



УДК 62-762: 629.7.03

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-3-3

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ И НИТРИДА
АЛЮМИНИЯ В УПЛОТНИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛЕ
НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ**

В.И. Титов

кандидат технических наук

Н.В. Гундобин

кандидат химических наук

Л.В. Пилипенко

Р.М. Дворецков

Май 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 62-762: 629.7.03

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-3-3

В.И. Титов¹, Н.В. Гундобин¹, Л.В. Пилипенко¹, Р.М. Дворецков¹

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ И НИТРИДА АЛЮМИНИЯ В УПЛОТНИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛЕ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

Разработаны методики определения содержания карбида кремния и нитрида алюминия в уплотнительном материале на основе никеля. Погрешность определения этих компонентов не превышает 5% (отн).

Ключевые слова: карбиды, нитриды, уплотнительные материалы, ионно-плазменное напыление, сплавление, титриметрический метод, гравиметрия, растворение.

V.I. Titov¹, N.V. Goundobin¹, L.V. Pilipenko¹, R.M. Dvoretzskov¹

DETERMINATION OF SILICON CARBIDE AND ALUMINUM NITRIDE IN THE SEALING MATERIAL ON THE BASIS OF NICKEL

A method for determination of silicon carbide and aluminum nitride in uplotnitel'nom material based on nickel. Error of definition of these components does not exceed 5% RH.

Keywords: carbides, nitrides, sealing materials, ion-plasma spraying, fusing, titrimetric method, gravimetry, dissolution.

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Уплотнительные материалы применяются в трактах газотурбинных двигателей (ГТД) с целью уменьшения радиальных зазоров проточной части газовых турбин между подвижными (ротор) и неподвижными (статор) частями ГТД. При этом уменьшаются утечки горячих газов, сокращается расход топлива и таким образом повышается коэффициент полезного действия (КПД) работы турбины [1–3]. Осуществление этих эффектов обеспечивается тем, что корпус турбины и компрессора высокого давления оснащены эффективным истираемым уплотнительным материалом, а торцы лопаток упрочнены абразивно-износостойким материалом [1].

Детали уплотнений работают в жестких условиях эксплуатации: подвергаются воздействию высоких температур, окислительной среды при больших скоростях газового потока. Поэтому материал уплотнений должен противостоять окислению, высокотемпературной газовой эрозии, термической усталости, не изнашивать детали ротора при контакте с ним, не снижать своих эксплуатационных свойств в течение всего ресурса [3].

Применявшиеся ранее серийные материалы типа УПК.153 и 18ВК-2г представляли композиции на органическом связующем для работы при температурах 115 и 350°C соответственно. Для работы при высоких температурах (1000–1200°C) в уплотнениях турбины применяли сотовые конструкции [1]. Стратегические направления развития материалов и технологий определяют новые пути разработки уплотнительных материалов [4–14]. В последнее время в качестве высокотемпературных уплотнительных материалов стали применять абразивно-износостойкие материалы на основе никеля с добавками тугоплавких карбидов, оксидов и нитридов [2].

Для нанесения уплотнительных материалов на корпусные детали компрессора и турбины в виде уплотнительного покрытия используют различные технологии, наиболее прогрессивной из которых является технология ионно-плазменного напыления. Покрытия также могут быть теплозащитными, полифункциональными высокотемпературными, комбинированными жаростойкими [15–19].

Вышеприведенные материалы применяются в качестве уплотнительных и имеют достаточно надежные физические и химические характеристики, обеспечивающие соответствующий уровень технических требований живучести и ресурса работы ГТД. Для обеспечения этих свойств уплотнительные материалы должны разрабатываться и производиться в сопровождении систематического контроля химического состава по соответствующим методикам.

Целью данной работы является разработка методик определения содержания карбида кремния и нитрида алюминия в уплотнительном материале на основе никеля, в котором необходимо контролировать содержание следующих компонентов:

- карбида кремния – в интервале 0,5–1,0% (по массе);
- нитрида алюминия – в интервале 0,1–0,5% (по массе).

Данные компоненты представляют собой ковалентные соединения, обладающие полупроводниковыми свойствами, высокой жаростойкостью, стойкостью против окисления и действия химически агрессивных сред, в том числе расплавленных металлов.

Карбид кремния и нитрид алюминия являются одними из наиболее твердых веществ и обладают высокой стойкостью против теплового удара [20–25], не растворяют-

ся в неорганических кислотах. В связи с этим определение содержания этих компонентов прямыми методами классической аналитической химии и спектрального анализа (требующего соответствующих стандартных образцов состава) в данном случае не представляется возможным.

Поэтому в данной работе применен метод предварительного разделения компонентов с последующим постадийным определением каждого из них в отдельности. Содержание карбида кремния определяли гравиметрическим методом, нитрида алюминия – титриметрическим.

Навеску уплотнительного материала массой ~0,5 г, помещенную в стакан объемом 400 см³, растворяли в смеси кислот (царской водке) при нагревании в течение ~30 мин. По окончании растворения в стакан приливали 20 см³ разбавленной 1:1 серной кислоты, раствор выпаривали до появления паров серной кислоты. Стакан с осадком охлаждали, приливали 100 см³ дистиллированной воды и растворяли соли при нагревании на плите. Раствор выдерживали в теплом месте 10 мин и отфильтровывали нерастворившийся осадок на фильтре «синяя лента» с добавлением в стакан фильтробумажной массы. Осадок на фильтре промывали горячей водой до отрицательной реакции промывных вод на ион Н⁺ по индикаторной бумаге конго. Фильтрат упаривали до объема ~100 см³ и сохраняли для определения никеля (фильтрат I). Фильтр с осадком помещали в платиновый тигель и сжигали в муфельной печи при температуре 1000°C. В охлажденный тигель с осадком помещали 6 г смеси калия-натрия углекислого и сплавляли в муфельной печи при температуре 1000°C в течение 15 мин. При этом кремний из карбидной формы переходит в оксидную. Охлажденный плав вместе с тиглем помещали в стакан вместимостью 400 см³, содержащий 100 см³ дистиллированной воды и 30 см³ разбавленной 1:1 соляной кислоты, и выщелачивали при умеренном нагревании. Затем освобожденный платиновый тигель извлекали из стакана. В раствор приливали 20 см³ разбавленной 1:1 серной кислоты и 10 см³ концентрированной азотной кислоты. Полученный раствор выпаривали до паров серной кислоты, охлаждали и растворяли соли в 100 см³ дистиллированной воды при умеренном нагревании. Раствор выдерживали в теплом месте 10 мин для более полного выделения кремневой кислоты и фильтровали с добавлением фильтробумажной массы на фильтре «синяя лента». Осадок на фильтре промывали горячей водой до отрицательной реакции промывных вод на ион Н⁺ по индикаторной бумаге конго, собирая фильтрат для определения алюминия (фильтрат II). Далее фильтр с осадком помещали в платиновый тигель, подсушивали на плите, затем прокаливали в муфельной печи при температуре 1000°C в течение 1 ч.

Прокаленный и охлажденный осадок диоксида кремния вместе с тиглем взвешивали на аналитических весах, затем смачивали несколькими каплями серной кислоты, приливали 5 см³ фтористоводородной кислоты и далее выпаривали на плите; образующийся при этом фторид кремния испарялся. Затем содержимое платинового тигля снова прокаливали в муфельной печи при температуре 1000°С в течение 5 мин, охлаждали в эксикаторе и взвешивали. Одновременно проводили контрольный опыт на загрязнение реактивов.

Массовую долю карбида кремния (X , %) вычисляли по формуле:

$$X = \frac{(M_1 - M_2) - (M_3 - M_4) \cdot 100 \cdot 0,66}{M_5},$$

где M_1 – масса тигля с осадком до обработки кислотами, г; M_2 – масса тигля с осадком после обработки кислотами, прокаленного в муфельной печи и доведенного до постоянной массы, г; M_3 – масса тигля контрольного опыта до обработки кислотами, г; M_4 – масса тигля контрольного опыта после обработки кислотами, г; M_5 – масса навески образца уплотнительного материала, взятого для анализа, г; 0,66 – фактор пересчета с диоксида кремния на карбид кремния.

Далее осадок в платиновом тигле после определения диоксида кремния сплавляли с 3 г калия пироксерникового в муфельной печи при температуре 1000°С в течение 10 мин. При этом нитрид алюминия полностью разрушался. Тигель охлаждали, помещали в стакан объемом 400 см³ и содержимое выщелачивали в 100 см³ дистиллированной воды с добавлением 20 см³ соляной кислоты (1:1). При этом алюминий полностью переходил в раствор. После выщелачивания тигель извлекали из стакана, полученный раствор объединяли с фильтратом II, упаривали до объема ~100 см³, помещали в коническую колбу вместимостью 500 см³ и связывали алюминий в растворе при pH 5,5–5,8 в комплексное соединение с добавлением 20 см³ титрованного раствора трилона Б, взятого в избытке. Затем нейтрализовали аммиаком по метиловому красному индикатору до перехода окраски из красной в желтую от одной капли, прибавляли 10 см³ буферного раствора, 5 капель ксиленолового оранжевого индикатора и определение алюминия заканчивали обратным титрованием избытка трилона Б раствором сернокислой меди в присутствии ксиленолового оранжевого индикатора до перехода окраски раствора из желто-зеленой в ярко-голубую.

Массовую концентрацию нитрида алюминия (X_1 , г/дм³) вычисляли по формуле:

$$X_1 = \frac{(V_1 - V_2 \cdot K) \cdot T \cdot 1000 \cdot a}{V},$$

где V_1 – объем раствора 0,1 н. трилона Б, введенного в анализируемый раствор, см³; V_2 – объем раствора 0,1 н. сернокислой меди, пошедшего на титрование, см³; K – показатель соотношения

между растворами трилона Б и сернокислой меди; T – титр раствора трилона Б, выраженный в граммах алюминия (теоретический титр 0,00135), г/см³; V – объем электролита, взятый для титрования, см³; a – фактор пересчета с алюминия на нитрид алюминия.

С применением данных методик проанализирована серия опытных образцов из уплотнительных материалов на содержание в них вышеуказанных соединений. Результаты анализа представлены в таблице.

Результаты измерения массовых долей карбида кремния и нитрида алюминия в уплотнительном материале (сравнительные результаты анализа опытных образцов при двух параллельных определениях)

Условный номер образца	Диапазон содержания	Введено	Найдено	Средний результат	Диапазон содержания	Введено	Найдено	Средний результат								
									карбида кремния				нитрида алюминия			
									% (по массе)							
1		0,5	0,56–0,45	0,52		0,1	0,092–0,11	0,101								
2	0,5–1,0	0,7	0,63	0,685	0,1–0,5	0,3	0,24–0,33	0,285								
3		1,0	0,72	0,965		0,5	0,42–0,56	0,49								

Видно, что содержания компонентов карбида кремния и нитрида алюминия, найденные в уплотнительном материале с применением разработанных методик измерения, определены с погрешностью, не превышающей 5% (отн.).

Растворы, применяемые для выполнения анализов:

– соль динатриевая этилендиамин-тетрауксусной кислоты двухводная (трилон Б) по ГОСТ 10652. Раствор концентрации 0,1 моль/дм³ (0,1 н.) готовили следующим образом: 18,2 г трилона Б растворяли в дистиллированной воде, переводили в мерную колбу вместимостью 1 дм³, доливали дистиллированной водой до метки, перемешивали или брали фиксаж (запаянную стеклянную ампулу) концентрации 0,1 моль/дм³ (0,1 н.) по ТУ 6-03-2540;

– серная кислота по ГОСТ 4204, разбавленная 1:1;

– индикатор ксиленоловый оранжевый по ТУ 6-09-1509; водный раствор с массовой долей 0,1% готовили по ГОСТ 49.19.1;

– смесь кислот (царская водка): 3 части соляной кислоты по ГОСТ 3118 и 1 часть азотной кислоты по ГОСТ 4461;

– индикатор метиловый красный по ТУ 6-09-5430, спиртовой раствор с массовой долей 0,1%;

– стандартный раствор алюминия готовили из алюминия гранулированного (ТУ 6-09-3742) или алюминия первичного по ГОСТ 11069. Навеску алюминия 0,65 г растворяли в 150 см³ соляной кислоты (1:1), переводили в мерную колбу вместимостью

1 дм³, доливали до метки дистиллированной водой и перемешивали; таким образом, 1 см³ раствора содержал 0,00065 г алюминия;

– раствор меди (фильтрат II) сернокислой пятиводный (сульфат меди фильтрат II) по ГОСТ 4165) 1/2 CuSO₄·5H₂O концентрации 0,1 моль/дм³ (0,1 н.): 12,48 г соли растворяли в дистиллированной воде, приливали 2 см³ концентрированной серной кислоты и разбавляли до объема 1 дм³;

– аммоний уксуснокислый (ацетат аммония) по ГОСТ 3117, буферный раствор с массовой долей 20%;

– водный раствор аммиака (1:1) по ГОСТ 3760;

– кислота соляная (1:1) по ГОСТ 3118.

Установление титра раствора трилона Б по алюминию

В коническую колбу вместимостью 250 см³ помещали 10 см³ стандартного раствора алюминия, приливали 2–3 см³ соляной кислоты (1:1), 100 см³ дистиллированной воды, 25 см³ раствора трилона Б, перемешивали и нагревали до кипения. Раствор охлаждали и нейтрализовали раствором аммиака (1:1) до слабо-розового цвета бумаги конго, приливали 10 см³ буферного раствора, 5 капель ксиленолового оранжевого индикатора и титровали раствором сернокислой меди до перехода желто-зеленой окраски раствора в сине-голубую. Концентрацию трилона Б, выраженную в г/см³ алюминия, вычисляли по формуле:

$$T = \frac{C \cdot V_2}{V - K \cdot V_1},$$

где C – массовая концентрация алюминия, г/см³; V – объем раствора трилона Б, см³; V_1 – объем раствора сульфата меди, пошедшего на титрование, см³; V_2 – объем стандартного раствора алюминия, взятый для титрования, см³; K – соотношение между растворами трилона Б и сульфата меди.

Установление соотношения между растворами трилона Б и сульфата меди

В коническую колбу вместимостью 250 см³ помещали 10 см³ раствора трилона Б, приливали 100 см³ дистиллированной воды, нагревали до 70°C, приливали 10 см³ буферного раствора, 5 капель ксиленолового оранжевого индикатора и титровали раствором сернокислой меди до перехода окраски раствора из желто-зеленой в ярко-голубую. Соотношение между растворами вычисляли по формуле:

$$K = \frac{V}{V_1},$$

где V – объем раствора трилона Б, см³; V_1 – объем раствора сернокислой меди, см³.

Контроль правильности результатов анализа проводили в соответствии с ОСТ 190188–90.

Таким образом, разработаны методики отдельного определения содержания карбида кремния и нитрида алюминия в уплотнительном материале на основе никеля. Погрешность определения этих компонентов не превышает 5% (отн.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мигунов В.П. Материалы для уплотнений проточной части ГТД /В сб. Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационные материалы. Вып. Уплотнительные материалы для проточной части ГТД. М.: ВИАМ. 1992. С. 5–8.
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. Кузнецов Е.Г., Майлер Д.П., Почуев В.П. Применение истираемых уплотнений в проточной части ГТД /В сб. Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационные материалы. Вып. Уплотнительные материалы для проточной части ГТД. М.: ВИАМ. 1992. С. 8–13.
4. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
5. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 19–36.
6. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–52.
7. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Защитные покрытия лопаток турбин перспективных ГТД //ГТТ. 2001. №3 (12). С. 30–32.
8. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Степанова С.В. Ионно-плазменные жаростойкие покрытия с композиционным барьерным слоем для защиты от окисления сплава ЖС36-ВИ //МиТОМ. 2011. №1. С. 34–49.
9. Мубояджян С.А. Особенности осаждения из двухфазного потока многокомпонентной плазмы вакуумно-дугового разряда, содержащего микрокапли испаряемого материала //Металлы. 2008. №2. С. 20–34.

10. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Ионно-плазменные и нанослойные эрозионностойкие покрытия на основе карбидов и нитридов металлов //Металлы. 2010. №5. С. 39–51.
11. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С., Журавлева П.Л. Исследование свойств нанослойных эрозионных покрытий на основе карбидов и нитридов металлов //Металлы. 2011. №4. С. 91–101.
12. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 71–81.
13. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей //Металлы. 2007. №5. С. 23–34.
14. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора ГТД методом ионного модифицирования поверхности //Труды ВИАМ. 2013. №1. Ст. 02 (viam-works.ru).
15. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Металлы. 2012. №1. С. 5–13.
16. Каблов Е.Н., Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. Современные полифункциональные высокотемпературные покрытия для никелевых сплавов, уплотнительных металлических волокнистых материалов и бериллиевых сплавов //Новости материаловедения. Наука и техника. 2013. №1 (materialsnews.ru).
17. Способ нанесения покрытия для защиты от высокотемпературного окисления поверхности внутренней полости охлаждаемых лопаток турбин из безуглеродистых жаропрочных сплавов на основе никеля: пат. 2471887 Рос. Федерация; опубл. 17.10.2011.
18. Способ нанесения комбинированного жаростойкого покрытия: пат. 2402633 Рос. Федерация; опубл. 31.03.2009.
19. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» /Под общ. ред. Каблова Е.Н. М.: Фонд «Наука и жизнь». 2013. С. 44.
20. Самсонов Г.В. Физико-химические и механические свойства карбидов и нитридов бора и кремния /В сб. информационных материалов «Металлокерамические материалы и методы их исследования». Киев: Изд-во УССР. 1959. С. 36–39.

21. Химическая энциклопедия: В 5 томах. М.: Советская энциклопедия. 1988. Т. 1. С. 212; Т. 2. С. 624; Т. 3. С. 508–510.
22. Стормс Э. Тугоплавкие карбиды: Пер. с англ. М. 1970. 170 с.
23. Тот Л. Карбиды и нитриды переходных металлов: Пер. с англ. М. 1974. 260 с.
24. Болгар А.С., Литвиненко В.Ф. Термодинамические свойства нитридов. Киев. 1980. 210 с.
25. Гнесин Г.Г. Карбидокремниевые материалы. М. 1977. 110 с.

REFERENCES LIST

1. Migunov V.P. Materialy dlja uplotnenij protochnoj chasti GTD [Sealants flowing part of GTE] /V sb. Voprosy aviacionnoj nauki i tehniki. Ser. Aviacionnye materialy. Vyp. Uplotnitel'nye materialy dlja protochnoj chasti GTD. M.: VIAM. 1992. S. 5–8.
2. Migunov V.P., Farafonov D.P., Degovec M.L., Stupina T.I. Uplotnitel'nye materialy dlja protochnogo trakta GTD [Sealing materials for flow path GTE] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 94–97.
3. Kuznecov E.G., Majler D.P., Pochuev V.P. Primenenie istiraemyh uplotnenij v protochnoj chasti GTD [Application abrasible seals in the running part of GTE] /V sb. Voprosy aviacionnoj nauki i tehniki. Ser. Aviacionnye materialy. Vyp. Uplotnitel'nye materialy dlja protochnoj chasti GTD. M.: VIAM. 1992. S. 8–13.
4. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
5. Ospennikova O.G. Strategija razvitija zharoprochnyh splavov i stalej special'nogo naznachenija, zashhitnyh i teplozashhitnyh pokrytij [The development strategy of superalloys and special steel, protective and thermal barrier coatings] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 19–36.
6. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nikelevye zharoprochnye splavy novogo pokolenija [Nickel superalloys new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 36–52.
7. Kablov E.N., Mubojadzhan S.A. Zashhitnye pokrytija lopatok turbin perspektivnyh GTD [Protective coating turbine blades looking GTE] //GTT. 2001. №3 (12). S. 30–32.
8. Budinovskij S.A., Mubojadzhan S.A., Gajamov A.M., Stepanova S.V. Ionno-plazmennye zharostojkie pokrytija s kompozicionnym bar'ernym sloem dlja zashhity ot

- okislenija splava ZhS36-VI [Ion-plasma heat-resistant composite coating with a barrier layer to prevent the oxidation of the alloy ZHS36-VI] //MiTOM. 2011. №1. S. 34–49.
9. Mubojadzhjan S.A. Osobennosti osazhdenija iz dvuhfaznogo potoka mnogokomponentnoj plazmy vakuumno-dugovogo razrjada, soderzhashhego mikrokapli isparjaemogo materiala [Features deposition of two-phase flow of a multicomponent plasma vacuum arc containing microdroplets of the evaporated material] //Metally. 2008. №2. S. 20–34.
 10. Mubojadzhjan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Ionno-plazmennye i nanoslojnye jerozionnostojkie pokrytija na osnove karbidov i nitridov metallov [Ion-plasma and Nanolayer erosionproofed coatings based on carbides and nitrides] //Metally. 2010. №5. S. 39–51.
 11. Mubojadzhjan S.A., Lucenko A.N., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S., Zhuravleva P.L. Issledovanie svojstv nanoslojnyh jerozionnyh pokrytij na osnove karbidov i nitridov metallov [Investigation of the properties nanolayer erosion coatings based on carbides and nitrides] //Metally. 2011. №4. S. 91–101.
 12. Mubojadzhjan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S., Egorova L.P., Bulavinceva E.E. Zashhitnye i uprochnjajushhie ionno-plazmennye pokrytija dlja lopatok i drugih otvetstvennyh detalej kompressora GTD [Protecting and strengthening the ion-plasma coatings for blades and other critical parts of the compressor turbine engine] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 71–81.
 13. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A., Budinovskij S.A., Lucenko A.N. Ionno-plazmennye zashhitnye pokrytija dlja lopatok gazoturbinnnyh dvigatelej [Ion-plasma protective coatings for gas turbine engine blades] //Metally. 2007. №5. S. 23–34.
 14. Mubojadzhjan S.A., Lucenko A.N., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Issledovanie vozmozhnosti povyshenija sluzhebnyh harakteristik lopatok kompressora GTD metodom ionnogo modifizirovanija poverhnosti [Research opportunities to improve service characteristics of the compressor blades GTE ion-surface modification] //Trudy VIAM. 2013. №1. St. 02 (viam-works.ru).
 15. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A. Teplozashhitnye pokrytija dlja lopatok turbiny vysokogo davlenija perspektivnyh GTD [Thermal barrier coatings for turbine blades of high pressure promising GTD] //Metally. 2012. №1. S. 5–13.
 16. Kablov E.N., Solncev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A. Sovremennye polifunkcional'nye vysokotemperaturnye pokrytija dlja nikelovyh splavov, uplotnitel'nyh metallicheskih voloknistyh materialov i berillievyyh splavov [Modern polyfunctional high-temperature coatings for nickel alloys, densifying metallic fiber-reinforced materials and beryllium alloys] //Metally. 2012. №1. S. 14–20.

- high-nickel alloy coatings, sealing materials and fibrous metal beryllium] //Novosti materialovedenija. Nauka i tehnika. 2013. №1 (materialsnews.ru).
17. Sposob nanosenija pokrytija dlja zashhity ot vysokotemperaturnogo okislenija povernosti vnutrennej polosti ohlazhdaemyh lopatok turbin iz bezuglerodistyh zharoprochnyh splavov na osnove nikelja [The method of coating for protection against high-temperature oxidation of the inner cavity cooled turbine blades of carbon-free heat-resistant nickel-based alloys]: pat. 2471887 Ros. Federacija; opubl. 17.10.2011.
 18. Sposob nanosenija kombinirovannogo zharostojkogo pokrytija [Method of application of combined heat-resistant coating]: pat. 2402633 Ros. Federacija; opubl. 31.03.2009.
 19. Dosphehi dlja «Burana». Materialy i tehnologii VIAM dlja MKS «Jenergija–Buran» [Armor for the «Buran». Materials and technologies for VIAM ISS «Energia-Buran»] /Pod obshh. red. Kablova E.N. M.: Fond «Nauka i zhizn'». 2013. S. 44.
 20. Samsonov G.V. Fiziko-himicheskie i mehanicheskie svojstva karbidov i nitridov bora i kremnija [Physico-chemical and mechanical properties of the carbides and nitrides of boron and silicon] /V sb. informacionnyh materialov «Metallokeramicheskie materialy i metody ih issledovanija». Kiev: Izd-vo USSR. 1959. S. 36–39.
 21. Himicheskaja jenciklopedija [Chemical encyclopedia]: V 5 tomah. M.: Sovetskaja jenciklopedija. 1988. T. 1. S. 212; T. 2. S. 624; T. 3. S. 508–510.
 22. Storms Je. Tugoplavkie karbidy [Refractory carbides]: Per. s angl. M. 1970. 170 s.
 23. Tot L. Karbidy i nitridy perehodnyh metallov [Carbides and nitrides of transition metals]: Per. s angl. M. 1974. 260 s.
 24. Bolgar A.S., Litvinenko V.F. Termodinamicheskie svojstva nitridov [Thermodynamic properties of nitrides]. Kiev. 1980. 210 s.
 25. Gnesin G.G. Karbidokremnievye materialy [Silicon carbide materials]. M. 1977. 110 s.