

УДК 621.762

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-3-14-21

История отечественных твердых сплавов

© 2017 г. **Е.А. Левашов, В.С. Панов, И.Ю. Коняшин**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Статья поступила в редакцию 10.02.17 г., доработана 28.02.17 г., подписана в печать 13.03.17 г.

В современной технике спеченные твердые сплавы имеют очень большое значение. Трудно назвать отрасль промышленности, в которой в той или иной мере не использовались бы твердые сплавы. Уникальные свойства по твердости, прочности, износостойкости, окислительной и жаропрочности, коррозионной стойкости позволяют применять твердосплавные изделия в качестве режущего инструмента, при бурении нефтяных скважин, в горно-обрабатывающей промышленности, при бесстружковой обработке металлов, в военной, атомной и космической технике, измерительном инструменте, вакуумной и электротехнической технике, для получения синтетических алмазов и др. В настоящей работе представлен обзор этапов появления и развития производства отечественных твердых сплавов. Показан вклад отечественных ученых в разработку различных марок твердых сплавов и становление их производства. Отмечена выдающаяся роль проф. Г.А. Меерсона в вопросе развития твердосплавной промышленности. Приведены результаты исследований многих ученых из России и стран СНГ из таких институтов, как Всероссийский научно-исследовательский институт твердых сплавов (г. Москва), Украинский институт материаловедения (г. Киев), Институт сверхтвердых материалов (г. Киев), Уральский филиал РАН (г. Кировоград), Уральский политехнический институт (г. Екатеринбург), Томский политехнический институт (г. Томск), Белорусский институт порошковой металлургии (г. Минск), Институт металлургии и материаловедения (г. Москва), Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (г. Черногловка, Московская обл.).

Ключевые слова: твердый сплав, порошковая металлургия, состав, структура, свойства, технология, производство, инструмент, покрытие, наносплавы.

Левашов Е.А. – докт. техн. наук, проф., акад. РАЕН, директор НУЦ СВС МИСиС–ИСМАН, зав. кафедрой порошковой металлургии и функциональных покрытий (ПМИФП) НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: levashov@shs.misis.ru.

Панов В.С. – докт. техн. наук, профессор кафедры ПМИФП НИТУ «МИСиС». E-mail: zeinalova@rambler.ru.

Коняшин И.Ю. – канд. техн. наук, директор по исследованиям и разработкам компании «Element Six GmbH» (Staedeweg 18, 36151, Burghaun, Germany), вед. эксперт кафедры ПМИФП НИТУ «МИСиС». E-mail: igor.konyashin@e6.com.

Для цитирования: Левашов Е.А., Панов В.С., Коняшин И.Ю. История отечественных твердых сплавов // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2017. № 3. С. 14–21.
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-3-14-21.

Levashov E.A., Panov V.S., Konyashin I.Yu.

History of domestic cemented carbides

Sintered cemented carbides are very important for modern engineering. It is difficult to point out an industry having no interest in cemented carbides. Their unique properties – hardness, strength, wear resistance, scale resistance, high temperature strength, corrosive resistance – make them suitable for different applications such as metal working, oil-well drilling, mining industry, chipless machining, arms industry, nuclear, space, vacuum and electric engineering, instrumentation, synthetic diamond fabrication process, etc. This paper provides an overview of domestic cemented carbide evolution and fabrication stages. The contribution of national researchers to the development of various cemented carbide grades and their fabrication progress is shown. The outstanding role of Professor G.A. Meerson in the cemented carbide industry development is mentioned. The paper cites the results of many Russian and CIS researchers from such leading institutes as the Russian National Cemented Carbide Research Institute (Moscow, Russia), Ukrainian Institute of Materials Science (Kiev, Ukraine), Institute for Superhard Materials (Kiev, Ukraine), Ural Branch of the Russian Academy of Science (Kirovograd, Russia), Ural Polytechnic Institute (Ekaterinburg, Russia), Tomsk Polytechnic Institute (Tomsk, Russia), Belarusian Institute of Powder Metallurgy (Minsk, Belarus), Institute of Metallurgy and Materials Science (Moscow, Russia), Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science, Russian Academy of Sciences (Chernogolovka, Russia).

Keywords: cemented carbide, powder metallurgy, composition, structure, properties, technology, fabrication, tool, coating, nanomaterials.

Levashov E.A. – Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. of RAS, Director of the Scientific-educational center SHS MISIS-ISMAN, Head of the Department of powder metallurgy and functional coatings (PM&FC), NUST «MISIS» (119049, Russia, Moscow, Leninsky pr., 4). E-mail: levashov@shs.misis.ru.

Panov V.S. – Dr. Sci. (Tech.), Prof., Department of PM&FC, NUST «MISIS». E-mail: zeinalova@rambler.ru.

Konyashin I.Yu. – Cand. Sci. (Tech.), Manager of Research and Development, Element Six GmbH (Staedeweg 18, 36151, Burghaun, Germany), Head expert of the Department of PM&FC, NUST «MISIS». E-mail: igor.konyashin@e6.com.

Citation: Levashov E.A., Panov V.S., Konyashin I.Yu. Istoriya otechestvennykh tverdykh splavov. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2017. No. 3. С. 14–21. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-3-14-21.

Введение

Анализ отечественных публикаций, посвященных твердым сплавам (ТС), позволил сделать вывод о растущем интересе фундаментальной и прикладной науки к данной области. В настоящее время трудно представить многие отрасли экономики без их применения. Уникальные показатели твердости, прочности, износостойкости, окалинстойкости, коррозионной стойкости позволяют использовать твердосплавные изделия в различных отраслях, таких как металлообработка, горнодобывающая промышленность, машиностроение, химическая и атомная отрасли и др.

В данной статье рассмотрены некоторые аспекты методологии и подходы к разработке технологий производства твердых сплавов с учетом областей их применения. Целью обзора является отражение состояния отечественной твердосплавной промышленности в течение многих десятилетий и вклада ученых в развитие производства отечественных твердых сплавов.

Историческая справка

Твердые сплавы представляют собой композиционные материалы особого класса, обладающие высокими твердостью, износостойкостью и прочностью, которые сохраняются до температуры 600–800 °С, а также повышенной окалино- и коррозионной стойкостью. Эти материалы состоят из зерен тугоплавкого соединения (карбида, нитрида, карбонитрида) и сравнительно легкоплавкого связующего металла на основе кобальта и/или никеля, легированного в некоторых марках твердых сплавов хромом, молибденом, ванадием, танталом и другими элементами. Получают ТС методом порошковой металлургии [1].

Свойства ТС существенно зависят не только от состава, но и от размера зерна карбидной фазы. Поэтому эти сплавы принято классифицировать на наноразмерные, ультрадисперсные, особомелкозернистые, мелкозернистые, среднезернистые, крупнозернистые и особокрупнозернистые.

В создание спеченных ТС значительный вклад внес Х. Шретер, по патентам которого в 1923 г. немецкой фирмой «Osram» впервые был получен сплав на основе карбида вольфрама с кобальтом. В 1926 г. фирма «Krupp» (Германия) осуществила промышленный выпуск твердого сплава под торговой маркой Widia (Widia-N, WC–6%Co), режущий инструмент из которого на Лейпцигской ярмарке произвел фурор, переворот в металлообрабатывающей промышленности, позволив увеличить скорость резания в 10–20 раз (в зависимости от обрабатываемого материала).

Появление и становление спеченных твердых сплавов в нашей стране связано с именем Г.А. Меерсона — родоначальника технологий редких металлов, а также тугоплавких металлов и их карбидов. В 1929 г. после его командировки в Германию совместно с Л.П. Мальковым на электроламповом заводе («Лампочка», Москва) были получены первые образцы отечественного ТС, а затем налажен опытный выпуск изделий из твердого сплава, получившего название «Победит» [1]. Сплав, содержащий 90 % карбида вольфрама и 10 % кобальта, использовался для изготовления режущих пластин, волок для протяжки проволоки и вставок для буровых коронок [1–5]. С этого момента по разработанной технологии [3, 4] начинается бурное развитие отечественной твердосплавной промышленности.

В начале 1930-х годов производство ТС было переведено на завод редких элементов (с 1936 г. — Московский комбинат твердых сплавов (МКТС)), где под руководством Л.П. Малькова и В.Я. Рискина по усовершенствованной технологии [1] был организован выпуск твердого сплава марки РЭ8 (состава 92%WC–8%Co), послуживший основой производства широкой гаммы ТС, содержащих 6–15 % Co), а также сплавов Альфа (TiC–WC–Co). С 1934 г. завод стал выпускать ТС марок РЭ6, РЭ12, РЭ15 (6–15 % Co) взамен Победита. В послевоенные годы эти ТС производились под марками ВК6, ВК8, ВК15 (WC–Co) и Т14К8, Т15К6, Т5К10 (WC–TiC–Co) на МКТС [1]. Сплавы РЭ12 и РЭ15

впервые в мире применили для ударно-вращательного бурения горных пород средней крепости.

В 1939 г. на МКТС под руководством В.И. Третьякова была разработана и внедрена технология получения сплава WC—Ni (Рэникс), из которого наряду с РЭБ в годы Великой Отечественной войны изготавливали сердечники для бронебойных снарядов [4].

Во время войны часть оборудования и сама технология твердых сплавов с МКТС были переведены в г. Кировоград Свердловской обл. (впоследствии — Кировоградский комбинат твердых сплавов), где под руководством Г.С. Креймера и А.Н. Зеликмана осуществлялся выпуск изделий из ТС для фронта.

В 1948 г. в Москве был организован головной институт по твердым сплавам — Всесоюзный научно-исследовательский институт твердых сплавов (ВНИИТС). Здесь ассортимент ТС пополнился новыми марками (Т30К4, Т60К6, ТМЗ) и сериями (М, В, ОМ, ХОМ, В253, К, С, КС) [1, 4].

В конце 1940-х годов, находясь в командировке в Австрии и Германии, молодой инженер В.С. Раковский — впоследствии крупнейший ученый в области порошковой металлургии — приобрел резец из твердого сплава для высокоскоростной обработки стальных деталей с большим срезом стружки. В нашей стране на тот момент подобных изделий не было. Резец был передан во ВНИИТС, где в начале 1950-х годов [6, 7] Г.С. Креймером с сотр. был создан аналог и разработана технология первого отечественного Та-содержащего твердого сплава под маркой ТТ7К12 (81%WC—4%TiC—3%TaC—12%Co). В это же время Г.С. Креймер с сотр. разработали [1, 4] серию специализированных крупнозернистых WC—Co-сплавов группы В (4—11 % Co) для перфораторного бурения горных пород и шарошечного бурения скважин.

В 1970-е годы под руководством В.А. Фальковского и В.А. Ивенсена были созданы особокрупнозернистые твердые сплавы WC—Co с индексами С, К и КС [8] для оснащения высадочного и штампового инструмента и особомелкозернистые сплавы WC—Co [1]. Одновременно под руководством Г.С. Креймера и В.И. Третьякова были разработаны отечественные танталсодержащие ТС марок ТТ20К9, ТТ8К6, ТТ10К8-Б, ТТ10К8А и др. [1].

Большой вклад в развитие твердосплавной промышленности в 60-е и 70-е годы прошлого века вновь внес Г.А. Меерсон. Им впервые была доказана целесообразность введения небольших добавок

карбида тантала (несмотря на его дороговизну) в WC—Co-сплавы [9].

В производственных условиях МКТС был апробирован метод получения сплавов ВК8Та и ВК12Та и налажен их выпуск для Электростальского машиностроительного завода. Позже была предпринята попытка замены дефицитного карбида тантала на карбид ниобия [9].

На МКТС под руководством Г.А. Меерсона и при активном участии В.С. Панова и В.Н. Глушкова была внедрена технология получения твердого сплава Т15К6 со знаком качества [10] за счет использования порошка вольфрама, полученного «прямоточным» восстановлением WO₃ в одну стадию (подача водорода осуществлялась по ходу движения лодочек, а не против, как было принято в производстве).

Видная роль в развитии отечественной твердосплавной промышленности принадлежит В.И. Третьякову. Под его руководством появились усовершенствованные методы получения порошковых полуфабрикатов, внедрена технология вакуумного спекания твердых сплавов, разработаны новые марки ТС, в том числе безвольфрамовые, освоено производство режущего инструмента с износостойким покрытием [1, 4]. В 1980-е годы им совместно с Л.И. Клячко, Т.А. Емельяновой и И.В. Кобицким созданы технологии производства особомелкозернистых и ультрадисперсных твердых сплавов марок ВХ, НС и НСТ взамен сплавов М и ОМ для сверл, разверток, метчиков, дисковых фрез и другого инструмента [11—13].

В это же время появились новые разработки по твердым сплавам:

- сушка распылением (МКТС им. С.П. Соловьева, г. Москва);
- спекание твердых сплавов в печах с контролируемой газовой средой (Украинский институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля, г. Киев);
- непрерывный процесс получения твердосплавных смесей во вращающейся печи (ВНИИТС);
- технология упрочнения твердосплавного породоразрушающего инструмента путем его облучения малыми дозами гамма-квантов (Томский политехнический институт);
- получение твердосплавных изделий при высоких гидростатических давлениях (Институт физики высоких давлений, г. Троицк);
- технология получения методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) наноразмерного и субмикронного порошков

карбида вольфрама и изделий из ультрадисперсных ТС (Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, г. Черноголовка, Московская обл.);

— способ изготовления зубков для перфораторного бурения сплавами WC—Co (ОАО Волгобурмаш, г. Самара);

— производство ТС и керамики (ЗАО «АЛГ» (г. Москва) и ОАО «Серпуховский инструментальный завод» «ТВИНТОС») и др.

С целью экономии дефицитного и дорогостоящего вольфрама в филиале ВНИИТС — Узбекском комбинате тугоплавких и жаропрочных металлов (УзКТЖиМ) (г. Чирчик, Ташкентская обл.) — продолжены работы по безвольфрамовым твердым сплавам и в 1986 г. был выпущен ГОСТ 226530 на их марки ТН20 и КНТ16 [14]. Дальнейшее развитие по созданию и усовершенствованию эти сплавы получили на Кировоградском комбинате твердых сплавов и в МИСиС на кафедре металлургии редких металлов и порошковой металлургии [1, 14–16].

Сотрудники этой кафедры под руководством В.С. Панова предложили новые составы и разработали метод получения жаростойких и жаропрочных марок твердых сплавов ТА и ВА [16, 17], в которых кобальт был заменен алюминидом никеля (NiAl и Ni_3Al). Новая технология прошла опытно-промышленную проверку на МКТС им. С.П. Соловьева, а инструмент из сплава ВА8 на ряде операций точения труднообрабатываемых материалов показал стойкость, в 1,7–2,2 раза более высокую по сравнению со сплавами WC—Co. Этими же учеными была разработана технология нанесения на твердосплавный инструмент покрытий из нитрида кремния Si_3N_4 , а также исследовано влияние различных пластификаторов на свойства ТС.

В 1990-е годы, в период экономического хаоса, твердосплавное производство удалось сохранить, во многом благодаря усилиям Л.И. Клячко — генерального директора «Союзтвердосплав» и директора ВНИИТС. С его именем связано заметное развитие всей отечественной твердосплавной промышленности и взаимодействие отраслевой науки с производством. Как производственник и руководитель крупнейшего производственного объединения страны, он уделял большое внимание решению проблем института и предприятий.

Важный вклад в развитие твердосплавной промышленности внесли А.Г. Мержанов, И.П. Боровинская, В.И. Ратников, А.Н. Питюлин, Е.А. Ле-

вахов и др., которые с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза получили безвольфрамовые твердые сплавы СТИМ (синтетические твердые инструментальные материалы) [18–21]. Ими создан целый ряд сплавов для различных применений (резцы, штамповый и прокатный инструмент, окалино- и жаростойкие изделия, износостойкие защитные покрытия). Данные разработки используются во многих отраслях промышленности.

С учетом экспериментальных данных, полученных в работе [22], на кафедре порошковой металлургии и функциональных покрытий МИСиС проводятся исследования по созданию способа спекания с двумя и более последовательно образующимися жидкими фазами.

В.Н. Шуменко впервые предложил способ «мокрого» прессования с лиофобной жидкостью, который в начале 2000-х годов получил развитие в технологии ТС [23]. Данное техническое решение позволило существенно снизить потери давления на внешнее трение при прессовании в стальной пресс-форме, а также увеличить равноплотность по объему брикетов, практически сохранив размер частиц карбидной фазы.

В последние годы появилось много работ, посвященных наноструктурным твердым сплавам, к которым проявляют большой интерес и отечественные ученые [24, 25].

Необходимо отметить выдающийся вклад Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (г. Москва). С использованием созданной под руководством Ю.В. Цветкова плазмохимической технологии [26, 27] были получены ультрадисперсные порошки вольфрама, из которых на УзКТЖиМ изготовили наноструктурированные твердые сплавы типа ВК6 [28]. При участии Ю.В. Благовещенского методом плазмохимического синтеза впервые были получены нанопорошки WC и сплавов WC—Co для производства ТС нового поколения [29]. Данные порошки нашли применение в СВС-технологии получения наномодифицированных сплавов [20, 21]. Кроме того, путем электроискрового плазменного спекания нанопорошков WC—Co с различным содержанием кобальта были получены сплавы с превосходными свойствами [30], определившими перспективу дальнейшего развития отечественных ТС для лезвийного инструмента.

Несомненно, важную роль в развитии материаловедения и технологии твердых сплавов играет

И.Ю. Коняшин. Проведенные им в 1990-е годы исследования послужили основой для создания новых технологий нанесения износостойких покрытий на вольфрамкобальтовые и безвольфрамовые твердые сплавы, оригинального метода получения карбидохромовых покрытий за счет взаимодействия паров металлического хрома с безвольфрамовыми ТС в вакууме [31–35], а также плазмохимической газофазной технологии осаждения алмазных покрытий на твердые сплавы с использованием специальных промежуточных слоев [36–38]. Совместно с сотрудниками кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий МИСиС и учеными из ИСМАН им выполнен цикл работ по созданию твердых WC–Co-сплавов с использованием в качестве исходного сырья мелкозернистых и субмикронных СВС-порошков карбида вольфрама [39–41], в которых показано, что данные порошки значительно расширяют сырьевую базу твердосплавной промышленности. Несколько позже были разработаны материаловедческие основы и технология производства специальных марок твердых сплавов для породо-разрушающего инструмента и дорожных резцов из особокрупнозернистых порошков карбида вольфрама с наноструктурированной связкой на основе кобальта [42, 43].

Заслуживают внимания работы по совершенствованию технологии получения твердых сплавов, подбору их оптимального состава, нанесению износостойких покрытий на твердосплавные изделия, а также исследования, посвященные вопросам материаловедения, проведенные в последние годы в АО «КЗТС» (г. Кировоград, Свердловская обл.), ОАО «Победит» (г. Владикавказ) и ВНИИТС (г. Москва) [47].

Заметный вклад в разработку сплавов СТИМ и СИГМА, применяющихся для изготовления различного твердосплавного инструмента, износостойких покрытий, порошков карбидов для приготовления твердосплавных смесей внесли сотрудники ИСМАН (г. Черноголовка, Московская обл.) под руководством А.Г. Мержанова и Е.А. Левашова.

Следует отметить работы кафедры порошковой металлургии под руководством акад. РАН В.Н. Анциферова Пермского национального исследовательского политехнического университета в области порошковой металлургии, материаловедения различных материалов, в том числе твердых сплавов.

Кафедрой порошковой металлургии (зав. кафедрой А.П. Амосов) Самарского государственного технического университета совместно с ОАО «Волгобурмаш» проведены работы по совершенствованию состава, структуры, технологии и применению зубков буровых и шарошечных долот из новых марок твердых сплавов [44–46].

По технологии плазмохимического синтеза в ИМЕТ им. А.А. Байкова впервые были получены нанопорошки WC и сплавов WC–Co для производства нового поколения твердых сплавов. Данные порошки нашли применение в СВС-технологии получения наномодифицированных сплавов. За счет использования плазмохимического WC, введения ингибиторов и оптимизации технологии получения смеси WC–Co авторы получили ультрадисперсные сплавы. Методом электроискрового плазменного спекания порошков WC–Co с различным содержанием кобальта были получены сплавы с повышенными, по мнению авторов, свойствами, которые должны определить перспективу дальнейшего развития отечественных твердых сплавов [29, 30].

Заключение

Рассмотрен вклад отечественных ученых в вопросах появления и развития производства твердых сплавов. Отмечена роль Г.А. Меерсона в становлении спеченных твердых сплавов. Показано, что благодаря своим уникальным свойствам ТС находят применение во многих отраслях народного хозяйства.

Приведенные материалы могут быть использованы для последующих исследований в области твердых сплавов.

Авторы приносят извинения за то, что из-за недостатка объема статьи не удалось отметить вклад всех исследователей, определивших устойчивое развитие отечественных твердых сплавов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по программе повышения конкурентоспособности НИТУ «МИСиС» среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 гг., Соглашение № 02.А03.21.0004 от 27 августа 2013 года (проект No. K2-2015-058).

Литература/References

1. Третьяков В.И. Основы металлургии и технологии производства спеченных твердых сплавов. М.: Металлургия, 1976; *Tret'yakov V.I. Osnovy metallorudeniya i tekhnologii proizvodstva spechennykh tverdykh*

- splavov [Fundamentals of metallurgy and technology of manufactured carbide]. Moscow: Metallurgiya, 1976.
2. Раковский В.С. Металлокерамические твердые сплавы и их свойства. М.: Оборонгиз, 1944; *Rakovskii V.S. Metallokeramicheskie tverdye splavy i ikh svoistva* [Cermets of hard alloy and their properties]. Moscow: Oborongiz, 1944.
 3. Раковский В.С., Самсонов Г.В., Ольхов И.И. Основы производства твердых сплавов. М.: Metallurgizdat, 1960; *Rakovskii V.S., Samsonov G.V., Ol'khov I.I. Osnovy proizvodstva tverdykh splavov* [The basis for the production of hard alloys]. Moscow: Metallurgizdat, 1960.
 4. Третьяков В.И., Клячко Л.И. К истории твердых сплавов. М.: Визави, 1998; *Tret'yakov V.I., Klyachko L.I. K istorii tverdykh splavov* [To the history of hard alloys]. Moscow: Vizavi, 1998.
 5. Самсонов Г.В., Витрянюк В.К. Современное состояние и перспектива развития твердых сплавов. Киев: Наук. думка, 1971; *Samsonov G.V., Vitryanyuk V.K. Sovremennoe sostoyanie i perspektiva razvitiya tverdykh splavov* [Current condition and perspective development of hard alloys]. Kiev: Naukova dumka, 1971.
 6. Креймер Г.С. Новые марки твердых сплавов. Изв. АН СССР. ОТН. Металлургия и топливо. 1960. Т. 4. С. 10—15; *Kreimer G.S. Novye marki tverdykh splavov* [A new marks of hard alloys]. Izv. AN SSSR. OTN. Metallurgiya i toplivo. 1960. Vol. 4. P. 10—15
 7. Каменская Д.С. Производство твердых сплавов новых марок. М.: ГОСИНТИ, 1960; *Kamenskaya D.S. Proizvodstvo tverdykh splavov novykh marok* [The production of hard alloys new marks]. Moscow: GOSINTI, 1960.
 8. Фальковский В.А. Теоретические основы разработки твердых сплавов для бесстружковой обработки металлов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М.: МИСиС, 1997; *Fal'kovskii V.A. Teoreticheskie osnovy razrabotki tverdykh splavov dlya besstruzhkovo obrabotki metallov* [The theoretical basis for the development of hard alloys for metal processing without chip]: Abstr. Diss. Grand PhD. Moscow: MISIS, 1997.
 9. Меерсон Г.А., Панов В.С. Улучшенные марки твердых сплавов. М.: ГОСИНТИ, 1969; *Meerson G.A., Panov V.S. Uluchshennye marki tverdykh splavov* [Superior marks of hard alloys]. Moscow: GOSINTI, 1969.
 10. Панов В.С., Глушков В.Н. Высокопроизводительный метод получения порошка мелкозернистого вольфрама. Изв. вузов. Цвет. металлургия. 1971. No. 8. С. 35—39; *Panov V.S., Glushkov V.N. Vysokoproizvoditel'nyi metod polucheniya poroshka melkozernistogo vol'frama* [High-performance method of obtaining fine-grained powder of tungsten]. Izv. vuzov. Tsvet. metallurgia. 1971. No. 8. P. 35—39.
 11. Кобицкой И.В., Емельянова Т.А., Клячко Л.И. Исследование особомелкозернистых твердых сплавов, легированных карбидами тугоплавких металлов. Цвет. металлы. 1998. No. 8. С. 58—60; *Kobitskoi I.V., Emel'yanova T.A., Klyachko L.I. Issledovanie osobomelkozernistykh tverdykh splavov, legirovannykh karbidami tugoplavkikh metallov*. Цвет. металлы. 1998. No. 8. С. 58—60.
 12. Клячко Л.И. Multicarbide WC—Co hard alloys. In: *Proc. 15-th Plansee Seminar*. Austria. 2001. Vol. 56. No. 11. P. 24—27.
 13. Фальковский В.А., Клячко Л.И. Твердые сплавы. М.: Руда и металлы, 2005; *Fal'kovskii V.A., Klyachko L.I. Tverdye splavy* [Hard alloys]. Moscow: Ruda i metally, 2005.
 14. Третьяков В.И., Клячко Л.И. Твердые сплавы, тугоплавкие металлы, сверхтвердые материалы. М.: Руда и металлы, 1999; *Tret'yakov V.I., Klyachko L.I. Tverdye splavy, tugoplavkie metally, sverkhтвердые материалы* [Hard alloys, refractory metals, super hard materials]. Moscow: Ruda i metally, 1999.
 15. Плаксин Е.К. Исследование и разработка технологии твердых сплавов на основе карбонитрида титана: Дис. ... канд. техн. наук М.: МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 1977; *Plaksin E.K. Issledovanie i razrabotka tekhnologii tverdykh splavov na osnove karbonitrida titana* [Research and development of technology of hard alloys based on titanium carbonitride]: Abstr. Diss. PhD. Moscow: MITKhT, 1977.
 16. Музыкант Я.А., Самойлов В.С. Режущий инструмент с пластинами из безвольфрамовых твердых сплавов. М.: ВНИИМАШ, 1984. С. 56—58; *Muzykant Ya.A., Samoilov V.S. Rezhushchii instrument s plastinami iz bezvol'framovykh tverdykh splavov* [Cutting tools with plates of without tungsten hard alloys]. Moscow: VNIIMASh, 1984. P. 56—58.
 17. Панов В.С., Туманов А.В. Физико-механические свойства твердого сплава ТА-20. Цвет. металлы. 1982. No. 10. С. 11—13; *Panov V.S., Tumanov A.V. Fiziko-mekhanicheskie svoistva tverdogo splava TA-20* [Physico-mechanical properties of hard alloy TA-20]. Tsvet. metally. 1982. No. 10. P. 11—13.
 18. Панов В.С., Коц Ю.Ф., Филимонова А.А. Формирование структуры композиционного материала системы WC—Ni₃Al при жидкофазном спекании. Цвет. металлы. 1993. No. 4. С. 55—57; *Panov V.S., Kots Yu.F., Filimonova A.A. Formirovanie struktury*

- kompozitsionnogo materiala sistemy WC—Ni₃Al pri zhidkofaznom spekanii [Formation of structure of composite material systems WC—Ni₃Al liquid-phase sintering]. *Tsvet. metally*. 1993. No. 4. P. 55—57.
19. Левашов Е.А., Рогачев А.С., Курбаткина В.В. Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. М.: Изд-во МИСиС, 2011; *Levashov E.A., Rogachev A.S., Kurbatkina V.V. Perspektivnye materialy i tekhnologii samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza* [Perspective materials and technologies of self-propagating high-temperature synthesis]. Moscow: MISIS, 2011.
 20. 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. Self-Prop. High-Temp. Synth.* 2012. Vol. 21. No. 4. P. 202—211.
 21. Loginov P., Mishnaevsky L., Jr., Levashov E., Petrzhik M. Diamond and cBN hybrid and nanomodified cutting tools with enhanced performances: Development, testing and modelling. *Mater. and Design*. 2015. Vol. 88. P. 310—319.
 22. Froschauer L., Fulrath R.M. Direct observation of liquid-phase sintering in the system tungsten carbide—cobalt: Report No LBL-3189. Lawrence Berkeley Laboratory. University of California. Berkeley. October, 1974.
 23. Панов В.С., Шуменко В.Н. Технология и свойства спеченных твердых сплавов. М.: Изд-во МИСиС, 2013; *Panov V.S., Shumenko V.N. Tekhnologiya i svoystva spechennykh tverdykh splavov* [Technology and properties of sintered hard alloys]. Moscow: MISIS, 2013.
 24. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: Академия, 2005; *Andrievskii R.A., Ragulya A.V. Nanostrukturnye materialy* [Nanostructured materials]. Moscow: Akademiya, 2005.
 25. Фальковский В.А. Инновации в технологии твердых сплавов: нано- и ультрадисперсные структуры. М.: МИТХТ, 2008; *Fal'kovskii V.A. Innovatsii v tekhnologii tverdykh splavov* [Innovations in the technology of hard alloys: nano- and ultradisperse structures]. Moscow: MITKhT, 2008.
 26. Цветков Ю.В., Николаев А.В., Самохин А.В. Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов. *Автоматическая сварка*. 2013. No. 10-11. С. 112—118; *Tsvetkov Yu.V., Nikolaev A.V., Samokhin A.V. Plazmennyye protsessy v metallurgii i tekhnologii neorganicheskikh materialov* [Plasma processes in metallurgy and technology of inorganic materials]. *Avtomaticheskaya svarka*. 2013. No. 10-11. P. 112—118.
 27. Цветков Ю.В., Николаев А.В., Панфилов С.А. Низкотемпературная плазма: Плазменная металлургия. Новосибирск: Наука, 1992; *Tsvetkov Yu.V., Nikolaev A.V., Panfilov S.A. Nizkotemperaturnaya plazma: Plazmennaya metallurgiya* [Low-temperature plasma: Plasma metallurgy]. Novosibirsk: Nauka, 1992.
 28. Каламазов Р.У., Цветков Ю.В., Кальков А.А. Высокодисперсные порошки вольфрама и молибдена. М.: Металлургия, 1988; *Kalamazov R.U., Tsvetkov Yu.V., Kal'kov A.A. Vysokodispersnye poroshki vol'frama i molibdena* [Highly dispersed powders of tungsten and molybdenum]. Moscow: Metallurgiya, 1988.
 29. Blagoveshchenskiy Yu.V., Isayev N.V., Blagoveshchenskaya N.V. Methods of compacting nanostructured tungsten—cobalt alloys from nanopowders obtained by plasma chemical synthesis. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2015. Vol. 6. No. 5. P. 415—426.
 30. Chuvildeev V.N., Moskvicheva A.V., Lopatin Y.G. Sintering of WC and WC—Co nanopowders with different inhibitors additions by SPS method. In: *Proc. 17-th Plansee Seminar: Int. Conf. on High Performance P/M Materials Reutte*. Austria, 2009. Vol. 2. No. 53.
 31. Konyashin I. A vacuum technology for coating TiCN—Based cermets. *J. Vacuum Sci. Technol. A*. 1995. Vol. 3. P. 1208—1212.
 32. Konyashin I., Anikeev A., Senchihin V. Development, production and application of novel grades of coated hardmetals in Russia. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 1996. Vol. 14. P. 41—48.
 33. Konyashin I. PVD/CVD Technology for coating cemented carbides. *Surf. Coat. Technol.* 1995. Vol. 71. P. 277—283.
 34. Konyashin I. Thin TiC_x films chemically vapor deposited onto cemented carbides from the TiC₁₄—CH₄—H₂ mixture. *Thin Solid Films*. 1996. Vol. 278. P. 37—44.
 35. Konyashin I. Healing of surface defects in hard materials by thin coatings. *J. Vacuum Sci. Technol. A*. 1996. Vol. 2. P. 447—452.
 37. Konyashin I., Guseva M. Thin films comparable with WC—Co cemented carbides as underlayers for hard and superhard coatings: the state of the art. *Diam. Relat. Mater.* 1996. Vol. 5. P. 575—579.
 37. Guseva M., Babaev V., Khvostov V. High quality diamond films on WC—Co surfaces. *Diam. Relat. Mater.* 1997. Vol. 6. P. 89—94.
 38. Konyashin I., Guseva M., Babaev V. Diamond films deposited on WC—Co substrates by use of barrier interlayers and nano-grained diamond seeds. *Thin Solid Films*. 1997. Vol. 300. P. 18—24.
 39. Zaitsev A.A., Vershinnikov V.I., Konyashin I. High-quality cemented carbides on the basis of near-nano and coarse-grain WC powders obtained by self-propagating high-

- temperature synthesis (SHS). *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* 2015. Vol. 22. P. 152—160.
40. Zaitsev A.A., Vershinnikov V.I., Konyashin I. Cemented carbides from WC powders obtained by the SHS method. *Mater. Lett.* 2015. Vol. 158. P. 329—332.
41. Zaitsev A.A., Vershinnikov V.I., Konyashin I. Near-nano and coarse-grain WC powders obtained by the self-propagating high-temperature synthesis and cemented carbides on their basis. Part I: Structure, composition and properties of WC powders. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2015. Vol. 50. P. 146—151.
42. Konyashin I., Ries B., Lachmann F. Hardmetals with nano-grain reinforced binder: Binder fine structure and hardness. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2008. Vol. 26. P. 583—588.
43. Konyashin I., Ries B., Lachmann F. Novel hardmetal with nano-strengthened binder. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2011. Vol. 2. No. 1. P. 19—21.
44. Ахметсагиров С.М. Технологическое обеспечение стабильности циклической ударной стойкости твердосплавных зубков буровых шарошечных долот: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2009; Akhmetzagirov S.M. Tekhnologicheskoe obespechenie stabil'nosti tsiklicheskoj udarnoi stoikosti tverdosplavnykh zubkov burovykh sharoshechnykh dolot [Engineering support of periodic toughness consistency of cemented carbide rock cutter drill bit]: Abstr. Diss. PhD. Samara State Technical University, 2009.
45. Сальников М.А. Разработка буровых твердых сплавов с повышенными характеристиками пластичности и трещиностойкости на основе карбида вольфрама: Автореф. ... дис. канд. тех. наук. Самара: СамГТУ, 2009; Salnikov M.A. Razrabotka burovykh tverdykh splavov s povyshennymi kharakteristikami plastichnosti i treshchinostoikosti na osnove karbida vol'frama [Designing of cemented carbides based on tungsten carbide for drilling with enhanced properties of plasticity and fracture strength]: Abstr. Diss. PhD. Samara State Technical University, 2009.
46. Захаров Д.А. Совершенствование состава, структуры, технологии и применения твердых сплавов в производстве буровых шарошечных долот: Автореф. ... дис. канд. тех. наук. Самара: СамГТУ, 2014; Zakharov D.A. Sovershenstvovanie sostava, struktury, tekhnologii i primeneniya tverdykh splavov v proizvodstve burovykh sharoshechnykh dolot [Upgrading of composition, structure technology and application of cemented carbides for rock cutter drill bit production]: Abstr. Diss. PhD. Samara State Technical University, 2014.
47. Твердые сплавы. Металлические порошки и порошковые материалы: Справочник. Под ред. Левинского Ю.В. М.: Экомет, 2005. С. 262—380; Levinskii Yu.V. (Ed.). Tverdye splavy. In: *Metallicheskie poroshki i poroshkovye materialy: Spravochnik* [Hard alloys. In: *Metal powders and powder materials: Handbook*]. Moscow: Ekomet, 2005. P. 262—380.