

На правах рукописи



ЖАДЯЕВ Александр Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ
В ПРОИЗВОДСТВЕ БУРОВЫХ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель:

Амосов Александр Петрович, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Дорофеев Владимир Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения, технологические машины и оборудование», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», Ростовская область г. Новочеркасск.

Оглезнева Светлана Аркадьевна, доктор технических наук, научный руководитель Научного центра порошкового материаловедения, профессор кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций», федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Защита состоится «02» декабря 2022, в 13 час. 00 мин. на заседании объединённого диссертационного совета 99.2.039.02 (Д 999.122.02) на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»:

http://d99912202.samgtu.ru/sites/d99912202.samgtu.ru/files/zadyaev_diss.pdf

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 99.2.039.02 (Д 999.122.02).

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

А.Р. Луц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время трудно представить многие отрасли экономики без применения твердых сплавов (ТС). Уникальные показатели твердости, прочности, износостойкости, окалиностойкости, коррозионной стойкости позволяют использовать твердосплавные изделия в различных отраслях, таких как металлообработка, горнодобывающая промышленность, машиностроение, химическая и атомная отрасли и др.

Помимо наиболее распространенного применения ТС для производства режущего, износостойкого, штампового инструмента, различных износостойких деталей, все большее значение приобретает использование твердых сплавов для изготовления бурового инструмента. С помощью бурового долота ведется разработка скважин в нефтяной и газовой промышленности, на карьерах по добыче угля и руд черных и цветных металлов, в строительстве, при высоких температурах, в агрессивных средах и даже в условиях Крайнего Севера и Арктики. От работоспособности долота зависят основные технико-экономические показатели бурения. В настоящее время наиболее распространены шарошечные долота.

Условия острой рыночной конкуренции в производстве породоразрушающего инструмента не только на внешнем, но и на Российском рынке, а также нынешняя политическая обстановка и ограничительные политические, и экономические меры, введенные недружественными государствами и международными организациями в отношении Российской Федерации требуют развития собственного производства бурового инструмента высокого качества, важнейшим из которых является долговечность буровых долот, их способность эффективно и надежно без аварий работать при бурении, а также соответствие заявленным характеристикам и приемлемой стоимости инструмента.

Практика применения буровых долот показывает, что основным видом повреждения породоразрушающего твердосплавного вооружения - твердосплавных зубков является их разрушение за счёт скола при повышенных или даже нормальных энергиях удара по забою. В связи с этим важной задачей в их производстве является повышение вязкости разрушения, то есть трещиностойкости твердосплавных зубков долот. Её решение во многом связано с качеством исходного сырья, технологическими условиями, контролем операций на всем производственном процессе, исправностью оборудования, ответственностью и исполнительностью работников, контролем физико-механических свойств готовой продукции и при необходимости их оптимизацией. Наряду с этим следует стремиться минимизировать образование вольфрамокобальтовых отходов в производстве твердых сплавов, экономя дорогостоящие материалы, природные запасы которых, в первую очередь, вольфрама,

сокращаются с большой скоростью. Следует также учесть, что процесс переработки и восстановления твердосплавных отходов является сложным и затратным.

Всё вышеизложенное обусловило необходимость проведения, на примере применения наиболее распространенных твердых сплавов группы ВК (карбид вольфрама – кобальт) в производстве буровых шарошечных долот в АО «Волгабурмаш», комплекса научно-исследовательских работ, направленных на исследование зависимости трещиностойкости твёрдого сплава от микроструктуры сплава и условий синтеза, на разработку и внедрение результатов, позволяющих гарантировать повышенную трещиностойкость твердых сплавов и высокую эксплуатационную стойкость твердосплавных зубков буровых шарошечных долот, а также снизить затраты на их производство.

Основная цель работы: исследование зависимости трещиностойкости твердосплавного вооружения буровых долот от микроструктуры сплава и условий производства; разработка технологических мероприятий по повышению трещиностойкости твердосплавных зубков; сравнительный анализ порошкового сырья и зубков различных производителей для обеспечения повышенной трещиностойкости твердосплавных зубков при приемлемой стоимости.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1) Исследовать зависимость трещиностойкости (по Палмквисту) твердосплавных зубков буровых шарошечных долот от:

- а) условий приготовления и формования гранулированной смеси;
- б) условий спекания;
- в) наличия типичных дефектов микроструктуры сплава;

2) Определить фактическую закономерность распространения трещин в твердосплавных зубках:

- по зернам WC (транскристаллитный характер разрушения);
- по связующему (межкристаллитный характер разрушения);

3) Исследовать процесс регулирования углеродного баланса с целью повышения трещиностойкости твердосплавных изделий за счет нормализующего режима спекания в различных условиях.

4) Обобщить результаты исследования и усовершенствовать технологический процесс изготовления твердосплавного вооружения буровых долот с целью повышения трещиностойкости, без ухудшения их физико-механических свойств и микроструктуры.

5) Провести сравнительный анализ физико-механических и технологических свойств покупных готовых смесей и твердосплавных зубков импортного производства и производства АО "Волгабурмаш".

Научная новизна:

1. Исследовано влияния производственных факторов на микроструктуру и трещиностойкость вольфрамкобальтовых твердых сплавов в производстве буровых шарошечных долот.

2. Установлены причины и разработаны мероприятия, не допускающие появление в серийных изделиях критических дефектов « η -фазы» и «свободного углерода». Подобран режим и состав нормализующих составов для исправления « η -фазы» и «свободного углерода».

3. Установлено влияние процесса регулирования углеродного баланса в сплаве за счет нормализующего режима спекания в различных условиях на повышение трещиностойкости твердосплавных зубков.

4. Установлены процессы, позволяющие нормализовать микроструктуру серийных твердосплавных смесей, что позволило повысить физико-механические и эксплуатационные свойства зубков.

5. Проведен сравнительный анализ физико-механических и технологических свойств покупных гранулированных твердосплавных смесей и зубков импортного производства, и производства АО "Волгабурмаш", и сделаны выводы по целесообразности их применения для обеспечения повышенной трещиностойкости твердосплавных зубков при приемлемой стоимости.

Практическая значимость: заключается в том, что результаты работы имеют прикладное значение для применения в производстве твердосплавного вооружения буровых шарошечных долот, повышения качества выпускаемой продукции завода АО «Волгабурмаш».

По результатам проведённых исследований:

1) Внедрен легирующий элемент Cr_3C_2 марки КХНП2 ТУ 14-22-28-90 в рецептуру сплава ВК15С (15% Со масс.);

2) ВК6С определен как основной сплав для изготовления зубков применяемых в качестве армирующих элементов долота подверженных сильному истирающему износу (лапы и тыльного конуса шарошки), что позволило повысить эксплуатационные свойства данных зубков и нормализовать микроструктуру;

3) Разработана новая конструкция пресс-оснастки, позволившая снизить плотность прессования. Это позволило: снизить нормы расхода дорогостоящих материалов - порошков карбида вольфрама и кобальта на 2-3%; повысить ресурс шлифовальных кругов станков на 25%; снизить трудоемкость изготовления продукции;

4) Исследована целесообразность применения покупных гранулированных смесей и спечённых зубков в качестве основных материалов для производства твердосплавного вооружения буровых шарошечных долот в АО «Волгабурмаш»;

5) Разработаны технологические требования № ТС22611281 по входному контролю и оценке качества покупных твердосплавных зубков;

6) Установлены и внедрены данные по трещиностойкости твердосплавных изделий в качестве альтернативных арбитражных данных для прогнозирования полученных свойств изделий, а также для принятия решений о пропуске в дальнейшее производство серийной продукции с отклонениями по микроструктуре или физико-механическим свойствам.

Объект исследования: твердосплавные гранулированные смеси, спеченное твердосплавное вооружение буровых шарошечных долот, покупные гранулированные смеси и твердосплавные зубки импортного производства.

Предмет исследования: трещиностойкость вольфрамокобальтового сплава, физико-механические свойства, микроструктура сплава.

Положения, выносимые на защиту:

1) Результаты исследований дефектов структуры вольфрамокобальтовых твердых сплавов в производстве буровых шарошечных долот, описание, причины возникновения и их влияние на физико-механические свойства и трещиностойкость твердосплавных изделий;

2) Результаты комплексных исследований влияния на физико-механические свойства, трещиностойкость и структуру твердого сплава изменений технологических режимов производства;

3) Сравнительное исследование покупных гранулированных порошковых смесей и спеченных зубков импортного производства и производства АО «Волгабурмаш», выводы по целесообразности их применения для обеспечения повышенной трещиностойкости твердосплавных зубков при приемлемой стоимости.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: 5-ая Международная научная конференция студентов и молодых ученых: "МОЛОДЕЖЬ И СИСТЕМНАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ СТРАНЫ» 19-20 мая 2020 (г. Курск), Всероссийская молодежная научная конференция: «ЗА НАМИ БУДУЩЕЕ: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества» 05 июня 2020 (г. Курск), 5-ая Международная научная конференция перспективных разработок молодых ученых: «Наука молодых – будущее России» 10-11 декабря 2020 (г. Курск), III International Scientific Conference "MIP: Engineering-III-2021: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering" 29-30 April 2021 (Krasnoyarsk, Russia), Физическое материаловедение: X Международная школа, посвященная 10-летию лаборатории «Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы» 13–17 сентября 2021 (г. Тольятти), Актуальные проблемы прочности: LXIII Международная конференция, посвященная 70 -летию Тольяттинского государственного

университета 13–17 сентября 2021 (г. Тольятти), II International Scientific Conference "CAMSTech-II- 2021: Advances in Materials, Systems and Technologies" 29-31 July 2021 (Krasnoyarsk, Russia); "Девятая Международная конференция: "КРИСТАЛЛОФИЗИКА И ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ"", посвященная 100-летию со Дня рождения академика Б.К. Вайнштейна и Четвертая Международная Школа Молодых Ученых "Актуальные проблемы современного материаловедения" 22-26 ноября 2021 (г. Москва).

Личный вклад автора в диссертационную работу. Все результаты, включенные в диссертацию, получены лично автором или при его непосредственном участии. Автором поставлены цели и задачи, выполнена разработка методологии исследования, проведена интерпретации результатов и формулировка всех основных положений, определяющих научную новизну и практическую значимость работы. Основные эксперименты автор выполнил в творческих коллективах, что отражено в составе авторов опубликованных работ.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 18 работах, в том числе 5 статей в журналах из перечня ВАК и входящих в базы данных Scopus и Web of Science, 14 тезисов и докладов в сборниках трудов конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов, списка использованных источников, включающего 184 наименования, содержит 223 страницы машинописного текста, 102 рисунка, 70 таблиц, 5 формул и 6 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении содержится обоснование актуальности диссертационной работы, цель и задачи исследований, обоснование практической значимости работы.

В первой главе приведен аналитический обзор научно-технической литературы, описывающий историю появления твердого сплава, классификацию, марки и области применения. Имеется раздел, посвященный вопросам повышения эксплуатационной стойкости твердосплавного вооружения буровых шарошечных долот. Описана технология изготовления твердых сплавов, начиная от изготовления гранулированной смеси, заканчивая спеканием прессованных заготовок и исследованием структуры. Представлены виды и причины аварийного разрушения буровых шарошечных долот. Приведены типичные дефекты WC-Co сплавов с описанием причин их появления и влияния на свойства изделия. Приведен обзор актуальных публикаций и патентов, посвященных исследованию трещиностойкости вольфрамкобальтовых сплавов, а также твердосплавным отходам производства. Раздел заканчивается формулировкой цели и задач для проведения настоящего диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена выбору и описанию материалов, методик, приборов и оборудования, применяемых в данном исследовании. В разделе представлены характеристики основного и вспомогательного сырья, применяемого при изготовлении твердосплавных зубков.

В диссертационной работе использовались общепринятые для твердосплавного производства методики контроля химического состава, физико–механических и технологических свойств сплава, изложенные в ГОСТ 3882-74 (ISO 513-75) и специальной литературе. К основным из них относятся такие методики как:

- Измерение предела прочности при поперечном изгибе в соответствии с ГОСТ 20019-74 (ISO 3327:2009);
- Измерение твердости HRA по ГОСТ 25172-82 (ISO 3878-83);
- Металлографический метод исследования микроструктуры твердых сплавов проводили в соответствии с ISO 4499:2020;
- Исследование вязкости разрушения (трещиностойкости) твердых сплавов по методу Палмквиста в соответствии со стандартом ISO 28079:2009.
- Исследование микроструктуры ТС осуществляли металлографическим методом согласно ISO 4499:2020 с использованием оптического металлографического микроскопа;
- Исследование микроструктуры сплава, размеров частиц и анализ трещин после замера трещиностойкости твердосплавных образцов проводилось на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM 6390A.

Основными материалами, исследуемыми в данной работе, являются спеченные твердосплавные зубки из серийных сплавов BK15C, BK10C, BK6C с содержанием кобальта равным 15, 10 и 6 % масс соответственно.

Приведено описание основного технологического оборудования, используемого в производстве твердосплавного вооружения буровых шарошечных долот в АО «Волгабурмаш».

Результаты исследований, полученные с использованием выбранных методов испытаний, позволяют получить полноценную, надежную информацию о физико-механических характеристиках вольфрамокобальтового сплава, трещиностойкости и микроструктуры, оценить влияние производственных факторов на характеристики изделия.

Третья глава посвящена анализу влияния типичных дефектов структуры на физико-механические свойства и трещиностойкость твердых сплавов WC-Co, используемых в производстве твердосплавного вооружения буровых шарошечных долот.

Проблема неоднородности структуры твердых сплавов внутри одной партии вызывает резкое снижение прочностных свойств инструмента. Отклонение может возникнуть на любом этапе производства. Возможные дефекты (неоднородности) структуры вольфрамокобальтовых сплавов, обнаруженные нами в производстве АО «Волгабурмаш», представлены на рисунке 1.

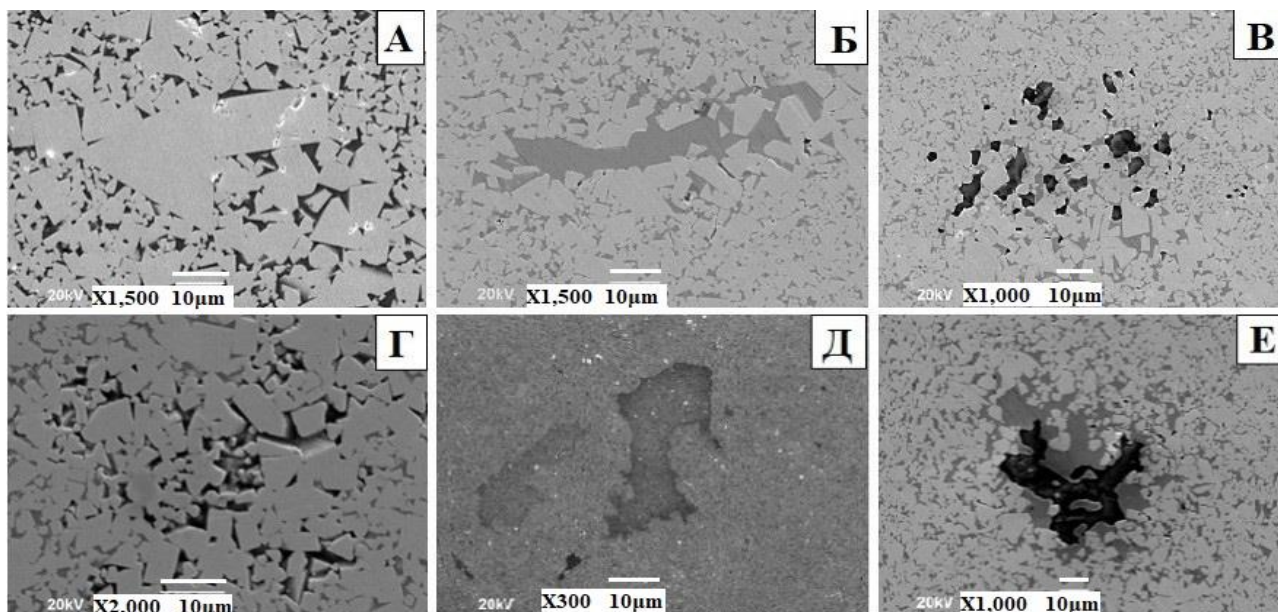


Рисунок 1 – Дефекты структуры твердого сплава. А - Крупные кристаллы карбида вольфрама и их скопления; Б - Компаундирование (скопление кобальта(β -фазы)); В - Пористость; Г - Свободный углерод; Д - Сегрегация WC; Е - η -фаза (двойной карбид W_3Co_3C);

Результаты исследования физико-механических свойств твердосплавных зубков с дефектами микроструктуры представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические свойства образцов ТС с содержанием Co = 10%.

Образец	Плотность, г/см ³	Твердость, HRA	Коэффициентная сила Hc, Э	Предел прочности при поперечном изгибе, кгс/мм ²	Средний размер зерна, мкм	Вязкость разрушения W _k , МН·м ^{3/2}	Длина трещины, мкм
Серийный BK10C	14,51	88,3	77	296	2,6	17,1	82
Большой кристалл	14,53	87,4	80	251	3,0	16,5	82
Скопление кристаллов	14,51	87,2	85	247	2,9	16,9	85
Компаундирование	14,53	86,8	87	250	2,6	16,3	95
Поры и свободный углерод	14,41	87,8	87	251	2,7	17,5	88
Сегрегация WC	14,52	89,3	74	236	2,3	18,4	74
Примечание: выделенное значение имеет отклонение от требований СПП 582 АО «ВБМ»							

Наличие данных дефектов микроструктуры ухудшает физико-механические свойства сплава, такие как: прочность на поперечный изгиб, твердость и трещиностойкость.

Характеристики образцов не соответствуют требованиям годной продукции предприятия, что требует их отбраковки или проведения мероприятий по устранению.

Такие дефекты как «крупный кристалл» и «компаундирование» приводят к пониженному показателю трещиностойкости ($16,5 \text{ МН}\cdot\text{м}^{-3/2}$ и $16,3 \text{ МН}\cdot\text{м}^{-3/2}$, соответственно), так как в первом случае большой кристалл является концентратором напряжения в структуре, что облегчает процесс распространения трещины. Во втором случае скопление кобальта в одной области обедняет соседние области сплава, что ослабляет связку между зерен и соответственно не препятствует дальнейшему образованию трещины ($W_K = 16,3 \text{ МН}\cdot\text{м}^{-3/2}$).

Таким образом, по результатам, полученным в данной главе, проведено сравнение физико-механических свойств сплавов с дефектами и без отклонений (серийные сплавы). Получены изображения микроструктуры поверхности образцов сплава WC-Co с дефектами. Разработана и внедрена в техническую документацию АО «Волгабурмаш» методика исправления дефекта η -фаза путем нормализующего спекания в засыпке с добавлением углерода.

В четвертой главе рассматривается влияние условий приготовления состава гранулированного твердосплавного порошка и его формования на свойства твёрдосплавных изделий.

На каждой производственной операции есть параметры, изменение которых может в той или иной степени повлиять на процесс изготовления твердосплавного вооружения, например на:

- микроструктуру сплава;
- физико-механические свойства сплава;
- затраты и возможные потери сырья;
- длительность процесса производства.

Проблема модернизации параметров производства с технической и экономической точек зрения, без снижения физико-механических свойств или ухудшения микроструктуры сплава, является актуальной для повышения конкурентоспособности на рынке.

Для буровых сплавов очень важно сохранить однородный набор зерен карбидной фазы при достаточной толщине кобальтовой прослойки. Было проведено исследование по влиянию времени размола исходного сырья на физико-механические свойства и трещиностойкость сплава, чтобы определить оптимальное значение времени размола. Из сплава BK10C производится основной объем твердосплавного вооружения буровых, поэтому из него было изготовлено пять опытных партий с различным временем размола: 8, 9, 10, 11, 12 часов соответственно. По результатам анализа установлено, что оптимальное время размола сплавов марки BK10C должно составлять 9 часов (твёрдость = 88,1 HRA, трещиностойкость $W_K = 17,9 \text{ МН}\cdot\text{м}^{-3/2}$).

Содержание пластификатора в серийных твердых сплавах, применяемых на производстве АО «Волгабурмаш», исходя из технологического оборудования и процесса производства,

составляет $2,0 \pm 0,25\%$ масс. Было проведено исследование влияния содержания пластификатора на технологические и физико-механические свойства гранулированного порошка и спеченного изделия соответственно. Результаты исследования показали, что оптимальным содержанием парафина, является 2% масс. (твердость = $87,8$ HRA, трещиностойкость $W_k = 17,1$ МН·м^{-3/2}).

С целью повышения однородности и улучшения микроструктуры спеченных твердосплавных зубков, изготавливаемых из сплава ВК15С, производилось добавление легирующего компонента — порошка карбида хрома КХНП2 ТУ 14-22-28-90. В результате добавления $0,3 \pm 0,1\%$ масс. КХНП-2 (Cr_3C_2) произошла нормализация микроструктуры, что привело к небольшому увеличению твердости ($86,2$ HRA \rightarrow $86,9$ HRA) и трещиностойкости ($22,3$ МН·м^{-3/2} \rightarrow $23,0$ МН·м^{-3/2}). На основании этого добавка карбида хрома марки КХНП-2 была внесена в Типовой технологический процесс на изготовление гранулированных смесей.

Продолжая изучение легирования вольфрамкобальтового сплава, была исследована возможность применения гранулированной смеси ВК10ХОМ в качестве сырья для изготовления твердосплавного вооружения буровых шарошечных долот. Данный сплав имеет высокие показатели твердости ($90,6$ HRA), что несомненно является преимуществом. Он, как и другие сплавы с особо мелким зерном, разрабатывался для обработки резанием особо твердых и абразивных материалов. Но данный сплав оказался непригодным для использования в производстве твердосплавных зубков буровых шарошечных долот по причине низкой трещиностойкости ($W_k = 12,6$ МН·м^{-3/2}).

В целях нормализации микроструктуры сплава ВК5С и избавления от пористости В1 и прочих дефектов в серийных изделиях была проведена работа по увеличению содержания кобальта и переходу на сплав ВК6С (6% Со масс.). Применение сплава ВК6С в производстве изделий привели к желаемому результату и позволили снизить количество изделий с отклонениями в виде пористости В1. Также незначительно, но смена состава сплава повлияла на повышение трещиностойкости сплава на 2% ($W_k = 12,9$ МН·м^{-3/2}), без снижения твердости ($90,4$ HRA).

Еще одной частью работы, посвященной улучшению качества твердосплавных зубков, было использование монокарбида WC на примере покупной импортной смеси М2 (Швеция), с содержанием Со = 9% масс. Данный сплав имеет показатели твердости, схожие с серийной смесью ВК10С, но более высокий параметр трещиностойкости ($18,2$ МН·м^{-3/2}), что обеспечивается более равномерной структурой. Однако стоимость данной смесикратно выше, что в условиях жесткой рыночной конкуренции является невыгодным.

С целью снижения норм расходов дорогостоящих вольфрамкобальтовых сплавов и повышения ресурса шлифовальных кругов на операции черного (предварительного) шлифования спеченных зубков, была проведена работа по изготовлению новой пресс-формы с

уменьшенным диаметром и снижением плотности прессования заготовок. Это позволяет увеличить экономию дорогостоящих материалов на 2-3%, повысить ресурс алмазных шлифовальных кругов на 25%, уменьшить время изготовления продукции. На основании полученных результатов проведено внедрение данной оснастки в производство.

Также с целью ускорения производственного процесса была проведена опытная работа по изучению возможности изготовления гидромониторных насадок без прессовки опытных образцов, за счет наладки параметров заготовок по усилию прессования. Данное мероприятие позволило сократить длительность производственного процесса на данное изделие с получением требуемых физико-механических свойств и микроструктуры.

Пятая глава посвящена анализу влияния условий спекания на физико-механические свойства и трещиностойкость твердосплавных зубков буровых шарошечных долот.

Первой частью исследований было определение среднестатистических характеристик физико-механических свойств и трещиностойкости сплавов ВК15С, ВК10С, ВК6С с содержанием кобальта равным 15, 10 и 6 % масс соответственно. Эти характеристики для сплавов, изготовленных в соответствии с технологическим процессом при температуре спекания 1400 ± 20 °С, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Среднестатистические значения характеристик твердых сплавов

№ образца	Плотность, г/см ³	Твердость, HRA	Коэффициент ая сила Нс, Э	Предел прочности при поперечном изгибе, кгс/мм ²	Средний размер зерна, мкм	Вязкость разрушения W _k , МН·м ^{-3/2}	Средняя длина трещины, мкм
ВК15С	13,99	87,1	79	313	2,5	20,3	60
ВК10С	14,51	88,3	77	296	2,6	17,1	82
ВК6С	14,91	90,3	132	242	2,2	13,1	99

Эти показатели выбраны как основные и используются в дальнейшей работе для сравнения, так как они максимально приближены к реальным показателям твердосплавного вооружения буровых шарошечных долот.

Следующим этапом работы было исследование влияния температуры спекания вольфрамкобальтового сплава на физико-механические и эксплуатационные свойства спеченных зубков, оценка роста зерен и характера распространения трещины в сплаве после внедрения индентора. Применялись следующие режимы спекания: Режим №1 – $T_{\text{спекания}} = 1450 \pm 20$ °С; Режим №2 – $T_{\text{спекания}} = 1370 \pm 20$ °С.

В случае с зубками сплава ВК15С и ВК10С спекание при температуре выше, чем в стандартном режиме (режим №1), привело к увеличению трещиностойкости ($W_k = 23 \text{ МН} \cdot \text{м}^{-3/2}$ и $19 \text{ МН} \cdot \text{м}^{-3/2}$, соответственно). Однако негативным фактором такого режима является частичное ухудшение микроструктуры изделий, появление скоплений кристаллов. Сплав ВК6С лучше спекать при температурах ниже стандартного режима (режим №2), так как это увеличивает твердость (90,6 HRA), что необходимо для данного сплава, работающего при абразивном истирании.

На следующем этапе работы проводился анализ влияния давления спекания, брались граничные режимы, при которых допускается проводить спекание на имеющемся оборудовании.

Спекание образцов с пониженным давлением $0,2 \pm 0,1 \text{ МПа}$ и высокой температурой $1450 \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ привело к появлению большого количества пор различного размер, что обусловлено особенностями плохого уплотнения пористых твердосплавных заготовок в процессе спекания при пониженном давлении (рисунок 2).

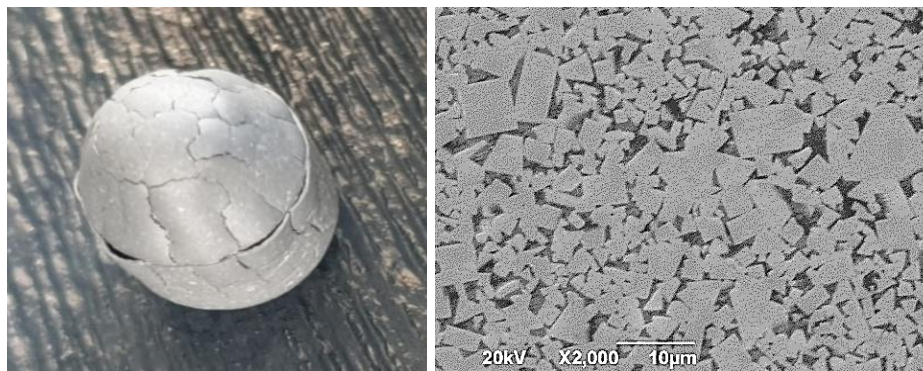


Рисунок 2 – Фотография поверхности и микроструктуры образца (увеличение $\times 2000$), спеченного при пониженном давлении

Спекать зубки в таких условиях недопустимо. Однако данные условия применяются при спекания зернового твердого сплава, используемого как наплавочный материал.

Спекание при повышенном давлении до $4 \pm 0,5 \text{ МПа}$ и выше ($T_{\text{спекания}} = 1400 \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$) благоприятно влияет на процесс уплотнения сплава и смачивание зерен карбидов кобальтовым связующем в процессе жидкофазного спекания и обеспечивает повышение трещиностойкости в Однако негативным фактором является то, что это увеличивает нагрузку на вакуумные узлы, приводит к скорейшему износу и/или разрушению графитового муфеля печи.

Исследование влияния среды спекания проводилось в следующих условиях:

- спекание с депарафинизацией в среде водорода при избыточном давлении с целью снижения содержания углерода в поверхностном слое изделия и создания более вязкого поверхностного слоя. Исследование показало, что при этом происходит неконтролируемый рост зерен и обезуглероживание, приводящие к снижению трещиностойкости в среднем на 7,5%.

- спекание по полному циклу совместно с депарафинизацией в среде смеси газов водорода и природного газа $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ (ГОСТ 5542-2014) во время процесса нормализации при 1000 ± 20 °С. Данное исследование не дало хороших результатов, произошло снижение трещиностойкости в среднем на 2.5%, возможно в связи с тем, что не до конца отработан и запущен режим подачи смеси газов в зону спекания печи;

- спекание в нормализующей смеси состоящей из электрокорунда белого марки 25А (ГОСТ 28818-90) с добавлением углерода марки Т900. Содержание углерода в данной смеси 2% масс. Такое спекание обычно проводится с целью выравнивания углеродного баланса сплава или в случае возникновения дефекта η -фазы. Спекание в нормализующей засыпке позволяет повысить значение трещиностойкости сплава в среднем на 6%, однако отрицательно сказывается на вакуумном оборудовании печи.

Также в процессе проведения исследований в данной главе рассматривалась возможность создания градиента свойств твердого сплава ВК10С на производстве АО «Волгабурмаш». Наиболее важными являются показатели физико-механических свойств сплава на глубине до 4,5мм (от образца №1 (0,9мм) до образца № 5(4,5мм)), так как это является «рабочей зоной зубка», до которой он стирается на забое до момента износа самого долота.

Сравнение твердости и трещиностойкости градиентных сплавов в зависимости от глубины анализа представлены на рисунках 3 и 4, соответственно.

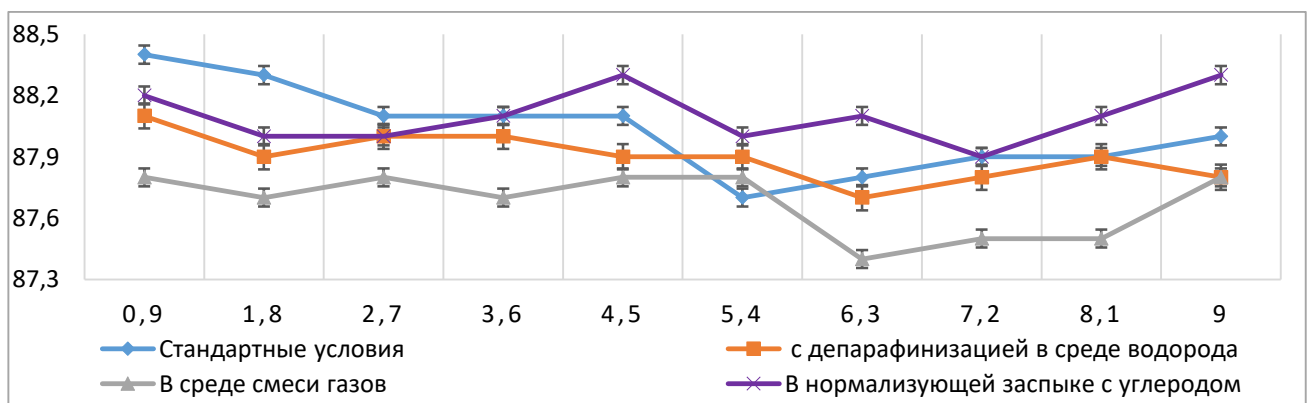


Рисунок 3 – Твердость градиентных сплавов

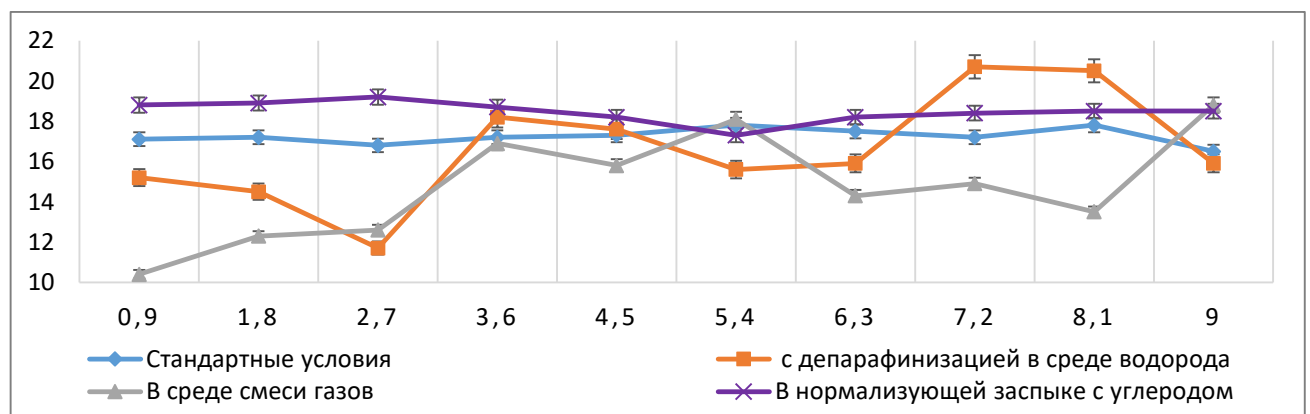


Рисунок 4 – Трещиностойкость градиентных сплавов

На данных графиках видно, что изменение условий спекания позволяет воздействовать на формирование микроструктуры, физико-механические свойства, в том числе и трещиностойкость твердосплавных изделий по глубине сплава.

Шестая глава посвящена анализу и подробному сравнению микро- и макроструктуры, физико-механических, химических и технологических свойств покупных твердосплавных смесей и спеченных зубков различных производителей и продукции собственного производства АО «Волгабурмаш».

В таблице 3 представлены физико-механические свойства ТС, изготовленных из покупных гранулированных смесей и смесей изготовления АО «Волгабурмаш».

Таблица 3 – Сравнение физико-механических свойств ТС, изготовленных из различных гранулированных смесей

№	Изготовитель	Плотность, г/см ³	Твердость, HRA	Коэффициентная сила Нс, Э	Предел прочности при поперечном разрыве, кгс/мм ²	Средний размер зерна, мкм	Вязкость разрушения W _k МН·м ^{3/2}	Средняя длина трещины, мкм
1.1	АО «ВБМ»	14,53	88,3	83	296	2,6	17,6	86
1.2	Поставщик 1	14,51	88,4	87	315	2,5	17,5	89
1.3	Поставщик 2	14,47	88,3	97	267	2,6	15,9	107
1.4	Поставщик 3	14,51	88,3	79	290	2,6	16,8	97
1.5	Поставщик 4	14,53	88,3	83	296	2,6	17,3	82

Примечание: выделенное значение имеет отклонение от требований СТП 582 АО «ВБМ»

Морфология и размеры частиц гранулированных твердосплавных смесей представлены на рисунке 5 (обозначения в таблице 3).

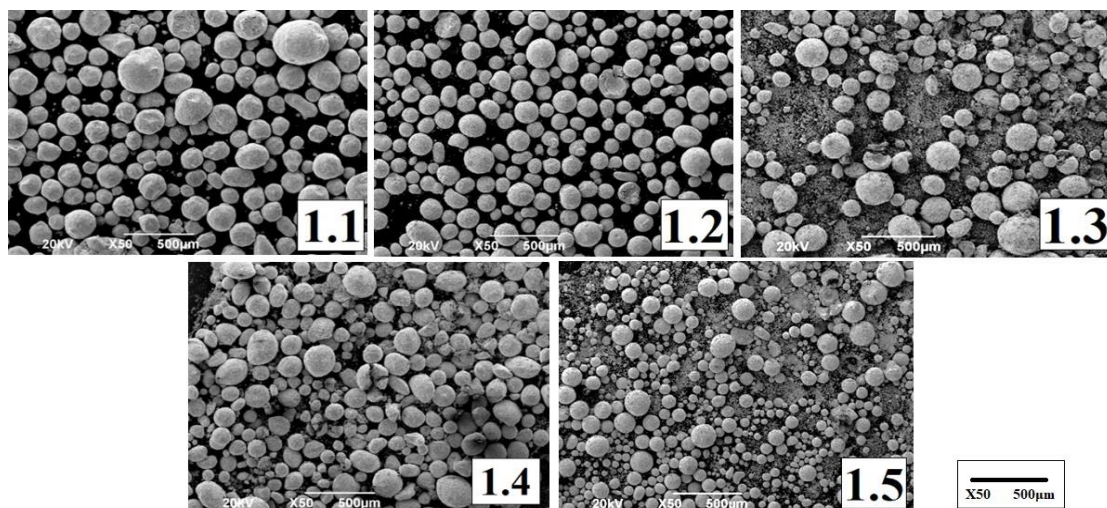


Рисунок 5 - Гранулированные твердосплавные смеси, увеличение х50.

Готовые твердосплавные смеси и покупные зубки соответствуют требованиям АО «Волгабурмаш». Однако работа с ними имеет определенные недостатки и требует проведение операций доработки. В варианте с собственным производством эти минусы практически отсутствуют.

Также исследованы микроструктура и физико-механические свойства зубков сплава WC-10%Co с отработанного долота АО «Волгабурмаш» и долота импортного производства. Результаты анализа зубков обоих долот показали схожее снижение прочностных характеристик сплава, вызванных выщелачиванием (удалением) из структуры сплава связующего в результате воздействия высоких ударных и абразивных нагрузок, высоких температур и влияния агрессивных сред при работе долота, а также возникновением внутренних напряжений в сплаве. По результатам исследований видно, что твердосплавное вооружение собственного производства не уступает импортному по характеристикам даже после работы под нагрузкой.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Показано, что при работе буровых шарошечных долот основным видом повреждения твердосплавных зубков является их разрушение за счёт скола при повышенных или даже нормальных энергиях удара по забою. В связи с этим преимущественное значение приобретает обеспечение вязкости разрушения (трещиностойкости) твердых сплавов и необходимость глубокого изучения влияния на трещиностойкость условий производства и микроструктуры вольфрамкобальтовых сплавов, используемых в буровых шарошечных долотах;

2. Установлено влияние типичных дефектов вольфрамкобальтовых твердых сплавов, применяемых в производстве буровых шарошечных долот, на трещиностойкость и другие физико-механические и эксплуатационные свойства твердых сплавов. Предложены мероприятия по исправлению некоторых из рассмотренных дефектов. Указаны условия, позволяющие не допускать данных видов отклонений. Подобран режим и состав нормализующей смеси для исправления критических дефектов «η-фазы» и «свободного углерода»;

3. Исследовано влияние режимов приготовления гранулированного твердосплавного порошка с целью получения высоких показателей трещиностойкости и микроструктуры сплава BK10C, определено оптимальное время операции смешивания-размола исходных компонентов – 9 часов. Достигнуто значение трещиностойкости $W_k = 18,3 \text{ МН} \cdot \text{м}^{-3/2}$, в то время как у изделий, изготовленных по стандартному режиму, $W_k = 17,1 \text{ МН} \cdot \text{м}^{-3/2}$;

4. Исследована возможность нормализации микроструктуры твердосплавных изделий и повышение трещиностойкости:

Установлен состав для сплава BK15C с добавлением ингибитора роста зерна твердого сплава КХНП-2 (Cr_3C_2) (ТУ 14-22-28-90), что позволило увеличить трещиностойкость и

нормализовать микроструктуру. Серийный сплав ВК15С имеет $W_k = 22,3 \text{ МН} \cdot \text{м}^{-3/2}$, а сплав с добавлением Cr_3C_2 имеет $W_k = 23 \text{ МН} \cdot \text{м}^{-3/2}$. Легирующий компонент КХНП-2 добавлен в технологический процесс производства;

Сплав ВК6С определен как основной для изготовления зубков, применяемых в качестве армирующих элементов долота подверженных сильному истирающему износу (лапы и тыльного конуса шарошки). Трещиностойкость и твердость сплава ВК5С составляют - $12,6 \text{ МН} \cdot \text{м}^{-3/2}$ и 90,4 HRA, соответственно, а сплава ВК6С - $13,0 \text{ МН} \cdot \text{м}^{-3/2}$ и 90,4 HRA, соответственно;

5. Предложена конструкция пресс-оснастки и подобран режим прессования с изменением плотности заготовки. Это позволило: снизить нормы расхода дорогостоящих материалов - порошков карбида вольфрама и кобальта на 2-3%; повысить ресурс алмазных шлифовальных кругов станков на 25%; снизить трудоемкость изготовления твердосплавных зубков;

6. Установлены оптимальные температурные режимы для спекания зубков из сплава ВК15С и ВК10С при температурах выше стандартного режима, так как это позволяет повысить трещиностойкость данных сплавов ($W_k = 23 \text{ МН} \cdot \text{м}^{-3/2}$ и $19 \text{ МН} \cdot \text{м}^{-3/2}$, соответственно), работающих при ударных нагрузках. Сплав ВК6С лучше спекать при температурах ниже стандартного режима, так как это увеличивает твердость (90,6 HRA), что необходимо для данного сплава, работающего при абразивном истирании.

Показано, что повышение давления спекания до $4 \pm 0,5 \text{ МПа}$ и выше благоприятно влияет на процесс уплотнения сплава и смачивание зерен карбидов кобальтовым связующем в процессе жидкофазного спекания и повышение трещиностойкости в среднем на 2%. Однако негативным фактором является то, что это увеличивает нагрузку на вакуумные узлы, приводит к ускоренному износу и/или разрушению графитового муфеля печи.

Рассмотрено влияние среды спекания на твердосплавные изделия, установлены достоинства и недостатки каждого способа. Показана нецелесообразность создания функционально-градиентных твердых сплавов на производстве АО «Волгабурмаш» с целью повышения трещиностойкости в поверхностном слое.

7. Проведен сравнительный анализ свойств покупных гранулированных твердосплавных смесей и спеченных зубков импортного производства. Сделаны выводы по целесообразности их применения в АО «Волгабурмаш» в качестве материалов с повышенной трещиностойкостью при производстве буровых долот. Также произведено исследование микроструктуры и физико-механических свойств зубков отработанного долота АО «Волгабурмаш» и долота импортного производства, по результатам которых показано, что твердосплавное вооружение собственного производства не уступает импортному по трещиностойкости.

Основное содержание диссертации представлено в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Жадяев, А.А. О применении твердых сплавов различных производителей в производстве буровых шарошечных долот / А.А. Жадяев, Д.А. Захаров // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. - 2022. – №3(16). – С. 78-87. **(ВАК)**.

2. Жадяев, А. А. Физико-механические свойства твердосплавного вооружения буровых шарошечных долот с типичными для сплава WC-Co неоднородностями структуры / А.А. Жадяев // Научноёмкие технологии в машиностроении. - 2022. - № 6. - С. 3-11. **(ВАК)**.

3. Захаров, Д.А. Пути повышения качества твердосплавного вооружения буровых долот / Д.А. Захаров, А.А. Жадяев // Металлургия машиностроения. – 2020. - №5. – С. 32-36. **(ВАК)**.

Публикации в изданиях, индексируемых базами Web of Science и/или SCOPUS:

4. Zhadyaev, A.A. Comparative analysis of the effect of defects in the microstructure of a hard alloy on crack resistance / A.A. Zhadyaev, D.A. Zakharov, A.P. Amosov // AIP Conference Proceedings. – 2022. - № 2467. – P. 020063. **(Scopus / WoS)**.

5. Zhadyaev, A.A. Comparative analysis of physical and mechanical properties of hard alloy products depending on the synthesis mode / A. A. Zhadyaev, D. A. Zakharov, A. P. Amosov, V.A. Novikov // AIP Conference Proceedings. - 2021. - № 2402. – P. 20056. **(Scopus / WoS)**.

Публикации в других изданиях:

6. Жадяев, А.А. Исследование возможности синтеза вольфрамкобальтовых изделий с функциональной градиацией свойств / А.А. Жадяев, Д.А. Захаров // Физическое материаловедение: X Международная школа, посвященная 10-летию лаборатории «Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы» (Тольятти, 13-17 сентября 2021 года); Актуальные проблемы прочности : LXIII Международная конференция, посвященная 70-летию Тольяттинского государственного университета (Тольятти, 13-17 сентября 2021 года) : сборник материалов / ответственный редактор Д.Л. Мерсон. – Тольятти: Изд-во ТГУ. - 2021. - С. 76-77.

7. Жадяев, А.А. Сравнительный анализ физико-механических свойств твердосплавных изделий импортного производства и производства АО «Волгабурмаш» / А.А. Жадяев, Д.А. Захаров // Физическое материаловедение: X Международная школа, посвященная 10-летию лаборатории «Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы» (Тольятти, 13-17 сентября 2021 года) ; Актуальные проблемы прочности : LXIII Международная конференция, посвященная 70-летию Тольяттинского государственного университета (Тольятти, 13-17 сентября 2021 года) сборник материалов / ответственный редактор Д.Л. Мерсон. – Тольятти: Изд-во ТГУ. - 2021. - С. 134-135.

8. Жадяев, А.А. Определение причины возникновения дефектов микроструктуры твердосплавных изделий WC-Co на производстве / А.А. Жадяев, В.А. Новиков, А.М. Хакимов, А.П. Амосов // СОВРЕМЕННЫЙ МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ: научно-практический рецензируемый журнал. Юго-Зап. гос. ун-т., Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. – 2020. - № 6 (33). - С. 21-28.

9. Жадяев, А.А. Сравнение защитных свойств антицементационных паст, используемых при вакуумном цементировании деталей буровых долот / А.А. Жадяев, А.М. Хакимов // Наука молодых – будущее России: сборник научных статей 5-ой Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых (10-11 декабря 2020 года) в 4-х томах, Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. – 2020. - № 4. - С. 94-98.

10. Жадяев, А.А. Определение причины скола опоры шарошки бурового долота / А.А. Жадяев, А.М. Хакимов // Наука молодых – будущее России: сборник научных статей 5-ой Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых (10-11 декабря 2020 года) в 4-х томах, Юго-Зап. гос. ун-т., Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. – 2020. - № 4. - С. 91-94.

11. Жадяев, А.А. Исследование влияния условий спекания твердого сплава WC-Co на его структуру, трещиностойкость и прочие физико-механические характеристики / А.А. Жадяев, Д.А. Захаров, А.П. Амосов // СОВРЕМЕННЫЙ МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ: научно-практический рецензируемый журнал, Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. – 2020. - № 4 (35). - С. 32-41.

12. Жадяев, А.А. Зависимость морфологии и размера частиц порошков карбида вольфрама от условий предварительного размола / А.А. Жадяев, Д.А. Захаров, А.П. Амосов, В.А. Новиков // ДПП 2020. Горячее прессование, фундаментальные и прикладные аспекты получения порошковых и композиционных материалов, покрытий: материалы международной научно-технической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения профессора Ю.Г. Дорофеева (Новочеркасск, 22–24 июня 2020 г.) – Новочеркасск: Изд-во «НОК». - 2020. – С. 189 – 194.

13. Жадяев, А.А. Исследование трещиностойкости вольфрамокобальтовых сплавов VK10C производства АО «Волгабурмаш» и VK10 производства Китай / А.А. Жадяев // ЗА НАМИ БУДУЩЕЕ: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества: Сборник научных статей Всероссийской молодежной научной конференции (05 июня 2020 года), в 4-х томах, Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. – 2020. - № 3. - С. 238-242.

14. Жадяев, А.А. Сравнительный анализ порошков сплава VK10C производства АО «Волгабурмаш» и VK10 производства Китай / А.А. Жадяев // МОЛОДЕЖЬ И СИСТЕМНАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ СТРАНЫ: Сборник научных статей 5-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых (19-20 мая 2020 года), в 6-х томах, Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. – 2020. - № 5. - С. 246-250.

15. Жадяев, А.А. Испытания прочностных характеристик твердого сплава WC-Co при пониженных температурах / А.А. Жадяев, Д.А. Захаров, А.П. Амосов // Девятая Международная конференция "КРИСТАЛЛОФИЗИКА И ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ", посвященная 100-летию со Дня рождения академика Б.К. Вайнштейна и Четвертая Международная Школа Молодых Ученых "Актуальные проблемы современного материаловедения", 22-26 ноября 2021 г., - Москва, НИТУ «МИСиС». – 2021. - С. 68.

16. Жадяев, А.А. Исследование оксидных слоев на поверхности твердосплавных зубков буровых долот, образующихся при их изготовлении / А.А. Жадяев // МОЛОДЕЖЬ И СИСТЕМНАЯ

МОДЕРНИЗАЦИЯ СТРАНЫ: Сборник научных статей 5-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых (19-20 мая 2020 года), в 6-х томах, Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. – 2020. - № 5. - С. 238-241.

17. Жадяев, А.А. Структура поверхности сплава WC-Co выявляемая при металлографическом исследовании шлифов, полученных с использованием электроэрозионного и химического травления / А.А. Жадяев // МОЛОДЕЖЬ И СИСТЕМНАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ СТРАНЫ: Сборник научных статей 5-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых (19-20 мая 2020 года), в 6-х томах, Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. – 2020. - № 5. - С. 242-245.

18. Жадяев, А.А. Сравнение физико-механических свойств импортных вольфрамкобальтовых порошковых смесей, применяемых в производстве твердосплавных изделий / А.А. Жадяев, Д.А. Захаров // 19-я Международная молодежная научно-практическая конференция, ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ, ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ, КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ, 27-28 февраля 2018 года, - Новочеркасск. – 2018. - С. 366-367.

Научное издание

Жадяев Александр Александрович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук на тему:

**ПОВЫШЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ БУРОВЫХ
ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ**

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 (Д 999.122.02) на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева» (протокол №11 от «26» сентября 2022г.)

Формат 60x84 1/16. Набор компьютерный

Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ № _____.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Отдел типографии и оперативной печати

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.