УДК 621.762
DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-1-98-106

Порошковая металлургия в Беларуси и мировые тенденции развития

© 2019 г. **П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, В.В. Савич**

Президиум НАН Беларуси, г. Минск

Институт порошковой металлургии им. академика О.В. Романа, г. Минск, Респ. Беларусь

Статья поступила в редакцию 07.10.18 г., подписана в печать 24.10.18 г.

Проведен анализ тенденций и перспектив развития отрасли по материалам европейских и всемирных конгрессов порошковой металлургии, публикациям в ведущих специализированных зарубежных изданиях. Отмечены тенденции устойчивого роста в развитых странах мира производства порошковых конструкционных деталей для автомобилестроения, в том числе с использованием технологии сборки при совместном спекании. Непрерывно растет производство изделий методами MIM, причем в отдельную подотрасль выделилась технология micro MIM, позволяющая производить изделия массой от 0,1 г и менее. Второе дыхание получили методы HIP: ими стало возможным получать крупногабаритные заготовки из титановых и жаропрочных сплавов, коррозионно-стойких сталей массой до 1000 кг; применение технологии post HIPing все шире используется для повышения качества изделий, полученных аддитивными технологиями, и ответственных отливок. С помощью аддитивных технологий уже изготавливают изделия массой до 100 кг. Авторами также сформулировано и собственное субъективное мнение по поводу перспектив развития порошковой металлургии в Европе и в мире, определены направления развития отрасли в Беларуси, ее влияние на развитие мировой порошковой металлургии. В частности, разрабатываются новые марки экономно-легированных порошковых сталей, позволяющих снизить себестоимость массовых конструкционных деталей без ущерба их техническим характеристикам. С этой же целью оптимизируются процессы совмещенного с закалкой спекания, причем в отличие от зарубежных аналогов для охлаждения используется эндогаз, а не азот.

Ключевые слова: порошковая металлургия, спекание-закалка, спекание-пайка, аддитивные технологии, порошки, горячее изостатическое прессование.

Витязь П.А. – академик НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф., рук-ль аппарата Президиума НАН Беларуси (220072, Респ. Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 66). E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by.

Ильющенко А.Ф. – чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф., ген. директор ГНПО ПМ, директор Института порошковой металлургии им. акад. О.В. Романа (220005, Респ. Беларусь, г. Минск, ул. Платонова, 41). E-mail: alexil@mail.belpak.by.

Савич В.В. – канд. техн. наук, доцент, 1-й зам. директора (по науке) Института порошковой металлургии им. акад. О.В. Романа. E-mail: savich@pminstitute.by.

Для цитирования: *Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Савич В.В.* Порошковая металлургия в Беларуси и мировые тенденции развития. *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия*. 2019. No. 1. С. 98–106. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-1-98-106.

Vityaz P.A., Ilyuschenko A.F., Savich V.V.

Powder metallurgy in Belarus and global development trends

The analysis of trends and prospects for the development of the industry on the materials of European and world congresses of powder metallurgy, publications in leading specialized foreign publications was carried out. The steady growth of the production of powder construction parts for the automotive industry, including using assembly technology during joint sintering, are noted in the developed countries. The production using MIM methods is constantly growing; micro MIM technology has emerged as a separate sub-industry, which allows manufacturing products with a mass of 0,1 g or less. HIP methods found its second wind: with them it became possible to obtain large-sized blanks from corrosion-resistant steels weighing up to 1000 kg, titanium and high-temperature alloys; the post HIPing technology is widely used to improve the quality of products obtained by additive technologies and important castings. With additive technologies, products weighing up to 100 kg are already being manufactured. The authors also formulated their own opinion about the prospects for the development of powder metallurgy in Europe and in the world, determined the development directions of the industry in Belarus and its influence on the development of world powder metallurgy. In particular, new grades of economically alloyed powder steels are developed. They make it possible to reduce the cost of mass structural parts without prejudice to their technical characteristics. For the same

purpose, processes combined with hardening of sintering are optimized, and, in contrast to foreign analogues, endogas is used for cooling instead of nitrogen.

Keywords: powder metallurgy, sintering-hardening, sintering-soldering, additive technologies, powders, hot isostatic pressing.

Vityaz P.A. – academician of the National Academy of Sciences (NAS) of Belarus, Dr. Sci. (Tech.), prof., chief of staff of the Presidium of the NAS of Belarus (220072, Republic of Belarus, Minsk, Nezavisimosti pr., 66). E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by.

Ilyuschenko A.F. – corresponding member of the NAS of Belarus, Dr. Sci. (Tech.), prof., general director of the State Research and Production Association, director of the Institute of Powder Metallurgy n.a. acad. O.V. Roman (220005, Republic of Belarus, Minsk, Platonov str., 41). E-mail: alexil@mail.belpak.by.

Savich V.V. – Cand. Sci (Tech.), associate prof., first deputy director (for science) of the Institute of Powder Metallurgy n.a. acad. O.V. Roman. E-mail: savich@pminstitute.by.

Citation: *Vityaz P.A., Ilyuschenko A.F., Savich V.V.* Powder metallurgy in Belarus and global development trends. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2019. No. 1. P. 98–106 (In Russ.).
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-1-98-106.

Введение

Порошковая металлургия в Беларуси постоянно модернизируется, осваивает передовые зарубежные материалы (порошковые смеси), технологии и оборудование, в то же время не остается в стороне и от проведения оригинальных поисковых и прикладных научно-исследовательских и опытно-технологических работ (НИОТР), конечной целью которых является повышение эксплуатационных характеристик изделий, получаемых методами порошковой металлургии, снижение издержек производства.

Цель данной работы — оценка состояния производства мировой порошковой металлургии в традиционных направлениях и выявление новых перспективных направлений НИОТР, которые имеют потенциал освоения в производстве в обозримом будущем в мире и в Беларуси, а также оценка влияния порошковой металлургии Беларуси на развитие отрасли в мировом масштабе.

Порошковая металлургия в Европе, Азии и Америке

Порошковая металлургия в Западной Европе, Азии и Северной Америке ориентирована, в первую очередь, на производство деталей и заготовок для автомобилестроения, поэтому заметный рост производства автомобилей в последние 3 года неминуемо ведет к повышению спроса на продукцию порошковой металлургии в этих регионах — до 26 % в 2016 г. от мирового объема выпуска в натуральном выражении [1—4]. Вторым значимым потребителем порошковых изделий стала авиационная промышленность — на ее долю пришлось в том же году 12 %. Следует при этом отметить, что именно авиационная промышленность стала пионером и первопроходцем в применении аддитивных металлургических технологий для производства широкой гаммы изделий из порошков суперсплавов, титановых сплавов, уже используемых в различных агрегатах и узлах современных гражданских и военных самолетов. Военная промышленность также стала заметным потребителем порошковых изделий — 5 % в 2016 г. от мирового объема выпуска. Практически такой же объем продукции порошковой металлургии (4—6 %) потребляют: производство изделий медицинской техники (в первую очередь — имплантатов и инструментов); электроника (ферриты, системы охлаждения, детали разъемов, кронштейны); энергетика (корпуса задвижек, вкладыши и опоры генераторов и турбин, коллекторы, сильноточные контакты); химическая промышленность (носители катализаторов, коррозионно-стойкие элементы, фильтры); инструментальное производство (быстрорежущие и карбидостали, твердые сплавы).

На рис. 1 [5] представлены области эффективного использования различных технологий порошковой металлургии в зависимости от программы выпуска, габаритов и массы деталей.

Как видно из рис. 1, горячее изостатическое прессование (Hot Isostatic Pressing — HIP) и аддитивные металлургические технологии пока не выходят на массовое или даже крупносерийное производство, но зато позволяют получать детали массой до 100 кг (аддитивные технологии) и даже свыше 1 т (HIP). В то же время технология МИМ (микроМИМ) — подача пластифицированного

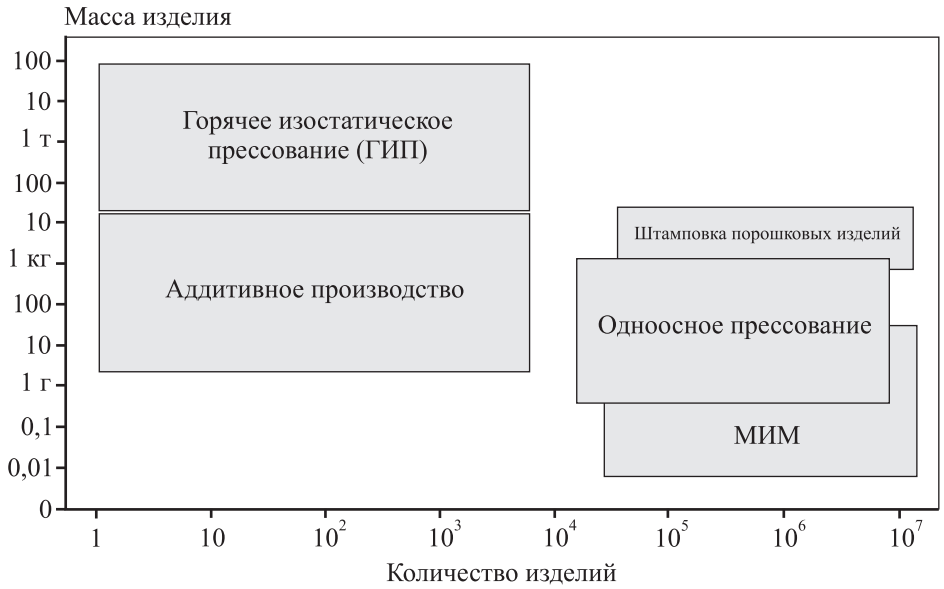

Рис. 1. Место различных технологий порошковой металлургии в зависимости от массы, размера и количества деталей [5]

порошка металла в форму под давлением методом впрыска (Metal Injection Molding — MIM) — позволяет изготавливать в массовом производстве точные и сложные детали массой от 0,01 г.

В работе [5] проведен анализ технологий получения заготовок из шихты на основе порошка железа и показано, что наивысшая прочность порошковых изделий достигается при комнатных температурах прессования и высокоэнергетических методах уплотнения шихты: динамическом прессовании, импульсном взрывном прессовании, прессовании при сверхвысоких давлениях. Чуть ниже прочность изделий, получаемых при горячей экструзии и горячей штамповке порошковых заготовок, еще ниже — после горячего статического и изостатического прессований, искрового импульсного спекания, а затем — спекания под давлением. Твердофазное диффузионное спекание прессовок, полученных традиционным одноосным прессованием, и заготовок, сформованных методом MIM или аддитивными технологиями, дает относительно низкую прочность, которую можно повысить объемной калибровкой (доуплотнением) и повторным спеканием либо дополнительной обработкой методом HIP. Есть и другой путь повышения механических характеристик порошковых изделий — их легирование. В этом направлении успешно развиваются компании «GKN Sinter Metal», «Hoeganaes», QMP [6—12]. Работы по экономному легированию порошковых смесей успешно ведутся и в Беларуси [13].

Новым важным моментом впервые в истории мировой порошковой металлургии стало увеличение доли Европы в мировом рынке в 2016 г. — до 38 %, что выше, чем в любом другом регионе — Северной Америке, Японии, Китае, Азиатско-Тихоокеанском регионе, и превращает Европу в наиболее значимый и весомый сектор отрасли в мировом масштабе. Неуклонно растет производство и продажа изделий, полученных методами MIM: за 2016—2020 гг. ожидается прирост в 11 %. При этом с 2012 г. в Европе падает производство твердых сплавов и изделий из них, не в последнюю очередь из-за конкуренции и поставки аналогичной продукции из Китая и Израиля.

Увеличение продаж оборудования для аддитивных технологий с использованием металлических порошков неминуемо ведет и к росту производства изделий из них данными технологиями — это связано и с тем, что Европа является безусловным лидером в этих технологиях, в первую очередь в аэрокосмической промышленности [14, 15]. Любопытен прогноз изменения за 10 лет (2015—2025 гг.) доли различных материалов в аддитивных технологиях, согласно которому потребление металлических порошков вырастет в 2 раза, а полимерных материалов разных типов — снизится. Согласно анализу Европейской ассоциации порошковой металлургии, производство продукции, полученной аддитивными технологиями из порошков металлов, за два года удвоилось: с ~500 т в 2015 г. до свыше 1000 т в 2017 г. При этом аэрокосмическая

промышленность остается первым и главным потребителем такой продукции. Растет производство этими методами и изделий медицинской техники (имплантатов и инструментов в первую очередь). Находят применение аддитивные технологии уже и в традиционной для порошковой металлургии отрасли — автомобилестроении, в первую очередь — в премиальном секторе [16]. Не последнюю роль в распространении аддитивных технологий играет внедрение новых методов — таких, как, например, Selective Laser Melting (SLM) и Electron Beam Melting (EBM), позволяющих сразу по завершении процесса формирования изделия и проведения релаксационного отжига иметь уровень свойств, достаточный для функционирования. Дополнительно повысить механическую прочность изделий, полученных не только методами SLM и EBM, но и Selective Laser Sintering (SLS), можно дополнительной обработкой методом HIP [17, 18], который все больше применяется и для обработки ответственных отливок. Следует отметить, что приоритет в дополнительной обработке методом HIP заготовок, полученных аддитивными технологиями, также принадлежит специалистам Беларуси [15]. Любопытна новая область применения HIP — получение биметаллических композиционных деталей, когда порошковый слой из коррозионно- или износостойкого порошка наносится этим методом на подложку из компактного металла. Такой технологией получают широкую гамму готовых биметаллических изделий и заготовок: крупногабаритные червячные зуборезные фрезы, шнеки экструдеров диаметром до 500 мм для полимерного производства, корпуса смесителей и реакторов химических производств, сопла инжекторов судовых дизелей.

Порошковая металлургия Беларуси

За почти 60-летнюю историю порошковой металлургии Беларуси были освоены практически все известные технологии, связанные с переработкой дисперсного металлического, керамического или композиционного исходного сырья, разработаны и оригинальные, среди которых — гидродинамическое прессование порошков, прямое импульсное прессование порошков в капсулах, пластическая деформация спеченных пористых заготовок выдавливанием, технологии получения капиллярно-пористых порошковых материалов и тепловых труб с порошковыми капиллярными структурами на их основе, получение спеченных фрикционных композиционных материалов методом свободной насыпки и напекания шихты с последующим уплотнением спеченного фрикционного слоя и выдавливанием маслоотводящих канавок, инфильтрация пористого железного каркаса с добавками твердых смазок расплавами медных сплавов и получение этим методом антифрикционных спеченных композиционных материалов для работы в условиях высоких скоростей скольжения и нагрузок и др. [19—21], а также разработан комплекс методов неразрушающего контроля спеченных порошковых материалов [22].

Исследования и разработки в области порошковой металлургии в 21-м веке ведутся в ГНПО и Институте порошковой металлургии им. акад. О.В. Романа (г. Минск), а также в ряде научных учреждений НАНБ и вузов; продукция, изготовленная методами порошковой металлургии, производится 11 предприятиями.

Основная номенклатура изделий порошковой металлургии, востребованных предприятиями Беларуси, включает:

— фрикционные изделия (диски и накладки муфт сцепления и тормозных механизмов автотракторной, дорожно-строительной и другой техники);

— антифрикционные детали (подшипники скольжения, втулки и вкладыши);

— конструкционные детали на основе железа (крышки, шестерни, героторные пары, корпуса, сложнопрофильные кольца и т.п.);

— электротехнические детали на основе меди (электроконтакты, заготовки коллекторов электрических машин постоянного тока, детали электроразъемов и т.п.);

— постоянные магниты на основе ферритов стронция и бария;

— магнитомягкие ферриты (сердечники РЭА);

— пористые порошковые материалы и изделия на их основе (фильтры для тонкой очистки и стерилизации жидкостей и газов, влагомаслоотделители, глушители шума выхлопа пневмопривода, огнепреградители газовых систем, диспергаторы газа в жидкости и т.п.);

— порошки для газотермического напыления, полученные методами СВС, используемые для нанесения термо-, коррозионно- и абразивостойких покрытий;

— изделия из технической керамики (высоко-

вольтные изоляторы, сопла горелок, устройств для струйно-абразивной обработки, тигли и т.п.).

В Институте порошковой металлургии им. акад. О.В. Романа создан кластер — Международный научный центр порошковых материалов и технологий, целью которого является обеспечение предприятий машиностроения и ГВПК конструкционными изделиями на основе карбидокремниевой керамики, тяжелых композиционных сплавов, других материалов; фрикционными дисками; сэндвич-панелями из ВПЯМ; теплоотводами на основе тепловых труб новых типов с порошковыми капиллярными структурами и др. Работы будут осуществляться в рамках реализации проектов ГПНИ, ГНТП, и хозяйственных договоров.

Основные направления научных исследований данного Центра следующие:

1. Порошковые материалы: композиционные специального назначения; модификаторы литейных сплавов; СВС-порошки для износостойких, коррозионно-стойких, теплозащитных покрытий и СВС пористые элементы; порошковые материалы, полученные распылением в вакууме инертным газом для аддитивных технологий; углерод-углеродные композиционные материалы; карбидокремниевые керамические композиционные материалы; тяжелые сплавы с высокой плотностью на основе системы вольфрам—никель—железо.

2. Аддитивные металлургические технологии производства изделий.

3. Антифрикционные материалы и изделия — полученные инфильтрацией, микролегированием.

4. Фрикционные материалы и изделия: новые материалы с функциональными компонентами (минеральными, отходами металлообработки); совершенствование конструкции фрикционных изделий для спецназначения.

5. Пористые материалы и изделия: высокопористые ячеистые материалы; пеноалюминий; пористые капиллярные структуры тепловых труб; пористые материалы для аэраторов, фильтров, сепараторов, имплантатов.

В Беларуси проводятся исследования и разработка методов активации диффузионных процессов в порошковых металлических материалах путем введения активных добавок различной природы для обеспечения энергосберегающих режимов их спекания. Полученные результаты позволят сократить расход электроэнергии на наиболее энергоемкой операции получения порошковых изделий — спекании.

Ведутся исследования по получению порошковых материалов с повышенной теплостойкостью и коррозионной стойкостью за счет воздействия на микро- и субструктуру материала введением нано- и ультрадисперсных добавок, когерентно связанных и не связанных с основой. Полученные результаты позволят расширить объем информации по материаловедению порошковых материалов как на металлической, так и керамической основе, создать принципы конструирования порошковых материалов с высоким комплексом механических свойств, разработать режимы получения изделий теплотехнического назначения.

Традиционно важное направление — это развитие научных и практических основ получения высокоплотных и высокопрочных порошковых конструкционных изделий из легированных сталей с использованием традиционных методов порошковой металлургии: прессование (в том числе теплое) металлических порошков и высокотемпературное активированное спекание прессовок, включающее упрочнение (закалку) изделий в процессе термической обработки. Необходимо исследование различных вариантов применения основных операций с целью повышения физико-механических и эксплуатационных свойств. Продолжится разработка опытных и промышленных технологий получения порошковых изделий для общего машиностроения, автотракторной и сельхозтехники. Запланировано проведение комплексных исследований, нацеленных на изучение влияния термовременных параметров и легирующих элементов на микроструктуру и физико-механические и эксплуатационные свойства стальных порошковых конструкционных сталей, а также на разработку технологических процессов изготовления высокоточных и высокопрочных порошковых деталей с заданными свойствами.

В развитии многочисленных способов повышения сопротивления росту усталостных трещин в порошковых сталях значительный интерес в настоящее время проявляется к стальным материалам с двухфазной ферритно-мартенситной структурой. Заготовки с подобной структурой сочетают повышенную прочность с высокой технологической пластичностью. Процентное соотношение фаз, а также морфология структурных составляющих порошковых низколегированных сталей с двухфазной ферритно-мартенситной структурой обуславливаются их назначением. Прочностные характеристики сталей определяются в основном

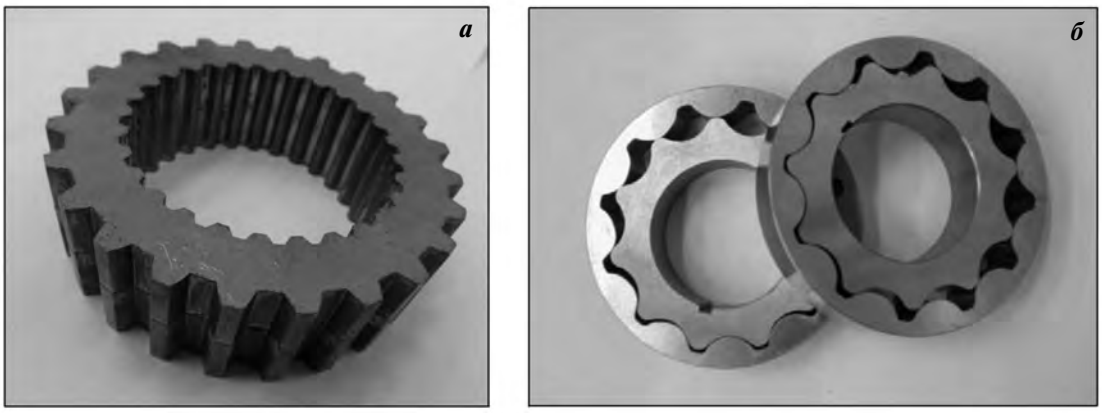

Рис. 2. Высокопрочные порошковые изделия сложной формы машиностроительного назначения
а – шлицевая втулка с переменной толщиной зуба; ***б*** – героторные пары

мартенситной фазой, а технологическая пластичность — ферритной.

Спекание с термообработкой порошковой среднеуглеродистой Cu—Ni—Mo-стали дает возможность получать мелкодисперсные смешанные ферритно-мартенситные структуры, обеспечивающие одновременное повышение не только прочности, но и пластичности, вязкости, а также сопротивления хрупкому и вязкому разрушению. Высокая технологическая пластичность порошковой низколегированной стали с двухфазной ферритно-мартенситной структурой дает возможность деформировать заготовки с большими степенями и позволяет изготавливать холодной объемной штамповкой высокоточные (6—7 степеней точности) детали сложной формы с повышенными значениями прочности и твердости при плотности 7,4—7,5 г/см.

По результатам проведенных исследований получены образцы материалов и отработана технология изготовления высокопрочных конструкционных порошковых деталей, в том числе экспериментальных образцов зубчатых колес 6—7 квалитета точности и твердостью 30—35 HRC из порошковых низколегированных Ni—Cu—Mo-сталей с двухфазной ферритно-мартенситной структурой с повышенными значениями прочности и твердости при плотности 7,4—7,5 г/см. Примером таких изделий являются, в частности, героторные пары (рис. 2, *б*).

В рамках договоров, выполняемых с Минским тракторным заводом и Бобруйским заводом тракторных деталей и агрегатов, осуществлено освоение производства всего ряда изделий из нового фрикционного материала ФМ-12 (рис. 3). Восстановлена и отработана технология по изготовлению фрикционных дисков для спецтехники ОАО «Мытищинский машиностроительный завод», с 2016 г. начата их серийная поставка на сборочный конвейер. Параллельно аналогичная продукция проходит испытания на Минском предприятии ГВПК РБ.

В рамках работ с ОАО «БелАЗ» (г. Жодино) планируется разработать спеченный фрикционный материал для узлов сухого трения с коэффициентом трения не менее 0,4 и организовать производство фрикционных тормозных колодок для большегрузных карьерных самосвалов БелАЗ.

Планируется разработать технологические процессы и организовать промышленное производство фрикционных дисков для эксплуатации

Рис. 3. Фрикционные диски, применяемые в тормозных узлах тракторов «Беларус»

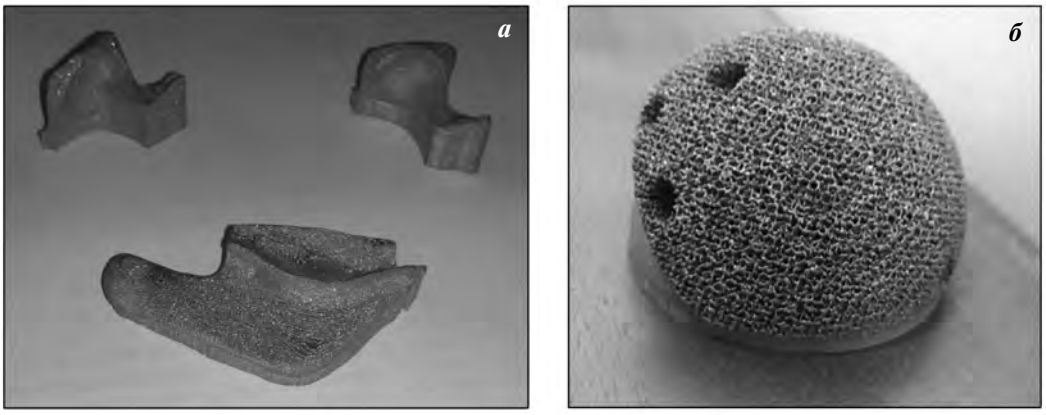

Рис. 4. Заготовки эндопротеза височно-нижнечелюстного сустава (***а***) и заготовки чашек эндопротезов тазобедренного сустава (***б***), полученные методом SLS из порошка марки Ti6Al4V в ГНПО ПМ

в условиях масляной среды для гидромеханических передач, тормозных механизмов и узлов сцепления современных карьерных машин и автотракторной техники с ресурсом работы до 16000 моточасов (БелАЗ, Минский тракторный завод, ОАО «Амкодор» (г. Минск), Минский завод колесных тягачей).

В области металлургических аддитивных технологий перед учеными и специалистами Беларуси стоят следующие задачи:

1. Разработка технологий изготовления композиционных порошков заданных химического и гранулометрического составов различными методами (распыление в вакууме, СВС, механическое легирование), технологий размола и классификации.

2. Изучение режимов спекания (припекания) порошковых материалов, управления конечными свойствами и геометрией изделия с учетом размерных изменений, происходящих на всех этапах технологии консолидации.

3. Исследование процессов последующих термической, термомеханической и термохимической обработок порошковых заготовок с целью придания им требуемых эксплуатационных характеристик.

На рис. 4 представлены образцы первых реальных изделий медицинской техники — имплантатов челюсти и чашки эндопротеза тазобедренного сустава, полученных методами SLS в ГНПО ПМ.

В ГНПО ПМ проводятся разработки новых перспективных порошковых материалов, соответствующие тенденциям общемирового материаловедения и обеспечивающие в обозримом будущем конкурентоспособность продукции отечественного машиностроительного комплекса. Ряд исследований направлены не только на обеспечение высоких эксплуатационных и иных характеристик создаваемых материалов, но и на экономное использование сырья, рециклинг, вовлечение в оборот отечественных сырьевых источников, в том числе отходов производства.

Технический уровень разрабатываемых материалов в основном соответствует аналогам стран СНГ, а по отдельным позициям — превосходит их, инициирует новые НИР и в странах Европы.

Заключение

В развитых странах мира наблюдается устойчивый рост производства порошковых конструкционных деталей для автомобилестроения, в том числе с использованием технологии сборки при совместном спекании. Растет непрерывно производство изделий методами MIM, причем в отдельную подотрасль выделилась технология micro MIM, позволяющая производить изделия массой от 0,1 г и менее. Продолжают развиваться методы HIP: с их помощью стало возможным получать крупногабаритные заготовки из титановых и жаропрочных сплавов, коррозионно-стойких сталей массой до 1000 кг; применение технологии post HIPing все шире используется для повышения качества изделий, полученных аддитивными технологиями, и ответственных отливок. Аддитивными технологиями уже получают изделия массой до 100 кг.

В мире и в Беларуси разрабатываются новые марки экономно-легированных порошковых сталей, позволяющих снизить себестоимость массо-

вых конструкционных деталей без ущерба для их технических характеристик. С этой же целью оптимизируются процессы совмещенного с закалкой спекания, причем в отличие от зарубежных аналогов используется для охлаждения эндогаз, а не азот. В Беларуси уже получены методами SLS первые образцы индивидуальных имплантатов для челюстно-лицевой хирургии и ортопедической стоматологии из порошков титановых сплавов, успешно использованные для лечения пациентов.

Литература/References

1. Euro PM 2017: Congress & Exhibition (1—5 Oct. 2017). Milan, Italy: ©EPMA, 2017.
2. *Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Савич В.В.* Порошковая металлургия и металлургические аддитивные технологии: По материалам европейского конгресса порошковой металлургии Euro PM 2017. *Порошк. металлургия*. 2017. No. 40. С. 5—14.
   Vityaz P.A., Ilyuschenko A.F., Savich V.V. Powder metallurgy and metallurgical additive technologies: According to the materials of the Eur. congr. of powder metallurgy Euro PM 2017. *Poroshkovaya metallurgiya*. 2017. No. 40. P. 5—14 (In Russ.).
3. World PM 2016: Current status and future outlook for the global PM industry reviewed in Hamburg. Powder Metall. Rev. 2016. Vol. 5. No. 4. P. 47—51.
4. *Whittaker David*. World PM 2016: Trends in automotive powertrains and their impact on the future of PM applications. *Powder Metall. Rev.* 2016. Vol. 5. No. 4. P. 35—45.
5. ASM Handbook. Vol. 7. Powder metallurgy. ASM International, 2015.
6. *Marucci M., Fillari G., King P., Narasimhan K.* A review of current sinter-hardening technology. In: *PM World Congress.* Vienna, Austria, 2004. P. 36—41.
7. *Sokolowski P., Lindsley B., Hanejko F.* Lean can mean sinter-hard and cost-effective. *Met. Powder Rep.* 2008. July/Aug. P. 40—48.
8. *Dobrzanski L.* Utilisation of sinter-hardrning treatment for various sintered steels. *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.* 2007. Vol. 24. No. 2. P. 187—190.
9. *Saccarola S.* Novel high performance, dimensionally controlled PM steels for sinter-hardening. *Powder Metall.* 2010. Vol. 53. No. 3. P. 184—187.
10. *Engsrom U.* High performance materials for sinter hardening applications. In: *Proc. PM 2010 World Congr.* Florence, Italy, 2010.
11. *Kalss G.* High performance sinterhardened PM steels. In: *Proc. PM 2010 World Congr.* Florence, Italy, 2010.
12. *Duhlstrom M.* High performance PM components heat treated by low pressure carburizing and gas quenching. In: *Proc. Euro PM 2013 Conf.* Sweden, 2013.
13. *Горохов В.М., Гучек В.Н., Тарусов И.Н.* Влияние способа введения легирующих элементов в железный порошок на механические свойства спеченных низколегированных сталей. *Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка*: Сб. докл. 10-го Междунар. симп. (Минск, 5—7 апр. 2017 г.). В 2 ч. Ч. 1. Минск: Беларус. навука, 2017. С. 68—76.
   Gorokhov V.M., Guchek V.N., Tarusov I.N. The influence of the method of introducing alloying elements into iron powder on the mechanical properties of sintered low-alloyed steels. In: *Powder metallurgy: surface engineering, new powder composite materials. Welding*: Reports of 10th Intern. symp. (Minsk, 5—7 April 2017). Minsk: Belarus. navuka, 2017. P. 68—76 (In Russ.).
14. Introduction to additive manufacturing technology. A guide for designers and engineers. URL: http://www.epma.com/additive-manufacturing.
15. *Ильющенко А.Ф., Савич В.В.* Порошковая металлургия — одна из первых аддитивных технологий. В сб.: *Аддитивные технологии, материалы и конструкции*: Матер. науч.-техн. конф. (Гродно, 5—6 окт. 2016 г.). Гродно: ГрГУ, 2016. С. 20—30.
   Ilyuschenko A.F., Savich V.V. Powder metallurgy is one of the first additive technologies. In: *Additive technologies, materials and constructions*: Mater. Sci.-Tech. Conf. (Grodno, 5—6 Oct. 2016). Grodno: GrSU, 2016. P. 20—30 (In Russ.).
16. Bugatti to trial additively manufactured titanium brake calipers. Metal AM. 2018. Vol. 25. January. URL: http://www.metal-am.com/bugatti-trial-additively-manufactured-titanium-brake-calipers/.
17. *Whittaker David*. Combining Metal AM and Hot Isostatic Pressing (HIP): Application and process innovations. *Met. Add. Manuf.* 2017. Vol. 3. No. 4. P. 83—91.
18. *Haan J., Asseln M., Zivcec M., Eschweiler J., Radermacher K., Broeckmann C.* Effect of subsequent hot isostatic pressing on mechanical properties of ASTM F75 alloy produced by selective laser melting. In: *Euro PM 2014.* AM: Characterisation and Post Treatment, 2014.

19. *Роман О.В.* Развитие порошковой металлургии за 40 лет. В сб.: *40 лет порошковой металлургии в Республике Беларусь*. Минск: Ковчег, 2000. С. 4—29.
Roman O.V. The development of powder metallurgy for 40 years. In: *40 years of powder metallurgy in the Republic of Belarus*. Minsk: Kovcheg, 2000. P. 4—29 (In Russ.).
20. *Горохов В.М., Дорошкевич Е.А., Звонарев Е.В.* Теоретические основы моделирования упруго-пластического поведения металлических порошков при прессовании в жесткой матрице. В сб.: *50 лет порошковой металлургии Беларуси. История, достижения, перспективы*. Минск: ГНПО ПМ, 2010. С. 151—170.
Gorokhov V.M., Doroshkevich E.A., Zvonarev E.V. Theoretical foundations of modeling the elastic-plastic behavior of metal powders when pressed in a rigid matrix. In: *50 years of powder metallurgy of Belarus. History, achievements, prospects*. Minsk, GNPO PM, 2010. P. 151—170 (In Russ.).
21. *Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Савич В.В.* Перспективы порошковой металлургии в Беларуси. В сб. науч. ст.: *Порошковая металлургия в Беларуси: вызовы времени*. Минск: Беларус. навука, 2017. С. 507—526.
Vityaz P.A., Ilyuschenko A.F., Savich V.V. Prospects of powder metallurgy in Belarus. In: *Powder metallurgy in Belarus: challenges of time*. Minsk: Belarus. navuka, 2017. P. 507—526 (In Russ.).
22. *Роман О.В., Скороход В.В., Фридман Г.В.* Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. Минск: Выш. шк., 1989.
Roman O.V., Skorokhod V.V., Fridman G.V. Ultrasonic and resistometric control in powder metallurgy. Minsk: Vysh. shkola, 1989 (In Russ.).