



НАУЧНЫЕ ИНСТИТУТЫ НАН БЕЛАРУСИ

УДК 621.762

А.Ф. ИЛЬЮЩЕНКО, чл.-кор. НАН Беларуси
ГНПО ПМ — Институт порошковой металлургии НАН Беларуси, г. Минск

СОВРЕМЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Приведены новые материалы и технологии порошковой металлургии, разработанные в ГНПО порошковой металлургии НАН Беларуси. Созданная наукоемкая продукция позволяет снизить расход материалов, уменьшить объем механической обработки и обеспечить повышение эффективности машиностроительной отрасли.

Ключевые слова: композиционные многокомпонентные материалы, конструкционные детали, износостойкие фрикционные материалы, керамические фильтрующие материалы, антифрикционные материалы

Порошковая металлургия — наиболее экономичный метод изготовления изделий. Отходы материалов здесь самые низкие по сравнению с традиционными технологиями (литьем, механической обработкой, холодной и горячей обработкой давлением) за счет получения изделий с размерами, близкими к окончательным и минимальным количеством операций. Методами порошковой металлургии производят материалы и изделия, которые либо невозможно получить традиционными металлургическими методами, либо их изготовление обходится дешевле, чем традиционным способом. В первом случае — это тугоплавкие материалы и твердые сплавы, композиционные многокомпонентные материалы триботехнического (подшипники скольжения, фрикционные диски и накладки), электротехнического (щетки электрических машин, эрозионно-стойкие контакты, магнитомягкие и магнитотвердые изделия) назначения, пористые материалы и изделия из них (фильтры, катализаторы, диспергаторы, глушители шума и т. п.). Изделия первой группы, как правило, имеют ресурс работы в 1,5—10 раз выше, чем аналогичные изделия из традиционных материалов, полученных традиционными технологиями. Во втором случае рассматриваются, в основном, конструкционные детали: (шестерни, храповики, диски, кольца и др.). При этом по сравнению с механической обработкой в условиях крупносерийного производства в 1,5...2,0 раза повышается коэффициент использования материала, снижается трудо-

емкость изготовления, обеспечивается возможность совмещения химико-термической упрочняющей обработки и спекания.

В ГНПО порошковой металлургии НАН Беларуси (далее — Объединение) особое внимание уделяется развитию в первую очередь тех направлений научно-исследовательских работ, которые могут быть использованы в качестве основы создания новых поколений белорусской автотракторной техники, станков, инструментов, принципиально новых узлов и агрегатов, позволяющих существенно повысить ресурсосбережение и эффективность использования машин отечественного производства.

Надежная работа современных машин и механизмов невозможна без применения тормозных и передаточных устройств, оснащенных износостой-

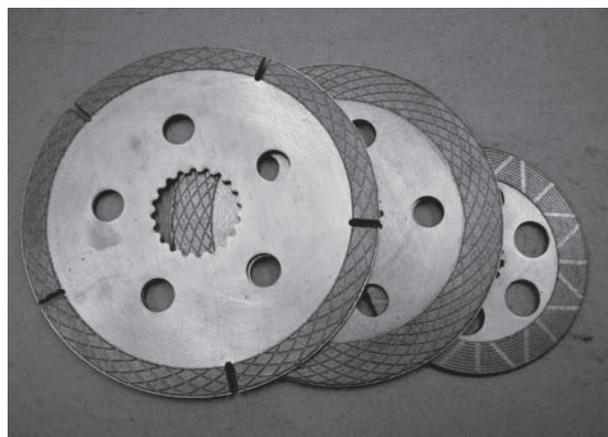


Рисунок 1 — Фрикционные диски

кими тормозными фрикционными материалами. Наиболее важной характеристикой фрикционных материалов является способность поглощения ими энергии движения, превращения ее в теплоту и рассеяние последней в воздухе, без катастрофического износа материала и разрушения узла трения. Для обеспечения длительной и стабильной работы фрикционные материалы должны обладать высокими значениями теплопроводности и коэффициента трения, конструктивной прочностью.

В Объединении разработаны новые поликомпонентные композиционные материалы с самоорганизующейся структурой на основе системы «металл — графит — керамика» для тяжелонагруженных фрикционных узлов автотракторной техники. Эти материалы имеют гетерофазную структуру, состоящую из двух или более фаз с резко различающимися свойствами, содержат как металлические, так и неметаллические составляющие и состоят из: матрицы (медной, железной, бронзовой); компонентов, выступающих в роли твердой смазки (графит, дисульфид молибдена, медь и т. д.); добавок, обеспечивающих высокий коэффициент трения (нитрид алюминия и титана, оксиды алюминия и кремния, карбид и т. д.); прочих компонентов, увеличивающих прочностные свойства матрицы (титан). Разработаны технологии изготовления спеченных фрикционных дисков восьми типоразмеров. На сегодняшний день, с использованием доработанной технологии «свободно насыпанного слоя» для материала «ШАДЕФ» на производстве Института порошковой металлургии организован промышленный выпуск фрикционных дисков (рисунок 1) которые успешно применяются в тормозных и передаточных узлах тракторов «Беларус» (86—1802035А, 320—3502040, 2522—1802035, 620—3502040, 2022—3502015, 1522—3502015, 142—3502015). Объем выпуска постоянно увеличивается. Так, если в 2009 году объем выпуска составил 96 тыс. шт., то в 2011 году он возрос до 135 486 шт. на сумму — 24,5 млрд руб.

Параллельно с расширением объема выпуска и областей применения фрикционных материалов на основе железа в Объединении активно ведутся работы в области совершенствования фрикцион-

ных материалов на основе меди. Несмотря на более высокую стоимость исходных порошков, они, благодаря хорошей технологичности в производстве и высоким триботехническим характеристикам готового изделия, продолжают оставаться наиболее востребованными на современном рынке. Институтом порошковой металлургии и Молодечненским заводом порошковой металлургии совместно со специалистами Минского тракторного завода, Белорусского автомобильного завода и Чебоксарского завода промышленных тракторов ведется работа по внедрению нового фрикционного материала (ФМ-12) на основе меди с повышенными фрикционными характеристиками [1, 2].

Материал ФМ-12 имеет следующие свойства:

- коэффициент трения в масле: 0,09—0,14;
- интенсивность изнашивания: 2—3 мкм/км;
- начальная скорость скольжения $V: \leq 50$ м/с;
- максимальная удельная нагрузка $P: \leq 4,0$ МПа;
- максимально допустимая удельная мощность трения: 2...5 Вт/мм².

На рисунке 2 представлены результаты сравнительных лабораторных испытаний образцов различных фрикционных материалов: МК-5, HS43 (Hoerbiger, Германия), ШАДЕФ и нового материала ФМ-12, проведенных на специализированном инерционном стенде.

Очевидно, что достигнутые фрикционные характеристики ФМ-12 не уступают характеристикам зарубежного аналога — интенсивность изнашивания на 25—30 % меньше при более высоком значении коэффициента трения (0,4—0,45). Материал ФМ-12 обладает наибольшим коэффициентом стабильности изменения момента сил трения в процессе торможения, что обеспечивает существенно более плавное срабатывание фрикционного узла в процессе включения без резких динамических ударов, что явилось основанием рекомендовать применения его в сухих сцеплениях тракторов семейства «Беларус» серии МТЗ-1221/1522/1822, тормозных узлах кормоуборочной и зерноуборочной техники, карьерных самосвалов БелАЗ, дорожно-строительной и иной техники (рисунок 3).

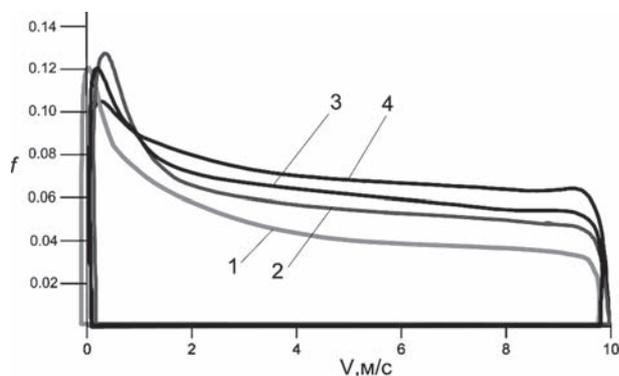


Рисунок 2 — Зависимость изменения коэффициента трения фрикционных материалов (f) в процессе торможения от скорости скольжения (V) для различных материалов:
1 — МК-5; 2 — H43 (Hoerbiger); 3 — ШАДЕФ; 4 — ФМ-12

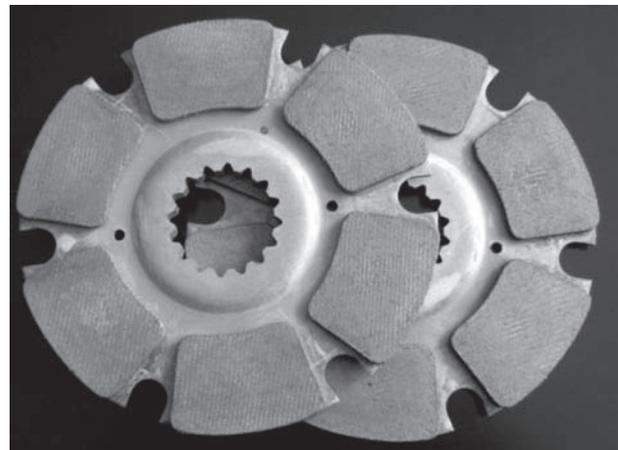


Рисунок 3 — Диски тормоза 3518020-48320 с фрикционными элементами из спеченного материала (ПО «Гомсельмаш»)

Кроме того, неоспоримым преимуществом разработанного материала является отсутствие в его составе не только асбеста, применение которого ограничено директивой Европейского Союза 1999/77/ЕС, но и такого канцерогенного вещества как свинец. Материал введен в технологическую документацию МТЗ. Опытные партии фрикционных дисков с фрикционным слоем из ФМ-12 уже применяются в масляных тормозах тракторов «Беларус» (см. рисунок 3).

Среди основных потенциальных потребителей тормозных дисков из ФМ-12 — отечественные предприятия (ПО «МТЗ», ПО «Гомсельмаш», ОАО «Амкодор», РУП «БЗТДиА» (г. Бобруйск); СП ОАО «Гомельский электротехнический завод» (фрикционная муфта стрелочного ж/д перевода); завод «Могилевтрансмаш» (филиал ОАО «МАЗ»); предприятия агро-сервиса, потребители в Российской Федерации (ФГУП «Уралвагонзавод» г. Нижний Тагил; ОАО «Промтрактор» г. Чебоксары; ОАО «Алтайский трактор» г. Барнаул и др.). Разработка защищена патентами Республики Беларусь.

В Объединении разработана технология получения керамических фильтрующих материалов с градиентной макро-, микро-, нанопористой

структурой для очистки жидкостей [3]. Путем управления характеристиками порошков (размер, морфология, химия поверхности, поверхностный потенциал), суспензий (состав, концентрация твердой фазы, вязкость), методами и режимами формирования структуры мембранного слоя получены керамические фильтрующие материалы для глубокой очистки жидкостей с повышенными эксплуатационными характеристиками. В качестве материала могут использоваться полидисперсные композиции на основе Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 с размером частиц 50...1000 нм. Пористость материала фильтра в зависимости от эксплуатационных требований может находиться в пределах 30—60 %, Диапазон размера пор — 0,4—100 мкм. Прочность на сжатие — 100—400. Структура и излом микропористой мембраны для фильтрации жидкостей показаны на рисунках 4, 5.

Разработаны фильтры-влагомаслоотделители для очистки сжатого воздуха от капель и паров воды, продуктов износа и коррозии трубопроводов, атмосферной пыли (рисунок 6). Уникальность разработки состоит в конструкции фильтра, в которой используется эффект охлаждения воздуха при адиабатическом расширении, что приводит к дополнительному выделению конденсата. Причем данный эффект обеспечивается за счет использования комбинации пористых порошковых проницаемых материалов с различными физическими свойствами (порошок бронзы ОФ 10-1 и медная стружка) и физико-химическими свойствами поверхности пор (угол смачивания 178° , повышенная коррозионная стойкость), обеспечива-

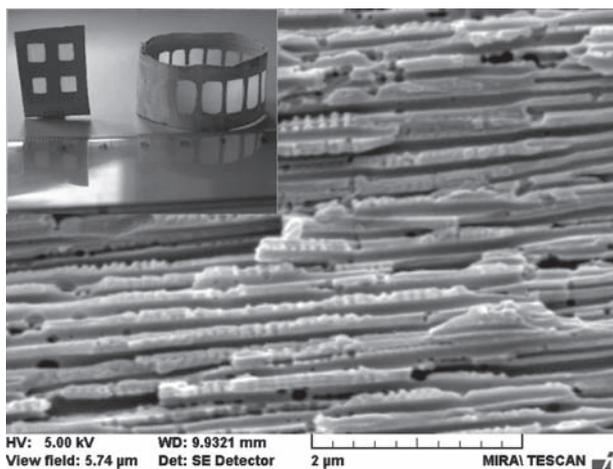


Рисунок 4 — Микроструктура (излом) и образцы плоских и трубчатых мембранных элементов на основе пористого анодного оксида алюминия

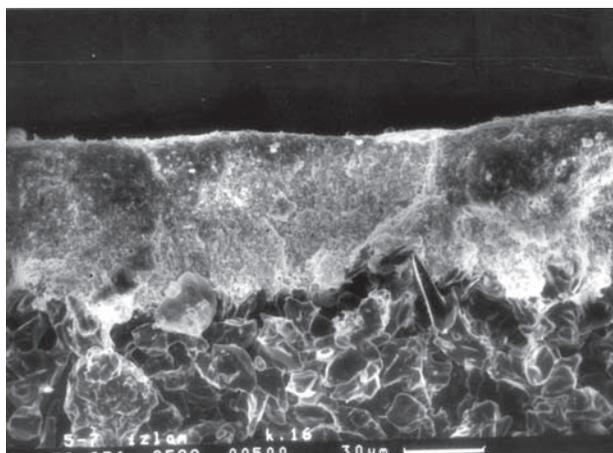


Рисунок 5 — Структура микропористой мембраны для фильтрации жидкостей



Рисунок 6 — Фильтр-влагомаслоотделитель для пневмосистем. Производительность: 60; 120; 300; 1200 м³/ч. Точка росы не выше $-5^\circ C$

ющими степень очистки 98,7 %. Фильтр характеризуется: производительность, м³/ч: 60; 120; 300; 600; 1200; 1500; 2000; 2500; степень очистки воздуха по ГОСТ 17433-80 ÷ не ниже 3 класса; область применения: пневматические сети производственных зданий и сооружений, локальные пневмосистемы станочного, прессового, окрасочного и другого технологического оборудования. Разработка защищена патентами Республики Беларусь.

В Объединении проводятся работы по повышению эксплуатационных свойств обрабатываемого инструмента. Использование композиций с наноструктурированными покрытиями на режущих зернах абразивного и рабочих поверхностях лезвийного инструмента обеспечивает повышение эффективности обработки различных материалов [4, 5, 6]. На рисунке 7 показана структурная модель абразивного материала и поверхность алмазных зерен с керамическим покрытием ZrO_2 и SiO_2 .

Покрытие абразивных зерен слоем SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2 , $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ позволяет снизить скорость их износа в 4—5 раз и изготовить инструменты повышенной стойкости. Оптимальная толщина покрытий на абразивных зернах, не превышает 100 нм. В противном случае наблюдается катастрофическое развитие магистральных трещин, а характер разрушения меняется от интер- до межкристаллитного (рисунок 8).

На рисунке 9 приведена морфология поверхности алмазных зерен с керамическим и металлическим покрытиями.

Разработана технология упрочнения лезвийного инструмента, которая повышает вязкость разрушения покрытия рабочего слоя инструмента в 1,7—2 раза, значительно улучшаются триботехнические характеристики, повышаются твердость инструмента в 1,2 раза и стойкость в 2,5—3 раза.

Упрочнение рабочего слоя по глубине достигается за счет образования композиционного материала в виде матричного материала, армированного высокотвердыми наноразмерными частицами, а также по поверхности — за счет образования наноразмерного слоя высокой прочности.

В Объединении разработан класс гетерогенных порошковых пористых и высокоплотных материалов со структурой псевдосплава на основе железа и меди для различных условий работы.

Пористые антифрикционные материалы на основе железа и меди (рисунок 10) предназначены для работы в режиме самосмазывания и ограниченной подачи смазки при давлении до 25 МПа, скорости скольжения до 50 м/с, в диапазоне температур от -60 °С до $+250$ °С для узлов трения в приборостроении, автомобилестроении, сельскохозяйственной технике, тормозной системе железнодорожного подвижного состава, текстильном оборудовании, электродвигателях и аппаратах бытовой техники, погружных скваженных насосах, военной технике.

Технические характеристики		
—	Материалы на основе железа	Материалы на основе меди
Пористость, %	15—25	10—15
Твердость НВ	70—120	40—80
Ударная вязкость, кДж/м ²	25—60	2—15
Коэффициент трения	0,01—0,1	0,03—0,1

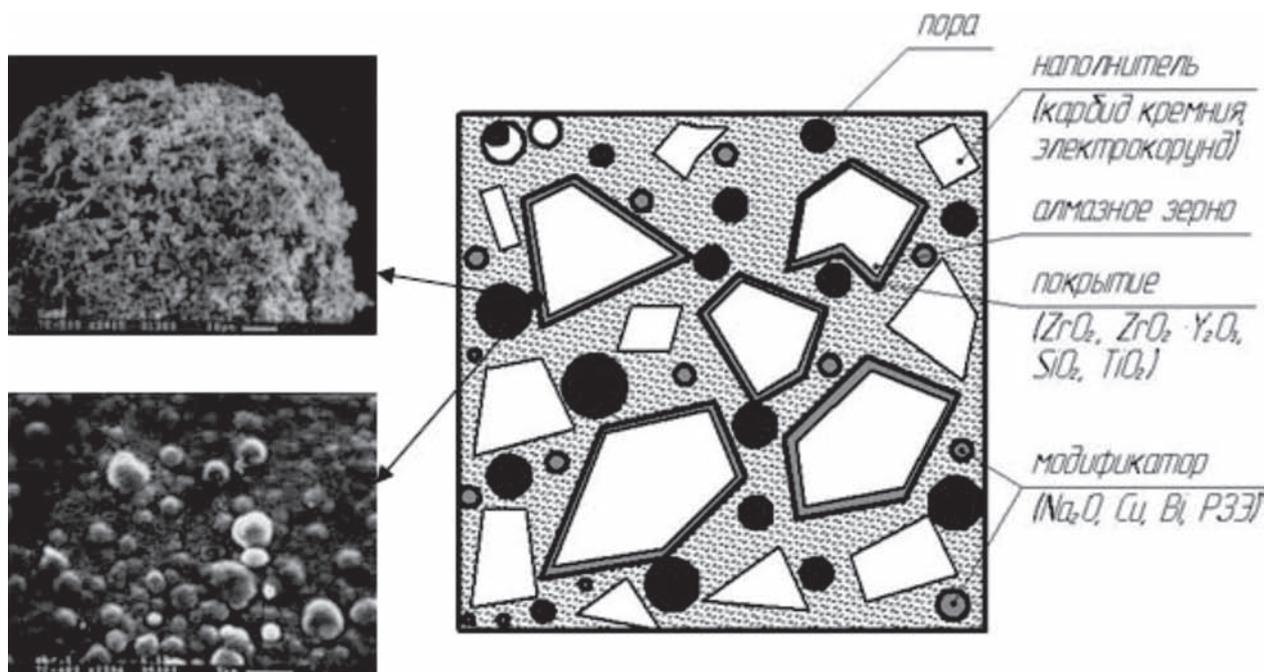


Рисунок 7 — Структурная модель АКМ с модифицирующими и активирующими наноконпонентами и пористой матрицей

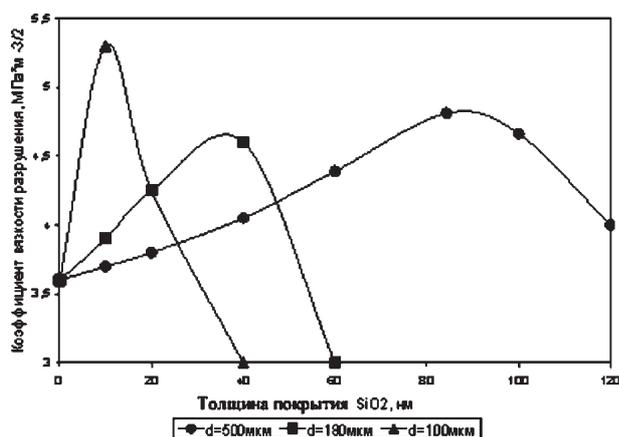


Рисунок 8 — Зависимость коэффициента вязкости разрушения АКМ от толщины покрытия SiO₂ на абразивных зернах различной зернистости (относительная ошибка < 10,5 %)

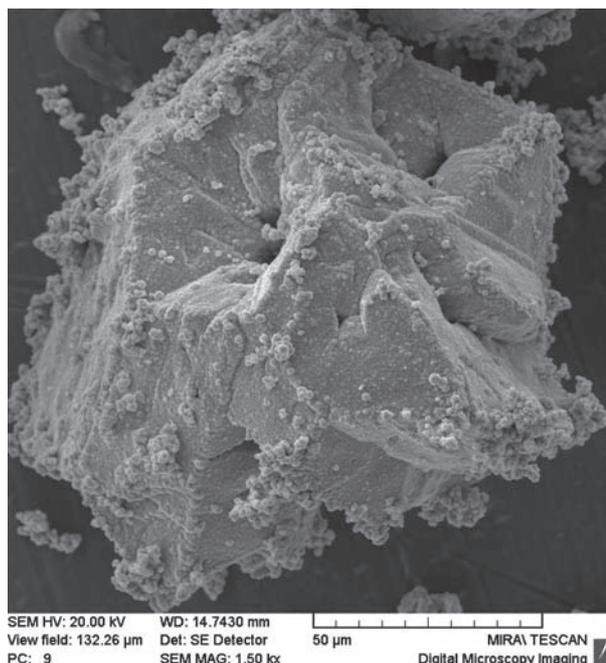
Высокоплотные антифрикционные материалы получены инфильтрацией медным сплавом различного состава каркасов из порошковых углеродистых и легированных сталей и предназначены для изделий, работающих в условиях механических и тепловых воздействий [7]. Например, втулки шкворня автомобилей МАЗ, направляющие гидравлических насосов (рисунок 11).

Технические характеристики	
Твердость НВ	120—380
Пористость, %	3—5
Теплопроводность, Вт/м	45—55
Коэффициент термического расширения, 1/м	12,2—12,8 · 10 ⁻⁶
Коэффициент трения	0,007—0,01

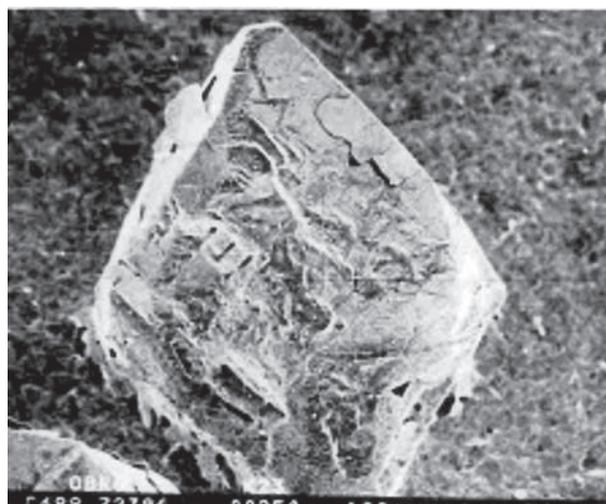
В Объединении разработана технология получения заготовок сборочных единиц аксиально-поршневых насосов, состоящих из стальных корпусов с отверстиями, в которых впрессованы пористые заготовки из порошка железа с добавками. Втулки при спекании в проходной печи инфильтрируются расплавом медного сплава. При этом одновременно осуществляется пайка втулок со стальным корпусом. Таким же методом наносят порошковый антифрикционный слой на торцовую распределительную поверхность стальных корпусов насосов (рисунок 12). Цилиндры затем растачиваются в чистовой размер, а торцовая поверхность обрабатывается по сфере, обеспечивая длительное герметичное прилегание «сопрягаемой детали — распределителя».

В Объединении разработаны научные принципы получения конструктивно сложных изделий автотракторной и сельхозтехники из порошковых легированных сталей с применением теплого прессования и методов активирования процесса спекания.

Особенностью **процесса теплового прессования** является использование пластификаторов, легко



a



b

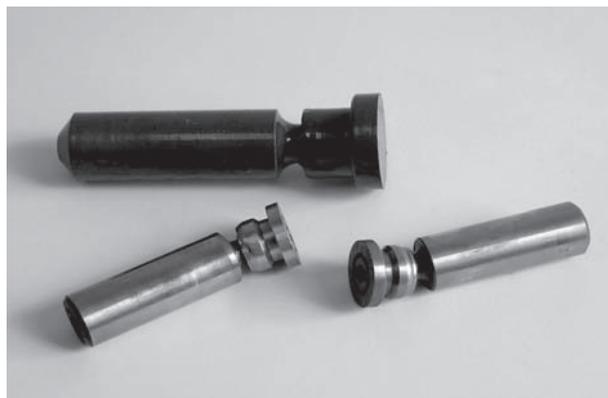
Рисунок 9 — Морфология поверхности алмазных зерен: a — с покрытием металлическим; b — с покрытием керамическим



Рисунок 10 — Пористые антифрикционные материалы на основе железа и меди



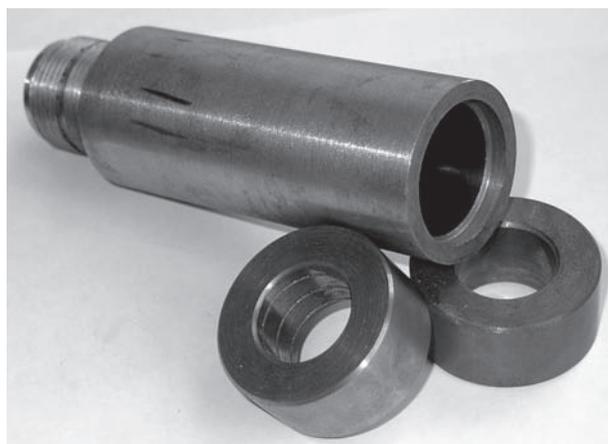
а



б



в



г

Рисунок 11 — Детали из высокоплотных антифрикционных материалов:
а — втулки шкворня автомобилей МАЗ; б — направляющая; в — шаровая опора; г — подпятник

удаляемых либо растворяемых в металле в процессе спекания деталей, которые одновременно служат жидкой смазкой, уменьшающей трение между частицами порошка друг с другом и со стенками пресс-формы. Данный процесс позволяет выровнять плотность образцов сложной формы по объему. Использование процесса теплового прессования

позволяет достичь на стадии формирования изделий из легированных порошков значений плотности спеченных образцов $7,4...7,6 \text{ г/см}^3$ и сырой прочности прессовок, в 2 раза превышающей прочность прессовок, полученных по традиционной технологии (однократное прессование порошка при комнатных температурах и спекание обеспечивает плотность $7,0...7,2 \text{ г/см}^3$).

Применение процесса теплового прессования позволяет исключить операции повторного прессования деталей после спекания или другие еще более энергоемкие процессы, такие как холодная или горячая штамповка. В свою очередь это приводит к снижению трудоемкости изготовления порошковой продукции и повышению рентабельности производства.

ПО «МТЗ» планирует 50 % от всего количества выпускаемых тракторов «Беларус» оснастить коробками передач с устройством синхронизации для выравнивания скоростей вращения валов при переключении коробки на другой режим работы. В настоящее время комплекты узла синхронизации приобретаются по импорту. В комплект узла синхронизации входит ряд деталей: кольцо блокировочное, кольцо конусное, ступица-каретка, муфта (рисунок 13).

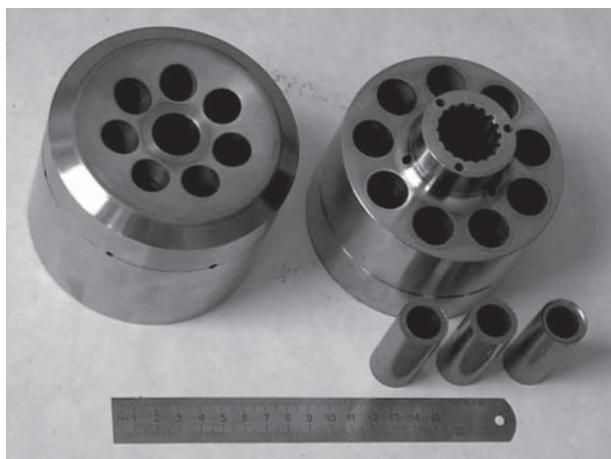


Рисунок 12 — Детали насосов с нанесенным покрытием (торцовая распределительная и поверхности цилиндров) блока аксиально-поршневых насосов и гидромоторов серии «А»

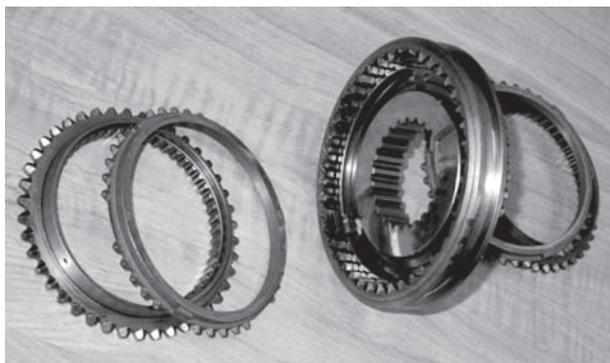


Рисунок 13 — Детали синхронизатора

В Институте порошковой металлургии НАН Беларуси разработана технология производства двух деталей узла синхронизации коробки перемены передач трактора «Беларус»: «кольцо блокировочное» и «кольцо коническое». Производство остальных деталей, сборку узла в целом планируется организовать на ПО «МТЗ».

В Объединении разработана порошковая низколегированная сталь и технология изготовления из нее размерного ряда деталей типа «втулка шлицевая» с переменной толщиной зуба для коробки передач трактора «Беларус». Деталь «втулка 75-1701352» относится к высоконагруженным деталям ответственного назначения, испытывающим в процессе эксплуатации значительные знакопеременные нагрузки. Поэтому работоспособность шлицевых втулок, передающих крутящий момент от двигателя к исполнительным механизмам, связана с получением заготовки детали высокой плотности и прочности, которые реализуются при плотности выше $7,5 \text{ г/см}^3$, исключая образование дефектов на рабочей поверхности на всех этапах технологического процесса.

В основе технологии лежит способ изготовления изделий из порошковых среднелегированных сталей деформированием спеченных заготовок после их термовременной обработки (ТВО) в температурной области аномальной диффузионной подвижности атомов железа, ограниченной точкой $A_{c1} \alpha \rightarrow \gamma$ — превращение. Уменьшение сопротивления пластической деформации и увеличение пластичности заготовок после ТВО вследствие вовлечения в процесс деформирования дополнительного механизма (проскальзывания по межчастичным контактам) коренным образом изменяет макроструктуру поверхностного слоя. Это изменение сводится к уменьшению концентрации и размеров поверхностных пор по сравнению с холодным деформированием спеченных заготовок.

В качестве исходного материала была выбрана порошковая частично легированная сталь ПКН4Д2М-30 с 0,4 % С. Давление прессования составляло 750 МПа, спекание выполняли в среде эндогаза с добавкой метана при температуре 1130 °С. Установлено, что при общей пористости

9 %, поверхностная пористость составляет 12—15 %. Не наблюдается заметного изменения пористости в поверхностном слое и после холодной штамповки спеченных заготовок давлением 1,5 ГПа: средняя пористость составляет 5,5 %, поверхностная — 8—10 %.

На основании исследований предложена следующая технологическая схема изготовления деталей «втулка 75-1701352»: приготовление шихты, прессование, спекание, термовременная обработка, калибровка, ХТО, механическая обработка.

Установлено, что концентрация поверхностных пор на образцах с использованием ТВО составляет 0,8—1,0 % (рисунок 14).

Для упрочнения рабочих поверхностных слоев образцов деталей рекомендуется проводить нитроцементацию. Технологические режимы химико-термической обработки выбраны так, чтобы обеспечить общую толщину упрочненных слоев после нитроцементации 0,4—0,6 мм. Твердость рабочих поверхностей порошковых легированных сталей после нитроцементации составляла 59—62 HRC. Микроструктура диффузионного слоя порошковой гомогенно легированной стали ПК20Н2М, предлагаемой для изготовления деталей «втулка 75-1701352», представляет собой мелкоигольчатый мартенсит, остаточный аустенит и небольшое количество карбонитридов. Структура сердцевины — малоуглеродистый мартенсит или бескарбидный бейнит. На рисунке 15 представлены втулки 75-1701352, изготовленные методом порошковой металлургии.

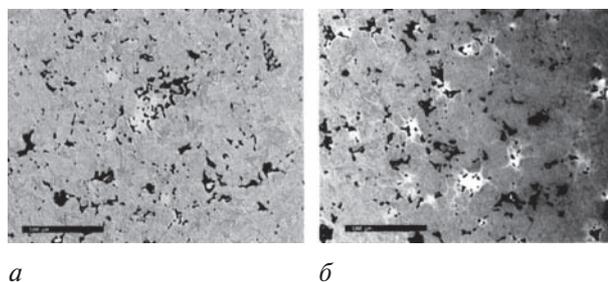


Рисунок 14 — Прессование, спекание, ТВО, калибровка (плотность $7,63 \text{ г/см}^3$): а — центр; б — край

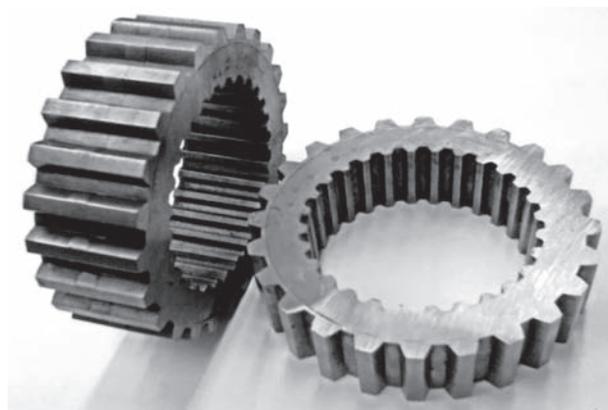


Рисунок 15 — Втулки 75-1701352, изготовленные методом порошковой металлургии

Таблица — Результаты испытаний опытной партии деталей «втулка 75-1701352»

Технические показатели	Фактические значения	Значения по ТЗ (чертежу)
Твердость, HRC	55—57*	57—63
Внешний венец	Ø 84,02—84,08	Ø 84,3—0,35
	Ø 76,73—76,78	Ø 77,3
Колесание длины общей нормали -W ₅ , мкм	35,69—35,71	35,814 ^{-0,135} _{-0,235}
Толщина замка	0,12	0,2 ^{+0,15} _{-0,05}

*При вторичной закалке в масле с температуры 790—800 °С твердость возрастает до 59—62 HRC

Данные и результаты испытаний опытной партии деталей «втулка 75-1701352» представлены в таблице.

Заключение. Разработанные в ИПМ НАН Беларуси новые материалы и технологии порошковой металлургии могут обеспечить существенное повышение эффективности машиностроительной отрасли, повысить экспортный потенциал Республики Беларусь. Организованное в ГНУ ИПМ и на Молодечненском заводе порошковой металлургии производство партий наукоемкой продукции порошковой металлургии продемонстрировало высокую экономическую эффективность за счет вовлечения в оборот вторичных ресурсов, снижения расхода материалов, в том числе цветных и других дорогостоящих металлов, а также за счет уменьшения объема или полного отказа от операций механической обработки.

Список литературы

1. Оценка влияния количества металлокерамических фрикционных дисков на эффективность торможения погрузчика «Амкодор» / А.Ф. Ильющенко [и др.] // Материалы. Технологии. Инструменты. — 2012. — Т. 17. — № 1. — С. 19—21.
2. Универсальный стенд для испытаний фрикционных дисков и его применение для сравнительных испытаний фрикционных дисков / А.Ф. Ильющенко [и др.] // Актуальные задачи машиностроения, деталей машин и триботехники: тр. Междунар. науч.-техн. конф., 27—28 апр. 2010 г. / Балт. гос. техн. ун-т. — Спб., 2010. — С. 259—262.
3. Ильющенко, А.Ф. Демпфирующие свойства высокопористых материалов на основе титана / А.Ф. Ильющенко, О.Л. Сморгыо, А.И. Марукович // Пористые пролиааемые материалы: технологии и изделия на их основе: материалы докл. IV Междунар. симпоз., 27—28 окт. 2011 г., г. Минск. — Мн.: Ин-т порошковой металлургии, 2011. — С. 76—79.
4. Витязь, П.А. Инструмент из сверхтвердых материалов для металлообработки на машиностроительных мероприятиях Республики Беларусь / П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, Е.В. Звонарев // Металлообработка: оборудование — инструмент — качество: материалы междунар. науч.-техн. конф., 8—9 апр. 2009г., г. Минск. — Минск, Бизнесофсет, 2009. — С. 10—13.
5. Сверхтвердые материалы для металлообработки в Республике Беларусь / А.Ф. Ильющенко [и др.] // Машиностроение-2010: Технологии — оборудование — инструмент — качество: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 7—8 апр. 2010 г., г. Минск. — Минск, Бизнесофсет, 2010. — С. 9—11.
6. Производство в Республике Беларусь синтетических порошков алмаза и инструмента на их основе / П.А. Витязь // Материалы докл. V Междунар. науч.-техн. конф. «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия», 18—19 сент., 2002 г., г. Минск. — Минск, 2002. — С. 104—105.
7. Ильющенко, А.Ф. Высокоплотные порошковые стали и технологии изготовления из них конструкционных деталей сложной формы / А.Ф. Ильющенко, П.А. Киреев, Е.С. Севастьянов // 50 порошковой металлургии Беларуси. История, достижения, перспективы / под ред. А.Ф. Ильющенко. — Минск, 2010. — Гл. 11. — С. 218—230.

Ilyuschenko A.F.

Current developments in powder metallurgy for mechanical engineering

In the article presents new materials and technology of powder metallurgy which were designed in State Research and Production Powder Metallurgy Association of the National Academy of Sciences of Belarus. This high-tech products can reduce the material consumption, reduce the amount of machining and provides a more efficient mechanical engineering industry.

Поступила в редакцию 17.08.2012.