На правах рукописи

РЯБЧИКОВ Сергей Яковлевич

ОБЪЁМНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ТВЁРДОСПЛАВНОГО И АЛМАЗНОГО ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Специальность 25.00.14 - Технология и техника
геологоразведочных работ

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Томск – 2002

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научные консультанты:

доктор технических наук, профессор Власюк Виктор Иванович

доктор технических наук, профессор Кривошеев Владимир Васильевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Горбунов Валерий Фёдорович

доктор технических наук, профессор Ошкордин Олег Владимирович

доктор технических наук, профессор Рожков Владимир Павлович

Ведущее предприятие: ОАО «Томскнефтегазгеология» ВНК

Защита диссертации состоится « 26 » декабря 2002 г. в 14 часов в 111 аудитории 1 корпуса на заседании диссертационного совета Д 212.269.07 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета

Автореферат разослан «_____» _____ 2002 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Евсеев В.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Эффективность бурения скважин любого назначения, особенно в твёрдых горных породах, в значительной степени определяется эксплуатационными показателями породоразрушающего инструмента (ПРИ).

Основным ПРИ для бурения скважин в различных геолого-технических условиях являются алмазные и твердосплавные коронки, шарошечные долота. Для их изготовления используются алмазы, твердые сплавы, легированные стали и различные наполнители. Все перечисленные материалы имеют высокую стоимость и относятся к категории остродефицитных, поэтому буровой инструмент является достаточно дорогим и заметно влияет на себестоимость бурения скважин. Этим определяется высокая актуальность поиска путей, обеспечивающих повышение его эксплуатационных показателей.

Существующие способы упрочнения твёрдых сплавов и композиционных алмазосодержащих материалов из-за большой сложности и малой эффективности не нашли широкого применения при создании ПРИ. Практически отсутствуют способы повышения износостойкости серийно выпускаемого инструмента. Поэтому исследование проблемы упрочнения породоразрушающего инструмента, создание новых технологий по повышению его эксплуатационных показателей является актуальной задачей.

Проблемой создания и повышения ресурса породоразрушающего инструмента занимались многие исследователи. Решению отдельных её аспектов посвящены работы Афанасьева И.С., Барона Л.И., Блинова Г.А., Башкатова Д.Н., Воздвиженского Б.И., Волкова С.А., Володченко К.Г., Власюка В.И., Горшкова Л.К., Головина О.С., Гинзбурга И.М., Глатмана Л.Б., Куличихина Н.И., Кудряшова Б.Б., Козловского Е.А., Корнилова Н.И., Калинина А.Г., Кардыша В.Г., Киселёва А.Т., Курочкина П.И., Лошака М.Г., Лачиняна Л.А., Марамзина А.В., Ошкордина О.В., Оношко Ю.А., Осецкого А.И., Сулакшина С.С. Соловьёва Н.В., Спирина В.И., Сахарова А.В., Чихоткина В.Ф., Эпштейна Е.Ф., Яковлева А.М. и др.

Выполненные исследования позволили решить многие вопросы при создании высокоэффективного ПРИ для бурения скважин в различных геолого-технических условиях. Однако износостойкость отечественного инструмента (большинства типов), особенно алмазного, существенно ниже зарубежного. Из общего количества серийно выпускаемых твёрдосплавных коронок для бурения скважин и шпуров от 10 до 40% выходят из строя, не отработав положенного ресурса по причине разрушения или чрезмерного износа. Учитывая вышеизложенное, поставленные в работе задачи направлены на повышение эксплуатационных показателей бурового породоразрушающего инструмента.

Идея работы. Идея настоящей работы заключается в повышении эксплуатационных показателей алмазного и твёрдосплавного ПРИ за счёт воздействия различными физическими методами (криогенная обработка, облучение малыми дозами гамма-квантов и электронов, комплексное криоген-

но-радиационное воздействие) на структуру и текстуру материалов, из которых они изготовлены, с целью модификации их физико-механических свойств.

Цель работы. Основной целью работы является систематизация, расширение и углубление знаний в области упрочнения ПРИ, разработка научно-методических основ для создания методов, технических средств и технологий повышения износостойкости инструмента, обеспечивающего высокую эффективность бурения скважин.

Задачи исследований. В соответствии с поставленной целью в работе предусматривается решение следующих задач:

- разработка новых технологий упрочнения породоразрушающего инструмента и их технико-экономическая оценка;
- выбор и обоснование перспективных направлений повышения ресурса ПРИ на основе анализа современных представлений о механизме упрочнения твёрдых сплавов и композиционных алмазосодержащих материалов;
- выбор и обоснование методов исследований структуры и физико-механических характеристик твёрдых сплавов и композиционных алмазосодержащих материалов;
- разработка на основе теоретических и экспериментальных исследований новых технологий повышения эксплуатационных показателей бурового инструмента и технико-методических средств для их реализации;
- опытно-производственная проверка результатов исследований и разработок;
- исследование и формулирование версий механизма повышения износостойкости и прочности ПРИ при различных методах воздействия на него.

Методы исследований. Поставленные задачи решаются с использованием комплекса методов, включающего в себя: анализ и обобщение результатов ранее проведенных теоретических исследований по повышению износостойкости твёрдосплавного и алмазного ПРИ; теоретическое обоснование и обобщение результатов экспериментальных исследований; проверка на лабораторных стендах и в производственных условиях результатов исследований; технико-экономический анализ внедрения результатов исследований в производство.

Наряду с традиционными в работе использовались новые методы исследований (радиографическое декорирование, химическое травление; методы, основанные на эффекте акустической эмиссии и др.).

Обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью ПЭВМ с использованием пакета стандартных программ.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- впервые доказана принципиальная возможность повышения эксплуатационных показателей ПРИ методами криогенной обработки, радиационного облучения малыми дозами гамма-квантов и электронов, а также комплексного криогенно-радиационного воздействия, подтверждённая патентами РФ на изобретения [45-48];
- на основании теоретических и экспериментальных исследований по-

лучены качественная и количественная оценки влияния криогенной обработки и облучения малыми дозами гамма-квантов на структуру, текстуру и напряженное состояние твёрдых сплавов и композиционных алмазосодержащих материалов;

- установлен характер влияния процессов криогенной обработки, облучения малыми дозами гамма-квантов и комплексного криогенно-радиационного воздействия на физико-механические свойства твёрдых сплавов и композиционных алмазосодержащих материалов (предел прочности при изгибе, упругая деформация, твёрдость, микротвёрдость, жесткость и др.);

- экспериментально установлены оптимальные режимные параметры криогенной обработки и облучения гамма-квантами твёрдосплавного и алмазного ПРИ, обеспечивающие максимальное повышение их эксплуатационных показателей;

- установлена связь структурных преобразований в твёрдом сплаве при криогенной обработке с уровнем акустической эмиссии при рентгеновском облучении, позволяющая осуществлять контроль за качеством упрочнения ПРИ;

- установлен характер влияния атомарного водорода на физико-механические характеристики и износостойкость твёрдых сплавов и композиционных алмазосодержащих материалов при облучении их гамма-квантами;

- сформулированы версии механизма упрочнения твёрдосплавного и алмазного ПРИ при криогенной обработке (в режиме термическом удара) и облучении малыми дозами гамма-квантов, основанные на изменении тонкой кристаллической структуры твёрдых сплавов и композиционных материалов.

Практическая ценность работы заключается в том, что на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработан и реализован в производственных условиях комплекс способов управляемого повышения эксплуатационных показателей твёрдосплавного и алмазного ПРИ.

1. Созданы методики и технологии повышения эксплуатационных показателей твёрдосплавного и алмазного ПРИ методами криогенной обработки, облучения малыми дозами гамма-квантов и их комплексного воздействия, нашедшие широкое практическое использование.

2. Разработаны технологические карты бурения скважин в различных геолого-технических условиях с использованием твёрдосплавного и алмазного ПРИ с повышенными эксплуатационными показателями.

3. Создана установка для криогенной обработки алмазного и твёрдосплавного породоразрушающего инструмента.

4. Разработан способ контроля качества упрочнённого ПРИ, основанный на явлении акустической эмиссии при слабом рентгеновском облучении.

Реализация результатов исследований:

- разработаны и изданы (совместно с Всероссийским институтом техники разведки) межотраслевые «Методические рекомендации по криогенной обработке алмазных буровых коронок», утверждённые Мингео СССР;

- внедрены во многих геологических организациях России и стран

СНГ методики по практическому применению криогенной обработки и облучению малыми дозами гамма-квантов твёрдосплавного и алмазного ПРИ, что отражено в многочисленных публикациях;

- разработана техническая документация на изготовление установки для криогенной обработки алмазного и твёрдосплавного ПРИ;

- в процессе исследований произведена в различных геологических объединениях отработка более 7000 единиц различного ПРИ, упрочнённого в Томском политехническом университете методом криогенной обработки и облучения малыми дозами гамма-квантов;

- изданные монографии [1, 2, 3], брошюры [4, 5, 6] распространены среди ВУЗов стран СНГ, осуществляющих подготовку специалистов по бурению скважин, и научно-исследовательских организаций, занимающихся разработкой и выпуском ПРИ, а также производственных организаций Министерства природных ресурсов и Министерства энергетики РФ.

- научные и практические результаты исследований использованы при проведении учебных занятий по дисциплине «Буровые машины и механизмы» со студентами специальности «Технология и техника разведки МПИ», подготовке студентами этой специальности дипломных работ, а также для подготовки аспирантов по научной специальности 25. 00. 14 «Технология и техника геологоразведочных работ».

Исходные материалы и личный вклад соискателя. Диссертация выполнена по материалам, полученным в результате проведения НИР по хоздоговорам с ПГО «Новосибирскгеология», «Востказгеология», «Томскнефтегазгеология», «Севвостгеология», трестом «Кузбассуглеразведка»; по госбюджетной теме № 2. 90. 94. Д. ТПУ; на основании договоров о творческом содружестве между ТПУ и ВИТР, ТПУ и Сибирским химкомбинатом (г. Томск). В большей части перечисленных НИР автор выступал в качестве научного руководителя или ответственного исполнителя.

Лично автору принадлежат практически все реализованные в диссертации научные, методические и технические идеи. Автор лично участвовал в проведении исследований и испытаний в лабораторных и производственных условиях, часть из которых выполнена под его научным руководством Борисовым К.И., Щукиным А.А., Айкашевым А.В., Письмеровым А.С., Лене Г.В., Шокоревым Н.Н., Печугиным А.В. При обработке результатов исследований и проведении некоторых экспериментов автор пользовался помощью и консультациями доцента Нейштеттера И.А.

Апробация работы. Основные положения и отдельные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Всероссийских научно-технических конференциях «Проблемы научно-технического прогресса в бурении геологоразведочных скважин» (Томск, ТПУ 1984, 1989, 1994, 1999); на 1 и 2 Международных симпозиумах по бурению скважин в осложнённых условиях» (Санкт-Петербург, 1989, 1992); на Всесоюзной научно-практической конференции «Проблемы технокриологии в различных отраслях промышленности» (Пенза, 1987); на НТС ПГО «Новосибирскгеология» (1988), «Востказгеология» (1989), «Запсибгеология» (1989); на Всесоюзной научно-

технической конференции «Разрушение горных пород при бурении скважин» (Уфа, 1989); на региональной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» (Тюмень,1997); на Международной научно-технической конференции «Материалы и упрочняющие технологии - 97» (Курск, 1997); на IX Международном симпозиуме «Измерение радиации и её применение» (США, Мичиган, 1998); на научно-технической конференции «Методы и средства измерений физических величин» (Нижний Новгород, 1998); на региональной научно-технической конференции «Перспективные материалы и технологии» (Красноярск, 1998); на 10-ой Международной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов» (Томск, 1999); на Региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока (Томск, 2000г.); на VIII научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика оборудования» (Иркутск, 2001); на Международной научно-технической конференции «Горно-геологическое образование в Сибири. 100 лет на службе науки и производства» (Томск, 2001);

Разработки по теме диссертации экспонировались на выставке, посвящённой 100-летию ТПУ (Томск, 1996); выставке «Интеграция – 97» (Томск, 1997); выставке-ярмарке «Товары народного потребления, промышленная и научно-техническая продукция» (Томск, 1998).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 52 работы, в том числе 4 монографии, 2 брошюры, 31 статья, 6 тезисов докладов, 1 отраслевая методика; 6 патентов РФ и 1 авторское свидетельство СССР на изобретения.

Объём и структура диссертации. Диссертация изложена на 309 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков, 38 таблиц и состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 205 наименований и 4 приложений.

Автор выражает глубокую благодарность научным консультантам, д.т.н. В.И. Власюку и д.т.н. В.В. Кривошееву за постоянную методическую помощь и консультации. Особую признательность автор выражает профессору А.П. Мамонтову, своему наставнику профессору С.С. Сулакшину, а также сотрудникам Томского политехнического университета профессору И.П. Чернову, доцентам В.А. Ермолаеву, К.И. Борисову, А.А. Щукину, В.Г. Храменкову, Л.Л. Игнатенко, В.А. Дельве, И.А. Нейштеттеру, Б.В. Чахлову за постоянную помощь при выполнении работы и обсуждении её результатов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранного направления исследований, излагаются идея, цель, задачи и методы исследований, характеризуется научная новизна и практическая значимость работы, формулируются основные защищаемые положения, приводится информация о реализации результатов исследований, исходных материалах, личном вкладе автора, об апробации диссертационной работы, её объёме и структуре.

В первой главе рассматривается современное состояние проблемы по-

вышения износостойкости и прочности ПРИ, проводится анализ факторов, определяющих его эксплуатационные показатели, на основании которого разработана классификация методов повышения прочности металлов и твёрдых сплавов, производится выбор и обоснование перспективных направлений исследований по повышению работоспособности алмазного и твёрдосплавного ПРИ. Показано, что наиболее перспективными являются методы объёмного упрочнения.

Во второй главе анализируются современные представления о структуре, текстуре и физико-механических свойствах твёрдых сплавов и композиционных алмазосодержащих материалов (КАМ) и на их основе производится выбор объектов и методов исследований. Здесь же приводится описание использованных методов исследований влияния криогенного воздействия и облучения малыми дозами гамма-квантов на износостойкость и прочность твердосплавного и алмазного породоразрушающего инструмента.

В третьей главе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований механизма модификации свойств твёрдых сплавов и КАМ при криогенной обработке: даются количественная и качественная оценки влияния криогенной обработки на структуру и текстуру твёрдых сплавов, на остаточные термические напряжения и физико-механические характеристики. Приводятся результаты исследований влияния криогенной обработки на износостойкость твёрдосплавных и алмазных коронок и их отдельных элементов, экспериментально установленные оптимальные режимные параметры криогенной обработки, рациональные технологические режимы бурения скважин упрочнённым инструментом.

В четвёртой главе приводятся результаты исследований влияния облучения малыми дозами гамма-квантов и электронов на ресурс твёрдосплавного и алмазного ПРИ: даны количественная и качественная оценки влияния облучения малыми дозами гамма-квантов на структуру твёрдых сплавов и их физико-механические свойства; приведены экспериментально установленные оптимальные режимные параметры облучения ПРИ; показано существенное влияние атомарного водорода на перестройку структуры твёрдых сплавов и КАМ при облучении их гамма-квантами; сформулированы версии механизма упрочнения твёрдосплавного и алмазного ПРИ; приведены полученные в результате экспериментальных исследований и сравнительных испытаний рациональные режимные параметры бурения скважин упрочнённым ПРИ.

В пятой главе приводятся результаты исследований технологии упрочнения ПРИ, основанной на криогенно-радиационном воздействии. Приводятся результаты исследований влияния данного метода на износостойкость и прочность твёрдых сплавов и композиционных материалов. Обосновывается перспективность применения криогенно-радиационной технологии для упрочнения ПРИ. Формулируются версии механизма упрочнения алмазного и твёрдосплавного ПРИ при криогенно-радиационном воздействии.

В шестой главе приводятся результаты внедрения и оценка эффективности использования результатов исследований в различных производственных организациях. Формулируются основные направления дальнейших ис-

следований по проблеме повышения износостойкости ПРИ.

В заключении приводятся основные выводы и рекомендации.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Положение 1. ***Криогенная обработка позволяет производить объёмное упрочнение твёрдосплавного и алмазного породоразрушающего инструмента. Механизм упрочнения и твёрдосплавного, и алмазного породоразрушающего инструмента при термическом ударе в области низких отрицательных температур обусловлен изменением тонкой кристаллической структуры твёрдых сплавов и композиционных материалов за счёт пластической деформации кобальтовой или иной другой связки в локальных областях по периметру включений (карбид вольфрама, алмазы, релит и др.) и имеет субструктурный характер.***

Эффективность бурения скважин в различных геолого-технических условиях в значительной степени зависит от эксплуатационных показателей ПРИ, к которым относятся углубка на коронку, механическая скорость бурения, расход твёрдых сплавов и алмазов. Эксплуатационные показатели в значительной степени определяются износостойкостью материалов, из которых изготавливается инструмент. Наиболее перспективным направлением увеличения износостойкости ПРИ является снижение интенсивности его изнашивания за счёт повышения качества используемых материалов. Модификация физико-механических свойств твёрдых сплавов и композиционных материалов может быть реализована воздействием на них различными физическими способами. Анализ классификации способов упрочнения металлов и сплавов, разработанной нами по признаку «глубина упрочнения», показал, что практический интерес для упрочнения ПРИ, работающего в условиях абразивного износа, представляют способы объёмного упрочнения. Наиболее перспективными из них представляются криогенная обработка и облучение малыми дозами гамма-квантов или электронов, поскольку они позволяют производить упрочнение материалов на значительную глубину, являются доступными, достаточно простыми, не требуют сложного оборудования и капитальных затрат. Кроме того, эти способы позволяют упрочнять уже изготовленный инструмент любой конфигурации.

Известно, что прочность и износостойкость твёрдых сплавов и КАМ в значительной степени зависят от их структуры. Воздействуя целенаправленно на структуру различными способами, можно улучшить и прочность, и износостойкость исследуемых материалов. Практически все физические свойства твёрдых тел определяются взаимным расположением, характером взаимодействия и интенсивностью движения атомов кристаллической решётки и свободных электронов. При низких отрицательных температурах происходят радикальные изменения свойств материалов. Состояние твёрдых тел при этом характеризуется малой энергией частиц, пониженным значением энтропии. Однако такое состояние имеет место только тогда, когда система (например, образец твёрдого сплава) принимает температуру окружающей сре-

ды (в нашем случае, температуру жидкого азота -196^{o} С). В начальный же период термического удара перепад температур **ΔT** имеет очень большие значения. Он определяется исходной температурой образца $\mathbf{T_{исх}}$ и температурой криогенной среды $\mathbf{T_a}$. Уровень энтропии в образце оказывается очень высоким. В это время в нём осуществляется работа с отводом тепла **ΔQ** в количестве:

$$\Delta Q = T\,\Delta S, \qquad (1)$$

где ΔS – величина уменьшения энтропии.

При большой теплопроводности твёрдых сплавов и композиционных алмазосодержащих материалов выравнивание их температуры с температурой криогенной среды происходит очень быстро. Следовательно, в образце в короткий промежуток времени совершается значительный объём работы.

Согласно первому началу термодинамики здесь разные формы энергии эквивалентно переходят из одного вида в другой. В приложении к теплу **Q** и работе **L** , будем иметь:

$$Q = A\,L\,, \qquad (2)$$

где А – тепловой эквивалент работы, А = 860 ккал/кВт · ч.

В системе СИ тепло и работа измеряются в одних единицах (Джоуль), следовательно, Q = L. Для единицы массы изменение тепла можно записать в общем виде

$$dQ = dE + dL\,, \qquad (3)$$

где **E** – собственная энергия образца, состоящая из 2-х частей:

$$E = (\nu^{2}/2 + h) + U \qquad (4)$$

$(\nu^{2}/2 + h)$ – внешняя энергия, где **$\nu^{2}/2$** – кинетическая энергия; **h** – потенциальная энергия; **U** – внутренняя энергия.

$$dQ = dU + \left(d\frac{\upsilon^{2}}{2} + dh\right) + PdV, \qquad (5)$$

где V – объём образца.

Обычно внешней энергией можно пренебречь, тогда уравнение (5) примет вид

$$\Delta Q = dU + PdV = dU + dL \qquad (6)$$

Тепловая функция системы или энтальпия определяется как:

$$I = U + PV, \qquad dI = d(U + PV) = dU + PdV + VdP = dQ + VdP, \qquad (7), (8)$$

При постоянном давлении P = const, $dQ = dI$. (9)

Таким образом, тепловое содержание образца при погружении его в жидкий азот быстро изменяется в сторону уменьшения, что сопровождается резким снижением энтропии

$$\Delta S = \Delta Q / T. \qquad (10)$$

В процессе релаксации в образце совершается работа

$$dL = \Delta Q - dU , \qquad (11)$$

имеющая пропорциональную зависимость от потери тепла **ΔQ**, что хорошо согласуется со вторым началом термодинамики:

$$dU = C_v\, dT + \left[T\left(\frac{dP}{dT}\right)_v - P \right] dV , \qquad (12)$$

где $\mathbf{C_v}$–теплоёмкость при постоянном объёме, $C_v = T(dS/dT)_v$.

Генерируемая в процессе термического удара энергия затрачивается на изменение объёма и структурных показателей образца. За счёт значительной разницы теплопроводности и термического коэффициента линейного расширения компонентов твёрдого сплава (WC, Co и др.) в них будут протекать деформационные процессы, способные изменять субструктуру, определяемую движением дислокаций и точечных дефектов, остаточные термические напряжения (σ_1, σ_2, $\sigma_{вн}$), характер распределения микролокальных полей и участков напряжений. Изменения в структуре, несомненно, приводят к изменению физико-механических характеристик твёрдого сплава, что подтверждается результатами наших исследований.

Исследования микролокальных полей и участков напряжений на поверхности твёрдых сплавов проводились с использованием метода радиографического декорирования (РД). На рис.1 приведены фигуры РД на поверхности твёрдого сплава ВК8 до криогенной обработки. Картины РД, отражающие поля напряжений, характеризуются дендритными симметричными (а) и несимметричными (б) фигурами, имеющими протяжённость от 0,2 до 1 мм, что свидетельствует о наличии больших суперпозиционных полей внешних и внутренних напряжений, которые определяются аномальными отклонениями от совершенной структуры твёрдого сплава.

а **б**

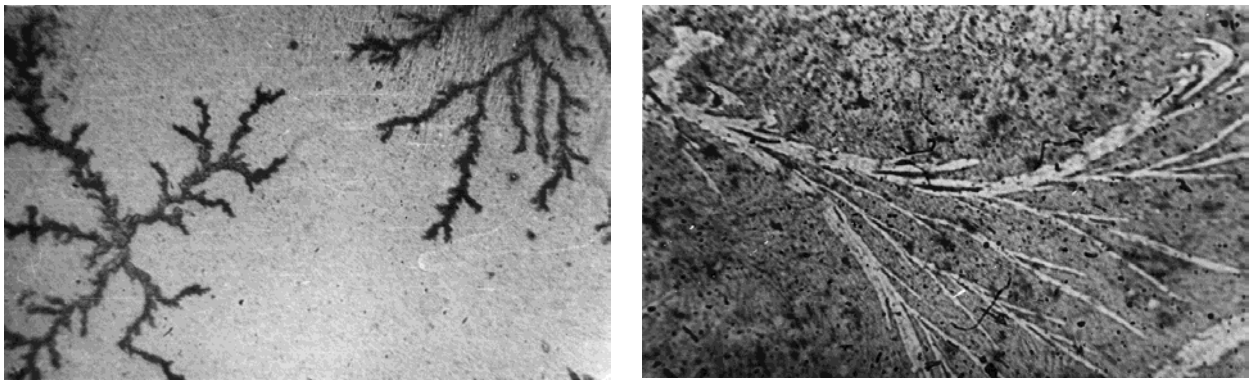

Рис.1. Фигуры радиографического декорирования на поверхности твёрдого сплава ВК8 до обработки жидким азотом. Увеличение х400:
а – симметричные поля напряжений; б – несимметричные поля напряжений

Достаточно мощные поля напряжений на поверхности могут существенно

влиять на прочностные свойства твёрдых сплавов. При последующем шлифовании поверхности образца на глубину 10-15 мкм описанные фигуры РД в основном сохраняют свои размеры и характер распределения, что говорит о существовании напряжений не только на поверхности, но и внутри образца.

На рис. 2 а, б приведены два вида фигур РД, выявленных на поверхности твёрдых сплавов, обработанных в жидком азоте. Первый вид (рис. 2 а) характеризуется сетчатым распределением линий. Обращает на себя внимание то, что угол между линиями сетки равен примерно 120^{o}. Очевидно, что такие фигуры РД отвечают распределению экзоэлектронных потенциалов внутри отдельных зёрен WC, имеющих гексагональную структуру решётки. Такое сравнительно чёткое и геометрически правильное сетчатое распределение фигур говорят о достаточно высоких внутренних напряжениях, имевших место до криогенной обработки. Под действием термического удара в зёрнах WC происходит фрагментация на блоки вдоль плоскостей спайности, в результате чего снимаются первичные суперпозиционные поля напряжений, происходит выравнивание градиента концентрации напряжений.

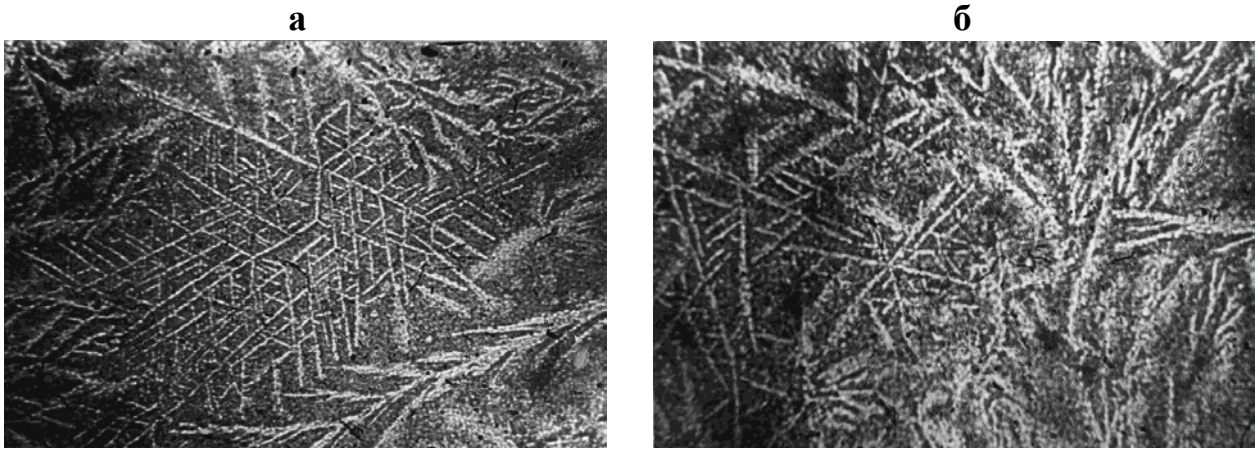

Рис. 2. Фигуры радиографического декорирования на поверхности твёрдого сплава ВК8 после обработки жидким азотом. Увеличение х400:
а – сетчатое распределение фигур РД; б – дендритное распределение фигур РД

Второй вид фигур РД (рис.2 б) имеет форму ветки хвойного дерева с фрагментами различной протяженности. Эти фигуры РД отвечают областям кобальтовой фазы твёрдого сплава, окружающей зерна WC. Их расплывчатая форма свидетельствует о значительно меньшей напряженности. Для образцов, обработанных жидким азотом, типичным является присутствие обеих видов фигур РД. Как правило, фигуры РД первого вида находятся в окружении фигур РД второго вида.

Анализ картин РД на рис.2 а, б показывает, что после криогенной обработки суперпозиционные поля напряжений существенно снимаются и рассредоточиваются.

Изменение напряжённого состояния поверхности твёрдого сплава при криогенной обработке свидетельствует о существенной перестройке структуры по всему объёму образца. Этот вывод подтверждается также изменени-

ем скорости химического травления твёрдого сплава в травителе состава: 10% K_3 [$Fe(CN)_6$] + 10% KOH + 80% H_2O. Усреднённые показатели скорости химического травления образцов твёрдого сплава ВК8 приведены в табл. 1.

Из табл.1 видно, что скорость химического травления образцов твёрдого сплава после криогенной обработки на 10,5% выше, чем у контрольных, что свидетельствует об изменениях, произошедших в структуре твёрдого сплава. Реальные кристаллы в поликристаллических телах всегда имеют достаточно высокий уровень концентрации дислокаций и точечных дефектов. Криогенная обработка твёрдого сплава сопровождается дополнительным по-

Таблица 1

Скорость химического травления твёрдого сплава ВК8

Вид образцов твёрдого сплава	Средняя скорость химического травления, г/мин	Разница в скорости химического травления, %
Обработанные жидким азотом	0,00273	10,5
Контрольные	0,00247	

вышением этого уровня, прежде всего за счёт дислокаций. При химическом воздействии работа отрыва атомов от кристалла в ядре дислокации, в скоплениях точечных дефектов ниже, чем на участках с пониженной концентрацией дефектов, поэтому скорость растворения кристалла здесь выше. Это обстоятельство является причиной более высокой скорости травления образцов твёрдого сплава, обработанных в жидком азоте.

Полученные результаты исследований позволили сформулировать версию о механизме упрочнения твёрдых сплавов при криогенной обработке.

С точки зрения структуры материала, основными факторами, определяющими прочностные характеристики твёрдого сплава, являются: соотношение компонентов, размер зёрен, наличие примесей, количество и размер пор, размеры микролокальных полей напряжений. После криогенной обработки происходят следующие изменения в этих характеристиках: соотношение компонентов, количество примесей и пор не изменяется; наблюдается значительная перестройка структуры, уменьшаются блоки микромозаики вследствие фрагментации их по плоскостям спайности; рассредоточиваются исходные поля напряжений. Всё это доказывает деформационное упрочнение твёрдого сплава при пластической деформации в процессе криогенной обработки. В пользу деформационного упрочнения говорит существенное повышение плотности дислокаций в твёрдом сплаве после криогенной обработки. В табл. 2 приведены результаты определения плотности дислокаций в твёрдом сплаве при различных режимах криогенной обработки, полученные методом рентгеноструктурного анализа. Так, при максимальном значении ΔT = 296 К плотность дислокаций повышается на два порядка.

На макроуровне перестройка в структуре твердого сплава при крио-

генной обработке напоминает собой изменения в структуре, происходящие при упрочнении металла методом механического наклепа.

Таблица 2

Плотность дислокаций в образцах твёрдого сплава ВК8 при различных режимах криогенной обработки

Исходные образцы	I режим обработки: $T_{исх}$= 293 К, $T_{кон}$= 77 К, $t_{обр}$= 20 мин	II режим $T_{исх}$= 293 К, $T_{кон}$= 77 К, $T_{обр}$= 1; 3; 6; 10 мин	III режим $T_{исх}$= 373 К, $T_{кон}$= 77 К, $T_{обр}$= 20 мин
$4{,}8 \cdot 10^{9}$ см$^{-2}$	$5{,}1 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$	$8{,}2 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$	$5{,}4 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$

Таким образом, эффект упрочнения твердого сплава при глубоком охлаждении обусловлен изменением тонкой кристаллической структуры за счет наклепа кобальтовой связки в локальных областях по периметру карбидных включений из-за различия коэффициентов термического расширения компонентов твёрдого сплава. Этот процесс должен сопровождаться изменением его физико-механических характеристик.

Механизм упрочнения композиционных алмазосодержащих материалов при криогенной обработке также базируется на изменении напряжённого состояния в материале матрицы, возникшем за счёт деформационных процессов при термическом ударе в области низких отрицательных температур. Повышение прочности матрицы достигается блокированием пластической деформации прослоек связки зёрнами вольфрамокобальтовой смеси, гранулами твёрдого сплава и других наполнителей. Сложная структура материала матрицы способствует повышению концентрации дислокаций и точечных дефектов при любом внешнем воздействии, приводящем к проявлению пластической деформации. Деформационное упрочнение обеспечивается также высокой плотностью порогов и реакций вдоль линий дислокаций. При этом алмазные зёрна рассматриваются как включения в матричный материал, воспринимающие от него всесторонние давления значительной величины. По данным Спирина В.И., если включением является частица алмаза, то при термическом ударе с перепадом температур в 216 К в системе «алмаз – матрица» возникают остаточные напряжения сжатия σ, равные - 550 МПа. Такое существенное изменение напряжённого состояния в материале матрицы при криогенной обработке повышает её удерживающую способность алмазных зёрен. Качество закрепления алмазов повышается не только за счёт адгезии, но и вследствие механического удержания окружающими объёмами металла. Под воздействием значительных усилий, возникающих в композиционном материале при криогенной обработке, происходит проникновение материала связки в микротрещины алмазных зёрен, заполнение поверхностных пор и т.д., что способствует более качественному закреплению алмазов в матрице и увеличению их работоспособного периода в составе алмазных коронок.

Проверка эффективности криогенной обработки алмазных коронок осуществлялась в процессе сравнительных испытаний большого объёма алмазного ПРИ (более 3000 единиц) в производственных условиях ПГО «Восказгеология». Испытания показали, что криогенная обработка алмазного ПРИ позволяет повысить углубку на коронку в 1,4-1,6 раза, механическую скорость бурения в 1,2- 1,3 раза.

Положение 2. ***Повышение эксплуатационных показателей твёрдосплавного породоразрушающего инструмента при термическом ударе в области низких отрицательных температур достигается созданием в твёрдом сплаве контролируемого напряженного состояния за счёт повышения остаточных напряжений сжатия в различных фазах и остаточных паяльных напряжений.***

В работах М.Г. Лошака, Л.И. Креймера, Н.А. Клочко и др. показано, что для упрочнения твёрдых сплавов необходимо применять такие методы, которые вызывали бы структурные изменения и фазовые превращения, приводящие к образованию остаточных напряжений сжатия, повышению твёрдости и ударной вязкости. К таким методам относится, на наш взгляд, криогенная обработка, реализуемая в режиме термического удара.

Структурные компоненты, входящие в состав твёрдого сплава (WC, Co), имеют существенно отличающиеся по величине коэффициенты термического линейного расширения и теплопроводности. Поэтому при охлаждении от температуры спекания в твёрдых сплавах возникает объёмное напряженное состояние термического характера, описываемое тремя главными нормальными напряжениями σ_1, σ_2, σ_3. Вопрос о влиянии остаточных напряжений на макроскопически измеряемые прочностные характеристики до сих пор является дискуссионным. Главным в этом вопросе является следующее: складываются ли алгебраически внешние приложенные напряжения с остаточными термическими напряжениями.

Криогенная обработка рассматривается нами как разновидность закалки, протекающей в режиме быстрого охлаждения в широком диапазоне изменения температуры (от +100 до -196^o С). Предполагалось, что при столь большом перепаде температуры в твёрдом сплаве могут происходить необратимые пластические деформации, приводящие к модификации остаточных напряжений растяжения в напряжения сжатия. Таким образом, конечной целью термического удара, как дополнительной термической обработки, является формирование в твёрдом сплаве макроскопического объёмного напряжённого состояния сжатия.

На основании предложенной модели, в основу которой положена гипотеза Шпета, дающая представление о природе возникновения термических напряжений в твёрдом сплаве, получены выражения для оценки термических напряжений в двухфазном твёрдом сплаве

$$\sigma_1 = \frac{E_1\beta_1 l_1(T_P - T_k)}{l_{k1}}, \qquad (16) \qquad \sigma_2 = \frac{E_2\beta_2 l_2[(\beta_2 - \beta_1)(T_p - T_k)}{l_{k2}}, \qquad (17)$$

где $\boldsymbol{\sigma_1}$, $\boldsymbol{\sigma_2}$ – напряжения соответственно в карбиде вольфрама и в кобальте; E_1, E_2 – модуль нормальной упругости WC и Co; β_1, β_2 – температурный коэффициент линейного расширения WC и Co; $T_р$ – температура образца при равновесном состоянии; $T_к$ – конечная температура образца при охлаждении; l_1, $l_{к1}$ – линейный размер компонента из карбида вольфрама при равновесном состоянии и при температуре $T_к$; l_2, $l_{к2}$ – линейный размер компонента из кобальта при равновесном состоянии и при температуре $T_к$.

Анализ формул (16), (17) позволяет сделать вывод о том, что на уровень напряжений, формирующихся в обеих фазах твёрдого сплава при криогенной обработке, первостепенное влияние оказывает разность начальной и конечной температуры ΔT.

Однако напряженное состояние в реальных твёрдых сплавах существенно отличается от макетных материалов. Поэтому для количественной оценки влияния криогенной обработки на прочностные характеристики твёрдых сплавов были определены (табл. 3) методом рентгеноструктурного анализа остаточные термические напряжения $\boldsymbol{\sigma_1}$, $\boldsymbol{\sigma_2}$, $\boldsymbol{\sigma_{вн}}$. Из табл. 3 видно, что термический удар при всех режимах криогенной обработки приводит к заметному повышению остаточных напряжений сжатия $\boldsymbol{\sigma_1}$, $\boldsymbol{\sigma_2}$ в WC и снижению напряжений растяжения в кобальтовой связке. Максимальные изменения наблюдаются при термическом ударе от температуры 373 К. В WC напряжения сжатия увеличиваются, а в кобальтовой связке напряжения из положительных преобразуются в отрицательные, то есть в напряжения сжатия, что хорошо согласуется с увеличением плотности дислокаций при этом режиме криогенной обработки (табл. 2).

Таблица 3

Остаточные термические напряжения в твёрдом сплаве ВК8 до и после криогенной обработки

Режим обработки образцов	Исходная температура образцов, К	Время обработки в жидком азоте, мин	Главные напряжения в фазах, МПа:				Внутреннее напряжение $\sigma_{вн}$, МПа
			WC		Co		
			σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	
Исходное состояние	293	-	-90	-130	1200	1500	300
I	293	20	-160	-200	400	600	350
II	293	1+3+6+10*	-170	-210	200	300	350
III	373	20	-190	-240	-100	-150	370

* - многократная криогенная обработка в жидком азоте с выдержкой 1, 3, 6, 10 мин.

В твёрдосплавных резцах реального твёрдосплавного инструмента наряду с главными остаточными напряжениями практически всегда присутствуют остаточные паяльные напряжения, возникающие в процессе закрепления твёрдосплавных резцов к корпусу при пайке. Природа паяльных остаточных напряжений заключается в большом отличии температурных коэффициентов линейного расширения твёрдого сплава ($5{,}5 \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$) и стали

(~12,6· 10^{-6} K^{-1}). Кроме того, в процессе пайки высокотемпературными припоями исходная структура стали переходит в аустенит, распад которого при последующем охлаждении сопровождается увеличением его объёма и изменением знака деформирования паяного соединения. К настоящему времени в диапазоне температур от солидуса припоя (начало затвердевания, 1050–1100° С) до 20^0 С процесс пайки хорошо исследован Л.Г. Куклиным, И.И. Яновским, Н.А. Клочко и др. Результаты этих исследований позволили разработать практические рекомендации по технологии пайки и координации марок сталей, твёрдых сплавов и припоев.

Известно, что основной процесс структурного превращения аустенита в мартенсит протекает в диапазоне температур 400 -100 °С. Структурное превращение в стали идёт с увеличением объёма изделия. Однако мартенситное превращение может быть продолжено и в области низких отрицательных температур, но только в режиме термического удара (криогенной обработки), который, активизируя мартенситные превращения в стали, изменяя неравнозначно линейные размеры твёрдого сплава и стали, сопровождается возобновлением силовых процессов в элементах паяного инструмента и проявлением пластической деформации как в стали, так и в твёрдом сплаве. Деформации в твёрдом сплаве могут вызывать напряжения сжатия, способные повысить его твёрдость, а, следовательно, и износостойкость.

Расчёт суммарных напряжений в твёрдом сплаве паяного инструмента при криогенной обработке производился по формуле (22). При выводе формулы использовано уравнение К.П. Имшенника и Н.А. Бухмана (18), полученное ими для определения нормальных паяльных напряжений в твёрдом сплаве.

$$\sigma_т = k\frac{(\alpha_c - \alpha_т)(T - T_0)}{h_c}\left[\frac{2}{bh_т}(E_c I_c - E_т I_т) + \frac{h_т E_т}{2}\right], \qquad (18)$$

где k - коэффициент, учитывающий отношение высоты стального образца h_c к высоте твёрдосплавного резца $h_т$ и модуля упругости E_c к модулю упругости твёрдого сплава $E_т$; b – длина образца; α_c, $\alpha_т$ – коэффициенты термического линейного расширения стали и твёрдого сплава; T – температура солидуса припоя; T_0 - комнатная температура; I_c, $I_т$ – осевые моменты инерции стального и твёрдосплавного образцов.

$$k = \frac{6(1+m^2)}{3(1+m)^2 + (1+mn)(m^2 + \frac{1}{mn})}; \qquad \frac{h_c}{h_т} = m; \quad \frac{E_c}{E_т} = n, \qquad (19)$$

Для расчёта напряжений при криогенной обработке данное уравнение требует некоторых преобразований. Так, разница $(T - T_0)$, отражающая градиент температур от солидуса припоя до комнатной температуры, в случае криогенной обработки запишется как $(T_0 - T_{кр})$, где $T_{кр}$ – температура хладоагента. Влияние скорости охлаждения на величину напряжения учитыва-

ется поправочным коэффициентом k_υ. Тогда уравнение (18) запишется в следующем виде:

$$\sigma_k = kk_\nu \frac{(\alpha_c - \alpha_т)(T_0 - T_k)}{h_c}\left[\frac{2}{bh_т}(E_c I_c - E_т I_т) + \frac{h_т E_т}{2}\right], \quad (20)$$

Исходя из выводов И.Н. Чапоровой и В. Шпета о возможности алгебраического суммирования напряжений, возникших в твёрдом сплаве от разных источников, можно просуммировать остаточные паяльные напряжения $\boldsymbol{\sigma_т}$ и напряжения, возникшие при криогенной обработке $\boldsymbol{\sigma_к}$.

$$\sigma_\Sigma = \sigma_т + \sigma_к \quad (21)$$

Подставив (18), (20) в (21) и сделав некоторые преобразования, получим

$$\sigma_\Sigma = \frac{k(\alpha_c - \alpha_т)}{h_c}\left[\frac{2}{bh_т}(E_c I_c - E_т I_т) + \frac{h_т E_т}{2}\right]\left[(T - T_0) + k_\nu (T_0 - T_k)\right] \quad (22)$$

Оценка уровня суммарных напряжений в твёрдом сплаве, создаваемых в результате пайки и термического удара при криогенной обработке, проводилась расчётным путём с использованием выражений (18), (22) на примере твёрдосплавных коронок СА1-76. В результате расчёта получены следующие значения напряжений в пластинах твёрдого сплава: остаточные паяльные напряжения $\sigma_т$ = - 456,7 МПА; суммарные напряжение σ_Σ = - 596,4 МПа.

Таким образом, пайка твёрдосплавных пластин к стальному корпусу и последующая криогенная обработка приводят к значительному напряженному состоянию твёрдого сплава. Напряжения здесь имеют не только термоупругую природу, они формируются и в процессе пластической деформации, как при пайке, так и при криогенной обработке.

Исследования влияния остаточных напряжений на микротвёрдость сплава ВК6 проводились на штабиках, вырезанных из твёрдосплавных коронок СА1-76, и твёрдосплавных резцах формы Г4105. На подготовленной поверхности резцов до и после криогенной обработки замерялась микротвёрдость на приборе ПМТ-3. Результаты замеров микротвёрдости приведены в табл. 4, из которой видно, что пайка твёрдосплавных резцов к стальному корпусу повышает их микротвёрдость на 6,4 %, криогенная обработка штабиков при $T_{исх} = 20^o$ С повышает микротвёрдость сплава на 8,8% (суммарно с

Таблица 4

Влияние криогенной обработки на микротвердость твёрдосплавных резцов

Вид образцов	Микротвёрдость, даН/мм^2
Резцы ВК6 в исходном состоянии (до пайки)	1278
Резцы в штабиках после пайки	1360
Резцы в штабиках после криогенной обработки при исходной температуре $T_{исх} = 20^o$ С	1480
Резцы в штабиках после криогенной обработки при исходной температуре $T_{исх} = 100^o$ С	1540

пайкой – 15,8%), а при $T_{исх}$ = 100°С - на 13,2% (суммарно с пайкой – 20,5%).Увеличение микротвёрдости сплава ВК6 косвенно свидетельствует о повышении напряжений сжатия в резцах и после пайки, и после криогенной обработки. Из табл. 4 видно, что, ***изменяя режим криогенной обработки породоразрушающего инструмента, можно направленно задавать микротвёрдость резцов, а, следовательно, и износостойкость породоразрушающего инструмента в целом.***

Для получения более полной картины влияния напряжённого состояния в твёрдом сплаве на прочностные характеристики инструмента были проведены исследования по определению зависимости физико-механических характеристик твёрдых сплавов от режимов криогенной обработки.

Основной характеристикой твёрдых сплавов при их стандартизации или при проведении исследований, связанных с процессами упрочнения, является предел прочности при изгибе. Испытания образцов на изгиб проводились на установке УМГП-3 по стандартной схеме нагружения. Результаты записывались в виде диаграммы в координатах "нагрузка-деформация». Значения предела прочности при изгибе $\sigma_{из}$ вычислялись по формуле:

$$\sigma_{из} = \frac{3G\ l}{2b\ h^2}\left(1 - \frac{4}{3\pi}\frac{h}{l}\right), \qquad (23)$$

где G - разрушающая нагрузка, даН**;** l - расстояние между опорами, см; b-ширина образца, см; h - высота образца, см.

При проведении испытаний на изгиб определялась также жесткость и деформация. Жесткость **С** (даН/мм) при таком виде испытаний характеризует способность образца сопротивляться внешней изгибающей силе в упругой области деформации и определяется по формуле C =P/d, где d - величина деформации, мм.

Режимы криогенной обработки изменялись в широком диапазоне, что определялось необходимостью выбора наиболее эффективных, которые в дальнейшем были взяты за основу при упрочнении ПРИ.

Рис. 3. Влияние исходной температуры резцов при криогенной обработке на разрушающую нагрузку и предел прочности при изгибе сплавов ВК6, ВК8: 1, 2 – разрушающая нагрузка для ВК6 и ВК8; 3, 4 – предел прочности при изгибе для ВК6 и ВК8

На рис.3, 4, 5 приведены зависимости различных физико-механи-

ческих характеристик твёрдых сплавов от исходной температуры образцов $T_{исх}$ при криогенной обработке. Свойства сплавов, определяющие прочностные характеристики (разрушающая нагрузка Р, предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$, деформация d, жесткость С), с повышением $T_{исх}$ изменяются неоднозначно. Если понижение Р, $\sigma_{изг}$, С составляет всего 5-8%, то деформация снижается на 23,7- 25,3 %.

Свойства сплавов, характеризующие их износостойкость (микротвёрдость, твёрдость), при криогенной обработке повышаются существенно при всех режимах обработки. Микротвёрдость (рис.5) в диапазоне изменения $T_{исх}$ от 20 до 100°С увеличивается от 10,3% до 18,8%.

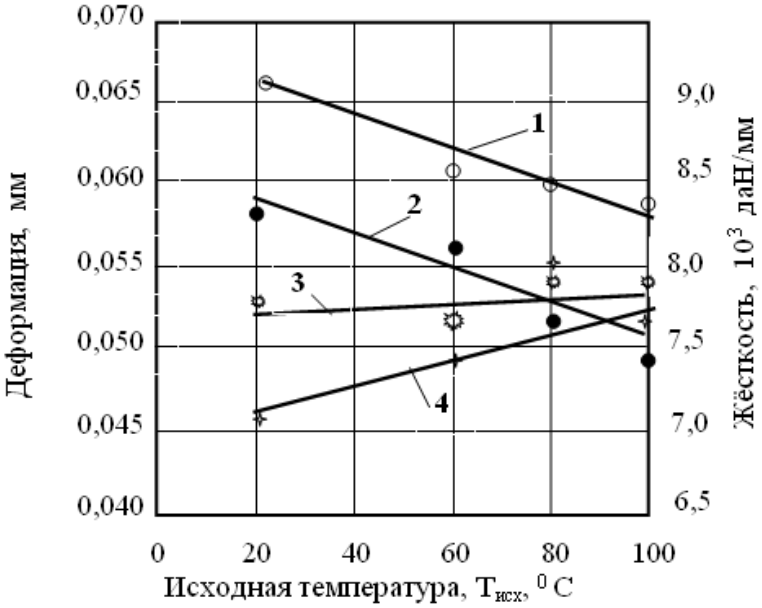

Рис. 4. Влияние исходной температуры резцов на деформацию и жесткость сплавов ВК6, ВК8 при криогенной обработке:
1, 2 – деформация для твёрдых сплавов ВК6, ВК8; 3, 4 – жесткость для сплавов ВК6, ВК8

Полученные результаты позволяют сделать важный вывод о том, что, изменяя в нужном направлении микротвёрдость, можно направленно воздействовать на износостойкость резцов, а, следовательно, и породоразрушающего инструмента в целом. Данный вывод был подтверждён в дальнейшем при испытании твёрдосплавного ПРИ в производственных условиях.

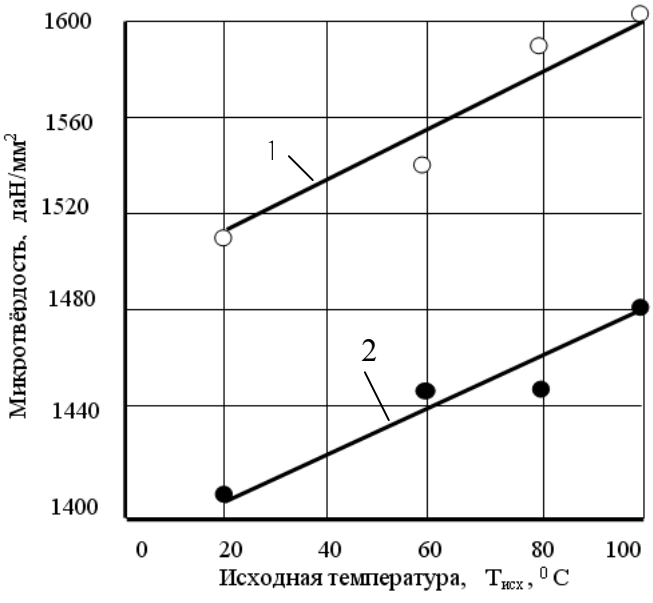

Рис. 5. Влияние исходной температуры резцов на микротвёрдость сплавов ВК6, ВК8 при криогенной обработке: 1, 2 - микротвёрдость для сплавов ВК6, ВК8

Снижение деформации твёрдого сплава при криогенной обработке сопровождается повышением жесткости и хрупкости, что ограничивает несколько область

применения криогенной обработки при упрочнении породоразрушающего инструмента. Криогенную обработку рационально применять (с учётом конструкции инструмента и свойств твёрдого сплава) для упрочнения следующих типов ПРИ:

- коронки с твёрдосплавными резцами, имеющими опорные площадки в виде стальных пластин, закреплённых на корпусе (коронки типа «СА»);
- коронки, армированные твёрдосплавными резцами большого сечения и предназначенные для бурения скважин ударно-вращательным способом с применением гидроударников, пневмоударников, перфораторов (коронки типа «КГ», «ГПИ», «КП», «КДП» и др.).
- шарошечные долота, армированные твёрдосплавными резцами;
- алмазный породоразрушающий инструмент.

Приведенные выводы и рекомендации были апробированы в лабораторных условиях на коронках СА1-76, СА2-76 и их элементах и в дальнейшем при проведении сравнительных испытаний в различных геолого-технических условиях на месторождениях Горловского угольного бассейна и Кузбасса. При этом было отработано с полным хронометражём около 800 коронок типа «СА». Результаты испытаний, приведенные в табл. 5, свидетельствуют о значительном повышении износостойкости твёрдосплавных коронок, обработанных жидким азотом, по сравнению с контрольными. Для различных геолого-технических условий ресурс коронок повысился от 40 до 71 %, механическая скорость бурения возросла от 25 до 50 %. Кроме того, было установлено, что эффективность работы коронок, прошедших криогенную обработку, выше при бурении более крепких горных пород.

В процессе исследований была установлена связь между режимами криогенной обработки, физико-механическими характеристиками твёрдых сплавов и их износостойкостью. Выявлены оптимальные значения режимных параметров криогенной обработки для создания заданных эксплуатационных показателей ПРИ для работы в различных геолого-технических условиях.

Таблица 5

Результаты сравнительных испытаний твёрдосплавных коронок

Категория горных пород по буримости	Диаметр коронок, мм	Углубка на коронку, м	Повышение показателя, %	Механическая скорость бурения, см/мин	Повышение показателя, %
VI	93	*9,84/7,01	40	*4,5/3,6	25
VII	76 93	7,33/4,94 8,32/5,94	48 40	4,0/3,2 3,8/2,9	30 30
VIII	76 93	3,64/2,36 5,87/3,74	54 49	2,8/2,0 26/1,9	40 36
IX	76	2,05/1,20	71	2,1/1,4	50

*-в числителе показатели для опытных коронок, в знаменателе – для контрольных коронок

На основании результатов выполненных исследований разработаны рациональные технологические режимы бурения скважин твёрдосплавным и алмазным инструментом с повышенными эксплуатационными показателями.

Положение 3. ***Радиационное облучение твёрдых сплавов и композиционных алмазосодержащих материалов малыми дозами гамма-квантов производит глубокую перестройку их структуры, снижает плотность дефектов, снимает суперпозиционные поля напряжений, что позволяет направленно изменять их физико-механические характеристики и эксплуатационные показатели породоразрушающего инструмента.***

Известно, что облучение твёрдого тела гамма-квантами или электронами приводит к ионизации атомов и рождению точечных дефектов. Повышение плотности дефектов, особенно дислокаций, согласно общим представлениям о природе субструктурного упрочнения металлов и сплавов, приводит к изменению их физико-механических характеристик. При этом повышаются износостойкость материала и его прочностные свойства. Чрезмерно высокая плотность дефектов приводит к увеличению хрупкости, жесткости изделий и, вследствие этого, к снижению их эксплуатационных показателей.

В работах С.Т. Конобеевского, А.М. Шалаева, Ф.В. Нолфи показана возможность упрочнения металлов и сплавов гамма-излучением за счёт образования дополнительных дефектов. Однако этот способ упрочнения нашел ограниченное применение. Больший интерес для упрочнения породоразрушающего инструмента представляет технология облучения изделий малыми дозами гамма-квантов. В результате систематических исследований, выполненных в Томском политехническом университете А.П. Мамонтовым, И.П.Черновым, И.П.Черданцевым, было установлено, что облучение гамма-квантами и электронами металлов и сплавов эквивалентной дозой излучения менее 10^5 Дж/кг приводит не к дальнейшему накоплению дефектов, а, наоборот, к их устранению и переводу кристалла в более равновесное состояние (Открытие. Диплом № 173 от 9.10.2001 г.). Ионизационные процессы при этом играют определяющую роль в перестройке дефектов в кристаллах. Структурная перестройка кристаллов происходит за счёт запасённой энергии в них, которая освобождается в результате цепных реакций дефектов, инициированных ионизацией. Переход кристалла из неравновесного состояния в равновесное сопровождается улучшением его физических свойств.

Практическое значение обнаруженного эффекта состоит в разработке на его основе новых технологических процессов, позволяющих улучшать важнейшие эксплуатационные показатели широкого класса материалов. Например, облучение гамма-квантами элементов полупроводниковых приборов позволяет улучшить их электрофизические характеристики, надежность. Облучение твёрдосплавного и алмазного ПРИ (выполненное впервые нами, патент РФ № 1135087, 1984)., повышает его износостойкость в 1,5-2 раза

Гамма-лучи обладают большой проникающей способностью, поэтому эффекты, вызванные ими, распределяются равномерно по всему объёму изделий любой конфигурации. После облучения вещество не приобретает остаточной радиоактивности.

Изменение физических свойств материалов при облучении гамма-квантами зависит от режимных параметров облучения, к которым относятся: поглощённая доза (Р), мощность поглощённой дозы (Р/с), время облучения. Исследование влияния указанных параметров на прочность и износостойкость твёрдых сплавов и композиционных материалов, а также ПРИ в целом, проводились в диапазоне изменения дозы от $8 \cdot 10^2$ Р до $3{,}6 \cdot 10^7$ Р, мощности поглощённой дозы – от 1,2 Р/с до 2,2 Р/с. Объектами исследований являлись образцы твёрдых сплавов ВК8, ВК6, Т15К6; образцы композиционных материалов, твёрдосплавные и алмазные коронки. Облучение гамма-квантами исследуемых материалов и ПРИ производилось на излучателе «Исследователь», а электронами – на электронном ускорителе ЭЛУ-4.

На рис.6 приведены типичные картины фигур радиографического декорирования после облучения малыми дозами гамма-квантов, которые существенно отличаются от картин РД, полученных после криогенной обработки (рис.2 а, б). Здесь фигуры РД характеризуются малыми размерами, близкими к зёренной структуре сплава ВК8. При небольшой протяженности они имеют сравнительно однородное распределение по площади. Форма фигур прямолинейная или дендритная. Суперпозиционные напряжения здесь уже не регистрируются. Отмечается заметная локализация полей напряжений около пор в виде ареола.

Рис. 6. Фигуры радиографического декорирования на поверхности твёрдого сплава ВК8 после облучения гамма-квантами.

Увеличение х400

В табл. 6 приведены результаты исследований влияния облучения гамма-кван-тами на скорость химического травления твёрдых сплавов, которая после облучения снижается для твёрдого сплава ВК8 на 15 %, а ВК6 – на 7 %. Изменение скорости химического травления сплавов является показателем заметного совершенствования их структуры при облучении гамма-квантами за счёт снижения плотности дефектов, перераспределения скоплений дислокаций и т.д.

Таблица 6

Скорость химического травления твёрдых сплавов ВК8 и ВК6

Марка сплава	Форма резцов	Масса образца, г		Потеря массы, г	Скорость химического травления, г/мин
		До травления	После травления		
ВК8	Г26	1,7124 1,7113	1,6875 1,6901	0,0247 0,0212	0,00247 0,00212
ВК6	Г5303	2,4726 2,4775	2,4434 2,4503	0,0292 0,0272	0,00292 0,00272

В числителе - показатели для контрольных образцов, в знаменателе – для облученных

Изменение плотности дефектов в твёрдом сплаве при облучении гамма-квантами контролировалось путём измерения удельного электрического

сопротивления Δρ по методике А.П. Мамонтова и И.П. Чернова.

Изменение удельного сопротивления Δρ непосредственно связано с изменением концентрации дефектов ΔС уравнением

$$\Delta\rho = \frac{2\pi m\upsilon\Delta C r^2}{ne^2}, \qquad (25)$$

где n – число электронов в единице объёма; e, υ, m – заряд, скорость и масса электрона; r – эффективный радиус сечения рассеивающих центров.

В результате исследований было установлено, что удельное электрическое сопротивление, например для твёрдого сплава ВК8, при воздействии гамма-квантов ($4\cdot10^5$ Р) уменьшается для образцов различного сечения от 6 до 13 %. Погрешность определения ρ не превышала 0,2 %.

Результаты исследований методом РД, химического травления и измерения электропроводности образцов позволяют сформулировать в общем виде версию о механизме модификации свойств твёрдых сплавов при облучении гамма-квантами. В общем виде она представляется следующим образом. Под действием радиационного облучения малыми дозами гамма-квантов в несовершенной области фаз компонентов твёрдого сплава происходят изменения на уровне точечных дефектов типа Шоттки – Френкеля. В результате этого процесса понижается плотность дефектов, увеличивается совершенная область микрокристаллов, приводящая к снятию суперпозиционных полей напряжений внутри и по границе зёрен, что в свою очередь приводит к совершенствованию внутризёренных и межзёренных связей.

В качестве критериев оценки прочности и износостойкости твёрдых сплавов при облучении гамма-квантами были взяты предел прочности при изгибе, деформация, жесткость, микротвёрдость. Режимы облучения гамма-квантами изменялись в широком диапазоне с целью выбора их рациональных значений, которые в дальнейшем были взяты за основу при разработке технологии радиационного упрочнения ПРИ. Результаты исследований влияния облучения гамма-квантами на перечисленные показатели представлены на рис.7, 8, 9. Из рис. 7, 8 видно, что с увеличением дозы облучения предел прочности при изгибе и деформация повышаются до дозы облучения в диапазоне $8\cdot10^4$ - $5\cdot10^5$Р, после чего наблюдается их резкое снижение. Данные результаты свидетельствуют о существовании для твёрдого сплава предельного значения дозы облучения гамма-квантами, после которой процессы в твёрдом сплаве протекают с образованием дополнительных, так называемых радиационных дефектов. При этом снижается предел прочности при изгибе и деформация, повышается твёрдость и хрупкость сплавов.

На рис. 9 приведена зависимость микротвёрдости от дозы облучения для сплавов ВК6 и ВК8, из которого видно, что повышение дозы от $8\cdot10^2$ до $7{,}2\cdot10^5$ Р приводит к снижению микротвёрдости. Дальнейшее увеличение

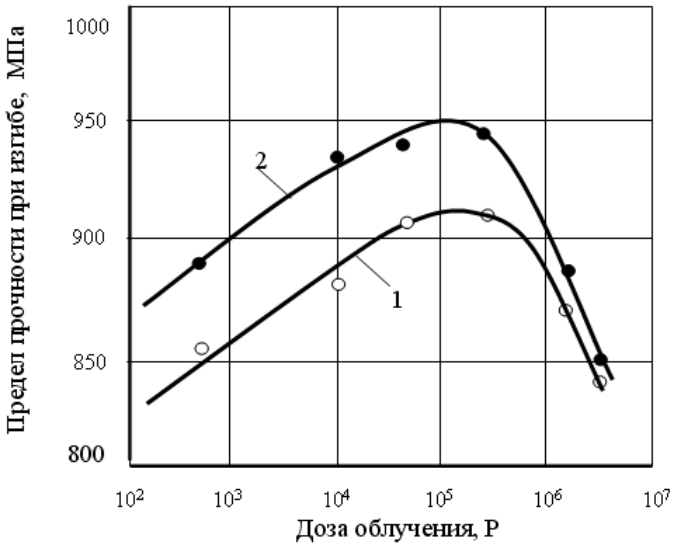

Рис. 7. Зависимость предела прочности при изгибе твёрдых сплавов ВК6, ВК8 от дозы облучения гамма-квантами:
1 – твёрдый сплав ВК6; 2 – твёрдый сплав ВК8

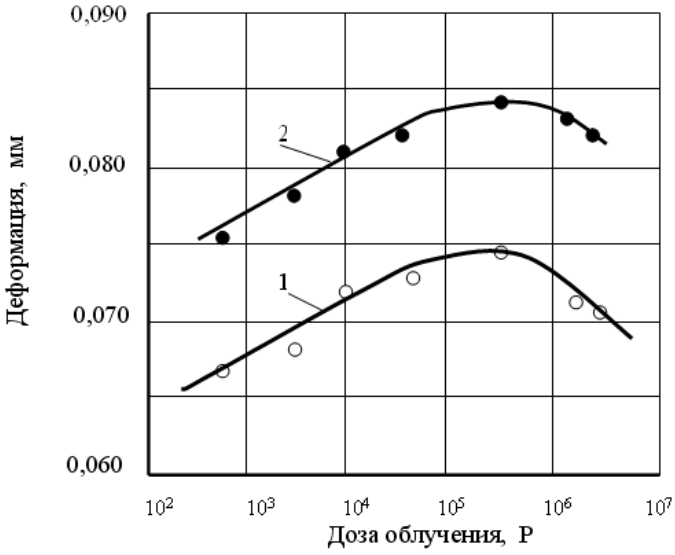

Рис. 8. Зависимость деформации при изгибе твёрдых сплавов ВК6, ВК8 от дозы облучения гамма-квантами:
1 – твёрдый сплав ВК6; 2 – твёрдый сплав ВК8

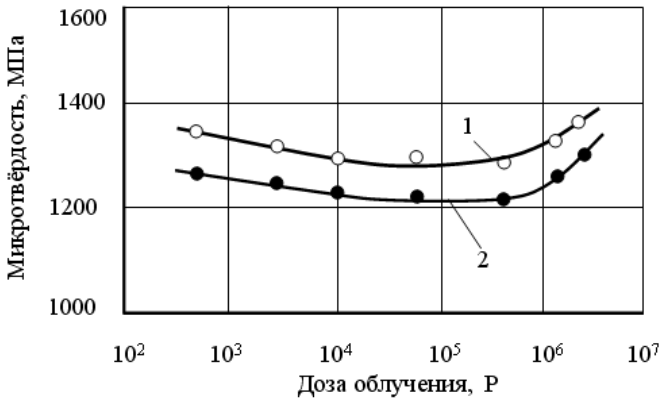

Рис. 9. Зависимость микротвёрдости сплавов ВК6 и ВК8 от дозы облучения гамма-квантами:
1– твёрдый сплав ВК6; 2 – твёрдый сплав ВК8

дозы сопровождается повышением микротвёрдости. При дозе $3{,}6 \cdot 10^6$ Р она превышает микротвёрдость образцов в исходном состоянии.

Из сравнения кривых на рис. 7-8 хорошо видно, что доза облучения при минимальной микротвёрдости соответствует дозе облучения при максимальных значениях предела прочности при изгибе и деформации, что ещё раз

подтверждает существование предельной дозы облучения гамма-квантами, выше которой изменения в структуре происходят за счёт увеличения концентрации дефектов.

Таким образом, ***зная закономерности изменения физико-механических характеристик твёрдых сплавов при облучении малыми дозами гамма-квантов, можно направленно задавать эксплуатационные показатели породоразрушающему инструменту в соответствии с геолого–техническими условиями бурения скважин.***

В работе приводятся рекомендуемые дозы облучения гамма-квантами твёрдосплавного инструмента при бурении скважин в различных геолого-технических условиях.

Для установления рациональных режимов облучения крупнорезцового ПРИ были проведены исследования с коронками КДП-40-25 и КДП-43-25, облученными гамма-квантами по граничным режимам предполагаемой оптимальной дозы $3 \cdot 10^4$ Р – $3{,}6 \cdot 10^6$ Р. Часть коронок была облучена гамма-квантами дозой $1{,}5 \cdot 10^6$ Р с одновременным нагревом до 300^0 С. Результаты исследований, приведенные в табл.7, позволяют сделать следующие выводы:

Таблица 7

Результаты сравнительных испытаний коронок КДП-43-25, облученных гамма-квантами в различных режимах

Доза облучения, Р	Отработано коронок, шт.	Углубка на коронку, м	Улучшение показателя, %	Удельный расход твёрдого сплава, г/м	Улучшение показателя, %
$3 \cdot 10^4$	15 15	4,5 4,10	9,75	0,98 1,096	11,8
$5 \cdot 10^5$	16 16	7,83 4,20	86,4	0,732 1,121	53,1
$1{,}6 \cdot 10^6$	17 17	5,58 3,97	40,5	0,764 1,107	44,8
$3{,}6 \cdot 10^6$	16 16	5,37 4,07	31,9	0,779 1,110	42,5
$1{,}5 \cdot 10^6$, $T=300^0$C	17 17	6,46 3,60	79,4	0,665 1,077	61,9

В числителе – показатели для коронок, облученных гамма-квантами; в знаменателе – показатели для контрольных коронок

- облучение малыми дозами гамма-квантов крупнорезцовых твёрдосплавных коронок приводит к существенному (до 86,4%) увеличению углубки до первой перезаточки и снижению расхода твёрдого сплава (до 61,9%);
- режим облучения гамма-квантами оказывает существенное влияние на величину углубки на коронку; максимальное повышение эксплуатационных показателей имеет место при дозе облучения $5 \cdot 10^5$ Р;

- облучение коронок гамма-квантами при температуре 300^0 С позволяет максимально снизить удельный расход твёрдого сплава и существенно повысить проходку на коронку.

Результаты исследований, приведенные в табл.8, хорошо согласуются с экспериментальными данными, представленными на графиках рис.7, 8, 9.

Существенное повышение эксплуатационных показателей коронок, прошедших радиационно-термическую обработку, можно объяснить активизацией диффузионных процессов при повышенной температуре, способствующих упорядочению структуры сплава.

Оценка эффективности радиационного метода упрочнении коронок кольцевого типа производилась при бурении скважин коронками СА4-76 в производственных условиях ПГО «Запсибгеология». Испытания показали, что проходка на опытную коронку при бурении скважин в горных породах VII категории увеличилась на 68 % (с 4,7 м до 7,9 м), а при бурении в породах VIII категории – на 75 % (с 2,6 до 4,5 м). Механическая скорость бурения возросла соответственно на 28 и 42 %. Здесь, как и при криогенной обработке, эффективность упрочнения твёрдосплавных коронок оказалась более высокой при бурении крепких пород.

В процессе испытаний коронок СА4-76 была установлена зависимость механической скорости бурения от углубки. Кривые на рис.10**,** отражающие изменение механической скорости бурения, для облученных коронок в начальный период имеют горизонтальный участок, то есть механическая скорость бурения какое-то время остаётся постоянной, затем начинает понижаться, вначале медленно, а затем достаточно резко. У контрольных коронок снижение механической скорости наблюдается с начала процесса бурения. Очевидно, облучение гамма-квантами, совершенствуя структуру твёрдого сплава, повышает его прочностные свойства и позволяет сохранять исходную работоспособность коронок более длительное время.

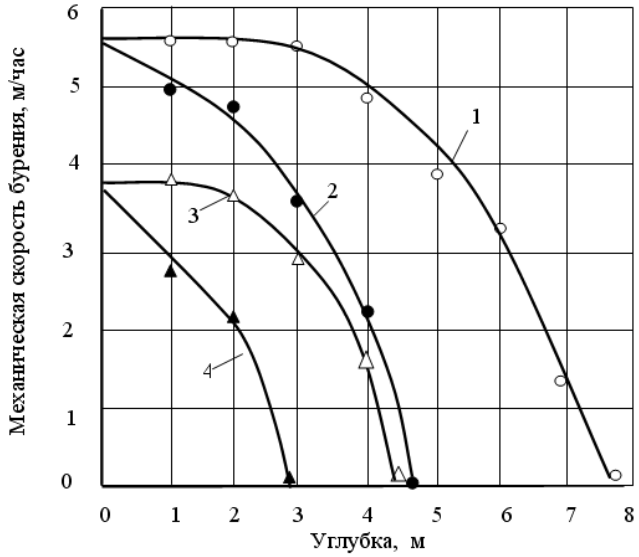

Рис. 10. Зависимость механической скорости бурения коронками СА4 от углубки:
1, 2 – бурение в горных породах VII категории облученными и контрольными коронками соответственно; 3, 4 – бурение в горных породах VIII категории облученными и контрольными коронками

Положение 4. ***Существенную роль в повышении износостойкости и прочности твёрдосплавного и алмазного породоразрушающего инструмента при облучении малыми дозами гамма-квантов играет атомарный***

водород, содержащийся в твёрдом сплаве и композиционном материале, который активизирует цепные процессы аннигиляции дефектов, переводя структуру материалов в более равновесное состояние.

Содержание водорода в твёрдых сплавах и композиционных материалах составляет до 10^{21} атомов/см^3. При облучении гамма-квантами водород ионизируется и переходит из молекулярного состояния в атомарное -H^+. Положительно заряженный атомарный водород в твёрдом теле отличается исключительно высокой активностью. При своём движении он взаимодействует с междоузельными атомами твёрдого тела, находящимися в метастабильном состоянии. При взаимодействии с водородом эти атомы получают энергию, достаточную для преодоления барьера аннигиляции, и либо аннигилируют с вакансиями, являющимися "стопорами" дислокаций, либо мигрируют к стокам, в качестве которых выступают границы зёрен. При аннигиляции вакансий дислокации снимаются со "стопоров" и занимают наиболее выгодные в энергетическом отношении положения, то есть происходит перестройка дислокаций. Освобождённые в результате взаимодействия с ионизированным атомарным водородом междоузельные метастабильные атомы кобальтовой или иной другой связки диффундируют в зёрна WC или другие наполнители за счёт резкого увеличения коэффициента диффузии материала связки.

Однако ионизированный атомарный водород при недостаточной его концентрации аномально быстро уходит из твёрдого тела, не успевая провзаимодействовать с большим количеством метастабильных атомов, что снижает эффективность облучения гамма-квантами. Для повышения эффективности необходимо создавать в твёрдом сплаве такую концентрацию атомов водорода, при которой он присутствует длительное время, обрабатывая междоузельные метастабильные атомы**.**

Механизм воздействия водорода на дефекты в твёрдом сплаве при облучении гамма-квантами говорит в пользу увеличения его концентрации. Поэтому были проведены исследования влияния концентрации водорода на прочность и износостойкость твёрдого сплава при искусственном увеличении его содержания и последующем облучении гамма-квантами.

Водород вводился в резцы из твёрдого сплава ВК8 и Т15К6 электролитическим способом из раствора серной кислоты. Контроль за содержанием водорода осуществлялся взвешиванием образцов на прецизионных весах с точностью 0,0001 г. Количество введенных дефектов оценивалось измерением электрического сопротивления образцов. После облучения резцы монтировались в короночные кольца. За базу сравнения были взяты резцы из твёрдого сплава, облученные гамма-квантами без предварительного насыщения водородом.

Бурение скважин проводилось на буровом стенде в блоках кварцевого диорита. Абразивный износ оценивался по потере массы. Результаты исследований представлены в табл**.** 8, из которой видно, что предварительное насыщение твёрдых сплавов водородом и облучение гамма-квантами заметно повышают их износостойкость.

Таблица 8

Результаты исследований износостойкости твёрдых сплавов ВК8 и Т15К6

Марка твёрдого сплава	Средний износ резцов, г	Удельный износ резцов, г/м	Улучшение показателей, %
ВК8	0,0191 / 0,0231	0,0012 / 0,0017	29,4
Т15К6	0,0195 / 0,0245	0,0013 / 0,0019	31,6

В числителе – показатели для опытных резцов, в знаменателе – для контрольных резцов

Приведенные результаты исследований были положены в основу разработанного технологического способа упрочнения твёрдосплавного и алмазного ПРИ, защищённого патентом РФ на изобретение [47].

Механизм упрочнения твёрдых сплавов по данному способу выглядит следующим образом. При введении в объём твёрдого сплава атомов водорода они накапливаются в порах, трещинах, на границах зёрен, вызывая дополнительные напряжения. При облучении атомы водорода ионизируются, что приводит к резкому усилению их коэффициента диффузии. Сечение взаимодействия гамма-квантов с атомами водорода составляет достаточно большую величину, ~ 10^{-16} $см^2$, в результате чего происходит возбуждение водородной атмосферы, энергия которой передаётся ядерной подсистеме твёрдого сплава, и его структура самоорганизуется. Однако для протекания процессов самоорганизации необходима большая плотность дефектов, которая и создаётся предварительным введением атомов водорода. При облучении твёрдого сплава малыми дозами гамма-квантов в нём протекают цепные процессы аннигиляции дефектов, структура твёрдого сплава при этом переходит в более равновесное состояние по сравнению с исходным состоянием, повышаются адгезионные свойства зёрен. Выполняя полезную работу при выходе из образца, водород уменьшает количество микротрещин, пор, повышает пластичность, предел прочности при изгибе и упругую деформацию. Всё это в конечном итоге приводит к улучшению физико-механических характеристик твёрдого сплава и повышению его эксплуатационной стойкости [3, 17].

Положение 5. ***Существенное повышение эксплуатационных показателей алмазного породоразрушающего инструмента при облучении его гамма-квантами может быть достигнуто только при оптимальном сочетании дозы облучения и её мощности, обеспечивающих повышенное качество закрепления алмазов в матрице.***

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, а также известные положения физики твердого тела позволили сформулировать основные представления о механизме упрочнения композиционных алмазосодержащих материалов (КАМ) при облучении малыми дозами гамма-квантов, выявить оптимальные режимные параметры облучения алмазного ПРИ с целью повышения его эксплуатационных показателей

В КАМ, входящем в состав ПРИ, зерна алмазов равномерно распределены в поверхностном слое или внутри матрицы, представляющей собой твёрдый сплав. Для повышения стойкости инструмента совершенно необходимо

увеличить прочность закрепления зёрен алмазов в твёрдом сплаве. Выполненные нами исследования показали, что облучение алмазов гамма-квантами дозой от $2 \cdot 10^3$ Р до $7{,}2 \cdot 10^5$ Р при мощности дозы 1,4 - 2,0 Р/с не приводит к улучшению их физико-механических характеристик, в частности к повышению предела прочности при раздавливании [34]. В то же время, физико-механические свойства твёрдого сплава и границы раздела "зерно алмаза - твёрдый сплав" значительно изменяются. При этом наблюдаются два конкурирующих процесса. С одной стороны, при малых дозах гамма-квантов происходит уменьшение дефектности в структуре твёрдого сплава, особенно на границе раздела "зерно алмаза - твердый сплав". С другой стороны, при больших дозах гамма-квантов ухудшаются свойства, как матрицы, так и границы раздела её с алмазными зёрнами в результате появления радиационных дефектов. То есть, при облучении КАМ с целью их упрочнения также существует предельная доза облучения.

Известно, что граница раздела отдельных зёрен в материалах является наиболее слабым местом, так как она является стоком дефектов, здесь же наблюдается максимальная концентрация полей напряжений. Такое состояние особенно характерно для материалов, сложенных из компонентов с существенно отличающимися физико-химическими свойствами, к которым относится и КАМ. В приложении к алмазному инструменту ситуация усугубляется ещё и низкими адгезионными свойствами алмазов. Всё это затрудняет создание рабочего инструмента с надёжным закреплением алмазных зёрен в матрице. Решение этой проблемы является исключительно важным направлением исследований при создании бурового инструмента. В значительной степени решить эту проблему позволяет облучение КАМ малыми дозами гамма квантов, которое может существенно снизить плотность дефектов, как в кристаллической структуре зёрен, так и на границе их раздела.

Существенную роль в устранении дефектов в КАМ при облучении гамма-квантами так же, как и в твёрдом сплаве, играет водород. Однако механизм воздействия его на структуру КАМ несколько иной. При облучении КАМ содержащийся в нём водород ионизируется и при своём движении взаимодействует с междоузельными атомами, находящимися в метастабильном состоянии. При взаимодействии с H^+ эти атомы получают энергию, достаточную для преодоления барьера аннигиляции, и либо аннигилируют с вакансиями, являющимися "стопорами" дислокаций, либо мигрируют к стокам, в качестве которых выступают границы алмазного зерна и матрицы. При аннигиляции вакансий дислокации снимаются со "стопоров" и занимают наиболее выгодные в энергетическом отношении положения. Поскольку максимальное количество дислокаций расположено на границе "зерно алмаза - твёрдый сплав", то перестройка дислокаций приводит к устранению микропор в этой области. Кроме того, освобождённые в результате взаимодействия с ионизированным атомарным водородом междоузельные метастабильные атомы связки композиционного материала диффундируют в зёрна алмазов за счёт резкого увеличения коэффициента диффузии материала связки.

Однако ионизированный атомарный водород, как было показано выше,

может аномально быстро уходить из облучаемого материала, не успевая провзаимодействовать с достаточно большим количеством метастабильных атомов. Для повышения эффективности перестройки структуры необходимо поддерживать в композиционном материале такую концентрацию ионизированных атомов водорода, при которой он длительное время обрабатывает междоузельные метастабильные атомы. Это достигается уменьшением мощности поглощённой дозы гамма-квантов и, соответственно, увеличением времени облучения. Поглощённая доза гамма-квантов при этом должна быть достаточной для того, чтобы прошла перестройка метастабильных междоузельных атомов, что требует строгой координации поглощённой дозы гамма-квантов и её мощности.

Устранение пор на границе раздела «матрица – алмазы», диффузия метастабильных атомов связки в алмазы способствуют более прочному закреплению зерен алмазов в матрице. Всё это должно приводить к повышению износостойкости рабочего инструмента и увеличению его ресурса.

Для подтверждения данной версии механизма упрочнения КАМ при облучении гамма-квантами были проведены исследования по выявлению оптимальных диапазонов поглощённых доз и мощности поглощённых доз. Выбор и обоснование данных параметров осуществлялись при испытании алмазных коронок типа К-01-1 и 01А3Д60К40.

По результатам испытаний коронок определялся показатель «углубка на коронку» в зависимости от поглощённой дозы и её мощности. Результаты испытаний по этому показателю приведены на рис.11,12, из которых видно, что при одних и тех же геолого-технических условиях и режимах бурения углубка на коронку К-01-1 изменяется в диапазоне – от 14 до 26 м, для коронок 01А3 – от 7 до 13 м в зависимости от дозы и мощности поглощённой дозы. Максимальную углубку имеют коронки, облученные дозой $5 \cdot 10^3$ Р. Отклонение дозы в ту или другую сторону приводит к снижению эффекта упрочнения. При поглощённой дозе $1 \cdot 10^4$ Р углубка на коронку становится

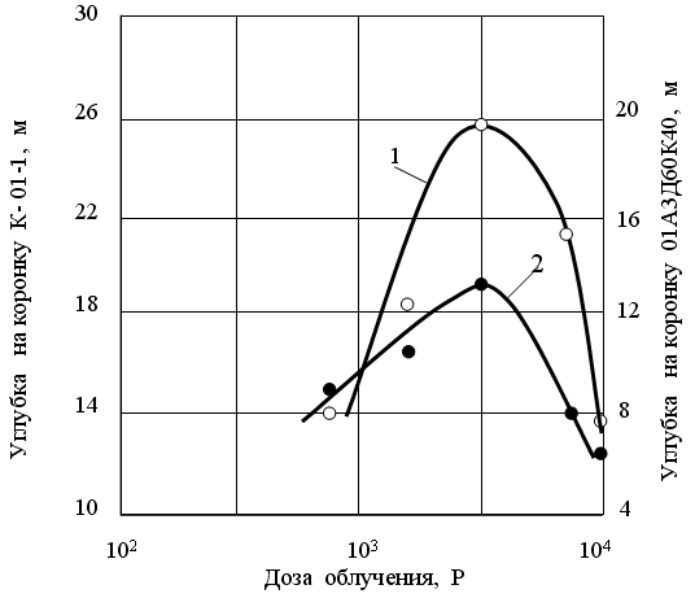

Рис. 11. Зависимость углубки на коронку К-01-1 от дозы облучения:
1 – коронка К - 01-1; 2 – коронка 01А3Д60К40

меньше, чем у контрольных коронок. Для этих коронок характерно появление большого количества трещин в матрице, наблюдались разрушения отдельных секторов в коронках.

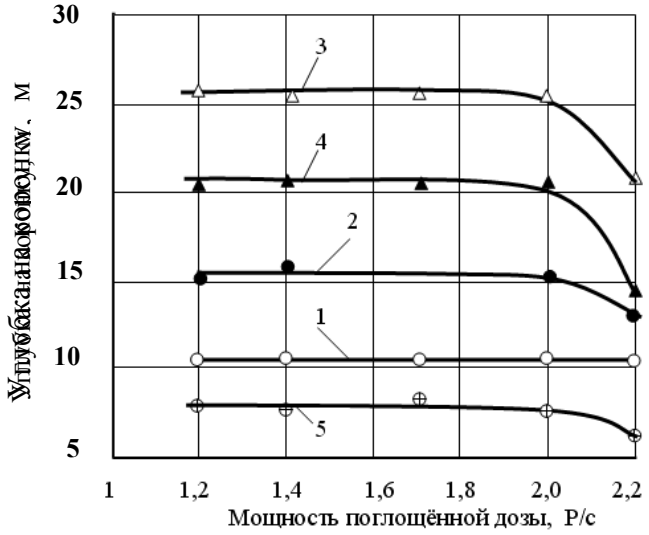

Рис. 12. Зависимость углубки на коронку К-01-1 от мощности поглощённой дозы при различных дозах облучения:
1 – поглощённая доза $8 \cdot 10^2$ Р;
2 – поглощённая доза $2 \cdot 10^3$ Р;
3 – поглощённая доза $5 \cdot 10^3$ Р;
4 –поглощённая доза $8 \cdot 10^3$Р;
5 – поглощённая доза $1 \cdot 10^4$ Р

Полученные результаты исследований хорошо согласуются с выводами о существовании оптимальных режимов облучения гамма-квантами для различных материалов. Для КАМ оптимальный диапазон дозы облучения находится в пределах $(2\text{-}8) \cdot 10^3$ Р при мощности дозы 1,4– 2,0 Р/с.

Для оценки влияния облучения гамма-квантами на надёжность (качество) закрепления алмазных зёрен в матрице по показателям «сохранность алмазов» и «удельный расход алмазов» были проведены исследования с коронками 01А3Д60К40. Перед началом и после испытаний в каждой коронке считались все алмазные зёрна с помощью бинокулярной лупы ЛУ-2. Каждая коронка отрабатывалась в два рейса по 3 м. После второго рейса производился контрольный подсчёт алмазов. Результаты данных исследований представлены в табл. 9**,** из которой видно, что минимальный удельный расход алмазов имеет место при дозе облучения $5 \cdot 10^3$ Р. Он почти в 2 раза меньше, чем у контрольных коронок или облученных дозой $8 \cdot 10^2$ и $1 \cdot 10^4$ Р.

После эксперимента все коронки были направлены для окончательной отработки. Полная углубка на коронку, облученную оптимальной дозой $5 \cdot 10^3$ Р, составила 12,8 м, что в 1,5-1,6 раза больше, чем у всех остальных коронок.

Таблица 9

Результаты испытаний алмазных коронок 01А3Д60К40

Тип коронок	Доза облучения, Р	Количество алмазных зёрен в коронке, шт.:		Удельный расход алмазов при проходке 6м, шт./м	Сохранность алмазов, %	Полная углубка на коронку, м
		до испытаний	после испытаний			
01А3Д60К40, облученные	$8 \cdot 10^2$ $5 \cdot 10^3$ $1 \cdot 10^4$	360 359 357	223 283 207	22,8 12,6 25,0	62 79 58	8,1 12,8 7,6
01А3Д60К40 контрольные	-	362	217	24,0	60	7,9

Существенное увеличение углубки на коронку при оптимальных режимах облучения можно объяснить повышенной сохранностью алмазов за счёт более надёжного закрепления их в матрице. Это обусловлено тем, что при дозах облучения ниже оптимальной величины процессы структурной перестройки в материале матрицы и на границе раздела "алмазное зерно – матрица" не успевают полностью завершиться, а при завышенных дозах концентрация вводимых радиационных дефектов повышается настолько, что приводит к повышению хрупкости и снижению прочности матрицы.

Оптимальный диапазон мощности дозы гамма-квантов (1,4 – 2,0 Р/с) обусловлен тем, что при малой её величине (1,4 Р/с) требуется длительное время облучения, а при мощности, большей 2,0 Р/с количество образующегося в единицу времени атомарного водорода таково, что он уходит из облучаемого инструмента, не произведя требуемой перестройки структуры.

Положение 6. ***Криогенно-радиационная обработка твёрдосплавного и алмазного породоразрушающего инструмента представляет собой технологический процесс «низкотемпературная закалка – радиационный отпуск», который позволяет повысить основные физико-механические характеристики твёрдого сплава и качество закрепления алмазов в матрице при незначительном снижении микротвёрдости сплавов, что обеспечивает существенное повышение износостойкости и прочности породоразрушающего инструмента.***

Упрочнение твёрдосплавного и алмазного ПРИ методами криогенной обработки и облучения малыми дозами гамма-квантов позволяет существенно повысить углубку на коронку, снизить расход алмазов и твёрдых сплавов, повысить механическую скорость бурения. Однако, наряду с положительным эффектом, и криогенная обработка, и облучение гамма-квантами снижают некоторые прочностные характеристики твёрдых сплавов и композиционных материалов. Так, криогенная обработка повышает хрупкость, а облучение гамма-квантами приводит к снижению твёрдости исследуемых материалов.

Необходимо, при сохранении полученного при криогенной обработке положительного эффекта (повышение микротвёрдости), снизить хрупкость, повысить предел прочности при изгибе и деформацию. Нами было сделано предположение, что данная проблема может быть решена путём последующего облучения ПРИ малыми дозами гамма-квантов. При этом криогенная обработка рассматривалась как низкотемпературная закалка, а облучение гамма-квантами - как радиационный отпуск. Технологическая операция «термическая закалка – отпуск» широко используется в металловедении для получения необходимых физико-механических свойств сталей. Предполагалось, что радиационный отпуск твёрдых сплавов и КАМ после криогенной обработки в силу своего особого механизма воздействия может повысить деформацию и предел прочности при изгибе, уменьшить хрупкость, снизить незначительно твёрдость. Данное предположение полностью подтвердилось при исследовании влияния криогенно-радиационной обработки на физико-механические свойства твёрдых сплавов ВК8, ВК6. Динамика изменения этих свойств представлена на диаграммах (рис.13), анализ которых позволяет

*Комплексная обработка – криогенно-радиационная обработка

Рис. 13. Диаграммы изменения физико-механических свойств твёрдого сплава ВК6 при различных способах упрочнения

сделать вывод о том, что криогенно-радиационная обработка обеспечивает существенное повышение предела прочности при изгибе и деформации по сравнению с криогенной обработкой. Микротвёрдость при этом снижается незначительно (на 4-5%). По сравнению с облучением гамма-квантами комплексная обработка твёрдых сплавов обеспечивает повышение предела прочности при изгибе и микротвёрдости при некотором снижении деформации (7-8%). Приведенный анализ позволил сделать предположение о более высокой эффективности комплексной обработки при повышении износостойкости и прочности ПРИ по сравнению с другими способами его упрочнения.

Проверка полученных результатов исследований проводилась при бурении скважин в условиях Центрально-Кузбасской ГРЭ твёрдосплавными коронками СА4-76. В процессе сравнительных испытаний было показано, что максимальные значения основных эксплуатационных показателей имеют коронки, прошедшие криогенно-радиационную обработку (табл.10).

С целью оптимизации режимных параметров бурения скважин коронками, упрочнёнными методом криогенно-радиационной обработки, были проведены исследования влияния осевой нагрузки и частоты вращения бурового снаряда на показатель «углубка на коронку». Кривые, представленные на рис.14, позволяют определить оптимальный диапазон осевой нагрузки, обеспечивающий максимальный ресурс коронок. Для коронок, подвергнутых криогенно-радиационной обработке, он находится в пределах 1300–1400 даН, что позволяет рекомендовать повышение осевой нагрузки на 15 -20 % по

сравнению с общепринятыми нормами для контрольных коронок.

Таблица 10

Результаты сравнительных испытаний твёрдосплавных коронок СА4 - 76

Вид обработки коронок	Углубка на коронку, м показатель эффективности, раз		Механическая скорость бурения, м/час показатель эффективности, раз	
	Категория горных пород		Категория горных пород	
	VII	VIII	VII	VIII
Контрольные коронки	4,7 / 1,0*	2,8 / 1,0*	3,5 / 1,0*	2,4 / 1,0*
Криогенная обработка	6,6 / 1,40	4,1 / 1,46	4,2 / 1,20	3,0 / 1,26
Облучение γ - квантами	7,5 / 1,59	4,5 / 1,60	4,4 / 1,27	3,2 / 1,35
Криогенно-радиационная обработка	7,9 / 1,68	5,0 / 1,79	4,7 / 1,35	3,48 / 1,45

* В числителе – проходка на коронку, в знаменателе – показатель эффективности,

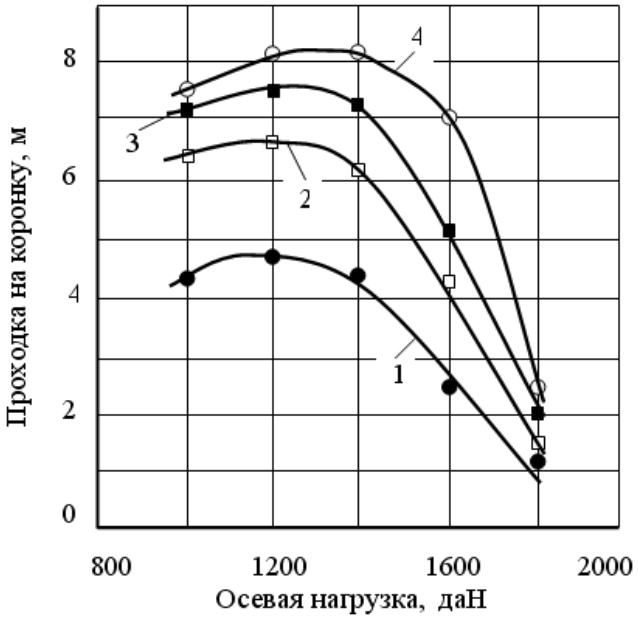

Рис. 14. Зависимость углубки на коронку СА4-76 от осевой нагрузки: 1–контрольные коронки; 2– коронки, обработанные в жидком азоте; 3 – коронки, облученные гамма-квантами; 4 – коронки, прошедшие криогенно-радиационную обработку

Исследования влияния криогенно-радиационной обработки на износостойкость алмазного ПРИ проводились на буровом стенде при бурении скважин в абразивном камне коронками 02И3. В процессе исследований было установлено, что эффективность криогенно-радиационной обработки значительно выше криогенной обработки или облучения гамма-квантами. Она позволяет снизить износ алмазных коронок по наружному диаметру на 30-50%, по высоте матрицы – на 30-40 %, по массе - на 15- 25 %.

Полученные результаты были подтверждены при проведении сравнительных испытаний в ПГО «Востказгеология», где было отработано с полным хронометражём 120 однослойных алмазных коронок 01А3, прошедших криогенно-радиационную обработку. Было установлено, что эффективность упрочнения алмазного ПРИ данным методом по показателю «углубка на коронку» на 20- 40 % выше, чем при криогенной обработке или облучении

гамма-квантами. По сравнению с контрольными коронками комплексная обработка позволяет повысить этот показатель на 60-90%.

Общие представления о механизме упрочнения твёрдых сплавов и КАМ при криогенно-радиационной обработке сформулированы на основании приведенных выше версий механизма упрочнения при криогенной обработке и облучении малыми дозами гамма-квантов.

В результате термического удара при криогенной обработке происходит своего рода закалка твёрдого сплава, позволяющая фиксировать структурные изменения, главным образом, в связующей фазе, которые происходят при быстром охлаждении до низких отрицательных температур. Сходные процессы протекают и при взаимодействии алмазного зерна с материалом связки матрицы в момент термического удара. При этом под воздействием значительных напряжений, возникающих в композиционном материале, происходит проникновение материала связки в микротрещины алмазных зёрен, заполнение поверхностных пор, что способствует более качественному закреплению алмазов в матрице и увеличению ресурса алмазных коронок.

Хрупкость твёрдых сплавов и композиционных материалов при криогенной обработке повышается за счёт значительного увеличения концентрации дислокаций и других видов дефектов при протекании деформационных процессов в связке. Снизить концентрацию дефектов в кристаллической структуре зёрен и на границе их раздела можно при облучении их малыми дозами гамма-квантов. При этом за счёт совершенствования структуры материала происходит снижение его хрупкости. Микротвёрдость при таком режиме обработки снижается незначительно (не более 4 – 5 %). В то же время прочностные характеристики инструмента существенно повышаются (рис. 13). Таким образом, облучение ПРИ малыми дозами гамма-квантов после криогенной обработки, с точки зрения упрочняющих термических технологий, играет роль отпуска, так как при этом достигается определённый (заданный) уровень физико-механических свойств исследуемых материалов.

Сформулированные представления о механизме упрочнения породоразрушающего инструмента при криогенно-радиационной обработке хорошо согласуются с приведенными выше результатами экспериментальных исследований и сравнительных испытаний ПРИ в производственных условиях.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Одним из основных резервов дальнейшего повышения эффективности буровых работ является создание ПРИ с повышенными эксплуатационными показателями за счёт дополнительного упрочнения различными физическими методами.

2. Научный и практический интерес с позиций повышения ресурса ПРИ представляют способы объёмного упрочнения, наиболее перспективными из которых являются криогенная обработка и облучение малыми дозами гамма-квантов.

3. Существует возможность управляемого повышения эксплуатационных показателей твёрдосплавного и алмазного ПРИ методами криогенной обработки и облучения малыми дозами гамма-квантов. Разработанные способы упрочнения

ПРИ защищены патентами на изобретения [45-51], прошли всестороннюю проверку в лабораторных и в производственных условиях.

4. Криогенная обработка твёрдых сплавов и КАМ, рассматриваемая нами как термический удар в области низких отрицательных температур, производит в них заметные структурные преобразования: снимаются полностью или рассредоточиваются суперпозиционные поля напряжений, создаётся равномерное объёмное напряжённое состояние сжатия, повышается концентрация дислокаций, происходит дробление блоков мозаики.

5. В результате криогенной обработки твёрдых сплавов и КАМ изменяются их физико-механические свойства: повышается микротвёрдость, жесткость; снижается упругая деформация.

6. Остаточные паяльные напряжения в твёрдосплавных резцах ПРИ суммируются алгебраически с напряжениями, возникающими при криогенной обработке, повышая напряженное состояние сжатия в твёрдом сплаве, что способствует увеличению его микротвёрдости, а, следовательно, и износостойкости.

7. Измерение параметров акустической эмиссии при слабом рентгеновском облучении твёрдых сплавов и КАМ позволяет получать качественную и количественную характеристику влияния криогенной обработки на уровень их структурных преобразований, что делает возможным использовать этот эффект для контроля качества твёрдосплавного и алмазного ПРИ [49].

8. Изменение режимных параметров криогенной обработки позволяет направленно задавать физико-механические свойства твёрдым сплавам и КАМ, обеспечивая максимальный ресурс ПРИ при бурении скважин в определённых геолого-технических условиях.

9. Объёмное упрочнение твёрдосплавного и алмазного ПРИ методом криогенной обработки в сочетании с найденными рациональными режимами бурения позволяют повысить его ресурс в 1,4-1,8 раза, механическую скорость бурения – в 1,2-1,3 раза.

10. Механизм модификации физико-механических свойств твёрдых сплавов при криогенной обработке основан, главным образом, на субструктурном упрочнении вследствие пластической деформации кобальтовой связки из-за большого различия температурного коэффициента линейного расширения WC и Co. Пластическая деформация повышает плотность дислокаций и точечных дефектов в твёрдом сплаве, что сопровождается изменением его прочности и износостойкости.

Механизм упрочнения КАМ дополняется тем, что существенное изменение напряжённого состояния матрицы при криогенной обработке повышает удерживающую способность алмазных зёрен за счёт механического воздействия окружающего материала и проникновения его в микротрещины и поверхностные поры.

11. Механизм упрочнения твёрдосплавного и алмазного ПРИ при облучении их гамма-квантами основан на совершенствовании структуры твёрдых сплавов и КАМ за счёт аннигиляции точечных дефектов и перераспределения дислокаций. Структурные преобразования приводят не к дальнейшему накоплению дефектов, а, наоборот, к их устранению и переводу кристаллических тел в более равновесное состояние. Дополнительное закрепление алмазов в матрице реализуется за счёт диффузии в них метастабильных атомов из материала связки.

12. Физико-механические свойства твёрдых сплавов и КАМ при их облучении гамма-квантами зависят от поглощённой дозы и мощности дозы. Зная закономерности их изменения, можно направленно задавать режимы облучения ПРИ в

соответствии с геолого-техническими условиями бурения скважин для обеспечения высоких эксплуатационных показателей

13. Режимные параметры облучения гамма-квантами алмазного и твёрдосплавного ПРИ имеют предельные значения, превышение которых приводит к существенному снижению физико-механических характеристик материалов за счёт увеличения концентрации дефектов в них. Оптимальные режимные параметры имеют следующие значения: для твёрдосплавного ПРИ – доза облучения $(5\text{-}8)\cdot 10^5$Р, мощность дозы – 2,0 Р/с; для алмазного ПРИ – соответственно – $(3\text{-}8)\cdot 10^3$ Р и 2,0 Р/с.

14. Облучение гамма-квантами при рациональных значениях поглощённой дозы и мощности дозы позволяет повысить ресурс твёрдосплавного ПРИ в 1,6 – 1,8 раза, алмазного ПРИ – в 1,6-2, 0 раза.

15. Существенную роль в устранении дефектов в твёрдых сплавах и КАМ играет водород, который при облучении принимает активное участие в структурной перестройке дефектов в облучаемом материале. Искусственное повышение концентрации водорода и последующее облучение гамма-квантами позволяет повысить прочностные характеристики сплавов и качество закрепления алмазных зерен в материале матрицы.

16. Криогенно-радиационное воздействие на твёрдые сплавы и КАМ является технологическим приёмом «низкотемпературная закалка – радиационный отпуск», который позволяет существенно повысить прочностные характеристики и износостойкость обрабатываемого ПРИ.

18. Реальный экономический эффект от внедрения результатов исследований только в ПГО «Восказгеология» составил 268,3 тыс. руб. (в ценах 1989г.).

17. Разработанные методические и технико-технологические средства могут явиться основой для создания заводских технологий изготовления ПРИ с повышенными эксплуатационными показателями.

Для создания ПРИ, способного успешно конкурировать с лучшими зарубежными образцами, необходимо продолжить исследования в области упрочняющих технологий, реализуемых различными физическими методами.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии и брошюры

1. Власюк В.И., Рябчиков С.Я., Будюков Ю.Е. и др. Новые технологии в создании и использовании алмазного породоразрушающего инструмента. – М.: «Геоинформмарк», 2002. – 140 с.

2. Рябчиков С.Я., Власюк В.И., Спирин В.И. Объёмное упрочнение породоразрушающего и металлорежущего инструмента. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2001. – 52 с.

3. Рябчиков С.Я., Мамонтов А.П., Власюк В.И. Повышение работоспособности породоразрушающего инструмента методами криогенной обработки и радиационного облучения. – М.: «Геоинформмарк», 2001. – 92 с.

4. Рябчиков С.Я. Повышение износостойкости породоразрушающего инструмента. – М.: ВИНИТИ, 1998. – 70 с.

5. Рябчиков С.Я. Повышение износостойкости породоразрушающего инструмента различными физическими способами. – М.: МГП «Геоинформмарк», Техн., технол. и орг-ия геол. развед. работ. Вып. 1, 1993. – 38 с.

6. Осецкий А.И, Рябчиков С.Я., Сулакшин С.С., и др. Методические рекомен-

дации по криогенной обработке алмазных буровых коронок.–Л.: ВИТР, 1987.– 12 с.

7. Ермолаев В.А., Мамонтов А.П., Рябчиков С.Я. Текстурные, структурные изменения и износостойкость твёрдых сплавов ВК-8 после воздействия электронами.– М.: ЦНИИ эконом. и информ. цветн. металлургии, 1987. - № 1572 – 87. БУ ВИНИТИ «Депонированные научные работы», № 9 (191), 1987 – 26 с.

8. Ермолаев В.А., Мамонтов А.П., Рябчиков С.Я., Особенности структуры и текстуры твёрдых сплавов до и после гамма- облучения. Деп.– М.: ЦНИИ эконом. и информ. цветн. металлургии, - № 1771 – 84. БУ ВИНИТИ «Депонированные научные работы», № 10 (156), 1984 – 28 с.

Статьи и тезисы докладов

9. Мамонтов А.П., Рябчиков С.Я., Чахлов Б.В. Современное состояние и перспективы развития криогенно-радиационных способов упрочнения породоразрушающего инструмента /Матер. III Международной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах», Томск, 2002. – С. 124-125

10. Рябчиков С.Я., Мамонтов А.П. Исследование механизма модификации свойств композиционных алмазосодержащих материалов при облучении малыми дозами гамма-квантов //Известия ТПУ, том 304, Вып. 1, Томск: 2001. – С. 307-312.

11. Рябчиков С.Я. Современное состояние и перспективы развития криогенно-радиационных способов упрочнения породоразрушающего инструмента //Сб. матер. Междунар. научно-техн. конф. «Горногеологическое образование в Сибири» - Томск: ТПУ, 2001 – С. 237-239.

12. Мамонтов А.П., Рябчиков С.Я., Чахлов Б.В. Рентгено-акустический метод контроля структуры металлов и сплавов //Тез. докл. VIII Региональной научно-технич. конф. «Неразрушающий контроль и техническая диагностика оборудования в процессе эксплуатации». – Иркутск, - 2001. – С.25-26.

13. Мамонтов.А.П., Рябчиков С.Я., Чахлов Б.В. Физические основы рентгено-акустического метода контроля и диагностики металлов и сплавов //Известия ТПУ, том 303, Вып. 3, Томск: 2000. – С.72-74.

14. Рябчиков С.Я., Мамонтов А.П., Печугин А.В. О влиянии комплексной криогенно-радиационной обработки на износостойкость алмазных коронок // Известия ВУЗов, сер. «Геология и разведка», М.: 2000. – С. 89 – 94.

15. Рябчиков С.Я. Исследование влияния криогенно-радиационной обработки на износостойкость алмазных и твёрдосплавных коронок //Сб. матер. Регион. научно-техн. конф. геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России.- Томск, - 2000. – С. 487-489.

16. Рябчиков С.Я., Мамонтов А.П. Исследование механизма модификации свойств композиционных алмазосодержащих материалов при облучении малыми дозами гамма-квантов //Тез. докл. научно-техн. конф. «Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин», Томск: ТПУ, 1999. –С. 53-54.

17. Мамонтов А.П, Рябчиков С.Я., Чернов И.П., Влияние водорода на упорядочение структуры неорганических материалов при облучении //Сб. матер. 10-ой Международной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов (РФХ-10). – Томск, 1999. – С. 329-331.

18. Рябчиков С.Я., Мамонтов А.П. Влияние криогенной обработки на акустическую эмиссию в твёрдых сплавах. - //Изв. вузов, серия «Геология и разведка»,

М.: 1998. - С.123 – 128.

19. Рябчиков С.Я. Современные методы упрочнения твёрдосплавного и алмазного породоразрушающего инструмента //Тез. докл. Межрегион. научно-техн. конф. «Новые технологии в горно-добывающей промышленности». – Новокузнецк: ВостНИГРИ, 1998, С. 29-30.

20. A. Mamontov, S. Ryabchikov, B. Chaklov. Acoustic Emission Generated During ionizing Radiation in Metals and Alloys //Symposium on Radiation Measurements and Applications. Ninth in a Series.-The University of Michigan. – 1998. – S. 148-150).

21. Мамонтов А.П., Рябчиков С.Я., Чахлов Б.В. Радиационно-акустический метод контроля качества металлов и сплавов //Сб. матер. III Всероссийской научно-техн. конф. «Методы и средства измерений физических величин». – Нижний Новгород, - 1998. – С. 28-29.

22. Мамонтов А.П., Рябчиков С.Я., Упрочнение изделий из композиционных материалов и радиационно-акустический контроль их качества //Тез. докл. Научно-техн. конф. «Перспективные материалы, технологии, конструкции».- Красноярск: Сибирская аэрокосмическая академия, - 1998.– С. 22.

23. Рябчиков С.Я., Мамонтов А.П. Исследование механизма упрочнения твёрдосплавного инструмента при криогенной обработке //Межвуз. научн. Темат.. Сборник «Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твёрдые полезные ископаемые»- Екатеринбург, - 1997.–С. 74-81.

24. Мамонтов А.П., Рябчиков С.Я., Чахлов Б.В. Технологии упрочнения твёрдосплавного и алмазного породоразрушающего инструмента //Сб. матер. V Международной научно-технической конференции «Материалы и упрочняющие технологии - 97». – Курск, - 1997. – С. 48-50.

25. Мамонтов А.П., Рябчиков С.Я., Чахлов Б.В. Применение ионизирующего излучения для упрочнения и диагностики породоразрушающего инструмента //Тез. докл. Регион. научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении». – Тюмень, - 1997.- С. 113-115.

26. Рябчиков С.Я., Мамонтов А.П., Нейштетер И.А. Влияние криогенной обработки и радиационного облучения на прочностные характеристики твердых сплавов //Межвуз. научн. тематич. сборник "Совершенствование техники и технол. бурения скважин на твёрдые полезные ископаемые"- Екатеринбург,-1996.-С. 78-84.

27. Рябчиков С.Я., Мамонтов А.П., О механизме упрочнения породоразрушающего инструмента при облучении его гамма-квантами. //Межвуз. научн. тематич. сборник "Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые" - Екатеринбург, - 1995.- С. 84-88.

28. Рябчиков С.Я. Классификация способов упрочнения породоразрушающего инструмента //Сб. докл. научно- техн. конф. «Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин». - Томск, 1994.- С.47-51.

29. Рябчиков С.Я. Механизм упрочнения породоразрушающего инструмента при криогенной обработке //Сб. докл. научно-техн. конф. «Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин». - Томск,-1994. - С.51-53.

30. Кривошеев В.В., Рябчиков С.Я., Сулакшин С.С. Разработка актуальных вопросов бурения скважин в осложнённых условиях. //Тез. докл. 2-го Международного симпозиума по бурению скважин в осложнённых условиях. – СПб: СГИ, 1992. – С. 51-52.

31. Рябчиков С.Я. Современные технологии повышения ресурса породоразрушающего инструмента //Сб. матер. Всесоюзн. школы передов. опыта «Перспек-

тивы внедрения прогрессивной техники и технологии при бурении скважин», Усть-Каменогорск: ПГО «Востказгеология»,1990.– С. 35-37.

32. Рябчиков С.Я., Айкашев А.В. Повышение износостойкости породоразрушающего инструмента различными физическими способами для бурения скважин в крепких горных породах //Тез. докл. 1-го Международного симпозиума по бурению скважин в осложненных условиях. – Л.: ЛГИ, 1989.- С.89-90.

33. Рябчиков С.Я., Борисов К.И., Письмеров А.С. Исследования и реализация путей снижения абразивного износа породоразрушающего инструмента //Сб. матер. 3-ей Всесоюзной научно-технич. конф. «Разрушение горных пород при бурении скважин». - Уфа, 1989. - С.17-19.

34. Рябчиков С.Я., Спиридонов Б.И. Опытно-методические работы по упрочнению породоразрушающего инструмента при бурении скважин на объектах ПГО "Востказгеология". /Отчет о НИР, - Томск: ТПУ - № ГР 0188. 0041444-9-88-15/7.(М.: ВНТИЦентр, законч. работа) - Томск, 1989. - 78с.

35. Рябчиков С.Я., Айкашев А.В., Спиридонов Б.И. Опытно-методические работы по упрочнению породоразрушающего инструмента на объектах ПГО «Востказгеология» – Отчёт о НИР, Томск: ТПУ, № ГР 0287. 002652. (М.: ВНТИЦентр, законч. работа) – 1988. – 56 с.

36. Рябчиков С.Я. Влияние режимных параметров криогенной обработки на износостойкость твёрдосплавного породоразрушающего инструмента //Материалы Всесоюзной научно-практич. конференции «Проблемы технокриологии в различных отраслях промышленности». – Пенза, 1987.- С. 18-21.

37. Филиппов В.Н., Рябчиков С.Я. Повышение износостойкости шарошечных долот путем термической обработки глубоким холодом //Материалы Всесоюзной научно-практической конференции «Проблемы технокриологии в различных отраслях промышленности». - Пенза, 1987. - С.15-18.

38. Рябчиков С.Я., Борисов К.И. Повышение износостойкости твердосплавных и алмазных коронок при криогенной обработке //Тез. докл. научн.-техн. конф. «Технол. и техника геологоразвед. работ в Сибири». - Томск, ТПУ, 1987.- С. 35-38.

39. Щукин А.А., Рябчиков С.Я., Чернов И.П. Пути повышения износостойкости породоразрушающего инструмента для бурения скважин и шпуров //Сб. статей, - Магадан: ПГО «Севвостокгеология», 1986. – С.17-21.

40. Сулакшин С.С., Рябчиков С.Я., Борисов К.И.и др. Исследование, разработка и внедрение прогрессивной технологии и техники бурения геологоразведочных скважин. /Отчет о НИР - Томск: ТПУ – № ГР 0287. 0023938, (М.: ВНТИЦентр, законч. работа), - 1986.- 155 с.

41. Сулакшин С.С., Рябчиков С.Я., Голиков В.Я. Материалы предварительных испытаний опытной партии буровых коронок СА-5, обработанных жидким азотом, в условиях Кузбасса. Исполнители: ТПИ, СКБ ПО "Союзгеотехника". – М.: Мингео СССР, Геолфонд СССР, 1985. –18 с.

42. Рябчиков С.Я., Сулакшин С.С., Борисов С.С. Результаты испытаний коронок типа «СА», обработанных в жидком азоте //Межвуз. научн. тематич. сборник: Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твёрдые полезные ископаемые, Екатеринбург, - 1982. – С. 25-27.

43. Рябчиков С.Я., СулакшинС.С., Борисов К.И. Повышение износостойкости породоразрушающего инструмента при обработке его жидким азотом //Техн. и технол. геол.-развед. работ.– М.: (ВИЭМС), 1981.–Вып.11–С. 1-6.

44. Рябчиков С.Я. Исследование влияния криогенной обработки на ресурс твёрдосплавных коронок //Тез. докл. Межотр. сем. «Современные методы и средства управления процессом бурения", Челябинск: ЧПИ, 1981. – С18.

45. Сулакшин С.С., Рябчиков С.Я., Борисов К.И. Совершенствование технологии бурения скважин в Горловском угольном бассейне //Отчёт о НИР, Томск: ТПУ, № ГР 0280.02152. (М.: ВНТИЦентр, законч. работа) –1980.–85с.

Авторские свидетельства и патенты

46. Способ обработки твёрдосплавного инструмента: Патент РФ № 1135087 /Рябчиков С.Я., Мамонтов А.П., Чернов И.П. //1984.–ДСП (не публ.).

47. Способ обработки твёрдосплавного породоразрушающего инструмента: А.С. № 1751931 /Рябчиков С.Я., Мамонтов А.П., Чернов И.П. и др. //1990.– ДСП.

48. Способ упрочнения твёрдосплавного инструмента: Патент РФ, № 2092282 / Мамонтов А.П., Рябчиков С.Я., Чернов И.П. // Би. – 1997. - № 28.

49. Способ упрочнения твёрдосплавного и алмазного инструмента для бурения горных пород: Патент РФ, № 2101456 /Рябчиков С.Я., Мамонтов А.П. /БИ. - 1998. - № 1.

50. Способ контроля качества твёрдосплавного и алмазного породоразрушающего инструмента: Патент РФ № 2146815 / Мамонтов А.П., Рябчиков С.Я., Чахлов Б.В., Чернов И.П. /БИ. – 2000. - № 8.

51. Способ повышения износостойкости металлорежущего инструмента: Патент РФ № 2168393 /Мамонтов А.П., Рябчиков С.Я //БИ.-2001. - № 16.

52. Способ упрочнения твёрдосплавного и алмазного инструмента для бурения горных пород. Положительное решение о выдаче патента РФ на изобретение по заявке № 2001100580/02(000537) /Мамонтов А.П., Рябчиков С.Я., Чахлов Б.В. и др., 24.06.2002. – № 022104