

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Уфимский государственный авиационный технический
университет»

На правах рукописи



Большаков Борис Олегович

**МИКРОСТРУКТУРА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ
КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ С НАНОЧАСТИЦАМИ КЕРАМИКИ**

Специальность 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Смыслов А.М.

Уфа – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 К ВОПРОСУ О ТИПАХ И ОСОБЕННОСТЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ УПЛОТНЕНИЙ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПАРОВЫХ ТУРБИН, ПЕРСПЕКТИВАХ ИХ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ.....	11
1.1 Типы уплотнений, применяемых в проточной части паровых турбин отечественного и импортного производства.....	11
1.1.1 Лабиринтные уплотнения с сотовыми вставками.....	12
1.1.2 Щеточные уплотнения.....	16
1.1.3 Уплотнения, наносимые с использованием газотермического напыления порошковых материалов.....	21
1.2 Особенности эксплуатации различных типов уплотнений.....	25
1.3 Требования, предъявляемые к уплотнениям проточной части паровых турбин.....	31
1.4 Металломатричные композитные материалы и методы их получения.....	33
1.5 Постановка цели и задач исследования.....	38
ГЛАВА 2 ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ	40
2.1 Обоснование и выбор используемых материалов.....	40
2.2 Технология получения компактов.....	42
2.3 Оборудование и методика металлографических исследований.....	44
2.4 Методика определения среднего размера зерен.....	45
2.5 Оборудование и методика определения химического состава.....	45
2.6 Оборудование и методика проведения механических испытаний.....	46
2.7 Методика построения температурно-ресурсных зон.....	48
2.8 Методика определения объемной доли пор и наполнителя.....	49
2.9 Методика определения физических свойств исследуемых компактов....	49
2.10 Методика определения коэффициента трения и скорости износа материала компактов.....	49

ГЛАВА 3 МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПАКТОВ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ НИТРИДА БОРА.....	51
3.1 Влияние содержания нитрида бора на микроструктуру компактов.....	51
3.2 Влияние содержания нитрида бора на физико-механические свойства композитного материала.....	63
3.3 Влияние содержания нитрида бора на структуру изломов.....	67
3.4 Влияние усилия деформирования на формирование микроструктуры и свойств композитного материала.....	72
ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 3.....	77
ГЛАВА 4 ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА P _X 13M ₂ -VN.....	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 4.....	83
ГЛАВА 5 ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА РАЗРАБОТАННОГО НАНОСТРУКТУРНОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА P _X 13M ₂ -VN ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА.....	84
5.1 Температурно-ресурсные зоны эксплуатации разработанного наноструктурного композитного материала.....	84
5.2 Оценка коэффициента трения и скорость износа разработанного наноструктурного композитного материала.....	86
5.3 Влияние длительного термического воздействия на микроструктуру и свойства разработанного наноструктурного композитного материала.....	90
5.4 Опытно-промышленные испытания разработанного наноструктурного композитного материала.....	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 5.....	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	97
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	98
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	112

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы работы

Стремительное развитие науки и техники в XX веке привело к формированию множества высокотехнологичных и зачастую взаимосвязанных отраслей промышленности, основополагающую роль в которых занимает энергетика. Развитие энергетической отрасли в целом и энергомашиностроения в частности является основой независимости и экономической стабильности большинства государств. При этом особую роль в тяжелом машиностроении занимает производство паровых турбин для тепловых, атомных и электрических станций.

Известно, что эффективность, безопасность и экономичность работы паровых турбин на протяжении межремонтного интервала определяется не только конструктивными параметрами самого агрегата, но и как показывает практика эксплуатации, типами уплотнений между рабочими лопатками и статором турбины, их конструктивными особенностями и материалами исполнения.

В этой связи в научно-технической литературе появляется все большее количество работ, направленных на решение проблемы «холостого» перетекания рабочей среды между статорными и роторными частями цилиндров паровых турбин за счет усложнения конструкции уплотнений. Однако вопрос используемых материалов при их изготовлении остаются не до конца определенным.

Степень разработанности

Основное направление совершенствования уплотнений проточной части паровых турбин основано в первую очередь на анализе аэродинамического движения потока перегретого пара и, как следствие, направлено на разработку новых конструкций уплотнений, обеспечивающих эффективное снижение холостых протечек рабочей среды. При этом в основе этих разработок лежит использование хорошо известных и зарекомендовавших себя металлических материалов в различном конструктивном исполнении. Однако с учетом предъявления все более жестких и порой противоречивых требований к

уплотнениям, применение в их конструкции традиционных материалов становится все менее обоснованным.

Альтернативным направлением совершенствования является разработка новых материалов для изготовления уже существующих и активно применяемых конструкций уплотнений. Здесь основной задачей, на решение которой направлены усилия ученых, является формирование уникального сочетания физико-механических и функциональных свойств. Достижения последних лет отечественных и зарубежных научных коллективов позволяют выделить два основных подхода к формированию уникальных свойств конструкционных материалов: 1) наноструктурирование металлов и сплавов, 2) замена традиционных материалов на композиты с металлической или полимерной матрицей, упрочненных дисперсными частицами и волокнами.

Широко известно, что определяющую роль в формировании итоговых свойств наноструктурных материалов играют свойства границ раздела, такие как межфазные границы и границы зерен. Свойства таких границ существенно отличаются от свойств материала зерна, и, следовательно, чем мельче зерно, тем больше таких границ и тем большее их влияние на свойства объемного материала. Данный механизм управления свойствами материалов преимущественно используется при формировании уникальных прочностных свойств, что не приемлемо для материалов уплотнений.

Наряду с этим, в последнее время все больше прослеживается тенденция в использовании композитных материалов на металлической или полимерной основе, обладающих рядом преимуществ по физико-механическим свойствам по сравнению со свойствами матричного материала. Управление свойствами композитного материала происходит за счет направленного армирования матрицы высокопрочными и высокомодульными частицами или волокнами, что позволяет достигать высокой прочности при значительном снижении веса материала. При этом взаиморасположение армирующих элементов в микроструктуре может носить как хаотичный, так и упорядоченный характер, что позволяет управлять

анизотропией свойств объемного изделия. Однако основная масса работ в этом направлении также направлена на достижение высоких прочностных свойств.

Накопленный многолетний опыт эксплуатации различных типов уплотнений позволил определить основные требования к материалу их исполнения. Он должен обладать заданным комплексом физико-механических характеристик, обеспечивающим его безопасную стабильную продолжительную эксплуатацию, и высокую истираемость, т.е. способность локально разрушаться без трещинообразования при контактном воздействии со стороны ответных вращающихся частей турбины. Достижение такого сочетания свойств, используя традиционные подходы, не представляется возможным и реализуемо только лишь при синтезе знаний из различных областей материаловедения.

Цель и задачи работы

Разработать композитный материал для конструкций уплотнений паровых турбин на основе порошка коррозионностойкой стали, модифицированной наноразмерными частицами нитрида бора, обеспечивающих его улучшенную истираемость.

Для достижения поставленной цели в работе решались **следующие задачи:**

1) Сформировать композитный материал с различным содержанием наночастиц h-BN, используя методы порошковой металлургии.

2) Исследовать закономерности формирования микроструктуры композитного материала в зависимости от изменения компонентного состава исходной порошковой смеси.

3) Изучить физико-механические, эксплуатационные свойства наноструктурного композитного материала и механизм его разрушения в зависимости от изменения компонентного состава исходной порошковой смеси.

4) Определить температурно-ресурсные зоны эксплуатации разработанного наноструктурного композитного материала и изучить стабильность его структуры при длительном термическом воздействии.

Научная новизна

1. Выявлены закономерности формирования микроструктуры композитного материала от компонентного состава исходной порошковой шихты. Установлено, что введение мелкодисперсного порошка нитрида бора (h-BN) в исходную шихту при деформировании приводит к формированию по границам зерен композитного материала наноразмерных частиц h-BN, толщиной 8...300 нм.

2. Разработана феноменологическая модель, объясняющая механизм формирования наночастиц и протяженных зернограничных областей, заполненных нитридом бора в микроструктуре композитного материала.

3. Установлена взаимосвязь параметров микроструктуры композитного материала с эксплуатационными свойствами (истираемость). Улучшенная истираемость композитного материала достигается за счет увеличения содержания нитрида бора от 2 до 6 % в составе исходной порошковой смеси и обеспечивается вследствие формирования в объеме композитного материала наноразмерных частиц h-BN толщиной 8...300 нм как по границам, так и в теле зерен.

4. На основе построенных температурно-ресурсных зон работоспособности разработанного наноструктурного композитного материала установлен интервал эксплуатации от 20 до 650 °С, в котором подтверждена стабильность его микроструктуры и физико-механических свойств.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Закономерность формирования наноразмерных элементов структуры композитного материала в зависимости от компонентного состава исходной порошковой смеси.

2. Экспериментальные данные влияния наночастиц и протяженных зернограничных областей на физико-механические свойства наноструктурных композитных материалов для применения в конструкциях уплотнений проточной части паровых турбин.

3. Феноменологическая модель формирования наночастиц и протяженных зернограничных областей, заполненных нитридом бора, в структуре композитных

материалов на основе металлического порошка с добавками элементов с графитоподобной структурой.

4. Улучшенные эксплуатационные свойства (истираемость) и температурно-ресурсные зоны работоспособности разработанного наноструктурного композитного материала.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработан наноструктурный композитный материал с улучшенной истираемостью для применения в конструкциях уплотнений проточной части паровых турбин, представляющий собой композит на основе коррозионностойкой стали с наночастицами нитрида бора, расположенными по границам зерен.

2. Разработана феноменологическая модель формирования микроструктуры порошковых композитных материалов на металлической основе с добавками наноразмерных элементов с графитоподобной структурой, позволяющая расширить область их применения для различных типов паровых и стационарных газовых турбин.

3. Показано, что улучшенная истираемость наноструктурного композитного материала достигается за счет увеличения содержания нитрида бора от 2 до 6 % по массе в составе исходной порошковой смеси, которое препятствует диффузионному взаимодействию металлических частиц при спекании и обеспечивает при эксплуатации облегченный механизм их отрыва за счет расслаивания своего кристаллического строения без трещинообразования в объеме материала.

4. Установлены температурно-ресурсные зоны работоспособности разработанного наноструктурного композитного материала, позволяющие обоснованно выбирать его состав для конструкций уплотнений проточной части паровых турбин в зависимости от условий их эксплуатации.

Внедрение результатов работы

Результаты работы (разработанный композитный материал с наночастицами нитрида бора) внедрены в конструкцию надбандажных уплотнений паровых

турбин производства АО «Силовые машины» (г. Санкт Петербург) и в производственную деятельность ООО НПП "Уралавиаспецтехнология" (г. Уфа).

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается использованием современного аналитического оборудования, стандартизированных методик проведения испытаний, корректным применением положений физического материаловедения и подтверждается успешными модельными испытаниями на специальном стенде и в составе энергетической паровой установки.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» 2020, Уфа; Всероссийской зимней школе-семинаре аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники» 2020, Уфа; Открытой школе-конференции стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы (УМЗНМ) 2020», Уфа.

Личный вклад автора

Данная работа является законченным научным трудом, направленным на решении крупной народнохозяйственной проблемы – повышении безопасности, стабильности и экономичности эксплуатации паровых турбин. Автор принимал непосредственное участие в обсуждении и постановке задач, получении и анализе результатов, написании статей. Все экспериментальные результаты получены непосредственно автором или при его непосредственном участии.

Публикации

Результаты диссертационной работы изложены в 8 публикациях, из них 3 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, 3 статьи в журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science, 1 патент на изобретение РФ.

Работа проводилась в рамках Госзадания № 0838-2020-0006 «Фундаментальное исследование новых принципов создания перспективных электромеханических преобразователей энергии с характеристиками выше мирового уровня, с повышенной эффективностью и минимальными удельными

показателями, с использованием новых высокоэффективных электротехнических материалов»

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 112 страницах, содержит 54 рисунка, 4 таблицы, состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, списка литературы из 120 наименований.

ГЛАВА 1 К ВОПРОСУ О ТИПАХ И ОСОБЕННОСТЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ УПЛОТНЕНИЙ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПАРОВЫХ ТУРБИН, ПЕРСПЕКТИВАХ ИХ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

1.1 Типы уплотнений, применяемых в проточной части паровых турбин отечественного и импортного производства

Постоянно меняющаяся конъюнктура рынка обуславливает необходимость внедрения доступных и удовлетворяющих все более возрастающим потребностям решений в различных отраслях промышленности, в том числе и в паротурбиностроении. Проблемы экологии и разрастающийся экономический кризис послужили необходимой движущей силой для более активного применения передовых технологий при проектировании новых, энергоэффективных, экологически более чистых, и реновации уже введенных в эксплуатацию паровых турбин.

Известно [1-8], что одним из путей повышения надежности и внутреннего относительного коэффициента полезного действия (КПД) цилиндров низкого, среднего, высокого давления и турбоагрегата в целом является модернизация элементов проточной части, в т.ч. усовершенствование уплотнений.

По конструктивным особенностям уплотнения паровых турбин подразделяются на три группы: лабиринтные, графитно-угольные и гидравлические. В современных паровых турбинах отечественного и импортного производства наибольшее распространение нашли уплотнения лабиринтного типа, подробная классификация которых приведена в [9]. Выбор того или иного типа уплотнения производится из условия достижения минимальной протечки при заданных осевых и радиальных габаритах участка, отводимого под уплотнение, и при заданных определяющих размерах (осевом разбеге c и радиальном зазоре δ), обеспечивающих эксплуатационную надежность турбомашин [9].

Рассмотрим более подробно наиболее часто применяемые конструкции надбандажных уплотнений проточной части современных паровых турбин отечественного и импортного производства.

1.1.1 Лабиринтные уплотнения с сотовыми вставками

Традиционно, разработка и применение передовых технологий начинается в авиадвигателестроении. Пройдя немалый путь от инновационной идеи через все этапы проектирования, экспериментальной и технологической отработки, последующего конструктивного усовершенствования, полученные знания и технологии в авиадвигателестроении постепенно распространяются на газотурбинные двигатели (ГТД) наземного базирования и только потом находят применение в энергетических паровых турбинах [10].

Необходимость снижения холостых протечек рабочего тела, увеличение удельной тяги авиадвигателя с одновременным уменьшением его габаритов и массы обусловили разработку в 60-х...70-х годах прошлого столетия принципиально нового типа уплотнений, получивших название сотовые [4, 5, 11].

Сотовыми называются уплотнения, имеющие на одной из поверхностей сотовую «дорожку», т.е. ряды перегородок, образующих по окружности массив односторонне замкнутых ячеек (рисунок 1.1) [11].

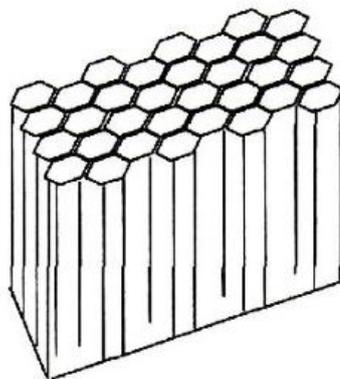


Рисунок 1.1 – Внешний вид ячеек сот в уплотнениях

Опыт эксплуатации сотовой конструкции уплотнений в авиадвигателестроении установил ряд их преимуществ по сравнению с полнотелыми типами лабиринтных уплотнений [12]:

- 1) имеют наибольшую прочность при минимальных затратах материала;

2) на переходных этапах работы и в случаях нестационарной работы турбоагрегата при задевании роторных частей о статор имеют площадь касания в 8,5 раз меньше, чем при их задевании о сплошную поверхность [12, 13];

3) позволяют обеспечить уменьшение радиального зазора, благодаря чему снижается уровень действующих на ротор аэродинамических сил.

Конструктивно, наибольшее распространение в турбиностроении получили сотовые уплотнения с четырехугольными и шестиугольными ячейками (рисунок 1.2) [12]. Для формирования ячеек сот применяют тонколистовые (толщиной от 0,03 до 0,3 мм) жаростойкие хромоникелевые стали и никелевые сплавы [14-16]. В зависимости от условий эксплуатации и типа агрегата диаметр вписываемой окружности в ячейку варьируется от 0,9 до 6,4 мм, а высота сот в поперечном сечении составляет не менее 4..5 мм [14, 15].

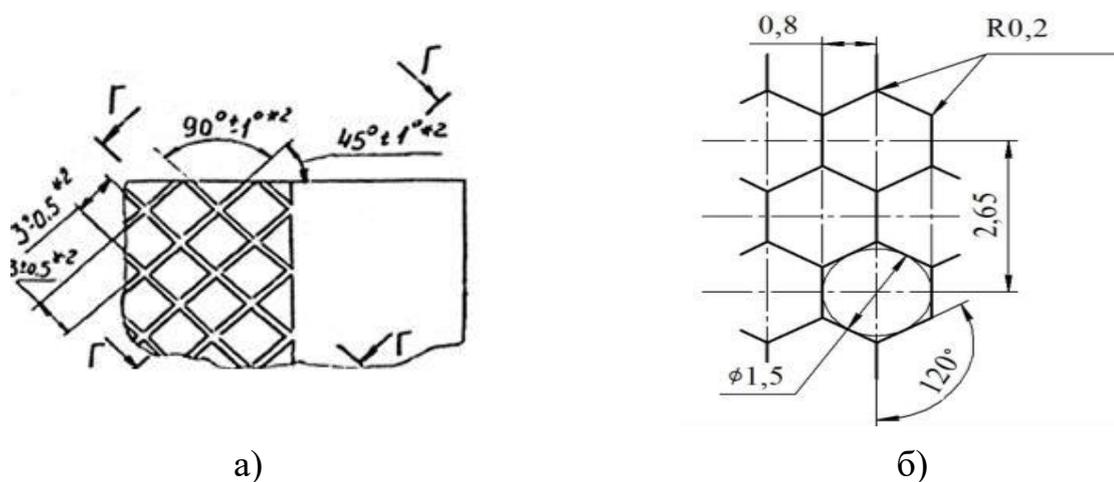


Рисунок 1.2 – Четырехугольные (а) и шестиугольные (б) ячейки сотовых уплотнений

Широкое разнообразие сотовых уплотнений по конструктивному признаку имеет вполне обоснованную научную теорию. В 80-х годах прошлого столетия в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова [17] открыли физический эффект интенсифицирования теплообмена потока за счет появления самоорганизующихся смерчьеобразных струй на поверхности с неглубокими лунками. Опытным путем авторы работы [17] установили причину роста энергии вихря (смерча), заключающуюся в поглощении мелких вихрей, порожденных трением вязкого

потока в последовательно расположенных лунках. Чем больше на пути потока расположено лунок, тем выше энергия потока.

Сущность процессов течения потока в сотовой поверхности существенно отличается от описанной выше [18-21]. В первую очередь это обусловлено большей высотой сотовых ячеек. Подробные исследования течения потока вдоль поверхности с глубокими выемками представлены в работе [18]. В соответствии с описанной в работе [18] моделью поток рабочей среды, оторвавшись от стенки над выемкой, присоединяется к стенке непосредственно за выемкой. При этом в самой выемке формируется автономный внутренний пограничный поток (завихрения). Аналогичные явления наблюдаются и в ячейках сотовой поверхности [19-21].

Результаты проведенных экспериментальных исследований на кафедре турбиностроения БГТУ [12] показывают, что изменение глубины, диаметра ячейки и величины радиального зазора приводит к различиям в механизме образования вихревой структуры в пространстве ячейки и оказывают значительное влияние на течение рабочей среды в зазоре, деформируя эпюру скоростей и углов потока в горизонтальной и меридиональной плоскостях, тем самым уменьшая холостые протечки через радиальный зазор.

Экспериментальные исследования на статических и динамических стендах кафедры турбиностроения БГТУ под руководством профессора Буглаева В.Т. показали необходимость оптимизации конструкции сотовых уплотнений на основе следующих критериев [12]:

- 1) форма ячейки сотового уплотнения;
- 2) геометрических размеров ячеек;
- 3) величины и формы радиального зазора;
- 4) особенностей конструктивных характеристик ступеней турбины;
- 5) режимных характеристик движения потока;
- 6) пульсационных явлений в сотовой структуре.

В настоящее время на отечественном рынке представлены сотовые уплотнения следующих предприятий – изготовителей и ремонтных организаций: ООО «СП «Демаг Делавал Пауэр Невский» (ООО «Невский»), ОАО «Уралтурбо»,

ООО «Брянский завод «Турборемонт», ООО НПП «АРМС», АО «Ротек» [14, 15, 22].

Впервые применение уплотнений с сотовыми вставками в конструкциях проточной части паровых турбин было предложено специалистами ФГУП НПП «Мотор» (г. Уфа) при модернизации турбины ПТ-30-90/18 Уфимской ТЭЦ-4 в 1994 году путем доработки конструкции цилиндра высокого давления (ЦВД) [4, 11, 23]. Полученные первые положительные результаты их применения позволили реализовать последующее внедрение сотовых уплотнений на ТЭЦ «Башкирэнерго», «Татэнерго», «Мосэнерго», «Саратовэнерго» и др. На текущий момент данным типом уплотнений оснащено свыше 200 турбин различной мощности.

Накопленный практический опыт эксплуатации модернизированных турбин позволяет сделать следующие основные положительные критерии их применения [11]:

- 1) применение сотовых уплотнений позволяет повысить среднеинтегральный КПД паровой турбины на 2,5...3% с сохранением достигнутых показателей на протяжении всего межремонтного интервала;
- 2) обеспечить стабильность параметров по ступеням цилиндра в течение межремонтного интервала;
- 3) уменьшение присоса пара и степени обводнения маслосистемы;
- 4) снижение затрат на ремонт самих уплотнений.

Кроме этого, проведенные стендовые испытания процесса контактного взаимодействия гребней лопаточного аппарата с поверхностью сотового уплотнения различной конструкции (испытывались сотовые блоки с диаметром вписываемой окружности в ячейки 0,9 мм, 1,1 мм, 1,5 мм) при различных условиях контакта (скорость вращения ротора изменялась в диапазоне 2...1600 об/мин) показали, что сотовый блок достаточно «мягкий» и легко прорезается при контакте с незначительным истиранием гребней лопаточного аппарата [24]. Следует отметить, что данные испытания проводились без подвода в зону контакта рабочей

среды – перегретого пара, температура которого в процессе эксплуатации турбины достигает 560 °С.

Несмотря на высокие темпы развития научно-технического прогресса, все большую автоматизацию производства, изготовление сотовых уплотнений является весьма сложным, дорогостоящим процессом, определяющим эффективность их дальнейшего применения. Анализ существующих способов их изготовления [25-34] показывает, что наиболее ответственной технологической операцией в производственной цепочке является высокотемпературная пайка сформированных сотовых ячеек к корпусу вставок. При этом известны два наиболее часто встречающихся дефекта [12]: формирование менее прочной взаимосвязи между ячейками и корпусом при использовании недостаточного количества припоя, и заполнение объема ячеек припоем при его чрезмерном количестве. Указанные технологические аспекты производства сотовых уплотнений, несомненно, отражаются при риск-ориентированном планировании деятельности предприятий-изготовителей и приводят к существенному удорожанию готовой продукции.

1.1.2 Щеточные уплотнения

Появление сотовых уплотнений в 60-х годах прошлого столетия позволило отечественным и зарубежным авиадвигательным предприятиям значительно уменьшить холостые протечки рабочей среды через радиальные зазоры между статорной и роторной частями, тем самым существенно повысить КПД двигателей. Однако вопросы повышения эффективности уплотнений остаются весьма актуальными и на сегодняшний день.

В качестве передового типа уплотнения в 60-х годах 20 века зарубежными исследователями был предложен принципиально новый тип контактного уплотнения, получивший название щеточное уплотнение [1-3, 10, 35].

Конструктивно простейшие щеточные уплотнения представляют собой круглое, сборное из сегментов кольцо, в котором между рабочей и опорной

пластинами запрессован или приварен пучок гибких металлических проволочек (рисунок 1.3). Сами проволочки обычно изготавливаются, в зависимости от предполагаемой температуры эксплуатации, из нержавеющей стали, никелевых или кобальтовых сплавов и имеют диаметр от 0,07 до 0,15 мм. Кроме этого, известны предложения [10] использовать в пучках не только металлические проволочки, но и волокна кевлара.

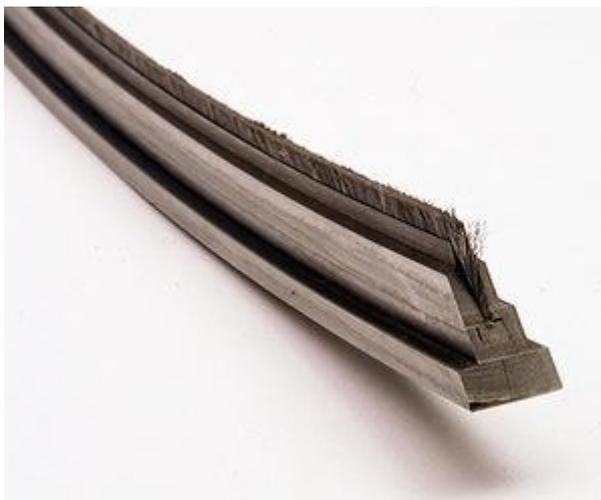


Рисунок 1.3 – Внешний вид простейшего сегмента щеточного уплотнения

Принцип работы щеточных уплотнений заключается в следующем: во-первых, так как это контактный тип уплотнений, минимизация радиальных зазоров происходит при монтаже за счет их установки с небольшой по величине силой натяга. При этом за счет упругих деформаций наблюдается незначительное увеличение расстояния между соседними проволочками. Во-вторых, в процессе разгона турбоагрегата и его последующего выхода на номинальный режим работы, вращение ротора обеспечивает упругие деформации проволочек по направлению действия окружных сил. В совокупности с постепенным увеличением давления рабочей среды происходит уплотнение пучка металлических проволочек, что в конечном итоге и обеспечивает уменьшение проницаемости уплотнения для рабочей среды [36, 37].

В первых щеточных уплотнениях пучок металлических волокон имел перпендикулярное расположение по отношению к ротору. Пример такой конструкции показан на рисунке 1.4. Однако проведенная серия испытаний

щеточных уплотнений такой конфигурации в условиях перепада рабочего давления, чередования пусков и остановов агрегата, выявили снижение КПД турбины уже после первого цикла испытания [38, 39]. По мнению авторов, данный факт связан с влиянием повышенных температур, сил и давлений на кончики металлических проволочек, приводящих к их деформированию.

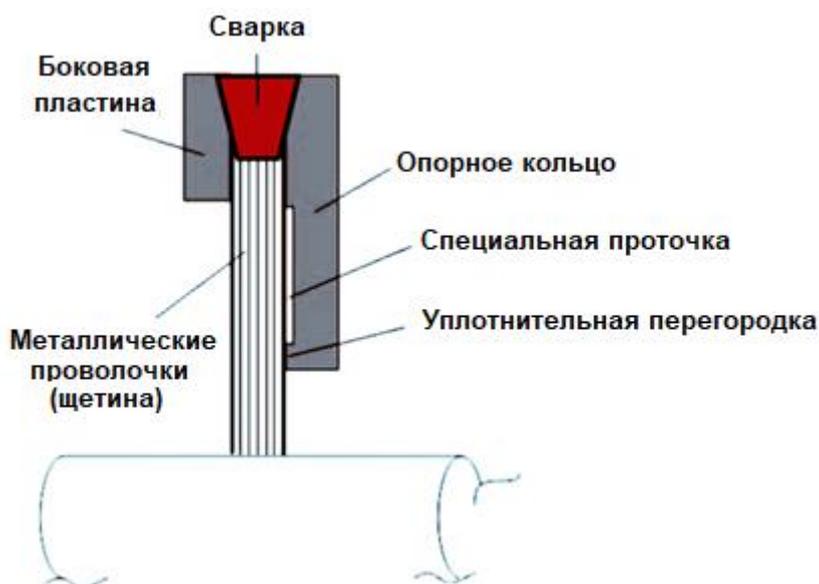


Рисунок 1.4 – Конструкция первых щеточных уплотнений

Вопросы оптимизации конструкции щеточных уплотнений подробно изучены в работах [40-43].

Основные результаты оптимизации можно разделить на две группы: конструктивные и технологические решения.

К технологическим следует отнести изменение угла наклона пучка металлических проволок до $45...55^\circ$ относительно сопрягаемой поверхности ротора в направлении его вращения (рисунок 1.5, угол наклона обозначен буквой В). При этом, благодаря своей эластичности металлические проволочки легко компенсируют осевые и радиальные перемещения ротора, возвращаясь в исходное положение, а существующий наклон значительно облегчает установку уплотнения. Проведенные в работе [44] сравнительные испытания классического лабиринтного и 2-х типов щеточного уплотнения (с перпендикулярным расположением металлических волокон и под углом 45° относительно поверхности ротора) в

составе компрессора двигателя серии УТ-700 показали, что применение щеточных уплотнений позволяет сократить удельный расход топлива на 3% и 5%, в зависимости от используемой конфигурации, соответственно.

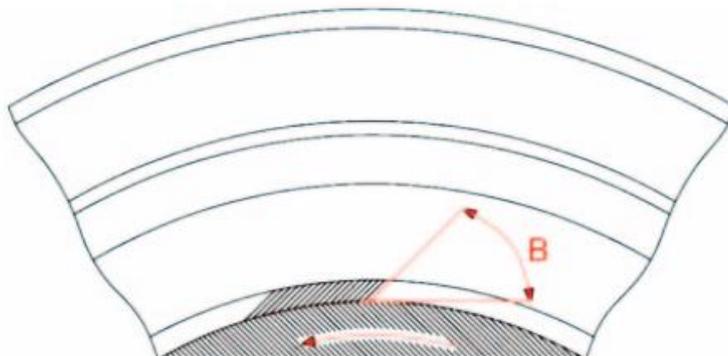


Рисунок 1.5 – Схематичный вид щеточных уплотнений с наклоненный по направлению вращения ротора пучка металлических проволочек

Конструктивные решения оптимизации щеточных уплотнений в своей основе были направлены на минимизацию возникающего гистерезиса пропускной способности щеточного уплотнения, вследствие деформирования кончиков металлических проволочек при их взаимодействии с ротором. К основным результатам этих работ можно отнести оптимизацию величины выступа опорного кольца относительно базовой поверхности, применение специальной проточки и уплотнительной перегородки на внутренней поверхности опорного кольца, придающие пучку проволочек дополнительную степень свободы при воздействии избыточного давления рабочей среды, что, как следствие, приводит к минимизации их разогрева при трении о ротор. Кроме этого, были предложены принципиально новые способы механического крепления металлических проволочек (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Схематичный вид щеточных уплотнений с механическим креплением пучка металлических проволочек

Первое промышленное использование щёточных уплотнений в конструкциях паровых турбин началось в 1990-е годы компанией General Electric. По результатам эксплуатации первых опытных турбин был определен ряд преимуществ щеточных уплотнений по сравнению с лабиринтными и сотовыми уплотнениями [10, 35]:

- 1) позволяют снизить до 80% уровень холостых протечек рабочей среды относительно лабиринтных типов уплотнений;
- 2) компактная конструкция позволяет значительно уменьшить размеры турбоагрегата и его вес;
- 3) компенсируют относительные радиальные и осевые смещения ротора на переходных режимах работы агрегата без снижения его производительности;
- 4) не вызывают дополнительных сил, оказывающих негативное влияние на стабильную работу ротора.

Одним из ключевых вопросов при проектировании щеточного уплотнения является правильный расчет радиального зазора между опорной пластиной и ротором. Величина этого зазора определяется с учетом особенностей работы турбины и физических свойств применяемых материалов. Во-первых, следует учитывать величину линейного расширения как роторных деталей, так и непосредственно самого уплотнения при выходе турбины на стационарный режим

работы. Во-вторых, следует учитывать повышенную вибрацию ротора при прохождении критических частот вращения, и возможный при этом контакт ротора об опорную пластину. Неправильно подобранный зазор может привести либо к преждевременному разрушению уплотнения, либо к увеличению холостых протечек и, как следствие, снижению КПД агрегата.

Щеточные уплотнения производят как специализированные предприятия (MTU, DM Energy, Arani Power Systems и другие), так и крупные производители турбин (Siemens, General Electric). Несмотря на массовый характер производства они остаются самым дорогим типом уплотнений.

1.1.3 Уплотнения, наносимые с использованием газотермического напыления порошковых материалов

Совершенствование турбомашин с целью повышения их экономичности, производительности и надежности имеет весьма богатую историю, на протяжении которой, в силу развития научно-технического прогресса и появления новых инновационных технологий, возникали весьма лаконичные решения. Своевременное появление первых лабиринтных полнотельных типов уплотнений, сотовых и щеточных конструкций уплотнений, удовлетворяли текущим потребностям того времени, но открывавшиеся особенности их эксплуатации определяли вектор дальнейшего развития технологии уплотнений. [45, 46].

Накопленный опыт эксплуатации турбин с различными типами уплотнений позволил сформулировать основное требование к уплотнениям следующего поколения – обеспечение сохранности роторных деталей при контактном взаимодействии. Реализация указанного требования возможна в двух случаях: 1 – изготовление уплотнений из менее прочных материалов, чем роторные детали; 2 – использование композитных материалов с низкой энергией сдвига.

Возможности применения металлов, обладающих низкой энергией сдвига (алюминий, серебро, кадмий, индий, цинк, медные сплавы), а также высокомолекулярных органических и неорганических химических соединений

подробно изучены в работах [47-49]. Обладая требуемым критериям «мягкости» при врезании, исследованные материалы имеют ограниченные температурные интервалы применения (не более 250 °С) и имеют тенденцию «налипать» на более твердые роторные детали, вызывая при этом ряд негативных явлений, таких как изменение профиля аэродинамического потока, повышенный местный износ и даже оплавление материала уплотнения, дисбалансировка ротора.

Активное развитие порошковой металлургии и появление технологий термического напыления порошковых материалов обусловили становление и развитие истираемых покрытий [50].

К наиболее распространенным методам нанесения истираемых покрытий относятся: газопламенное напыление, электродуговое напыление, высокоскоростное газопламенное напыление, холодное газодинамическое напыление и плазменный метод напыления. Описанные методы отличаются между собой как по температуре осаждаемого материала, так и по скорости напыления (рисунок 1.7).

Разнообразие доступных на сегодняшний день порошковых материалов позволяет разрабатывать составы истираемых покрытий для конкретных условий их эксплуатации. При этом, наряду с основным критерием повышенной истираемости, к материалу покрытий всегда предъявляются требования по стойкости к коррозионному, эрозионному воздействию и термоциклированию [50].

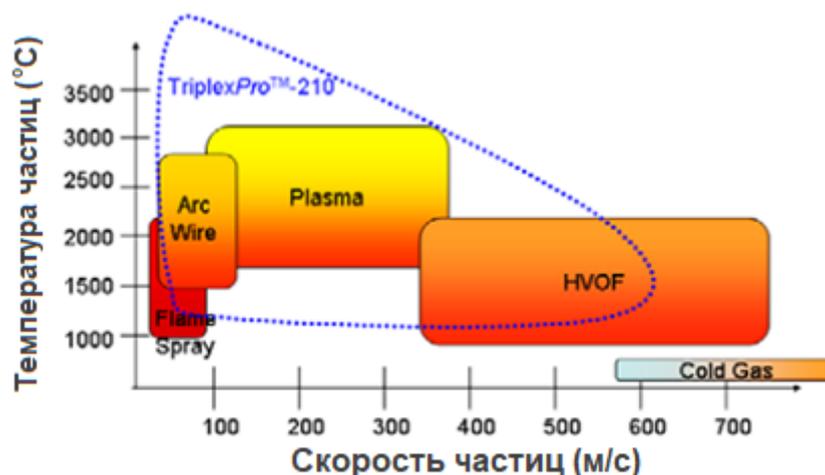


Рисунок 1.7 – Температурно-скоростные параметры различных видов термического напыления

Подробная классификация наиболее распространённых в мировой практике истираемых покрытий в зависимости от температуры их эксплуатации, твердости и характера контактного взаимодействия с материалом лопаток, представлена на рисунке 1.8.

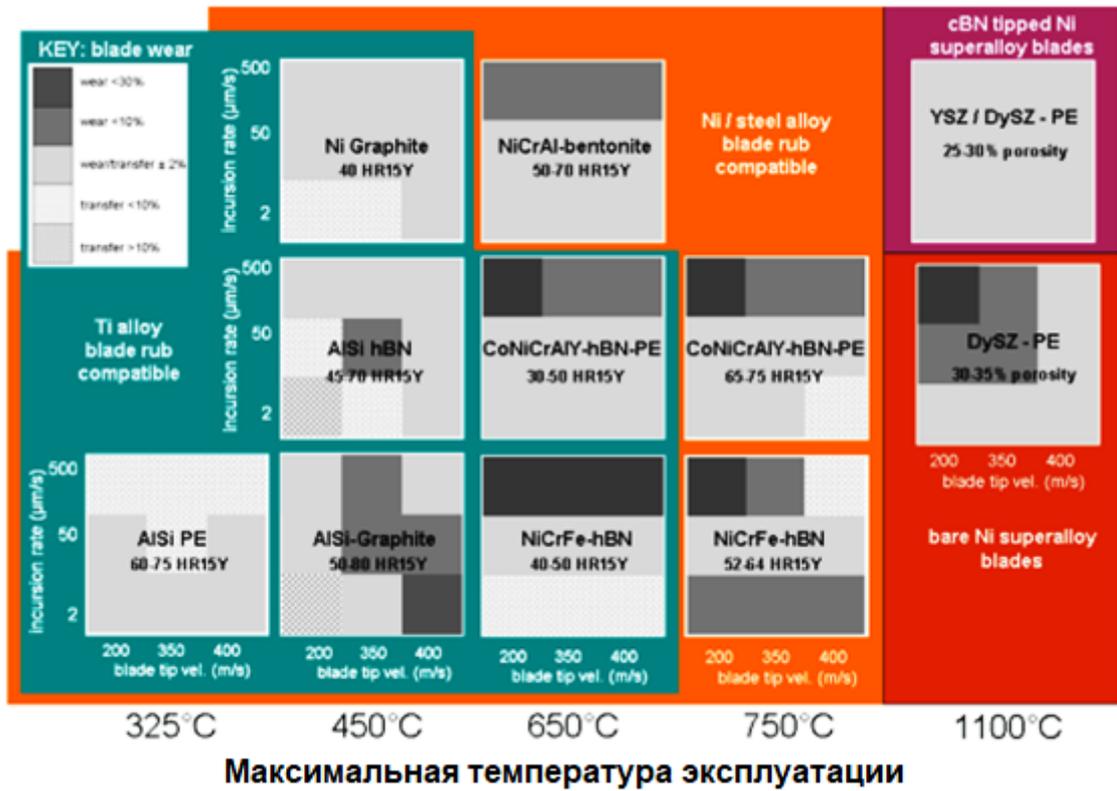


Рисунок 1.8 – Наиболее распространенные системы истираемых покрытий за рубежом

В России истираемые покрытия не получили особого распространения. В отечественной научно-технической литературе встречаются единичные публикации об использовании в газотурбинных двигателях покрытий на основе алюминия – АНБ (алюминий – нитрид бора), обладающих максимальной температурой эксплуатации, ограниченной 450 °С, медно-никелевой губки (20Б) – до 650 °С, никеля (УВС-2) и никель-кремниевой губки (КНА) – до 750 °С, и MeCrAlY – до 850 °С [4, 51, 52]. Активные разработки в этом направлении ведутся учеными ФГУП «ВИАМ», однако все они направлены на применение в турбинах высокого давления авиационных двигателей [52].

На рисунке 1.9 представлена типичная структура истираемого покрытия, наносимого с использованием газотермического напыления. В основе обеспечения

высоких свойств истираемости лежит сбалансированное сочетание структурно-фазовых компонентов: металлической матрицы, пористости, и наличия частиц второй фазы – «твердой смазки», к которой относят природные и синтетические кристаллические материалы с графитоподобной или слоистой структурой.

К основным преимуществам истираемых покрытий, помимо способности сохранять роторные детали при контактном взаимодействии, следует отнести:

- 1) отсутствие влияние на аэродинамический поток;
- 2) отсутствие необходимости проектирования и изготовления системы крепления на статорной части.

А к наиболее критическому недостатку – отсутствие возможности проведения оперативного ремонта без наличия специализированного оборудования и материалов.

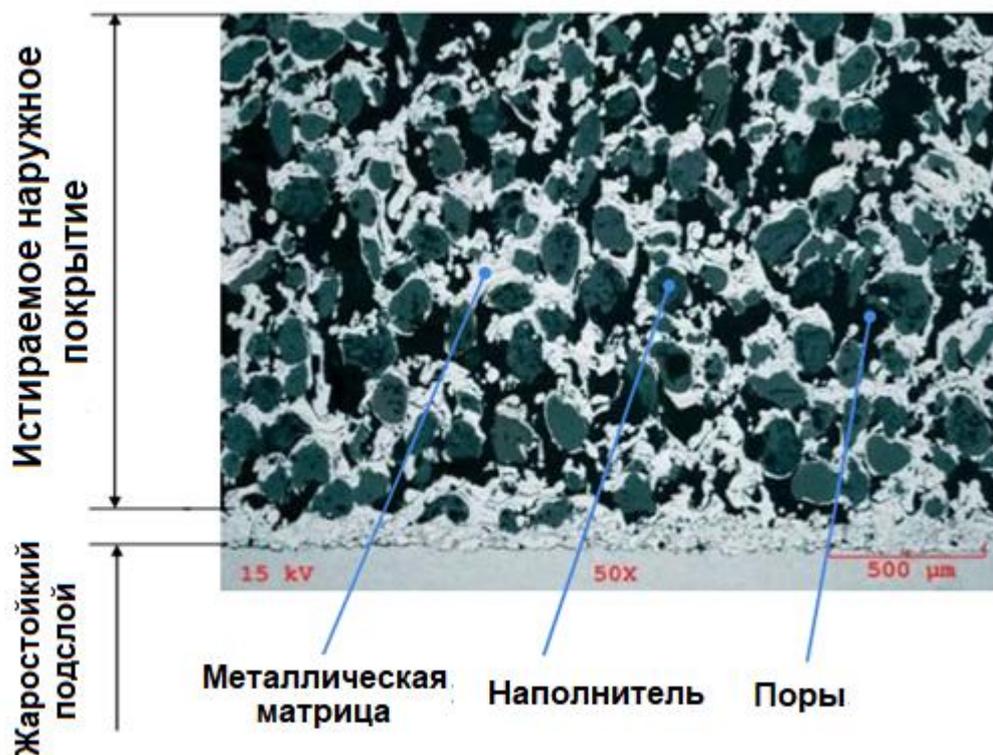


Рисунок 1.9 – Типичная структура истираемого покрытия

Признанными мировыми лидерами в области проектирования, нанесения истираемых покрытий и изготовления специализированного оборудования для газотермического напыления являются швейцарские компании Oerlikon Metco AG

и Sulzer Metco. Разработанные ими покрытия и технологии их нанесения используют ведущие мировые производители газотурбинного оборудования такие как General Electric, Siemens, Pratt and Whitney и другие.

Применение истираемых покрытий в конструкциях паровых турбин началось сравнительно недавно. В этой связи в научно-технической литературе отсутствуют сведения об особенностях их эксплуатации и влияния на основные показатели агрегатов в течении межремонтного интервала.

1.2 Особенности эксплуатации различных типов уплотнений

Стабильность, надежность и сохранность начальных показателей эффективности турбоагрегата на протяжении всего межремонтного интервала работы зависит не только от конструктивных параметров турбины в целом и условий ее эксплуатации, но и от способности сохранять свои свойства и эксплуатационные характеристики используемых при изготовлении различных узлов материалов. В особенности это касается конструктивных элементов турбины, к которым предъявляются особые требования, к числу которых относятся надбандажные уплотнения.

Надбандажные уплотнения проточной части паровых турбин работают в условиях одновременного воздействия повышенных температур, коррозионно-эрозионной среды, циклических напряжений от давления пара, периодического контактного воздействия со стороны роторных деталей при пусках и остановках агрегата и, как следствие, возникающих при этом вибраций при прохождении критических частот вращения ротора. Наряду с этими факторами, в процессе длительной эксплуатации турбин могут возникать дополнительные негативные явления, к примеру попадание в проточную часть крупных коррозионных отложений при плохой подготовке пара.

Рассматривать особенности длительной эксплуатации различных типов надбандажных уплотнений, применяемых в турбинах отечественного и

импортного производства, следует в тесной взаимосвязи с технологией их изготовления.

Анализ эффективности эксплуатации сотовых уплотнений в паровых турбинах представлен в работах [6-8, 11, 13, 16, 23, 24, 53, 54]. Наряду с положительными аспектами использования сотовых уплотнений в проточной части паровых турбин авторы работ [7, 8, 53] высказывают свои опасения в масштабности их использования, в особенности в агрегатах с сверхкритическими параметрами пара. В первую очередь, это связано с возникновением неконсервативных сил, вызывающих низкочастотную вибрацию валопровода, и как следствие, его дисбалансировку.

Кроме этого, в работах [7, 8] приводятся данные о возможном «закусывании» ротора в сотовом уплотнении. Причиной этого является термоупругий прогиб роторов, возникающий в результате его задевания об уплотнения в сочетании с одновременным изменением относительного расширения при остановах и происходящими деформациями цилиндров, усугубляющееся минимальными выставленными зазорами, в совокупности приводящими к невозможности преодоления двигателем валоповоротного устройства возникающего сопротивления.

Наряду с техническими проблемами, вызываемыми использованием сотовых уплотнений, в работах [8, 55, 56] приводятся сведения о тромбировании сотовых ячеек продуктами коррозии. В процессе длительной эксплуатации при плохой подготовке пара происходит постепенное коксование ячеек с увеличением жесткости и твердости конструкции уплотнения в целом. Внешний вид сотовых уплотнений с тромбированными ячейками представлен на рисунке 1.10. Подобные изменения сотовой конструкции, в случае соприкосновения гребешков лопаточного аппарата с уплотнением, вызывает повышенный разогрев и износ гребней лопаток, что в конечном итоге приводит к ряду негативных последствий: необходимости проведения ремонта дорогостоящих роторных деталей, снижению коэффициента полезного действия (КПД) агрегата, увеличению расхода топлива.

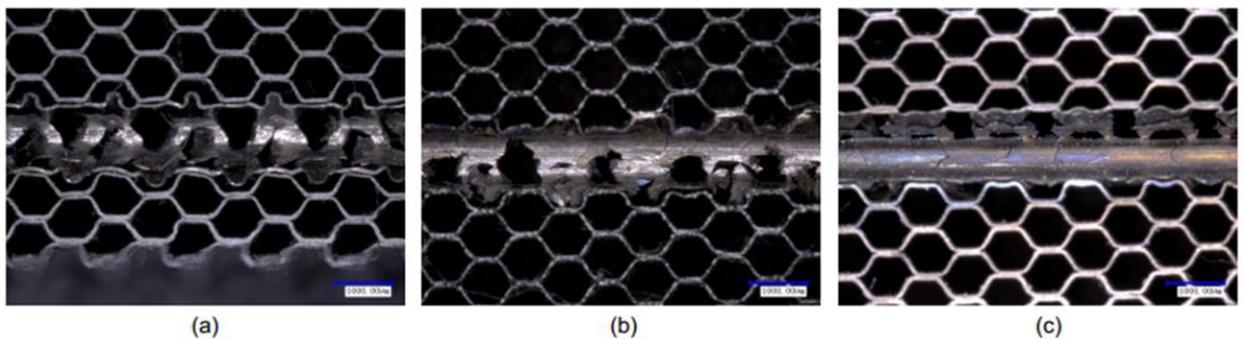


Рисунок 1.10 – Внешний вид сотового покрытия тромбированного продуктами коррозии

Следует отдельно отметить, что технология изготовления сотовых уплотнений достаточно сложна и сопряжена с необходимостью использования высокотемпературной вакуумной пайки, которая и является операцией, определяющей качество готовых уплотнений. Как отмечалось выше, известны два наиболее часто встречающихся дефекта при пайке [12]: формирование менее прочной взаимосвязи между ячейками и корпусом при использовании недостаточного количества припоя и заполнение объема ячеек припоем при его чрезмерном количестве. В первом случае при пуске агрегата и прохождении критических частот вращения валопровода в случае задевания лопаток об уплотнение произойдет отрыв и наматывание сотовых ячеек на гребни лопаток, во втором будут наблюдаться явления, аналогичные тромбированию ячеек.

Эффективность сотовых уплотнений при контактном взаимодействии с роторными деталями вызывает сомнение не только у отечественных ученых. Так, под руководством профессора Чжанга из Чжэцзянского университета (Ханчжоу, Китай) были проведены натурные испытания процесса контактного взаимодействия гребней лопаток с сотовыми уплотнениями при различных

условиях касания [57]. На рисунке 1.11 представлен внешний вид сотовой поверхности после касания гребней лопаток с различной скоростью вращения. По результатам проведенных испытаний авторы [57] отмечают, что в месте касания происходит не истирание сотовой поверхности, а ее смятие. Причем, чем выше скорость вращения гребней лопаток, тем глубже и шире «канавка». Несмотря на непродолжительное время касания (в эксперименте составляло всего 2 секунды) при увеличении скорости вращения гребней лопаток до 450 м/с наблюдается полное тромбирование ячеек материалом, из которого они изготовлены (рис. 1.11, с).



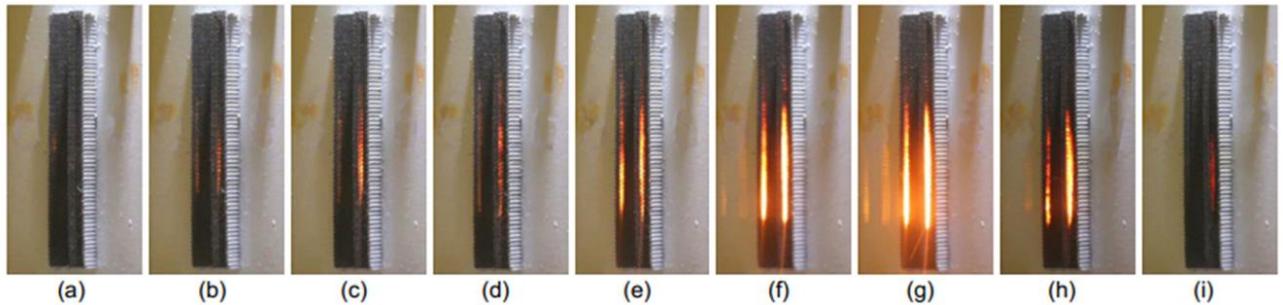
- a) – скорость вращения гребней лопаток 150 м/с;
- b) – скорость вращения гребней лопаток 300 м/с;
- c) – скорость вращения гребней лопаток 450 м/с.

Рисунок 1.11 – Внешний вид сотовой поверхности после касания гребней лопаток

Увеличение продолжительности времени контактного воздействия при скорости вращения гребней лопаток 450 м/с с 2 до 16 секунд приводит к значительному разогреву контактируемых поверхностей. Максимальная температура в зоне контакта наблюдается после 12 секунд контакта, после чего происходит ее постепенное снижение (рис. 1.12). Как отмечают авторы исследования, снижение связано со значительной выработкой сотовой поверхности, ее оплавлением и уменьшением площади соприкосновения [57].

Представленные результаты исследований и опытные данные об эксплуатации сотовых уплотнений в составе паровых турбин позволяют сделать

заклучение о нецелесообразности их унификации и необходимости тщательного подбора и оптимизации конструкции под конкретный тип и условия эксплуатации агрегата.



(a) $t=0$ s; (b) $t=2$ s; (c) $t=4$ s; (d) $t=6$ s; (e) $t=8$ s; (f) $t=10$ s; (g) $t=12$ s;
(h) $t=14$ s; (i) $t=16$ s

Рисунок 1.12 – Разогрев сотовой поверхности вместе контакта в процессе испытания

Широкое применение щеточных уплотнений началось в 80-х годах прошлого столетия. Однако их использование в качестве основного типа уплотнений в паровых турбинах началось сравнительно недавно. По этой причине на сегодняшний день в научно-технической литературе отсутствуют сведения об эффективности их эксплуатации в паровых турбинах.

Принимая во внимание идентичность конструкции и принцип работы щеточных уплотнений для паровых и газовых турбин, можно предположить, что и дефекты, возникающие в процессе длительной эксплуатации, будут иметь схожий характер. Дальнейшее рассмотрение вопроса эффективности работы щеточных уплотнений и возможных дефектов при эксплуатации будем рассматривать в контексте их применения в газовых турбинах.

Накопленный опыт эксплуатации щеточных уплотнений в газовых турбинах показал, что при недостаточном соблюдении рекомендаций по проектированию уплотнительных узлов с использованием данного типа уплотнений, в процессе длительной эксплуатации агрегатов могут наблюдаться повреждения не только самих уплотнений, но и ряда других узлов [58-68]. Щеточное уплотнение является контактным типом уплотнения, поэтому его типичные, часто наблюдаемые

повреждения связаны с упругой или пластической деформацией. С этой точки зрения в процессе эксплуатации при неправильном подборе радиальных зазоров могут наблюдаться следующие повреждения:

- повышенный износ отдельных щетинок или целых пучков;
- эрозионные повреждения щетинок;
- спаивание щетинок друг с другом вследствие значительного разогрева при трении;
- усталостный излом щетинок от постоянно действующих динамических нагрузок.

Описанные повреждения приводят к изменению свойств щеточных уплотнений и, как следствие, изменению технических показателей агрегата в целом. Кроме этого, известны случаи, когда преждевременное разрушение щетинок (их отрыв и попадание с потоком рабочей среды в другие узлы) приводило к повреждению подшипников валопровода.

Неправильный расчет радиального зазора может приводить не только к снижению КПД агрегата вследствие увеличения зазора, но и к значительной выработки гребней лопаточного аппарата при их касании об опорную пластину щеточных уплотнений, изгибу щетинок под действием потока рабочей среды, их преждевременной поломки и др.

Немаловажную роль для эффективности работы щеточных уплотнений играет правильный подбор материалов. К основным критериям при выборе материала относят прочность материала щетки (для обеспечения упругого возврата в течение всего периода эксплуатации) и стойкость к окислению. Неправильно подобранные по условиям эксплуатации материалы могут привести к катастрофическому разрушению уплотнения уже после первых 200 часов эксплуатации.

В целом, на эффективность эксплуатации щеточных уплотнений влияют три основных взаимосвязанных фактора: производственный, обоснованность конструкторских решений и правильный подбор материалов.

В силу этих факторов промышленные предприятия, занимающиеся изготовлением щеточных уплотнений, зачастую имеют огромный парк

испытательных стендов, позволяющих оценить эффективность работы щеточных уплотнений в конкретных условиях эксплуатации и своевременно (не только на этапе опытно-технологических работ, но и в серийном производстве) вносить необходимые конструктивные и технологические изменения.

Применение в качестве уплотнений проточной части паровых турбин покрытий, наносимых газотермическим способом принципиально новое направление, не имеющее не только статистики эффективности работы, но и массовости использования. Рассматривая возможные дефекты эксплуатации, из общих соображений можно выделить следующие узкие места:

- плохая подготовка поверхности статора под нанесение покрытия, вследствие чего под действием давления рабочей среды или возникающих в процессе работы вибраций может происходить частичное разрушение или даже полное отслаивание покрытия;

- чрезмерное количество открытых пор, что может приводить к их тромбированию коррозионными отложениями и, как следствие, увеличению твердости покрытия в целом;

- неправильный подбор состава покрытия, что может приводить либо к его неэффективности в заданных условиях эксплуатации, либо к повышенному износу гребней лопаточного аппарата.

В настоящее время известно множество различных типов уплотнений, обладающих каждый своими преимуществами и недостатками. И как показал анализ научно-технической литературы, совершенствование уплотнительных узлов является постоянно необходимой, крупной народнохозяйственной задачей, на решение которой направлено внимание ведущих мировых научных коллективов.

1.3 Требования, предъявляемые к уплотнениям проточной части паровых турбин

На сегодняшний день на рынке энергооборудования сложилась ситуация, когда производственные мощности предприятий-изготовителей значительно

превышают потребности рынка [68]. В этой связи произошло изменение основных показателей турбин с мощности и эффективности при некотором ограничении уровня стоимости к более сложным и комбинированным [68-70]. Не углубляясь в многоуровневые экономические расчеты, можно сделать заключение, что на сегодняшний день критерием привлекательности энергооборудования для покупателя является величина интегральной прибыли, которую он получит за определенный период владения оборудованием. На практике, с точки зрения производителя, это означает необходимость постоянного совершенствования конструкции турбины с целью снижения всевозможных издержек его последующего владения покупателем, в том числе и стремление достигнуть максимально возможный КПД агрегата. КПД паровых турбин, в свою очередь, напрямую зависит от суммарных потерь выработки электроэнергии, определяемых неэффективными холостыми протечками в проточной части рабочей среды. Следовательно, их сокращение посредством уменьшения радиального зазора между статором и ротором приведет к существенному приросту выработки электроэнергии при сохранении или даже снижении потребления топлива.

Уплотнения проточной части паровых турбин подвергаются одновременному тепловому и коррозионно-эрозионному воздействию рабочей среды и работают в достаточно сложных условиях статического и циклического нагружения от перепада давлений и удара струи. Одновременное воздействие нескольких из перечисленных факторов может приводить к потере функциональных свойств и даже преждевременному разрушению уплотнений. В этой связи к материалам уплотнений предъявляются жесткие требования по физико-механическим свойствам. Минимальные требования по физико-механическим свойствам, предъявляемые конструкторами специального конструкторского бюро «Турбина» (входит в состав АО «Силовые машины, г. Санкт-Петербург), приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Требования по физико-механическим свойствам материала уплотнений проточной части паровых турбин

Плотность, г/см ³	Твердость, НВ	σ_b^{600} , МПа (кгс/мм ²)	КС, кДж/м ² (кгс·м/см ²)	$\sigma_{изг}^{20}$, МПа (кгс/мм ²)	КТЛР (α) при 600 °С 10 ⁻⁶ /К ⁻¹
5,5...6,0	≤ 110	≥ 49 (5)	≤ 98,066 (1)	147...392 (15-40)	≤ 14

Наряду с этим, накопленный мировой опыт эксплуатации различных типов уплотнений позволяет сформулировать дополнительные требования к материалам уплотнений проточной части паровых турбин:

- с учетом условий работы, материал уплотнений должен обладать хорошей коррозионной и эрозионной стойкостью;
- обеспечивать безопасное врезание гребней лопаточного аппарата;
- иметь сплошную структуру с минимальным уровнем пористости.

Разработка материала, отвечающего всем вышеперечисленным требованиям, позволит не только повысить эффективность паровых турбин, но и обеспечить безопасность их эксплуатации при нестационарных режимах работы. Помимо этого, решение вопроса безопасного контакта гребней лопаточного аппарата об уплотнение значительно сократит расходы, связанные с проведением восстановительного ремонта и повысит конкурентоспособность отечественных паровых турбин на мировом рынке энергетического оборудования.

1.4 Металломатричные композитные материалы и методы их получения

Металломатричные композиты (ММК) – разновидность композитных материалов на металлической основе. Как и все композитные материалы, состоят не менее чем из двух химически и физически различных материалов, обеспечивающих в сочетании комплекс свойств, недостижимый в любом из материалов по отдельности.

Развитие и совершенствование технологии производства, постоянное снижение себестоимости готовых изделий из МКК позволяет использовать их не только в авиационной и космической отрасли, но и открывает перспективу применения в других отраслях промышленности.

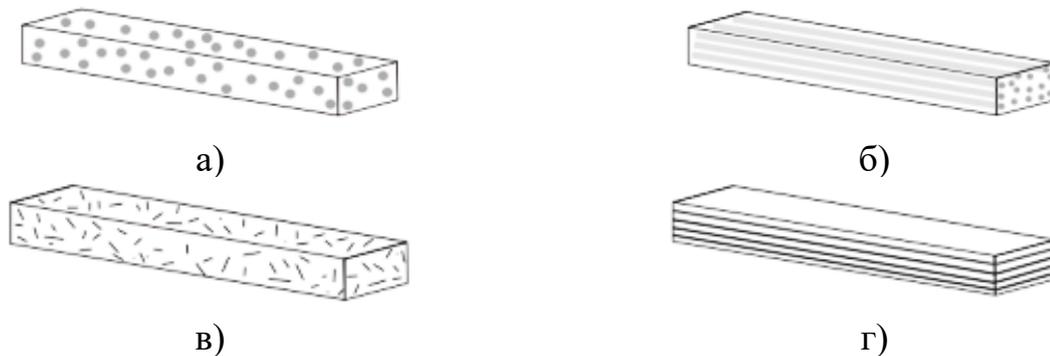
К основным преимуществам металломатричных композитов перед традиционными конструкционными материалами относят [71-73]:

- стабильностью размеров, т.е. формоустойчивость готовых деталей;
- сниженный вес за счет повышения удельной прочности;
- повышенное сопротивление ползучести;
- более высокий предел выносливости.

В зависимости от характера распределения упрочняющего компонента в матричном металле различают:

- 1) дисперсно-упрочненные ММК;
- 2) ММК, упрочненные нитевидными кристаллами или коротким волокном;
- 3) ММК, упрочненные длинными волокнами или дискретными пластинками;
- 4) слоисто упрочненные ММК.

На рисунке 1.13 представлено схематичное изображение армирования металломатричных композитных материалов различными частицами и волокнами.



а) – ММК, армированный частицами;

б) – ММК, армированный непрерывными волокнами;

в) – ММК, армированный нитевидными кристаллами;

г) – слоистый ММК.

Рисунок 1.13 – Различные виды ММК по типу армирования

Из представленных типов армирования, наибольшее применение нашли металломатричные композитные материалы, упрочненные дискретными волокнами. Они обладают рядом технологических и практических преимуществ:

- с точки зрения производственных затрат имеют наименьшую себестоимость изготовления;
- могут быть подвергнуты дополнительной термомеханической или деформационной обработке;
- в зависимости от материала матрицы имеют широкий температурный интервал работоспособности;
- не имеют анизотропии по механическим свойствам;
- устойчивы к износу.

Получение металломатричных композитных материалов возможно различными технологическими процессами, отличающимися производительностью, максимальными размерами формируемого композита и гомогенностью его микроструктуры. В общем случае все известные методы можно разделить на три основные группы: жидкофазные, твердофазные и гетерофазные методы, связанные с осаждением второй компоненты.

Жидкофазные методы.

Основаны на известных подходах в литье и предполагают плавление матричного материала без плавления упрочняющих компонентов. Данные методы относят к наиболее технологичным и экономически эффективным способам формирования ММК, позволяющим получать изделия конечной формы с большими размерами. Однако ему присущ ряд технологических недостатков, связанных с существенной разницей по физико-механическим и химическим свойствам используемых материалов:

- расплавы металлов имеют высокую температуру, вследствие чего при их контактировании с упрочняющими частицами и волокнами происходит химическое взаимодействие с образованием по границам раздела дополнительных охрупчивающих фаз;

- недостаточная смачиваемость и флотация, обусловленные различиями в плотности компонентов, затрудняют равномерное распределение упрочняющих частиц в объеме композитного материала.

В этой связи для более однородного распределения частиц в объеме МКК, наибольшее распространение нашли следующие технологические приемы: литье с перемешиванием, пропитка расплавом, пропитка расплавом под давлением, подробно описанные в работах [74-77].

Твердофазные методы.

Твердофазные методы получения МКК основаны на формировании взаимодействия поверхностных атомов металлической матрицы и упрочняющего компонента друг с другом посредством дополнительного энергетического вложения, в качестве которого может выступать тепловая энергия, упругая или пластическая деформация, ультразвуковые колебания и др. При этом подходе, немаловажную роль играет диспергирование, очистка поверхности компонентов и др.

Среди основных технологических подходов в твердофазном методе получения МКК выделяют диффузионное спекание (диффузионная сварка) и технологию порошковой металлургии.

Наибольшую применимость метод диффузионного спекания нашел при производстве консолидированные композитных материалов, армированных длинными волокнами. Данный метод заключается в формировании пакета последовательной укладкой слоями матричного материала и длинных волокон, который на заключительном этапе производства подвергается деформационно-термическому воздействию.

Методы порошковой металлургии.

Методы порошковой металлургии нашли широкое применение при производстве деталей конечной формы из керамических, металлических и металлокерамических материалов [78].

При нагреве порошковых материалов протекает комплекс разнообразных физико-химических процессов: изменение размеров, формы, микроструктуры и

свойств исходного материала, поверхностная, граничная и объемная само- и гетеродиффузия, различные химические реакции, релаксация микро и макронапряжений, полигонизация, рекристаллизация и множество других процессов [78-80].

В зависимости от температуры выделяют следующие стадии (процессы) спекания [79]:

1. Нагрев до температуры 0.1-0.3 от температуры плавления ($T_{пл}$) приводит к увеличению площади контакта частиц матричного материала с образованием первичной взаимосвязи (перемычек спекания и т.д.). При этом форма и размеры прессованной заготовки остаются неизменными.

2. При увеличении температуры до 0.4-0.5 от $T_{пл}$ начинаются процессы рекристаллизации, происходит снижение уровня замкнутых пор. Происходит постепенное увеличение плотности материала с незначительным уменьшением геометрических размеров заготовки.

3. При температуре 0.7-0.9 $T_{пл}$ активно протекают процессы собирательной рекристаллизации, происходит уменьшение количества и объема изолированных пор и увеличение плотности материала.

Следует отдельно отметить, что в процессе нагрева сложнолегированных или многокомпонентных порошковых смесей до предплавильных температур ($0.9 T_{пл}$) возможно появление жидкой фазы, оказывающей значительное влияние на закономерности спекания и свойства материала.

Технология твердофазного спекания широко используется при производстве металлматричных композитных триботехнических материалов армированных дисперсными частицами соединений, относящихся к категории твердой смазки (MoS_2 , BaF_2 , CaF_2 , h-BN и другие) [81-88]. В этих работах показано, что равномерность распределения частиц вторых фаз в сформированных композитных материалах обеспечивается специальной подготовкой исходной порошковой смеси и тщательным ее перемешиванием. Сформированные композиты обладают однородной микроструктурой, а с точки зрения сформированного комплекса свойств имеют сниженные коэффициенты трения и скорость износа, что

обуславливает возможность их применения в парах трения, например, в подшипниках.

Наряду с этими известны и другие, более сложные методы получения металломатричных композитов. К их числу относят методы осаждения [89, 90], «in-situ» методы [91-95] и ударно-волновое компактирование [96-103]. Несмотря на однородность формирования микроструктуры и свойств, все эти методы в настоящее время не способны обеспечить требуемые для промышленности объемы производства.

1.5 Постановка цели и задач исследования

Анализ научно-технической литературы показал, что известные типы уплотнений, применяющиеся в паровых турбинах, имеют как положительные, так и отрицательные показатели эксплуатации. Главным образом, они не обеспечивают безопасное контактное взаимодействие с роторными деталями при нестационарных режимах работы тубоагрегата. В этой связи, совершенствование уплотнений проточной части паровых турбин является весьма актуальной задачей турбиностроительной отрасли.

Практика эксплуатации разработанных новых конструкций уплотнений с использованием традиционных материалов не принесла искомого результата, следовательно, дальнейшее развитие технологии уплотнений должно быть направлено в сторону применения в уже существующих конструкциях принципиально новых материалов, полученных с использованием передовых достижений в науке и технологии.

Современные тренды развития конструкционных материалов для различных отраслей промышленности представлены двумя основными направлениями: наноматериалы и композитные материалы на полимерной и металлической основе. При этом большинство исследований в этих направлениях ориентированы на формировании высокой прочности материалов, что применительно к материалу уплотнений не приемлемо. Однако открытые закономерности и явления,

протекающие в границах раздела как в наноматериалах, так и в композитных материалах являются необходимыми научными предпосылками для создания принципиально новых, легко истираемых материалов.

Исходя из этого была сформулирована **цель данной работы** - разработать композитный материал для конструкций уплотнений паровых турбин на основе порошка коррозионностойкой стали, модифицированной наноразмерными частицами нитрида бора, обеспечивающих его улучшенную истираемость.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1) Сформировать композитный материал с различным содержанием наночастиц h-BN, используя методы порошковой металлургии.

2) Исследовать закономерности формирования микроструктуры композитного материала в зависимости от изменения компонентного состава исходной порошковой смеси.

3) Изучить физико-механические, эксплуатационные свойства наноструктурного композитного материала и механизм его разрушения в зависимости от изменения компонентного состава исходной порошковой смеси.

4) Определить температурно-ресурсные зоны эксплуатации разработанного наноструктурного композитного материала и изучить стабильность его структуры при длительном термическом воздействии.

ГЛАВА 2 ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Обоснование и выбор используемых материалов

Как было отмечено выше, уплотнения проточной части паровых турбин подвергаются одновременному тепловому и коррозионно-эрозионному воздействию рабочей среды и работают в достаточно сложных условиях статического и циклического нагружения от перепада давлений и удара струи. В этой связи материал основы разрабатываемого композитного уплотнения, помимо достаточного уровня физико-механических характеристик, определяемого типом турбины и ее расходными характеристиками, должен обладать хорошей коррозионной стойкостью и стабильностью структурно-фазового состава до температур, превышающих предполагаемые температуры его эксплуатации. Кроме этого, еще одно основополагающее требование к материалу уплотнения вытекает из конструктивных особенностей, а именно, условия формирования неразъемного сопряжения уплотнения и обоймы диафрагмы, вследствие чего коэффициенты линейного термического расширения используемых материалов должны быть сопоставимы.

С учетом требований [104, 105], регламентирующих применение в качестве материала диафрагм коррозионностойкой стали типа 08X13, и требований [9] recommending использование стали типа 08X18H10T для изготовления уплотнений с рабочей температурой до 650 °С, в качестве материала основы разрабатываемого композитного уплотнения, был выбран порошок коррозионностойкой стали Fe-13%Cr-2%Mo с фракционностью от 10 до 60 мкм полученный в соответствии с ГОСТ 13084-84. Внешний вид используемого металлического порошка представлен на рисунке 2.1.

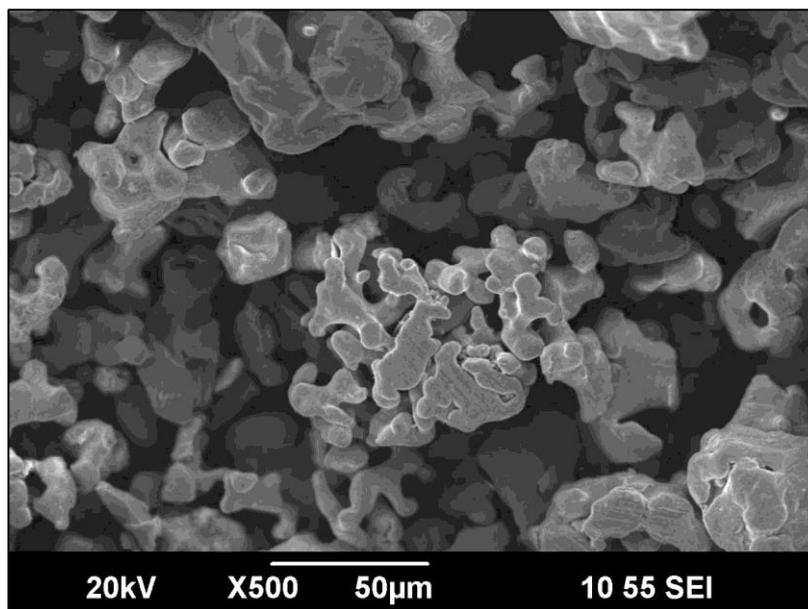


Рисунок 2.1 – Внешний вид исходного порошка коррозионностойкой стали Fe-13%Cr-2%Mo (РЭМ)

Ранее отмечалось, что обеспечение улучшенного комплекса трибологических характеристик при производстве деталей методом порошковой металлургии достигается за счет введения в состав порошковых материалов элементов «твердой смазки» к которым относятся синтетические и природные кристаллические материалы с графитоподобной структурой. Наиболее распространенными элементами данной группы материалов являются графит, MoS_2 , BaF_2 , CaF_2 , h-BN, вермикулит, флогопит и другие [81-88]. Однако, в силу особенностей кристаллического строения, материалы с графитоподобной структурой нестабильны при нагреве: деструктурируются вследствие взаимодействия с различными химическими элементами с образованием новых соединений. Так, максимальная температура нагрева графита в воздушной атмосфере ограничена $350\text{ }^\circ\text{C}$, дисульфида молибдена – $400\text{ }^\circ\text{C}$, фторидов – $450\text{ }^\circ\text{C}$.

Максимальная рабочая температура надбандажных уплотнений в современных паровых турбинах составляет $560\text{ }^\circ\text{C}$. С учетом этого, в качестве второго компонента шихты, обеспечивающего снижение коэффициента трения и требуемые показатели истираемости, был выбран мелкодисперсный порошок гексагонального нитрида бора BN, полученный по ТУ.У 26.8-00222226-007-2003.

Внешний вид частиц нитрида бора представлен на рисунке 2.2. Частицы нитрида бора в исходном состоянии имеют хлопьевидную форму с диаметральным размером, варьирующимся в диапазоне от 1 до 8 мкм, и толщиной от 0,2 до 1 мкм.

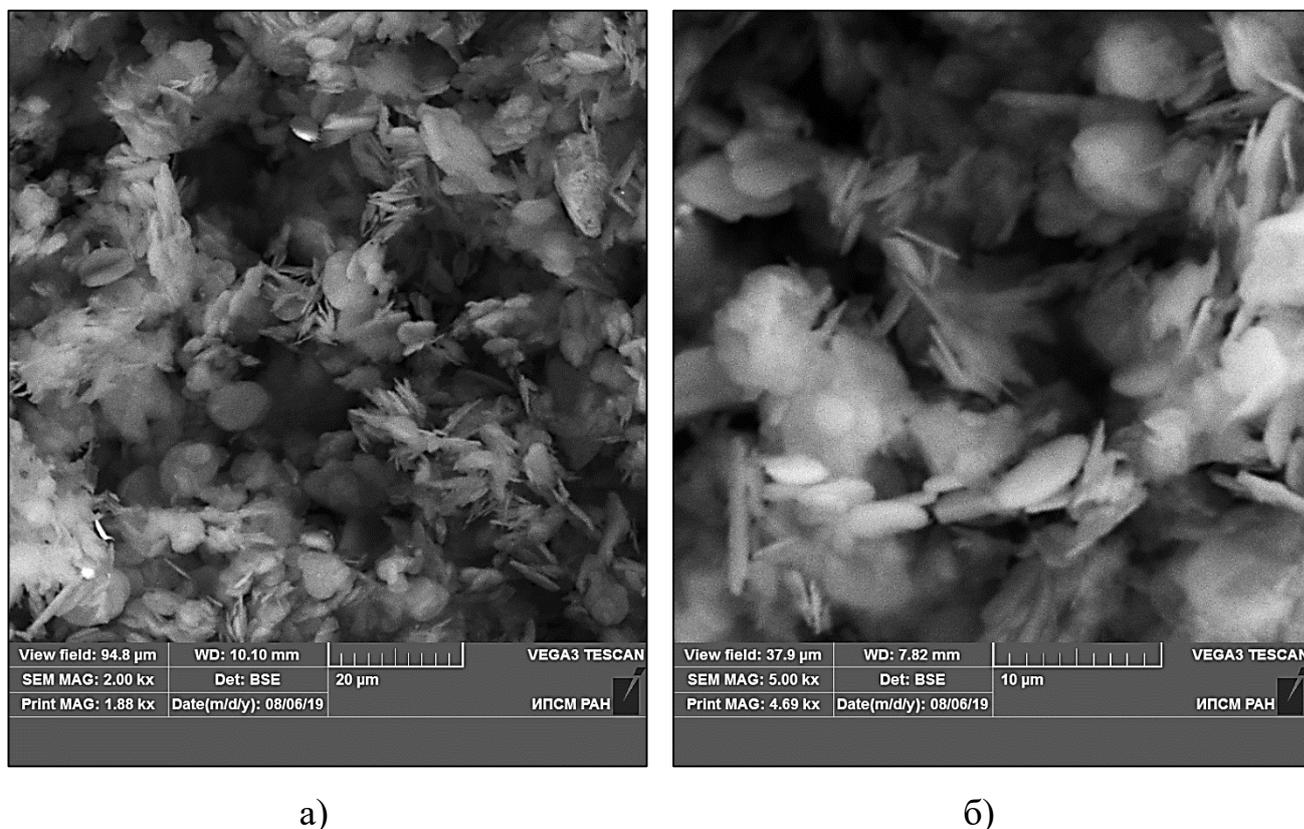


Рисунок 2.2 – Внешний вид порошка гексагонального нитрида бора (РЭМ)

2.2 Технология получения компактов

Технологическая схема получения изделий конечной формы методами порошковой металлургии в общем случае состоит из следующих основных операций [106]:

1. подготовки исходной порошковой смеси (шихты);
2. формования изделия заданной формы;
3. спекания сформированного изделия;
4. обработки спеченного материала;
5. контроля физико-механических свойств.

Подготовка перед прессованием заключалась в предварительном взвешивании исходных порошковых компонентов и их тщательном

перемешивании в течение 1 часа до достижения равномерного распределения компонентов по объему шихты.

Формообразование проводили методом холодного статического прессования в матрице прямоугольного сечения с размерами 10x100 мм. Оптимальное усилие прессования при этом составляло 80 т.с. Навеску шихты различного состава для прессования подбирали из условия получения отпрессованных образцов высотой не менее 10 мм.

Оптимизацию состава композитного металлокерамического материала производили опытным путем до достижения требуемого сочетания физико-механических характеристик и свойств истираемости. На первом этапе проведения исследований, с целью оценки правильности выбранного вектора разработки нового материала и определения граничных концентраций исходных компонентов, были подготовлены 4 состава шихты с содержанием нитрида бора 0%, 2%, 4% и 6% соответственно.

Спекание проводили в электропечи в воздушной атмосфере. Температура спекания сформированных компактов различного состава подбирали опытным путем с учетом общепризнанных правил ее не превышения $0,9 T_{пл}$. По результатам серии испытаний был выбран режим спекания в течение 2 часов при температуре 1200 °С.

Дополнительно, с целью изучения механизма формирования микроструктуры композитного материала, к исследуемым составам были добавлены промежуточные концентрации нитрида бора в исходной порошковой смеси. В конечном итоге исследованиям подвергались компакты следующих составов:

- 1) ПХ13М2 без содержания h-BN;
- 2) ПХ13М2 + 0,5% h-BN;
- 3) ПХ13М2 + 1% h-BN;
- 4) ПХ13М2 + 2% h-BN;
- 5) ПХ13М2 + 4% h-BN;
- 6) ПХ13М2 + 4,5% h-BN;

- 7) ПХ13М2 + 5% h-BN;
- 8) ПХ13М2 + 6% h-BN.

2.3 Оборудование и методика металлографических исследований

Подготовка образцов для металлографического анализа состояла из следующих основных этапов:

1) Вырезке сегментов из спеченных компактов на напольном отрезном станке с автоматической подачей смазывающе-охлаждающей жидкости образцов в продольном и поперечном направлении с размерами 10x10 мм и толщиной не менее 5 мм.

2) Механической обработке одной из поверхностей на шлифовально-полировальном станке Struers Labo Pol-1:

2.1) Шлифовку проводили с использованием карбид кремниевой абразивной бумаги различной зернистости с переходами от крупного к более мелкому абразиву. При этом, направление шлифования меняли на 90° и в процессе обработки добивались устранения рисок от предыдущей абразивной бумаги.

2.2) Полировку проводили на бархатной ткани с коротким ворсом с использованием в качестве абразива коллоидной суспензии на основе карбида кремния зернистостью 0,05 мкм. После полировки образцы тщательно промывались на бархатной ткани с непрерывной подачей воды и сушились струей сжатого воздуха.

Металлографические исследования подготовленных образцов проводили на оптическом микроскопе Olympus GX-51, растровых электронных микроскопов JEOL JSM-6490LV, Tescan Lyra 3 и сканирующем электронном микроскопе с полевым эмиссионным катодом Zeiss Merlin при увеличениях до x200000 крат.

2.4 Методика определения среднего размера зерен

При определении среднего размера сформировавшихся зерен металлической матрицы применяли методику произвольных секущих линий. При этом, количество полей зрения на одно состояние составляло не менее 5, а общее количество измерений для расчета составляло не менее 100.

Среднее арифметическое значение ряда отдельных измерений рассчитывали по формуле:

$$a_{\text{cp}} = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i)}{n}. \quad (2.1)$$

Среднее квадратичное отклонение:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - a_{\text{cp}})^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (2.2)$$

Истинное значение искомой величины лежит в интервале от $(a_{\text{cp}} - \Delta a)$ до $(a_{\text{cp}} + \Delta a)$, где Δa – доверительный интервал величины a . Доверительный интервал рассчитывается по формуле

$$\Delta a = s \cdot t_{\lambda n}, \quad (2.3)$$

где $s \cdot t_{\lambda n}$ – коэффициент Стьюдента, зависящий от задаваемой доверительной вероятности P (принимался равным 0,95) и числа измерений n .

$$\Delta a = (a_{\text{cp}} \pm \Delta a). \quad (2.4)$$

2.5 Оборудование и методика определения химического состава

Локальное определение химического состава структурных составляющих проводили на растровом электронном микроскопе с помощью приставки для микрорентгеноспектрального анализа INCA X-act Oxford Instruments.

2.6 Оборудование и методика проведения механических испытаний

Определение характеристик прочности и пластичности исследуемого композитного материала проводили при комнатной и повышенной температуре – 600 °С.

Испытания проводили по стандартным методикам, описанным в ГОСТ 1497 и ГОСТ 9651 на образцах тип 3 номер 9 и тип 1 номер В соответственно. Скорость нагружения в процессе испытания составляла 1 мм/мин. Статическое растяжение проводили на универсальной испытательной машине Instron 5982 с автоматическим контролем и записью данных с помощью программного обеспечения Instron Bluehill версия 2.27.

По полученным первичным данным «усилие-перемещение» производили построение кривой «напряжение-деформация».

Расчет напряжений и степени деформации в образце в процессе деформирования производили по формулам:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad (2.6)$$

где σ – условные нормальные напряжения;

F – растягивающие образец усилия;

A_0 – площадь поперечного сечения образца.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\%, \quad (2.7)$$

где ε – относительное удлинение;

l – начальная длина и удлинение образца;

Δl – удлинение образца.

Определение характеристик длительной прочности проводили на цилиндрических пропорциональных образцах диаметром 5 мм с начальной расчетной длиной 25 мм по методике, описанной в ГОСТ 10145 в интервале температур 600...700 °С с различным уровнем напряжений. Испытания проводили на специализированной электромеханической испытательной машине Instron 8862. Время прогрева образца после загрузки в печь составляло 1 час. Контроль и запись параметров испытаний осуществлялся программой Instron WaveMatrix.

Определение твердости по Бринеллю компактов проводили по ГОСТ 9012 на твердомере ТН-600 при максимальной прикладываемой нагрузке 250 кг. Диаметр вдавливаемого шарика составлял 5 мм, время выдержки при максимальной нагрузке 30 сек. Значение твердости компактов определяли путем сопоставления диаметра получаемого отпечатка со стандартными значениями, приведенными в ГОСТ 9012.

Определение вязкости разрушения при ударном воздействии проводили по стандартной методике по ГОСТ 9454 на прямых образцах с размерами 10x10x55 мм без концентратора напряжений. Испытания проводили на копре с вертикально падающим грузом Instron Ceast 9350. Запасенная энергия удара составляла 50 Дж. Расчет работы разрушения A и вязкости разрушения KC производился в автоматическом режиме с помощью программного обеспечения Instron Ceast View версия 5.94 5E.

Испытания на статический 3-х точечный изгиб проводили по методике, описанной в ГОСТ 14019 на сервогидравлической испытательной машине Instron 8801 с использованием фирменной оснастки. При этом образцы для испытания имели прямоугольную форму с сечением 8x10 мм и длиной 50 мм. Расстояние между опорами составляло 38 мм, скорость нагружения – 50 мм/мин. Процесс испытания контролировался компьютерной программой Instron Bluehill 2.27. Расчет изгибающих напряжений $\sigma_{изг}$ проводили по следующей формуле:

$$\sigma_{изг} = \frac{M}{W}, \quad (2.8)$$

где $\sigma_{изг}$ – максимальное изгибающее напряжение;

M – максимальный изгибающий момент;

W – момент сопротивления сечения образца.

Максимальный изгибающий момент рассчитывается по формуле:

$$M = \frac{bh^2}{6}, \quad (2.9)$$

где b – ширина образца;

h – высота образца.

Момент сопротивления сечения образца рассчитывается как:

$$W = \frac{Fl}{4}, \quad (2.10)$$

где F – максимальное усилие в процессе испытания;

l – расстояние между опорами.

С целью повышения точности измерений и минимизации статистической ошибки количество параллельных испытаний составляло не менее 5 для всех видов испытаний.

2.7 Методика построения температурно-ресурсных зон

Температурно-ресурсные зоны работоспособности материалов и изделий строили путем математического обсчета результатов испытаний длительной прочности (долговечности при заданных условиях испытаний).

Методика проведения испытаний на длительную прочность приведена в разделе 2.6.

Матрица проведения испытаний для расчета температурно-ресурсных зон представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Рекомендуемый начальный уровень растягивающей нагрузки

Температура испытания, °С	Напряжение растяжения на образце, МПа (кгс/мм ²)
600	58,9 (6)
	68,7 (7)
	78,5 (8)
	88,3 (9)
650	49,1 (5)
	58,9 (6)
	68,7 (7)
700	29,4 (3)
	39,2 (4)
	49,1 (5)

2.8 Методика определения объемной доли пор и наполнителя

Для расчета объемной доли пор и количества вторых фаз (структурных составляющих) применяли метод Глаголева, основанный на подсчете числа узловых точек, попавших на фазу, при наложении квадратной сетки. Количество полей зрения на одно состояние составляло не менее 10.

При этом, объемное соотношение фаз рассчитывается в соответствии с формулой:

$$\sum V_{\alpha} = \frac{Z_{\alpha}}{Z}, \quad (2.11)$$

где $\sum V_{\alpha}$ – доля исследуемой структурной составляющей в объеме сплава, %;

Z_{α} – число точек, попавших на структурную составляющую;

Z – общее число точек.

2.9 Методика определения физических свойств исследуемых компактов

Плотность компактов определяли стандартным способом по методике, описанной в ГОСТ 18898 (ИСО 2738).

Значения коэффициента линейного термического расширения определяли с помощью дилатометра Netzsch DIL 402C в интервале температур 20...600 °C на цилиндрических образцах диаметром 5 мм и длиной 25 мм. Скорость нагрева в процессе испытания составляла 1 °/мин.

2.10 Методика определения коэффициента трения и скорости износа материала компактов

Оценку параметров износостойкости исследуемых компактов проводили на высокотемпературном трибометре Nanovea (США) при комнатной температуре. Для максимального приближения условий испытаний к реальным условиям

эксплуатации, контртела были изготовлены из коррозионностойкой стали 20Х13 – материала лопаток паровых турбин. Определение коэффициента трения материала компактов при контакте с контртелом производилось в автоматическом режиме. Тип движения диска – вращательное, скорость вращения 50 об/мин. Усилие, прикладываемое к контртелу составляло 1 Н.

Максимальная глубина канавки на компактах оценивалась с помощью профилографа-профилометра Абрис ПМ-7. Расчет величины линейного износа контртела производили исходя из фактических измерений величины диаметра изношенной поверхности.

Величину относительного износа рассчитывали по формуле:

$$k = h/h_p \quad (2.12)$$

где h – наибольшая глубина канавки изнашивания в уплотнительном материале;

h_p – линейный износ контртела.

ГЛАВА 3 МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПАКТОВ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ НИТРИДА БОРА

Несмотря на известные данные [81, 83-87] об улучшении трибологических характеристик материалов на металлической основе, полученных при твердофазном спекании, за счет введения в состав гексагонального нитрида бора, вопросы влияния его содержания на физико-механические свойства и микроструктуру остаются недостаточно изученными и представляют большой научный интерес.

3.1 Влияние содержания нитрида бора на микроструктуру компактов

На рисунках 3.1-3.8 представлена микроструктура спеченных компактов различного состава.

Микроструктура компактов без нитрида бора состоит из сформировавшихся зерен матричного материала и пор сферической формы различных размеров, закономерно расположенных по границам металлических зерен. Объемная доля пор составляет около 3,5%, средний размер – 2,5 мкм. Причина формирования подобной структуры порошковых компактов без содержания нитрида бора носит комплексный характер. Во-первых, в процессе прессования возникает большая по величине сила трения между соседними частицами металлического порошка, препятствующая их более плотному прилеганию друг к другу. Во-вторых, иррегулярная форма частиц оказывает дополнительное сопротивление уплотнению компакта при прессовании. В-третьих, реализованные температурно-временные параметры спекания привели лишь к частичному снижению поверхностной энергии порошкового компакта. При этом, сформированное в процессе прессования поровое пространство оказало решающее препятствующее воздействие для развития процессов рекристаллизации, увеличения плотности и полноты усадки [113-115, 117, 118]. Наблюдаемый в плоскости шлифа размер

сформированных металлических зерен варьируется в диапазоне 10...100 мкм, что соответствует гранулометрическому составу используемого металлического порошка ПХ13М2 и подтверждает описанные выше особенности его формирования.

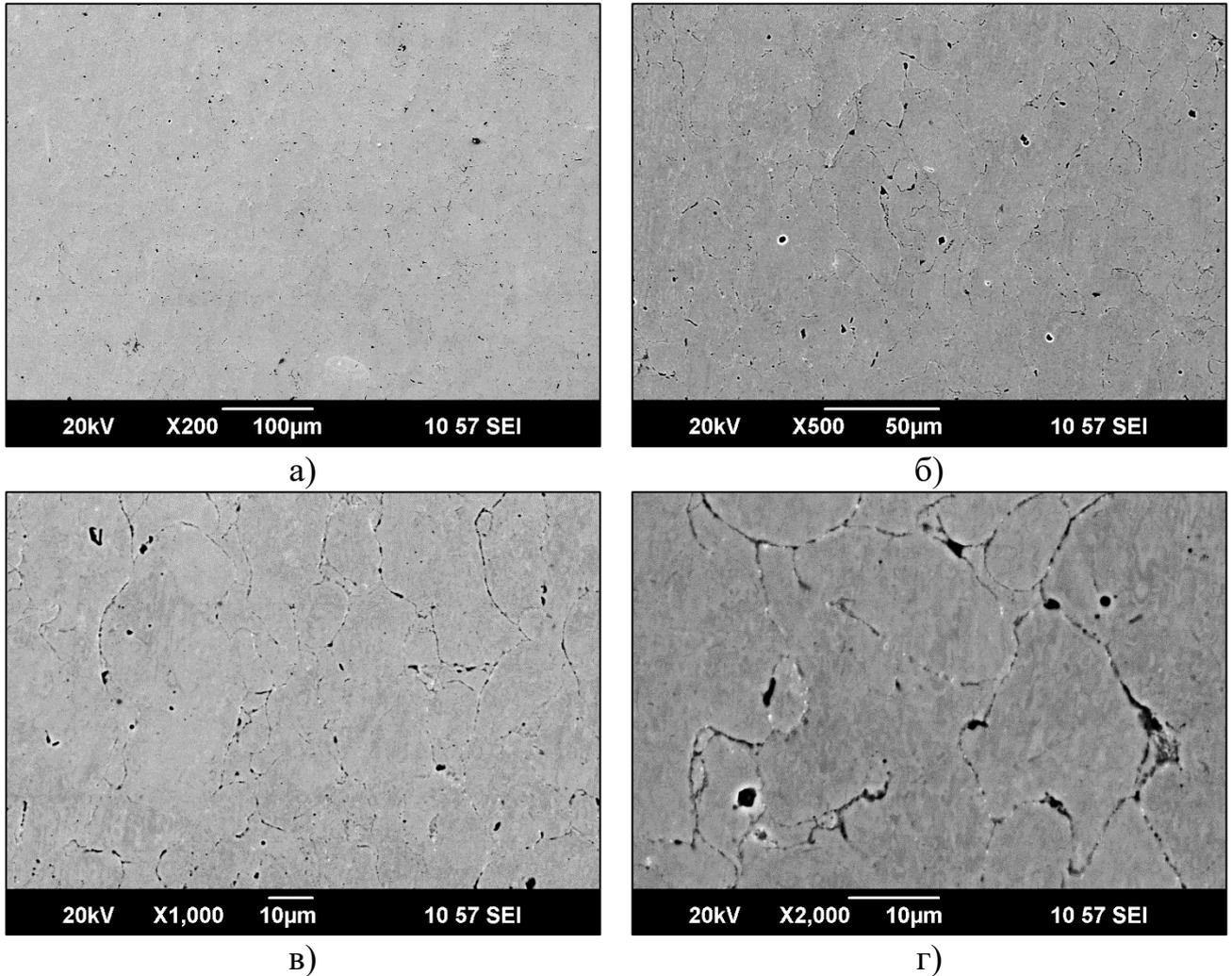


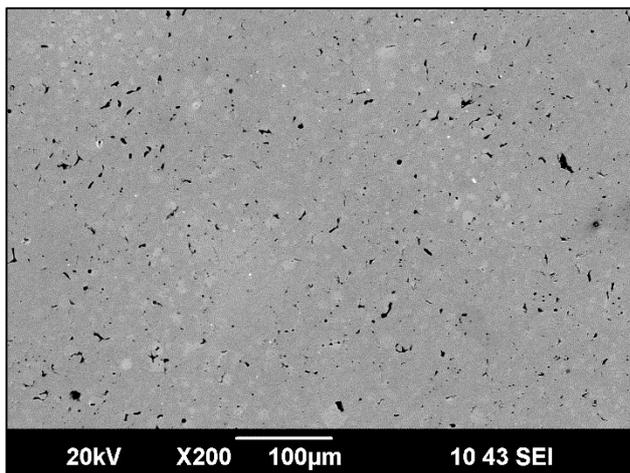
Рисунок 3.1 – Микроструктура компакта без содержания h-BN (РЭМ)

Введение в состав исходной шихты нитрида бора оказывает значительное влияние на формирование микроструктуры спеченных компактов – приводит к образованию протяженных зернограничных пор различной формы и размеров (рис. 3.2-3.8). Причем, чем выше содержание в исходной шихте нитрида бора, тем больше объемная доля и размер зернограничных пор. Так, увеличение содержания нитрида бора в составе исходной порошковой смеси с 0,5% h-BN до 6% по массе

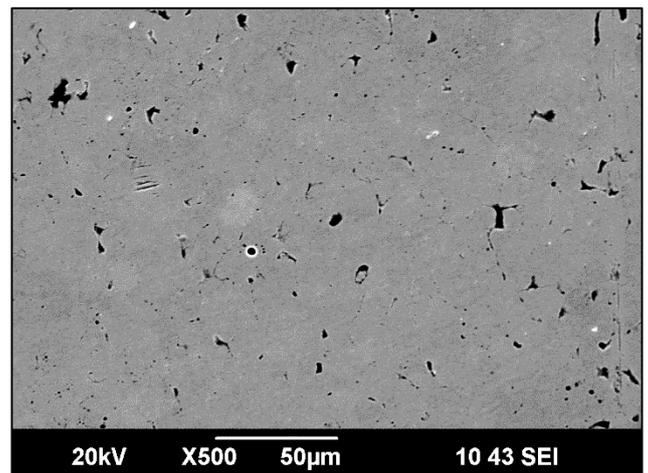
приводит к повышению объемной доли пор с 5,2% до 17,3%. При этом средний размер пор увеличивается с 3,6 мкм до 37 мкм [113-115, 117, 118].

Механизм образования наблюдаемых протяженных зернограничных пор отличен от классического представления, описанного в работах [106-109]. Вследствие существенного различия насыпной плотности используемых порошковых материалов объем замешиваемых компонентов сопоставим. В совокупности с химической инертностью и низкой адгезионной способностью нитрида бора можно предположить, что наблюдаемые в микроструктуре протяженные зернограничные поры являются областями с повышенной концентрацией твердой смазки, которая удаляется вместе с абразивом при подготовке объектов исследования к металлографическому анализу [117, 118].

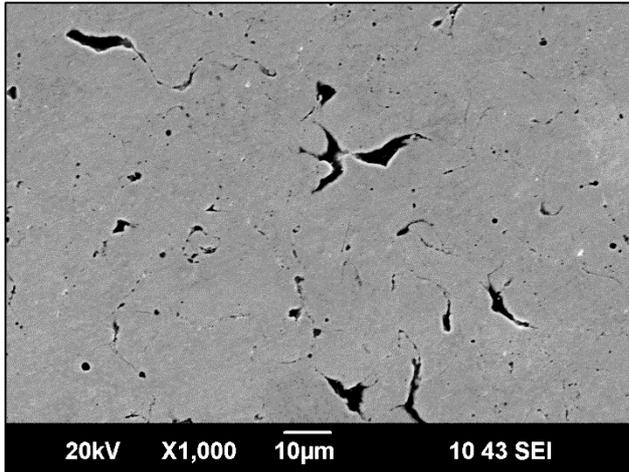
Следует отдельно отметить, что введение небольшого количества, до 2% по массе, нитрида бора способствует формированию более плотных границ зерен. По-видимому, это обусловлено снижением коэффициента трения между частицами матричного материала при прессовании за счет смазочного действия BN и, как следствие, более плотному прилеганию частиц металлического порошка друг к другу и более полному протеканию процессов зернограничной диффузии при спекании.



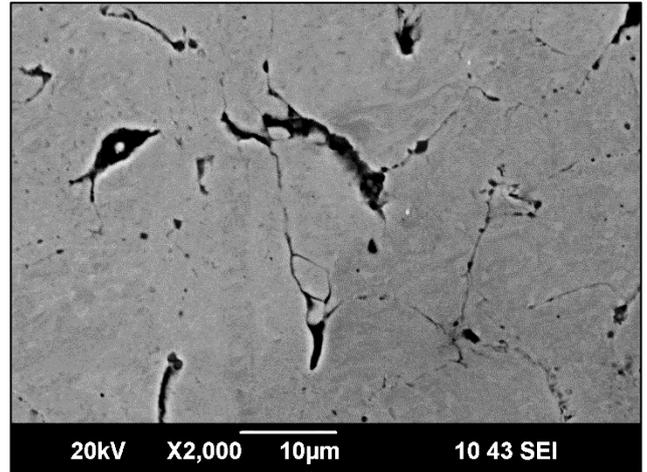
а)



б)

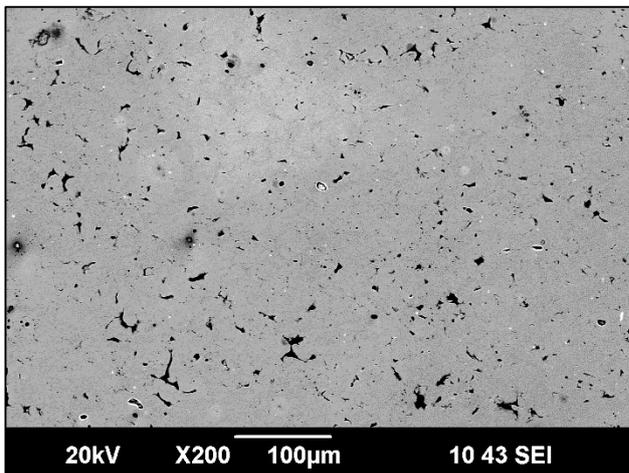


в)

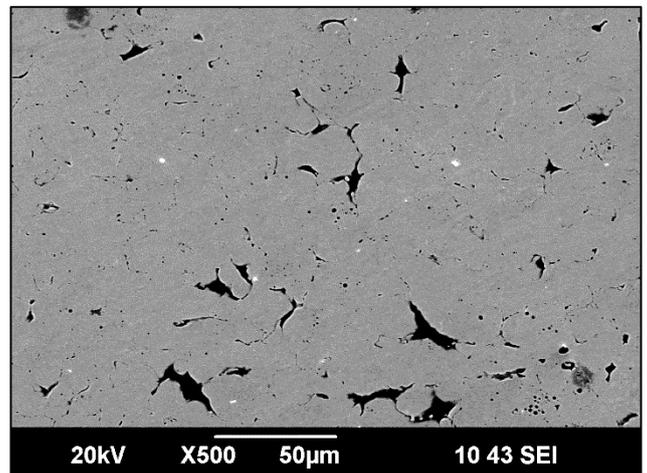


г)

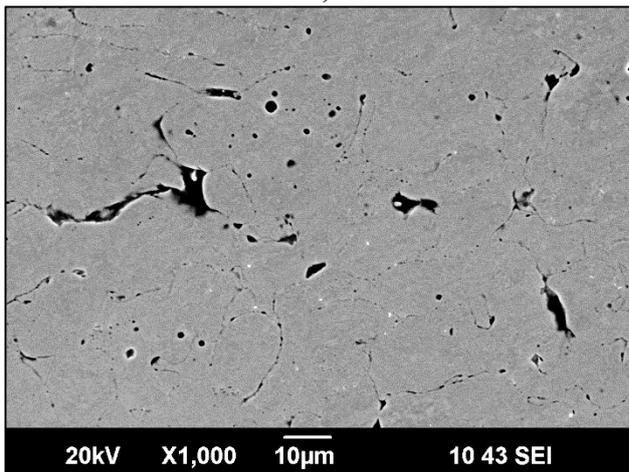
Рисунок 3.2 – Микроструктура компакта с содержанием h-BN 0,5% (РЭМ)



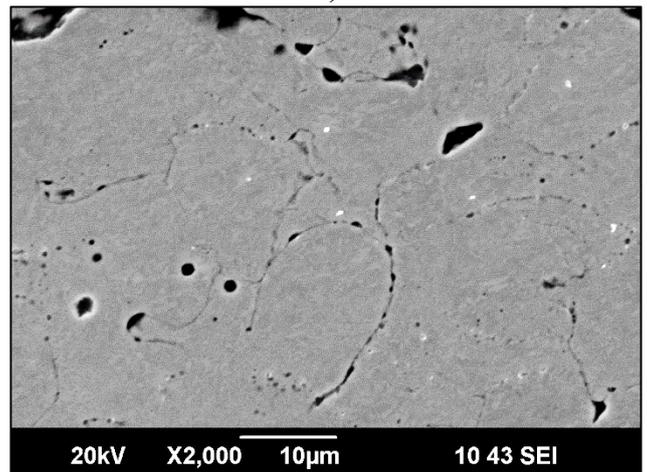
а)



б)

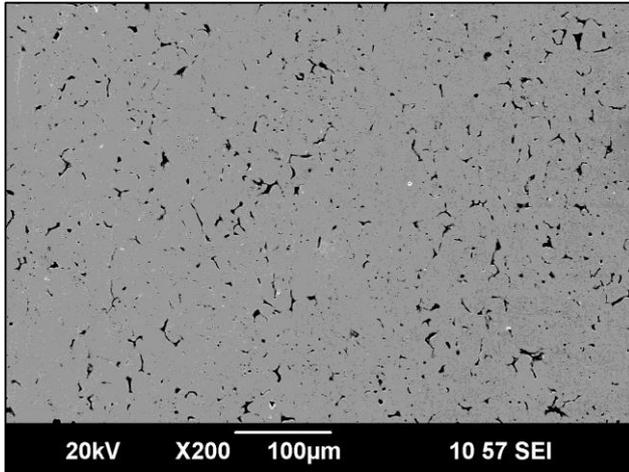


в)

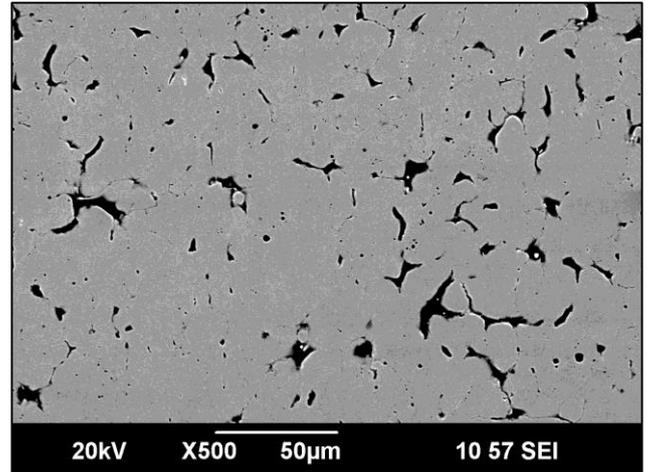


г)

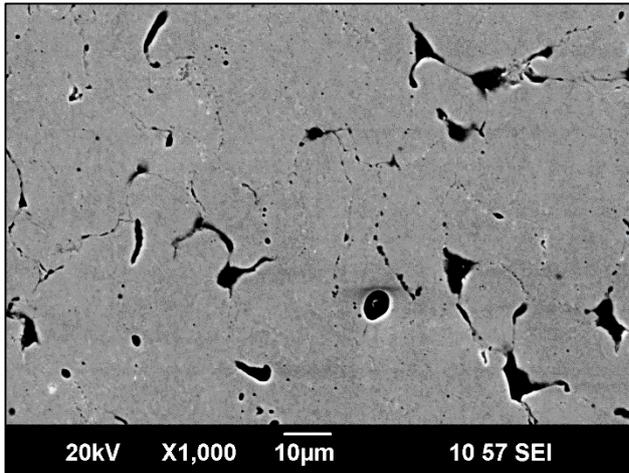
Рисунок 3.3 – Микроструктура компакта с содержанием h-BN 1% (РЭМ)



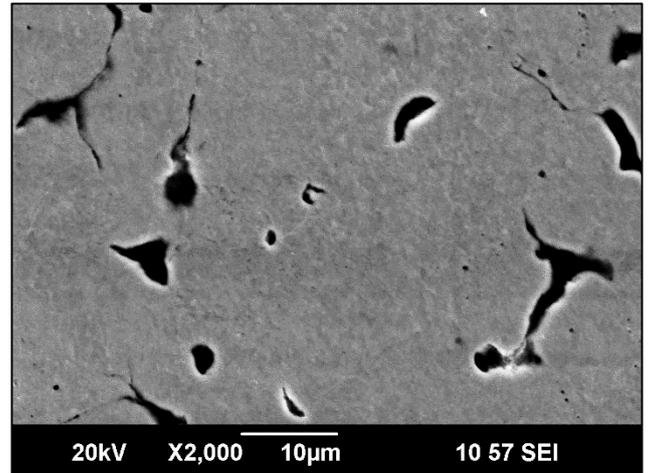
a)



б)

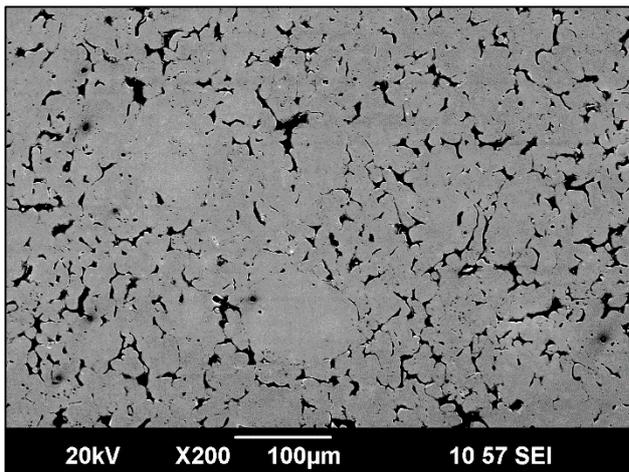


в)

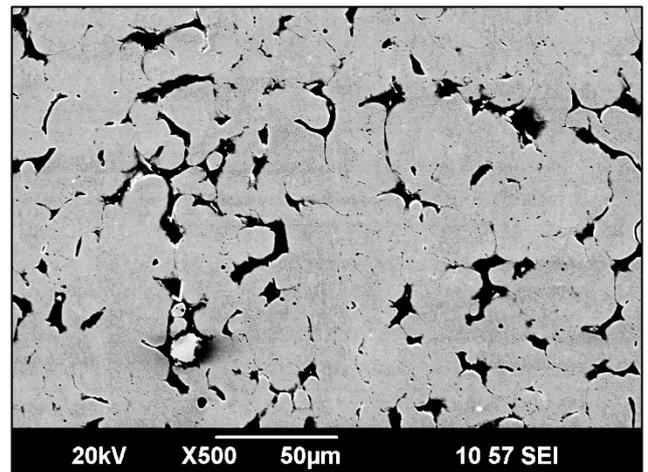


г)

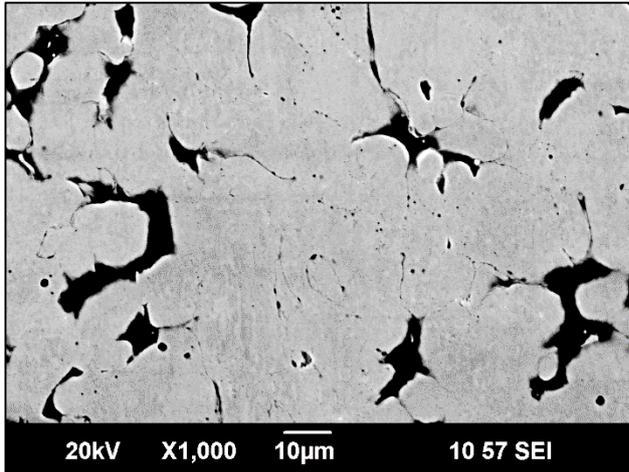
Рисунок 3.4 – Микроструктура компакта с содержанием h-BN 2% (РЭМ)



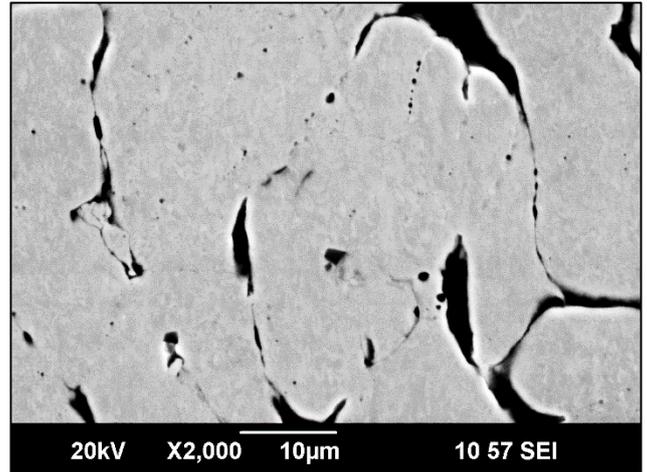
a)



б)

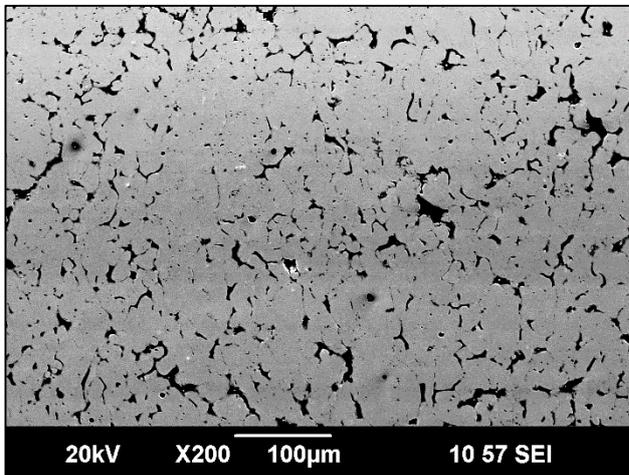


b)

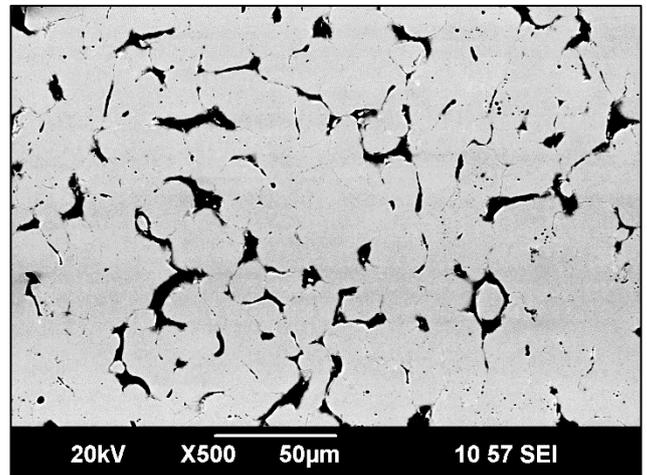


г)

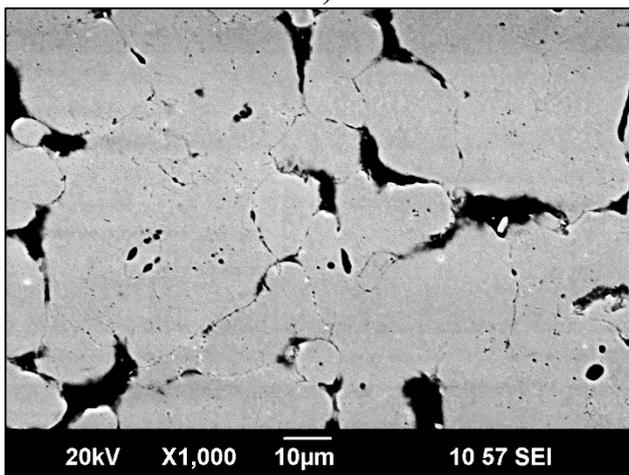
Рисунок 3.5 – Микроструктура компакта с содержанием h-BN 4% (РЭМ)



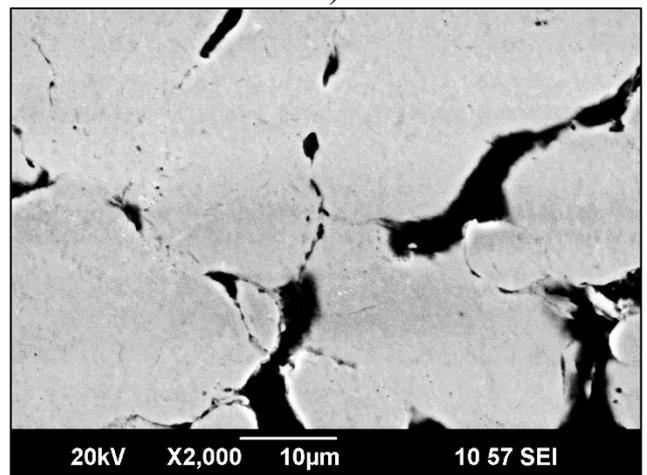
a)



б)

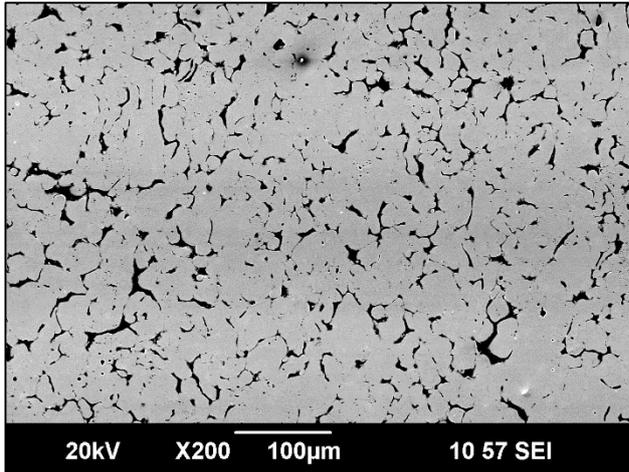


b)

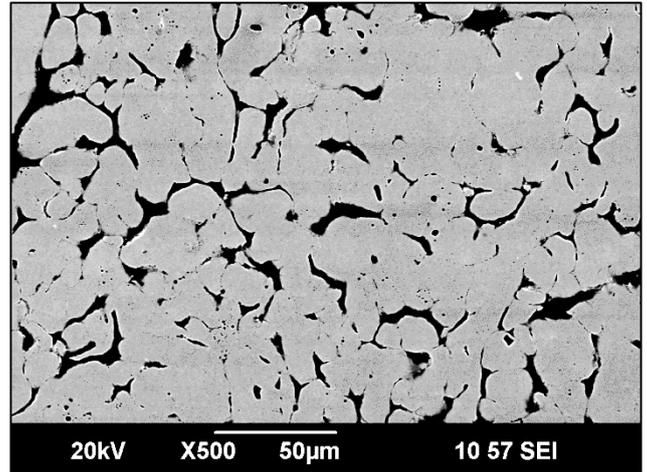


г)

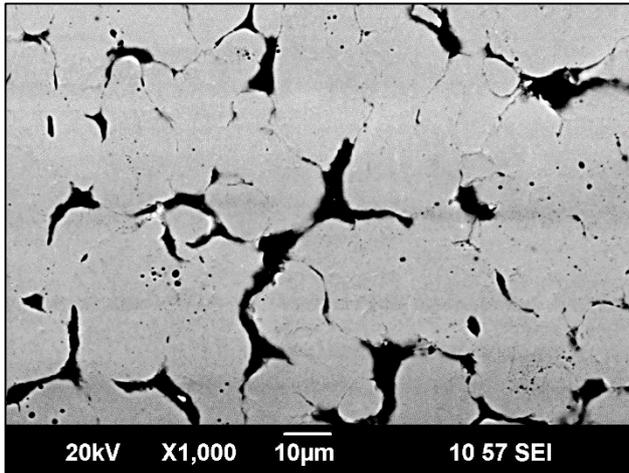
Рисунок 3.6 – Микроструктура компакта с содержанием h-BN 4,5% (РЭМ)



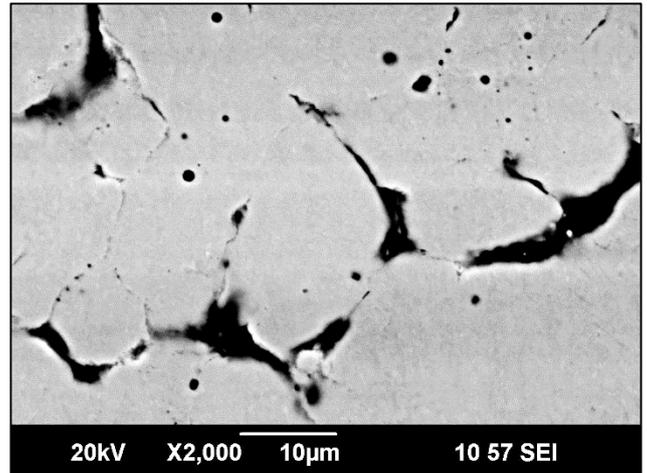
a)



б)

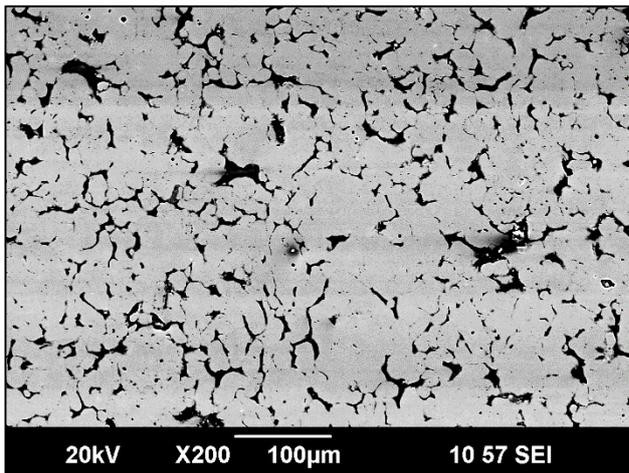


в)

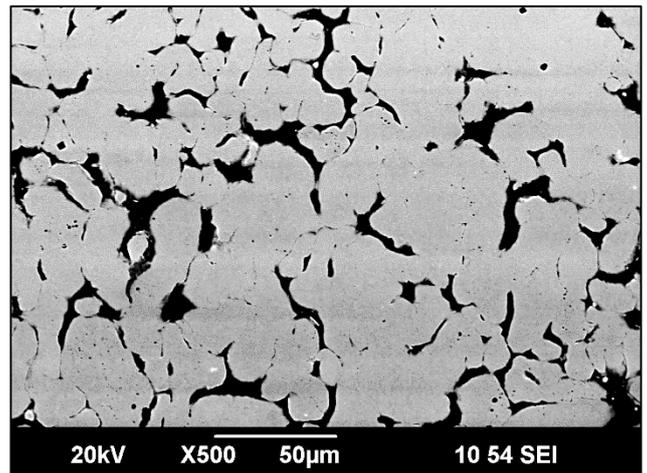


г)

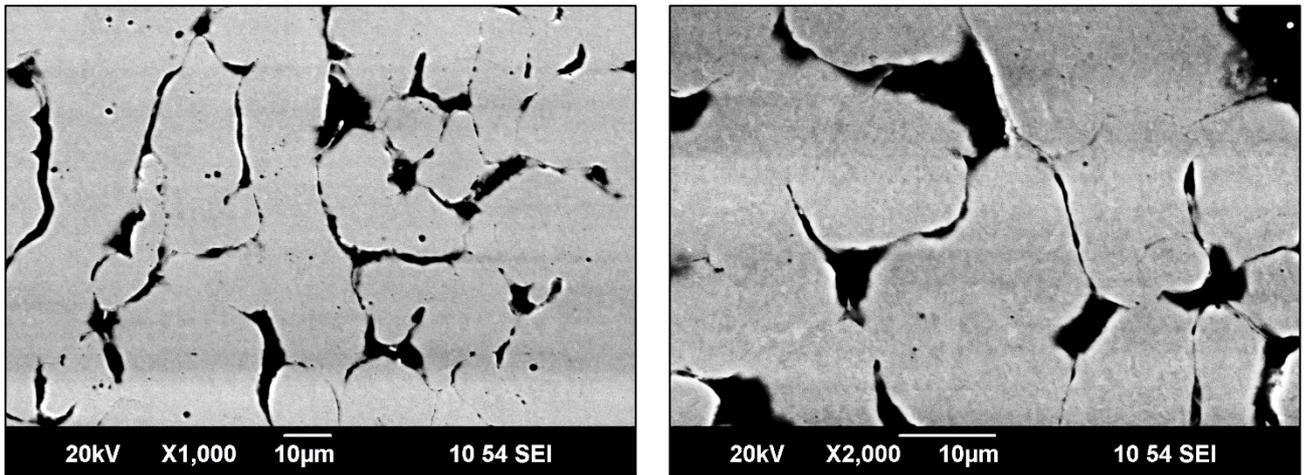
Рисунок 3.7 – Микроструктура компакта с содержанием h-BN 5% (РЭМ)



a)



б)



в)

г)

Рисунок 3.8 – Микроструктура компакта с содержанием h-BN 6% (РЭМ)

Исследования микроструктуры всех компактов с содержанием нитрида бора в режиме фазового контраста при большем увеличении выявили наличие дисперсных наноразмерных, толщиной 20...200 нм, частиц как по границам зерен (рис. 3.9 а и б), так и в теле сформировавшихся зерен (рис. 3.9 а и в). Причем в отдельных границах зерен наблюдается ярко выраженная их фрагментация (рис. 3.9, б) [116, 117, 119].

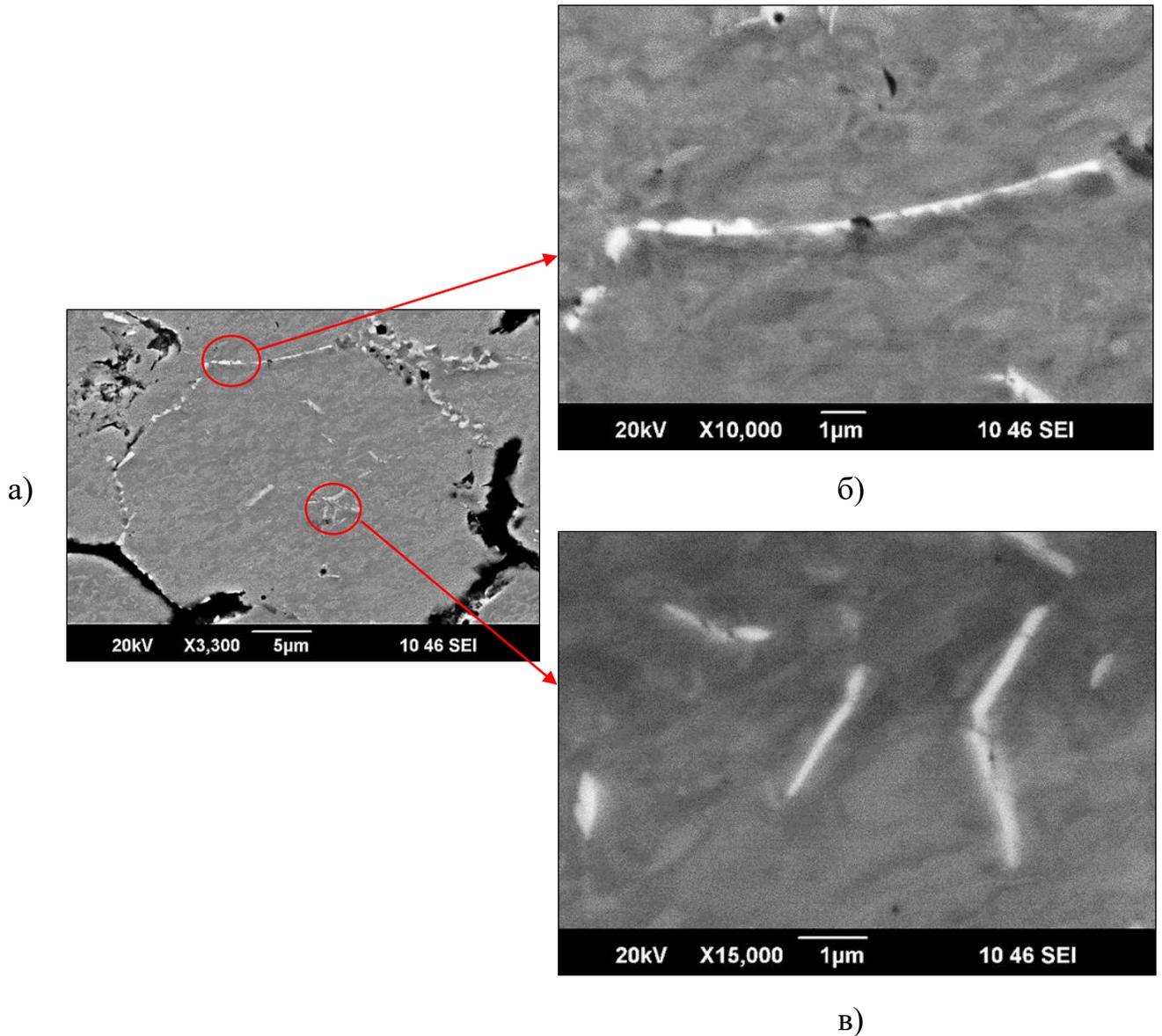


Рисунок 3.9 – Внешний вид частиц второй фазы по границам (а) и в теле (б) зерен (РЭМ)

Проведенный микрорентгеноспектральный анализ обнаруженных частиц по границам зерен показал, что наблюдаемые частицы являются частицами нитрида бора (рис. 3.10-3.11, табл. 3.1-3.2).

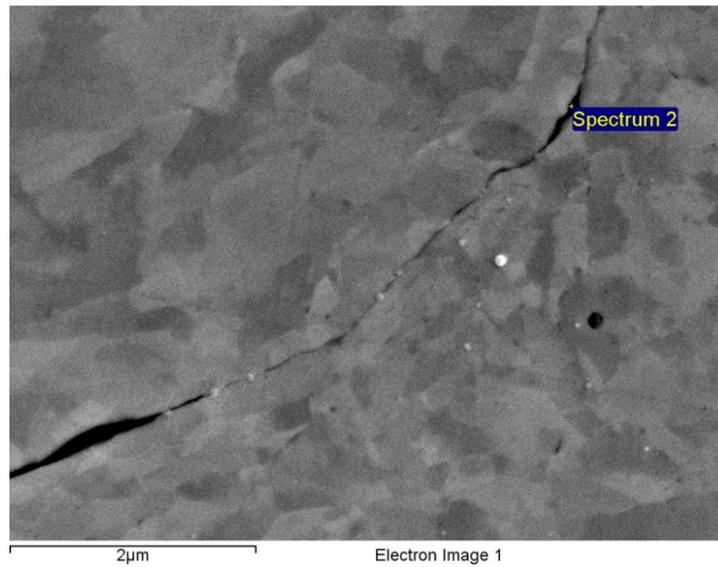


Рисунок 3.10 – Микроструктура компакта с содержанием 4% h-BN и обозначенными спектрами определения химического состава (РЭМ)

Таблица 3.1 – Результаты определения химического состава по спектрам с рисунка 3.10

Химический элемент	Содержание химического элемента	
	Весовых %	Атомных %
N	6.46	20.69
O	2.24	6.27
Cr	17.06	14.72
Fe	70.25	56.45
Mo	4.00	1.87
Суммарное содержание	100.00	

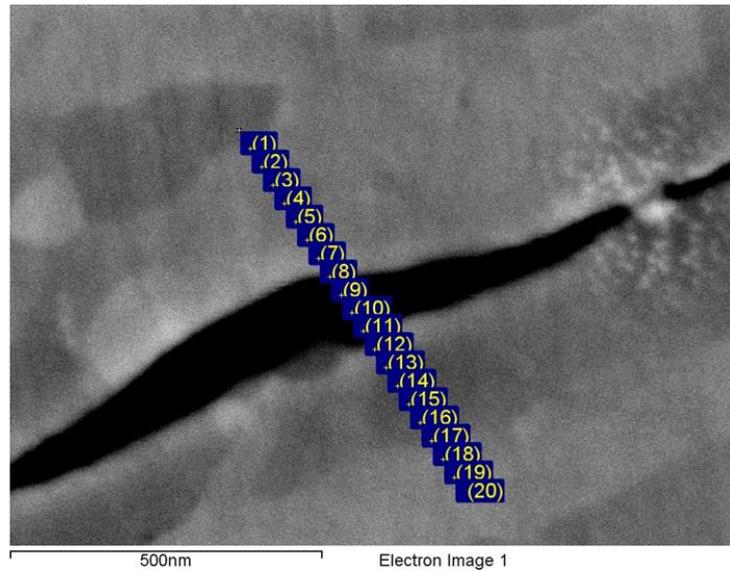
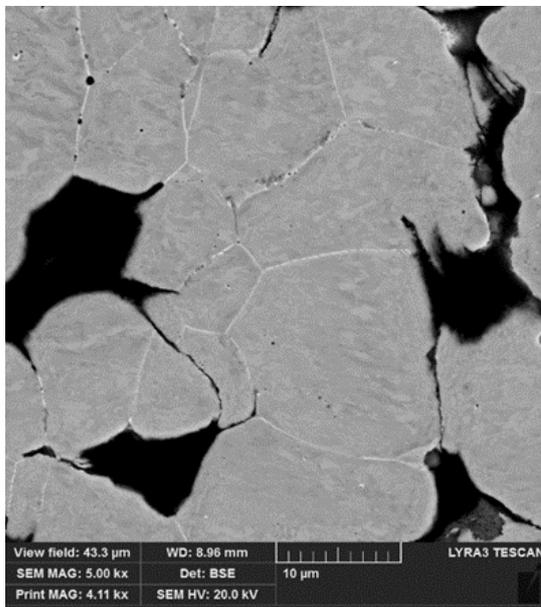


Рисунок 3.11 – Микроструктура компакта с содержанием 4% h-BN и обозначенными спектрами определения химического состава (РЭМ)

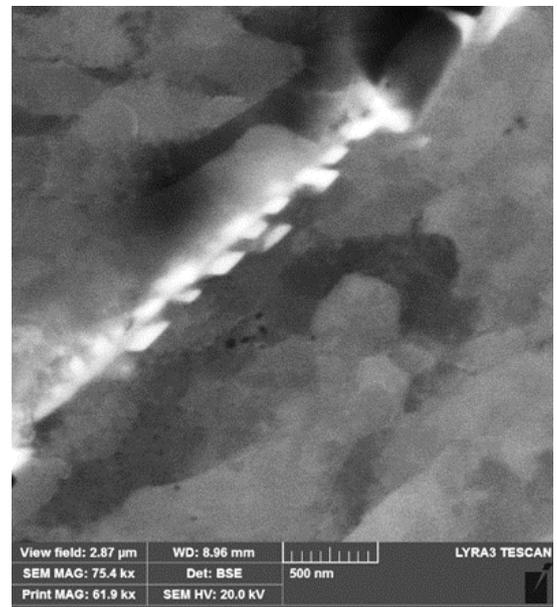
Таблица 3.2 – Результаты определения химического состава по спектрам с рисунка 3.11

Номер спектра	Содержание химического элемента, вес. %		
	C	N	Fe
(1)	-	-	100.00
(2)	-	-	100.00
(3)	11.78	-	88.22
(4)	15.73	-	84.27
(5)	20.45	-	79.55
(6)	20.72	-	79.28
(7)	23.22	-	76.78
(8)	21.56	-	78.44
(9)	21.73	21.59	56.68
(10)	-	45.99	41.37
(11)	-	57.59	42.41
(12)	23.54	28.36	48.11
(13)	27.31	-	72.69
(14)	24.60	-	75.40
(15)	23.70	-	76.30
(16)	20.07	-	79.93
(17)	19.30	-	80.70
(18)	20.21	-	79.79
(19)	18.35	-	81.65
(20)	19.30	-	80.70

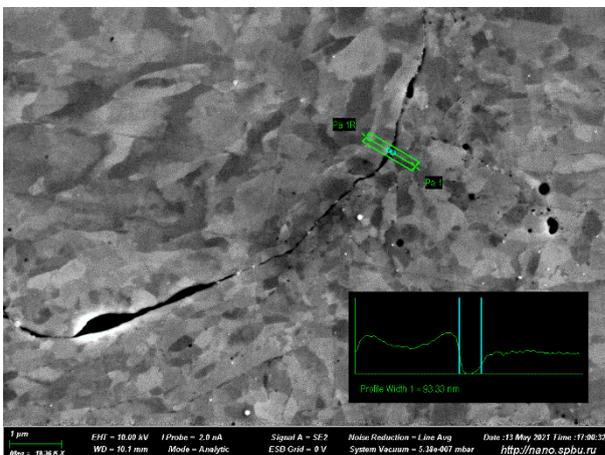
Детальные исследования границ зерен в режиме фазового контраста позволили уточнить размер фрагментированных частиц нитрида бора – толщина частиц варьируется в диапазоне 8...110 нм (рис. 3.12) [116].



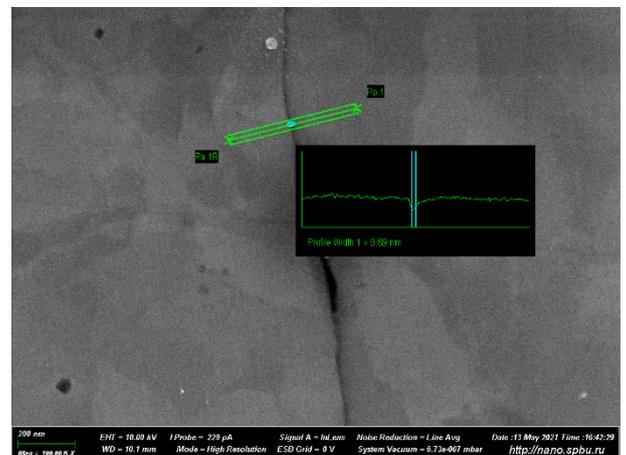
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.12 – Частицы нитрида бора в границах зерен компактов (РЭМ)

Результаты проведенного микроструктурного анализа позволили сделать заключение, что выбранный технологический подход формирует композитный материал с наночастицами нитрида бора, расположенными в теле и по границам зерен металлической матрицы. При этом, характер их расположения в объеме материала указывает на диффузионное перераспределение в процессе спекания.

3.2 Влияние содержания нитрида бора на физико-механические свойства композитного материала

На рисунке 3.13 приведена зависимость физических свойств исследуемых компактов от содержания нитрида бора в исходной порошковой смеси. Из представленных данных видно, что введение в состав нитрида бора приводит к монотонному снижению исследуемых физических свойств. Так, плотность постепенно уменьшается с $6,7 \text{ г/см}^3$, свойственными для компактов без нитрида бора, до $6,0 \text{ г/см}^3$, свойственным образцам с 6% по массе h-BN. Аналогичная зависимость прослеживается и для КТЛР. Максимальное линейное удлинение наблюдается на образцах без содержания h-BN, а минимальные значения характерны для образцов с 6% по массе нитрида бора. По-видимому, полученные зависимости физических свойств обусловлены особенностями состава и строения исследуемых порошковых компактов. Как было отмечено выше, частицы нитрида бора преимущественно располагаются по границам зерен, следовательно, с увеличением содержания нитрида бора в объеме компактов, доля границ в которых располагаются частицы возрастает, тем самым минимизируя площадь соприкосновения металлических частиц друг с другом в объеме материала [115]. При нагреве металлические частицы, между которыми расположены частицы нитрида бора, не оказывают взаимного влияния, что и приводит к снижению КТЛР.

С монотонным снижением плотности все гораздо проще. Вследствие существенного различия в плотности гексагонального нитрида бора и металла вытекает прямая зависимость: чем больше содержание h-BN, тем ниже плотность компакта.

На рисунке 3.14 представлены кривые растяжения при $600 \text{ }^\circ\text{C}$ образцов, изготовленных из исследуемого композитного материала различного состава. Внешний вид кривых типичен для конструкционных материалов: после упругой области при увеличении прикладываемого усилия наблюдается непродолжительная стадия пластического течения, после которой происходит разрушение образца. При этом, введение и увеличение содержания нитрида бора в состав исходной порошковой смеси приводит к экстремальному характеру

изменению прочностных характеристик материала как при комнатной, так и при повышенной температуре (рис. 3.15). Максимальные значения прочностных характеристик наблюдаются при содержании нитрида бора 2% по массе. Дальнейшее увеличение содержания h-BN приводит к резкому падению прочностных свойств с достижением минимальных значений при 6% по массе нитрида бора.

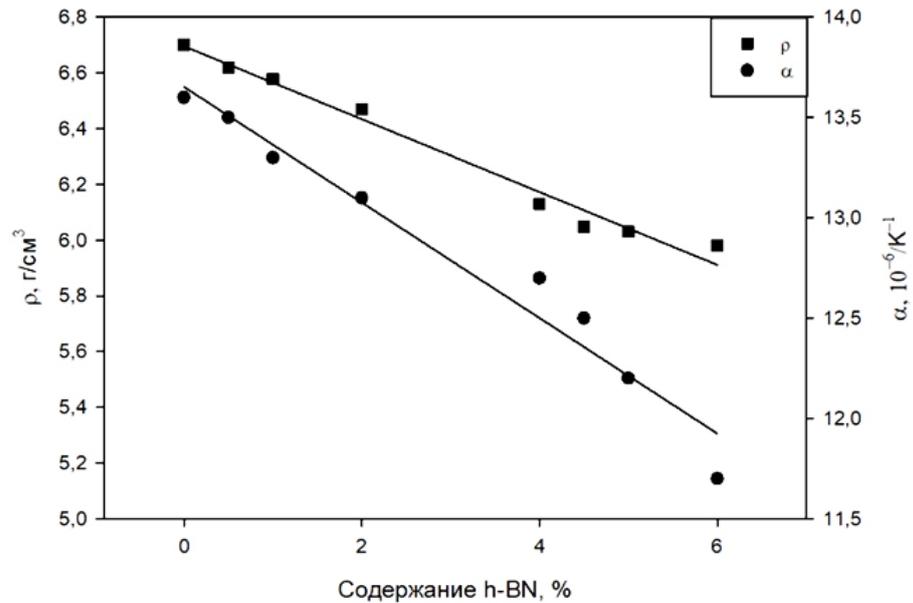


Рисунок 3.13 – Физические свойства исследуемого композитного материала в зависимости от содержания в нем h-BN

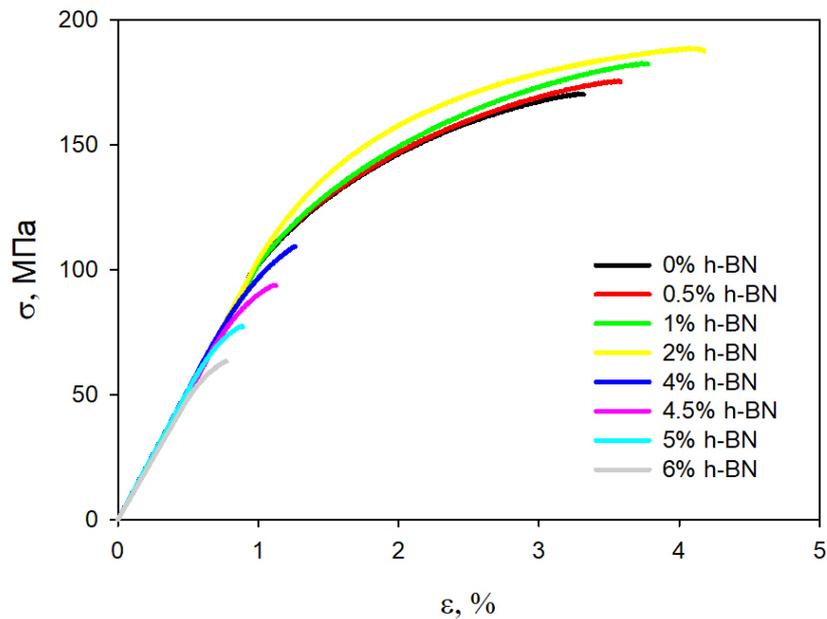


Рисунок 3.14 – Кривые растяжения при 600 °C образцов, изготовленных из исследуемого композитного материала в зависимости от содержания в нем h-BN

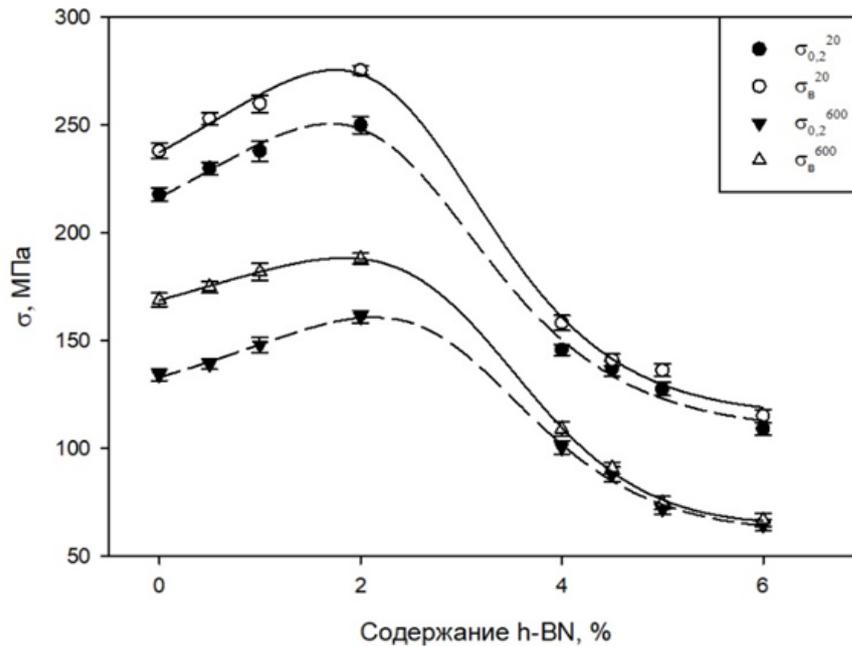


Рисунок 3.15 – Влияние содержания h-BN в композитном материале на прочностные характеристики

Принцип работы уплотнений подразумевает контактное взаимодействие с вращающимися частями. В этой связи, эффективность эксплуатации разрабатываемого композитного материала уплотнений в первую очередь будет определяться отсутствием значительной пластической деформации в месте контакта, исключающем возможность наволакивания материала уплотнения на гребни бандажных полок лопаток.

Из рисунка 3.14 видно, что пластичность компактов так же имеет экстремальный характер с максимумом свойств при содержании нитрида бора 2%. Полученные данные коррелируют с результатами микроструктурных исследований и, как было отмечено выше, обусловлены увеличением площади соприкосновения металлических частиц друг с другом при прессовании за счет снижения коэффициента трения, и более полному развитию процессов зернограничной диффузии при спекании. Следует отдельно отметить, что максимальная степень деформации для исследуемых составов композитного материала не превышает 2,5%. При этом использование в конструкции уплотнений проточной части турбин легко разрушающихся материалов с экстремально

низкими пластическими характеристиками несомненно положительно скажется на сохранности гребней бандажных полок лопаток и надежности паровых турбин в целом [114, 115, 117, 118].

Изменение твердости компактов при увеличении содержания нитрида бора в составе исходной порошковой смеси так же, как и физические свойства, имеет прямолинейный ниспадающий характер. А значения прочности на изгиб и ударной вязкости компактов имеют аналогичный с прочностными характеристиками экстремальный характер.

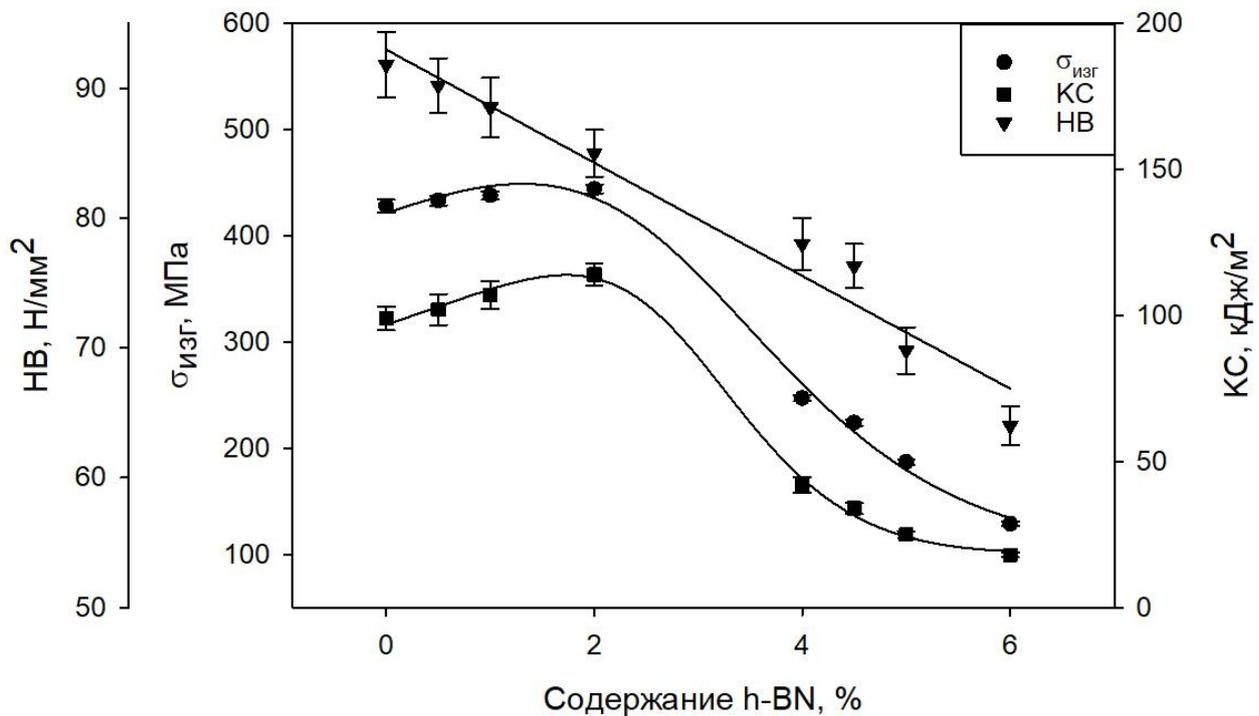


Рисунок 3.16 – Влияние содержания h-BN в композитном материале на твердость, прочности при изгибе и вязкость разрушения

Совокупный анализ комплекса свойств исследуемых порошковых компактов различного компонентного состава позволяет сделать заключение о соответствии компактов с содержанием нитрида бора от 4 до 5% по массе требованиям, предъявляемыми к материалу уплотнений проточной части паровых турбин (табл. 1.1).

3.3 Влияние содержания нитрида бора на структуру изломов

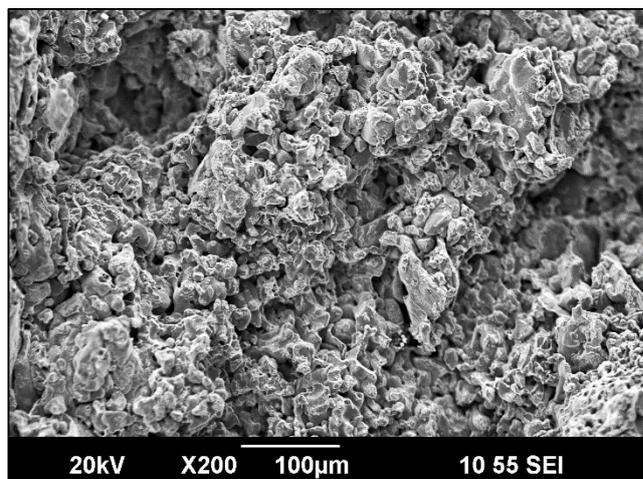
Как было отмечено ранее, одним из критериев, предъявляемых к материалу уплотнения, является обеспечение безопасного врезания гребней лопаточного аппарата. Иными словами, материал уплотнения должен не просто легко разрушаться, а локально истираться в зоне контактного воздействия. С целью оценки потенциальной способности разработанного композитного материала к локальному истиранию были проведены фрактографические исследования на образцах компактов различного компонентного состава после определения их ударной вязкости. На рисунке 3.17-3.20 представлен внешний вид изломов.

Поверхность всех исследуемых изломов имеет сложное строение и состоит из нескольких характерных составляющих, объемная доля которых зависит от компонентного состава компактов.

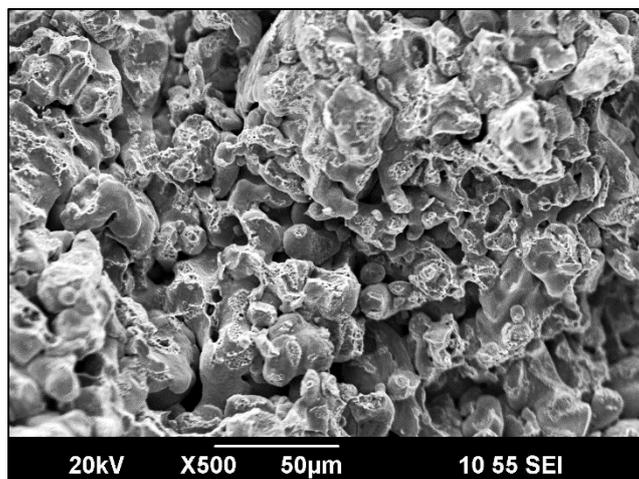
В структуре изломов компактов без содержания нитрида бора отчетливо выделяются области с характерными «ямками», свидетельствующие о вязком механизме разрушения материала (рис. 3.17 в и г). Объемная доля вязкой составляющей для данных образцов составляет около 19%. При этом, оставшаяся основная доля поверхности изломов представляет собой совокупность пор сферической формы различных размеров и «открытых» поверхностей металлических частиц, которые при термическом воздействии стремились минимизировать свою поверхностную энергию и, как следствие, изменили свою первоначальную иррегулярную форму на более правильную, округлую (рис. 3.17). Наблюдаемые особенности строения изломов компактов без нитрида бора подтверждают выдвинутые ранее предположения о незавершенности процессов диффузионного массопереноса при реализованных температурно-временных режимах спекания.

Введение и постепенное повышение до 2% по массе содержания нитрида бора в составе исходной порошковой смеси приводит к увеличению доли вязкой составляющей до 26% (рис. 3.18). При этом в структуре изломов наблюдается

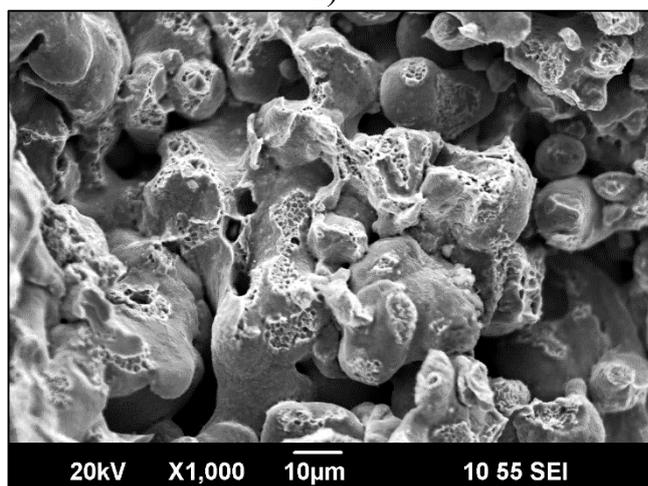
снижение доли и размеров округлых пор, между частицами матричного материала выявляются частицы нитрида бора, не имеющие преимущественной ориентации.



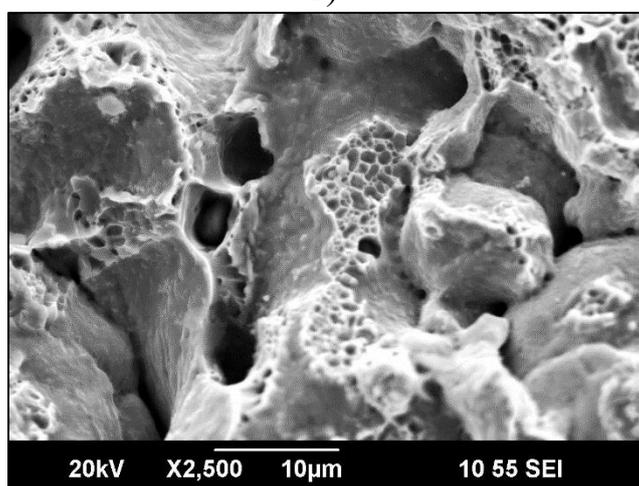
a)



б)

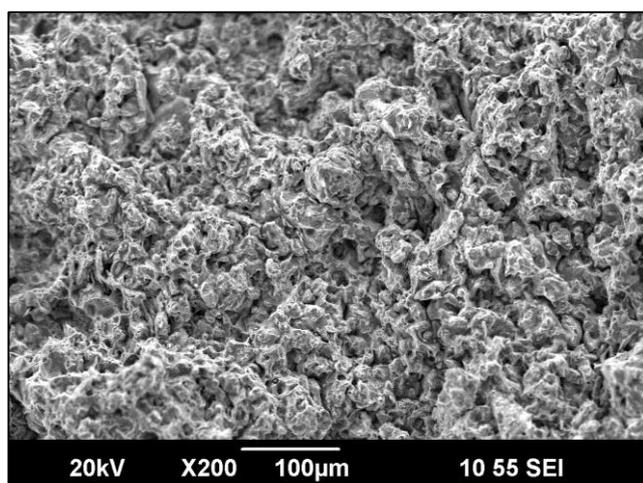


в)

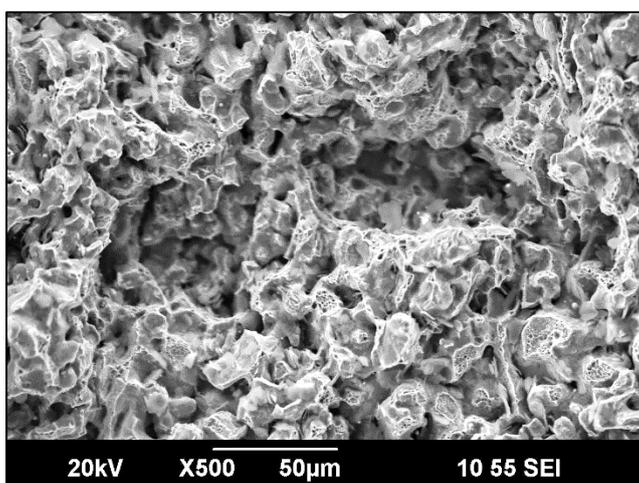


г)

Рисунок 3.17 – Строение изломов компактов без нитрида бора (РЭМ)



a)



б)

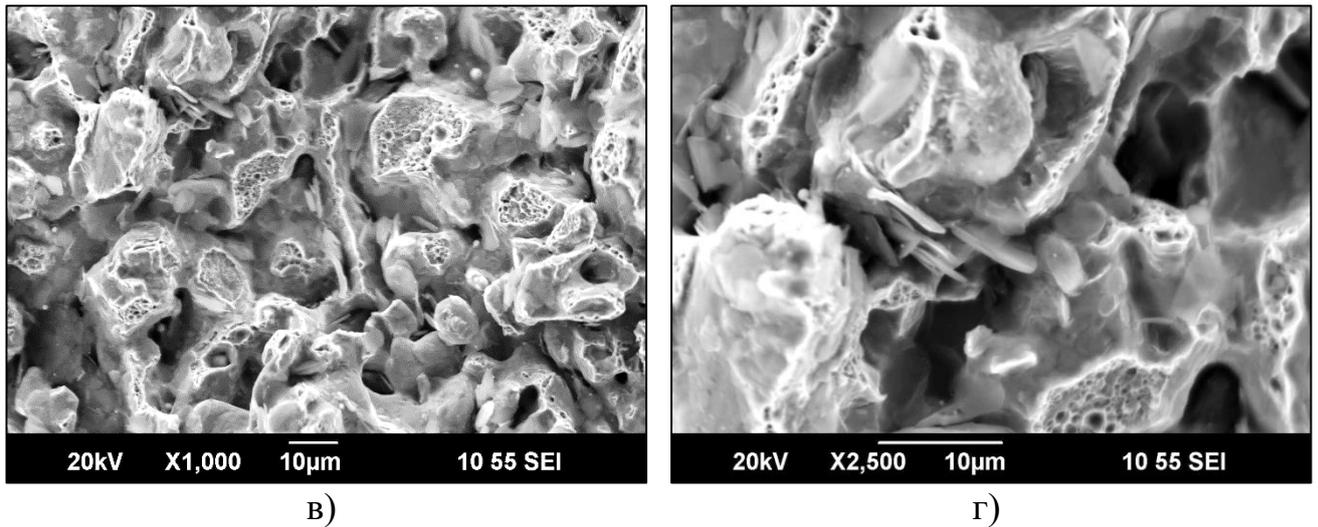
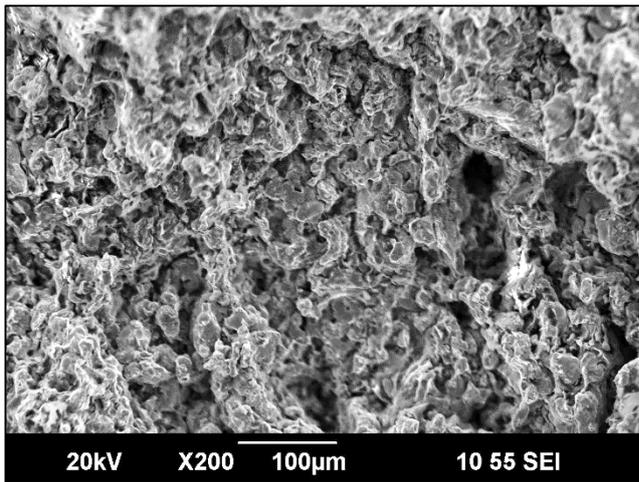


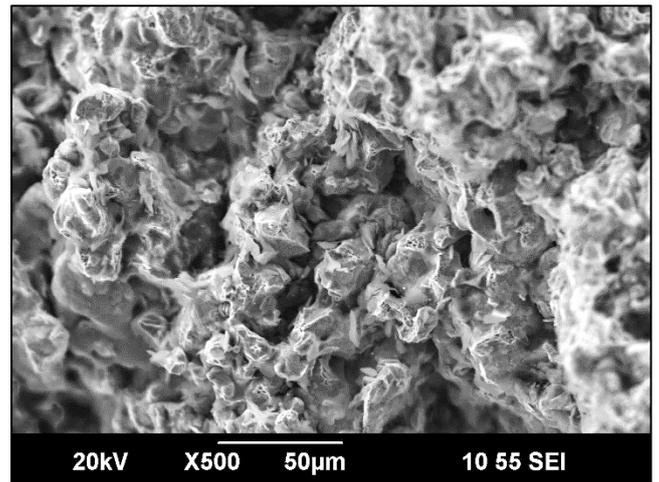
Рисунок 3.18 – Строение изломов композитного материала с 2% h-BN (РЭМ)

Дальнейшее увеличение содержания нитрида бора в составе компактов до 6% по массе не приводит к существенному изменению морфологии изломов. Наблюдается постепенное снижение доли вязкой составляющей до 4,7% с заметным увеличением количества частиц h-BN (рис. 3.19, 3.20).

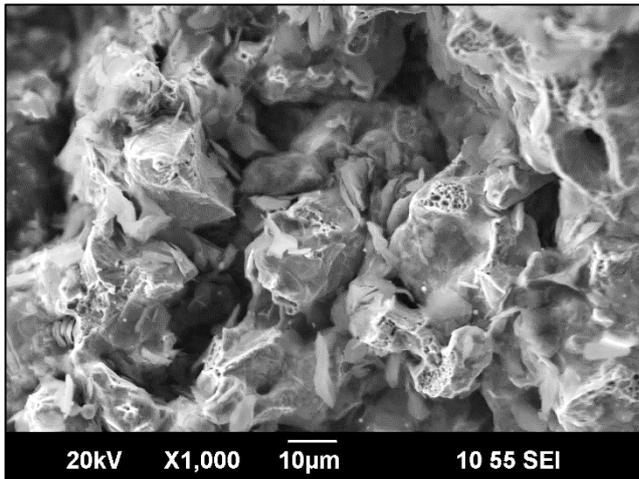
Следует отдельно отметить, что несмотря на низкую пластичность исследуемых порошковых компактов, разрушение при ударном воздействии происходит не в одной плоскости. На поверхности всех изломов наблюдаются локальные макро «ямки» размером до 100 мкм (рис. 3.17-3.20, а). Очевидно, что разрушение подобных композитных материалов происходит по наиболее слабым границам. Подобное локальное разрушение материала, в случае его применения в конструкциях уплотнений проточной части паровых турбин, в процессе контактного воздействия при эксплуатации не окажет никакого влияния на работоспособность других узлов и изделия в целом.



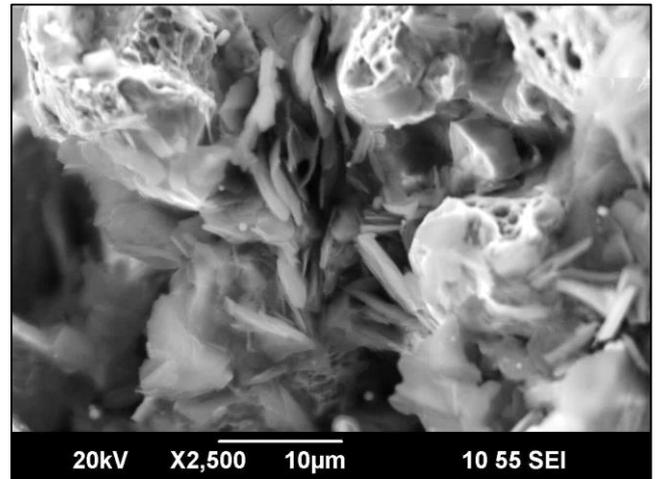
a)



б)

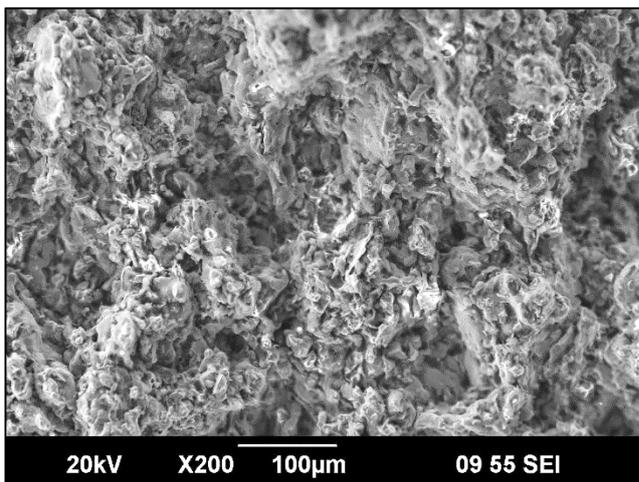


в)

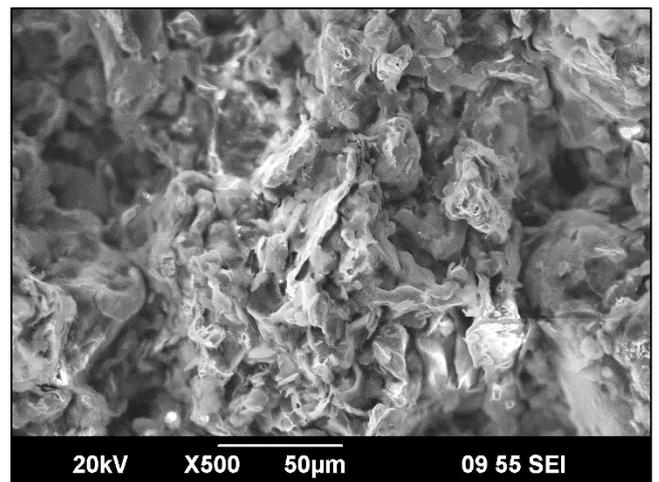


г)

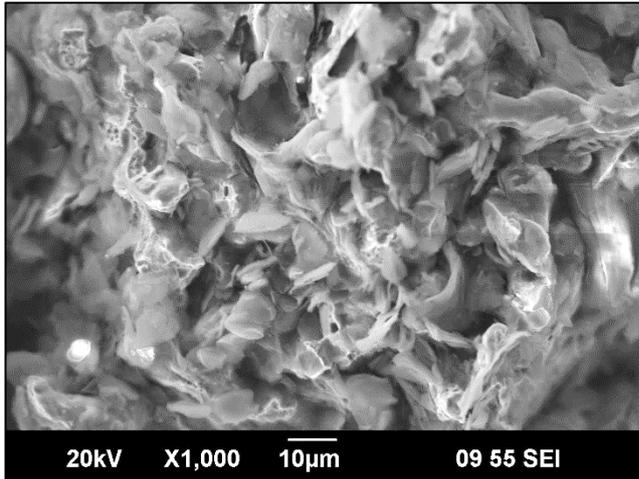
Рисунок 3.19 – Структура изломов композитного материала с 4% h-BN (РЭМ)



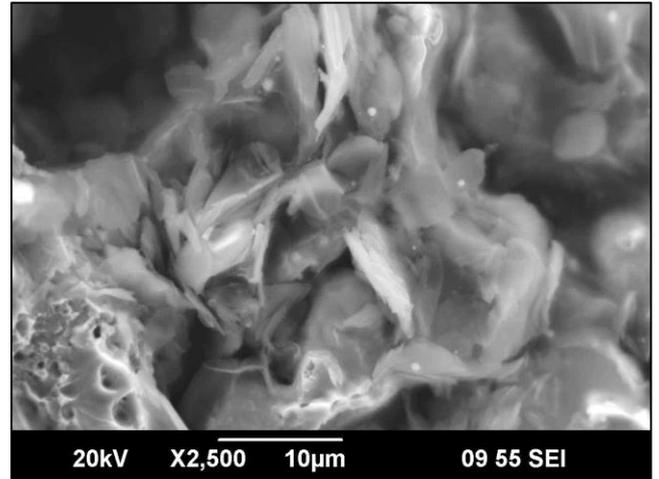
a)



б)



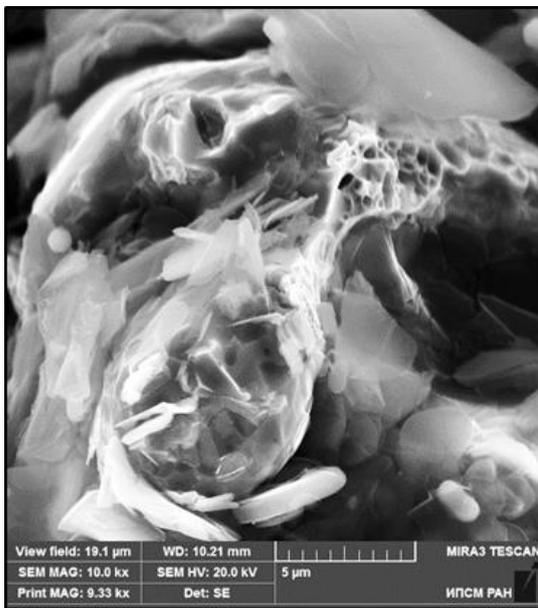
в)



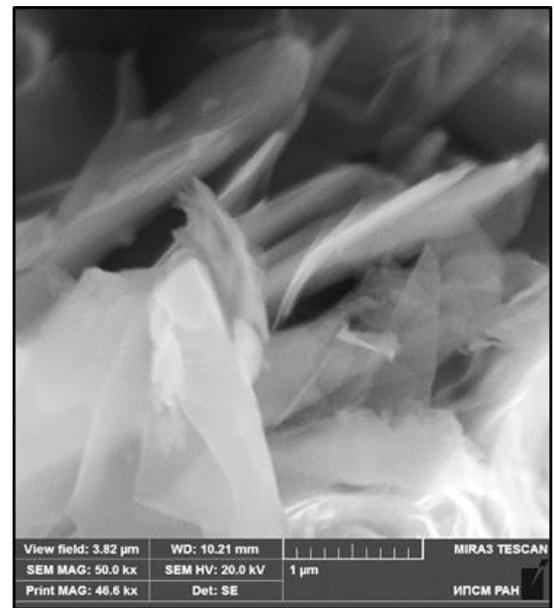
г)

Рисунок 3.20 – Структура изломов композитного материала с 6% h-BN (РЭМ)

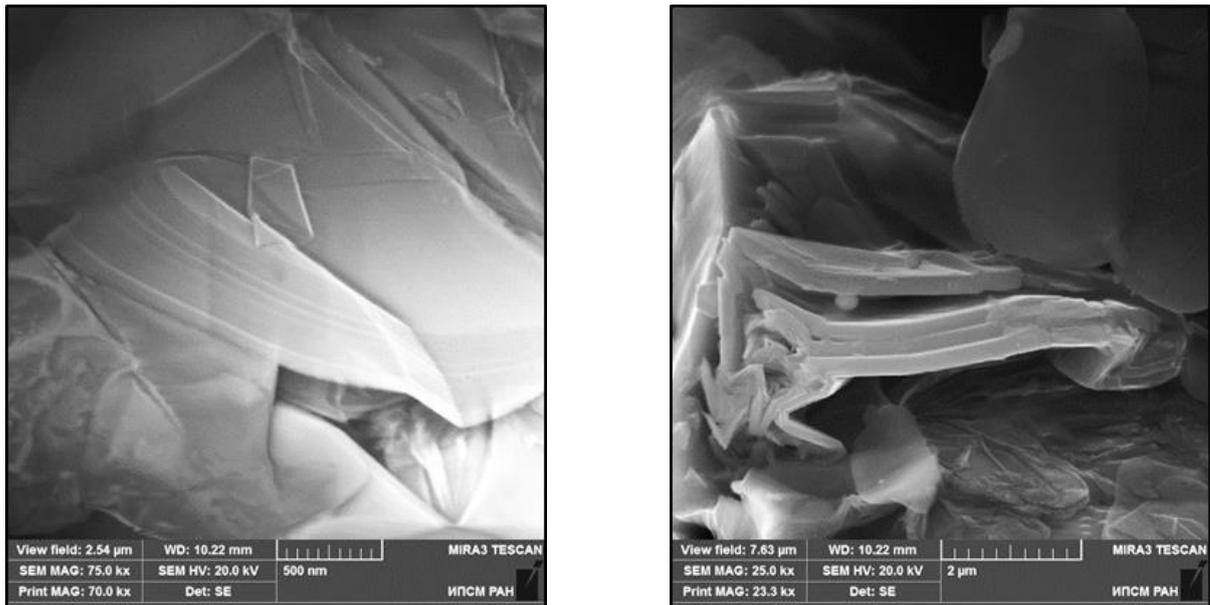
Исследование частиц нитрида бора в структуре изломов компактов при большем увеличении показало, что вне зависимости от ориентирования по отношению к оси приложения ударной нагрузки наблюдается их расслоение на тонкие ламели толщиной 8...100 нм (рис. 3.21).



а)



б)



в)

г)

Рисунок 3.21 – Расслоение частиц h-BN в структуре изломов (РЭМ)

3.4 Влияние усилия деформирования на формирование микроструктуры и свойств композитного материала

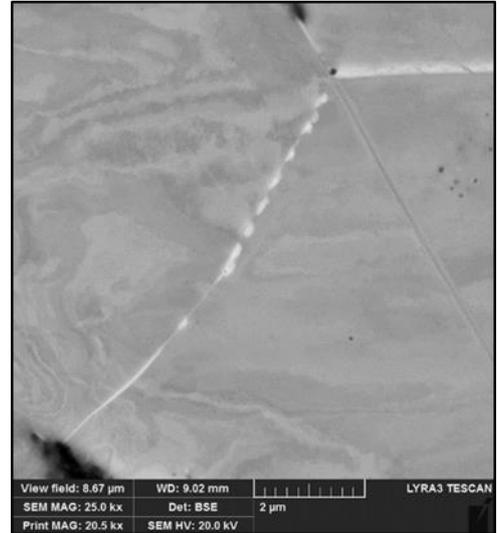
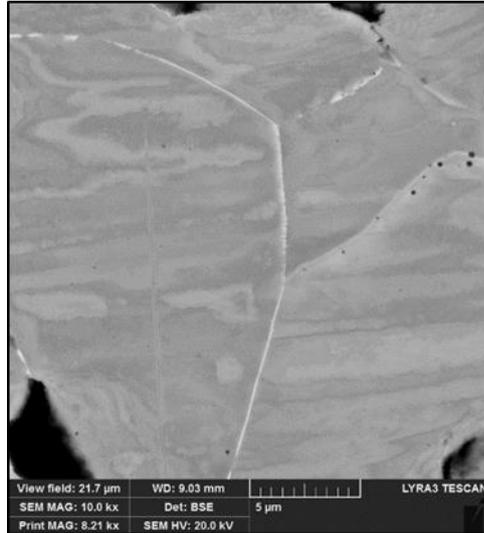
Проведенные исследования позволили выявить наличие дисперсных наночастиц h-BN по границам зерен, оказывающих определяющее влияние на комплекс физико-механических свойств композитного материала. Однако природа их формирования остается не совсем понятной и требует проведения дополнительных исследований.

С этой целью с учетом неоднородности распределения напряжений в порошковых материалах при деформировании было изучено влияние усилия прессования на формирование микроструктуры и физико-механических свойств на примере композитного материала с содержанием нитрида бора 4% по массе. На рисунке 3.22 представлена микроструктура композитного материала с содержанием 4% нитрида бора по массе сформированная при различном усилии прессования и последующем спекании.

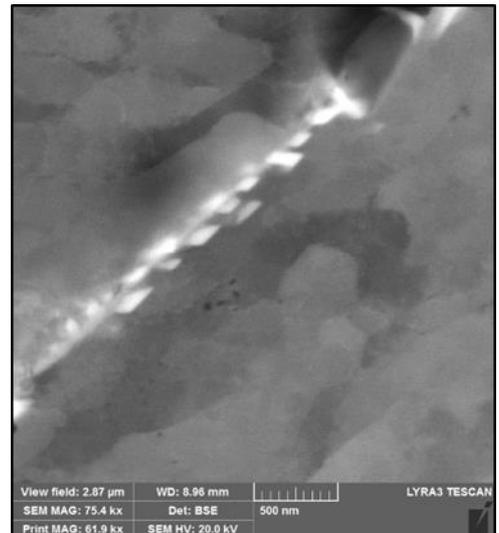
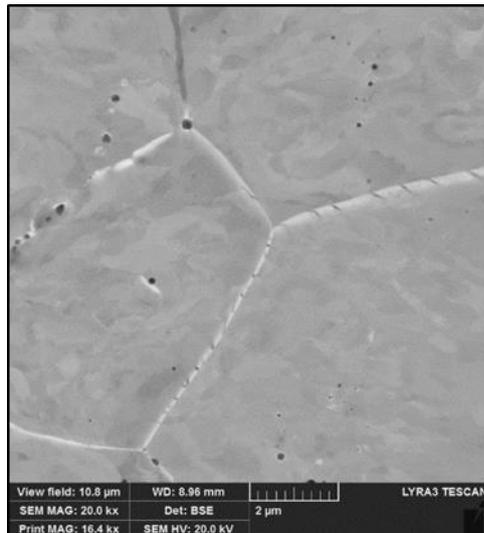
Из представленных снимков видно, что вне зависимости от прикладываемого усилия при прессовании по границам зерен формируются фрагментированные

частицы нитрида бора толщиной от 8 до 100 нм. Следует отдельно отметить, что усилие прессования не оказывает влияния и на удельную долю границ зерен, в которых наблюдаются частицы нитрида бора. Для всех исследуемых образцов она составляет около 76%.

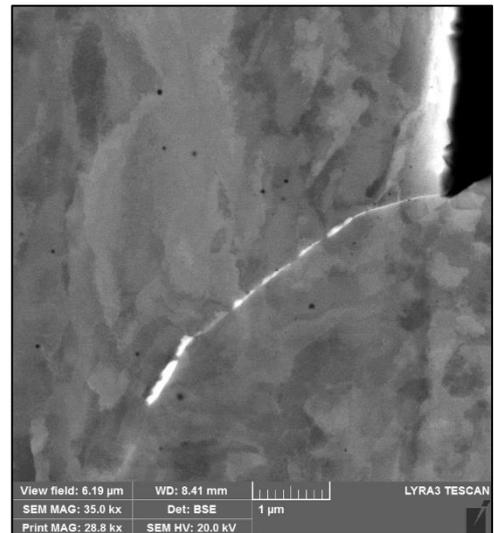
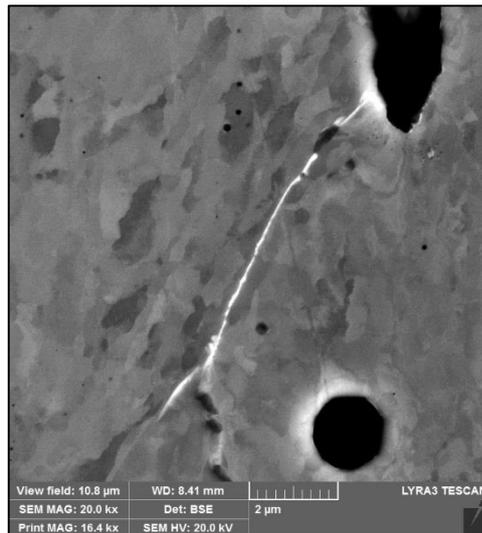
40 т.с.



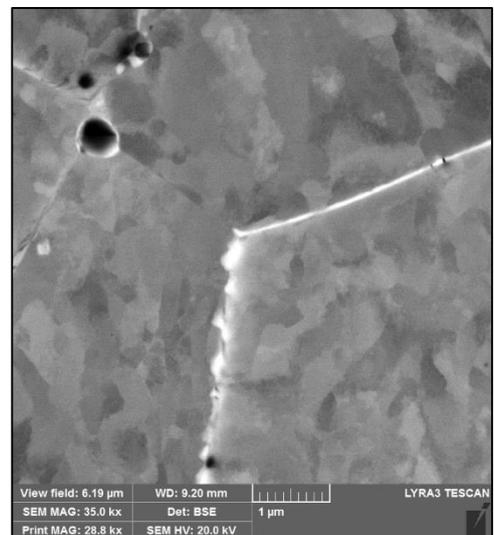
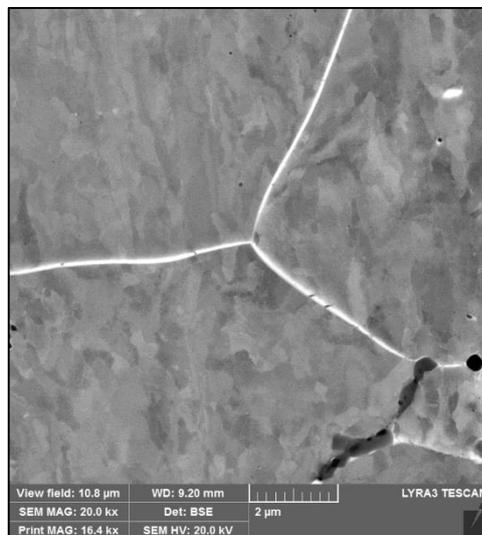
60 т.с.



80 т.с.



100 т.с.



120 т.с.

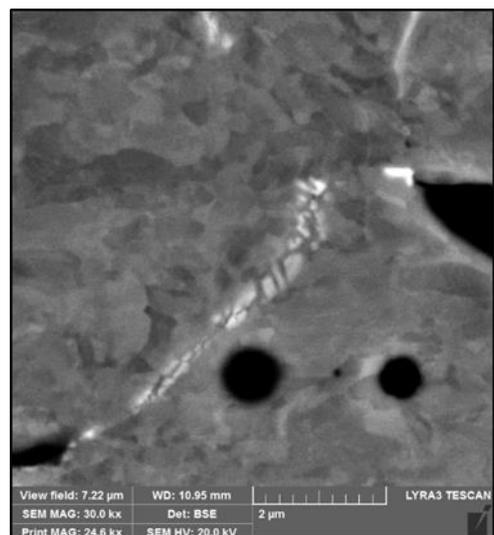
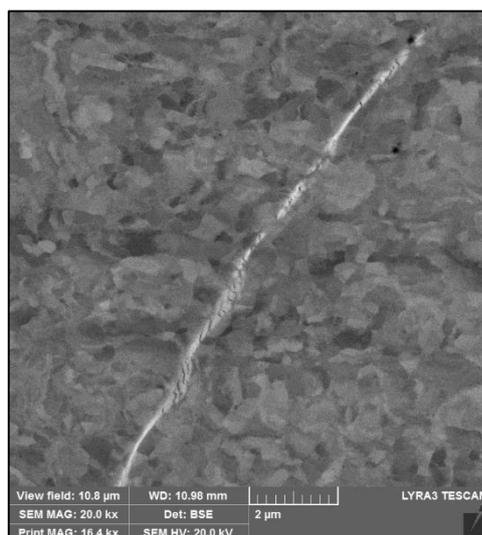


Рисунок 3.22 – Микроструктура композитного материала с 4% h-BN по массе, сформированная при различном усилии прессования и последующем спекании (РЭМ)

Оценка физических свойств композитных компактов, полученных с различным усилием прессования, показала их прямолинейную зависимость: чем выше усилие прессования, тем выше плотность и коэффициент термического линейного расширения (рис. 3.23). Причем в данном случае увеличение значений КТЛР напрямую зависит от плотности образцов, т.е. величины площади соприкосновения металлических частиц друг с другом.

Исследование влияния усилия прессования на прочность и пластичность формируемого композитного материала показали постепенное увеличение характеристик прочности как при комнатной, так и при повышенной температуре (рис. 3.25). При этом увеличение усилия прессования не оказывает существенного влияния на пластичность (рис. 3.24).

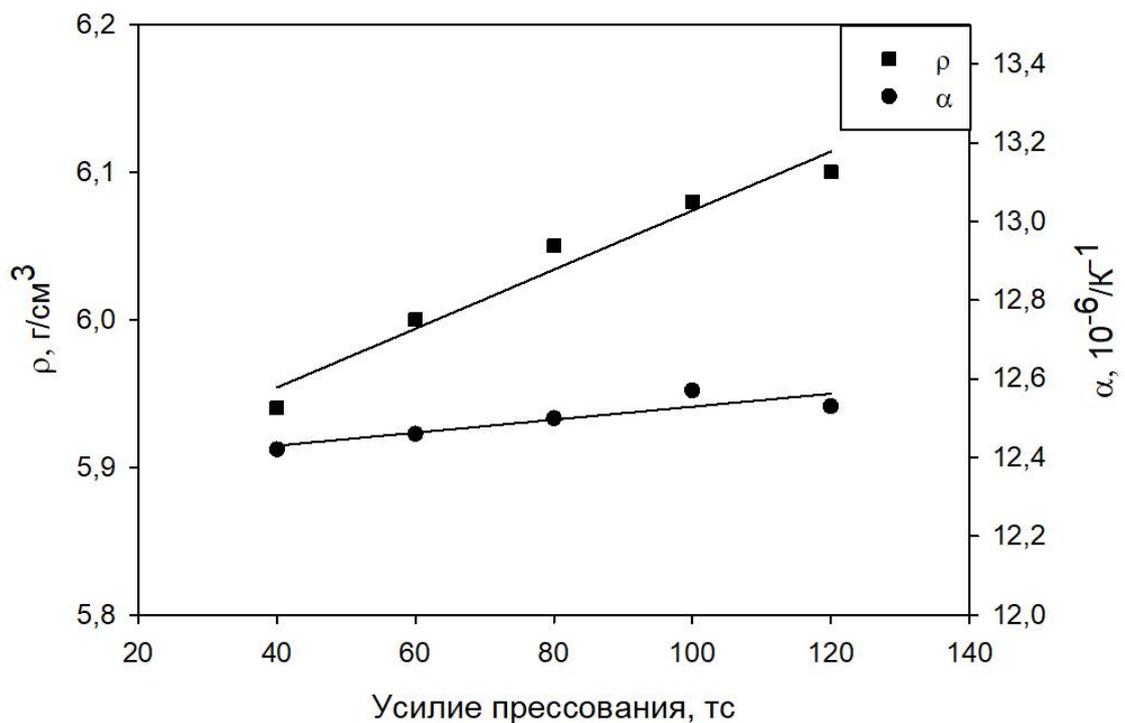


Рисунок 3.23 – Влияние усилия прессования на физические свойства композитного материала с содержанием 4% h-BN по массе

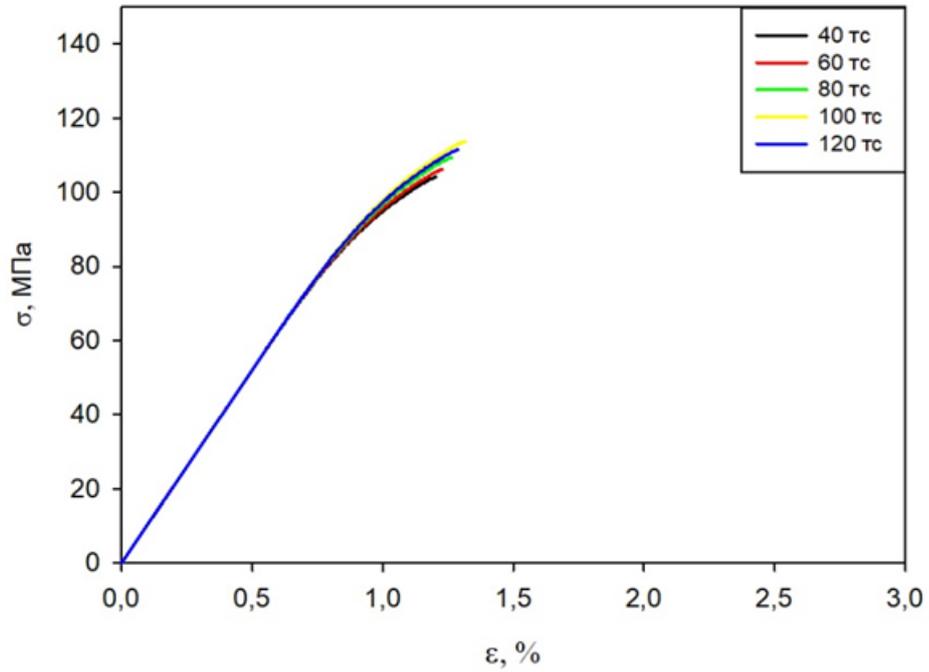


Рисунок 3.24 – Кривые растяжения при 600 °С образцов, изготовленных из композитного материала с содержанием 4% h-BN сформированных при различном усилии прессования

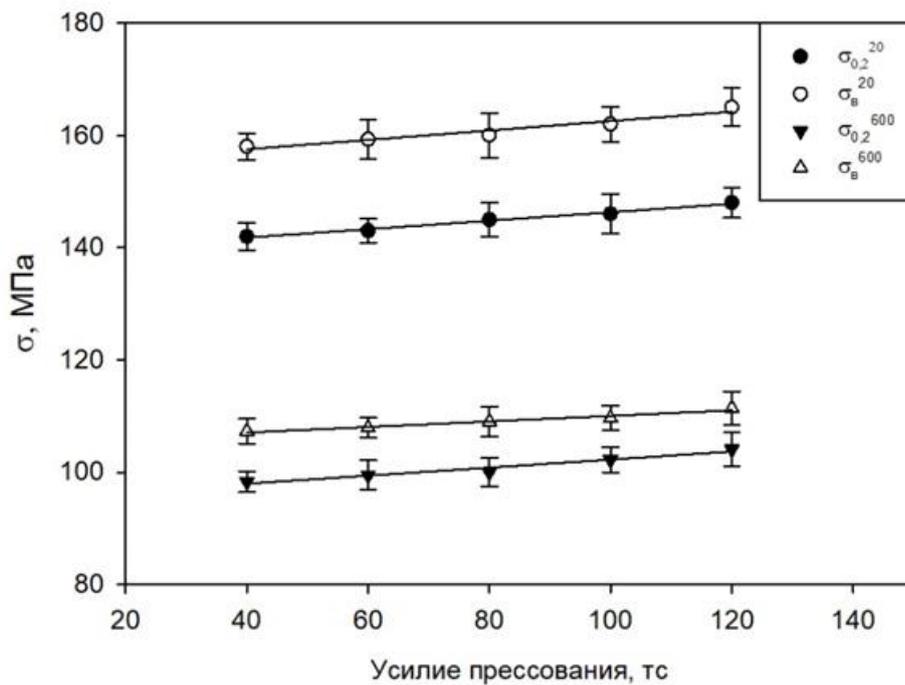


Рисунок 3.25 – Влияние усилии прессования на прочностные характеристики композитного материала содержания h-BN 4% по массе

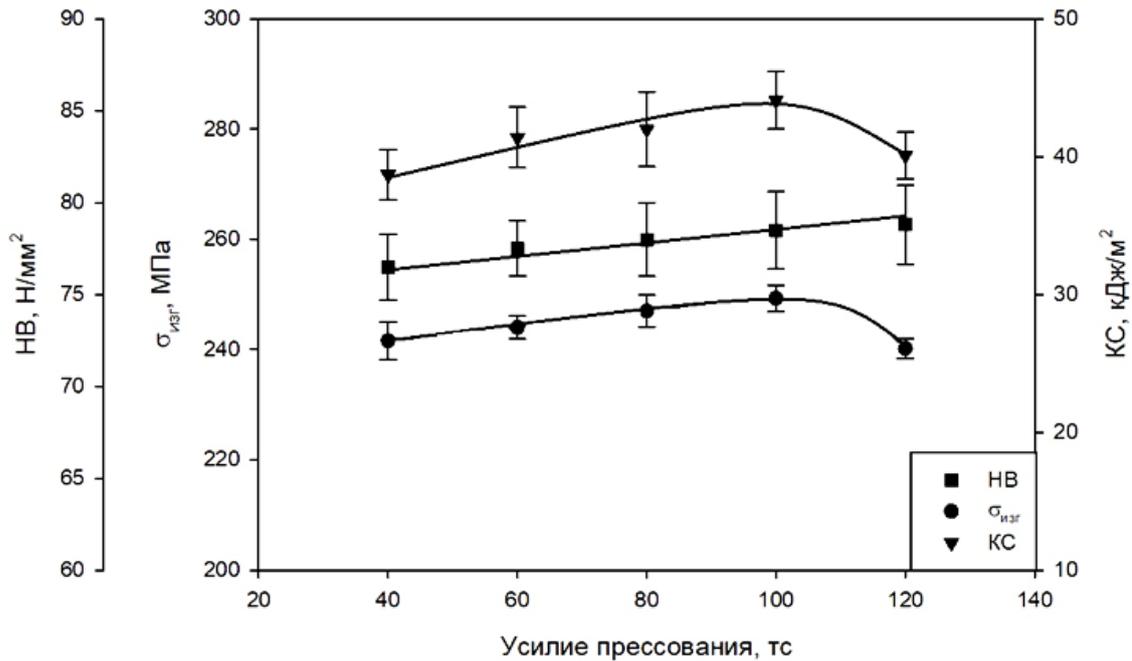


Рисунок 3.26 – Влияние усилия прессования на твердость, прочность при изгибе и вязкость разрушения композитного материала с содержанием h-BN 4% по массе

Аналогичная тенденция к постепенному увеличению прослеживается и для значений твердости образцов. (рис. 3.26). Исключением из этой зависимости является характер изменения прочности на изгиб и ударной вязкости. При увеличении усилия прессования они монотонно возрастают, достигая максимума при значении усилия прессования 100 т.с. Дальнейшее увеличение прикладываемого усилия до 120 т.с. приводит к резкому падению свойств. Причина такого снижения кроется в появлении задиrow на боковых поверхностях прессованных образцов, которые являются концентраторами напряжений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 3

Проведенный комплекс исследований компактов различного компонентного состава позволили сделать следующие основные выводы:

- 1) Выбранная технология получения компактов обеспечивает формирование композитного материала на основе порошка коррозионностойкой стали с добавками частиц нитрида бора.

- 2) Установлено, что введение в состав исходной порошковой смеси h-BN приводит к формированию в микроструктуре композитного материала фрагментированных частиц с размерами 8...100 нм, расположенными как по границам зерен, так и в теле зерен металлической матрицы.
- 3) Установлено, что закономерное распределение наночастиц нитрида бора по границам металлических зерен оказывает определяющее влияние на формируемый комплекс физико-механических свойств композитного материала.
- 4) Композитный материал с содержанием нитрида бора в интервале от 4 до 5% по массе удовлетворяет требованиям, предъявляемым к материалу уплотнений проточной части паровых турбин.

ГЛАВА 4 ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА ПХ13М2-BN

Полученные данные по изменению микроструктуры компактов с увеличением содержания нитрида бора и усилия при прессовании позволяют рассмотреть вопрос ее формирования, предварительно разделив поставленную задачу на 2 составляющие: 1 – влияние деформации при прессовании, 2 – влияние высокой температуры при спекании.

На рис. 4.1 представлена феноменологическая модель влияния деформации на формирование структуры компактов. При прессовании часть равномерно распределённых частиц h-BN в объеме шихты оказывает «смазывающий эффект», способствуя более плотному прилеганию частиц металлического порошка друг другу. При этом частицы нитрида бора в условиях постепенного уплотнения материала частично подвержены либо прямому быстрому вытеснению в более свободные зоны пониженной плотности, где развитие процессов деформации не началось из-за недостаточности прикладываемого усилия, либо постепенному медленному вытеснению за счет возникающих напряжений сдвига и разрушения взаимосвязи крайних, граничащих с металлическими частицами, слоев (расслаивание частиц нитрида бора (рис. 4.2)). Подобное направленное движение частиц нитрида бора в процессе прессования приводит к формированию в объеме компактов закрытой зернограничной пористости, заполненной частицами h-BN (области с повышенной концентрацией h-BN). При этом, чем выше содержание нитрида бора в исходной шихте, тем больше объемная доля зернограничных пор [116, 119].

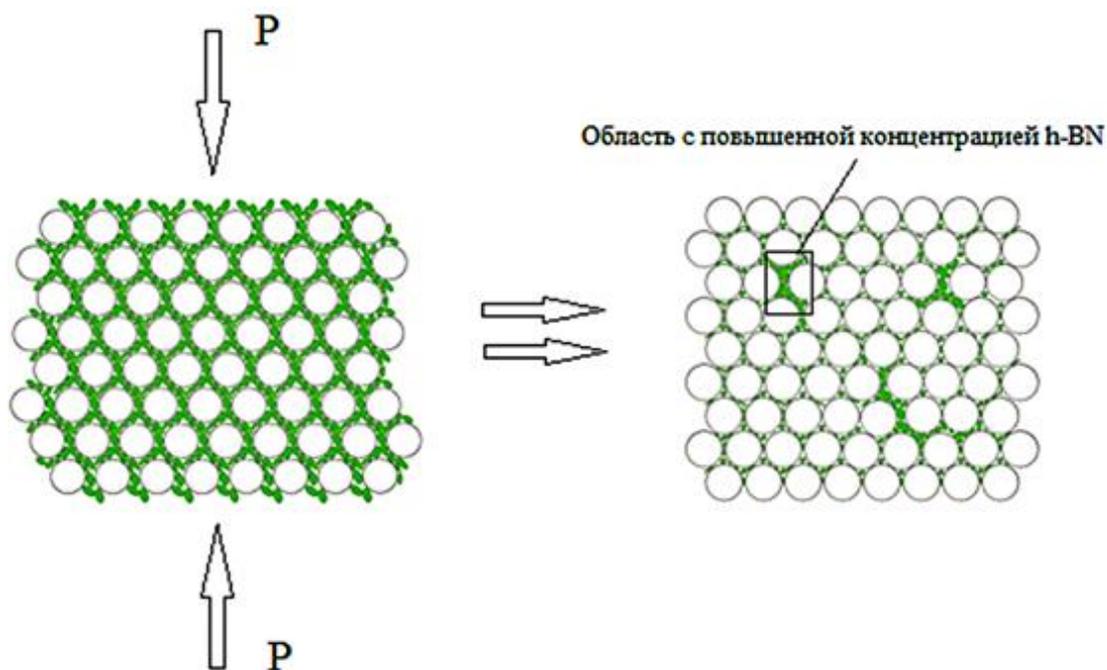


Рисунок 4.1 – Феноменологическая модель влияния деформации на структурообразование компактов

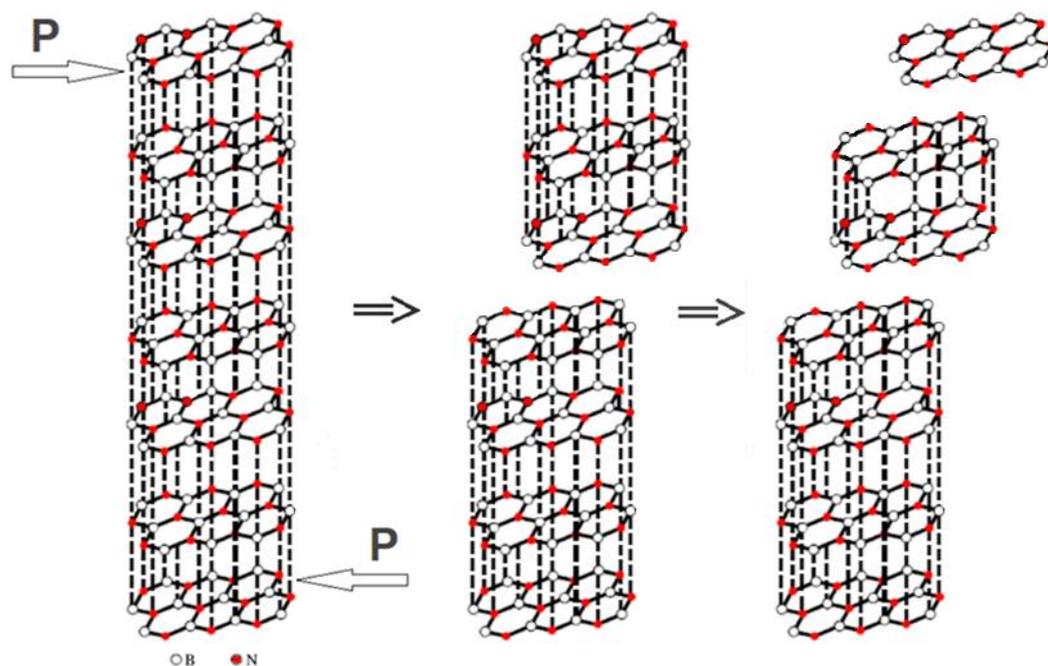


Рисунок 4.2 – Схематическое изображение процесса расслаивания частиц нитрида бора

При спекании формирование структуры происходит по модели, описанной в работе [111]. На границах раздела, в которых имеются точечные контакты металлических частиц друг с другом, или толщина нитридной прослойки настолько мала, что вследствие термического расширения порошка ПХ13М2 возможно их

соприкосновения друг с другом, развиваются процессы диффузионного массопереноса, происходит образование перемычек спекания и слияние металлических частиц с образованием более крупных зерен. При этом возможно частичное поглощение частиц h-BN растущими металлическими зернами (рис. 3.9, а, в и 4.3, б) [116, 119]. По границам раздела с большим содержанием керамических частиц и в областях с повышенной концентрацией нитрида бора развитие процессов массопереноса и рекристаллизации блокируется.

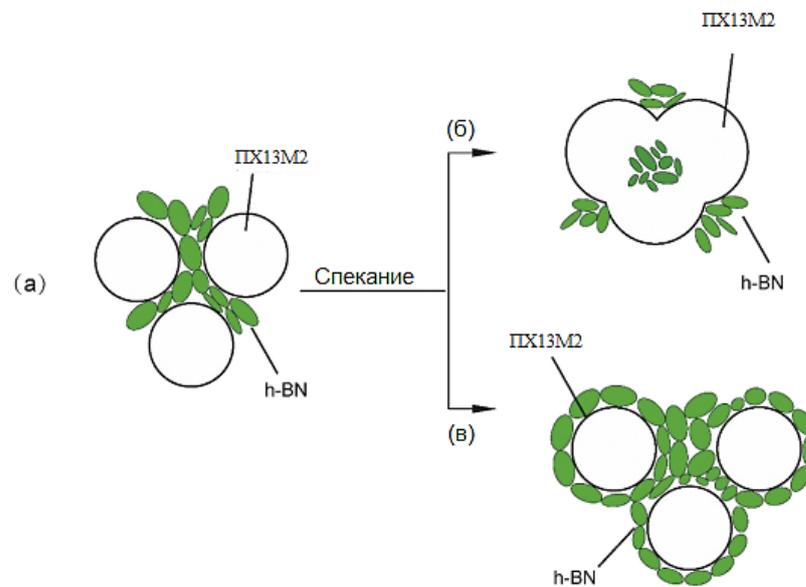


Рисунок 4.3 – Феноменологическая модель структурообразования при спекании

Представленные схемы весьма точно описывают процессы формирования макро и микроstructures исследуемого композитного материала. Однако они не объясняют отсутствия четкой границы раздела между частицами нитрида бора и металлической матрицей. Более того, наличие неоднородных по толщине частиц нитрида бора в пределах одной границы зерна наводит на мысль о гораздо более сложном взаимодействии частиц h-BN и металлической матрицы (рис. 3.9 и 3.22).

Изучению межфазных границ посвящено много работ. Их подробный анализ представлен в [112]. Показано, что твердофазное смачивание происходит при низких температурах, однако сама по себе температура не является причиной наличия или отсутствия превращения смачивания. Оно, как и жидкофазное смачивание, зависит от значения поверхностных энергий границ зерен и значения

поверхностной энергии межфазной границы [112]. При этом возможно появление следующих видов смачивания, отличающихся по морфологическому признаку: полное, неполное и псевдонеполное.

С целью подтверждения предположения о смачивании межфазных границ h-BN – металлический порошок были проведены исследования спрессованного композитного материала с содержанием нитрида бора 4% по массе без спекания. На рисунке 4.4 приведена микроструктура такого компакта.

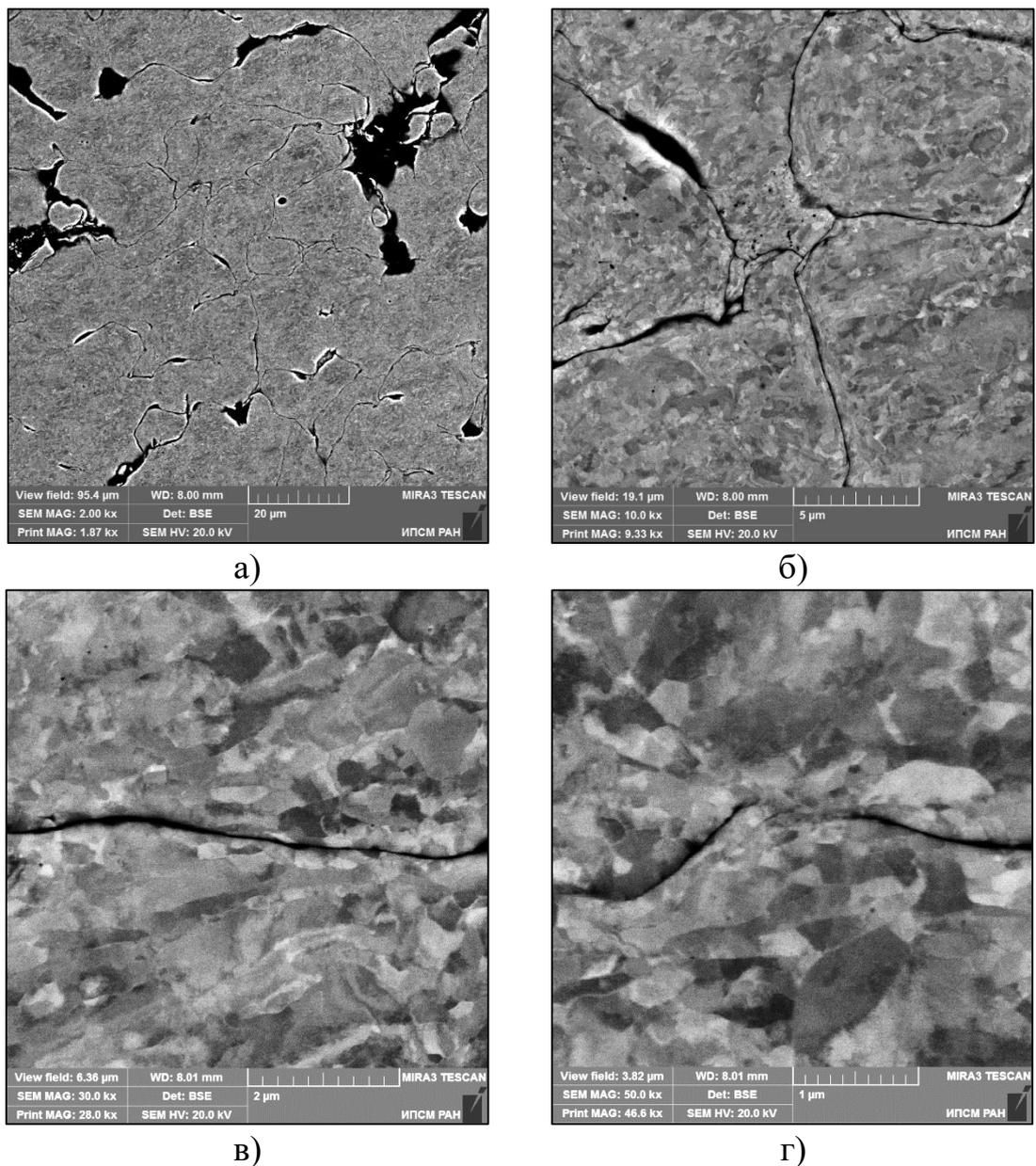


Рисунок 4.4 – Микроструктура (РЭМ) композитного материала с содержанием 4% h-BN после прессования (до спекания)

Исследование микроструктуры композитного материала с содержанием 4% h-BN до спекания показало полное отсутствие частиц нитрида бора в границах зерен. Следовательно, в процессе спекания компактов из исследуемого композитного материала на границах раздела металлическая матрица – частицы h-BN протекают процессы смачивания. Основываясь на данных работы [112], по характерному внешнему виду границ зерен с наночастицами керамики можно предположить, что происходит полное и псевдонеполное смачивание.

Таким образом, образование взаимосвязи между металлической матрицей и частицами нитрида бора в совокупности с особенностями его кристаллического строения (взаимодействие между плотноупакованными слоями кристаллической решетки гексагонального нитрида бора осуществляется за счет сил Ван-дер-Ваальса) позволяет управлять прочностными свойствами исследуемого композитного материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 4

1) Разработана феноменологическая модель формирования протяженных зернограницных областей и наночастиц по границам зерен в микроструктуре порошковых композитных материалов на металлической основе с добавками наноразмерных элементов с графитоподобной структурой.

2) Впервые установлено, что на границе раздела металл-керамическая частица происходит смачивание поверхности с образованием взаимосвязи, обеспечивающее формирование улучшенного комплекса физико-механических свойств композитного материала.

ГЛАВА 5 ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА РАЗРАБОТАННОГО НАНОСТРУКТУРНОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА ПХ13М2-ВН ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА

К конструкционным материалам, длительно работающим при повышенных температурах, наряду с соответствием по физико-механическим свойствам предъявляются весьма жесткие требования по эксплуатационным характеристикам. Данная глава будет посвящена вопросам стабильности микроструктуры и свойств разработанного композитного материала при длительном термическом воздействии и исследованиям его эксплуатационных характеристик с использованием специальных методик.

5.1 Температурно-ресурсные зоны эксплуатации разработанного наноструктурного композитного материала

Опыт промышленной эксплуатации показывает, что межремонтный срок работы паровых турбин составляет 7...8 лет. Следовательно, используемые при изготовлении различных деталей и узлов турбины, материалы должны сохранять свои первоначальные микроструктуру и физико-механические свойства в течение заданного времени.

При разработке новых конструкционных материалов не всегда является возможным определение условий их работоспособности по временному параметру, что связано в первую очередь с необходимостью проведения длительных дорогостоящих испытаний. В этой связи, были разработаны различные математические модели экстраполяции результатов кратковременных испытаний на более длительные. Наиболее известной и широко применимой является модель Ларсена-Миллера.

В параметрической зависимости Ларсена-Миллера используется допущение об эквивалентности в определенной степени влияния на предел длительной прочности времени и температуры. Для ее построения необходимо иметь

результаты нескольких испытаний при постоянном напряжении, разных температурах и однотипном разрушении. При этом, максимальная температура испытания не должна превышать рабочей температуры более чем на 50...100 °С, и выдержка при ней не должна вызывать новых фазовых превращений.

Матрица проведения испытаний представлены в таблице 2.1. На рисунке 5.1 представлены температурно-ресурсные зоны эксплуатации композитных материалов с содержанием нитрида бора от 4 до 5% по массе. Для удобства анализа полученные кривые были разделены на 3 характерные зоны (в соответствии с реальными условиями эксплуатации уплотнений проточной части паровых турбин):

- зона 1: зона высоких нагрузок и низких температур;
- зона 2: зона средних нагрузок и температур;
- зона 3: зона высоких температур и низких нагрузок.

Анализ полученных данных свидетельствует о высокой работоспособности разработанного композитного материала с различным содержанием нитрида бора в зоне высоких нагрузок и низких температур. Разница в долговечности составов между собой в зоне 1 составляет от 5% до 7%. В зоне средних нагрузок и температур разница в долговечности исследуемых материалов незначительно снижается и составляет от 3% до 5%, а в зоне высоких температур и низких нагрузок практически нивелируется, что в свою очередь связано с началом окислительных процессов нитрида бора при температурах около 700 °С.

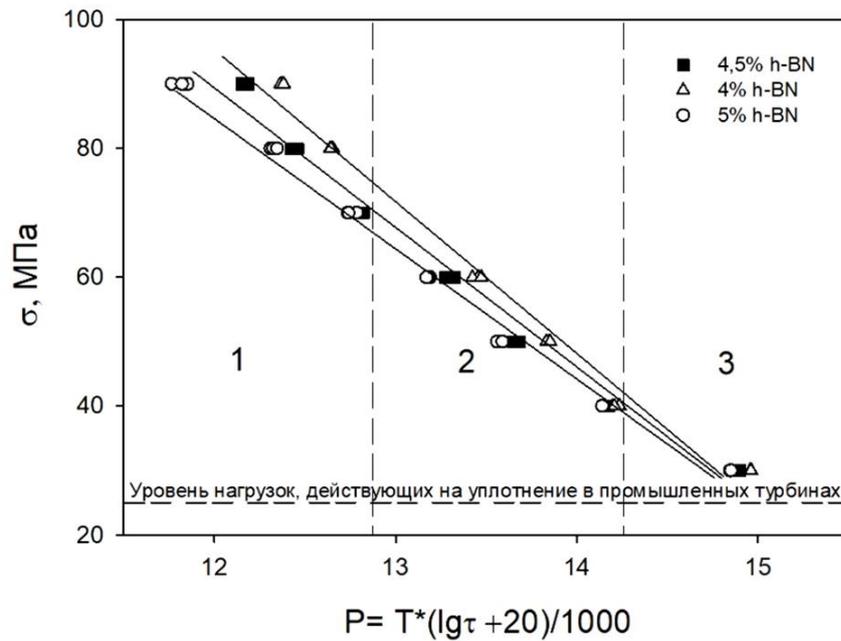


Рисунок 5.1 – Температурно-ресурсные зоны эксплуатации разработанного композитного материала с содержанием h-BN от 4 до 5% по массе

Построенные кривые в совокупности с данными физико-механических свойств композитного материала с различным содержанием нитрида бора позволяют обоснованно выбирать материал уплотнений по условиям их эксплуатации.

5.2 Оценка коэффициента трения и скорость износа, разработанного наноструктурного композитного материала

Как отмечалось выше, максимальное повышение КПД паровых турбин возможно при минимизации зазоров в надбандажных уплотнениях проточной части. При этом уменьшение зазоров потенциально может создать постоянно действующую пару трения уплотнение-гребень лопатки. В этом случае наиболее важными эксплуатационными свойствами материала уплотнений станут коэффициент трения и скорость износа.

Оценку коэффициента трения материала и скорости износа проводили на исследуемых компактах различного компонентного состава при вращательном

движении контртела. На рисунке 5.2 представлен типичный внешний вид поверхности износа разрабатываемого материала (рис. 5.2, а) и контртела (рис. 5.2, б).

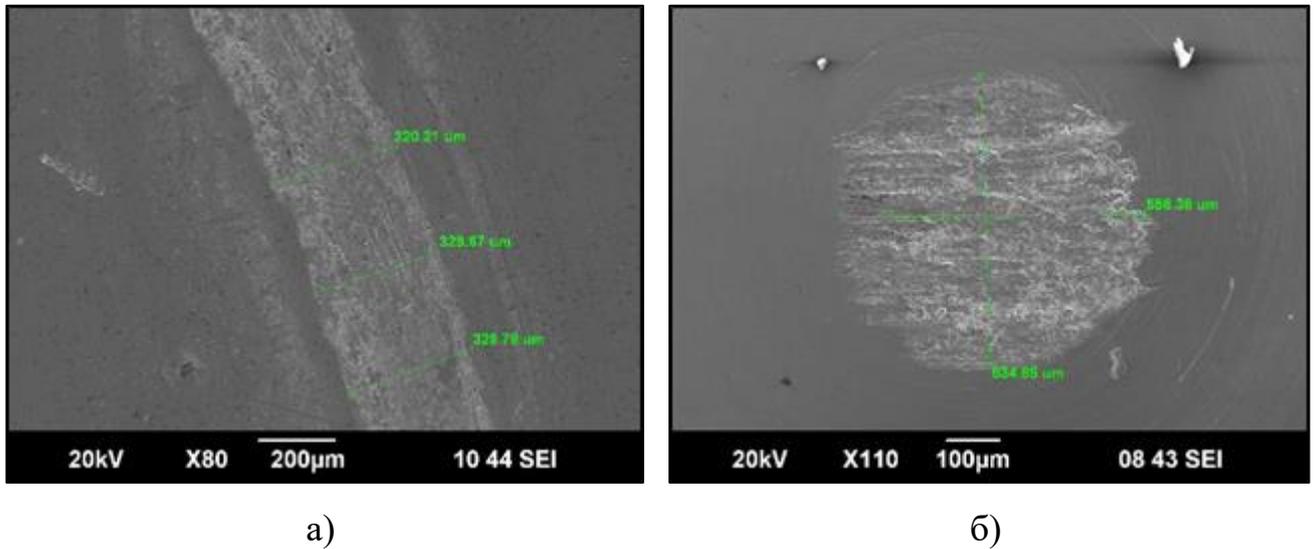


Рисунок 5.2 – Типичный внешний вид поверхности износа разрабатываемого материала и контртела (РЭМ)

Из представленных снимков видно, что в процессе испытаний происходит равномерное истирание контактируемых поверхностей. Истирание поверхности композитных материалов с содержанием нитрида бора происходит с образованием небольших по величине локальных ямок выкрашивания, размер которых не превышает 100 мкм. С увеличением содержания нитрида бора в составе композитного материала ширина и глубина канавки износа постепенно уменьшаются, что связано с смазывающим эффектом от h-BN. Аналогичная закономерность с увеличением содержания твердой смазки прослеживается и для степени износа контртела (табл. 5.1). При этом, снижение коэффициента относительного износа оказывается более интенсивным и при содержании h-BN 6% в составе композитного материала достигает соотношения 1:1 (табл. 5.1).

Расчет коэффициента трения производили в автоматическом режиме с записью диаграммы его изменения при увеличении дистанции, т.е. продолжительности контактного воздействия. На рисунке 5.3 представлен типичный график изменения величины коэффициента трения при увеличении

дистанции. График можно разделить на три характерных участка: 1) приработка – начальный участок графика, когда контактируемые поверхности свободны от дефектов и трение происходит без изменения коэффициента; 2) интенсивное истирание – участок графика с постепенным увеличением значения коэффициента трения при увеличении дистанции, связан с накоплением поверхностных дефектов; 3) катастрофический износ – участок графика, на котором вследствие постоянного локального изменения качества поверхности происходит повышенный износ контактируемых поверхностей с максимальным значением коэффициента трения.

Увеличение содержания нитрида бора в составе композитного материала не приводит к принципиальному изменению характерных участков графика изменения коэффициента трения с увеличением дистанции, однако оказывает влияние на величину участков. Так с увеличением содержания h-BN наблюдается увеличение стадии приработки и сокращение участка интенсивного износа. При этом вне зависимости от исследуемой контактной пары значения коэффициента трения на участке катастрофического износа находится около 1.

На рисунке 5.4 представлена сводная диаграмма зависимости коэффициента трения и скорости износа от состава композитного материала.

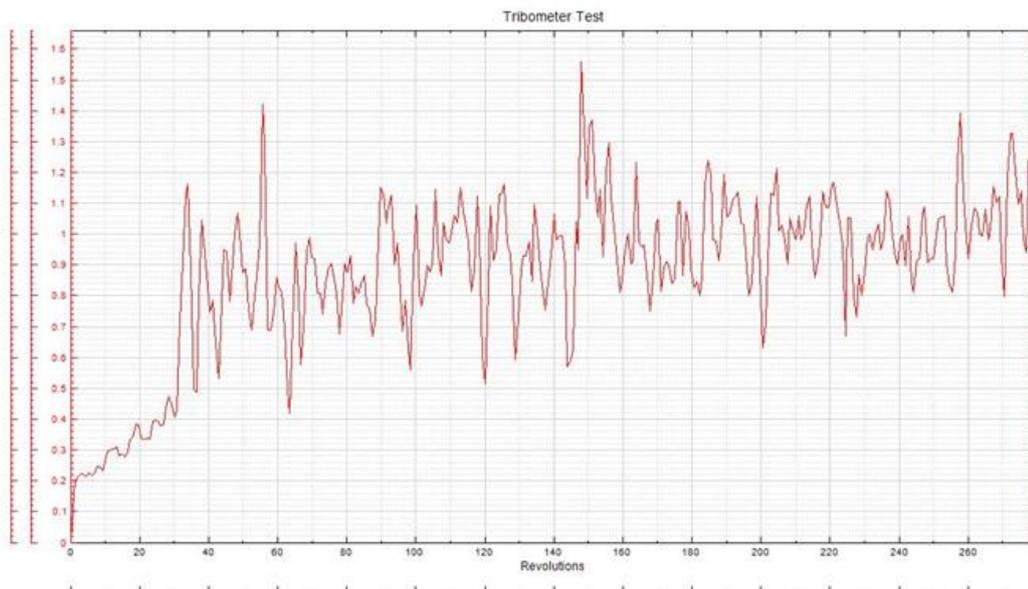


Рисунок 5.3 – Типичный график изменения коэффициента трения при увеличении дистанции

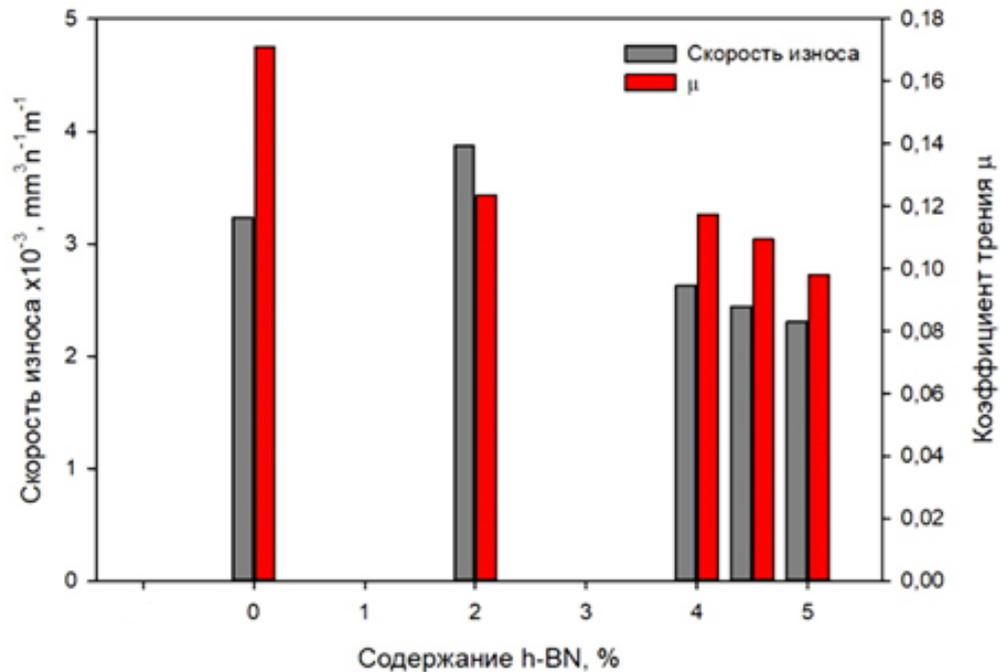


Рисунок 5.4 – Сводная диаграмма зависимости коэффициента трения и скорости износа от состава композитного материала

Из представленной диаграммы видно, что с увеличением содержания нитрида бора в составе исходной порошковой смеси происходит монотонное снижение начального коэффициента трения. При этом скорость износа композитного материала носит экстремальный характер с максимумом значений наблюдаемым при содержании h-BN 2% по массе. По-видимому, подобный характер изменения скорости износа связан с описанными выше особенностями микроструктуры и физико-механических свойств исследуемых материалов. Введение в состав исходной шихты до 2% по массе нитрида бора оказывает смазывающий эффект и способствует более плотному прилеганию металлических частиц друг к другу при прессовании. При этом в процессе спекания развитие процессов диффузионного массопереноса происходит в большем объеме металлического материала, что в свою очередь приводит к повышению прочностных характеристик материала, вязкости разрушения и, следовательно, увеличивает скорость износа. Повышение содержания нитрида бора в составе исходной шихты до 6% приводит к увеличению содержанию наночастиц в

границах зерен, которые препятствуют формированию металлической связи при спекании, оказывают положительное влияние на коэффициент трения и снижают скорость износа.

Таблица 5.1 – Параметры износа разрабатываемого материала и контртела

Содержание h-BN	Максимальная глубина канавки, мм	Линейный износ контртела, мм	Относительный износ k
0%	0,0102	0,0272	1 : (2 ÷ 3)
2%	0,0110	0,0350	1 : 3
4%	0,0085	0,0176	1 : 2
4,5%	0,0081	0,0129	1 : (1 ÷ 2)
5%	0,0078	0,0067	1 : 1

5.3 Влияние длительного термического воздействия на микроструктуру и свойства разработанного наноструктурного композитного материала

Известно, что широкому распространению ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов в промышленности препятствует ограничение по максимальной температуре эксплуатации, связанное с развитием процессов полигонизации и рекристаллизации. В этой связи, применительно к данному классу конструкционных материалов, уделяется более пристальное внимание вопросам стабильности их структуры и свойств при нагреве.

Ранее отмечалось, что межремонтный интервал эксплуатации паровых турбин составляет 8 лет. Проведение натуральных испытаний влияния длительного термического воздействия на микроструктуру и свойства разработанного наноструктурного композитного материала - трудоемкий, продолжительный процесс, и зачастую не представляется возможным. По этой причине исследование влияния длительного термического воздействия на структуру и комплекс свойств

было проведено по ускоренной методике, в которой исследуемый материал подвергается менее продолжительному нагреву, но в заведомо более агрессивных условиях. С учетом условий эксплуатации надбандажных уплотнений, температура нагрева составляла 650 °С, а максимальное время выдержки 2000 часов.

На рисунке 5.5 представлена микроструктура наноструктурного композитного материала с содержанием h-BN 4% по массе в исходном состоянии и после длительной термоэкспозиции. Полученные снимки свидетельствуют об идентичности микроструктуры. Средний размер металлических зерен составляет в обоих случаях около 60 мкм. По границам зерен наблюдаются наночастицы нитрида бора, следовательно, длительное термическое воздействие не оказало никакого влияния на микроструктуру.

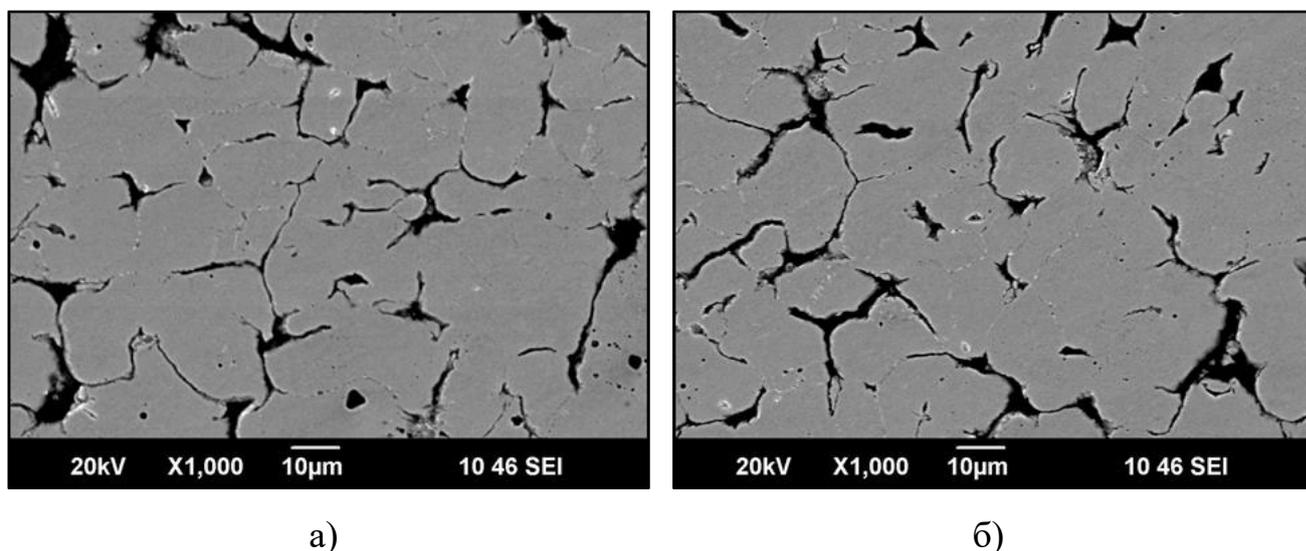


Рисунок 5.5 – Микроструктура композитного материала с содержанием 4% h-BN до (а) и после (б) длительной термоэкспозиции (РЭМ)

Проведенная оценка физико-механических характеристик наноструктурного композитного материала, подвергнутого длительному термическому воздействию, также не выявила влияния нагрева на изменение свойств (рис. 5.6). Длительная термоэкспозиция не оказала влияния и на температурно-ресурсные зоны эксплуатации, которые остаются в той же области значений в пределах статистической ошибки определения (рис.5.7).

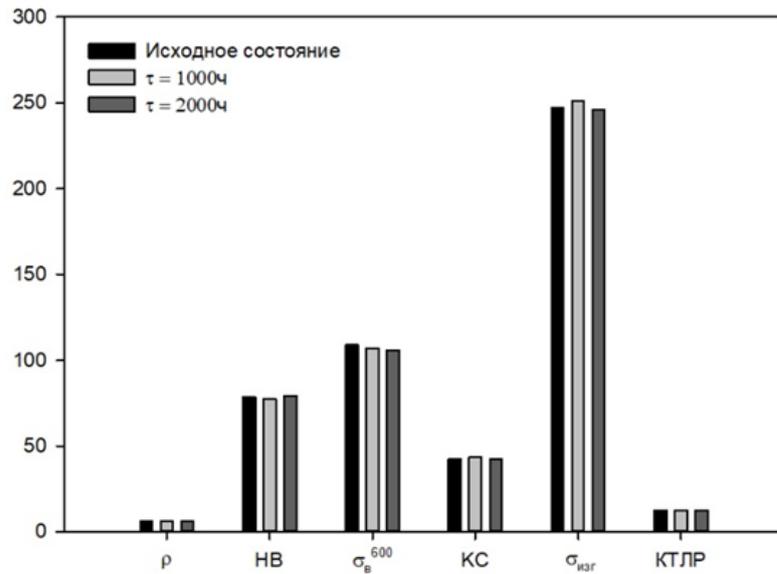


Рисунок 5.6 – Влияние длительной термоэкспозиции на физико-механические характеристики наноструктурного композитного материала

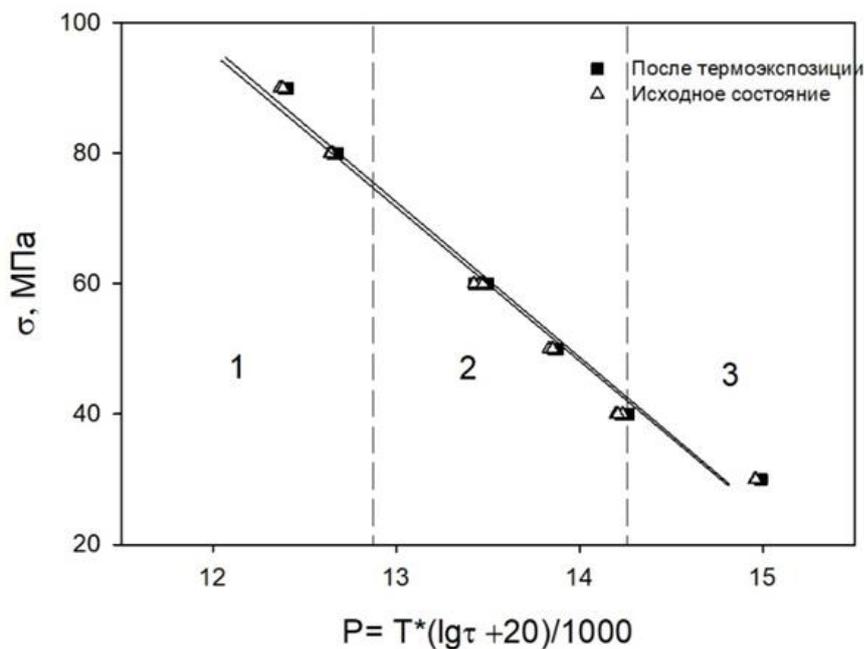


Рисунок 5.7 – Температурно-ресурсные зоны эксплуатации разработанного наноструктурного композитного материала с содержанием 4% h-BN до и после длительной термоэкспозиции

Результаты проведенных исследований влияния длительного термического воздействия на микроструктуру и свойства разработанного композитного материала свидетельствуют о его стабильности в интервале температур 20...650 °С

и позволяют начать опытно-промышленные испытания в составе энергетических паровых установок.

5.4 Опытные-промышленные испытания разработанного наноструктурного композитного материала

Внедрение новых конструкций и материалов уплотнений проточной части паровых турбин возможно лишь после проведения натуральных многоступенчатых испытаний надежности и безопасности задевания ротора об уплотнение. С этой целью из разработанного наноструктурного композитного материала (на примере материала с содержанием h-BN 4% по массе) была изготовлена опытная партия уплотнительных вставок, профиль которых представлен на рисунке 5.8.

Натурные испытания проводились в два этапа:

- 1) На испытательном стенде СКБ «Турбина» (входит в состав АО «Силовые машины», г. Санкт-Петербург);
- 2) В составе экспериментальной паровой турbine ЭТП-2 первой очереди Выборгской ТЭЦ-17.

Испытания на стенде СКБ «Турбина» проводились при комнатной температуре в воздушной среде с целью оценки возможности контактного воздействия с гребешками ротора в составе турбины. Испытания проводились при различных режимах с изменением как скорости вращения ротора, так и условий его подачи для контактного воздействия.

По результатам проведенных испытаний на специальном стенде установлено, что максимальная температура в зоне контакта не превышала 85 °С, истирание наноструктурного композитного материала происходит в виде мелкодисперсной пыли. Геометрия вреза соответствует величине радиального и осевого перемещения гребней лопаток (рис. 5.9.). При этом, повреждений ротора экспериментального стенда, налипания на него материала уплотнения не обнаружено. В совокупности, полученные данные позволили принять решение о

проведении второго этапа натуральных испытаний в составе экспериментальной паровой турбины ЭТП-2 первой очереди Выборгской ТЭЦ-17.

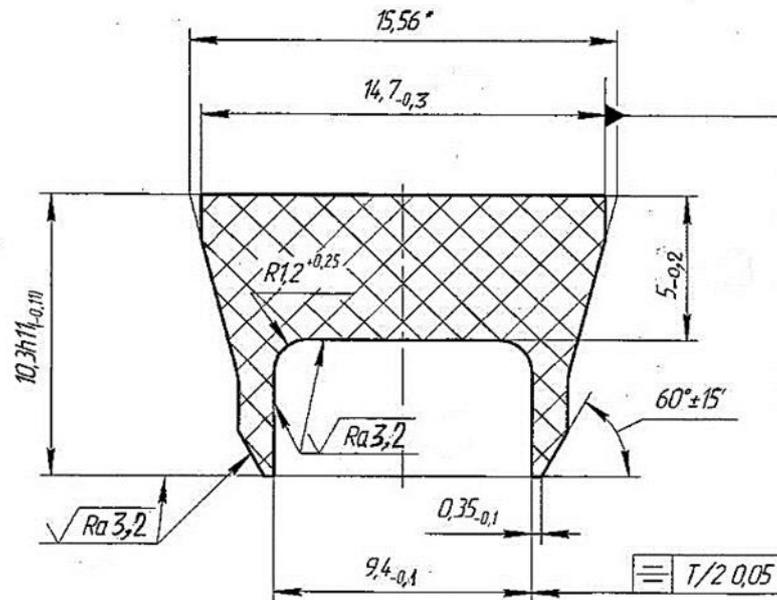


Рисунок 5.8 – Профиль уплотнительных вставок для натуральных испытаний

Испытания на ЭТП-2 проводились в условиях, приближенных к реальным по температуре, давлению и среде с осуществлением подвода греющего пара в зону экспериментальной обоймы уплотнений. Испытания также проводились при различных режимах вращения и скорости подачи ротора.

По результатам испытаний отмечено следующие:

- 1) Обеспечиваются минимальные радиальные зазоры и сохранение технических показателей турбины на протяжении всего времени работы;
- 2) Безопасное врезание в композитный материал уплотнений и сохранение гребней лопаточного аппарата в случае радиальных и осевых смещений ротора турбины;
- 3) Отсутствие значительного нагрева гребней лопаток при контакте с материалом уплотнений;
- 4) Отсутствие налипания материала уплотнения на гребни лопаток.
- 5) Геометрия вреза соответствует величине радиального и осевого перемещения гребней лопаток.

б) В уплотнении отсутствуют сколы и трещины.

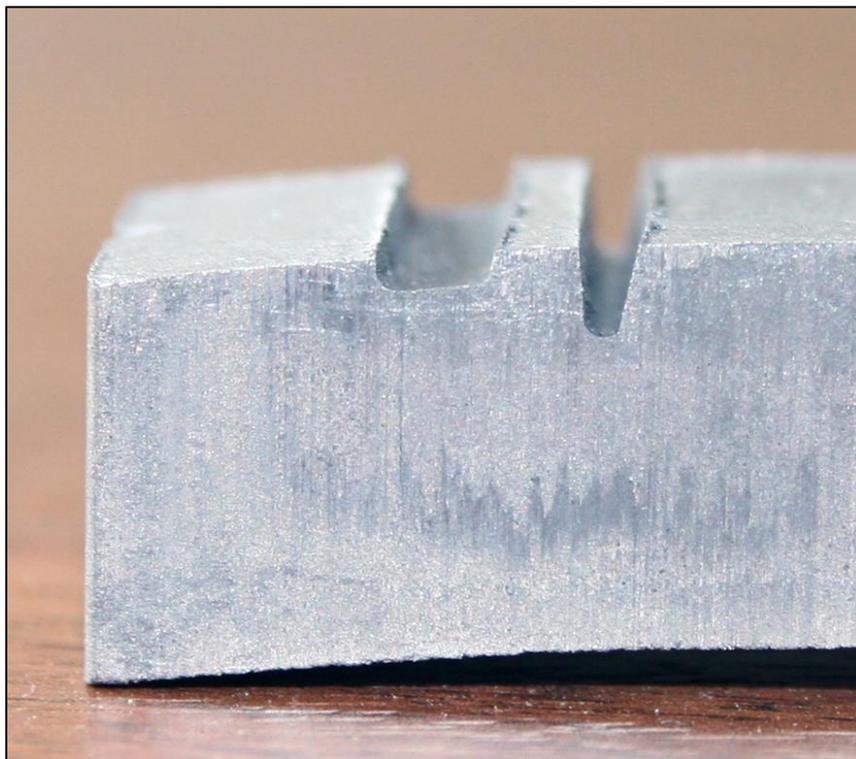


Рисунок 5.9 – Внешний вид вставки из композитного материала после испытаний на врезание на испытательном стенде СКБ «Турбина»

По результатам комплексных натурных испытаний от АО «Силловые машины» было получено положительное решение о возможности применения разработанного наноструктурного композитного материала в конструкциях надбандажных уплотнений проточной части паровых турбин.

Кроме этого, по запросу АО «Силловые машины», наряду с «монолитными» уплотнительными вставками, изготовленными из разработанного наноструктурного композитного материала, была разработана технология изготовления многослойных уплотнительных вставок с усиленными бортиками¹, планируемыми к серийному использованию на перспективных паровых турбинах с сверхкритическими параметрами пара [120].

¹ Автор выражает благодарность ООО НПП «Уралавиаспецтехнология» за предоставленные производственные мощности и возможность проведения работы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 5

1. Определены температурно-ресурсные зоны эксплуатации разработанного наноструктурного композитного материала с содержанием h-BN от 4 до 5% по массе, позволяющие обоснованно выбирать состав материала по условиям эксплуатации уплотнений.

2. Установлено, что введение в состав исходной порошковой смеси нитрида бора приводит к снижению коэффициента трения и скорости износа композитного материала за счет смазывающего действия h-BN.

3. Установлено, что длительное термическое воздействие при температурах до 650 °С не оказывает влияние на микроструктуру и комплекс физико-механических свойств.

4. Проведенные натурные испытания уплотнительных вставок, изготовленных из разработанного наноструктурного композитного материала, показали, что его истирание происходит в виде мелкодисперсной пыли. При этом налипания разработанного материала, разогрева и повреждения от контакта с гребнями лопаток не наблюдается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан наноструктурный композитный материал на основе коррозионностойкой стали, модифицированной наночастицами нитрида бора, с улучшенным комплексом физико-механических и эксплуатационных характеристик (истираемость) для применения в конструкциях уплотнений проточной части паровых турбин.

2. Исследованы закономерности формирования микроструктуры композитного материала в зависимости от компонентного состава исходной порошковой смеси. Установлено, что введение гексагонального нитрида бора приводит к образованию при деформировании наноразмерных, толщиной 8...300 нм, частиц нитрида бора по границам зерен металлической матрицы.

3. Установлен диапазон процентного содержания нитрида бора от 4 до 5% по массе в наноструктурном композитном материале, в котором обеспечивается заданный уровень физико-механических и эксплуатационных свойств (истираемость). Улучшенная истираемость достигается за счет формирования наночастиц h-BN по границам матричного материала, которые обеспечивают облегченный механизм отрыва металлических частиц за счет расслаивания своего кристаллического строения без трещинообразования в объеме материала.

4. Установлено, что длительное термическое воздействие при температурах до 650 °C не оказывает влияние на микроструктуру и комплекс физико-механических свойств, что позволяет эксплуатировать разработанный наноструктурный композитный материал в указанном температурном диапазоне без ограничений.

5. Определены температурно-ресурсные зоны эксплуатации разработанного наноструктурного композитного материала, позволяющие на их основе, в совокупности с данными по физико-механическим характеристикам, обоснованно выбирать его компонентный состав по условиям эксплуатации и значительно расширить его применимость для конструкций уплотнений различных типов паровых турбин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chupp, R.E. Sealing in Turbomachinery. /R.E Chupp, R.C. Hendricks, S.B. Lattime, V.M. Steinetz. – NASA TM-214341. –2006. – 62 p.
2. Chupp, R.E. Sealing in Turbomachinery. /R.E Chupp, R.C. Hendricks, S.B. Lattime, V.M. Steinetz// Journal of Propulsion and Power. – Vol.22(2). – 2006. – p. 313-349.
3. Flitney, Robert. Seals and Sealing Handbook. / R. Flitney. – Elsevier Ltd. – 2007. – 633 p.
4. Неумин, В.М. Уплотнения проточной части паровых турбин (обзор). /В.М. Неумин// Теплоэнергетика. – 2018. – №3. – с. 3-14.
5. Ушинин, С.В. Разработка и применение усовершенствованных конструкций сотовых уплотнений в проточных частях паровых турбин большой мощности: Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.14.14 /Сергей Владимирович Ушинин. – Санкт Петербург: НПО ЦКТИ. – 2011. – 24с.
6. Урьев, Е.В. Об использовании сотовых уплотнений в паровых турбинах. /Е.В. Урьев, С.В. Жуков// Электрические станции. – 2008. – №9. – с. 40-45.
7. Костюк, А.Г. Влияние эксплуатационного износа статорных частей надбандажных уплотнений паровых турбин на их экономичность. /А.Г. Костюк, С.С. Дмитриев, Б.Н. Петрунин, А.А. Гусев// Теплоэнергетика. – 2018. – №1. – с. 16-22.
8. Жуков, С.В. Анализ использования сотовых уплотнений в конструкциях паровых турбин. /С.В. Жуков, А.В. Кистойчев, К.В. Шапошников, Е.В. Урьев// Электрические станции. – 2013. – №2. – с. 27-31.
9. РТМ 108.020.33-86. Уплотнения лабиринтные стационарных паровых и газовых турбин и компрессоров (1986) // Руководящий технический материал. Санкт Петербург: НПО ЦКТИ. – 71 с.
10. Zheng, X. Chapter: 14 Introduction of new sealing technologies for steam turbines in book Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants. /X. Zheng. – Elsevier Ltd. – 2017. – p. 307-320.

11. Салихов, А.А. Применение сотовых уплотнений на турбинах. / А.А. Салихов, М.П. Юшка, С.В. Ушинин, А.Ф. Ивах, А.А. Салихов// Электрические станции. – 2005. – №6. – с. 22-26.
12. Буглаев, В.Т. Сотовые уплотнения в турбомашинах: монография. /В.Т. Буглаев, В.Т. Перевезенцев, С.В. Перевезенцев, Д.В. Даниленко, А.Л. Карташов, А.А. Климцов. – 2-е изд., перераб. и доп., Брянск: БГПУ, 2006. – 192 с.
13. Речкоблит, А.Я. Исследование влияния размера сотовых ячеек на эффективность уплотнительных устройств с различными вращающимися элементами. /А.Я. Речкоблит, О.В. Авдеев// Труды ЦИАМ №1156. –1985. – 11с.
14. Основные сведения о сотовых уплотнениях // Сайт научно производственного предприятия «АРМС» http://www.armstech.ru/cat/osn_sved_o_sotah/ Просмотрово 20.11.2020.
15. Сотовые материалы // Сайт акционерного общества «Ротек» <https://zaorotec.ru/sotovye-uplotnenia/> Просмотрово 25.11.2020.
16. Шилин, М.А. Совершенствование конструкции уплотнения зазоров в проточной части газоперекачивающего аппарата ГТК-10-4. // М.А. Шилин, В.Т. Перевезенцев// Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – №1. – с. 35-40.
17. Алексеев, В.В. Смерчевой энергообмен на трёхмерных вогнутых рельефах – структура самоорганизующихся течений, их визуализация и механизмы обтекания поверхностей. /В.В. Алексеев, И.А. Гаччиладзе, Г.И. Кикнадзе, В.Г. Олейников// Труды Второй Российской конференции по теплообмену. – Т.6. М: Изд-во МЭИ. – 1998. – с. 37-42.
18. Гортышов, Ю.Ф. Теплопередача и трение на поверхности со сферическими выемками / Ю.Ф. Гортышов, В.В. Олимпиев, И.А. Федотов// Известия вузов. Авиационная техника. – 1996. – №3.– с. 16-21.
19. Childs, D. Annular Honeycomb Seals; Test Results for Leakage and Rotordynamics CoEfficients /D. Childs , D. Elrod, C. Ramsey// Journal of Tribology. – 1989. – Vol. 111(2). – p. 293-300.

20. Childs, D. Annular Honeycomb Seals; Additional Test Results for Leakage and Rotordynamics Co-Efficients /D. Childs , D. Elrod, C. Ramsey// IFToMM, Proceedings of the Third International Conference on Rotordynamics. – 1990. – p. 303-312.
21. Zeidan, F.Y. The Use of Honeycomb Seals In Stabilizing Two Centrifugal Compressors /F.Y. Zeidan, R.X. Perez, E.M. Stephenson// Proceedings of the Twenty-Second Turbomachinery Symposium. – 1993. – p. 3-16.
22. Ильичев, В. Ю., Заричный, А. Ф. Применение сотовых уплотнений в ступенях газовых турбин / В. Ю. Ильичев, А. Ф. Заричный // Вестник научных конференций. – 2015. – № 2-1 (2). Перспективы развития науки и образования: по материалам международной научно-практической конференции, 31 октября 2015 г. Часть 1. – Тамбов, 2015. – С. 52-53.
23. Сахаров, А.М. Первые результаты использования систем уплотнений сотовой конструкции взамен уплотнений традиционного типа в паровых турбинах ТЭЦ №№16 и 23 АО Мосэнерго / А.М. Сахаров, С.В. Ушинин, Ю.П. Малютин, И.А. Лунин// Энергосбережение и водоподготовка. –2005. – №2(34). – с. 30-33.
24. Лисянский, А.С. Практический опыт внедрения сотовых надбандажных уплотнений на блоках сверхкритического давления мощностью 250-800 МВт /А.С. Лисянский, В.Г. Грибин, Ю.А. Сахнин, О.В. Фатьков, К.В. Горлицын, С.В. Ушинин// Электрические станции. – 2013. – №10. – с. 8-13.
25. Патент РФ 2039872, МКИ F 01D11/08, 1995.
26. Патент США 2180668, МКИ 1615/28, 1615/40, 1980.
27. Патент США 4162077, МКИ F16J15/44, 1979.
28. Патент США 4218066, МКИ F16J 015/44, 1980.
29. Патент США 4623298, МКИ F01D 011/02, 1986.
30. Патент США 4897021, МКИ F01D 005/02, 1990.
31. Патент США 5037114, МКИ F16J 015/447, 1991.
32. Патент США 5161942, МКИ F01D 025/32, 1992.
33. Патент США 6171052, МКИ F02C 007/18, 2001.
34. Патент Франции 2103007, МКИ 01D5/00, 1972.

35. Aslan-zada, F. E. Brush seals and labyrinth seals in gas turbine applications /F.E. Aslan-zada, V.A. Mammadov, F. Dohnal// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. – 2013. – Vol. 227(2). – p. 216–230.
36. Kutz, M. Mechanical engineers handbook. Volume 1: Materials and engineering mechanics. /M. Kutz. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc. – 2015. – 1025 p.
37. Steinetz, B.M. Aircraft engine seals. Tribol for Aerospace. Chapter 9. /B.M. Steinetz, R.C. Hendricks. – STLE Special Publication SP-37. – 1997. 130 p.
38. Chupp, R.E. Performance characteristics of brush seals for limited life engines /R.E. Chupp, C.A. Dowler// ASME J Eng Gas Turbines Power. – 1993. – Vol. 155. – p. 390–396.
39. Basu, P. Hysteresis and bristle stiffening effects in brush seals /P. Basu, A. Datta, R. Loewenthal// J Propul Power. – 1994. – Vol. 10(4). – p. 569–575.
40. Chupp, R.E. Advanced seals for industrial turbine applications: dynamic seal development /R.E. Chupp, F. Ghasripoor, N.A. Turnquist// J Propul Power. – 2002. – Vol. 18(6). – p. 1260-1266.
41. Holle, G.F. Gas turbine engine brush seal applications /G.F. Holle, M.R. Krishnan. AIAA Paper 90-2142. – 1990. – 10 p.
42. Dinc, S. Fundamental design issues of brush seals for industrial applications /S. Dinc, M. Demiroglu, N. Turnquist// ASME J Turbomachinery. – 2002. – Vol. 124. – p. 293–300.
43. Hendricks, R.C. Brush seals in vehicle tribology /R.C. Hendricks, M.J. Braun, V. Canacci// In: 17th-Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Paper IX, Tribology Series 18. Amsterdam Elsevier. – 1991. – p.231-242. Paper IX, Tribology Series 18. Amsterdam Elsevier. – 1991. – p.231-242.
44. Hendricks, R.C. Relative performance comparison between baseline labyrinth and dual-brush compressor discharge seals in a t-700 engine test. /R.C. Hendricks, T.A. Griffen, T.R. Kline. NASA TM106360 ARLM Report ARL-MR-232. – 1994. – 21 p.

45. Scharrer, J.K. Leakage and Rotordynamic effects of Compressor annular Seals. /J.K. Scharrer, J.M. Pelletti// Proc. 24th Turbomachinery Symposium, Houston, TX, Sept. 26-28th. – 1995. – p. 175.

46. Dobek, L. Labyrinth Seal Testing for Lift Fan Engines. /L. Dobek. Technical Report, Pratt & Whitney Aircraft Division United Aircraft Corporation. – 1973. –75 p.

47. Whalen, J. K. The use of Engineering Thermoplastics for Centrifugal Compressor Labyrinths. /J. K. Whalen. Proc. 23rd Turbomachinery Symposium, Houston, TX, Sept. – 1994. – p.81.

48. Патент США 2742224, МКИ F01D11/12, 1956.

49. Патент США 3042356, МКИ F02D12/14, 1962.

50. Wilson, S. Thermally sprayed abradable coating technology for sealing in gas turbines. /D. Sporer, S. Wilson, P. Fiala, R. Schuelein// Thermally Sprayed Abradable Coatings in Steam Turbines: Design Integration and Functionality Testing. Volume 7: Turbomachinery, Parts A, B, and C. – 2010. – p. 1-9.

51. Фарафонов, Д.П. Перспективы развития и применения истираемых уплотнительных материалов из металлических волокон в проточном тракте турбины авиационных двигателей. /Д.П. Фарафонов, В.П. Мигунов, М.Л. Деговец, Р.Ш. Алешина// Авиационные материалы и технологии. – 2015. – №3. – с. 51-59.

52. Фарафонов, Д.П. Истираемость и эрозионная стойкость уплотнительных материалов проточной части ГТД. /Д.П. Фарафонов, В.П. Мигунов, М.Л. Деговец, Р.Ш. Алешина// Труды ВИАМ. – 2018. – №8. – с. 70-80.

53. Костюк, А.Г. Практический опыт внедрения сотовых надбандажных уплотнений на турбоагрегатах мощностью 60-800 МВт. /А.Г.Костюк, В.Г. Грибин, Б.Н. Петрунин, А.С. Лисянский, К.В. Горлицын, С.В. Ушинин// Труды II Всероссийской научно-практической конференции «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем». М.: МЭИ. – 2012. – с. 192–196.

54. Сахаров А.М. Результаты промышленного внедрения сотовых надбандажных уплотнений на турбоагрегатах мощностью 300 МВт. /А.М. Сахаров, В.К. Коновалов, С.В. Ушинин// Электрические станции. – 2010. – №2. – С. 33-38.

55. Ушинин, С.В. Опыт внедрения сотовых уплотнений в паровых турбинах. /С.В. Ушинин// Электрические станции. – 2009. – №10. – с. 8-14.
56. Крылов, П.В. Актуальность задачи унификации и оптимизации уплотнений в газотурбинных двигателях. / П.В. Крылов, С.В. Перевезенцев, В.Т. Перевезенцев, М.А. Шилин// Газовая промышленность. – 2017. – №11(760). – с. 56-61.
57. ZHANG, N. Investigation of high-speed rubbing behavior of labyrinth-honeycomb seal for turbine engine application. / N. ZHANG, H. XUAN, X. GUO, C. GUAN, W. HONG// Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering). – 2016. – Vol. 17(12). – p. 947-960.
58. Flower, R. Brush Seal Development System. /R. Flower// Paper from 1990, AIAA-90-2143. – 1990. – p. 1-8.
59. Derby, J. Tribopair Evaluation of Brush Seal Applications. /J. Derby, R. England// Paper AIAA 92-3715 of the AIAA/SAE/ASME/ASEE 28th Joint Propulsion Conference, July 6-8. – 1992. – p. 1-14.
60. Basu, P. Hysteresis and Bristle Stiffening Effects of Conventional Brush Seals. /P. Basu, A. Datta, R. Johnson, R. Loewenthal, J.Short// Paper AIAA 93-1996 of the AIAA/SAE/ASME/ASEE 29th Joint Propulsion Conference, June 28-30. – 1992. – p. 1-8.
61. Hendricks, R. C. Integrity Testing of Brush Seal in Shroud Ring of T-700 Engine. /R. C. Hendricks, T.A. Griffin, G.A. Bobula, R.C. Bill, H.W. Howe// ASME Paper 93-GT-373 of the “International Gas Turbine and Aero Engine Congress”, Cincinnati, Ohio, May 24-27. – 1993. – p. 1-13.
62. Hendricks, R. C. Brush Seals in Vehicle Tribology. /R. C. Hendricks, M.J. Braun, V. Canacci, R.L. Mullen// Paper IX (i) of the symposium Sept. – 1990. – p. 231-242.
63. Sanderson, A. R. Projected Power and Specific Fuel Consumption Development of the Rolls Royce Gem Engine. /A. R. Sanderson// Proceedings of the “37th Annual forum of the American Helicopter Society”, New Orleans, May 17. – 1981. – p. 359-402.

64. Advanced Bristle Seals for Gas Turbine Engines. Report FR9201-01 of the Contract DAAJ02-92-C-0008. – 1993. – p. 1-39.
65. Dinc, S. Brush Seals in Industrial Gas Turbines- Turbine Section Interstage Sealing. /S. Dinc, G. Reluzo, N. A. Turnquist, J. Lawen, P. Crudington// Paper AIAA-98-3175 of the “34th AIAA, ASME, SAE, ASEE Joint Propulsion Conference” July 13-15. – 1998. – p. 1-10.
66. Prior, R. Brush Seal Wear Model. /R. Prior, J. Short, P. Basu// Paper AIAA-98-3170 of the “34th AIAA, ASME, SAE, ASEE Joint Propulsion Conference” July 13-15. – 1998. – p. 1-6.
67. Soditus, S. M. Commercial Aircraft Maintenance Experience Relating to Corrent Engine Seal Technology. /S. M. Soditus// Paper AIAA-98-3284 of the “34th AIAA, ASME, SAE, ASEE Joint Propulsion Conference” July 13-15. – 1998. –p. 1-4.
68. Петреня, Ю.К. Проектирование конструкции отдельных и совмещенных цилиндров паровых турбин на основе конкурентных характеристик. / Ю.К. Петреня, В.В. Глухов, С.А. Иванов// Научно-технические ведомости СПбГУ. – 2017. – Том 23, №1. – с. 36-47.
69. World Energy Outlook Special Report 2015: Energy and Climate Change – Executive Summary //IEA PUBLICATIONS. Paris, Printed in France by IEA. –2015.
70. Porter, M.E. The Global Competitiveness Report. / M.E. Porter, K. Schwab// World Economic Forum, Geneva, Switzerland. – 2008. – 513 p.
71. Casati R. Metal matrix composites reinforced by nano-particles—a review / R. Casati, M. Vedani // Metals. – 2014. – Vol. 4, № 1. – p. 65–83.
72. Shirvanimoghaddam K. Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties / K. Shirvanimoghaddam, S. U. Hamim, M. K. Akbari, S. M. Fakhrhoseini, H. Khayyam, A. H. Pakseresht, E. Ghasali, M. Zabet, K. S. Munir, S. Jia, J. P. Davim, M. Naebe // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2017. – Vol. 92. – p. 70–96.
73. Pramanik A. Developments in the non-traditional machining of particle reinforced metal matrix composites // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2014. – Vol. 86. – p. 44–61.

74. Balaji V. Manufacture of aluminium metal matrix composite (Al7075-SiC) by stir casting technique / V. Balaji, N. Sateesh, M. M. Hussain // *Materials Today: Proceedings*. – 2015. – Vol. 2, № 4–5. – p. 3403–3408.
75. Katzman H. Fibre coatings for the fabrication of graphite-reinforced magnesium composites / H. Katzman // *Journal of Materials Science*. – 1987. – Vol. 22, № 1. – p. 144–148.
76. Kalkanli A. Melt Infiltration Casting of Alumina Silicon Carbide and Boron Carbide Reinforced Aluminum Matrix Composites / A. Kalkanli, T. Durmaz, A. Kalemtaş, G. Arslan // *Journal of Material Sciences & Engineering*. – 2017. – Vol. 6. – p. 01–05.
77. Alhashmy H. A. Laminate squeeze casting of carbon fiber reinforced aluminum matrix composites / H. A. Alhashmy, M. Nganbe // *Materials & Design*. – 2015. – Vol. 67. – P. 154–158.
78. Бальшин М.Ю. Порошковое металловедение. / М.Ю. Бальшин. – М.: Металлургиздат. – 1948. – 332 с.
79. Анциферов В. Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
80. Алымов М. И. Порошковая металлургия нанокристаллических материалов / М. И. Алымов. – М.: Наука, 2007. – 169 с.
81. Ding, C.H. Effect of size refinement and distribution of lubricants on friction coefficient of high temperature selflubricating composites. /C.H. Ding, C.H. Liu, Z.M. Yang, Y.P. Wang, Z.B. Sun, L. Yu// *Compos Sci Technol*. – 2010. – Vol. 70. – p. 1000–1005.
82. Kato, H. Wear and mechanical properties of sintered copper–tin composites containing graphite or molybdenum disulfide. /H. Kato, M. Takama, Y. Iwai, K. Washida, Y. Sasaki// *Wear*. – 2003. – Vol. 255. – p. 573–580.
83. Sutor, P. Solid lubricants: overview and recent developments. /P. Sutor// *MRS Bull*. – 1991. – Vol. 16. – p. 24–30.
84. Clauss, F.J. Low-Friction Inorganic Solids, in: *Solid Lubr. Self-Lubricating Solids*. /F.J. Clauss. Elsevier. – 1972. – p. 15–41.

85. Lancaster, J. Solid Lubricants, in: CRC Handb. Lubr. /J. Lancaster. CRC Press. – 1988. – p. 269–290.
86. McMurtrey, E.L. Lubrication Handbook for the Space Industry - Part A, Solid Lubricants. /E.L. McMurtrey. NASA TM-86556, Marshall Space Flight Center, 1985.
87. Sliney, H.E. Solid lubricant materials for high temperatures - A review. /H.E. Sliney// Tribol. – 1982. – Vol. 15. – p. 303–315.
88. Lansdown, A.R. Molybdenum Disulphide Lubrication. /A.R. Lansdown. Tribology Series, 35, Elsevier Science, Amsterdam, 1999.
89. Cahn, R. W. Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment / R. W. Cahn, P. Haasen, E. J. Kramer. – John Wiley & Sons, 2005. – Vol. 13/14. – p. 179.
90. Evans, A. Metal Matrix Composites in Industry / A. Evans, C. San Marchi, A. Mortensen. – Springer US, 2003. – p. 142.
91. Tjong, S. C. Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites / S. C. Tjong, Z. Y. Ma // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2000. – Vol. 29. – P. 49–113.
92. Varin, R. A. Intermetallic-reinforced light-metal matrix in-situ composites // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2002. – Vol. 33. – p. 193–201.
93. Cui, C. Fabrication, Microstructure, and Mechanical Properties of Tip/Al Composite / C. Cui, Y. Shen, Y. Li, J. Sun, S. B. Kang // Advanced Engineering Materials. – 2003. – Vol. 5. – p. 725–729.
94. Aravind, M. Formation of Al₂Cu and AlCu intermetallics in Al(Cu) alloy matrix composites by reaction sintering / M. Aravind, P. Yu, M. Y. Yau, H. L. Ng Dickon // Materials Science and Engineering: A. – 2004. – Vol. 380. – p. 384–393.
95. Hsu, C. J. Al–Al₃Ti nanocomposites produced in situ by friction stir processing / C. J. Hsu, C. Y. Chang, P. W. Kao, N. J. Ho, C. P. Chang // Acta Materialia. – 2006. – Vol. 54. – p. 5241–5249.

96. Первухина, О.Л. Влияние состава атмосферы на образование соединения титана со сталью при сварке взрывом // Известия ВолГТУ. Серия: Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 2006. – № 9 (24). – с. 70–74.
97. Прюммер, Р. Обработка порошкообразных материалов взрывом. – М.: Мир, 1990. – 128 с.
98. Chawla, N. Metal-matrix composites in ground transportation / N. Chawla, K. K. Chawla // JOM. – 2006. – Vol. 58. – p. 67–70.
99. Yung-Chang, K. Tensile properties of nanometric Al₂O₃ particulate-reinforced aluminum matrix composites / K. Yung-Chang, Ch. Sammy-Ip // Materials Chemistry and Physics. – 2004. – Vol. 85. – p. 438–443.
100. Jordan, J. L. Synthesis of Ti-based metal-like ternary ceramic compounds by dynamic densification and reaction synthesis / J. L. Jordan, N. Thadhani. – Amsterdam: Elsevier Science, Ltd., 2001. – p. 305–312.
101. Kennedy, G. Dynamic mechanical properties of microstructurally-biased twophase TiB₂+Al₂O₃ ceramics / G. Kennedy, A. Keller, R. Russell, L. Ferranti, J. Zhai, M. Zhuo. – Amsterdam: Elsevier Science, Ltd., 2001. p. 63–70.
102. Alba-Baena, N. G. Characterization of micro and nano two-phase regimes created by explosive shock-wave consolidation of powder mixtures / N. G. Alba-Baena, W. Salas, L. E. Murr // Materials Characterization. – 2008. – Vol. 59, № 9. – p. 1152–1160.
103. Tavakol, M. Shock wave sintering of Al/SiC metal matrix nano-composites: A molecular dynamics study / M. Tavakol, M. Mahnama, R. Naghdabadi // Computational Materials Science. – 2016. – Vol. 125. – p. 255–262.
104. ОСТ 108.021.04-78. Турбины паровые стационарные. Диафрагмы сварные, аппараты направляющие. Общие технические условия (1978) // Разработчик: ВПТИЭнергомаш, НПО ЦКТИ. Санкт Петербург: НПО ЦКТИ. – 35 с.
105. ОСТ 108.210.01-86. Диафрагмы паровых стационарных турбин. Расчет на статическую прочность (1986) // Разработчик НПО ЦКТИ. Санкт Петербург: НПО ЦКТИ. – 39 с.

106. Бальшин, М.Ю. Порошковое металловедение. / Ю.М. Бальшин. М.: Metallurgizdat. – 1948. – 332 с.
107. Exner, H. Sintering and rearrangement during sintering of glass spheres Sintering and catalysis. /H. Exner, G. Petzow// New York: Plenum press. – 1976. – p. 279–293.
108. Shinohara, N. Morphological changes in processrelated large pores of granular compacted and sintered alumina. /N. Shinohara, M. Okumiya, T. Hotta// J. Amer. Ceram. Soc. – 2000. – Vol. 87, No. 7. p. – 1633–1640.
109. Liniger, E. Packing and sintering of twodimensional structures made from bimodal particle size distributions. /E. Liniger, R. Raj// J. Amer. Ceram. Soc. – 1987. – Vol. 70, No 11. – p. 843–849.
110. Kostoglou, N. Thermal and chemical stability of hexagonal boron nitride (h-BN) nanoplatelets. /N. Kostoglou, K. Polychronopoulou, C. Rebholz// Vacuum. – 2015. – Vol. 112. – p. 42 – 45.
111. Ting, Li. Surface modification of h-BN and its influence on the mechanical properties of CuSn10/h-BN composites. /Li Ting, Yi Danqing, Hu Jun, Xu Jiao, Liu Junlei, Wang Bin// Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Vol. 723. – p. 345-353.
112. Страумал, А.Б. Полное, неполное и псевдонеполное смачивание границ зерен твердой и жидкой фазой: дис. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. - МИСиС, Москва, 2017 - 115 с.
113. Большаков, Б.О. Металлокерамический композитный материал для надбандажных уплотнений проточной части паровых турбин. /Б.О. Большаков, Р.Ф. Галиакбаров, А.М. Смыслов, А.С. Лисянский, К.М. Усачев// Вестник УГАТУ. – 2019. – Т.23. №4. – с. 11-17.
114. Большаков, Б.О. Металлокерамический композиционный материал для конструкций надбандажных уплотнений проточной части паровых турбин. /Б.О. Большаков, Р.Ф. Галиакбаров, А.М. Смыслов, А.С. Кулешов, К.М. Усачев// Электрические станции. – 2020. – №5. – с. 25-30.
115. Большаков Б.О. Структура и свойства композиционных компактов из высоколегированного порошка железа с добавками нитрида бора. /Б.О. Большаков,

Р.Ф. Галиакбаров, А.М. Смыслов// Перспективные материалы. – 2020. – №8. – с. 39-48.

116. Большаков Б.О. Механизм формирования нанодисперсных прослоек нитрида бора в порошковых компактах ПХ13М2-BN. /Б.О. Большаков, Р.Ф. Галиакбаров, А.М. Смыслов// Наноиндустрия. – 2021. – Т. 14. № 1 (103). – с. 36-43.

117. Bolshakov, B.O. Metal-ceramic composite material for shroud seals in the steam path of steam turbines. /B.O. Bolshakov, R.F. Galiakbarov, A.M. Smyslov, A.S. Kuleshov, K.M. Usachev// Power Technology and Engineering. – 2020. – Vol. 54, No. 4. – p. 532-536.

118. Bolshakov B.O. The Structure and Properties of Composite Compacts Made of High-Alloy Powder Containing Boron Nitride Additives./ B.O. Bolshakov, A.M. Smyslov.// Inorganic Materials: Applied Research. – 2020. – Vol. 12(2). – p. 354-360.

119. Bolshakov, B.O. Features of the structure and physical and mechanical properties of a metal-ceramic composite material depending on the content of boron nitride in it. /B.O. Bolshakov, A.M. Smyslov// IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 1008, 012041.

120. Патент РФ №2754943, МПК51 В22F7/04, С22С33/02, В22F3/12, F16J15/16, F01D11/08 Способ изготовления элемента прирабатываемого уплотнения турбомшины [Текст] /Б.О. Большаков, Р.Ф. Галиакбаров, А.М. Смыслов, А.С. Лисянский, А.Д. Мингажев// №2020139624. – заявл. 03.12.20. – опубл.08.09.2021. – Бюл. – №25.



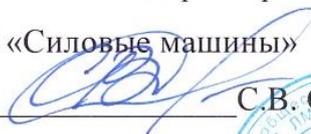
Акционерное общество «Силловые машины – ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт»
(АО «Силловые машины»)

ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, Россия, 195009, тел. +7 (812) 346-70-37, факс +7 (812) 346-70-35
mail@power-m.ru; www.power-m.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Технический директор ЛМЗ

АО «Силловые машины»


С.В. Слепков

«23» 03 2021г.



АКТ

внедрения результатов кандидатской диссертации

Большакова Бориса Олеговича

на тему «МИКРОСТРУКТУРА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ
СТАЛИ С НАНОЧАСТИЦАМИ КЕРАМИКИ»

в производственную деятельность АО «Силловые машины» - «ЛМЗ»

Мы, нижеподписавшиеся, АНАНИНА С.Б., МАКСИМОВ С.А., УСАЧЁВ К.М. удостоверяем, что полученные Большаковым Б.О. в диссертационной работе научные и практические результаты, а именно разработанный композитный материал, внедрены в конструкцию надбандажных уплотнений проточной части паровых турбин различной мощности производства АО «Силловые машины» – «ЛМЗ».

Современные мировые тенденции рынка энергетического оборудования направлены не только на повышение эффективности агрегатов за счет снижения уровня холостых протечек рабочей среды, но и на повышение безопасности их эксплуатации при нестационарных режимах работы в условиях контактного

взаимодействия статорной и роторной частей. Предложенный Большаковым Б.О. подход к решению поставленной задачи, основанный на использовании в качестве материала уплотнения композита ПХ13М2-BN, не имеет зарубежных аналогов, что доказывает новизну и практическую значимость полученных результатов. По результатам проведенных нами натурных испытаний уплотнений, изготовленных из разработанного композитного материала, в составе опытной паровой турбины в условиях, приближенных к реальным по температуре, давлению и среде с осуществлением подвода греющего пара в зону экспериментальной обоймы уплотнений опытных испытаний контактного взаимодействия разработанного материала и имитатора ротора следует отметить, что:

- 1) Обеспечиваются минимальные радиальные зазоры и сохранение технических показателей турбины на протяжении всего времени работы;
- 2) Обеспечивается безопасное врезание в композитный материал уплотнений и сохранение гребней лопаточного аппарата в случае радиальных и осевых смещений ротора турбины;
- 3) Обеспечивается отсутствие значительного нагрева гребней лопаток при контакте с материалом уплотнений;
- 4) Отсутствует налипание материала уплотнения на гребни лопаток;
- 5) Геометрия вреза соответствует величине радиального и осевого перемещения гребней лопаток.

Проведенные в работе систематические исследования влияния содержания нитрида бора в составе композитного материала на основе коррозионностойкой стали на комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств позволяет обоснованно выбирать состав материала уплотнения по условиям его эксплуатации.

Материалы диссертационной работы Большакова Б.О. были представлены, обсуждены и приняты на совещании В СКБ «ТУРБИНА» от 21 сентября 2021 г.

Начальник сектора СКБ «Турбина»

С.Б. Ананьина

Начальник сектора СКБ «Турбина»

С.А. Максимов

Ведущий конструктор СКБ «Турбина»

К.М. Усачев



Общество с ограниченной ответственностью
Научно-производственное предприятие
«Уралавиаспецтехнология»
(ООО НПП «УАСТ»)
 ИНН/КПП 0273023889/027301001
 ОГРН1020202392308
 450027, Республика Башкортостан, г. Уфа,
 ул. Трамвайная, д. 5, корп. 1
 Тел.:(347)292-78-49
 E-mail: info@nppuast.ru
<http://www.nppuast.com>

Исх. № 136/1 от «09»09.2021г.
 На № _____ от «___» _____ 20___ г.

АКТ

внедрения результатов кандидатской диссертации
 Большакова Бориса Олеговича
 на тему «МИКРОСТРУКТУРА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
 КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ С
 НАНОЧАСТИЦАМИ КЕРАМИКИ»
 в производственную деятельность ООО НПП «Уралавиаспецтехнология»

Настоящим актом удостоверяется, что в нашей компании были тщательно изучены теоретически и практически значимые результаты диссертационной работы Большакова Б.О. Наибольший интерес в работе представляет предложенная диссертантом технологическая схема изготовления композитного материала уплотнений, отличающаяся от известных технических решений получения прирабатываемых материалов своей технологичностью, высокой производительностью и возможностью производства массивных деталей.

Разработанный композит ПХ13М2-ВN, по нашему мнению, является перспективным материалом для изготовления прирабатываемых уплотнений, обеспечивающих сохранность дорогостоящих роторных частей энергетических агрегатов при их касании о статор. Представленная феноменологическая модель формирования регламентируемой структуры, обеспечивающей высокие служебные свойства: истираемость и прирабатываемость, является необходимой научной основой для разработки и производства целой линейки прирабатываемых материалов с максимальной температурой эксплуатации до 950 °С (при условии подбора компонентов исходной шихты). В перспективе это позволит использовать легко истираемые композитные материалы в конструкциях уплотнений не только паровых турбин, но и газовых энергетических установок.

Результаты диссертационной работы Большакова Б.О. были использованы при организации производственного участка ООО НПП «Уралавиаспецтехнология» по изготовлению надбандажных уплотнений проточной части паровых турбин для АО «Силовые машины».

Директор

Технический директор, к.т.н.

Заместитель директора
 по производству



В.А. Гонтюрев

К.С. Селиванов

П.В. Бегликчиев