

УДК 621.165

МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЙ КОМПОЗИТНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ НАДБАНДАЖНЫХ УПЛОТНЕНИЙ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Б. О. Большаков¹, Р. Ф. Галиакбаров², А. М. Смыслов³,
А. С. Лисянский⁴, К. М. Усачев⁵

¹bobolshakov@gmail.com, ²grf@mail.com, ³smyslovam@yandex.ru, ⁴lisalex54@mail.ru, ⁵vikukm@mail.ru

^{1,2} ООО «НПП «Уралавиаस्पехтехнология»

³ ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

^{4,5} ПАО «Силловые машины», подразделение СКБ «Турбина»

Поступила в редакцию 05.11.2019

Аннотация. Представлены результаты исследования металлокерамического композитного материала для надбандажных уплотнений лопаток паровых турбин, длительно работающих в условиях повышенных температур и высокочастотных вибраций. Разработан материал, одновременно обеспечивающий высокие показатели истираемости и механической прочности за счет обоснованного выбора состава и дисперсности исходных компонентов. Образцы металлокерамического композита были получены методом прессования исходной шихты порошка стали Fe-13%Cr-2%Mo и нитрида бора BN с последующим твердофазным спеканием. Показано, что регламентируемая структура композита обеспечивается за счет равномерного распределения частиц BN между частицами стального порошка при прессовании. Представлены результаты экспериментальных исследований истираемости композита с различной структурой при взаимодействии с врезаемым элементом лопатки паровой турбины.

Ключевые слова: металлокерамический композит; микроструктура; остаточная пористость; твердость, истираемость.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности и экономичности паровых турбин обуславливает применение в проточной части цилиндров надбандажных, диафрагменных и концевых уплотнений различных конструкций. Наибольшее распространение в отечественном турбостроении получили уплотнения лабиринтного типа [1]. В процессе работы турбины уплотнения испытывают значительные температурные, вибрационные и контактные воздействия. Более того, в случае возникновения аварийных ситуаций происходит соприкосновение элементов ротора и статора, что приводит к их взаимному повреждению [2]. В этой связи к материалам уплотнений предъявляются весьма противоречивые требования: с одной сторо-

ны, они должны обладать достаточно высокими прочностными характеристиками, удовлетворительными параметрами коррозионной и эрозионной стойкости, с другой стороны – обладать хорошей истираемостью для предотвращения повреждения дорогостоящих вращающихся деталей.

Развитие паротурбинной отрасли машиностроения привело к созданию нескольких основных типов уплотнений, среди которых наиболее широкое применение нашли сотовые уплотнения [1]. Намного реже встречаются щеточные уплотнения и уплотнения, наносимые газотермическим напылением порошкового материала [2–4]. Истираемость всех описанных типов уплотнений происходит за счет их высокой пористости и низкой прочности. Однако агрессивные

условия эксплуатации и длительные межремонтные интервалы приводят к катастрофическому ухудшению их эксплуатационных характеристик за счет проявления так называемого эффекта тромбирования, т.е. возникновения и коксувания коррозионных высокопрочных отложений в порах исходной структуры уплотнений, которые значительно увеличивают твердость применяемых уплотнений и постепенно истирают сопрягаемые детали.

Наряду с совершенствованием конструкции уплотнений, в последнее время прослеживается тенденция создания новых высокопористых уплотнительных материалов из тонких металлических волокон [5], а также композитных металлических материалов, армированных керамическими волокнами [6]. Применение высокопористых уплотнений из тонких металлических волокон не исключает проявления эффекта их тромбирования, а технологический процесс изготовления композитных уплотнений, армированных керамическими волокнами, достаточно сложен и трудоемок, что в свою очередь приводит к значительному удорожанию готовой продукции.

Разработка материала, обладающего высокой прочностью, коррозионно-эрозийной стойкостью, в совокупности

с хорошей истираемостью и невысокой стоимостью, является весьма актуальной задачей для современного паротурбиностроения, решение которой позволит повысить экономичность и безопасность эксплуатации паровых турбин.

Данная проблема может быть решена путем создания металлокерамического композитного материала с регламентируемым структурно-фазовым составом методом порошковой металлургии.

Цель данной работы – исследование влияния содержания керамической составляющей на твердость и истираемость металлокерамического композитного материала, полученного методом порошковой металлургии.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обеспечение безопасной работы паровой турбины при пусках и остановках, в том числе и при внештатной ситуации, т.е. при задевании роторных деталей о статор, возможно только при соблюдении основополагающего условия – локального истирания материала уплотнения без повреждения элементов деталей роторной части. Модель такого врезания для надбандажного типа уплотнений представлена на рис. 1.

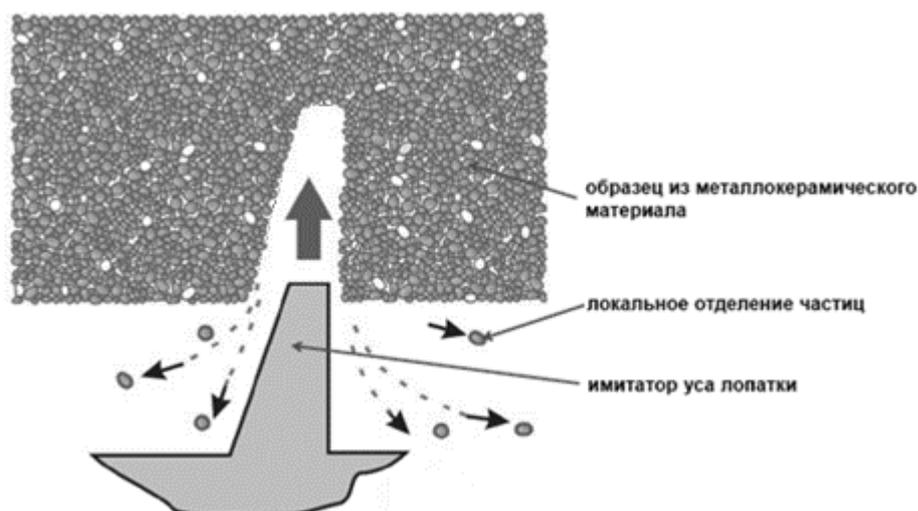


Рис. 1. Модель локальной выработки материала при врезании (стрелками указано движение уса лопатки при врезании)

В качестве базовой технологии изготовления истираемого материала уплотнений было выбрано твердофазовое спекание металлического порошка. Данный метод характеризуется высокой производительностью процесса, позволяет получать изделия конечной формы, минимизируя затраты на финишную механическую обработку, позволяет варьировать компонентным составом исходный шихты, изменяя тем самым в широком интервале свойства готового изделия. Агрессивные условия работы уплотнений, а именно длительное воздействие среды перегретого пара (который достигает температуры 560 °С) обусловили выбор в качестве материала основы порошка коррозионностойкой стали Fe-13%Cr-2%Mo с фракционностью от 80 до 160 мкм.

Требуемые свойства истираемости материала уплотнений возможно обеспечить за счет введения в шихту «твердой смазки» [7]. С учетом структурной стабильности и инертности в различных средах в широком интервале температур в качестве «твердой смазки» был выбран мелкодисперсный порошок нитрида бора BN. С целью изучения влияния различных концентраций порошка BN в исходной шихте, были изготовлены пробные партии материала следующего состава:

- 1) Состав «0» – прессованные заготовки из чистого порошка ПХ13М2;
- 2) Состав «1» – порошок ПХ13М2 + 5% BN;
- 3) Состав «2» – порошок ПХ13М2 + 7% BN;
- 4) Состав «3» – порошок ПХ13М2 + 9% BN.

Время перемешивания компонентов в шихте составляло 1 ч. Для получения компактированных заготовок порошковая смесь подвергалась прессованию в формы прямоугольного сечения. Спекание порошковых композитов проводили в электропечах в воздушной атмосфере при температуре 1200 °С. Время спекания 2 ч.

Микроструктура образцов изучалась с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6490LV с рентгеновским детектором INCA x-act model 51-ADD0009.

Твердость образцов определялась методом Бринелля в соответствии с ГОСТ 9012.

Оценка свойств истираемости проводилась путем врезания инструмента, имитирующего элемент лопатки, изготовленного из высокохромистой стали 20Х13 (см. рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Микроструктура опытных образцов металлокерамического композитного материала уплотнений в зависимости от исходного состава шихты.

На рис. 2 представлена микроструктура спеченных образцов с различным содержанием BN.

Из представленных снимков видно, что в структуре всех исследуемых образцов присутствуют несплошности и поры различных формы и размеров. Минимальная остаточная пористость наблюдается в образце состава «0», т.е. в случае спекания порошка без добавок (рис. 2, а). При этом между отдельными частицами отсутствуют четкие границы, что свидетельствует об их прочной связи и развитии процессов диффузии при спекании. Наличие остаточной пористости в микроструктуре спеченного образца состава «0» обусловлено возникновением сил трения между отдельными частицами в процессе прессования и, как следствие, блокированием их проскальзывания друг относительно друга.

Введение в состав исходной шихты BN приводит к формированию в микроструктуре большого количества крупных пор и несплошностей, причем, чем больше содержание BN, тем больше наблюдается дефектов структуры (рис. 2, б–г). Вероятней всего, видимые на шлифах дефекты являются следствием особенности подготовки образцов к металлографическому анализу, т.е. в объеме материала имеются локальные зоны с повышенным содержанием частиц BN, которые, в силу своей низкой адгезионной взаимосвязи с металлическим порошком, легко уносятся при соприкосновении с абразивными материалами.

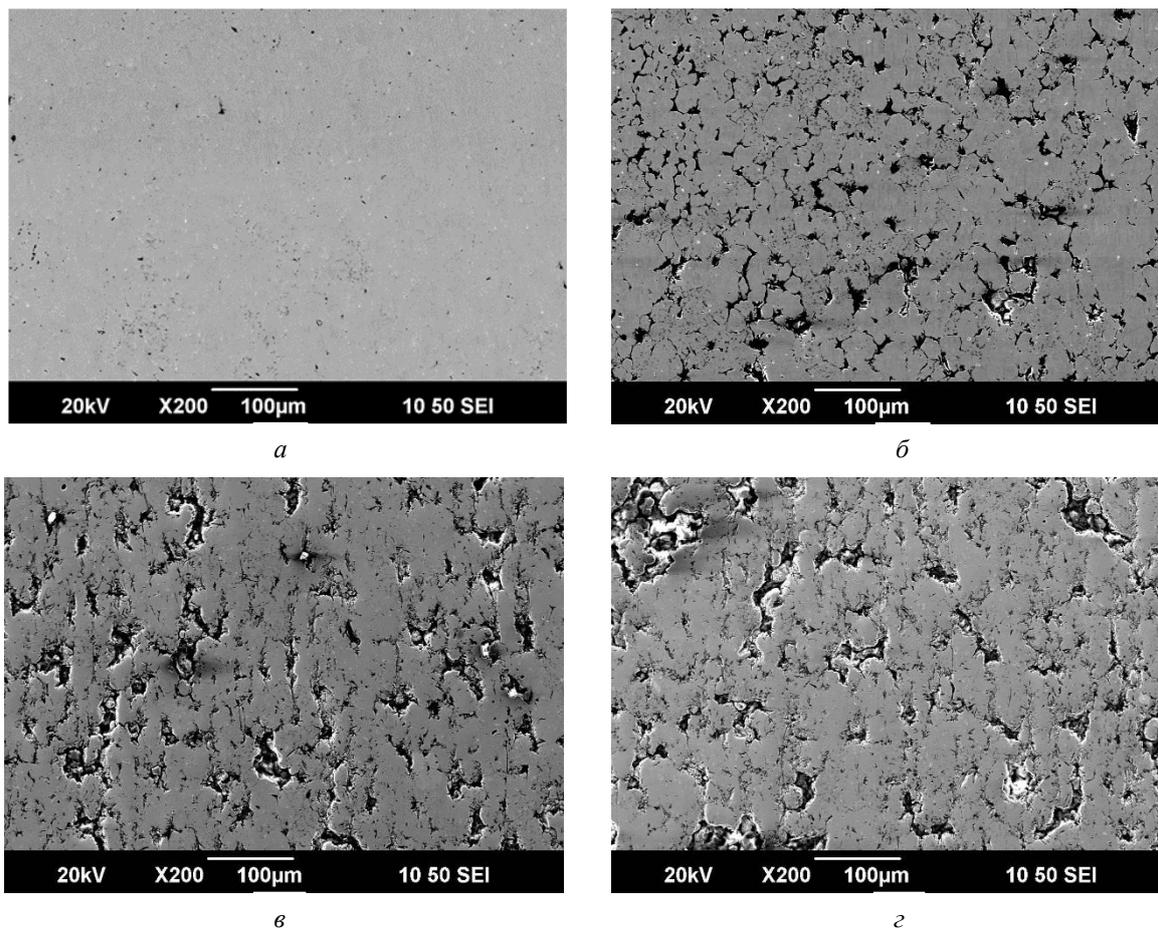


Рис. 2. Микроструктура спеченных образцов металлокерамического композитного уплотнения:
a – 0% BN; *б* – 5% BN; *в* – 9% BN; *г* – 9% BN

В структуре образцов с различным содержанием BN отчетливо выявляются развитые неспеченные границы. Вследствие различной насыпной плотности, несмотря на относительно небольшое процентное содержание керамической составляющей, объем добавляемого порошка BN в шихте сопоставим с объемом металлического порошка. В процессе перемешивания смеси перед прессованием, происходит равномерное распределение частиц двух порошков по всему объему шихты, в результате чего минимизируется площадь соприкосновения отдельных металлических порошинок друг с другом. В процессе спекания мелкодисперсные частицы BN, находясь между металлическими порошинками, препятствуют возникновению прочных адгезионных связей между ними, что в свою очередь должно положительно сказаться на процессе отделения частиц металлического порошка друг от друга при врезании инструмента, други-

ми словами обеспечить более высокие свойства истираемости.

Твердость и истираемость образцов.

В табл. 1 приведены результаты измерения твердости НВ спеченных образцов металлокерамического композитного материала с различным содержанием BN.

Видно, что наиболее высокую твердость имеют образцы, спеченные из стального порошка без добавок. Это объясняется высокой плотностью прилегания частиц металлического порошка друг к другу и, как следствие, возникновению между ними прочной связи за счет развития процессов диффузии при спекании (рис. 2, *a*). Увеличение содержания в составе исходной шихты BN приводит к постепенному снижению твердости спеченных образцов со 130 единиц НВ, характерными для спеченного образца без добавок, до 56 единиц НВ, присутствующими для образца с содержанием 9% BN. Следует отдельно отметить, что в образцах

с высоким содержанием керамической составляющей (составы «2» и «3») связь между частицами металлического порошка минимальна, что выражается в легком уносе материала при соприкосновении с инородными телами. Следовательно, можно предположить, что в процессе эксплуатации турбины уплотнения с высоким содержанием порошка нитрида бора BN будут подвержены интенсивному эрозионному износу. Срок службы уплотнений, изготовленных с такими составами, будет ограничен и не приемлем для энергетических компаний. По этой причине испытаниям на истираемость подвергались лишь образцы состава «0» и «1».

Таблица 1

Твердость спеченных образцов

Содержание BN	0%	5%	7%	9%
Твердость, НВ	130	88	72	56

На рис. 3 показаны результаты эксперимента на истираемость металлокерамического композитного материала, полученного без добавок и с добавлением BN в количестве 5%. В случае спекания стального порошка без добавок, когда остаточная пористость минимальна, а прочность между спеченными частицами металлического порошка максимальна, наблюдается разогрев и деформация материала при врезании инструмента, выраженные в появлении харак-

терного напыла материала (заусенца) и цветов побежалости вокруг зоны врезания (рис. 3, а). В образце с содержанием 5% BN, когда границы зерен и поры заполнены высокотемпературной «твердой смазкой» при внедрении инструмента, происходит проскальзывание отдельных частиц металлического порошка друг относительно друга, их отрыв и унос. При этом истирание металлокерамического материала происходит в виде мелкодисперсной пыли, размеры частиц которой соответствуют размерам исходных материалов шихты. Максимально зафиксированная пирометром температура в зоне контакта не превышала 85 °С, что свидетельствует об отсутствии разогрева как металлокерамического композитного материала, так и внедряемого имитатора уса лопатки (рис. 3, б). Проведенный по результатам испытаний на истираемость двух образцов состава «0» и «1» внешний осмотр имитатора уса лопатки позволяет сделать вывод, что введение в состав материала «твердой смазки» нитрида бора BN и, как следствие, формирование регламентированного структурно-фазового состояния материала уплотнений, помимо обеспечения всех требуемых показателей, описанных выше, не позволяет «налипать» изнашиваемому материалу на вращающиеся детали, тем самым снижая вероятность возникновения их дисбаланса при вращении.



а



б

Рис. 3. Внешний вид спеченных металлокерамических образцов после испытаний на истираемость: а – 0% BN; б – 5% BN

Таким образом, процесс истираемости разработанного металлокерамического композитного уплотнения нового поколения складывается из совокупности единичных процессов отрыва частиц металлического порошка и наполнителя в результате снижения прочности сцепления на границе каждой частицы. Кроме того, отрыв и унос частиц приводит к отводу излишней теплоты из зоны контакта и не позволяет нагреваться как образцу, так и врезаемому инструменту.

Использование для надбандажных уплотнений разработанного металлокерамического композитного материала, полученного путем спекания коррозионностойкого стального порошка с «твердой смазкой» нитрида бора с регламентируемым структурно-фазовым составом, обеспечивающим сочетание высоких прочностных характеристик с высокими показателями истираемости, является перспективным подходом к повышению эффективности и безопасности работы паровых турбомашин. Следует отметить, что применение порошкового металлокерамического композита для получения истираемого уплотнения позволит снизить трудоемкость их изготовления за счет формирования геометрии и формы, максимально приближенной к готовым изделиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены первые результаты разработки металлокерамического композитного материала с регламентируемым структурно-фазовым составом для надбандажных уплотнений проточной части паровых турбин.

Установлено, что получение металлокерамического композитного материала путем твердофазного спекания порошка коррозионностойкой стали состава Fe-13%Cr-2%Mo с добавлением высокотемпературной «твердой смазки» BN способствует формированию регламентированной структуры, обеспечивающей сочетание высоких прочностных характеристик и истираемости.

Введение в состав шихты «твердой смазки» BN приводит к уменьшению пло-

щади соприкосновения частиц металлического порошка, появлению развитых неспеченных границ и снижению твердости спеченных образцов со 130 до 56 единиц НВ при повышении содержания керамической составляющей до 9%.

Процесс истираемости разработанного металлокерамического материала складывается из совокупности единичных процессов отрыва и уноса частиц металлического порошка и наполнителя в результате снижения прочности сцепления на границе каждой частицы.

Наилучшим комплексом свойств обладают образцы состава «1»: металлический порошок ПХ13М2 + 5% BN.

Исследовательская часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО «УГАТУ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Неуймин В. М.** Уплотнения проточной части паровых турбин (обзор) // Теплоэнергетика. 2018. № 3. С. 3–14. [V. M. Neumin, "Steam Turbine Flow Path Seals (a Review)", (in Russian), in *Teploenergetika*, no. 3, pp. 3-14, 2018.]
2. **Mel'nik V. A.** Complementary products and devices. Classification of contactless slit seals // Chemical and Petroleum Engineering. 2009. Vol. 45, No. 3-4. Pp. 152-160. [V. A. Mel'nik, "Complementary products and devices. Classification of contactless slit seals", in *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 45, no. 3-4, pp. 152-160, 2009.]
3. **B. Qiu, J. Li, X. Yan.** Investigation into the flow behavior of multi-stage brush seals // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A: Journal of Power and Energy. 2014. Vol. 228, No. 4. Pp. 416-428.
4. **Pugachev A. O., Helm P.** Calibration of porous medium models for brush seals // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2009. Vol. 223, No. 1. Pp. 83-91.
5. **Перспективы** развития и применения истираемых уплотнительных материалов из металлических волокон в проточном тракте турбины авиационных двигателей / Д. П. Фарафонов и др. // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 3. С. 51–59. [D. P. Farafonov et. al., "Development prospects of abradable sealing materials made from metal fibers for application in flow duct of aircraft engine turbine", (in Russian), in *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, no. 3, pp. 51-59, 2015.]
6. **Material** needs for turbine sealing at high temperature / J. R. Davenport, et. al. // Materials Science and Technology. 2014. Vol. 30, No. 15. Pp. 1877-1883, 2014.
7. **Дзnelадзе Ж. И.** Порошковая металлургия сталей и сплавов. М.: Металлургия, 1978. 264 с. [Zh. I. Dzneldzei, *Powder metallurgy of steels and alloys*, (in Russian). Moscow: Metallurgiya, 1978.]

ОБ АВТОРАХ

БОЛЬШАКОВ Борис Олегович, вед. инж. ООО НПП «Уралавиаспецтехнология», магистр. техн. и технол. по спец. материаловед. (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. металлокерамических уплотнений.

ГАЛИАКБАРОВ Руслан Фанилевич, зам. дир. ООО НПП «Уралавиаспецтехнология» Дипл. спец. тех. маш. (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. металлокерамических уплотнений.

СМЫСЛОВ Анатолий Михайлович, проф. каф. тех-нол. машиностроения. Дипл. инж.-технол. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по производству двигателей ЛА (УГАТУ, 1993). Иссл. в обл. ионно-имплант. и вакуумно-плазм. модиф. поверхности.

ЛИСЯНСКИЙ Александр Степанович, гл. конструктор СКБ «Турбина». Дипл. инж.-констр. (ЛПИ, 1976). Д-р техн. наук по констр. турбомашин и комбинированных турбоустановок (СПГУ, 2014).

УСАЧЕВ Константин Михайлович, вед. конструктор СКБ «Турбина». Дипл. инж.-мех. (ВТУЗ-ЛМЗ, 1993), канд. техн. наук по констр. турбомашин и комбинированных турбоустановок («НИУ «МЭИ», 2019).

METADATA

Title: Metal ceramic composite material steam turbines flow path shroud seals.

Authors: B. O. Bolshakov¹, R. F. Galiakbarov², A. M. Smyslov³, A. S. Lisyanskiy⁴, K. M. Usachev⁵

Affiliation:

^{1,2} LLC Scientific and production enterprise «Uralaviaspeztehnologiya», Russia.

³ Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

^{4,5} Public Joint Stock Company "Power machines", SDB "Turbine", Russia.

Email: ¹bobolshakov@gmail.com, ²grf@mail.com,
³smyslovam@lyandex.ru, ⁴lisalex54@mail.ru,
⁵vikukm@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 4 (86), pp. 11-17, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: In this paper presents the results of a study of a metal-ceramic composite material steam turbines flow path shroud seals that operate for a long time in conditions of high temperatures and high-frequency vibrations. A material that simultaneously provides high rates of abrasion and mechanical strength due to the reasonable choice of composition and dispersion of the raw materials was developed. Samples of cermet composite were obtained by pressing the initial charge of Fe-13% Cr-2% Mo steel powder and BN boron nitride followed by solid-phase sintering. It is shown that the regulated structure of the composite is provided by deformation of a particle of steel powder in combination with ceramic additives BN. The results of experimental studies of the abrasion of composite with different structure in the interaction with the embedded element of the steam turbine blade are presented.

Key words: cermet composite; microstructure; residual porosity; hardness, abrasability.

About authors:

BOLSHAKOV, Boris Olegovich, Master of Technics & Technology (UGATU, 2012).

GALIAKBAROV, Ruslan Fanilevich, Dipl. En techn. of mechanical engineering (UGATU, 2009).

SMYSLOV, Anatoly Mikhailovich, Prof., Dept. of Engineering technology. Dipl. Engineer (UAI, 1973). Dr. of Tech. Sci. (Ufa, 1993).

LISYANSKIY, Aleksandr Stepanovich, Dipl. designer (LPI, 1976). Dr. of Tech. Sci. (St. Petersburg, 2014)

USACHEV, Konstantin Mikhailovich, Dipl. designer (SPBSTU, 1976, Phd. of Tech. Sci. (Moscow, 2019)