

Лузан С.А.,
Сидашенко А.И.,
Лузан А.С.
Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени
Петра Василенка
E-mail: khadi.luzan@gmail.com

**СВС-ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИЯХ
УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН НАПЛАВКОЙ И
ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМИ СПОСОБАМИ
НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ (ОБЗОР)**

УДК 631.3.004.8:339.13

Выполнен обзор научно-технической литературы по СВС-процессам, который свидетельствует о перспективности его применения для технологий упрочнения и восстановления деталей наплавкой и газотермическими методами напыления. Одним из новых направлений является использование предварительной механоактивации порошковых компонентов для обеспечения высокотемпературного синтеза новых композиционных порошковых материалов.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, композиционный порошок, карбид, оксид, металлокерамика.

Введение

Практика эксплуатации машин и оборудования подтверждает, что наиболее распространенной причиной их выхода из строя в 80 случаях из 100 является не поломка, а износ и повреждение рабочих поверхностей [1-5]. Материальные потери в машиностроении развитых государств вследствие трения и изнашивания составляют 4-5% национального дохода. Согласно данным [2] сопротивление трению поглощает во всем мире 30-40% вырабатываемой в течение года энергии. Повышение и обеспечение надежности средств транспорта является одной из важнейших предпосылок их эффективного использования. Определяющее качество, которое характеризует надежность средств транспорта, долговечность определяется сроком службы и ресурсом. В то же время, например, за период эксплуатации расход металла на запчасти тракторного двигателя составляют 50-100% его массы, шасси трактора – 100%. Затраты средств на техническое обслуживание и ремонт тракторов, автомобилей за весь срок службы в 3-6 раз превышает стоимость их изготовления. Например, средняя наработка на отказ трактора Т-150 в 2 раза, а срок службы в 2-3 раза меньше, чем у зарубежных аналогов [3].

Развитие конструкций машин происходит при постоянном стремлении к увеличению их производительности, что почти всегда сопровождается повышением механической и тепловой напряженности подвижных сопряжений деталей [1]. При этом ставятся задачи достижения высокой надежности и долговечности машины, снижения ее массы, сокращения расхода дефицитных материалов. Известно, что повышение долговечности машины даже в небольшой степени ведет к значительной экономии металла, уменьшению затрат на производство запасных деталей; сокращается число и объем ремонтов, а следовательно, увеличивается количество фактически работающих машин [1].

В связи с этим создание новых композиционных материалов, обеспечивающих повышение долговечности и надежности различных деталей машин и механизмов в условиях интенсивного износа, воздействия высоких напряжений, температур, агрессивных сред – важная народнохозяйственная задача, при этом учет факторов энерго- и ресурсосбережения является определяющим.

Одним из наиболее эффективных путей решения этой проблемы является применение технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). В

настоящее время данная технология получила развитие в передовых зарубежных странах: США, Японии, Польши, Китая, Беларусь, РФ и др.

История открытия и развития СВС-процессов.

В 1967 году группа ученых (Мержанов А.Г., Боровинская И.П. и Шкиро В.М.) Научного Центра Академии наук СССР в г. Черноголовка, Московской области, исследуя экспериментальные модели горения конденсированных систем, открыла новое явление, получившее название «твердого пламени» (официальное название «Явление волновой локализации автотормозящихся твердофазных реакций») [6]. Твердое пламя, которое было для того времени достаточно необычным явлением, представляет собой процесс, в котором исходные реагенты, промежуточные и конечные продукты остаются в твердом состоянии в течение всего процесса превращения. Твердое пламя позволило получать ценные тугоплавкие материалы. Это обстоятельство привело к созданию нового высокоэффективного метода их производства - самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Исследования СВС-процессов открыли новые горизонты познания и практических применений.

Можно выделить следующие основные этапы развития СВС-технологий: 1967-1972 г.г. первичные исследования, изучающие механизмы процессов, проводились небольшой группой ученых, работающих в отделе Макроскопической кинетики Отделения Института химической физики АН СССР;

1972-1980 г.г. инициативные исследовательские работы. Возникновение творческих групп в Томске, Ереване, Киеве и других городах СССР. Проведение в Отделении ИХФ АН СССР первых технологических работ по получению порошков, компактных материалов и изделий, нанесению покрытий, соединению деталей. Первая промышленная реализация СВС-технологии на Кироваканском заводе высокотемпературных нагревателей;

1980-1992 г.г. в соответствии Постановлению Совета Министров СССР об ускорении внедрения СВС-технологий в народное хозяйство страны, был создан Межотраслевой научно-технический комплекс «Термосинтез» и Институт макрокинетики РАН в качестве головной организации. На 15 предприятиях страны созданы опытно-промышленные участки. Организовано проведение исследований по технической и экономической эффективности.

С 1980 г. начинаются работы по СВС за рубежом: США, Японии, Польши, Китая и ряда других стран, так по данным ИСМАН-ИНФОРМ, в настоящее время работы по СВС ведутся в 47 странах, в том числе и Украине. В США – это создание энергетически стимулированных СВС-процессов с использованием джоулевого и СВЧ-нагрева, постановка и решение ряда задач математического моделирования процессов со сложным физико-химическим механизмом; в Японии – создание функционально-градиентных СВС-материалов, выращивание монокристаллов из тугоплавких бескислородных СВС-продуктов, центробежная технология производства труб большого диаметра, газостатическое уплотнение СВС-продуктов; в Польше – разработка пластичной СВС-керамики. В Китае на 10 предприятиях с применением СВС-технологий производят трубы с износостойкими покрытиями для транспортировки абразивных сред в горнодобывающей и цементной промышленности, а в Испании запущено первое в мире автоматизированное производство керамических СВС-порошков [7].

С 1992 г. в связи с распадом системы МНТК "Термосинтез" централизованного руководства работами не стало. Организации стали работать в условиях рыночных отношений по специальным заказам, контрактам, грантам, по инициативе ИСМАН регулярно

проводятся Международные симпозиумы «Самораспространяющийся высокотемпературный синтез», издается Международный журнал с таким же названием (Allerton Press, N-Y, USA). В настоящее время на территории бывшего СССР наиболее активно действуют: Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения (ИСМАН), РАН, г. Черноголовка, Россия, Отдел Структурной Макрокинетики, Томский научный центр, Сибирское Отделение РАН, г. Томск, Россия, Инженерный центр СВС, г. Самара, Россия, Институт проблем материаловедения, г. Киев, Украина, Институт порошковой металлургии, г. Минск, Беларусь, Институт проблем горения, г. Алма-Ата, Казахстан, Институт химической физики в Армении и Институт металлургии в Грузии [8].

Технологии и материалы, применяемые для СВС-процессов.

Метод СВС позволяет синтезировать материалы требуемого химического, фазового составов и их свойств. Кроме этого метод позволяет осуществлять прямой синтез изделий с заданными размерами и формой. Для решения этих задач разработано более 30 технологических разновидностей СВС, которые объединены в шесть основных технологических типов – ТТ [9].

ТТ-1 (химический синтез). Процесс проводится в герметичных СВС-реакторах, в атмосфере воздуха или инертного или реакционного (азота, водорода, кислорода) газа. Продукты имеют вид спеков, которые могут использоваться в качестве полуфабрикатов или перерабатываться в порошки для порошковой металлургии и газотермических способов нанесения покрытий.

ТТ-2 (СВС-спекание). При этом типе технологии из реакционной шихты предварительно изготавливают изделие заданной формы и СВС-процесс проводят так, чтобы сохранить эту форму и размеры. Две разновидности процесса получили применение: синтез нитридной керамики при высоких газовых давлениях и синтез карбидных, боридных, силицидных и интерметаллических материалов в вакууме с предварительной термической обработкой шихты.

ТТ-3 (силовое СВС-компактирование). Процесс СВС проводят в специальной пресс-форме, и горячий продукт горения уплотняют до беспористого состояния. Варианты различаются способами механического воздействия. Создана серия новых марок твердых сплавов группы синтетических твердых инструментальных материалов с различным сочетанием твердости и прочности.

ТТ-4 (СВС-литье). В этом технологическом типе используют высококалорийную шихту (алюмотермические смеси), в результате горения которой достигаются температуры выше температуры плавления продуктов. Продукт образуется в виде расплава, к которому применяют известные металлургические операции: литье в форму, центробежное литье, кристаллизацию слитков, наплавку и др. Литые однородные и неоднородные СВС-материалы находят широкое применение в виде литых порошков, деталей с твердосплавными наплавками, а также металло- и минералокерамических труб. Наиболее распространенные керметные фазы – карбиды, бориды и силициды Cr, W, Mo и Nb; керамические – оксид алюминия. Технология позволяет осуществлять литье тугоплавких материалов при температурах 3300-3800 К.

ТТ-5 (СВС-сварка). Сварка СВС применяется для соединения деталей из тугоплавких материалов: ниобий, вольфрам, молибден, тантал, графит и композитов на их основе между собой и с другими (более легкоплавкими) сплавами. Реакционная смесь располагается в зазоре между соединяемыми деталями, инициирование реакции происходит за счет пропуска электрического тока через свариваемые детали.

ТТ-6 (газотранспортная СВС-технология). Используется: при получении тонких

(5-100 мкм) осажденных покрытий. Обрабатываемые детали и газотранспортный агент (йод) вводятся в шихту, получаемую по способам ТТ-1. В результате газотранспортного процесса, после прохождения волны горения, деталь покрывается тонким слоем конечного продукта. Отработаны некоторые процессы нанесения покрытий из хрома или боксидов хрома на стальные детали, из нитрида титана – на твердые сплавы.

Все шесть технологических типов СВС-технологий построены по единому принципу. Обобщенная система СВС-технологий представлена на рис. 1 [9].



Рис. 1 – Обобщенная схема СВС-технологий

На основе анализа обобщенной схемы можно сделать вывод: главная особенность заключается в том, что основная стадия проводится в режиме СВС. Технологии СВС различаются видами исходного сырья, структурой шихты, типами химических реакций и процессов, внешними воздействиями, морфологией продуктов и способами их обработки или переработки, назначением конечной продукции.

Необходимо отметить, что СВС не только новая технология применения известных материалов, но и возможность создания новых типов материалов. Как пример можно отметить положительные результаты экспериментов по получению сложных оксидных нанопорошков, нитевидных кристаллов бескислородной керамики, анизотропной оксидной керамики, функционально-градиентных материалов, бескислородных монокристаллов и др. [10, 11].

Технология СВС является эффективным энерго- и ресурсосберегающим методом получения композиционных порошков [12]. Метод основан на использовании экзотермического эффекта реакций взаимодействия металлов с углеродом, кремнием, бором, азотом и др. Сущность процесса заключается в том, что после локального инициирования реакция протекает в узкой зоне – волне горения, которая перемещается по изделию за счет теплопередачи. В качестве реагентов применяются смеси следующих элементов: металлов с неметаллами, металлов с металлами, неметаллов с неметаллами или их соединений, выделяющих при взаимодействии большое количество тепла.

Общую схему процесса можно представить в следующем виде [13]:



где X(i) – реагент в твердом состоянии;

Y(i) – реагент в твердом, жидком или газообразном состоянии;

Z(k) – продукт синтеза (карбиды, бориды, силициды, нитриды, интерметаллиды и др.) в конденсированной фазе.

СВС-процесс позволяет синтезировать композиции, получение которых другими известными способами требует больших затрат, сложного и дорогостоящего оборудования или вообще невозможно [14]. Кроме того СВС позволяет получить многокомпонентные продукты в одну стадию даже в системах материалов, значительно отличающихся по свойствам.

В Институте порошковой металлургии, г. Минск более 25 лет ведутся интенсивные исследования и разработка технологических процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза композиционных порошков. Результаты исследований и созданные термодинамические и физические модели позволили разработать технологии получения широкого спектра композиционных СВС-порошков типа «металлическая связка – тугоплавкое соединение», в том числе не имеющих аналогов в мире. В качестве связок используются металлы, металлические сплавы на основе железа, никеля, алюминия и интерметаллиды - Ni_xAl_y , Fe_xAl_y , Ti_xNi_y , Ti_xAl_y . В качестве тугоплавких соединений используют карбиды титана, хрома, кремния и их комбинации, а также оксиды алюминия, титана и хрома.

Основные этапы типовой технологической схемы процесса получения СВС-порошков: подготовка порошковой шихты, синтез, размол и рассев по фракциям. При необходимости применяют механическую активацию реакционной смеси в атриторе. Данная операция позволяет произвести взаимозмельчение исходных порошков и сформировать композиционные частицы с равномерным распределением исходных реагентов по объему, а также снижает теплотери при синтезе, повышает активность системы и гомогенность продукта горения. Синтез в системах с низким теплосодержанием осуществляют с применением предварительного подогрева в печи.

Наиболее популярными являются композиции на основе карбида титана. Это связано с высоким экзотермическим эффектом реакции образования карбида титана из элементов (2), обеспечивающим широкий выбор материала связки [15]:



В результате выделяющегося тепла температура твердых и расплавленных продуктов реакции достигает 2500-3500 К, поэтому реакция не зависит от внешних источников нагрева и может распространяться как волна горения, сама производящая энергию для своего распространения. Несмотря на высокую температуру, переход любого из компонентов смеси в газовую фазу незначителен, и им можно пренебречь.

Синтез композиционных порошков на основе карбидов хрома из элементов из-за низкого экзотермического эффекта производится с применением предварительного подогрева шихты до температуры 723-873 К.

СВС-технология позволяет синтезировать композиции на основе сложных карбидов в одну стадию для металлов IV и VI групп периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева, обладающих более высокими физико-механическими характеристиками по сравнению с образующими их карбидами [16, 17]. Типичным представителем таких материалов являются композиционные порошки системы Cr_3C_2 -TiC/NiCr. Другой подход к повышению свойств композиционных металлокерамических композиционных порошков на основе карбидов – разработка материала связки. Положительные

результаты были получены при создании композиционных порошков на основе карбида титана со сложными легированными связками, которые вводятся в шихту в виде готовых порошков-сплавов, либо формируются в процессе СВС в результате плавления и химического взаимодействия простых реагентов.

Перспективным направлением является разработка антифрикционных композиционных порошковых материалов, содержащих в своем составе твердые смазки, такие как графит, дисилицид молибдена и фторид кальция. Порошки получают методом СВС путем введения в реакционную шихту порошков твердых смазок, например: $TiC/NiCr/MoS_2$, $TiC/NiCr/CaF_2$, $TiC/FeCr$ /графит, $TiC/FeCrMo$ /графит и $Cr_2O_3/TiO_2/CaF_2$, которые обеспечивают высокую работоспособность покрытий в условиях сухого трения или трения с граничной смазкой, а также в при высоких температурах [18].

Еще одним классом перспективных материалов являются композиционные порошки типа «интерметаллид-оксид» на основе алюминидов никеля, железа и титана, обеспечивающие значительное уменьшение массы за счет невысокой плотности алюминидов по сравнению с традиционно используемыми сплавами при сохранении высоких механических и коррозионных свойств композиций [13]. Эти композиции могут быть получены двумя способами: 1 – синтезом интерметаллических соединений из элементов в присутствии дисперсных частиц оксидов и 2 – формированием необходимых композиций с использованием алюминотермических реакций. Оба способа имеют ограничения, обусловленные невысоким по 1-му способу или наоборот, слишком высоким по 2-му способу теплосодержанием реакционных систем. Использование предварительной механической активации позволяет активировать процесс синтеза в низкоэкзотермических системах и формировать однородную тонкозернистую структуру композиций с равномерным распределением оксидных частиц в объеме материала. Протекание механохимических реакций в ограниченных объемах на этапе механоактивации позволяет снизить теплосодержание реакционных смесей и получать ультрадисперсные композиты и даже наноконпозиционные порошки в системах с алюминотермическими реакциями [19]. Такой подход был реализован в системах $Fe-Al-Fe_2O_3$ и $Fe-Al-Cr_2O_3$ [20]. Были получены наноконпозиционные порошки на основе моноалюминида железа $FeAl/Al_2O_3$ и $FeAl(Cr)/Al_2O_3$, полностью наследующие структурную морфологию прекурсоров.

Разработанные композиционные порошки применяются для напыления износостойких и коррозионностойких покрытий плазменным, детонационным и высокоскоростным газоплазменным способами [13]. По сравнению с традиционно применяемыми для газотермического напыления механическими смесями и конгломерированными порошками синтезированные порошки обеспечивают сохранение фазового состава композиции в процессе напыления, равномерное распределение твердой фазы в объеме покрытия, увеличение коэффициента использования материала на 10-30%, а также более высокую износостойкость покрытий. Особенно перспективными представляются композиты Cr_3C_2/Me , TiC/Me и $Cr_3C_2/TiC/Me$, из которых получают высококачественные износостойкие покрытия, не уступающие износостойким покрытиям из композитов на основе карбида вольфрама [21].

Благодаря своим особенностям, метод СВС позволяет получать порошки на основе интерметаллических сплавов с уникальной структурой и свойствами. Общее химическое уравнение синтеза интерметаллидов методов СВС можно записать следующим образом:



Поскольку экзотермический эффект образования интерметаллидов из элементов

недостаточно высок для обеспечения формирования порошков интерметаллидов применяется предварительный подогрев. Благодаря малой плотности и высоким удельным механическим свойствам наиболее перспективны порошки на основе алюминидов никеля, железа и титана [13].

Высокие свойства газотермических покрытий из разработанных СВС-порошков поставили задачу промышленного освоения разработанных технологий. Так, например, в Институте порошковой металлургии впервые была разработана безреакторная технология процесса синтеза композиционных порошков в режиме горения в среде воздуха, обеспечивающая возможность синтеза композиций типа «карбид-металл», «интерметаллид-оксид» и др. в условиях любого термического участка предприятия. В настоящее время на базе Института порошковой металлургии создано опытно-промышленное производство композиционных порошков мощностью 10 т/год с возможностью выпуска порошков для напыления узкого гранулометрического состава. Основные потребители СВС-порошков являются следующие фирмы: Metalspray (США), Union Technology (США), РАФАКО (Польша).

СВС-процессы в газотермических способах напыления и наплавки покрытий.

Одним из новых направлений в получении защитных покрытий является применение предварительно механоактивированных композиционных материалов в процессах высокотемпературного синтеза, а также применение композитов, содержащих в объеме матрицы наноразмерные синтезированные включения, в процессах детонационного напыления [22]. Объединение СВС, детонационного напыления и механохимии в единую интегральную технологию имеет определенные перспективы в плане развития нанотехнологий. Результаты исследований В.И. Яковлева позволили установить, что для большинства технологических параметров (гранулометрический состав порошка 40-63 мкм., толщина покрытия за один выстрел 10-20 мкм., расходы газов горючей смеси - стехиометическое соотношение, дистанция напыления 50-100 мм., и т.п.) имеется узкий диапазон, при которых формируются покрытия с достаточно высокими прочностными свойствами.

Разработана двухступенчатая технология, сочетающая процессы механической активации порошковых смесей и СВС, предназначенных для изготовления и восстановления деталей сельскохозяйственной техники, подверженных интенсивному изнашиванию [23]. Созданы многокарбидные СВС-механокомпозиты, представляющие собой новые композиционные материалы со структурой типа «упрочняющая фаза – матрица». Применение составов типа «TiC + (Ni-Cr)», «TiC + SiC + (Ni-Cr)», «TiC + WC + (Ni-Cr)», «TiC + SiC + WC + (Ni-Cr)» позволяет с помощью порошкового электрода формировать износостойкое покрытие на деталях сельскохозяйственного машиностроения [24].

Разработаны композиционные СВС-материалы системы P6M5+TiC и NiCr-сталь + TiC, предназначенные для упрочнения деталей методами электродуговой наплавки и детонационного напыления, применяются для повышения ресурса стрелчатых лап культиваторов и сеялок [25]. В работе [26] сделан вывод о перспективности интегрирования СВС-процессов с газотермическими способами напыления покрытий.

Предприятия Межотраслевой научно-производственный центр «Элисон ЛТД», г. Ивано-Франковск информирует о разработке электродов СВС-класса, позволяющих наплавлять защитное покрытие с твердостью 63-70 HRC, износостойкость которого в 1,2 – 1,5 раза выше износостойкости твердых сплавов типа ВК в абразивной среде [27].

Необходимо отметить основной недостаток СВС-технологии, который состоит в

том, что она не универсальна. Не каждую реакцию можно провести в режиме СВС, поскольку для этого она должна выделять достаточное количество тепла. Это накладывает ограничения на выбор материалов для синтеза.

В настоящее время в области СВС ведутся перспективные работы по синтезу нанопорошков и наноматериалов, созданию композиционных материалов типа полимер-керамика, синтезу сверхтвердых материалов. В части методов наплавки – задача создания электродов на основе СВС-продукта неполного превращения. Дореагирование электрода в процессе наплавки с выделением тепла повышает температуру наплавки и обеспечивает снижение энергоемкости процесса [7].

Выводы

Выполненный обзор научно-технической литературы свидетельствует о перспективности работ в области СВС-процессов применительно к методам газопламенного напыления и наплавки.

Одно из принципиально новых направлений в получении защитных износостойких покрытий - использование предварительной механоактивации порошковых компонентов для обеспечения высокотемпературного синтеза новых композиционных порошковых материалов, а также их применение для дуговой наплавки и газотермического напыления деталей машин.

Литература

1. Гаркунов Д. Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин): [учебник] / Гаркунов Д. Н. – М. : МСХА, 2002. - 632 с.
2. Хебды М., Теоретические основы. Справочник по триботехнике в трех томах / М. Хебды, А. В. Чичинадзе – М. : Машиностроение, 1989. – Т. 1. – 400 с.
3. Кухтов В. Г. Долговечность деталей шасси колёсных тракторов / Кухтов В. Г. – Харьков : ХНАДУ, 2004. – 292 с.
4. Чичинадзе А. В. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Чичинадзе А. В. – М. : Центр «Наука и техника», 1995. – 284 с.
5. Чичинадзе А. В. Не стоит платить за незнание / А. В. Чичинадзе // Инженерная газета. – 1994. - № 28.
6. Явление волновой локализации автотормозящихся твердофазных реакций / Мержанов А.Г., Боровинская И.П., Шкиро В.М. (СССР); диплом № 287. Приор. от 05.07.67, Бюл. 1084, № 32; Вестн. АН СССР, 1984, № 10.
7. Коцепция развития СВС как области научно-технического прогресса. Черноголовка: «Территория», 2003. – 368 с.
8. https://ru.wikipedia.org/wiki/Самораспространяющийся_высокотемпературный_синтез.
9. Мержанов А.Г. Твердопламенное горение / А.Г. Мержанов, А.С. Мукасян. – М. : ТОРУС ПРЕСС, 2007. – 336 с.
10. Merzhanov A.G. SHS technology / A.G. Merzhanov // Adv. Mater. – 1992. – Vol. 4. – No. 4. – P. 294-295.
11. Merzhanov A.G. Advanced SHS ceramics: Today and tomorrow morning / A.G. Merzhanov // Ceramics: Toward the 21st century. Symposium on Ceram. Proceedings. Commemorating the Centennial of the Ceram. Soc. of Japan / Eds. N. Soda, A. Kato. 16-18 October, 1991. Yokohama, Japan. Tokyo: Ceram Soc. Jap. Publ., 1991. – P. 378-403.
12. Физическая химия. Современные проблемы. Ежегодник / Под ред. акад.

- Я.М. Колотыркина. – М. : Химия, 1983. – 224 с.
13. 50 лет порошковой металлургии Беларуси. История, достижения, перспективы / ред. кол.: А.Ф. Ильющенко, Е.Е. Петюшик, В.В. Савич. – Минск, 2010. – 632 с.
 14. Левашов А.Е. Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / А.Е. Левашов, А.С. Рогачев, В.И. Юхвид и др. - М. : Издательство БИНОМ, 1999. – 176 с.
 15. Рогачев А.С. Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетическую / А.С. Рогачев, А.С. Мукасян. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 400 с.
 16. Комратов Г.Н. Кинетика окисления на воздухе порошков карбида титана и двойного карбида титана и хрома / Г.Н. Комратов // Порошковая металлургия. - 1993. - № 6. – С. 51-54.
 17. Амосов А.П. Разработка комплексно легированных композиционных материалов на основе карбида титана для режущего инструмента / А.П. Амосов, А.Ф. Федоров // Изв. ВУЗов. Сер. Черная металлургия. – 1996. - № 11. – С. 62-65.
 18. Pyuschenko A. Investigation of composite powders with hard lubricant components for thermal spraying of coatings / A. Pyuschenko, A. Shevtsov, T. Azarova and other // Proc. ITSC, Essen, Germany, March 4-6, 2002, DVS-Verl. Essen. – P. 1029-1032.
 19. Ляхов Н.З. Влияние механоактивации на процессы фазо- и структурообразования при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе / Н.З. Ляхов, Т.Л. Талако, Т.Ф. Григорьева. – Новосибирск: Параллель, 2008. – 168 с.
 20. Витязь П.А. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез нанокоспозиционных порошков интерметаллид/оксид / П.А. Витязь, Н.З. Ляхов, Т.Л. Талако и др. // Доклады Национальной Академии наук Беларуси, 2006. – Т. 50. - № 3. – С. 106-110.
 21. Уляницкий В.Ю. Моделирование процесса детационного напыления металло-керамических СВС-порошков / Ю.В. Уляницкий, С.Б. Злобин, П.А. Витязь и др. // Республиканский межведомственный сборник научных трудов «Порошковая металлургия». – Минск: 2004. – Вып. 27. – С. 116-122.
 22. Евстигнеев В.В. Получение и исследование наноструктурных детонационных покрытий на деталях машиностроения с использованием механокомпозитов типа TiB_2-Cu / В.В. Евстигнеев, В.И. Яковлев, С.И. Гибельгауз и др. // Ползуновский вестник. – 2007. - № 4. – С. 155-161.
 23. Собачкин А.В. Морфология покрытий из многокомпонентных, предварительно механоактивированных порошков СВС-композитов / А.В. Собачкин, И.В. Назаров, В.И. Яковлев // Обработка металлов. – 2012. - № 3(56). – С. 141-144.
 24. Собачкин А. В. Применение метода механостимулированного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для создания многокомпонентных композиционных наплавочных материалов [Текст] / А.В. Собачкин, В.И. Яковлев, А.А. Ситников // Инновации в машиностроении : труды 4-ой Международной научно-практической конференции / под ред. Х.М. Рахмянова. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 287–291.
 25. Ситников А.А. Новые порошковые материалы из СВС-композитов для электродуговой наплавки износостойких покрытий / А.А. Ситников, В.И. Яковлев, М.Е. Татаркин // Инновации в машиностроении: Материалы 1-й международной научно-практической конференции. – Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2010. – С. 191-193.
 26. Кухтов В.Г. О возможностях применения СВС-процессов совместно с газотермическим напылением / В.Г. Кухтов, С.А. Лузан, И.В. Сидоренко // Вісник ХНТУСГ. -

Вип. 44. - Т. 2. - Механізація сільськогосподарського виробництва. - Харків, 2006. – С. 42-46.

27. Пилипченко О.В. Наплавлення матеріалами СВС-класу / О.В. Пилипченко // Метали, технології та обладнання. – 2009. - № 24. – С. 15-16.

Summary

Luzan S., Sidashenko A., Luzan A. SHS-processes in the technologies of hardening and recovery of machine parts by welding and thermal spray methods of deposition of coatings (review)

A review of the scientific literature on SHS-processes, which indicates the prospects of its application for technologies of hardening and recovery of parts by welding and thermal spray methods of deposition. One of the new trends is the use of preliminary mechanical activation of powder components to ensure high-temperature synthesis of composite powder materials. Key words: self-propagating high-temperature synthesis, composite powder, carbide, oxide, and cermet.

References

1. Garkunov D. N. Tribotekhnika (konstruirovaniye, izgotovleniye i jekspluatatsiya mashin): [uchebnik] / Garkunov D. N. – M. : MSHA, 2002. - 632 s.
2. Hebdy M., Teoreticheskie osnovy. Spravochnik po tribotekhnike v trekh tomah / M. Hebdy, A. V. Chichinadze – M. : Mashinostroeniye, 1989. – T. 1. – 400 s.
3. Kuhtov V. G. Dolgovechnost' detalej shassi koljosnykh traktorov / Kuhtov V. G. – Har'kov : HNADU, 2004. – 292 s.
4. Chichinadze A. V. Osnovy tribologii (treniye, iznos, smazka) / Chichinadze A. V. – M. : Centr «Nauka i tekhnika», 1995. – 284 s.
5. Chichinadze A. V. Ne stoit platit' za neznanie / A. V. Chichinadze // Inzhenernaya gazeta. – 1994. - № 28.
6. Javlenie volnovoy lokalizatsii avtotormozjashhihsya tverdofaznykh reaktsij / Merzhanov A.G., Borovinskaja I.P., Shkiro V.M. (SSSR); diplom № 287. Prior. ot 05.07.67, Bjul. 1084, № 32; Vestn. AN SSSR, 1984, № 10.
7. Kocetsiya razvitiya SVS kak oblasti nauchno-tehnicheskogo progressa. Chernogolovka: «Territoriya», 2003. – 368 s.
8. https://ru.wikipedia.org/wiki/Samorasprostranjajushhijsja_vysokotemperaturnyj_sintez.
9. Merzhanov A.G. Tverdoplamennoe gorenije / A.G. Merzhanov, A.S. Mukas'jan. – M. : TORUS PRESS, 2007. – 336 s.
10. Merzhanov A.G. SHS technology / A.G. Merzhanov // Adv. Mater. – 1992. – Vol. 4. – No. 4. – P. 294-295.
11. Merzhanov A.G. Advanced SHS ceramics: Today and tomorrow morning / A.G. Merzhanov // Ceramics: Toward the 21st century. Symposium on Ceram. Proceedings. Commemorating the Centennial of the Ceram. Soc. of Japan / Eds. N. Soda, A. Kato. 16-18 October, 1991. Yokohama, Japan. Tokyo: Ceram Soc. Jap. Publ., 1991. – P. 378-403.
12. Fizicheskaja himija. Sovremennye problemy. Ezhegodnik / Pod red. akad. Ja.M. Kolotyorkina. – M. : Himija, 1983. – 224 s.
13. 50 let poroshkovej metallurgii Belarusi. Istorija, dostizhenija, perspektivy / red. kol.: A.F.

- Il'jushhenko, E.E. Petjushik, V.V. Savich. – Minsk, 2010. – 632 s.
14. Levashov A.E. Fiziko-himicheskie i tehnologicheskie osnovy samorasprostranjajushhegosja vysokotemperaturnogo sinteza / A.E. Levashov, A.S. Rogachev, V.I. Juhvid i dr. - M. : Izdatel'stvo BINOM, 1999. – 176 s.
 15. Rogachev A.S. Gorenje dlja sinteza materialov: vvvedenie v strukturnuju mak-rokinetiku / A.S. Rogachev, A.S. Mukas'jan. – M.: FIZMATLIT, 2013. – 400 s.
 16. Komratov G.N. Kinetika okislenija na vozduhe poroshkov karbida titana i dvojnogo karbida titana i hroma / G.N. Komratov // Poroshkovaja metallurgija. - 1993. - № 6. – S. 51-54.
 17. Amosov A.P. Razrabotka kompleksno legirovannyh kompozicionnyh materialov na osnove karbida titana dlja rezhushhego instrumenta / A.P. Amosov, A.F. Fedorov // Izv. VUZov. Ser. Chernaja metallurgija. – 1996. - № 11. – S. 62-65.
 18. Ilyuschenko A. Investigation of composite powders with hard lubricant components for thermal spraying of coatings / A. Ilyuschenko, A. Shevtsov, T. Azarova and other // Proc. ITSC, Essen, Germany, March 4-6, 2002, DVS-Verl. Essen. – P. 1029-1032.
 19. Ljahov N.Z. Vlijanie mehanoaktivacii na processy fazo- i strukturoobrazovanija pri samorasprostranjajushhegosja vysokotemperaturnom sinteze / N.Z. Ljahov, T.L. Talako, T.F. Grigor'eva. – Novosibirsk: Parallel', 2008. – 168 s.
 20. Vitjaz' P.A. Samorasprostranjajushhegosja vysokotemperaturnyj sintez nano-kompozicionnyh poroshkov intermetallid/oksid / P.A. Vitjaz', N.Z. Ljahov, T.L. Talako i dr. // Doklady Nacional'noj Akademii nauk Belarusi, 2006. – T. 50. - № 3. – S. 106-110.
 21. Ul'janickij V.Ju. Modelirovanie processa detacionnogo napylenija metallo-keramicheskikh SVS-poroshkov / Ju.V. Ul'janickij, S.B. Zlobin, P.A. Vitjaz' i dr. // Respublikanskij mezhdzvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov «Poroshkovaja metallurgija». – Minsk: 2004. – Vyp. 27. – S. 116-122.
 22. Evstigneev V.V. Poluchenie i issledovanie nanostrukturnyh detonacionnyh pokrytij na detaljah mashinostroenija s ispol'zovaniem mehanokompozitov tipa TiB₂-Cu / V.V. Evstigneev, V.I. Jakovlev, S.I. Gibel'gauz i dr. // Polzunovskij vestnik. – 2007. - № 4. – S. 155-161.
 23. Sobachkin A.V. Morfologija pokrytij iz mnogokomponentnyh, predvartel'no mehanoaktivirovannyh poroshkov SVS-kompozitov / A.V. Sobachkin, I.V. Nazarov, V.I. Jakovlev // Obrabotka metallov. – 2012. - № 3(56). – S. 141-144.
 24. Sobachkin A. V. Primenenie metoda mehanostimulirovannogo samorasprostranjajushhegosja vysokotemperaturnogo sinteza dlja sozdanija mnogokomponentnyh kompozicionnyh naplavochnyh materialov [Tekst] / A.V. Sobachkin, V.I. Jakovlev, A.A. Sitnikov // Innovacii v mashinostroenii : trudy 4-oj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii / pod red. H.M. Rahimjanova. – Novosibirsk : Izd-vo NGTU, 2013. – S. 287–291.
 25. Sitnikov A.A. Novye poroshkovye materialy iz SVS-kompozitov dlja jelek-trodugovoj naplavki iznosostojkikh pokrytij / A.A. Sitnikov, V.I. Jakovlev, M.E. Tatarkin // Innovacii v mashinostroenii: Materialy 1-j mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – Bijsk: Izd-vo AltGTU, 2010. – S. 191-193.
 26. Pilipchenko O.V. Naplavlennja materialami SVS-klasu / O.V. Pilipchenko // Metali, tehnologii ta obladnannja. – 2009. - № 24. – S. 15-16.