

На правах рукописи

**ЛОГИНОВ ПАВЕЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ  
МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ РЕЖУЩЕГО  
ИНСТРУМЕНТА ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.16.06 - Порошковая металлургия и композиционные материалы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)

**Научный руководитель:** Левашов Евгений Александрович  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Бугаков Василий Иванович** доктор технических наук,  
Институт физики высоких давлений им. Л. Ф.  
Верещагина Российской Академии Наук (ИФВД РАН),  
г. Троицк  
заместитель директора

**Поздняков Андрей Анатольевич** кандидат технических наук,  
Федеральное государственное бюджетное научное  
учреждение «Технологический Институт Сверхтвердых и  
Новых Углеродных Материалов» (ФГБНУ ТИСНУМ),  
г. Троицк  
заведующий лабораторией синтеза новых сверхтвердых  
материалов

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Институт металлургии и материаловедения им.  
А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН),  
г. Москва

Защита диссертации состоится «03» декабря 2014 года в 14-30 в аудитории К-212 на заседании диссертационного совета Д 212.132.05 при НИТУ «МИСиС» по адресу: г. Москва, ул. Крымский вал, д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС» и на сайте <http://www.misis.ru>.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, 4, НИТУ «МИСиС», ученому секретарю диссертационного совета Лобовой Т.А.

Автореферат разослан «    » октября 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Т.А. Лобова

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

В настоящее время проблема обработки резанием крупных металлических конструкций, например, из сталей и чугунов, является крайне актуальной. Существующие алмазные режущие инструменты, предназначенные для данных целей, имеют свои недостатки. Например, канатные пилы со связкой, нанесенной электролитическим методом, имеют тонкий алмазоносный рабочий слой. После изнашивания алмазных зерен у инструментов такого типа безвозвратно падают эксплуатационные характеристики.

Также для резки сталей и чугунов применяются сегментные инструменты с горячепрессованной связкой на основе кобальта, меди и их сплавов. Однако, как правило, они используются также для обработки армированных бетонов. Количество специализированного инструмента для резки сталей и чугунов достаточно ограничено. Одним из недостатков существующих канатных пил и ОСК с горячепрессованной связкой является низкая производительность и срок службы. Это связано с тем, что в качестве абразивной составляющей в рабочем слое используются алмазы, активно изнашивающиеся при обработке сталей и чугунов. В связи с этим актуальной представляется их замена на другой вид сверхтвердых материалов (СТМ) – кубический нитрид бора cBN.

Основной проблемой при разработке режущего инструмента является отсутствие на рынке сплавленных порошков связок, предназначенных для производства канатных пил и ОСК для резки сталей и чугунов. Существующие составы, например, порошок сплава Cu-Fe-Co марки Next 100, характеризуются высокой твердостью и используются при обработке абразивных материалов. Однако данные связки имеют низкую ударную вязкость, что ограничивает их применение в инструментах, работающих при больших скоростях (около 80 м/с), таких как, например, ОСК. Поэтому для разработки инструмента для резки сталей и чугунов представляется перспективным легирование существующих связок типа Next100 никелем с целью повышения пластических характеристик.

В результате проведенных ранее в Научно-учебном центре СВС МИСИС-ИСМАН исследований была установлена потенциальная возможность дисперсного упрочнения различных металлических связок на основе кобальта, железа, никеля, меди высокомолекулярными наночастицами тугоплавких соединений. Однако влияние данных добавок на механические свойства многокомпонентных связок Cu-Fe-Co-Ni, а также на служебные свойства изготовленных на ее основе режущих инструментов, содержащих как алмазы, так и cBN, рассмотрено не было. Добавка в металлические связки малых концентраций твердой смазки гексагонального нитрида бора hBN также является перспективным и ранее не применявшимся методом для усовершенствования инструмента. Данный компонент способствует уплотнению при компактировании и, следовательно, может увеличить механические свойства материала.

Известно, что для повышения адгезионной способности связки ее легируют реакционно-активным по отношению к алмазам или cBN компонентом – титаном. Эффективность данного подхода подтверждена для инструментов с рабочим слоем на основе алюминия и бронз. Однако при использовании титана в связках Cu-Fe-Co-Ni возможно образование большого количества интерметаллидов, приводящих к охрупчиванию материала. В связи с этим необходимо проведение исследований по определению его оптимальной концентрации и способа введения.

Актуальность работы подтверждается тем, что работа выполнялась в рамках следующих проектов:

- Государственный контракт № 16.513.11.3106 от 10 октября 2011 г. «Разработка кристаллических наноматериалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками для энергоэффективных автоматизированных процессов порошковой металлургии нового поколения инструмента из сверхтвердых материалов» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».

- Государственный контракт № 14.513.11.0045 от 20 марта 2013 г. «Разработка нового поколения однокристалльного и металлорежущего инструмента из сверхтвердых материалов с наномодифицированной металлической связкой» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2013 годы».

- Проект РФФИ № 14-08-00842 от 16 марта 2013 г. «Разработка механически легированных металлматричных композитов с эффектом двойного дисперсного упрочнения за счет выделения избыточных фаз при расслоении пересыщенных твердых растворов и введения функциональных наночастиц».

- Проект К2-2014-001 от 15 апреля 2014 г.: «Разработка перспективных функциональных неорганических материалов и покрытий с участием ведущих ученых» в рамках федеральной программы повышения конкурентоспособности НИТУ «МИСиС» среди ведущих мировых научно-образовательных центров «5-100».

#### **Цель диссертационной работы**

Разработка перспективных методов увеличения служебных свойств режущих инструментов из сверхтвердых материалов, предназначенных для резки сталей и чугунов, путем оптимизации состава, структуры металлической связки и концентрации алмаза и кубического нитрида бора.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

- выявить влияние легирующей добавки никеля на прочностные свойства связки Cu-Fe-Co (Next 100) и определить его оптимальную концентрацию;

- исследовать влияние режимов механической обработки порошковых смесей Cu-Fe-Co-Ni в ПЦМ, а также наночастиц WC, ZrO<sub>2</sub> и hBN на фазо- и структурообразование при механическом

легировании;

- разработать способ введения наночастиц и титана в порошковую связку Cu-Fe-Co-Ni, обеспечивающий их равномерное распределение по объему шихты;

- исследовать влияние добавок WC, ZrO<sub>2</sub> и hBN на процессы уплотнения при холодном прессовании и спекании связки Cu-Fe-Co-Ni;

- исследовать возможность повышения адгезионной прочности связки Cu-Fe-Co-Ni за счет ее легирования реакционно-активной по отношению к СТМ добавкой титана и установить взаимосвязь его концентрации с механическими свойствами и структурой;

- исследовать влияние соотношения алмазов и cBN на режущие свойства инструмента для оптимизации состава рабочего слоя;

- провести сравнительные испытания отрезных сегментных кругов и канатных пил с наномодифицированной связкой и определить производительность и скорость резания инструмента.

### **Методы исследования**

Смешивание порошков в планетарных центробежных мельницах (ПЦМ), шаровых мельницах (ШМ) и двухконусном смесителе, исследование физико-механических свойств связок, изучение их структуры и состава методами рентгенофазового анализа (РФА), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), Оже-спектроскопии проводили в НИТУ «МИСиС». Исследование структуры методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), в том числе высокого разрешения (ПЭМВР) осуществляли в University of Notre Dame (Саут-Бенд, США). Анализ границы раздела «связка – СТМ» проводили методом спектроскопии комбинационного рассеяния света в Технологическом институте сверхтвердых и новых углеродных материалов (Троицк, Россия). Горячее прессование связок, изготовление экспериментальных образцов режущих инструментов проводили в условиях серийного производства на технологической линии Dr. Fritsch в ЗАО «Кермет». Испытания инструментов выполнены на оборудовании ЗАО «Кермет».

### **Научная новизна**

1. Установлены закономерности влияния условий механической обработки порошковых смесей в планетарных центробежных мельницах на структуру и фазовый состав, заключающиеся в том, что с увеличением длительности обработки от 3 до 20 мин происходит изменение структуры гранул от слоистой до гомогенной, соответствующей фазе пересыщенного твердого раствора Fe, Co, Ni в меди. Присутствие частиц hBN замедляет процесс образования данной фазы.

2. Установлена взаимосвязь между содержанием титана в связке Cu-Fe-Co-Ni и ее механическими свойствами, позволившая определить предельную концентрацию титана на уровне 1 %, обеспечивающую высокую адгезию связки к сверхтвердому компоненту и твердость, а также исключающую образование интерметаллидов, приводящее к снижению прочности.

3. Установлены закономерности влияния наночастиц WC, ZrO<sub>2</sub> и hBN и режимов обработки порошковых смесей Cu-Fe-Co-Ni на уплотняемость и кинетику спекания, заключающиеся в том, что частицы hBN интенсифицируют процессы уплотнения при холодном прессовании на стадии структурной деформации за счет уменьшения межчастичного трения, а на стадии упруго-пластической деформации основной вклад в ухудшение уплотняемости вносит наклеп порошка, в то время как наночастицы WC, ZrO<sub>2</sub> и hBN слабо влияют на данные процессы. Энергия активации спекания порошков связки увеличивается при их предварительной обработке в планетарной центробежной мельнице с 13 до 64 кДж/моль, введение добавок WC и ZrO<sub>2</sub> дополнительно затрудняет усадку порошковых заготовок и повышает энергию активации спекания до 77 и 88 кДж/моль соответственно.

4. Найдено оптимальное соотношение концентраций алмаза и кубического нитрида бора в инструменте, при котором достигается наибольшая скорость резания стали в сочетании с надежным удерживанием зерен сверхтвердых материалов в связке.

#### **Практическая значимость**

1. На результаты интеллектуальной деятельности «Связка на основе меди для изготовления режущего инструмента со сверхтвердым материалом» получены патенты № 2487005 и № 2487006.

2. В условиях серийного производства ЗАО «Кермет» (г. Москва) изготовлены опытные партии канатных пил и отрезных сегментных кругов нового состава, показавших повышенные ресурс и производительность по сравнению с лучшими российскими и зарубежными аналогами.

3. Разработаны технические условия на перлины канатных пил ТУ 3972-034-11301236-2014 и сегменты отрезных кругов ТУ 3972-035-11301236-2014, используемых в процессах резки сталей и чугунов, на основе сверхтвердых материалов с модифицированной дисперсными частицами связкой.

4. Разработанные составы связки и технологические приемы внедрены в серийное производство канатных пил и отрезных сегментных кругов ЗАО «Кермет».

#### **На защиту выносятся:**

- установленные закономерности влияния легирующей добавки никеля на механические свойства связки Cu-Fe-Co (Next100);

- установленные закономерности влияния режимов механической обработки в ПЦМ на фазовый состав и микроструктуру порошковых гранул состава Cu-Fe-Co-Ni, в том числе с добавкой hBN;

- способ введения легирующих добавок WC, ZrO<sub>2</sub>, hBN и титана в порошковую связку Cu-Fe-Co-Ni, обеспечивающий их равномерное распределение по объему шихты;

- особенности влияния легирующих добавок WC, ZrO<sub>2</sub>, hBN на процессы холодного прессования и спекания связки Cu-Fe-Co-Ni, а также на ее механические свойства;

- установленные закономерности влияния легирующей добавки титана на механические

свойства, структуру и адгезионную прочность связки по отношению к СТМ;

- результаты испытаний канатных пил и отрезных сегментных кругов со сверхтвердыми материалами и связками, модифицированными различными частицами.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты работы докладывались на следующих выставках и конференциях: III Всероссийской молодёжной конференции с элементами научной школы «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества» (Москва, Россия, 2012); Научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов» (НФМ'2012) (Санкт-Петербург, Россия, 2012); IV Международной конференции «Фундаментальные основы механохимических технологий» (Новосибирск, Россия, 2013); III Всероссийской молодежной школе-конференции «Современные проблемы металловедения» (Пицунда, Абхазия, 2013); V Всероссийской конференции по наноматериалам «НАНО 2013» (Звенигород, Россия, 2013); Научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов» (НФМ'2014) (Санкт-Петербург, Россия, 2014); 41 – ом Международном салоне изобретений Inventions Geneva (Женева, Швейцария, 2013).

### **Публикации по теме диссертации**

По материалам диссертации имеется 12 публикаций, в том числе 3 статьи в журналах из перечня ВАК и входящих в базы данных Scopus, Web of Science, 7 тезисов и докладов в сборниках трудов конференций, а также 2 патента Российской Федерации.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка использованных источников и 5 приложений. Диссертация изложена на 159 страницах, содержит 14 таблиц, 53 рисунка. Список использованной литературы содержит 159 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен аналитический обзор литературы, в котором рассмотрены различные подходы для усовершенствования режущих инструментов на основе СТМ, предназначенных для обработки сталей и чугунов.

Рассмотрены основные типы режущих инструментов, в которых в качестве абразивной составляющей используются СТМ – отрезные сегментные круги (ОСК), канатные пилы. Анализ литературных данных показал, что применяемые в производстве большинства режущих инструментов алмазы могут быть успешно заменены на cBN – материал, уступающий алмазам по

твердости, но превосходящий по теплостойкости и химически инертный по отношению к металлам триады железа. Описаны возможные механизмы износа зерен алмазов и cBN в режущем инструменте при обработке сталей и чугунов. Алмазы подвержены как абразивному, так и химическому износу, тогда как при использовании cBN для резки данных материалов наблюдается только абразивное разрушение зерен (микроскалывание).

Проведен анализ существующих видов связок, применяемых при производстве режущих инструментов. Металлические связки имеют ряд преимуществ по сравнению с полимерными и керамическими. Благодаря высокой теплопроводности они отводят тепло из мест контакта с обрабатываемым материалом при резании, обеспечивают высокую производительность и долговечность. Горячее прессование металлических связок происходит в режимах, обеспечивающих минимальное разрушение зерен СТМ.

Рассмотрены все основные материалы для изготовления металлических связок (Co, Cu, Fe, Ni, W, WC, бронзы). Проведенный анализ литературных данных позволяет сделать вывод о том, что лучшим комплексом механических свойств и адгезией к зернам СТМ обладают связки на основе Co. Однако из-за его дефицитности представляется перспективным использование сплавов, в которых Co частично заменен на Cu, Fe и Ni.

В современной литературе подробно описано влияние различных легирующих добавок на механические свойства связок и эксплуатационные свойства инструментов на их основе. Повышение свойств, например, достигается за счет введения таких компонентов, как Sn, Cr, W. Альтернативным подходом к усовершенствованию механических свойств связок является их дисперсное упрочнение высокомолекулярными нанодисперсными частицами. Применение данного метода позволяет повысить эксплуатационные характеристики инструмента, лишь в незначительной степени изменяя технологическую схему его изготовления. В работах Зайцева А. А. подтверждена возможность эффективного упрочнения наночастицами WC и ZrO<sub>2</sub> кобальтовых и железных связок для алмазного инструмента. Однако не исследовано их влияние на механические свойства связок Cu-Fe-Co-Ni и производительность изготовленного на их основе инструмента, содержащего в рабочем слое в качестве абразивной составляющей cBN. Также является перспективным ранее не применявшийся при изготовлении инструментов подход, заключающийся в использовании в качестве модифицирующей добавки порошка hBN, который способствует уплотнению порошковых смесей при прессовании.

По результатам анализа литературы сформулированы направления исследований.

**Во второй главе** приведены характеристики исходных материалов (порошков связок и модифицирующих добавок), методики получения модифицированных связок, исследований их физико-механических свойств и испытаний режущего инструмента.

В качестве исходных материалов для связок были использованы порошки Next100 (сплав Cu-Fe-Co) и никеля марки ПНК-УТЗ со средним размером частиц  $d_{cp}$  5 и 10 мкм соответственно и

с содержанием примесей менее 1 %. Модифицирование проводили введением высокодисперсных добавок – нанопорошков WC и ZrO<sub>2</sub> (до 100 нм), порошков hBN ( $d_{cp} = 3$  мкм) и титана марки ПТОМ ( $d_{cp} = 10$  мкм). Для изготовления перлин и сегментов экспериментальных режущих инструментов были использованы алмазы и cBN фракции 40/50 меш. Смешивание порошков связок проводили в шаровой мельнице (ШМ) и в двухконусном смесителе с продолжительностью 60 минут. Введение модификаторов осуществляли смешиванием с порошками связки в ПЦМ марки «МПП-1» (ООО ТТД, Россия) с центробежным фактором 28 g в течение 3 минут.

Для получения механически легированных порошковых гранул с различной микроструктурой проводили обработку в высокоэнергетическом режиме (120 g) в ПЦМ марки «Активатор-2s» (ООО Машиностроительный завод "Активатор", Россия) с продолжительностью от 3 до 20 минут в атмосфере аргона. Соотношение масс размольных тел и порошка было постоянным.

Исследование влияния модифицирующих добавок на процессы уплотнения порошковых смесей проводили на универсальной сервогидравлической машине модели LF-100KN (Walter +Bai, Швейцария) в диапазоне давлений от 0,1 до 10 т/см<sup>2</sup>. Брикетирование образцов перед горячим прессованием проводилось на автоматическом прессе КР-35 фирмы Dr Fritsch с весовым дозированием при давлении 20 МПа.

Спекание спрессованных заготовок осуществлялось в вакуумной электропечи ВЭ-3-16 (ООО Фирма «Вак ЭТО», Россия) при температурах 750, 800, 850, 900 °С и выдержках 15, 30, 45, 60 минут. Горячее прессование предварительно брикетированных заготовок проводили в ЗАО «Кермет» на прессе DSP-475 («Dr. Fritsch», Австрия) при температуре 850 °С, давлении 3,5 МПа и выдержке при максимальной температуре 3 минуты.

Остаточная пористость компактных образцов связок и готовых алмазосодержащих сегментов и перлин определялась методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 25281-82 с помощью аналитических весов фирмы A&D (Япония). Твердость по Роквеллу компактных связок определялась на плоскопараллельных образцах с помощью твердомера Wolpert Rockwell Hardness Tester марки Wolpert 600 MRD (США) по шкале В (ГОСТ 20017-74). Определение предела прочности на изгиб проводили на универсальной сервогидравлической машине LF-100 фирмы «Walter + bai» (Швейцария) с внешним цифровым контроллером (EDC).

Структура и химический состав материалов изучались методами сканирующей электронной микроскопии с микрорентгеноспектральным анализом на микроскопе S-3400N (Hitachi), оснащенный рентгеновским энергодисперсионным спектрометром NORAN. Фазовый состав, размер областей когерентного рассеяния и значения микродеформации порошковых и компактных образцов определялись по рентгеновским спектрам, сделанным на рентгеновском автоматизированном дифрактометре ДРОН-3 с использованием монохроматического Co-K $\alpha$ -излучения. Исследования порошков с нанокристаллической структурой проводили с помощью

просвечивающего электронного микроскопа Titan 80-300 производства фирмы «FEI» (США). Исследование взаимодействия связки с зернами СТМ проводилось на установке для проведения локальной спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) с микроскопической приставкой на базе спектрометра TRIAX 552 (Jobin Yvon) и детектора CCD Spec-10, 2KBUV (2048x512) (Princeton Instruments).

Испытания отдельных перлин, содержащих СТМ, по резке стали проводились в ЗАО «Жермет» на экспериментальной установке. В ходе испытаний рассчитывались производительность и удельный ресурс перлин и было выбрано оптимальное соотношение алмазов и cBN в рабочем слое. Канатные пилы испытывали на установке для канатной резки Hydrostress BR-4 (Австрия) с гидравлической канатной системой SK-B и водяным охлаждением. По окончании экспериментов измерялся диаметр перлин и площадь реза, сделанного канатной пилой. Затем перлины снимали с каната и с помощью оптического микроскопа «Neophot-32» оценивалось состояние зерен СТМ в их рабочем слое (подсчитывалось количество целых, вырванных и разрушенных зерен). ОСК диаметром 500 мм и размерами сегментов 40x4,2x9 мм испытывались на мостовом отрезном станке «Алмаз-3» (Россия). Скорость вращения составляла 3000 об/мин, в ходе работы область контакта с обрабатываемым материалом также охлаждали водой. По окончании испытания измерялись средние значения высот сегментов и рассчитывалась площадь реза, сделанного ОСК.

**Третья глава** посвящена исследованию влияния содержания никеля на механические свойства базовой связки, выбору оптимального режима предварительной механической обработки порошка для получения материала с высокими механическими свойствами, изучению процессов модифицирования связки высокодисперсными частицами и легированию титаном.

Для определения оптимального содержания никеля в связке были исследованы механические свойства горячепрессованных образцов Cu-Fe-Co + X масс.% Ni (где X = 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75). Введение никеля, являющегося пластичным компонентом, приводит к почти линейному увеличению ударной вязкости связки и уменьшению ее твердости (Табл. 1).

В качестве базовой связки для режущих инструментов был выбран состав Cu-Fe-Co + 30 % Ni, так как при таком содержании Ni обеспечивается повышение ударной вязкости (в 2,5 раза) по сравнению с чистым сплавом Next100 при незначительном уменьшении прочности. Далее данный состав связки будет обозначен как «N».

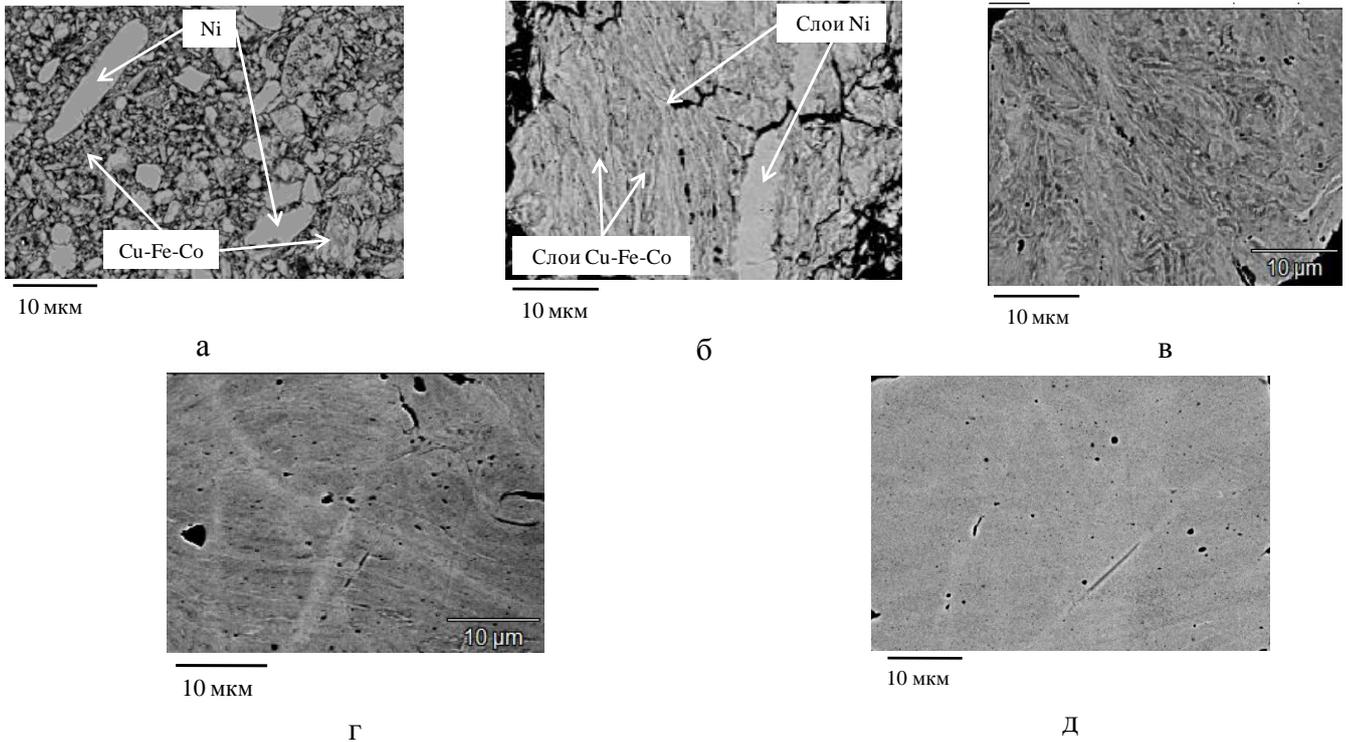
Для определения оптимальной микроструктуры гранул связки N проведена механическая обработка порошковых смесей в ШМ и ПЦМ в высокоэнергетическом режиме (120 г) с их последующим горячим прессованием. Критерием, по которому выбран вид микроструктуры (слоистая, гомогенная или с отдельными частицами сплава Cu-Fe-Co и Ni), были механические свойства горячепрессованных образцов.

Таблица 1 – Свойства горячепрессованных связок Cu-Fe-Co, легированных различными концентрациями никеля

Состав	Пористость, %	Твёрдость, HRB	Предел прочности при изгибе, МПа	Ударная вязкость, Дж/мм <sup>2</sup>
Cu-Fe-Co	3,8	100	1200±20	2,0±0,3
Cu-Fe-Co + 15 % Ni	3,6	98	1170±20	3,60±0,3
Cu-Fe-Co + 25 % Ni	2,4	96	1120±40	4,5±0,5
Cu-Fe-Co + 35 % Ni	3,5	93	1060±20	5,6±0,3
Cu-Fe-Co + 45 % Ni	2,8	89	1020±20	7,2±0,4
Cu-Fe-Co + 55 % Ni	2,6	84	950±40	8,8±0,7
Cu-Fe-Co + 65 % Ni	3,0	81	910±20	10,4±0,8
Cu-Fe-Co + 75 % Ni	4,8	75	850±20	12,5±1,7

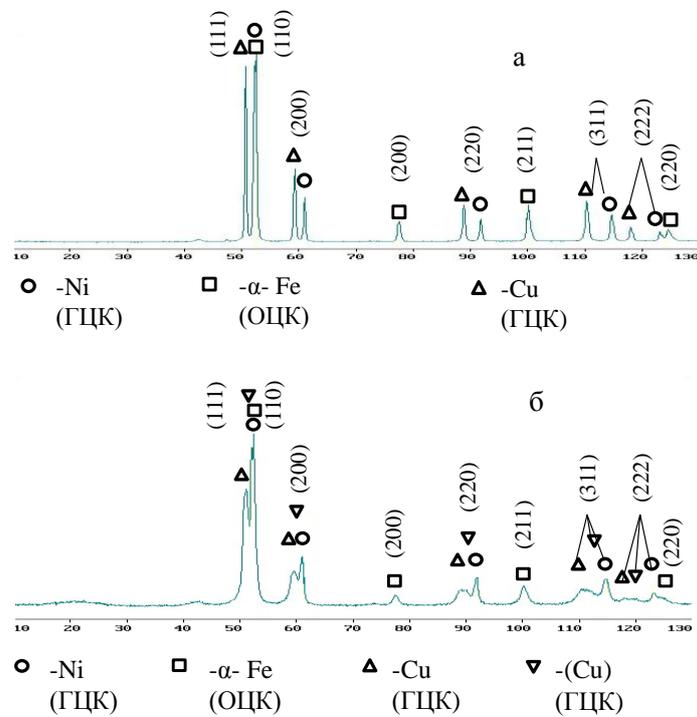
Порошковая смесь N, полученная в ШМ, характеризуется наличием отдельных частиц Ni и сплава Cu-Fe-Co (Рис. 1). Их форма и размеры практически не изменились во время смешивания. В процессе обработки порошков в ПЦМ происходит изменение их морфологии в результате пластического деформирования частиц и протекания процессов холодной сварки. При продолжительности процесса 3 минуты образуются композиционные гранулы со слоистой структурой. Толщина слоев может варьироваться от долей до нескольких мкм. Увеличение продолжительности обработки до 5 минут приводит к уменьшению масштаба гетерогенности структуры. После 10 минут обработки гранулы характеризовались гомогенной структурой. Дальнейшее увеличение продолжительности до 20 минут не привело к существенным структурным изменениям. Исследование методом ЭДС химического состава порошков N после 10 и 20 минут МЛ показало равномерное распределение элементов в объеме частиц.

Исследования, проведенные методом РФА (Рис. 2), показали, что после 3 минут обработки в ПЦМ происходит уменьшение размеров кристаллитов и механическое легирование (МЛ) компонентов Cu и Ni с образованием фазы твердого раствора (Cu), по параметрам кристаллической решетки близкого к меди (структурный тип cF4/1, период решетки  $a = 3,581 \text{ \AA}$ ). Увеличение продолжительности до 5 минут приводит к дальнейшему взаимному растворению компонентов с увеличением доли твердого раствора на основе меди. В тоже время часть никеля в количестве 20 % остается в виде самостоятельной фазы. После 10 минут обработки в ПЦМ в порошке присутствует только фаза (Cu). Дальнейшее увеличение продолжительности процесса до 20 минут не приводит к изменению фазового состава порошковой смеси, уменьшение ширины линий на дифрактограммах являлось следствием гомогенизации фазы (Cu) по химическому составу.



*а – порошковая смесь после смешивания в ШМ; б – 3 минуты МЛ в ПЦМ; в – 5 минут МЛ в ПЦМ; г – 10 минут МЛ в ПЦМ; д – 20 минут МЛ в ПЦМ.*

Рисунок 1 – Микроструктуры частиц исходной порошковой смеси и механически легированных порошков Cu-Fe-Co-Ni



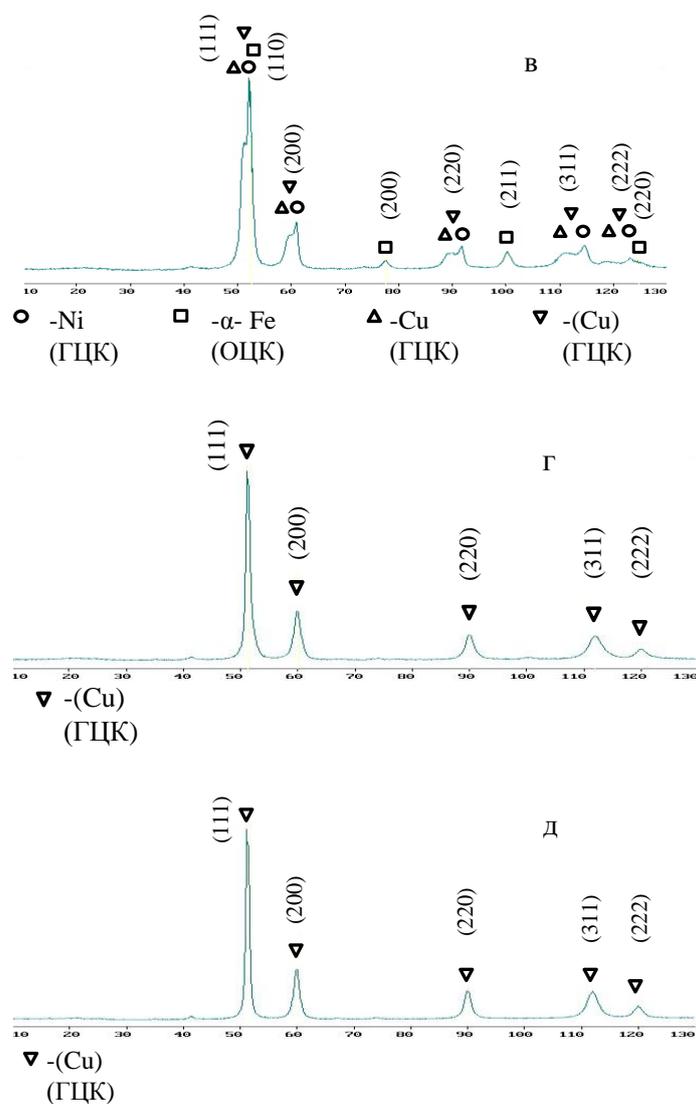
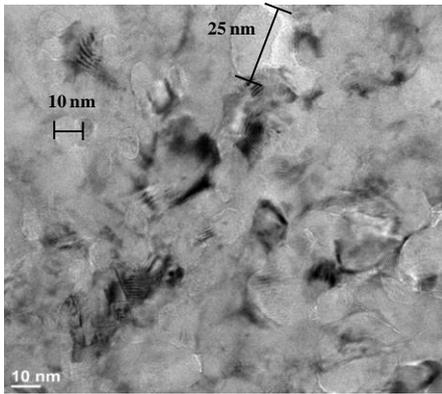
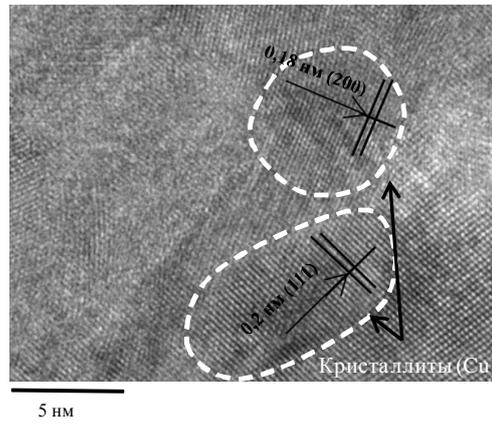


Рисунок 2 – Дифрактограммы порошков Cu-Fe-Co-Ni: – после смешивания в шаровой мельнице продолжительностью 60 минут (а); после обработки в ПЦМ продолжительностью 3 (б), 5 (в), 10 (г), 20 (д) минут

Исследованиями структуры методом микроскопии высокого разрешения установлено, что однофазные МЛ-порошки обладают нанокристаллической структурой (размер кристаллитов 10 – 30 нм) (Рис. 3 а). Значения измеренных межплоскостных расстояний кристаллической решетки, соответствующие фазе (Cu), соответствовали рассчитанным по формуле Вульфа-Брэгга для кристаллографических направлений (111) и (200) (Рис. 3 б).



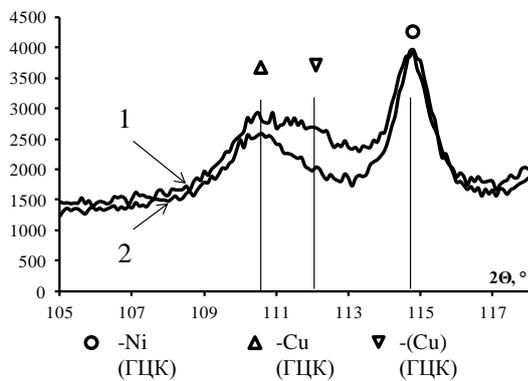
а



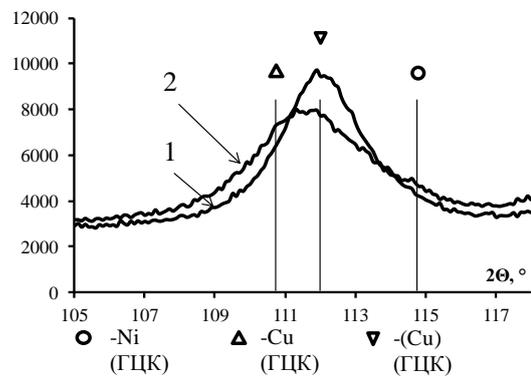
б

Рисунок 3 – ПЭМВР-микроструктура гранулы Cu-Fe-Co-Ni после 20 минут МЛ, снятая при увеличении  $\times 200000$  (а) и  $\times 1200000$  (б)

Добавка hBN замедляет процессы формирования однофазных композиционных гранул. Методом СЭМ установлено, что при обработке в ПЦМ частицы hBN измельчаются до 30-100 нм и блокируют поверхность порошков сплава Cu-Fe-Co и Ni, препятствуя развитию контактов между ними. Исследования фазового состава порошковых смесей N с добавкой hBN после обработки в ПЦМ в высокоэнергетическом режиме с различной продолжительностью показали, что данная добавка замедляет взаимодействие компонентов и образование пересыщенного твердого раствора на основе меди (Рис. 4). Методами СЭМ установлено, что после 10 минут МЛ в составе остается Ni (до 10 %), а фаза медного твердого раствора химически менее однородна, чем в смеси N после такой же продолжительности обработки, на что указывает большая ширина пиков данной фазы на дифрактограмме. Полное растворение никеля в твердом растворе меди и гомогенизация химического состава гранул происходит после 20 минут МЛ.



а



б

1 – порошковая смесь N; 2 – порошковая смесь N-hBN.

Рисунок 4 – Фрагменты дифрактограмм порошковых смесей после 3 (а) и 10 (б) минут обработки в ПЦМ (линии (311) фаз (Cu), Ni и Cu)

В процессе горячего прессования МЛ-порошков происходит концентрационное расслоение фазы (Cu) с образованием второй фазы, имеющей ГЦК-решетку и отличающейся по химическому составу от исходной – (Cu)' (Табл. 2). В структуре образцов, зафиксированы многочисленные нанопоры размером от 30 до 80 нм (Рис. 5), которые являются основной причиной низкой прочности данных материалов. Более высокая твердость объясняется лучшим сопротивлением фаз (Cu) и (Cu)' пластической деформации при индентировании в силу сильной искаженности их кристаллических решеток.

Таблица 2 – Химический состав фаз (Cu) и (Cu)'

Элемент	Фаза (Cu)	Фаза (Cu)'
	Концентрация, масс. %	Концентрация, масс. %
Cu	31	80
Fe	21	3
Co	18	2
Ni	30	15

Для образцов, полученных из порошковых смесей, приготовленных в ШМ, характерна низкопористая структура и самые высокие прочностные свойства (Табл. 3). Поэтому для изготовления связки режущего инструмента был выбран данный способ смешивания порошков Cu-Fe-Co и Ni (исключающий МЛ).

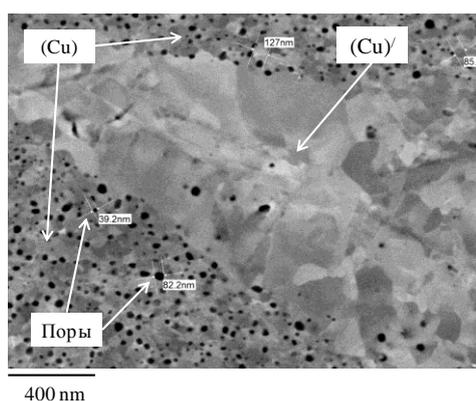


Рисунок 5 – Микроструктура горячепрессованного образца, изготовленного из механически легированного порошка Cu-Fe-Co-Ni.

Модифицирование связки N осуществлено за счет введения частиц WC, ZrO<sub>2</sub> и hBN. Для достижения равномерного распределения добавок в связке проводилось их смешивание с порошками Next100 и Ni в ПЦМ с центробежным фактором 28 g. Установлено, что равномерное распределения WC, ZrO<sub>2</sub> и hBN по объему порошка достигается после 3 минут такой обработки.

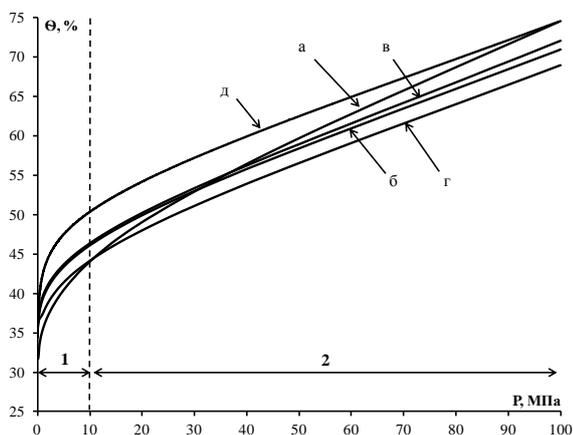
Таблица 3 – Физико-механические свойства связок N, изготовленных из порошков с различной структурой

Состав	Пористость, %	Твердость, HRB	Предел прочности при изгибе, МПа
N	2,5	95	1080±30
N (3 мин МЛ)	8,5	102	810±60
N (5 мин МЛ)	10,0	103	540±80
N (10 мин МЛ)	12,4	105	200±20
N (20 мин МЛ)	12,8	106	200±10

Для исследования влияния добавок WC, ZrO<sub>2</sub> и hBN на уплотняемость проведен ряд экспериментов по прессованию порошковых смесей. Для разделения эффектов влияния модификаторов и механической обработки порошка осуществляли прессование немодифицированной связки, приготовленной не только в ПЦМ, но и в двухконусном смесителе.

На стадии структурной деформации наименьшей относительной плотностью обладают порошки без модификаторов, приготовленные в двухконусном смесителе (Рис. 6). Все смеси, полученные в ПЦМ, характеризуются более интенсивным ростом относительной плотности от давления прессования, что связано с их меньшей шероховатостью. Лучшей уплотняемостью на стадии структурной деформации обладает смесь, содержащая hBN, так как данный компонент, являясь твердой смазкой, уменьшает межчастичное трение. На стадии упруго-пластической деформации интенсивнее всего проходит прессование смеси N, приготовленной в двухконусном смесителе. Порошки, предварительно обработанные в ПЦМ, хуже уплотнялись при прессовании на данной стадии. Таким образом, основной вклад в ухудшение прессуемости вносит механическая обработка порошка в ПЦМ, приводящая к его наклепу. Введение частиц WC, ZrO<sub>2</sub> и hBN не приводит к заметному изменению сопротивляемости порошка уплотнению.

Обработка порошковой смеси N в ПЦМ привела увеличению энергии активации спекания с 13 до 64 кДж/моль. Это является следствием более активного прохождения гетеродиффузионных процессов между исходными компонентами, в результате которых в образцах формируется диффузионная пористость. При спекании медь активно диффундирует из частиц сплава Cu–Fe–Co в зерна Ni. Субмикронные поры в матрице сплава Cu–Fe–Co образовались из-за разницы коэффициентов диффузии меди в никель и никеля в медь. Добавки наночастиц WC и ZrO<sub>2</sub> дополнительно увеличивают значение энергии активации (до 77 и 88 кДж/моль соответственно), так как являются диффузионным барьером при спекании.



1 – структурная деформация, 2 – упруго-пластическая деформация

Рисунок 6 – Зависимость относительной плотности от приложенного давления прессования образцов Cu-Fe-Co-Ni из порошков, смешанных в двухконусном смесителе (а) и в ПЦМ (б), в том числе с добавками WC (в), ZrO<sub>2</sub> (г) и hBN (д)

Анализ физико-механических свойств исходной и модифицированных связок N проводился на образцах, полученных горячим прессованием. Для каждого вида модификатора установлены оптимальные концентрации, при которых были получены компактные образцы с максимальными механическими свойствами (Табл. 4). Применение частиц WC и ZrO<sub>2</sub> в связке позволяет увеличить прочность до 100 МПа, твердость – на 4 – 7 HRB, что объясняется эффектом дисперсного упрочнения. Максимальный эффект обнаружен при введении 0,1 % hBN. В данном случае прочность возросла почти на 200 МПа, что объясняется низкой пористостью данных образцов.

Таблица 4 – Физико-механические свойства дисперсно-упрочненных связок

Состав (масс.%)	Пористость, %	Твердость, HRB	Предел прочности при изгибе, МПа
N	2,4	95	1080±30
N (ПЦМ)	5,4	96	1100±10
N-5,1% WC	5,0	99	1180±20
N-0,64%ZrO <sub>2</sub>	3,6	102	1160±50
N-0,1%hBN	3,0	102	1260±10

Порошок Ti вводился для увеличения адгезии между связкой и зёрнами СТМ. Выбор оптимальной концентрации Ti производился с учетом его влияния на механические свойства. При введении 1 % Ti в связку N прочность осталась на прежнем уровне, твердость повысилась на 5-6 HRB (Табл. 5). Добавка больших концентраций Ti привела к охрупчиванию материала. Методом РФА было установлено наличие фаз интерметаллидов в данных образцах, которые стали

причиной уменьшения прочности.

Таблица 5 – Характеристики связок Cu-Fe-Co-Ni с различным содержанием титана

Состав	Пористость, %	Твердость, HRB	Предел прочности на изгиб, МПа	Концентрация Ti <sub>2</sub> (Ni,Co,Fe), масс. %
N «0»	5,5	96	1100±10	-
N – 1 % Ti	5,2	102	1120±10	-
N – 3 % Ti	5,8	104	1050±20	1
N – 5 % Ti	5,6	105	990±10	1
N – 7 % Ti	5,7	105	930±10	2

Из-за низкой концентрации Ti и его высокой крупности возникает проблема его распределения в связке и повышения суммарной площади контакта с зернами СТМ. Для ее решения титан вводили в виде порошка, механически легированного с компонентами базовой связки. Было проведено МЛ титана отдельно с порошком никеля [Ni-Ti], с порошком Next100 [Next100-Ti] (с последующей дошихтовкой для получения состава N) и с порошковой смесью состава N [N-Ti]. Методами РФА и СЭМ установлено, что при МЛ в течение 10 минут Ti равномерно распределен во всех трех вариантах введения. Образцы из порошков [Ni-Ti] обладали лучшим сочетанием твердости и прочности (Табл. 6), поэтому в дальнейшем связку с титаном получали по данной методике.

Таблица 6 – Свойства связок Cu-Fe-Co-Ni, механически легированных титаном

Состав	Пористость, %	Твердость, HRB	Предел прочности на изгиб, МПа
Next100 + [Ni-Ti]	5,2	102	1010±30
[Next100-Ti]-Ni	7,0	104	800±100
[N-Ti]	12,0	105	200±10

Методом СЭМ были исследованы изломы сегментов на основе титансодержащей связки с алмазами и cBN. Обнаружено, что зерна СТМ были покрыты связкой. Исследования состава данных областей методом ЭДС показали высокое содержание титана, что позволило сделать вывод о его положительном влиянии на адгезию связки к алмазным зернам (Рис. 7).

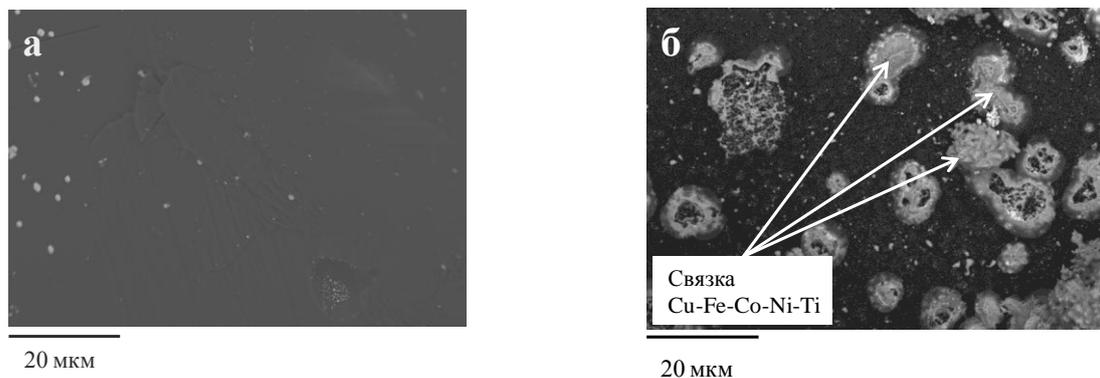


Рисунок 7 – Поверхность СТМ в сегментах со связками Cu-Fe-Co-Ni (а) и Cu-Fe-Co-Ni-Ti (б)

**В четвертой главе** описаны результаты экспериментов по оптимизации соотношения алмазов и cBN в рабочем слое инструмента, исследования характера взаимодействия связки и зерен СТМ, а также представлены результаты сравнительных испытаний канатных пил и ОСК при резке стали и чугуна соответственно.

Оптимизация концентрации алмазов и cBN в инструменте проводилась на отдельных перлинах канатных пил с соотношением СТМ (алмаз : cBN, масс. %): 100% алмазов, 3:1, 1:1, 1:3. Обрабатываемым материалом при испытаниях была сталь марки Ст3. Общее содержание СТМ было одинаковым – 20 об. %. Установлено, что зависимость производительности резки и удельного ресурса от доли cBN среди СТМ в инструменте имеет экстремальный характер (Рис. 8). Максимальные эксплуатационные характеристики получены при соотношении алмазов и cBN – 75 / 25. Одна из причин повышения производительности при замене алмазов на cBN – более прочное механическое зацепление зерен со связкой. Исходные порошки cBN характеризуются более сложной формой и высокой шероховатостью поверхности, чем алмазы, за счет чего лучше удерживаются в связке.

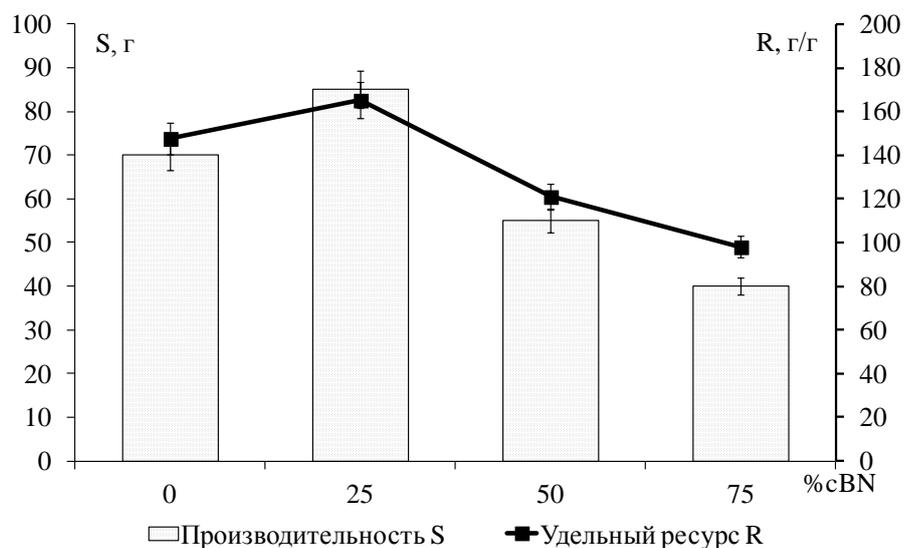


Рисунок 8 – Производительность и удельный ресурс перлин с различным соотношением алмазов и cBN при резке стали

Закрепление зерен cBN также происходит за счет химического взаимодействия со связкой. Методами оже-спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света установлено, что поверхность cBN на изломах сегментов покрыта тонким (около 2 нм) слоем металлов, присутствующих в связке. При наличии в связке добавки WC толщина таких слоев увеличивается.

При обработке стали алмазы подвергались химическому износу, из-за чего теряли режущие свойства в процессе эксплуатации инструмента. Зерна cBN разрушались хрупко, при их раскалывании формировались новые грани, расположенные под разными углами к обрабатываемому материалу. Поэтому резка стали происходит с большей производительностью при частичной замене алмазов на cBN. Однако установлено, что при увеличении доли cBN среди СТМ до 50 и 75 % наблюдается падение производительности резания и ресурса инструмента, что связано с разрушением зерен cBN вследствие их низкой прочности и заполировыванием рабочего слоя. Таким образом, было выбрано оптимальное соотношение алмазов и cBN – 3:1.

Сравнительные испытания канатных пил проводились для экспериментальных образцов со связками N, N - 5,1 % WC, N - 0,64 % ZrO<sub>2</sub> (соотношение алмазов и cBN – 3:1), а также пилы «Cedima» (Германия). Все инструменты имели одинаковую длину и количество перлин на погонный метр. По производительности все экспериментальные канатные пилы превосходят инструмент фирмы «Cedima» на 60 – 100 % (Рис. 9 а). Самая высокая производительность отмечена у канатной пилы N - 5,1 % WC – 1500 см<sup>2</sup>, что связано с лучшим удерживанием СТМ в данной связке. За время испытаний перлины на этих канатах уменьшились в диаметре на 0,4 – 0,5 мм. Потеря инструментами производительности резания связана с их заполировыванием. Перлины канатной пилы «Cedima» были полностью изношены. Для дальнейшего использования данный инструмент был непригоден, в то время как экспериментальными канатными пилами можно было продолжать обработку стали после перевскрытия рабочего слоя.

Испытания по резке чугуна проходили экспериментальные ОСК со связками из чистого порошка Next100, N, N – 0,64 % ZrO<sub>2</sub>, N – 0,1 % hBN, N – 1 % Ti, N – 1 % Ti – 5,1 % WC, а также ОСК Boomrad (Франция). Среди экспериментальных инструментов меньшей производительностью и удельным ресурсом обладал ОСК со связкой из порошка Next100 (Рис. 9 б). Сегменты данного состава были самыми хрупкими и частично откалывались в процессе резания, что связано с низкой ударной вязкостью сплава Next100. Легирование сплава Next100 никелем за счет повышения ударной вязкости позволяет увеличить срок службы и производительность ОСК. Введение модифицирующих частиц ZrO<sub>2</sub> и титана дополнительно повышает эксплуатационные характеристики инструмента. Добавка титана позволила увеличить способность связки к удерживанию СТМ, что было установлено исследованием поверхности сегментов после испытаний. Комплексное модифицирование связки высокодисперсными частицами (WC) и реакционно-активным компонентом (Ti) позволяет увеличить производительность и скорость резки инструмента (на 200 см<sup>2</sup> и 30 см<sup>2</sup>/ч соответственно) по

сравнению с ОСК со связкой, легированной только Ti. Лучшими эксплуатационными свойствами обладал ОСК со связкой N – 0,1 % hBN. Причиной этого является синергетический эффект от введения hBN как твердой смазки и модификатора механических свойств связки. Добавка hBN приводит к повышению способности связки к удержанию зерен СТМ, что подтвердилось анализом поверхности сегментов и отсутствием СТМ, вырванных из рабочего слоя. Также hBN в процессе резания уменьшает трение между инструментом и обрабатываемым материалом, что приводит к меньшему износу связки на границе раздела с зёрнами СТМ. ОСК марки «Boomrad» обладал самой низкой производительностью среди испытанных инструментов, что объяснялось низкой способностью связки данного инструмента к удерживанию алмазных зерен и быстрому заполировыванию рабочего слоя.

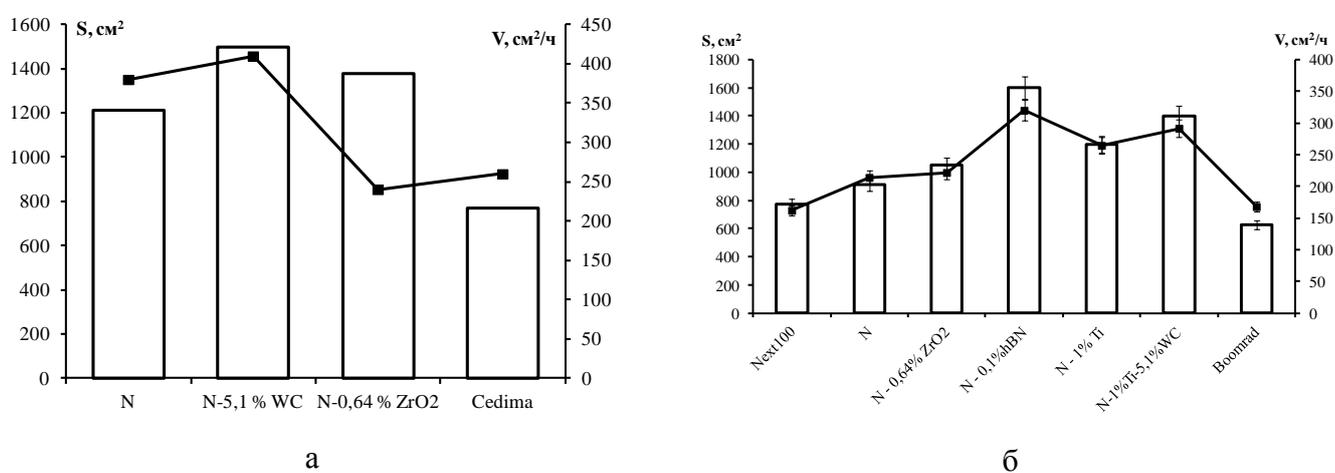


Рисунок 9 – Результаты испытаний канатных пил по резке стали марки Ст3 (а) и ОСК по резке чугуна марки СЧ20 (б)

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Разработаны новые составы связок в системе Cu-Fe-Co-Ni-Ti для режущих инструментов на основе СТМ. Определены оптимальные концентрации модифицирующих высокодисперсных частиц WC, ZrO<sub>2</sub> и hBN, что позволило увеличить твердость на 4-7 HRB и прочность на изгиб на 100-200 МПа.

2 Определена оптимальная концентрация и способ введения реакционно-активной добавки титана для получения связки с повышенными механическими свойствами и лучшей адгезионной прочностью удержания зерен СТМ. При концентрации легирующей добавки около 1 % твердость повышается на 5-6 HRB при неизменном значении прочности. Для обеспечения равномерного распределения титана в связке проводят предварительное механическое легирование титана с никелем.

3 Исследованы процессы механического легирования в системе Cu-Fe-Co-Ni, которые

показали возможность получения композиционных гранул с гомогенной однофазной структурой, состоящих из пересыщенного твердого раствора на основе меди. Описано влияние модифицирующих наночастиц на процесс механического легирования. Добавка hBN замедляет процесс формирования пересыщенного твердого раствора.

4 Установлено оптимальное соотношение алмазов и cBN, обеспечивающее максимальную производительность, удельный ресурс и скорость резки инструмента, предназначенного для обработки чугуна и стали.

5. Проведены сравнительные испытания канатных пил и ОСК с модифицированными высокодисперсными частицами связками. Показано, что канатные пилы со связками, модифицированными WC и ZrO<sub>2</sub>, обладают на 15-20 % большей производительностью по сравнению с пилами с базовой связкой N. При обработке резанием стали экспериментальные образцы канатных пил нового поколения превосходят по производительности и ресурсу лучшие отечественные и зарубежные аналоги. При обработке резанием чугуна введение модифицирующих частиц позволяет увеличить производительность и скорость резания до 2 раз. Наибольший эффект достигается при легировании связки титаном и hBN.

6 Разработаны технические условия на перлины канатных пил ТУ 3972-034-11301236-2014 и сегменты отрезных кругов ТУ 3972-035-11301236-2014, используемых в процессах резания сталей и чугунов, на основе СТМ с наномодифицированной связкой.

7 Осуществлено внедрение новых связок и технологических приемов их получения в серийное производство ЗАО «Кермет» (г. Москва).

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 П. А. Логинов, В. В. Курбаткина, Е. А. Левашов, В. Ю. Лопатин, А. А. Зайцев, Д. А. Сидоренко, С. И. Рупасов. Особенности влияния наномодифицирования на свойства связки Cu-Fe-Co-Ni для алмазного инструмента // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2014. – № 2. – С. 23 – 31.

2 Sidorenko D.A., Zaitsev A.A., Kirichenko A.N., Levashov E.A., Kurbatkina V.V., Loginov P.A., Rupasov S.I., Andreev V.A. Interaction of diamond grains with nanosized alloying agents in metal-matrix composites as studied by Raman spectroscopy // Diamond and Related Materials – 2013. – Vol. 38. – P. 59 – 62.

3 Андреев В.А, Гуреев А.И., Севастьянов П.И, Логинов В.И., Левашов Е.А., Логинов П.А., Рупасов С.И., Курбаткина В.В. Особенности влияния наномодифицирования и макроструктурирования на свойства связки Fe-Mo для алмазного инструмента // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2013. – № 3. – С. 82 – 86.

4 Логинов П.А., Зайцев А.А., Левашов Е.А., Курбаткина В.В., Рупасов С.И. Разработка

дисперсно-упрочненной наночастицами WC и ZrO<sub>2</sub> связки Cu-Fe-Co-Ni для режущего инструмента из сверхтвердых материалов // III Всероссийская молодёжная конференция с элементами научной школы «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества». Москва. 29 мая – 1 июня 2012 г. / Сборник материалов. – М:ИМЕТ РАН, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2012, 381 – 382 с.

5 Логинов П.А., Левашов Е.А., Курбаткина В.В., Зайцев А.А., Рупасов С.И., Андреев В.А. Структура и свойства дисперсно-упрочненного наночастицами порошкового металлматричного композита в системе Cu-Fe-Co-Ni // Труды международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов» (НФМ'2012), Санкт-Петербург, Россия, 27-29 июня 2012, с. 451 – 455.

6 Loginov P.A., Levashov E.A., Kurbatkina V.V. Microgranule structure evolution under mechanical alloying powder mixture Cu-Fe-Ni-Co as applied to new generation of diamond tool production // IV International Conference “Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies”, Novosibirsk, Russia, June 25-28, 2013, p. 66.

7 Sidorenko D.A., Zaitsev A.A., Levashov E.A., Kurbatkina V.V., Rupasov S.I., Loginov P.A., Andreev V.A. Application of mechanical activation in manufacturing process of diamond tool with nanomodified binders // IV International Conference “Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies”, Novosibirsk, Russia, June 25-28, 2013, p. 83.

8 Логинов П.А., Левашов Е.А., Курбаткина В.В., Зайцев А.А., Сидоренко Д.А. Рупасов С.И. Особенности прессования и спекания механически легированного жаростойкого сплава Cu-Fe-Co-Ni, дисперсно-упрочненного наночастицами WC и ZrO<sub>2</sub>. // III-я Всероссийская молодежная школа-конференция «Современные проблемы металловедения»: Сборник трудов, Пицунда, Абхазия, 10-13 сентября 2013 г., Изд. Дом МИСиС, 2013. – с. 112 – 123.

9 Логинов П.А., Левашов Е.А., Курбаткина В.В., Сидоренко Д.А. Разработка наномодифицированной связки на основе сплава Cu-Fe-Co-Ni для создания нового поколения режущего инструмента из сверхтвердых материалов // V Всероссийская конференция по наноматериалам «НАНО 2013». Звенигород, 23-27 сентября 2013 г., Сборник материалов. М: ИМЕТ РАН, 2013, с. 331 – 332.

10 Логинов П.А., Левашов Е.А., Курбаткина В.В., Сидоренко Д.А., Зайцев А.А. Разработка режущего инструмента на основе алмазов и кубического нитрида бора с наномодифицированной связкой Cu-Fe-Co-Ni. // Труды международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов» (НФМ'2014), Санкт-Петербург, Россия, 24-28 июня 2014, с. 279 – 285.

11 Левашов Е.А., Андреев В.А., Курбаткина В. В., Зайцев А. А., Сидоренко Д. А., Рупасов С. И., Логинов П.А., Севастьянов П.И. Связка на основе меди для изготовления режущего инструмента со сверхтвердым материалом // Патент РФ № 2487005; заявл. 10.02.2012; опубл.

10.07.2013, Бюл №19. – 7 с.

12 Левашов Е.А., Андреев В.А., Курбаткина В.В., Зайцев А.А., Сидоренко Д. А., Рупасов С. И., Логинов П.А., Севастьянов П.И. Связка на основе меди для изготовления режущего инструмента со сверхтвердым материалом // Патент РФ № 2487006; заявл. 10.02.2012; опубл. 10.07.2013, Бюл №19. – 6 с.

## ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертационную работу Логинова Павла Александровича по теме: «Разработка методов получения наномодифицированных металломатричных композиций для нового поколения режущего инструмента из сверхтвердых материалов», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы»

Логинов Павел Александрович поступил в «МИСиС» в 2006 г. и успешно освоил учебную программу по специальности 150108 «Порошковая металлургия, композиционные материалы, покрытия» на кафедре Порошковой металлургии и функциональных покрытий (ПМиФП). В 2011 году Логинов П.А. на «отлично» защитил дипломную работу по теме: «Разработка технологии и исследование свойств высокопористого материала из полых стеклянных микросфер» с присвоением квалификации «Инженер» по специальности «Порошковая металлургия, композиционные материалы, покрытия».

В 2011 году Логинов П.А. поступил в очную аспирантуру НИТУ «МИСиС» по специальности 05.16.06 «Порошковая металлургия и композиционные материалы», которую успешно окончил в 2014 г., сдав кандидатские экзамены (философию и иностранный язык на «отлично» и специальность на «хорошо») и подготовив диссертацию по теме: «Разработка методов получения наномодифицированных металломатричных композиций для нового поколения режущего инструмента из сверхтвердых материалов».

В период обучения в аспирантуре Логиновым П.А. были разработаны научные и технологические основы получения сегментов и перлин с дисперсно-упрочненной связкой для режущих инструментов, предназначенных для резания сталей и чугунов. Проведенные им комплексные исследования позволили усовершенствовать существующие связки Next100 на основе меди путем легирования никелем, упрочнения за счет введения наномодификаторов, а также повышения адгезионной способности благодаря добавке реакционно-активного по отношению к СТМ компонента. Логиновым П.А. была установлена оптимальная микроструктура порошковых гранул для изготовления связки и соотношение алмазов и кубического нитрида бора в рабочем слое, что позволило разработать инструмент с высокими служебными характеристиками.

Логинов П.А. зарекомендовал себя квалифицированным специалистом, способным самостоятельно решать различные научные и прикладные задачи. Им освоены многие теоретические и практические вопросы порошковой металлургии применительно к

получению дисперсно-упрочненных материалов, современные физико-химические методы исследования (рентгенофазовый анализ, оптическая и электронная микроскопия, исследования механических характеристик).

По тематике диссертации им опубликованы 3 статьи в журналах, входящих в базы Scopus, Web of Science и перечень ВАК. Он выступил с докладами по теме диссертации на 7 научных конференциях, является соавтором 2 патентов РФ.

Таким образом, Логинов Павел Александрович является сложившимся специалистом, имеющим все квалификационные признаки кандидата технических наук.

Считаю, что диссертационная работа Логинова Павла Александровича по теме: «Разработка методов получения наномодифицированных металломатричных композиций для нового поколения режущего инструмента из сверхтвердых материалов» соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а сам соискатель заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Научный руководитель

Заведующий кафедрой порошковой металлургии

и функциональных покрытий,

Директор Научно-учебного центра СВС

д.т.н., профессор

Е.А. Левашов

