

УДК 539.375.6 + (621.762 + 621.793) : 546.07  
 DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-4-17-33

## Наноматериалы технологии СВС для триботехнического применения Обзор

© 2016 г. А.П. Амосов

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 06.04.16 г., доработана 07.05.16 г., подписана в печать 11.05.16 г.

Дан обзор результатов применения порошковой технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) для получения разнообразных наноматериалов, которые могут быть использованы по триботехническому назначению. Во-первых, это недорогие нанопорошки сульфидов, оксидов, нитридов, карбидов, боридов и металлов, которые пригодны в качестве твердых смазок и модификаторов трения для жидких и пластичных смазочных материалов. Во-вторых, это твердые компактные наноструктурные керамические и композиционные материалы для изготовления триботехнических конструкций. Данный вид наноматериалов может быть получен как *ex situ* из СВС-нанопорошков спеканием или введением в расплав, так и *in situ* в одну стадию из исходных порошковых реагентов методами газостатной СВС-технологии, силового СВС-компактирования, СВС-литья, СВС в расплаве, что значительно упрощает и удешевляет производство таких материалов. В-третьих, это материалы СВС для нанесения наноструктурных покрытий различной толщины с высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения: наноструктурные материалы для наплавки и напыления, электроды для электроискрового легирования, многокомпонентные мишени для магнетронного распыления и катоды для вакуумно-дугового испарения, нанодисперсные наполнители электрохимических и химических покрытий.

**Ключевые слова:** самораспространяющийся высокотемпературный синтез, твердые смазки, нанопорошковые модификаторы трения, наноструктурная керамика, нанокompозиты, нанопокpытия.

**Амосов А.П.** – докт. физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов Самарского государственного технического университета (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244). Тел.: (846) 242-28-89. E-mail: egundor@yandex.ru.

**Для цитирования:** Амосов А.П. Наноматериалы технологии СВС для триботехнического применения: Обзор // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покpытия. 2016. No. 4. С. 17–33.  
 DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-4-17-33.

Amosov A.P.

### **Nanomaterials of SHS technology for tribological applications: A review**

The paper reviews the results of using the self-propagating high-temperature synthesis (SHS) powder technology to obtain various nanomaterials, which can be utilized for tribological purposes. Firstly, these are low-cost nanopowders of sulfides, oxides, nitrides, carbides, borides and metals, which can be used as solid lubricants and friction modifiers for liquid and semisolid lubricants. Secondly, these are solid compact nanostructured ceramic and composite materials for the production of tribological structures. This type of nanomaterials can be obtained either *ex situ* from SHS nanopowders by sintering or introducing into the melt or *in situ* in a single stage from initial powdered reagents by the methods of gasostatic SHS technology, force SHS compaction, SHS casting, and SHS in the melt, which significantly simplifies and cheapens production of such materials. Thirdly, these are SHS materials for application of nanostructured coatings of different thickness with high wear resistance and low friction factor, such as nanostructured materials for surfacing and spraying, electro-spark alloying electrodes, multicomponent targets for magnetron sputtering and cathodes for vacuum arc evaporation, nanosized fillers for electrochemical and electroless chemical coatings.

**Keywords:** self-propagating high-temperature synthesis, solid lubricants, nanopowder friction modifiers, nanostructured ceramics, nanocomposites, nanocoatings.

**Amosov A.P.** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof., head of Department of metals science, powder metallurgy, nanomaterials of Samara State Technical University (443100, Russia, Samara, Molodogvardeiskaya str., 244). E-mail: egundor@yandex.ru.

**Citation:** Amosov A.P. Nanomaterialy tekhnologii SVS dlya tribotekhnicheskogo primeneniya: Obzor. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2016. No. 4. С. 17–33. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-4-17-33.

## Введение

Трибологические процессы трения, смазки и износа играют очень важную роль в технике. Они во многом определяют потери энергии в техниче-

ских устройствах, потребление топлива, выбросы выхлопных газов, износ материалов, срок службы и межремонтный период работы механизмов. Раз-

работка материалов и покрытий, обеспечивающих малые коэффициенты трения и/или износа как при обычных, так и повышенных температурах, в коррозионных средах и вакууме, приобретает особое значение для современной техники, характеризующейся большими механическими нагрузками, скоростями, температурами и действием других факторов. Зачастую таким требованиям могут удовлетворять только новые материалы, в первую очередь керамические и композиционные [1]. Керамика обладает малым весом, высокими значениями твердости и жесткости, жаростойкости и жаропрочности, что делает ее перспективным износостойким материалом для авиакосмической и автомобильной техники, машиностроения в целом и металлургии. Если керамику использовать в составе композиционных материалов, то можно существенно снизить влияние ее хрупкости и получить надежные триботехнические материалы, обеспечивающие одновременно низкое трение и малый износ в самых разных условиях. Самыми новыми материалами являются наноматериалы, обладающие, как известно, уникальными свойствами. Поэтому особое внимание в последнее время уделяется разработке наноматериалов триботехнического назначения: наноструктурных композиционных керамических и металлокерамических материалов для изготовления триботехнических конструкций, наноструктурных триботехнических покрытий, нанопорошковых твердых смазок и модификаторов трения для жидких и пластичных смазочных материалов [1–3].

Однако получение новых триботехнических материалов часто сопряжено с большими трудностями и возможно при наличии сложного дорогостоящего оборудования. Для практического использования этих материалов несомненный интерес представляют экономически выгодные технологии их производства. К таким технологиям следует отнести технологию самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), которая основана на проведении экзотермических химических реакций взаимодействия исходных порошковых реагентов в форме горения с образованием тугоплавких неорганических соединений (карбидов, нитридов, боридов, оксидов, халькогенидов и др.), керамических и композиционных материалов на их основе, в том числе и наноматериалов [4, 5]. Технология СВС отличается простотой и малыми габаритами оборудования, отсутствием затрат электроэнергии, разнообразием продуктов

и является экономически выгодной, что особенно важно в случае наноматериалов, для которых характерна высокая стоимость. Обзор материалов и покрытий триботехнического назначения, получаемых по технологии СВС, был представлен в статье [6], но тема наноматериалов там практически не обсуждалась. В настоящей работе, являющейся продолжением [6], рассматриваются трибологические наноматериалы марки СВС для применения в технике, главным образом машиностроении (без обсуждения трибологических наноматериалов медицинского назначения).

## **1. Нанопорошковые модификаторы смазочных материалов и твердые смазки**

Как известно, модификаторы трения представляют собой добавки и присадки в смазочные материалы, используемые для снижения коэффициента трения между соприкасающимися поверхностями и уменьшения затрат топлива в двигателях на преодоление трения. Как отмечено в недавнем обзоре современного развития модификаторов трения для жидких смазок [3], существуют три вида таких модификаторов: органические модификаторы трения, металлоорганические соединения (главным образом органические соединения молибдена) и нанопорошки. Применение микро- и наночастиц различной природы (полимеры, металлы, керамика и др.) в качестве модификаторов трения широко изучается в настоящее время в трибологических центрах [7, 8]. Такие порошковые добавки существенно повышают противозносные свойства смазочных материалов и снижают коэффициент трения при высоких температурах и нагрузках. Уменьшение размера частиц приводит к увеличению способности их удерживания в масле без выпадения в осадок и снижению интенсивности изнашивания, поэтому наноразмерные модификаторы являются наиболее эффективными среди порошковых модификаторов трения [7, 8]. В качестве порошковых наномодификаторов используются присадки нанопорошков металлов, полимеров, графита, алмазов, фуллеренов, а также, что особенно важно, — тугоплавких неорганических соединений: оксидов, нитридов, сульфидов и др., которые можно получать по СВС-технологии [5].

Среди неорганических соединений наиболее распространенными твердыми смазками и моди-

фикаторами являются дисульфиды молибдена и вольфрама. Проведение реакции СВС между порошком серы и нанопорошками молибдена и вольфрама в атмосфере аргона позволяет получать нанопорошки гексагональных  $\text{MoS}_2$  и  $\text{WS}_2$  в виде агломерированных частиц нанопластинчатого строения толщиной 40–150 нм и шириной 100–3000 нм [9]. Эти сульфиды способны расслаиваться на наноразмерные слои при сдвиге и обеспечивать заметное уменьшение коэффициента трения по сравнению с микронным порошком дисульфида молибдена [10]. Показана возможность применения порошка дисульфида молибдена с наноразмерными слоями в качестве противоизносной присадки в масла, а порошка дисульфида вольфрама — в качестве твердой смазки, обеспечивающей низкое трение на воздухе при временном повышении температуры до 400 °С.

Достаточно распространено также использование наноксидов  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  в качестве модификаторов трения [7, 11]. Технология СВС позволяет получать нанопорошки многих оксидов [5, 12]. Нанопорошки оксидов металлов с размером частиц порядка 40 нм образуются при горении газозвеси металлических частиц величиной менее 10 мкм, при котором успевает происходить их газификация в процессе горения. Нанопорошки оксидов металлов образуются также при горении различных прекурсоров металлов, например нитратов или перхлоратов металлов, или их соединений с гидразином  $\text{N}_2\text{H}_4$  [12]. Подобные реакции можно проводить и в жидких растворах указанных реагентов (так называемый растворный СВС, который отличается простотой реализации, не требует специального оборудования, экологически безопасен и весьма перспективен для создания недорогих производств нанопорошков разных оксидов) [12, 13]. Углеродный СВС позволяет получать нанопорошки сложных оксидов [14].

Большие возможности для получения нанопорошков нитридов  $\text{BN}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{TiN}$  и их композиций предлагает азидная технология СВС [5, 15]. Она основана на использовании азиды натрия  $\text{NaN}_3$  в качестве азотирующего реагента вместо газообразного азота и характеризуется низкими температурами горения, формированием конденсированных и газообразных продуктов горения, разделяющих первичные частицы синтезированных нитридов и способствующих образованию их в наноразмерном виде. Например, частицы гексагонального нитрида бора  $\text{h-BN}$ , который может

применяться как высокотемпературная твердая смазка, получают в форме диска толщиной порядка 20 нм и диаметром, в 10–15 раз превышающим их толщину.

Нанопорошки металлов  $\text{Ti}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{W}$ ,  $\text{Mo}$  могут быть получены в реакциях СВС с восстановительной стадией из оксидов переходных металлов в расплавах солей щелочных или щелочно-земельных металлов, например  $\text{NaCl}$  [16]. Во время горения расплавленная соль  $\text{NaCl}$  образует защитный слой вокруг первичных частиц восстановленного металла, сохраняя этим их наноразмерность.

Таким образом, метод СВС позволяет получать самые разные нанопорошки, которые могут быть использованы в качестве модификаторов смазочных материалов и твердых смазок.

## 2. Наноструктурные триботехнические керамические и композиционные материалы

Как отмечалось во введении, керамические триботехнические материалы привлекательны малым весом, высокими значениями твердости и жесткости, жаропрочности и коррозионной стойкости, что, например, очень важно в газотурбинных двигателях для высокоскоростных шариковых подшипников, изготавливаемых из нитрида кремния или сialона, или для уплотнительных материалов, которые выполняются из карбида кремния и предназначены для работы при высоких температурах и в агрессивных средах [1]. Традиционно такие материалы получают реакционным спеканием или горячим прессованием из соответствующих керамических порошков. Неоднократно показано, что уменьшение размера порошков, переход к нанопорошкам и изготовление наноструктурной керамики могут значительно улучшить трибологические свойства [1], однако традиционные методы спекания при этом уже не должны применяться, так как приводят к укрупнению нанопорошков. Современной альтернативой данным методам является, например, метод искрового плазменного спекания (ИПС), который наиболее широко используется для спекания нанопорошков.

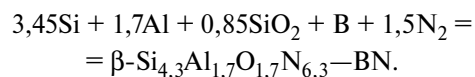
Среди неоксидной керамики хорошим сочетанием свойств выделяется керамика из нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , которая наряду с перечисленными выше свойствами обладает высокой вязкостью разрушения, поэтому в технологии СВС большое внимание уделяется получению порошков нит-

рида кремния как  $\alpha$ -, так и  $\beta$ -фазы. Еще в 2000 г. сжиганием порошка кремния в азоте с участием газифицирующих добавок  $\text{NH}_4\text{Cl}$  и  $\text{NH}_4\text{F}$  в промышленном реакторе СВС-30 с рабочим объемом 30 л были синтезированы субмикронные порошки нитрида кремния с удельной поверхностью  $5 \text{ м}^2/\text{г}$  и содержанием  $\alpha$ -фазы более 90 мас.%, которые не уступали по своим характеристикам порошкам  $\text{Si}_3\text{N}_4$  печного синтеза [17]. Затем эта технология была усовершенствована за счет применения более мелкого порошка кремния и введения  $\alpha$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  в исходную смесь порошков, что позволило значительно увеличить удельную поверхность порошка и содержание  $\alpha$ -фазы [18]. Использование в качестве исходного сырья дешевого порошка ферросилиция при сжигании в азоте привело к получению порошка  $\text{Si}_3\text{N}_4$  субмикронного размера (в среднем 0,5 мкм), состоящего из смеси фаз [19]. По азидной технологии СВС были синтезированы порошки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с содержанием  $\alpha$ -фазы волокнистой структуры от 40 до 95 %, из которых методом горячего прессования без активаторов спекания была получена керамика с хорошей вязкостью разрушения до  $8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$  [15]. В работе [20] для промышленного применения предлагается метод СВС высокочистого порошка  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  при низком давлении азота 140–200 кПа с предварительным подогревом реагентов до 500–750 °С. Процесс СВС с использованием гранулированной шихты и разбавления позволяет получать равноосные частицы  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ , а с применением высокопористой пены из геля шихты — удлиненные частицы  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  [21, 22]. Удлиненность керамических частиц, их волокнистая структура способствуют увеличению вязкости разрушения спеченной из них керамики. Последние достижения в использовании процесса СВС для получения нитридной керамики, в том числе наноструктурной, представлены в недавней монографии [23].

Керамика из карбида кремния  $\text{SiC}$  также обладает хорошими трибологическими свойствами. Для получения изделий с высокими характеристиками при повышенных температурах необходимо создание беспористых нанокристаллических материалов из  $\text{SiC}$ , спеченных без активаторов спекания. Недавно сочетанием кратковременной механической активации реакционной смеси порошков кремния и углерода с последующим синтезом в режиме горения удалось получить субмикронные порошки (50–300 нм)  $\beta$ -фазы карбида кремния с удельной поверхностью более  $20 \text{ м}^2/\text{г}$ ,

из которых методом ИПС при 2000 °С в течение 10 мин была получена беспористая  $\text{SiC}$ -керамика со свойствами, сопоставимыми с лучшей коммерческой керамикой, но при меньших затратах [24, 25].

Наряду с уменьшением размеров керамических порошков и структуры спеченной из них керамики, другим важнейшим направлением развития триботехнических керамических материалов является разработка композиционных керамических материалов, в том числе керамических нанокомпозитов [1, 26]. Однофазная керамика может плохо спекаться, неудовлетворительно обрабатываться, быть слишком хрупкой, иметь большой коэффициент трения и т.д., поэтому существует большое разнообразие композиционных керамических материалов для триботехнического применения, и технология СВС весьма перспективна для их развития. Например, хорошо известно, что наиболее плотная и прочная керамика из порошков нитрида кремния спекается при горячем прессовании с использованием активирующих добавок  $\text{MgO}$  и  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , но достаточно сложно и дорого получить исходные высококачественные порошковые смеси с такими добавками [27]. Методом СВС удастся создавать такие порошковые смеси в одну стадию, что оказывается проще и дешевле, и методом горячего прессования спекать из них композиционную керамику с высокими характеристиками [27]. Другой пример — сиалонвая керамика  $\text{SiAlON}$ , которая спекается из смесей нитридов ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{AlN}$ ) и оксидов ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и обладает лучшими свойствами, чем  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -керамика, но ее применение ограничено экономическими факторами, так как для ее производства требуются дорогие исходные порошки и длительный нагрев при высоких температурах спекания [1]. Сжигание значительно более дешевых исходных порошков в СВС-газостате высокого давления азота (до 150 МПа) позволяет получить в одну стадию, практически без затрат электроэнергии, плотную сиалоновую керамику и композиты на ее основе с хорошими трибологическими свойствами, например композит сиалон — гексагональный нитрид бора [28, 29]:



Эти же достоинства технологии СВС отмечаются в работе [30], посвященной прямому синтезу чистой керамики, состоящей из гексагонального

нитрида бора h-BN, и композиционной керамики h-BN—SiO<sub>2</sub> в СВС-газостате при давлении азота 80 МПа.

Необходимо отметить, что применение гексагонального нитрида бора h-BN весьма распространено в композиционных керамических материалах триботехнического назначения [1, 31]. Сравнительно мягкий h-BN обладает слоистой графитоподобной кристаллической структурой, используется в качестве высокотемпературной твердой смазки, имеет малый коэффициент термического расширения, высокую теплопроводность, термостойкость, химическую инертность. Керамические неоксидные композиты, содержащие h-BN, особенно Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>—BN и Sialon—BN, демонстрируют отличную коррозионную и термическую стойкость, малый коэффициент трения и износ при сухом трении, хорошую трещиностойкость, прочность на изгиб, механическую обрабатываемость [31, 32]. Однако при этом большую роль играют вид и размер частиц гексагонального BN, вводимого в состав композита. Если h-BN вводится в виде больших хлопьев или агломератов таких хлопьев, то уплотнение композита и его прочность после спекания ухудшаются. Для получения высокой прочности композита необходимо, чтобы частицы BN были очень мелкими и равномерно распределенными по объему композита. Как отмечается в работе [31], очень мелкие частицы гексагонального BN могут быть получены и равномерно распределены в объеме композита не путем механического смешивания керамических порошков с BN, а посредством проведения химического синтеза этих частиц в объеме композита при реализации процессов *in situ*. Технология СВС, в частности азидная технология СВС, дает возможность получать *in situ* высокодисперсные композитные порошки нитридов различных элементов с h-BN [15, 33].

Керамика из чистого Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> очень твердая и плохо поддается механической обработке даже алмазным инструментом, что значительно повышает стоимость готовых деталей из нее [34]. Отсутствие у нее электропроводности затрудняет искровое плазменное спекание и делает неприменимой более дешевую электроэрозионную обработку [35]. Нитрид титана TiN обладает электропроводностью и высокой твердостью, поэтому у композиционной керамики Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>—TiN хорошая износостойкость, она лучше спекается методом ИПС и может обрабатываться на электроэрозионных станках.

Метод СВС позволяет сравнительно просто получать композиционный порошок Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>—TiN, причем наличие частиц TiN ограничивает рост частиц Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> при синтезе [34]. Керамика Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>—30об.%TiN, спеченная методом ИПС из наночастиц Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и TiN (полученных не методом СВС), имеет износостойкость в 3 раза выше, чем композиционная керамика этого состава, спеченная методом горячего прессования из промышленно выпускаемых порошков [36]. Такая композиционная керамика с твердыми наночастицами TiN значительно меньше повреждает контртело при трении, чем керамика с частицами TiN микронного размера, что важно, например, для гибридных подшипников, в которых шарики изготавливаются из керамики, а кольца — из металла [37]. Стоит задача — научиться получать композитные нанопорошки Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>—TiN методом СВС.

Плотный нанокристаллический керамический композит AlN—SiC может быть синтезирован в режиме теплового взрыва в магнитном поле при индукционном нагреве спрессованной в образец смеси исходных микропорошков Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al и C [38]. Сначала происходит плавление алюминия, затем растворение Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> в расплаве и азотирование алюминия с большим тепловыделением и подъемом температуры до 1400 °С. В результате СВС получается твердый раствор AlN—SiC в Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>—Al—C, термообработка которого приводит к формированию нанокристаллической структуры композита AlN—SiC.

Керамика из диборида титана TiB<sub>2</sub> относится к одной из самых твердых, жестких и тугоплавких керамик, поэтому представляет большой интерес для триботехнических применений [1]. Однако широкое применение монолитной керамики TiB<sub>2</sub> сдерживается ее плохой спекаемостью, хрупкостью, окислением при высоких температурах и плохой обрабатываемостью. Для устранения этих недостатков на основе TiB<sub>2</sub> разрабатываются композиционные материалы, и для изготовления некоторых из них с тонкой субмикронной структурой может быть использована технология СВС [39, 40].

В последние годы значительный интерес проявляется к такому виду керамики, как МАХ-фазы (тройные карбиды и нитриды), которые по своим свойствам занимают промежуточное положение между керамикой и металлами [41]. Для триботехники особое значение представляет слоистая керамика из наноструктурного карбосилицида

титана  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ , которая обладает ультрамалым коэффициентом трения [42]. С применением процесса СВС эта МАХ-фаза может быть получена в виде как порошка, так и компактного (прессованного) материала [43, 44]. Следует отметить возможность использования порошка  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  в качестве высокотемпературной твердой смазки в самосмазывающихся композитах на основе матрицы  $\text{NiAl}$ , которые изготавливаются методом ИПС [45].

Перейдем от керамических к металлокерамическим композитам, которые отличаются значительно большими прочностью и вязкостью разрушения, но имеют меньшие допустимые температуры эксплуатации. В обзоре современных триботехнических металломатричных композитов (ММК) показано, как применение в составе композитов в качестве упрочняющей фазы керамических наночастиц может существенно снижать коэффициент трения и износ материалов, причем снижать более эффективно по сравнению с использованием микроразмерных керамических частиц [46]. Исследование влияния наноразмерных добавок  $\text{WC}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на механические и трибологические свойства спеченных дисперсно-упрочненных ММК на основе  $\text{Co}$  и  $\text{Fe}$  выявило увеличение твердости — до 10 %, прочности на изгиб — до 50 %, износостойкости — в 2–10 раз и уменьшение коэффициента трения — до 4 раз [47]. Превосходные трибологические свойства наблюдались у спеченных композитов бронза—графит, железо—графит и железо—никель—графит с наночастицами твердой смазки  $\text{WS}_2$  [48]. Очевидно, указанные керамические наночастицы, предназначенные для использования в составе спеченных порошковых ММК, могут предварительно изготавливаться методом СВС и быть сравнительно дешевыми.

Наряду с этим большой интерес представляет применение процесса СВС для прямого получения в одну стадию ММК, *ex situ* или *in situ* армированных керамическими наночастицами. Известна широкая гамма металлокерамических синтетических твердых инструментальных материалов (СТИМ), характеризующихся высокой износостойкостью, изготавливаемых методом силового СВС-компактирования, главным образом СВС-прессования [4]. Выполнен большой цикл исследований по влиянию наноразмерных керамических добавок на параметры горения, состав и свойства соответствующих порошковых

СВС-композитов различного состава:  $\text{TiC—Ni}$ ,  $\text{TiC—NiAl}$ ,  $\text{TiC—Ti}_3\text{AlC}_2$ ,  $\text{TiC—Cr}_3\text{C}_2\text{—Ni}$ ,  $\text{TiB}_2\text{—TiAl}$ ,  $\text{TiC—TiNi}$  [49]. Перспективными для триботехнического использования являются легкие каркасные алюмокерамические композиты с большим содержанием (50–80 мас.%) керамической фазы  $\text{TiC}$  или МАХ-фазы  $\text{Ti}_2\text{AlC}$ , получаемые из исходных порошков  $\text{Ti}$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{TiH}_2$  также методом СВС-прессования [50, 51]. Хорошими триботехническими свойствами обладают литые наноструктурные ММК на основе  $\text{Fe}_3\text{Al}$  или  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  и  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$ , структура которых формируется *in situ* в процессе разделения и остывания жидкофазных продуктов СВС в поле тяжести или в поле центробежных сил в центрифуге (метод СВС-литья) [52–54]. В этих работах подчеркиваются технические и экономические преимущества метода СВС-литья таких сплавов перед традиционной вакуумной электрометаллургией. Недавно предложена другая разновидность метода СВС-литья с направленной кристаллизацией жидкофазных продуктов без фазоразделения, позволившая получить сравнительно недорогой композит  $\text{Cr—CrS}$  с малой пористостью и высокими механическими свойствами, в котором синтезированный сульфид хрома играет роль твердой смазки [55, 56].

Среди триботехнических металлокерамических композитов следует отметить легкие литые наноструктурные алюмоматричные композиты, дискретно упрочненные наночастицами тугоплавких соединений: оксидов, карбидов, нитридов, с относительно небольшим содержанием керамической фазы (не более 30 мас.%) [57]. Жидкофазные технологии изготовления литых композитов являются более простыми и дешевыми по сравнению с твердофазными порошковыми технологиями. В случае литых композитов процесс СВС может быть применен по трем направлениям [58]: 1) синтез менее дорогих керамических нанопорошков для последующего их ввода в матричный расплав (*ex situ*); 2) ввод готовых керамических наночастиц в матричный расплав (*ex situ*) с использованием процесса СВС, создающего большой градиент температуры и химического потенциала и этим способствующего смачиванию и равномерному распределению наночастиц; 3) синтез недорогих армирующих керамических наночастиц непосредственно в расплаве алюминия (*in situ*) с обеспечением их хорошей адгезии к матрице. Анализ первого направления представлен в работе [59] на примере применения нанопорошковой продук-

ции азидной технологии СВС для армирования и модифицирования алюминиевых сплавов *ex situ*. Второе направление еще ждет своего подробного исследования. Третье — анализируется в обзоре [60], посвященном использованию процессов СВС для получения *in situ* алюмоматричных композиционных материалов, дискретно армированных наноразмерными керамическими частицами карбида титана.

### 3. Наноструктурные триботехнические покрытия

В последнее время значительное внимание уделяется наноструктурным покрытиям триботехнического назначения [2, 61]. Эти покрытия могут включать в себя наночастицы твердых смазок, обеспечивая сверхнизкий коэффициент трения, или представлять собой сверхтвердые наноструктурные покрытия с очень высокой износостойкостью. Используется несколько подходов в создании наноструктурных триботехнических покрытий с применением СВС-технологий и материалов.

Как известно, покрытия самой большой толщины (до 20 мм и более) могут быть получены разными методами наплавки. Например, недавно осуществлена прямая центробежная СВС-наплавка литого ММК на основе комплексных боридов  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  и  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$  на стальную и титановую основы [62]. При толщине 2–6 мм твердость покрытия составила 800–1200 HV, а его структура представляла собой матрицу на основе интерметаллидного соединения  $\text{Ni}_4\text{Mo}$  с включениями частиц боридов с размером 10–20 мкм и наноразмерных выделений  $\text{Ni}_3\text{Al}$ . СВС-технология также способна поставлять высококачественные наплавочные материалы, в том числе и наноструктурные, для других методов наплавки. Литые композиционные материалы  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ – $\text{NiAl}$  с различным соотношением карбидных и интерметаллидных фаз были получены методом СВС-литья при избыточном давлении газа, измельчены в порошок и использованы для лазерной наплавки покрытий, которые показали твердость на уровне лучших российских и зарубежных аналогов [63]. В работе [64] представлены результаты разработки процесса СВС-экструзии для получения длинномерных изделий с наноразмерной структурой из композиционных керамических материалов, содержащих износостойкую составляющую ( $\text{TiC}$ ,  $\text{TiB}_2$ ) и оксидную эвтектику  $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{ZrO}_2$ . Такие изделия перспективны в каче-

стве электродов для электродуговой наплавки износостойких наноструктурных покрытий [65]. Повышение износостойкости было достигнуто при электронно-лучевой наплавке покрытий толщиной 2–3 мм на никелевой и хромоникелевой основах при введении в них 10 % наночастиц диборида титана (80–100 нм) за счет применения композиционного порошкового наплавочного материала, изготовленного предварительно в несколько этапов при использовании процессов механической активации смеси исходных порошков, последующего СВС, дробления спека и повторной механической активации [66].

Методами напыления покрытий получают триботехнические покрытия толщиной от 0,15 мм до нескольких мм при переносе на поверхность детали частиц напыляемого материала размером 1–100 мкм [67]. Для газотермического напыления покрытий из порошков, содержащих наночастицы, используют в основном два способа: плазменное напыление на воздухе (APS) и высокоскоростное газопламенное напыление (HVOF), каждый из которых имеет свои достоинства и ограничения [2, 68]. Плазменный способ позволяет расплавлять частицы с высокой температурой плавления в нейтральных газах. Способ HVOF обеспечивает очень высокие скорости частицам (до 1000 м/с), за счет чего формируются плотные покрытия (до 99 % плотности) с хорошей адгезией. Однако общим недостатком этих способов является высокая температура напыляемого материала и покрытия из него, из-за чего наноструктура напыляемого материала может не сохраниться в покрытии. В этом отношении более перспективно применение холодного газодинамического напыления (CS) и детонационного напыления (DS) [2]. Для напыления наноструктурных покрытий используются материалы в виде: 1) суспензии с наночастицами или растворов; 2) агломерированного композиционного порошка, полученного распылительной сушкой суспензии с наночастицами; 3) спеченных композитов с наночастицами с последующим их дроблением; 4) механически легированных порошков с наночастицами [68, 69]. Пока для напыления покрытий с наноструктурой применяются СВС-материалы только третьего вида, которые создаются при механической активации исходных порошков, проведении СВС (чаще с прессованием) композита с керамическими наночастицами, дроблении полученного композита до нужных размеров частиц порошка [68, 70]. В последней работе

использовались приготовленные таким образом композиционные СВС-порошки  $\text{TiB}_2$ —43об.%Cu с частицами  $\text{TiB}_2$  размером 50—100 нм, которые позволили получить наноструктурные покрытия при напылении методами CS и DS. Но в целом исследования по применению СВС-наноматериалов для получения наноструктурных покрытий методами напыления ведутся пока не очень активно.

Значительно более интенсивно изучаются возможности использования СВС-наноматериалов для электроискрового легирования (ЭИЛ) поверхностей металлов и сплавов с образованием износостойких покрытий толщиной до 100 мкм. Разработана технология силового СВС-компактирования и получены новые электродные материалы из безвольфрамовых твердых сплавов марки СТИМ на основе карбида титана, дисперсно-упрочненных наночастицами  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , NbC, W, WC, WC—Co,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [71, 72]. Введение наночастиц в СВС-шихту приводит к существенному модифицированию синтезированных твердых сплавов с уменьшением зерна карбидной фазы в 2—7 раз. Применение таких материалов в качестве электродов для ЭИЛ обуславливает получение покрытий высокого качества по сплошности, микротвердости, жаростойкости, трибологическим свойствам и увеличение срока службы деталей машин и инструментов с этими покрытиями в 1,5—10 раз [73, 74]. Последние работы в этом направлении посвящены разработке наноструктурных дисперсионно-твердеющих СВС-компактированных материалов на основе двойных карбидов (Ti, Zr)C и (Ti, Nb)C без использования дорогостоящих нанопорошковых добавок в СВС-шихту и их применению для получения ЭИЛ-покрытий с улучшенными триботехническими свойствами на сталях и титановых сплавах [75]. Электроды для ЭИЛ из твердых сплавов марки СТИМ могут быть изготовлены также методом СВС-экструзии [76].

Самые тонкие покрытия триботехнического назначения толщиной до 10 мкм получают методами вакуумного осаждения из паровой фазы, образованной за счет химических реакций из газообразных прекурсоров, подаваемых в вакуумную камеру, или физических процессов распыления (испарения) конденсированной фазы с последующим химическим взаимодействием с реакционным газом в вакуумной камере (соответственно методы CVD или PVD) [67]. Материалы техно-

логии СВС используются в методах PVD при нанесении многокомпонентных наноструктурных пленок с уникальными свойствами для защиты поверхностей изделий и инструментов от различных видов износа, воздействия агрессивных сред и повышенных температур [77]. В машиностроении до сих пор распространено двухкомпонентное защитное покрытие из нитрида титана TiN. Введение в состав такого покрытия третьего и четвертого компонентов (C, B, Al, Si, Cr) позволяет создать наноразмерную структуру покрытия, за счет чего значительно улучшить твердость, термическую стабильность, износостойкость, снизить коэффициент трения [77, 78]. Для нанесения таких многокомпонентных покрытий необходимо иметь соответствующие многокомпонентные мишени для установок магнетронного распыления или многокомпонентные катоды для установок вакуумно-дугового испарения. Изготовление многокомпонентных мишеней (катодов) на основе тугоплавких соединений титана традиционными методами литья, спекания или горячего прессования является сложным и затратным процессом, а иногда и невозможным. Значительно проще и дешевле применить для этого метод СВС-прессования [78, 79]. При магнетронном распылении СВС-прессованных многокомпонентных мишеней получены наноструктурные покрытия Ti—Cr—B—N и Ti—Cr—Si—C—N на твердосплавном режущем инструменте с повышением его стойкости в 11—17 раз [78]. Использование СВС-катодов системы Ti—C—Al—Si уменьшило объем микрокапельной фазы в покрытии в 2,5—3,0 раза по сравнению с катодом из титана, сделало покрытие наноструктурным и сверхтвердым, увеличило стойкость твердосплавных фрез в 2,4 раза по сравнению с покрытием TiN [79]. Указанные износостойкие покрытия представляют интерес для улучшения эксплуатационных свойств режущего инструмента и различных конструкционных материалов, но они обладают высоким коэффициентом трения, что не позволяет использовать их в качестве антифрикционных материалов [61]. Одним из эффективных путей снижения коэффициента трения при сохранении высоких твердости и износостойкости является разработка нанопозиционных покрытий, в которых наряду с твердой фазой из карбидов и нитридов переходных металлов содержится «мягкая» фаза, выполняющая роль твердой смазки или способствующая образованию самосмазывающихся фаз в процессе наг্রে-



ва: серебро, золото, диселенид молибдена, фосфид кальция, углерод и др. [61]. Многокомпонентные нанокпозиционные покрытия: двухслойное TiAlCON—MoSeC и однослойные TiAlSiCN—MoSeC, MoCN—Ag(Au), TiCN—CaF<sub>2</sub> были получены методом магнетронного и ионного распыления различных мишеней: композиционных, изготовленных методами СВС или порошковой металлургии, а также литых металлических [61]. Двухслойное покрытие с внешним самосмазывающимся слоем MoSeC характеризуется стабильно низким коэффициентом трения, но со временем изнашивается или перемещивается с продуктами износа, теряя свои свойства. Более перспективными являются нанокпозиционные покрытия, которые обеспечивают постоянное поступление твердой смазки в зону трибоконтакта. Показано, что в интервале температур до 700 °С существенного снижения коэффициента трения и увеличения износостойкости покрытий можно достичь как путем непосредственного введения дополнительной мягкой фазы в состав покрытия, так и в процессе его температурной самоадаптации в результате фазовых превращений или окисления.

Большие возможности для получения нанокпозиционных покрытий предоставляют методы электрохимического и бестокового химического осаждения с включением нанодисперсных наполнителей в металлическую матрицу покрытий с толщиной 1—50 мкм [80—83]. Такие покрытия получают при создании в ванной с электролитом или раствором реагентов взвеси нанопорошков, которые осаждаются вместе с металлом на поверхность детали и формируют композиционное покрытие. Включение дисперсных материалов — как высокотвердых керамических (оксидов, карбидов, нитридов, боридов), так и сравнительно мягких — твердых смазок (сульфидов, графита, полимеров, металлов) — в металлическую матрицу в десятки раз повышает износостойкость, антифрикционные характеристики, коррозионную и термическую стойкость гальванических покрытий [84]. Современной тенденцией развития электрохимических и химических покрытий является переход к нанокпозиционным покрытиям, содержащим в металлической матрице наночастицы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, SiC, WC, TiC, TiN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, AlN, MoS<sub>2</sub>, Ag, углеродные нанотрубки и др. [80—83]. Пока нет сведений об использовании в электрохимических и химических нанокпозиционных покрытиях кера-

мических наночастиц, полученных по технологии СВС, хотя нет сомнения в перспективности такого использования.

## Заключение

Проведенный обзор показывает, что простая, экономичная порошковая технология СВС открывает большие возможности для получения самых разнообразных наноматериалов триботехнического назначения. По технологии СВС синтезирована широкая гамма недорогих нанопорошков сульфидов, оксидов, нитридов, карбидов, боридов и металлов, которые могут быть использованы в качестве твердых смазок и модификаторов трения для жидких и пластичных смазочных материалов. Эти нанопорошки могут также применяться для изготовления разнообразных компактных конструкционных материалов триботехнического назначения (керамических и композиционных) по технологиям *ex situ*: твердофазным технологиям порошковой металлургии спеканием из порошков и жидкофазным технологиям введением нанопорошков в расплав матричного материала. Кроме того, процесс СВС позволяет получать компактные керамические и композиционные материалы *in situ* в одну стадию из исходных порошковых реагентов (методы газостатной СВС-технологии, силового СВС-компактирования, СВС-литья, СВС в расплаве), что значительно упрощает и удешевляет производство таких материалов. Материалы СВС могут быть использованы также для нанесения наноструктурных покрытий различной толщины с высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения, в качестве наноструктурных материалов для наплавки и напыления, электродов для электроискрового легирования, многокомпонентных мишеней для магнетронного распыления и катодов для вакуумно-дугового испарения, нанодисперсных наполнителей электрохимических и химических покрытий. Перечисленные возможности технологии и материалов СВС перспективны для разработки и применения новых, сравнительно недорогих наноструктурных материалов и покрытий триботехнического назначения с улучшенными свойствами. При этом полезно использовать диаграммы Эшби [85], которые наглядно показывают место по свойствам и стоимости новых разработанных материалов среди других уже известных материалов, как это было продемонстрировано в работе [55] на примере керамики-ме-

таллического композита Cr—CrS, полученного методом СВС, с отражением достоинств материала и технологии СВС.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет» на проведение НИР на 2014—2016 годы (код проекта 1583).*

## Литература

1. Basu B., Kalin M. Tribology of ceramics and composites: a materials science perspective. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
2. Achanta S., Dress D., Celis J.-P. Nanocoatings for tribological applications // Nanocoatings and ultra-thin films: Technologies and applications / Eds. A.S.H. Makhlof, I. Tiginyanu. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011. P. 355—396.
3. Tang Z., Li S. A review of recent developments of friction modifier for liquid lubricants (2007-present) // Curr. Opin. Solid State Mater. Sci. 2014. Vol. 18. No. 3. P. 119—139.
4. Левашов Е.А., Рогачев А.С., Курбаткина В.В., Максимов Ю.М., Юхвид В.И. Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. М.: Изд. дом МИСиС, 2011.
5. Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г., Сычев А.Е. Принципы и методы регулирования дисперсной структуры СВС-порошков: от монокристаллов до наночастиц // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2005. No. 5. С. 9—22.
6. Амосов А.П. Материалы и покрытия триботехнического назначения, получаемые по технологии СВС // Ремонт, восстановление, модернизация. 2010. No. 1. С. 15—20.
7. Пучков В.Н., Заскалько П.П. Исследование влияния добавок наноструктурированных материалов на трибологические свойства смазочных масел // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. No. 11. С. 25—30.
8. Akbulut M. Nanoparticle-based lubrication systems // Powder Metall. Mining. 2012. Vol. 1. No. 1. 1000e101 (open access). URL: <http://dx.doi.org/10.4172/2168-9806/1000e101> (дата обращения: 16.03.2016).
9. An V., Bozheyev F., Richencoeur F., Irtegov Yu. Synthesis and characterization of nanolamellar tungsten und molybdenum disulfides // Mater. Lett. 2011. Vol. 65. No. 15—16. P. 2381—2383.
10. Ан В.В., Иртегов Ю.А., Яворовский Н.А., Галанов А.И., Погребенков В.М. Трибологические свойства нанослоистых дисульфидов вольфрама и молибдена // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54. No. 11. С. 326—331.
11. Alves S.M., Barros B.S., Trajano M.F., Ribeiro K.S.B., Moura E. Tribological behavior of vegetable oil-based lubricants with nanoparticles of oxides in boundary lubrication conditions // Tribol. Int. 2013. Vol. 65. P. 28—36.
12. Patil K.C., Hedge M.S., Tanu R. Chemistry of nanocrystalline oxide materials. Combustion synthesis, properties and applications. Singapore: World Scientific, 2008.
13. Mukasyan A.S., Dinka P. Novel approaches to solution-combustion synthesis of nanomaterials // Int. J. SHS. 2007. Vol. 16. No. 1. P. 23—35.
14. Martirosyan K.S. Carbon combustion synthesis of ceramic oxides nanopowders // Adv. Sci. Technol. 2010. Vol. 63. P. 236—245.
15. Bichurov G.V. Halides in SHS azide technology of nitrides obtaining // Nitride Ceramics: Combustion synthesis, properties, and applications / Eds. A.A. Gromov, L.N. Chukhlomina. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015. P. 229—263.
16. Nersisyan H.H., Lee J.H., Won C.W. SHS for a large scale synthesis method of transition metal nanopowders // Int. J. SHS. 2003. Vol. 12. No. 1. P. 149—158.
17. Zakorzhnevskii V.V., Borovinskaya I.P. Some regularities of  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> synthesis in a commercial SHS reactor // Int. J. SHS. 2000. Vol. 9. No. 2. P. 171—191.
18. Zakorzhnevskii V.V., Borovinskaya I.P. SHS of  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> from fine Si powders in the presence of blowing agents // Int. J. SHS. 2011. Vol. 20. No. 3. P. 156—160.
19. Chukhlomina L.N., Ivanov Yu.F., Maksimov Yu.M., Akhunova Z.S., Krivosheeva E.N. Preparation of submicron silicon nitride powders via self-propagating high-temperature synthesis // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2007. Vol. 46. Iss. 1. P. 8—11.
20. Wang Q., Liu G., Yang J., Chen Y., Li J. Preheating-assisted combustion synthesis of  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> powders at low N<sub>2</sub> pressure // Mater. Res. Bull. 2013. Vol. 48. Iss. 3. P. 1321—1323.
21. Yang J., Han L., Chen Y., Liu G., Lin Z., Li J. Effects of pelletization of reactants and diluents on the combustion synthesis of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> powder // J. Alloys Compd. 2012. Vol. 511. Iss. 1. P. 81—84.
22. Cui W., Zhu Y., Ge Y., Kang F., Yuan X., Chen K. Effects of nitrogen pressure and diluent content on the morphology of gel-cast-foam-assisted combustion synthesis of elongated  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> particles // Ceram. Int. 2014. Vol. 40. Iss. 8. Pt. A. P. 12553—12560.
23. Nitride ceramics: combustion synthesis, properties, and

- applications / Eds. A.A. Gromov, L.N. Chukhlomina. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015.
24. *Mukasyan A.S., Lin Ya-Ch., Rogachev A.S., Moskovskikh D.O.* Direct combustion synthesis of silicon carbide nanopowder from the elements // *J. Am. Ceram. Soc.* 2013. Vol. 96. No. 1. P. 111–117.
25. *Moskovskikh D.O., Lin Ya-C., Rogachev A.S., McGinn P.J., Mukasyan A.S.* Spark plasma sintering of SiC powders produced by different combustion synthesis routes // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2015. Vol. 35. P. 477–486.
26. *Palmero P.* Structural ceramic nanocomposites: a review of properties and powders' synthesis methods // *Nanomaterials*. 2015. Vol. 5. No. 2. P. 656–696.
27. *Zakorzhevskii V.V., Borovinskaya I.P., Chevykalova L.A., Kelina I.Ya.* Combustion synthesis of  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–(MgO, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) composites // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2007. Vol. 46. No. 1–2. P. 8–12.
28. *Zhao Y.S., Yang Y., Li J.T., Borovinskaya I.P., Smirnov K.L.* Combustion synthesis and tribological properties of SiAlON-based ceramic composites // *Int. J. SHS*. 2010. Vol. 19. No. 3. P. 172–177.
29. *Smirnov K.L.* Combustion synthesis of hetero-modulus SiAlON-BN composites // *Int. J. SHS*. 2015. Vol. 24. No. 4. P. 220–226.
30. *Zhang Y., He X., Han J., Du Sh.* Combustion synthesis of hexagonal boron nitride-based ceramics // *J. Mater. Process. Technol.* 2001. Vol. 116. P. 161–164.
31. *Zhang G.-J., Yang J.-F., Ando M., Ohji T.* Nonoxide–boron nitride composites: in situ synthesis, microstructure and properties // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2002. Vol. 22. No. 14–15. P. 2551–2554.
32. *Carrapichano J.M., Gomes J.R., Silva R.F.* Tribological behavior of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–BN ceramic materials for dry sliding applications // *Wear*. 2002. Vol. 253. P. 1070–1076.
33. *Amosov A.P., Shiganova L.A., Bichurov G.V., Kerson I.A.* Combustion synthesis of TiN–BN nanostructured composite powder with the use of sodium azide and precursors of titanium and boron // *Modern Appl. Sci.* 2015. Vol. 9. No. 3. P. 133–144.
34. *He W., Zhang B., Zhuang H., Li W.* Combustion synthesis of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–TiN composite powders // *Ceram. Int.* 2004. Vol. 30. Iss. 8. P. 2211–2214.
35. *Evdokimov A.A., Sivkov A.A., Gerasimov D. Yu.* Obtaining ceramic based on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and TiN by spark plasma sintering // *Glass Ceram.* 2016. Vol. 72. Iss. 9. P. 381–386.
36. *Yoshimura M., Komura O., Yamakawa A.* Microstructure and tribological properties of nano-sized Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> // *Scr. Mater.* 2001. Vol. 44. P. 1517–1521.
37. *Tatami J., Kodama E., Watanabe H., Nakano H., Waki-hara T., Komeya K., Meguro T., Azushima A.* Fabrication and wear properties of TiN nanoparticle-dispersed Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics // *J. Ceram. Soc. Jap.* 2008. Vol. 116. No. 6. P. 749–754.
38. *Kata D., Ohyanagi M., Munir Z.A.* Induction-field-activated self-propagating high-temperature synthesis of AlN–SiC solid solutions in the Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–Al–C system // *J. Mater. Res.* 2000. Vol. 15. No. 11. P. 2514–2525.
39. *Vallauri D., Atías Adrián I.C., Chrysanthou A.* TiC–TiB<sub>2</sub> composites: A review of phase relationships, processing and properties // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2008. Vol. 28. Iss. 8. P. 1697–1713.
40. *Vallauri D., DeBenedetti B.L., Jaworska, Klimczyk P., Rodriguez M.A.* Wear-resistant ceramic and metal–ceramic ultrafine composites fabricated from combustion synthesized metastable powders // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2009. Vol. 27. Iss. 6. P. 996–1003.
41. *Barsoum M.W.* MAX phases. Properties of machinable ternary carbides and nitrides. Weinheim: Wiley-VCH, 2013.
42. *Myhra S., Summers J.W.B., Kisi E.H.* Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> a layered ceramics exhibiting ultra-low friction // *Mater. Lett.* 1999. Vol. 39. No. 1. P. 6–11.
43. *Meng F., Liang B., Wang M.* Investigation of formation mechanism of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> by self-propagating high-temperature synthesis // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2013. Vol. 41. P. 152–161.
44. *Davydov D.M., Amosov A.P., Latukhin E.I.* Synthesis of MAX-phase of titanium silicon carbide (Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>) as a promising electric contact material by SHS pressing method // *Appl. Mech. Mater.* 2015. Vol. 792. P. 596–601.
45. *Shi X., Wang M., Zhai W., Xu Z., Zhang Q., Chen Y.* Influence of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> content on tribological properties of NiAl matrix self-lubricating composites // *Mater. Design*. 2013. Vol. 45. P. 179–189.
46. *Rohatgi P.K., Tabandeh-Khorsid M., Omrani E.* Chapter 8. Tribology of metal-matrix composites // *Tribology for scientists and engineers: From basics to advanced concepts* / Eds. P.L. Menezes et al. N.Y.: Springer Science + Business Media, 2013.
47. *Levashov E., Kurbatkina V., Zaytsev A.* Improved mechanical and tribological properties of metal-matrix composites dispersion-strengthened by nanoparticles // *Materials*. 2010. No. 3. P. 97–109.
48. *Rapoport L., Leshchinsky V., Lvovsky I., Volovik Yu., Feldman Y., Popovitz-Biro R., Tenne R.* Superior tribological properties of powder materials with solid lubricant nanoparticles // *Wear*. 2003. Vol. 255. No. 7–12. P. 794–800.

49. Pogozhev Yu.S., Potanin A.Yu., Levashov E.A., Kochetov N.A., Kovalev D.Yu., Rogachev A.S. SHS of TiC—TiNi composites: Effect of initial temperature and nanosized refractory additives // *Int. J. SHS*. 2012. Vol. 21. Iss. 4. P. 202—211.
50. Amosov A.P., Fedotov A.F., Latukhin E.I., Novikov V.A. TiC—Al interpenetrating composites by SHS pressing // *Int. J. SHS*. 2015. Vol. 24. No. 4. P. 187—191.
51. Федотов А.Ф., Амосов А.П., Латухин Е.И., Новиков В.А. Получение алюмокерамических каркасных композитов на основе МАХ-фазы  $Ti_2AlC$  методом СВС-прессования // *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2015. No. 6. С. 53—62.
52. Xue Q.J., La P.Q. Combustion synthesized bulk nanocrystalline materials and intermetallic matrix composites and their tribological properties // *Chin. J. Nonferr. Met.* 2004. Vol. 14. No. 1. P. 128—137.
53. La P.Q., Wang H.D., Bai Y.P., Yang Y., Wei Y.P., Lu X.F., Zhao Y., Cheng C.J. Microstructures and mechanical properties of bulk nanocrystalline  $Fe_3Al$  materials with 5, 10, and 15 wt.% Cr prepared by aluminothermic reaction // *Mater. Sci. Eng. A*. 2011. Vol. 528. No. 21. P. 6489—6496.
54. Sanin V., Andreev D., Ikornikov D., Yuxhvid V. Cast intermetallic alloys and composites based on them by combined centrifugal casting — SHS process // *Open J. Metal.* 2013. No. 3. P. 12—24.
55. Nabavi A., Goroshin S., Frost G.L., Barthelat F. Mechanical properties of chromium-chromium sulfide cermets fabricated by self-propagating high-temperature synthesis // *J. Mater. Sci.* 2015. Vol. 50. P. 3434—3446.
56. Tomoshige R., Niitsu K., Sekiguchi T., Oikawa K., Ishida K. Some tribological properties of SHS-produced chromium sulfide // *Int. J. SHS*. 2009. Vol. 18. No. 4. P. 287—292.
57. Калашиников И.Е., Болотова Л.К., Чернышова Т.А. Трибологические характеристики литых алюмоматричных композитов, модифицированных наноразмерными тугоплавкими порошками // *Росс. нанотехнологии*. 2011. Т. 6. No. 1—2. С. 144—153.
58. Амосов А.П., Никитин В.И., Никитин К.В., Рязанов С.А., Ермошкин А.А. Научно-технические основы применения процессов СВС для создания литых алюмоматричных композиционных сплавов, дискретно армированных наноразмерными керамическими частицами // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2013. No. 8. С. 3—9.
59. Амосов А.П., Титова Ю.В., Майдан Д.А., Ермошкин А.А., Тимошкин И.Ю. О применении нанопорошковой продукции азидной технологии СВС для армирования и модифицирования алюминиевых сплавов // *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2015. No. 1. С. 68—74.
60. Амосов А.П., Луц А.Р., Латухин Е.И., Ермошкин А.А. Применение процессов СВС для получения in situ алюмоматричных композиционных материалов, дискретно армированных наноразмерными керамическими частицами карбида титана: Обзор // *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2016. No. 1. С. 39—49.
61. Штанский Д.В., Бондарев А.В., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Левашов Е.А. Нанокоспозиционные антифрикционные покрытия для инновационных триботехнических систем // *Металловедение и терм. обраб. металлов*. 2015. No. 7. С. 77—84.
62. Sanin V.N., Ikornikov D.M., Andreev D.E., Yuxhvid V.I., Derin B., Yücel O. Protective  $Mo_2NiB_2$ —Ni coatings by centrifugal metallothermic SHS // *Int. J. SHS*. 2015. Vol. 24. Iss. 3. P. 161—170.
63. Горшков В.А., Качин А.Р., Юхвид В.И. СВС-металлургия литого композиционного материала  $Cr_3C_2$ —NiAl и защитные покрытия на его основе // *Перспективные материалы*. 2014. No. 10. С. 60—67.
64. Бажин П.М., Столин А.М., Алымов М.И., Чижиков А.П. Особенности получения длинномерных изделий из керамического материала с наноразмерной структурой методом СВС-экструзии. // *Перспект. материалы*. 2014. No. 11. С. 73—81.
65. Stolin A.M., Bazhin P.M., Mikheev M.V., Averichev O.A., Saguidollayev A.S., Kylyshbaev K.T. Deposition of protective coatings by electric arc cladding with SHS electrodes // *Weld. Int.* 2015. Vol. 29. No. 8. P. 657—660.
66. Степанова И.В., Панин С.В., Дураков В.Г., Корчагин М.А. Модификация структуры порошковых покрытий на никелевой и хромоникелевой основах введением наночастиц диборида титана при электронно-лучевой наплавке // *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия*. 2011. No. 1. С. 68—74.
67. Makhlof A.S.H. Current and advanced coating technologies for industrial applications // *Nanocoatings and ultra-thin films: Technologies and applications* / Eds. A.S.H. Makhlof, I. Tiginyanu. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011. P. 3—23.
68. Калита В.И., Комлев Д.И. Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой. М.: Лидер М, 2008.
69. Pawlowski L. Finely grained nanometric and submicrometric coatings by thermal spraying: a review // *Surf. Coat. Technol.* 2008. Vol. 202. P. 4318—4328.
70. Lomovsky O.I., Dudina D.V., Ulianiysky V.Yu., Zlobin S.B., Kosarev V.F., Klinkov S.V., Korchagin M.A., Know D.-H., Kim J.-S., Know Y.-S. Cold and detonation spraying of  $TiB_2$ —Cu nanocomposites // *Mater. Sci. Forum*. 2007. Vol. 534—536. P. 1371—1376.

71. Levashov E.A., Pogozhev Yu.S., Kudryashov A.E., Senatulin B.R., Moore J.J. Studying the effect of various nature zirconia nanocrystalline powder additions on composition and physical-chemical properties of SHIM-3B hard alloy // *Phys. Metals Metallogr.* 2003. Vol. 96. No. 2. P. 1–7.
72. Левашов Е.А., Погужев Ю.С., Кудряшов А.Е., Рупасов С.И., Левина В.В. Дисперсно-упрочненные наночастицами композиционные материалы на основе TiC–Ni для электроискрового легирования // *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия.* 2008. No. 2. С. 17–24.
73. Кудряшов А.Е., Левашов Е.А., Ветров Н.В., Шалькевич А.Б., Иванов Е.В., Солнцева И.С. Новый класс электроискровых покрытий для изделий из титановых сплавов, работающих в экстремальных условиях эксплуатации // *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия.* 2008. No. 3. С. 34–45.
74. Левашов Е.А., Кудряшов А.Е., Доронин А.Н., Крафт В.Б. О применении СВС-электродных материалов для электроискрового упрочнения валков стана горячей прокатки // *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия.* 2013. No. 1. С. 64–72.
75. Манакова О.С., Кудряшов А.Е., Левашов Е.А. О применении дисперсионно-твердеющих СВС-электродных материалов на основе карбида (Ti, Zr)C в технологии электроискрового легирования // *Электрон. обраб. материалов.* 2015. Т. 51. No. 5. С. 1–10.
76. Пантелеенко Ф.И., Саранцев В.В., Столин А.М., Бажин П.М., Азаренко Е.Л. Создание композиционных покрытий на основе карбида титана электроискровым легированием // *Электрон. обраб. материалов.* 2011. Т. 47. No. 4. С. 106–115.
77. Левашов Е.А., Штанский Д.В. Многофункциональные наноструктурированные пленки // *Успехи химии.* 2007. Т. 76. No. 5. С. 501–509.
78. Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Швейко А.Н., Комаров В.А., Блантер М.С., Скрылева Е.А., Ширманов Н.А., Левашов Е.А., Штанский Д.В. Наноструктурные покрытия Ti–Cr–B–N и Ti–Cr–Si–C–N для твердосплавного режущего инструмента // *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия.* 2010. No. 2. С. 39–47.
79. Федотов А.Ф., Амосов А.П., Ермошкин А.А., Лавро В.Н., Алтухов С.И., Латухин Е.И., Давыдов Д.М. Состав, структура и свойства СВС-прессованных катодов системы Ti–C–Al–Si и полученных из них вакуумно-дуговых покрытий // *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия.* 2013. No. 2. С. 29–36.
80. Walsh F.C., Ponce de Leon C. A review of the electrodeposition of metal matrix composite coatings by inclusion of particles in a metal layer: an established and diversifying technology // *Trans. Inst. Mater. Finish.* 2014. Vol. 92. No. 2. P. 83–98.
81. Ahmad Y.H., Mohamed A.M.A. Electrodeposition of nanostructured nickel-ceramic composite coatings: a review // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2014. Vol. 9. P. 1492–1963.
82. Sudagar J., Lian J., Sha W. Electroless nickel, alloy, composite and nanocoatings — a critical review // *J. Alloys Compd.* 2013. Vol. 571. P. 183–204.
83. Narayanan T.S.N.S., Seshadri S.K., Park S., Lee M.H. Electroless nanocomposite coatings: synthesis, characteristics, and applications // *Handbook of Nanoelectrochemistry: Electrochemical synthesis methods, properties and characterization techniques* / Eds. M. Aliofkhazraei, A.S.H. Makhlof. Springer Intern. Publ., 2015. P. 1–23.
84. Бородин И.М. Порошковая гальванотехника. М.: Машиностроение, 1990.
85. Ashby M.F. Chapter 4. Material property charts // *Materials selection in mechanical design* / Ed. M.F. Ashby. 4-th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. P. 57–96.

## References

1. Basu B., Kalin M. Tribology of ceramics and composites: a materials science perspective. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
2. Achanta S., Dress D., Celis J.-P. Nanocoatings for tribological applications. In: *Nanocoatings and ultra-thin films: Technologies and applications*. Eds. A.S.H. Makhlof, I. Tiginyanu. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011. P. 355–396.
3. Tang Z., Li S. A review of recent developments of friction modifier for liquid lubricants (2007-present). *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 2014. Vol. 18. No. 3. P. 119–139.
4. Levashov E.A., Rogachev A.S., Kurbatkina V.V., Maksimov Yu.M., Yukhvid V.I. Perspektivnye materialy i tekhnologii samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza [Advanced materials and technology of self-propagating high-temperature synthesis]. Moscow: Izd. dom MISIS, 2011.
5. Amosov A.P., Borovinskaya I.P., Merzhanov A.G., Sychev A.E. Principles and methods for regulation of dispersed structure of SHS powders: from monocrystallites to nanoparticles. *Int. J. SHS.* 2005. Vol. 14. No. 3. P. 165–186.
6. Amosov A.P. Materialy i pokrytiya tribotekhnicheskogo naznacheniya, poluchaemye po tekhnologii SVS [Materials and coatings of tribotechnical purpose, obtained by

- SHS technology]. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya*. 2010. No. 1. P. 15–20.
7. Puchkov V.N., Zaskalko P.P. Issledovanie vliyaniya dobavok nanostrukturirovannykh materialov na tribologicheskie svoystva smazochnykh masel [Study of influence of additives of nanostructured materials on the tribological properties of lubricating oils]. *Trenie i mazka v mashinakh i mekhanizmkh*. 2010. No. 11. P. 25–30.
  8. Akbulut M. Nanoparticle-based lubrication systems. *Powder Metall. Mining*. 2012. Vol. 1. No. 1. 1000e101 (open access). URL: <http://dx.doi.org/10.4172/2168-9806/1000e101> (accessed: 16.03.2016).
  9. An V., Bozheyev F., Richencoeur F., Irtegov Yu. Synthesis and characterization of nanolamellar tungsten und molybdenum disulfides. *Mater. Lett*. 2011. Vol. 65. No. 15–16. P. 2381–2383.
  10. An V.V., Irtegov Yu.A., Yavorovsky N.A., Galanov A.I., Pogrebenkov V.M. Tribologicheskie svoystva nanosloistnykh disulfidov vol'frama i molibdena [Tribological properties of nanolamellar disulfides of tungsten and molybdenum]. *Izv. vuzov. Fizika*. 2011. Vol. 54. No. 11. P. 326–331.
  11. Alves S.M., Barros B.S., Trajano M.F., Ribeiro K.S.B., Moura E. Tribological behavior of vegetable oil-based lubricants with nanoparticles of oxides in boundary lubrication conditions. *Tribol. Int*. 2013. Vol. 65. P. 28–36.
  12. Patil K.C., Hedge M.S., Tanu R. Chemistry of nanocrystalline oxide materials. Combustion synthesis, properties and applications. Singapore: World Scientific, 2008.
  13. Mukasyan A.S., Dinka P. Novel approaches to solution-combustion synthesis of nanomaterials. *Int. J. SHS*. 2007. Vol. 16. No. 1. P. 23–35.
  14. Martirosyan K.S. Carbon combustion synthesis of ceramic oxides nanopowders. *Adv. Sci. Technol*. 2010. Vol. 63. P. 236–245.
  15. Bichurov G.V. Halides in SHS azide technology of nitrides obtaining. In: *Nitride Ceramics: Combustion synthesis, properties, and applications*. Eds. A.A. Gromov, L.N. Chukhlomina. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015. P. 229–263.
  16. Nersisyan H.H., Lee J.H., Won C.W. SHS for a large scale synthesis method of transition metal nanopowders. *Int. J. SHS*. 2003. Vol. 12. No. 1. P. 149–158.
  17. Zakorzhnevskii V.V., Borovinskaya I.P. Some regularities of  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> synthesis in a commercial SHS reactor. *Int. J. SHS*. 2000. Vol. 9. No. 2. P. 171–191.
  18. Zakorzhnevskii V.V., Borovinskaya I.P. SHS of  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> from fine Si powders in the presence of blowing agents. *Int. J. SHS*. 2011. Vol. 20. No. 3. P. 156–160.
  19. Chukhlomina L.N., Ivanov Yu.F., Maksimov Yu.M., Akhunova Z.S., Krivosheeva E.N. Preparation of submicron silicon nitride powders via self-propagating high-temperature synthesis. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2007. Vol. 46. Iss. 1. P. 8–11.
  20. Wang Q., Liu G., Yang J., Chen Y., Li J. Preheating-assisted combustion synthesis of  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> powders at low N<sub>2</sub> pressure. *Mater. Res. Bull*. 2013. Vol. 48. Iss. 3. P. 1321–1323.
  21. Yang J., Han L., Chen Y., Liu G., Lin Z., Li J. Effects of pelletization of reactants and diluents on the combustion synthesis of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> powder. *J. Alloys Compd*. 2012. Vol. 511. Iss. 1. P. 81–84.
  22. Cui W., Zhu Y., Ge Y., Kang F., Yuan X., Chen K. Effects of nitrogen pressure and diluent content on the morphology of gel-cast-foam-assisted combustion synthesis of elongated  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> particles. *Ceram. Int*. 2014. Vol. 40. Iss. 8. Pt. A. P. 12553–12560.
  23. Nitride ceramics: Combustion synthesis, properties, and applications. Eds. A.A. Gromov, L.N. Chukhlomina. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015.
  24. Mukasyan A.S., Lin Ya-Ch., Rogachev A.S., Moskovskikh D.O. Direct combustion synthesis of silicon carbide nanopowder from the elements. *J. Am. Ceram. Soc*. 2013. Vol. 96. No. 1. P. 111–117.
  25. Moskovskikh D.O., Lin Ya-C., Rogachev A.S., McGinn P.J., Mukasyan A.S. Spark plasma sintering of SiC powders produced by different combustion synthesis routes. *J. Eur. Ceram. Soc*. 2015. Vol. 35. P. 477–486.
  26. Palmero P. Structural ceramic nanocomposites: a review of properties and powders' synthesis methods. *Nanomaterials*. 2015. Vol. 5. No. 2. P. 656–696.
  27. Zakorzhnevskii V.V., Borovinskaya I.P., Chevykalova L.A., Kelina I.Ya. Combustion synthesis of  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>—(MgO, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) composites. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2007. Vol. 46. No. 1–2. P. 8–12.
  28. Zhao Y.S., Yang Y., Li J.T., Borovinskaya I.P., Smirnov K.L. Combustion synthesis and tribological properties of SiAlON-based ceramic composites. *Int. J. SHS*. 2010. Vol. 19. No. 3. P. 172–177.
  29. Smirnov K.L. Combustion synthesis of hetero-modulus SiAlON—BN composites. *Int. J. SHS*. 2015. Vol. 24. No. 4. P. 220–226.
  30. Zhang Y., He X., Han J., Du Sh. Combustion synthesis of hexagonal boron nitride-based ceramics. *J. Mater. Process. Technol*. 2001. Vol. 116. P. 161–164.
  31. Zhang G.-J., Yang J.-F., Ando M., Ohji T. Nonoxide—boron nitride composites: in situ synthesis, microstructure and properties. *J. Eur. Ceram. Soc*. 2002. Vol. 22. No. 14–15. P. 2551–2554.

32. Carrapichano J.M., Gomes J.R., Silva R.F. Tribological behavior of  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -BN ceramic materials for dry sliding applications. *Wear*. 2002. Vol. 253. P. 1070—1076.
33. Amosov A.P., Shiganova L.A., Bichurov G.V., Kerson I.A. Combustion synthesis of TiN—BN nanostructured composite powder with the use of sodium azide and precursors of titanium and boron. *Modern Appl. Sci.* 2015. Vol. 9. No. 3. P. 133—144.
34. He W., Zhang B., Zhuang H., Li W. Combustion synthesis of  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -TiN composite powders. *Ceram. Int.* 2004. Vol. 30. Iss. 8. P. 2211—2214.
35. Evdokimov A.A., Sivkov A.A., Gerasimov D. Yu. Obtaining ceramic based on  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and TiN by spark plasma sintering. *Glass Ceram.* 2016. Vol. 72. Iss. 9. P. 381—386.
36. Yoshimura M., Komura O., Yamakawa A. Microstructure and tribological properties of nano-sized  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . *Scr. Mater.* 2001. Vol. 44. P. 1517—1521.
37. Tatami J., Kodama E., Watanabe H., Nakano H., Wakihara T., Komeya K., Meguro T., Azushima A. Fabrication and wear properties of TiN nanoparticle-dispersed  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics. *J. Ceram. Soc. Jap.* 2008. Vol. 116. No. 6. P. 749—754.
38. Kata D., Ohyanagi M., Munir Z.A. Induction-field-activated self-propagating high-temperature synthesis of AlN—SiC solid solutions in the  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Al—C system. *J. Mater. Res.* 2000. Vol. 15. No. 11. P. 2514—2525.
39. Vallauri D., Atías Adrián I.C., Chrysanthou A. TiC—TiB<sub>2</sub> composites: A review of phase relationships, processing and properties. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2008. Vol. 28. Iss. 8. P. 1697—1713.
40. Vallauri D., DeBenedetti B.L., Jaworska, Klimczyk P., Rodriguez M.A. Wear-resistant ceramic and metal—ceramic ultrafine composites fabricated from combustion synthesized metastable powders. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2009. Vol. 27. Iss. 6. P. 996—1003.
41. Barsoum M.W. MAX phases. Properties of machinable ternary carbides and nitrides. Weinheim: Wiley-VCH, 2013.
42. Myhra S., Summers J.W.B., Kisi E.H.  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  a layered ceramics exhibiting ultra-low friction. *Mater. Lett.* 1999. Vol. 39. No. 1. P. 6—11.
43. Meng F., Liang B., Wang M. Investigation of formation mechanism of  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  by self-propagating high-temperature synthesis. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2013. Vol. 41. P. 152—161.
44. Davydov D.M., Amosov A.P., Latukhin E.I. Synthesis of MAX-phase of titanium silicon carbide ( $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ ) as a promising electric contact material by SHS pressing method. *Appl. Mech. Mater.* 2015. Vol. 792. P. 596—601.
45. Shi X., Wang M., Zhai W., Xu Z., Zhang Q., Chen Y. Influence of  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  content on tribological properties of NiAl matrix self-lubricating composites. *Mater. Design.* 2013. Vol. 45. P. 179—189.
46. Rohatgi P.K., Tabandeh-Khorsid M., Omrani E. Chapter 8. Tribology of metal-matrix composites. In: *Tribology for scientists and engineers: From basics to advanced concepts*. Eds. P.L. Menezes et al. N.Y.: Springer Science + Business Media, 2013.
47. Levashov E., Kurbatkina V., Zaytsev A. Improved mechanical and tribological properties of metal-matrix composites dispersion-strengthened by nanoparticles. *Materials*. 2010. No. 3. P. 97—109.
48. Rapoport L., Leshchinsky V., Lvovsky I., Volovik Yu., Feldman Y., Popovitz-Biro R., Tenne R. Superior tribological properties of powder materials with solid lubricant nanoparticles. *Wear*. 2003. Vol. 255. No. 7—12. P. 794—800.
49. Pogozhev Yu.S., Potanin A.Yu., Levashov, E.A., Kochetov N.A., Kovalev D.Yu., Rogachev A.S. SHS of TiC—TiNi composites: Effect of initial temperature and nanosized refractory additives. *Int. J. SHS*. 2012. Vol. 21. No. 4. P. 202—211.
50. Amosov A.P., Fedotov A.F., Latukhin E.I., Novikov V.A. TiC—Al interpenetrating composites by SHS pressing. *Int. J. SHS*. 2015. Vol. 24. No. 4. P. 187—191.
51. Fedotov A.F., Amosov A.P., Latukhin E.I., Novikov V.A. Poluchenie alyumokeramicheskikh karkasnykh kompozitov na osnove MAX-fazy  $\text{Ti}_2\text{AlC}$  metodom SVS-pressovaniya [Production of aluminum-ceramic skeleton composites on the basis of the MAX-phase  $\text{Ti}_2\text{AlC}$  by the method of SHS-compaction]. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2015. No. 6. P. 53—62.
52. Xue Q.J., La P.Q. Combustion synthesized bulk nanocrystalline materials and intermetallic matrix composites and their tribological properties. *Chin. J. Nonferr. Met.* 2004. Vol. 14. No. 1. P. 128—137.
53. La P.Q., Wang H.D., Bai Y.P., Yang Y., Wei Y.P., Lu X.F., Zhao Y., Cheng C.J. Microstructures and mechanical properties of bulk nanocrystalline  $\text{Fe}_3\text{Al}$  materials with 5, 10, and 15 wt. % Cr prepared by aluminothermic reaction. *Mater. Sci. Eng. A*. 2011. Vol. 528. No. 21. P. 6489—6496.
54. Sanin V., Andreev D., Ikornikov D., Yukhvid V. Cast intermetallic alloys and composites based on them by combined centrifugal casting — SHS process. *Open J. Metal*. 2013. No. 3. P. 12—24.
55. Nabavi A., Goroshin S., Frost G.L., Barthelat F. Mechanical properties of chromium-chromium sulfide cermets fabricated by self-propagating high-temperature synthesis. *J. Mater. Sci.* 2015. Vol. 50. P. 3434—3446.
56. Tomoshige R., Niitsu K., Sekiguchi T., Oikawa K., Ishida K.

- Some tribological properties of SHS-produced chromium sulfide. *Int. J. SHS*. 2009. Vol. 18. No. 4. P. 287–292.
57. Kalashnikov I.E., Bolotova L.K., Chernyshova T.A. Tribologicheskie kharakteristiki litykh alyumomatrichnykh kompozitov, modifitsirovannykh nanorazmernymi tugo-plavkimi poroshkami [Tribological characteristics of cast aluminum-matrix composites, modified by nanosized refractory powders]. *Rossiiskie nanotekhnologii*. 2011. Vol. 6. No. 1–2. P. 144–153.
  58. Amosov A.P., Nikitin V.I., Nikitin K.V., Ryazanov S.A., Ermoshkin A.A. Nauchno-tekhnicheskie osnovy primeneniya protsessov SVS dlya sozdaniya litykh alyumomatrichnykh kompozitsionnykh splavov, diskretno armirovannykh nanorazmernymi keramicheskimi chastitsami [Scientific and technical basis for the use of SHS processes for creating cast aluminum matrix composite alloys, reinforced with discrete ceramic nanoparticles]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*. 2013. No. 8. P. 3–10.
  59. Amosov A.P., Titova Yu.V., Maydan D.A., Ermoshkin A.A., Timoshkin I.Yu. Application of the nanopowder production of azide SHS technology for the reinforcement and modification of aluminum alloys. *Rus. J. Non-Ferrous Met.* 2015. Vol. 56. No. 2. P. 222–228.
  60. Amosov A.P., Luts R.A., Latukhin E.I., Ermoshkin A.A. Application of SHS processes for in situ preparation of alumomatrix composite materials discretely reinforced by nanodimensional titanium carbide particles (review). *Rus. J. Non-Ferr. Met.* 2016. Vol. 57. No. 2. P. 106–112.
  61. Shtansky D.V., Bondarev A.V., Kiryukhantsev-Korneev F.V., Levashov E.A. Nanokompozitsionnye antifriktsionnye pokrytiya dlya innovatsionnykh tribotekhnicheskikh sistem [Antifriction nanocomposite coatings for innovative tribological systems]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2015. No. 7. P. 77–84.
  62. Sanin V.N., Ikornikov D.M., Andreev D.E., Yukhvid V.I., Derin B., Yücel O. Protective  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$ –Ni coatings by centrifugal metallothermic SHS. *Int. J. SHS*. 2015. Vol. 24. Iss. 3. P. 161–170.
  63. Gorshkov V.A., Kachin A.R., Yukhvid V.I. SVS-metallurgiya litogo kompozitsionnogo materiala  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ –NiAl i zashchitnye pokrytiya na ego osnove [SHS-metallurgy of cast composite material  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ –NiAl and protective coatings based on it]. *Perspektivnye materialy*. 2014. No. 10. P. 60–67.
  64. Bazhin P.M., Stolin A.M., Alymov M.I., Chizhikov A.P. Osobennosti polucheniya dlinnomernykh izdelii iz keramicheskogo materiala s nanorazmernoi strukturoi metodom SVS-ekstruzii [Peculiarities of obtaining long products of ceramic material with a nanosize structure by the method of SHS-extrusion]. *Perspektivnye materialy*. 2014. No. 11. P. 73–81.
  65. Stolin A.M., Bazhin P.M., Mikheev M.V., Averichev O.A., Saguidollayev A.S., Kylyshbaev K.T. Deposition of protective coatings by electric arc cladding with SHS electrodes. *Weld. Int.* 2015. Vol. 29. No. 8. P. 657–660.
  66. Stepanova I.V., Panin S.V., Durakov V.G., Korchagin M.A. Modifikatsiya struktury poroshkovykh pokrytii na nikelovoi i khromonikelovoi osnovakh vvedeniem nanochastits diborida titana pri elektronno-luchevoi naplavke [Modification of the structure of powder coatings on nickel and chromium-nickel bases by introducing nanoparticles of titanium diboride during electron-beam surfacing]. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2011. No. 1. P. 68–74.
  67. Makhlof A.S.H. Current and advanced coating technologies for industrial applications. In: *Nanocoatings and ultra-thin films: Technologies and applications*. Eds. A.S.H. Makhlof, I. Tiginyanu. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011. P. 3–23.
  68. Kalita V.I., Komlev D.I. Plazmennye pokrytiya s nanokristallicheskoj i amorfnoy strukturoi [Plasma coatings with nanocrystalline and amorphous structure]. Moscow: Lider M, 2008.
  69. Pawlowski L. Finely grained nanometric and submicrometric coatings by thermal spraying: a review. *Surf. Coat. Technol.* 2008. Vol. 202. P. 4318–4328.
  70. Lomovsky O.I., Dudina D.V., Ulianitsky V.Yu., Zlobin S.B., Kosarev V.F., Klinkov S.V., Korchagin M.A., Know D.-H., Kim J.-S., Know Y.-S. Cold and detonation spraying of  $\text{TiB}_2$ –Cu nanocomposites. *Mater. Sci. Forum*. 2007. Vol. 534–536. P. 1371–1376.
  71. Levashov E.A., Pogozhev Yu.S., Kudryashov A.E., Senatulin B.R., Moore J.J. Studying the effect of various nature zirconia nanocrystalline powder additions on composition and physical-chemical properties of SHIM-3B hard alloy. *Phys. Metals Metallogr.* 2003. Vol. 96. No. 2. P. 1–7.
  72. Levashov E.A., Pogozhev Yu.S., Kudryashov A.E., Rupasov S.I., Levina V.V. Dispersno-uprochnennye nanochastitsami kompozitsionnye materialy na osnove  $\text{TiC}$ –Ni dlya elektroiskrovogo legirovaniya [Nanoparticles dispersion-strengthened composite materials based on  $\text{TiC}$ –Ni for the spark alloying]. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2008. No. 2. P. 17–24.
  73. Kudryashov A.E., Levashov E.A., Vetrov N.V., Shalkevich A.B., Ivanov E.V., Solntseva I.S. Novyi klass elektroiskrovyykh pokrytii dlya izdelii iz titanovykh splavov, rabotayushchikh v ekstremal'nykh usloviyakh ekspluatatsii



- [New class of electric-spark coatings for products made of titanium alloys, working in extreme conditions]. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2008. No. 3. P. 34—45.
74. Levashov E.A., Kudryashov A.E., Doronin O.N., Krakht V.B. On the application of SHS-electrode materials for the electrospark hardening of rolls for hot rolling mill. *Rus. J. Non-Ferr. Met.* 2014. Vol. 55. No. 4. P. 394—402.
  75. Manakova O.S., Kudryashov A.E., Levashov E.A. On the application of dispersion hardened SHS electrode materials based on (Ti, Zr)C carbide using electrospark deposition. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2015. Vol. 51. No. 5. P. 413—421.
  76. Panteleenko F.I., Sarantsev V.V., Stolin A.M., Bazhin P.M., Azarenko E.L. Sozdanie kompozitsionnykh pokrytii na osnove karbida titana elektroiskrovym legirovaniem [The creation of composite coatings based on titanium carbide by electric spark alloying]. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 2011. Vol. 47. No. 4. P. 106—115.
  77. Levashov E.A., Shtansky D.V. Mnogofunktsional'nye nanostrukturirovannye plenki [Multifunctional nanostructured films]. *Uspekhi khimii*. 2007. Vol. 76. No. 5. P. 501—509.
  78. Kiryukhantsev-Korneev F.V., Sheveiko A.N., Komarov V.A., Blanter M.S., Skryleva E.A., Shirmanov N.A., Levashov E.A., Shtansky D.V. Nanostructured Ti—Cr—B—N and Ti—Cr—Si—C—N coatings for hard-alloys cutting tools. *Rus. J. Non-Ferr. Met.* 2011. Vol. 52. No. 3. P. 311—318.
  79. Fedotov A.F., Amosov A.P., Ermoshkin A.A., Lavro V.N., Altukhov S.I., Latukhin E.I., Davydov D.M. Composition, structure and properties of SHS-compacted cathodes of the Ti—C—Al—Si system and vacuum-arc coatings obtained from them. *Rus. J. Non-Ferr. Met.* 2014. Vol. 55. No. 5. P. 477—484.
  80. Walsh F.C., Ponce de Leon C. A review of the electrodeposition of metal matrix composite coatings by inclusion of particles in a metal layer: an established and diversifying technology. *Trans. Inst. Mater. Finish.* 2014. Vol. 92. No. 2. P. 83—98.
  81. Ahmad Y.H., Mohamed A.M.A. Electrodeposition of nanostructured nickel-ceramic composite coatings: A review. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2014. Vol. 9. P. 1492—1963.
  82. Sudagar J., Lian J., Sha W. Electroless nickel, alloy, composite and nanocoatings: A critical review. *J. Alloys Compd.* 2013. Vol. 571. P. 183—204.
  83. Narayanan T.S.N.S., Seshadri S.K., II Park S., Lee M.H. Electroless nanocomposite coatings: synthesis, characteristics, and applications. In: *Handbook of Nanoelectrochemistry: Electrochemical synthesis methods, properties and characterization techniques*. Eds. M. Aliofkhazraei, A.S.H. Makhlof. Springer Intern. Publ., 2015. P. 1—23.
  84. Borodin I.M. Poroshkovaya gal'vanotekhnika [Powder electroplating]. Moscow: Mashinostroenie, 1990.
  85. Ashby M.F. Chapter 4. Material property charts. In: *Materials selection in mechanical design*. Ed. M.F. Ashby. 4-th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. P. 57—96.