

Научная статья

УДК 661.657.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-174-185

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИТРИДА БОРА BN В КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ

Р.М. Дворецков¹, Ф.Н. Карачевцев¹, Н.П. Бурковская¹, К.В. Савина¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. *Растущее использование порошка нитрида бора для изготовления покрытий привело к возникновению потребности в его количественном определении в составе промышленных материалов – в композиционных порошках для получения прирабатываемых покрытий газотурбинных двигателей. В данной работе предложена методика определения нитрида бора в композиционных прирабатываемых покрытиях методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой с двумя вариантами предварительной пробоподготовки: сплавление с гидроксидом натрия и автоклавное разложение в кислотах.*

Ключевые слова: *нитрид бора, композиционные материалы, прирабатываемые покрытия, истираемые покрытия, химический анализ, аналитический контроль, атомно-эмиссионная спектроскопия, индуктивно связанная плазма, сплавление, микроволновое разложение*

Для цитирования: Дворецков Р.М., Карачевцев Ф.Н., Бурковская Н.П., Савина К.В. Определение нитрида бора BN в композиционных порошковых материалах с помощью метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой // Труды ВИАМ. 2026. № 5 (159). С. 174–185. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-174-185.

Scientific article

DETERMINATION OF BORON NITRIDE BN IN COMPOSITE POWDER MATERIALS USING INDUCTIVELY COUPLED PLASMA ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY

R.M. Dvoretsov¹, F.N. Karachevtsev¹, N.P. Burkovskaya¹, K.V. Savina¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. *The growing use of boron nitride powder for the manufacture of coatings has led to the need for its quantitative determination in the composition of industrial materials – in composite powders for the production of run-in coatings for gas turbine engines. In this paper, a method is proposed for the determination of boron nitride in composite coatings by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry with two pre-sample preparation options: fusion with sodium hydroxide and autoclave decomposition in acids.*

Keywords: *boron nitride, composite materials, workable coatings, abrasion coatings, chemical analysis, analytical control, atomic emission spectroscopy, inductively coupled plasma, fusion, microwave decomposition*

For citation: Dvoretzky R.M., Karachevtsev F.N., Burkovskaya N.P., Savina K.V. Determination of boron nitride BN in composite powder materials using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. *Trudy VIAM*, 2026, no. 5 (159), pp. 174–185. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-174-185.

Введение

Истираемые материалы с нитридом бора BN в двигателестроении

Текущие потребности авиастроения определяют направления научно-исследовательских работ в этой области при создании новых материалов с требуемым уровнем физико-механических свойств [1]. Одно из таких направлений – разработка истираемых уплотнительных материалов или покрытий, в составе которых присутствует нитрид бора BN [2].

Нитрид бора (BN, азотистый бор, мононитрид бора) обладает отличной теплопроводностью, термостойкостью, высокотемпературной стабильностью и высокой механической прочностью; нетоксичен, подходит для использования в агрессивной среде, химически инертен, не взаимодействует с рядом химических реагентов, а также не смачивается многими расплавленными металлами, кроме того обладает хорошими антифрикционными свойствами за счет слоистой структуры. Неудивительно, что благодаря набору своих уникальных свойств соединение BN находит широкое применение в различных областях промышленности, и часто применяется как «твердая» смазка, в том числе в авиационном двигателестроении [3, 4].

Истираемые уплотнительные материалы могут представлять собой порошковые композиционные материалы из металлической матрицы на никелевой, кобальтовой, медной или алюминиевой основе с распределенными в ней твердыми смазками – графитом или гексагональным нитридом бора (или их смесью), а также специальными металлическими или неметаллическими добавками и присадками [5].

Поиск и разработка эффективного уплотнения радиальных зазоров проточного тракта газотурбинного двигателя ведутся довольно давно. Это направление – очень важное, поскольку система уплотнения существенно влияет на расход топлива и срок службы дорогостоящих лопаток турбины и компрессора двигателя.

Главная задача при создании такого уплотнительного материала (вернее, порошковой композиции или порошкового композиционного материала, который в дальнейшем наносится как покрытие) – материал должен работать при экстремально высокой рабочей температуре и при контактном взаимодействии ротора и статора, а жаростойкость материала должна сочетаться с его хорошей эрозионной стойкостью.

Один из первых таких технологичных и эффективных композиционных материалов создавался длительное время, в результате этого разработан уплотнительный материал марки 20Б, который использовали при рабочих температурах до 600 °С, – это гранулированный порошок на основе Ni, содержащий ~15 % (по массе) BN, а также SiO₂, Cu и графит [6].

Затем разработаны легкосрабатываемые материалы на основе Al (порошок марки АНБ и его модификации), который применяется в качестве покрытий, работающих до температур 450–550 °С, его исходные гранулы содержат ~20 % (по массе) BN, а также SiO₂ [7].

Порошки типа УВС представляют собой смесь компонентов: основа – Ni, ~20 % (по массе) BN, добавки SiO₂, а также графит, CuO и CdO [8].

Для повышения эффективности работы турбин также применяются антифрикционные ленточные уплотнительные материалы, которые представляют собой композиции из матрицы на никелевой или хромовой основе, содержащие до ~15 % (объемн.) частиц твердой смазки в виде BN (Нибон-20) [9, 10].

Промышленная технология получения истираемых покрытий может включать такие стадии, как приготовление шихты; возможно, прокатку ленты; спекание или горячую прокатку с целью плакирования основного порошкового материала компактными жаропрочными подложками; непосредственно нанесение покрытий на детали и др. Используемые порошки являются достаточно дорогостоящими материалами, а используются они для того, чтобы защитить и продлить срок службы еще более дорогостоящих деталей двигателей, компрессоров и другой техники. При этом возникает необходимость аналитического контроля содержания BN и других компонентов в подобных материалах [11].

Необходимо отметить, что соединение BN может существовать в виде нескольких полиморфных модификаций: гексагональной α -BN (или h -BN), кубической β -BN (или c -BN), плотноупакованной гексагональной ω -BN, аморфной (некристаллической) формы, наноформы нитрида бора. При этом разные полиморфные модификации BN существенно различаются по физическим и химическим свойствам: несмотря на одинаковый химический состав, разница в кристаллической структуре приводит к заметной вариативности реакционной способности, устойчивости и т. д. [12–14].

Модификация h -BN устойчива к окислению кислородом до температуры ~ 700 °С, не реагирует с большинством кислот и расплавов металлов, медленно разлагается в горячих концентрированных щелочах с выделением аммиака. Модификация c -BN обладает еще более высокой химической стойкостью благодаря более прочным связям, чем у модификации h -BN: не растворяется в железе при нагреве, устойчива к окислению до температуры ~ 1200 °С, реагирует только с сильными окислителями при высоких температурах. Реакционная способность аморфных и наноструктур нитрида бора выше, чем у кристаллических модификаций, из-за неоднородности и большой удельной поверхности таких материалов.

В технологиях получения истираемых уплотнительных материалов, как правило, используют BN с гексагональной графитоподобной кристаллической решеткой (h -BN). Однако порошок гексагонального BN может содержать примеси других полиморфных модификаций нитрида бора.

Выбор методов анализа

В технической документации на материал АНБ предложен метод анализа, который заключается в определении BN и SiO₂ с помощью одной навески путем гравиметрического выделения этих компонентов из навески порошка и последующей отгонки SiO₂ из смеси в виде летучего фторида.

В технической документации на материал УВС предложен метод анализа, который заключается в определении нитрида бора титриметрическим методом. Бор отделяют от никеля углекислым натрием в присутствии хлористого бария. Борную кислоту выделяют из раствора глицерином и оттитровывают раствором гидроксида натрия в присутствии индикатора фенолфталеина.

Упомянутые методы химического анализа относятся к классическим методам, которые часто называют методами «мокрой химии». Они не требуют специального оборудования, имеют продолжительную историю применения и хорошо зарекомендовали себя как надежные и точные методы анализа. Однако эти методы анализа требуют высокой квалификации оператора и точного выполнения большого количества операций с использованием различных реактивов [15]. Каждая методика позволяет определять концентрацию только одного конкретного элемента или соединения. В условиях современного серийного промышленного производства использование классических методов анализа часто неприемлемо из-за их длительности, высокой трудоемкости и ограничения методик измерений по элементам и уровням концентраций [16].

Альтернативой является применение современных инструментальных элементных методов анализа, которые позволяют сократить трудоемкость и проводить определение сразу нескольких элементов одновременно [17]. При этом с использованием методов многоэлементного анализа и несложных вычислений при обработке данных можно пересчитать концентрацию бора на концентрацию нитрида бора.

В аналитическом контроле многокомпонентных металлургических материалов широко используются следующие методы: искровой или лазерный атомно-эмиссионный анализ (ИАЭС, ЛАЭС), рентгенофлуоресцентный анализ, атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (АЭС ИСП) [18]. Рассмотрим особенности упомянутых методов анализа и возможности их применения к порошковым материалам.

Для ИАЭС и ЛАЭС нужны твердые монолитные образцы определенного размера (цилиндры размером $\sim(30 \times 30)$ мм). Анализ порошков иногда возможен при запрессовке исследуемых материалов в смолу, однако это может отразиться на точности определения и существенно увеличивает трудоемкость. При этом для градуировки нужны стандартные образцы (СО), максимально близкие по составу и структуре к исследуемым образцам. Стандартные образцы материалов истираемых покрытий отсутствуют – как в виде порошков, так и в виде запрессованных в смолу таблеток, либо уже спеченных покрытий. Разработка таких СО – это отдельная сложная технологическая задача.

Рентгенофлуоресцентный анализ порошков возможен, однако этот метод имеет ограничения по определению легких элементов (бора, азота, кислорода, углерода), содержащихся в большом количестве в истираемых покрытиях. Как упомянуто ранее, СО композиционных порошковых материалов для нанесения покрытий, нужные для градуировки и контроля правильности анализа, отсутствуют.

При применении метода АЭС ИСП обязательно требуется перевод пробы в раствор, при этом возможно использование СО сплавов, близких по составу, либо вообще можно обойтись без СО и контролировать правильность анализа с помощью модельных растворов.

Анализ методом АЭС ИСП позволяет определить Ni, Al, B, Si, Cd, Cu, а при необходимости и многие другие элементы в композиционных порошках и пересчитать их концентрации на соответствующие соединения (BN, SiO₂, CuO, CdO и др.).

При воздействии на композиционные порошковые материалы типа АНБ, УВС и другие минеральными кислотами, пробы могут лишь частично взаимодействовать со смесью кислот, так как соединения BN и SiO₂ (вследствие своей инертности) при нормальных условиях либо реагируют очень медленно, либо вообще не вступают в реакции с кислотами. Полнота вскрытия проб зависит от элементного и компонентного состава материала, а также уровня концентраций веществ, используемых для растворения реагентов и условий.

Процедуры пробоподготовки металлических материалов на основе никеля и алюминия описаны в научно-технической литературе [19, 20], а процесс перевода в раствор диоксида кремния рассмотрен в работе [21]. При этом для определения массовой доли графита (углерода), а при необходимости и азота потребуются использовать другие методы анализа, например метод инфракрасной спектроскопии (инфракрасно-абсорбционный), и соответствующие приборы – газоанализаторы [22].

Вскрытие проб нитрида бора и содержащих его материалов частично освещено в научно-технических источниках, однако данный вопрос требует дополнительного рассмотрения в контексте оптимизации пробоподготовки для авиационных композиционных порошковых материалов типа 20Б, УВС и др., а также последующего их анализа методом АЭС ИСП.

В данной статье авторами рассматривается только количественное определение нитрида бора на примере композиционных порошковых материалов для нанесения покрытий типа 20Б, УВС, КНА, АНБ, УМБ и др.

Цель данной работы – разработка и опробование методики определения нитрида бора в композиционных материалах типа 20Б, АНБ, УВС и др. методом АЭС ИСП, а также выбор способа перевода проб в удобное для анализа состояние.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.1. «Фундаментально-ориентированные исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [23].

Материалы и методы

Для растворения проб использовали систему микроволновой пробоподготовки (МВП). Навески ВН по 0,1 г растворяли с использованием соляной (НСl), азотной (HNO₃) и фтористоводородной (HF) кислот (ос.ч.). Для сплавления проб использовали муфельную печь, гидроксид натрия (NaOH, ч.д.а) и пиросернистый калий (K₂S₂O₇, ч.д.а). Для хранения растворов применяли колбы из полипропилена объемом 100 мл. Общая концентрация анализируемых растворов составляла 1 г/л.

Измерение аналитического сигнала проводили на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой с аксиальным обзором плазмы с использованием следующих рабочих параметров прибора: мощность плазмы 1,2 кВт; расход плазмообразующего потока газа 1 л/мин; расход газа, подаваемого на распылитель, 0,7 л/мин. Применяли газ аргон марки ВЧ чистотой 99,998 % (объемн.). Продолжительность измерения аналитического сигнала составляла 15 с (5 реплик по 3 с).

При измерении аналитического сигнала использовали инертную к воздействию щелочи и фтористоводородной кислоты пластиковую систему распыления растворов.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Для того чтобы убедиться, что в составе рабочих проб порошков истираемых покрытий присутствует именно гексагональный нитрид бора, проведено рентгенодифракционное исследование исходного порошка нитрида бора, использованного для изготовления рабочих партий композиционных порошковых материалов АНБ и УВС (рис. 1). Исходя из дифрактограммы, порошок соответствует гексагональному нитриду бора. Таким образом, применимость предложенной далее методики для материалов, содержащих кубический нитрид бора, в данной работе не рассматривалась.

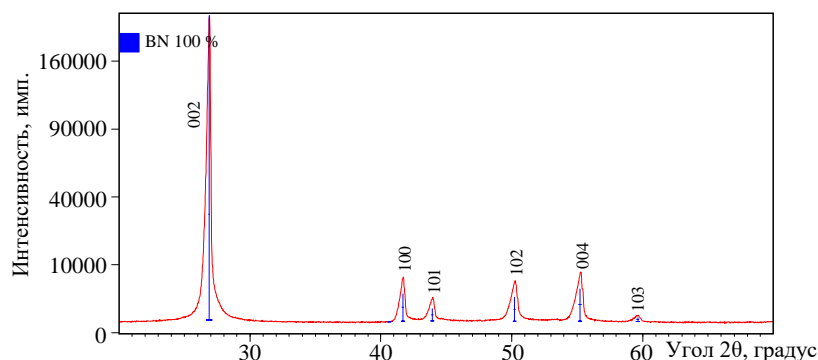


Рис. 1. Результаты рентгенодифракционного исследования исходного порошка нитрида бора

Проанализированы данные из научно-технических литературных источников [24–26], описывающих условия вскрытия проб соединений бора, нитрида бора и содержащих его материалов, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Условия вскрытия проб соединений бора

Реагенты	Условия
BN (навеска 0,25 г) + 15 мл 20–30-ной % HF	Автоклав с магнитной мешалкой, покрытый политетрафторэтиленом, при температуре 150 °С в течение 4 ч
BN + Cl	Хлорирование при температуре 800 °С
BN (навеска 0,1–0,15 г) + 1,5 г CaO или BaCO ₃	Сплавление в печи при температуре ~ (700–900) °С, никелевый/железный тигель
BN + смесь NiO с NaKCO ₃	
BN (навеска 0,2 г) + 10 г LiOH·2H ₂ O (или NaOH)	
Кристаллический бор, борид титана, карбид бора B ₄ C + K ₂ S ₂ O ₇	

В сборнике [27] упоминаются методы, основанные на разложении нитрида бора с щелочами в железной трубке при температурах 400–450 °С, а также сплавление в железном тигле со смесью щелочи и перекиси натрия с последующим многостадийным способом отделения мешающих элементов и титриметрическим определением бора.

В работе [28] представлен аналитический метод для «быстрого» определения примеси BN в порошке аморфного бора. Разложение проводили с помощью нескольких кислот и их смесей с использованием микроволнового разложения в закрытом сосуде: выдержка при температурах до 200 °С в течение 10 мин при малом объеме реагентов – до 3 мл: H₂SO₄ (98 %), HNO₃ (68–70 %), HF (40 %) + H₂SO₄, HF (40 %) + HNO₃, HF (40 %) и HF (48 %), а полное разложение чистого BN до фторбората аммония (NH₄BF₄) наблюдалось только при использовании кислоты HF и смеси кислот (HF + HNO₃). Кроме того, упоминается разложение BN сплавлением с карбонатом натрия (Na₂CO₃). Степень разложения при различных температурах контролировали и изучали путем определения содержания бора с помощью метода АЭС ИСП и ионов аммония с помощью ионной хроматографии.

Резюмируя способы разложения соединения BN, представленные в научно-технической литературе, можно выделить три направления: разложение с использованием фтористоводородной кислоты, хлорирование при нагреве и сплавление с соединениями щелочных металлов или непосредственно с щелочами.

Для уточнения оптимальных условий пробоподготовки шихтовых композиционных порошков АНБ (основа – Al, содержание BN по нормативной документации (НД) составляет ~(15–25) % (по массе)) и УВС (основа – Ni, содержание BN по НД составляет ~(10–20) % (по массе)) провели эксперименты с разложением рабочих проб в системе МВПП в смеси кислот HNO₃ и HF в муфельной печи с NaOH и K₂S₂O₇. От хлорирования при высокой температуре решили отказаться в виду сложности организации процесса при большом количестве рабочих проб.

После перевода проб порошков УВС и АНБ в раствор в колбах можно видеть нерастворившуюся графитную фракцию, которая в течение 2–3 ч осаждается на дно и не мешает дальнейшему анализу.

На атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой проводили измерение интенсивности эмиссии атомов бора на следующих длинах волн:

182,577; 249,678 и 249,772 нм – свободных от значимых спектральных помех. Затем полученные значения концентрации бора пересчитывали на нитрид бора. Контроль правильности результатов анализа осуществляли с помощью модельных растворов. Результаты экспериментов по разложению порошков АНБ и УВС представлены в табл. 2 и 3 соответственно.

Таблица 2

Результаты экспериментов по разложению проб порошка АНБ
(при $n = 3$; $P = 0,95$; табличном значении коэффициента Стьюдента $t_{\text{табл}} = 4,3$)

Условия разложения*	Массовая доля BN ± абсолютная погрешность, %
МВПП, 5 мл H ₂ O + 2,5 мл HNO ₃ + 5 мл HF, при 100 °С, 3 ч	2,7±1,6
МВПП, 5 мл H ₂ O + 2,5 мл HNO ₃ + 5 мл HF, при 180 °С, 1 ч	15,6±3,3
МВПП, 5 мл HCl + 2,5 мл HNO ₃ + 5 мл HF, при 180 °С, 1 ч	16,9±2,0
МВПП, 5 мл HNO ₃ + 5 мл HF, при 160 °С, 1 ч	4,9±2,1
МВПП, 5 мл HNO ₃ + 5 мл HF, при 180 °С, 1 ч	18,1±0,6
МВПП, 5 мл HNO ₃ + 5 мл HF, при 190 °С, 1 ч	18,4±0,5
Сплавление в муфеле с K ₂ S ₂ O ₇ (4 г), при 600 °С, 2 ч	4,4±1,7
Сплавление в муфеле с K ₂ S ₂ O ₇ (2 г), при 600 °С, 2 ч	4,7±1,9
Сплавление в муфеле с NaOH (4 г), при 600 °С, 2 ч	18,4±0,3
Сплавление в муфеле с NaOH (2 г), при 600 °С, 2 ч	18,8±0,7
Метод гравиметрии	18,8±1,0

* Приведено общее время нагрева и выдержки при указанной температуре.
Примечание. МВПП – микроволновая пробоподготовка.

Таблица 3

Результаты экспериментов по разложению проб порошка УВС
(при $n = 3$; $P = 0,95$; табличном значении коэффициента Стьюдента $t_{\text{табл}} = 4,3$)

Условия разложения*	Массовая доля BN ± абсолютная погрешность, %
МВПП, 5 мл H ₂ O + 2,5 мл HNO ₃ + 5 мл HF, при 100 °С, 3 ч	3,0±1,2
МВПП, 5 мл H ₂ O + 2,5 мл HNO ₃ + 5 мл HF, при 180 °С, 1 ч	13,1±2,1
МВПП, 5 мл HCl + 2,5 мл HNO ₃ + 5 мл HF, при 180 °С, 1 ч	13,4±1,6
МВПП, 5 мл HNO ₃ + 5 мл HF, при 160 °С, 1 ч	14,8±4,3
МВПП, 5 мл HNO ₃ + 5 мл HF, при 180 °С, 1 ч	16,9±1,0
МВПП, 5 мл HNO ₃ + 5 мл HF, при 190 °С, 1 ч	16,9±0,8
Сплавление в муфеле с K ₂ S ₂ O ₇ (4 г), при 600 °С, 2 ч	3,2±2,3
Сплавление в муфеле с K ₂ S ₂ O ₇ (2 г), при 600 °С, 2 ч	2,3±1,2
Сплавление в муфеле с NaOH (4 г), при 600 °С, 2 ч	17,5±0,5
Сплавление в муфеле с NaOH (2 г), при 600 °С, 2 ч	17,7±0,7
Метод гравиметрии	17,2±0,7

* Приведено общее время нагрева и выдержки при указанной температуре.
Примечание. МВПП – микроволновая пробоподготовка.

Во всех экспериментах использовали одинаковую навеску 0,1 г композиционных порошковых материалов из одной партии АНБ и УВС. При этом в каждом эксперименте использовали по три параллельных пробы, в которых усреднялись результаты определения массовой доли BN (табл. 2 и 3). После сплавления проб с гидроксидом натрия и пиросернистым калием плавы растворяли в горячей воде.

Судя по полученным данным, полный переход бора в раствор в системе МВПП происходит только при жестких условиях – больше концентрация кислот, выше температура. При этом у многих промышленных систем МВПП, предназначенных для разложения металлических материалов, предельная рабочая температура нагрева $<200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и постоянная работа при режимах, близких к максимальной температуре, может приводить к преждевременному износу автоклавов и самого оборудования.

Следует отметить, что в свою очередь сплавление в муфеле с едким натром и последующий анализ растворов с повышенным содержанием NaOH, а также с повышенным содержанием HF в случае растворения в системах МВПП, могут приводить к повреждению даже химически стойкого стекла из которого изготавливают распылительные системы спектрометров для метода АЭС ИСП (распылитель, распылительная камера, горелка). В этом случае рекомендуется использовать инертную к NaOH и HF распылительную систему из специального химически стойкого пластика и горелку с корундовым сердечником.

Результаты определения соединения BN, полученные при использовании максимально жестких условий системы МВПП, при сплавлении в муфеле с NaOH хорошо сходятся с результатами гравиметрического метода, при этом сплавление с NaOH – наиболее выгодный способ пробоподготовки, потому что не требует дополнительного оборудования и менее трудоемкий по сравнению с гравиметрией.

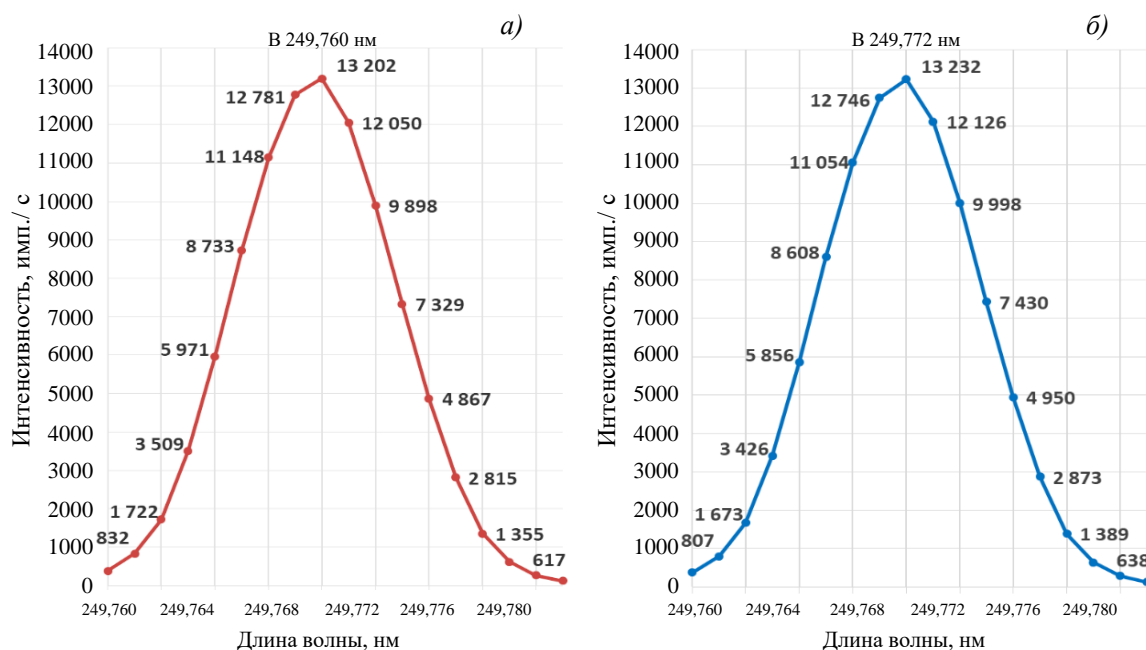


Рис. 2. Вид спектров вблизи аналитической линии бора 249,772 нм, полученных при измерении модельных растворов с NaOH (а) и без NaOH (б)

Из литературных научно-технических источников известно, что большие концентрации щелочных металлов депрессируют аналитические сигналы других элементов в индуктивно связанной плазме. Авторы данной работы показали, что возможно провести успешное разложение порошков АНБ и УВС в количестве 0,1 г с использованием 1,5–2 г NaOH. При дальнейшем разбавлении исходного раствора в 25 раз концентрация NaOH в анализируемом растворе оказывается $<0,8\text{ г/л}$, что существенно не влияет на сигнал аналитических линий бора и в конечном счете – на результаты определения нитрида бора в порошках УВС и АНБ. Для подтверждения этого измерены

интенсивности бора в модельных растворах, содержащих только 0,01 г/л В + соответствующие шихте АНБ и УВС количества Si, Al или Ni, и в таких же растворах, но с добавкой 1 г/л NaOH, при этом существенных изменений интенсивности аналитического сигнала не выявлено (рис. 2).

Заключения

Предложена методика определения содержания гексагонального нитрида бора в композиционных истираемых материалах методом АЭС ИСП с двумя вариантами предварительной пробоподготовки: сплавление с гидроксидом натрия в муфельной печи и последующим растворением плава в горячей воде и автоклавное растворение в смеси кислот (азотной и фтористоводородной в соотношении 1:1) в системе микроволнового разложения. Выбраны аналитические линии бора свободные от спектральных помех. Показано отсутствие существенного влияния NaOH на аналитический сигнал бора при их концентрациях 1 и 0,01 г/л соответственно.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
2. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П., Деговец М.Л., Ступина Т.И. Уплотнительные материалы для проточного тракта ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 94–97.
3. Турченко М.В., Лебедева Ю.Е., Прокофьев В.А., Житнюк С.В. Исследование влияния нитрида бора на механическую обрабатываемость керамического материала системы SiC–ZrB₂ // Труды ВИАМ. 2024. № 2 (132). С. 57–66. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-57-66.
4. Воронов В.А., Чайникова А.С., Лебедева Ю.Е., Житнюк С.В. Получение, физико-механические и триботехнические свойства горячепрессованного углерод-керамического композиционного материала на основе карбида кремния // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). С. 74–84. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 03.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-74-84. DOI 10.18577/2713-0193-2022-0-2-74-84.
5. Живушкин А.А., Полянский С.Б., Тихомирова Е.А. и др. Применяемые и перспективные уплотнительные материалы в изделиях АО «ОДК-Климов» // Мат. XI Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» «Физико-механические испытания, прочность, надежность, высокотемпературные испытания». М.: ВИАМ, 2019. С. 429–438.
6. Фарафонов Д.П., Мигунов В.П., Сараев А.А., Лещев Н.Е. Истираемость и эрозионная стойкость уплотнительных материалов проточной части ГТД // Труды ВИАМ. 2018. № 8 (68). С. 70–80. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-70-80.
7. Фарафонов Д.П., Лещев Н.Е., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Артеменко Н.И. Абразивно-износостойкие материалы для уплотнений проточной части ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-67-74.
8. Истираемое уплотнительное покрытие (рабочая температура до 800 °С): пат. 2791541С1 Рос. Федерация; заявл. 27.06.22; опубл. 09.03.23.
9. Мальцев И.М., Гетмановский Ю.А. Получение и свойства проката из плакированных порошков НПП-80 и Нибон-20 // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2023. Т. 17. № 1. С. 5–11. DOI: 10.17073/1997-308X-2023-1-5-11.
10. Спеченный уплотнительный материал для газотурбинных двигателей: пат. 2699340С2 Рос. Федерация; заявл. 18.12.17; опубл. 04.09.19.
11. Карпов Ю.А., Барановская В.Б. Аналитический контроль – неотъемлемая часть диагностики материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1. С. 5–12.

12. Лидин Р.А., Молочко В.А., Андреева Л.Л. Химические свойства неорганических веществ. М.: Химия, 2000. 480 с.
13. Курдюмов А.В., Пилянкевич А.Н., Шульман Л.А. и др. Полиморфные модификации углерода и нитрида бора: справ. М.: Металлургия, 1994. 318 с.
14. Ряшенцев Д.С. Структура и электронные свойства новых полиморфных разновидностей нитрида бора: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Челябинск, 2023. 148 с.
15. Карпов Ю.А., Барановская В.Б. Проблемы стандартизации методов химического анализа в металлургии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1–2. С. 5–14.
16. Барановская В.Б., Медведевских М.Ю., Карпов Ю.А. Актуальные проблемы качества химического анализа // Аналитика и контроль. 2021. Т. 25. № 4. С. 273–279. DOI: 10.15826/analitika.2021.25.4.005.
17. Отто М. Современные методы аналитической химии: в 2 т. / пер. с нем. под ред. А.В. Гармаша. М.: Техносфера, 2003. 416 с.
18. Лепилина М.Ю., Якубенко Е.В., Ермолаева Т.Н., Барановская В.Б. Разработка методики рентгенофлуоресцентного анализа цинк-алюминий-магниевого сплава // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2024. Т. 90. № 2. С. 5–11. DOI: 10.26896/1028-6861-2024-90-2-5-11.
19. Дворецков Р.М., Славин А.В., Летов А.Ф., Карачевцев Ф.Н. Определение микродобавок редкоземельных металлов и Са, Mg, V, Zr, Hf в никелевых сплавах методом атомно-эмиссионной спектроскопии // Журнал аналитической химии. 2020. Т. 75. № 8. С. 682–691. DOI: 10.31857/S004445022008006X.
20. Карачевцев Ф.Н., Дворецков Р.М., Загвоздкина Т.Н. Определение серебра в алюминиевых сплавах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). С. 143–152. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 03.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-143-152.
21. Суриков В.Т. Кислотное растворение кремния и его соединений для анализа методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Аналитика и контроль. 2008. Т. 12. № 3–4. С. 93–100.
22. Дульнев К.В., Севальнев Г.С., Пахомкина Т.Н., Бузенков А.В. Исследование изменения микроструктуры, размера зерна и концентрации азота в зависимости от температуры термической обработки высокопрочной конструкционной высокоазотистой стали // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 3 (80). С. 3–14. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-3-14.
23. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
24. Немодрук А.А., Каралова З.К. Аналитическая химия бора. М.: Наука, 1964. 285 с.
25. Бок Р. Методы разложения в аналитической химии. М.: Химия, 1984. 432 с.
26. Негина В.Р., Козырева Э.А., Дегтярева О.Ф. и др. Анализ бора, его соединений и прессконпозиций: практическое руководство. М.: Атомиздат, 1978. 92 с.
27. Васильева М.Г., Лалыкина В.М., Махарашвили Н.А. и др. Анализ бора и его неорганических соединений / под ред. Е.Е. Барони. М.: Атомиздат, 1965. 268 с.
28. Yadav A., Bulakh N., Gupta A. et al. Rapid determination of impurity of boron nitride in amorphous boron powder using inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES) and ion chromatography (IC) // Analytical Methods. 2017. Vol. 9. No. 21. P. 3141–3150. DOI: 10.1039/c7ay00140a.

References

1. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916. DOI: 10.31857/S0869587323100055.

2. Migunov V.P., Farafonov D.P., Degovets M.L., Stupina T.I. Sealing materials for flowing path of GTE. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 5, pp. 94–97.
3. Turchenko M.V., Lebedeva Yu.E., Prokofiev V.A., Zhitnyuk S.V. Investigation of the boron nitride effect on the machinability of SiC–ZrB₂ system ceramic material. *Trudy VIAM*, 2024, no. 2 (132), pp. 57–66. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 03, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-57-66.
4. Voronov V.A., Chainikova A.S., Lebedeva Yu.E., Zhitnyuk S.V. Production, physico-mechanical and tribotechnical properties of hot-pressed carbon-ceramic composite material on the basis of silicon carbide. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), pp. 74–84. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 03, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-74-84.
5. Zhivushkin A.A., Polyansky S.B., Tikhomirova E.A. et al. Applied and promising sealing materials in the products of JSC «UEC-Klimov». *Proc. XI All-Rus. Conf. on Testing and Research of Material Properties «TestMat» «Physical and Mechanical Testing, Strength, Reliability, High-Temperature Testing»*. Moscow: VIAM, 2019, pp. 429–438.
6. Farafonov D.P., Migunov V.P., Sarayev A.A., Leshchev N.E. Abradability and erosion resistance of seals in turbine engine air-gas channel. *Trudy VIAM*, 2018, no. 8 (68), pp. 70–80. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 02, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-70-80.
7. Farafonov D.P., Leshchev N.E., Afanasiev-Khodykin A.N., Artemenko N.I. Abrasive wear-resistant seal materials of the gas turbine engine flow section. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-67-74.
8. *Abrasion-resistant sealing coating (operating temperature up to 800°C)*: pat. 2791541C1 Rus. Federation; appl. 27.06.22; publ. 09.03.23.
9. Maltsev I.M., Getmanovsky Yu.A. Production and properties of rolled products from clad powders NPG-80 and Nibon-20. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya*, 2023, vol. 17, no. 1, pp. 5–11. DOI: 10.17073/1997-308X-2023-1-5-11.
10. *Sintered sealing material for gas turbine engines*: pat. Rus. Federation; appl. 18.12.17; publ. 04.09.19.
11. Karpov Yu.A., Baranovskaya V.B. Analytical Control – an Integral Part of Materials Diagnostics. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2017, vol. 83, no. 1, pp. 5–12.
12. Lidin R.A., Molochko V.A., Andreeva L.L. *Chemical Properties of Inorganic Substances*. Moscow: Khimiya, 2000, 480 p.
13. Kurdyumov A.V., Pilyankevich A.N., Shulman L.A. et al. *Polymorphic Modifications of Carbon and Boron Nitride*: Reference Book. Moscow: Metallurgiya, 1994, 318 p.
14. Ryashentsev D.S. *Structure and Electronic Properties of New Polymorphic Varieties of Boron Nitride*: thesis, Cand. Sc. (Phys.&Math.). Chelyabinsk, 2023, 148 p.
15. Karpov Yu.A., Baranovskaya V.B. Problems of standardization of chemical analysis methods in metallurgy. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2019, vol. 85, no. 1–2, pp. 5–14.
16. Baranovskaya V.B., Medvedevskikh M.Yu., Karpov Yu.A. Actual problems of the quality of chemical analysis. *Analitika i kontrol*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 273–279. DOI: 10.15826/analitika.2021.25.4.005.
17. Otto M. *Modern methods of analytical chemistry*: in 2 vols. Trans. from Germ. Ed. A.V. Garmash. Moscow: Tekhnosfera, 2003, 416 p.
18. Lepilina M.Yu., Yakubenko E.V., Ermolaeva T.N., Baranovskaya V.B. Development of a method for X-ray fluorescence analysis of zinc-aluminum-magnesium alloys. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2024, vol. 90, no. 2, pp. 5–11. DOI: 10.26896/1028-6861-2024-90-2-5-11.
19. Dvoretsov R.M., Slavin A.V., Letov A.F., Karachevtsev F.N. Determination of trace elements of rare earth metals and Ca, Mg, V, Zr, Hf in nickel alloys by atomic emission spectrometry. *Zhurnal analiticheskoy khimii*, 2020, vol. 75, no. 8, pp. 682–691. DOI: 10.31857/S004445022008006X.
20. Karachevtsev F.N., Dvoretsov R.M., Zagvozdkina T.N. Determination of silver in aluminum alloys by atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), pp. 143–152. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 03, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-143-152.

21. Surikov V.T. Acid dissolution of silicon and its compounds for analysis by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analitika i kontrol*, 2008, vol. 12, no. 3–4, pp. 93–100.
22. Dulnev K.V., Sevalnev G.S., Pahomkina T.N., Buzenkov A.V. Study of changes in microstructure, grain size and nitrogen concentration depending on heat treatment temperature of high-strength structural high-nitrogen steel. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 3 (80), pp. 3–14. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-3-14.
23. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
24. Nemodruk A.A., Karalova Z.K. *Analytical Chemistry of Boron*. Moscow: Nauka, 1964, 285 p.
25. Bock R. *Decomposition Methods in Analytical Chemistry*. Moscow: Khimiya, 1984, 432 p.
26. Negin V.R., Kozyreva E.A., Degtyareva O.F. et al. *Analysis of Boron, Its Compounds, and Press Compositions: A Practical Guide*. Moscow: Atomizdat, 1978, 92 p.
27. Vasilyeva M.G., Lalykina V.M., Makharashvili N.A. et al. *Analysis of Boron and Its Inorganic Compounds*. Ed. by E.E. Baroni. Moscow: Atomizdat, 1965, 268 p.
28. Yadav A., Bulakh N., Gupta A. et al. Rapid determination of impurity of boron nitride in amorphous boron powder using inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES) and ion chromatography (IC). *Analytical Methods*, 2017, vol. 9, no. 21, pp. 3141–3150. DOI: 10.1039/c7ay00140a.

Информация об авторах

Дворецков Роман Михайлович, начальник сектора, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Карачевцев Федор Николаевич, начальник лаборатории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бурковская Наталия Петровна, научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Савина Ксения Владимировна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Roman M. Dvoretsov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Fedor N. Karachevtsev, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalia P. Burkovskaya, Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ksenia V. Savina, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.12.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 23.12.2025.
The article was submitted 17.12.2025; approved and accepted for publication after reviewing 23.12.2025.