

РОЛЬ И ВОЗМОЖНОСТИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ В РАЗВИТИИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ТУРБОМАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.438

В.В. Настека, ПАО «Газпром» (Санкт-Петербург, РФ)

В.В. Вавилов, ПАО «Газпром»

В.П. Голуб, к. т. н., ПАО «Газпром», V.Golub@adm.gazprom.ru

В статье анализируются возможные направления развития импортозамещения в российском энергомашиностроении. Доказываются преимущества реинжиниринга (создания отечественных аналогов зарубежной техники с улучшенными характеристиками) перед 100%-м копированием оборудования и технологий иностранного производства. В качестве примера приводится реинжиниринг лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) ГТУ SGT-600 «Балтика-25» в условиях повышения рабочих температур за счет применения новых литейных никелевых жаропрочных сплавов и покрытий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ, ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ, РЕИНЖИНИРИНГ, ГАЗОТУРБИНАЯ УСТАНОВКА, ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ, ЛИТЕЙНЫЕ СПЛАВЫ, ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ.

Одной из важнейших составляющих экономики России является топливно-энергетическая промышленность. Ее безопасность и независимость от внешнеполитических факторов обеспечивает энергомашиностроение. В СССР энергомашиностроению уделялось особое внимание, данная отрасль обладала мощной научно-технической базой, создававшей основу для производства высококачественного оборудования. До начала 1990-х гг. доля российского энергетического оборудования на мировом рынке составляла 13 % [1], однако последовавшие за этим политический и экономический кризисы привели к катастрофическим последствиям. Научно-производственная база энергомашиностроения пришла в упадок и уже не могла, как в прежние годы, осуществлять технико-технологические разработки, учитывающие передовые достижения отечественной науки.

Особенно сильно кризис сказался на производстве паровых и газовых энергетических тур-

бин, выпуск которых снизился за 1990-е гг. в семь раз. Вследствие сокращения производства резко выросли объемы импортных закупок, что отрицательно сказалось на энергетической безопасности, при этом страна попала в зависимость от импорта оборудования и технологий [1]. Необходимо отметить, что в настоящее время газотурбинные установки (ГТУ) большой мощности закупаются в основном за рубежом либо в России производится их лицензионная сборка из импортных комплектующих [2].

Энергетической стратегией России на период до 2035 г. и Стратегией развития энергомашиностроения на 2010–2020 гг. установлены целевые показатели уровня развития импортозамещающих производств, которые должны осуществляться поэтапно [2]. Это позволит восстановить положение России не только на внутреннем, но и на международном рынке энергомашиностроения, а также снизить зависимость от западных производителей в области техники, технологии и услуг.

Следует отметить, что использование в России импортной техники и технологий имеет как отрицательные, так и положительные эффекты. Конечно, положительный опыт пока является, по сути, потенциальным – его еще предстоит принять и, улучшив под требования отрасли, реализовать на практике [1, 2]. В то же время импортозамещение как явление в российском энергомашиностроении при эффективной его реализации дает шанс вывести эту отрасль на новый технический уровень за счет создания конкурентоспособной техники и технологий [2].

В связи с этим одной из основных задач импортозамещения является создание отечественных аналогов зарубежной техники с улучшенными характеристиками. Широко известно, что увеличение температуры газа в турбинах способствует существенному повышению КПД силовых установок при одновременном снижении расхода топлива. Поэтому наиболее важными и ответственными для изготовителей деталями

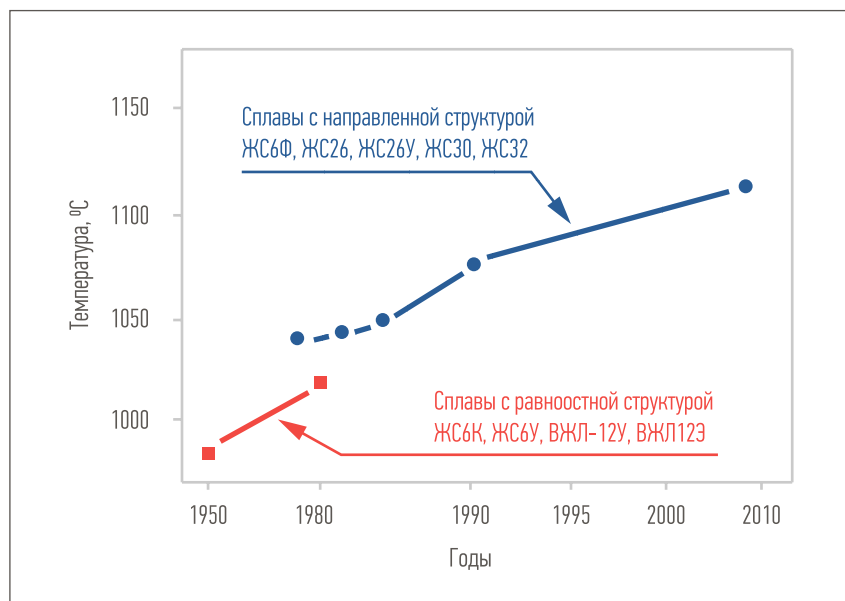


Рис. 1. Температурный уровень работоспособности литейных жаропрочных сплавов, по данным ВИАМ [6, 7]

ГТУ, определяющими уровень развития всего турбоэнергомашиностроения, являются рабочие и сопловые лопатки. Вопросы импортозамещения должны быть жестко увязаны с возможностью производства лопаток ГТУ, имеющих высокие эксплуатационные показатели [2].

В целом для энергомашиностроения России возможны два основных направления развития импортозамещения [1]. Первое основывается на полном копировании или использовании оригинальных материалов, конструкций и технологий изготовления зарубежной техники. Второе базируется на создании аналогов заменяемой импортной техники и ее элементов (деталей), основанном на использовании отечественных материалов и технологий, а где это возможно – и конструкций заменяемой импортной техники.

Реализация первого варианта импортозамещения сопряжена с рядом сложностей, поскольку связана с необходимостью приобретения исходных иностранных материалов и деталей либо технологий их изготовления. Так же обстоит дело и с приобретением иностранных технологий, что

сложнее и дороже покупки оригинальных деталей. Более того, приобретение западных материалов и технологий для производства техники и ее элементов в России, по сути, уже не является импортозамещением.

В то же время импортозамещение в областях энергетики и энергомашиностроения России, где используется значительное количество западной техники, эксплуатация которой связана с определенными сложностями с ремонтом и техобслуживанием, требует применения и развития собственных технологий. Их разработка должна учитывать соотношение цены и качества выпускаемой продукции при условии ее конкурентоспособности на мировых рынках. И такие прецеденты в отечественной промышленности есть.

Так, завод «Турбодеталь», филиал ОАО «Газэнергосервис», с 1989 г. производит точнолитые детали из жаропрочных сплавов для турбин газоперекачивающих агрегатов импортного производства. Предприятия Объединенной двигателестроительной корпорации (АО «ОДК»), такие как ПАО «Уфимское моторостроительное про-

изводственное объединение» (г. Уфа), АО «ОДК-СТАР» (Пермь), ПАО «Кузнецов» (Самара), АО «Московское машиностроительное предприятие им. В.В. Чернышева» (Москва), ПАО «Научно-производственное объединение «Сатурн» (Рыбинск) и др., неоднократно демонстрировали свои производственные возможности, осваивая изготовление лопаток турбин для нужд ПАО «Газпром» на высоком уровне качества и в кратчайшие сроки. При этом качество подтверждалось многолетними референциями и не уступало зарубежным аналогам, а стоимость изделия была снижена в 3–5 раз.

Использование лопаток, изготовленных из жаропрочных сплавов (чем объясняется их высокая стоимость, особенно у импортных образцов) привело к необходимости развития российских технологий восстановительного ремонта, позволяющего повысить их ресурс [3, 4]. Восстановительный ремонт лопаток импортных турбомашин получил в России широкое распространение благодаря наличию научно-технологической базы, сниженной стоимости восстановленных лопаток турбомашин (в 3–5 раз по отношению к новым) при высоком уровне их послеремонтных эксплуатационных характеристик и востребованности такого рода услуг на рынке.

Второе направление импортозамещения является наиболее целесообразным для экономики России, поскольку может быть основано на отечественных материалах и технологиях, обеспечивающих создание эквивалентной или лучшей по характеристикам техники, способствуя тем самым увеличению рынка отечественных энергомашин. Что касается критерия эквивалентности зарубежной техники и технологий, то в данном случае критерием становится соответствие не материалам, конструкциям и технологиям, а эксплуатационным характеристикам зарубежных образцов. При этом развитие техники и технологий

должно идти за счет синергии в решении задач импортозамещения на основе научных отечественных подходов, что будет способствовать развитию передовых технологий и отрасли в целом.

Мировая практика показывает, что реинжиниринг, как правило, приводит к возникновению новых технических решений, основанных на слиянии зарубежного и отечественного опыта [4, 5]. Подобный подход к импортозамещению отечественные ученые и инженеры успешно использовали для совершенствования собственных разработок на основе зарубежных аналогов [4].

Развитие отечественной техники и технологий требовало от сотрудников научно-исследовательских институтов решения вопросов повышения ресурса, мощности, надежности ГТД и ГТУ, в результате чего был накоплен богатейший опыт производства и ремонта деталей турбомашин различного назначения. В частности, были созданы отечественные жаропрочные сплавы, превосходящие по некоторым показателям зарубежные аналоги (рис. 1). При этом самые сложные вопросы были связаны с созданием рабочих и сопловых лопаток турбомашин, обладающих хорошими эксплуатационными свойствами [6].

В настоящее время как в России, так и за рубежом прослеживается тенденция к использованию более сложного легирования при создании новых литейных никелевых жаропрочных сплавов. Высокий уровень жаропрочности рабочих лопаток современных ГТД и ГТУ в России и за рубежом обеспечивается за счет применения технологии формирования монокристаллов и направленной кристаллизации, а также высокоградиентной технологии литья [7]. Кроме того, повышение жаропрочных свойств и совершенствование эксплуатационных характеристик сплавов связано с кардинальным улучшением

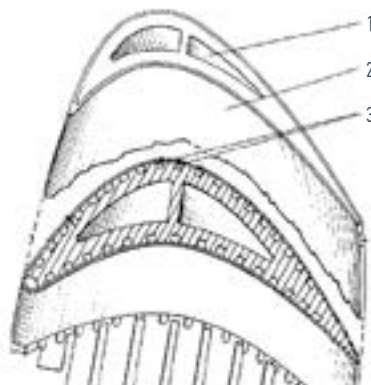


Рис. 2. Конструкция лопатки с оболочковым покрытием: 1 – лопатка; 2 – оболочка; 3 – каналы охлаждения [10]

методов и средств выплавки, с применением шихтовых материалов повышенной чистоты по примесям, с использованием технологии высокоградиентной направленной кристаллизации и специальных режимов многоступенчатой термической обработки, а также с применением нового технологического оборудования. Разработки в части создания новых жаропрочных сплавов и технологий изготовления лопаток указывают на то, что российская наука в этой области находится на одной из лидирующих позиций и может успешно обеспечить импортозамещение по созданию лопаток турбин ГТУ и ГТД за счет

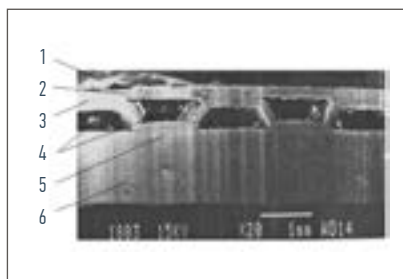


Рис. 3. Покрытие с внутренними каналами охлаждения для лопаток турбины ГТД и ГТУ: 1 – поверхность покрытия; 2 – внешняя оболочка; 3 – внутренний каркас, разделяющий пространство между внешней оболочкой и поверхностью детали на каналы; 4 – каналы охлаждения; 5 – подслой; 6 – основной материал детали [9]

получения сплавов, не уступающих, а по некоторым параметрам и превосходящих сплавы-аналоги таких компаний, как ONERA, General Electric, Cannon-Muskegon, Siemens и др. [7].

Для продления ресурса лопаток из жаропрочных сплавов в условиях высоких температур и интенсивных теплосмен используются жаростойкие покрытия, обеспечивающие защиту основного металла детали от окисления и высокотемпературной коррозии. В России разработан и широко применяется ряд жаростойких покрытий, успешно конкурирующих с зарубежными аналогами. К отечественным разработкам относятся такие покрытия, как, например, СДП-2 (Ni-Cr-Al-Y), СДП-41 (Ni-Cr-Al-Ta-Hf-Re-Y), ВСДП-16 (Al-Ni-Y), ВСДП-9 (Ni-Al-Cr-Ta-Y), ВСДП-18 (Al-Ni-Cr-Y) и др., в том числе покрытия, обеспечивающие формирование барьерного слоя, препятствующего диффузионным процессам на границе «покрытие – основа». Повышение защитных свойств жаростойких покрытий обеспечивается также за счет использования различного вида конструкций покрытий и их составов, в частности при сочетании слоев покрытия: СДП-2 + СДП-4; СДП-2 + ВСДП-16; ДП-41 + ВСДП-18; [СДП-41 + C₂H₂] + СДП-41 + ВСДП-18; ВСДП-9 + ВСДП-18; [ВСДП-9 + C₂H₂] + ВСДП-9 + ВСДП-18 и др. Защита от газовой коррозии в области температур 1050–1100 °С – СДП-2, ВСДП-5, ВСДП-7 (Ni-Cr-Al-B), защита от сульфидно-оксидной коррозии в области температур 800–950 °С – СДП-1 (Ni-Co-Cr-Al-Y), СДП-6 (Co-Cr-Al-Ni-Y), защита от газовой коррозии в области температур 1100–1200 °С, соединительные слои теплозащитных покрытий (ТЗП) – СДП-2 + ВСДП-16(ВП) ((MeC) + (Ni-Cr-Al-Y) + (Ni-Al-Cr-Y)) и др. [8].

Одним из эффективных методов, позволяющих повысить эксплуатационную температуру лопаток, является использование керамических ТЗП и специаль-

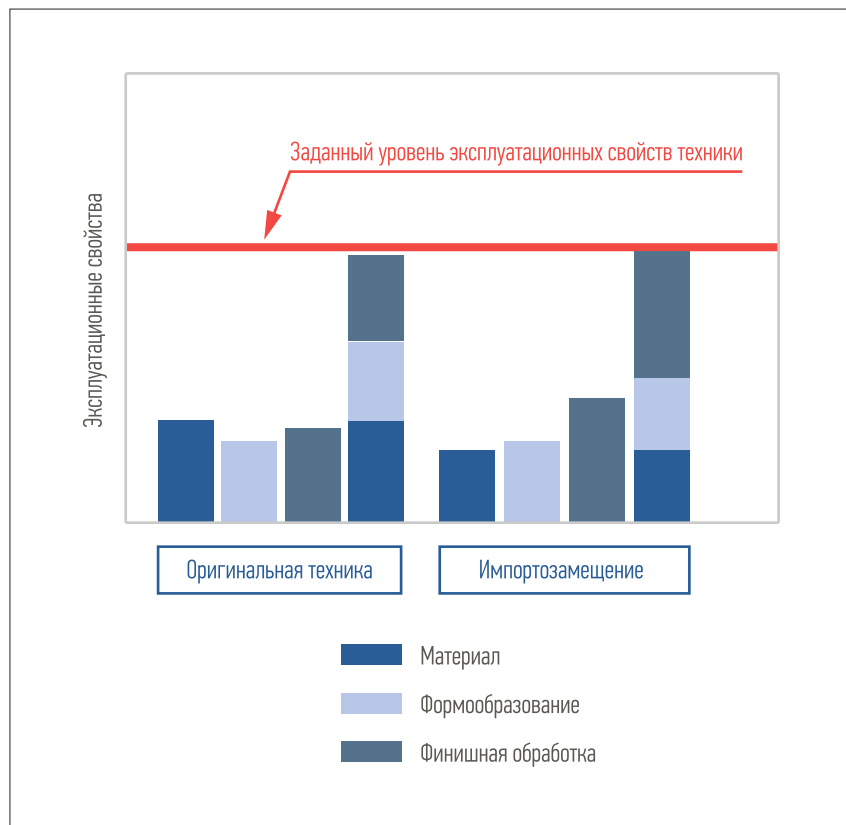


Рис. 4. Обеспечение заданного уровня эксплуатационных свойств детали энергомашин при импортозамещении за счет финишной защитно-упрочняющей обработки

ных конструкционных покрытий [8], созданных одновременно в России и других странах мира. Особый интерес представляют конструкционные охлаждающие покрытия (КОП), обладающие значительным потенциалом теплозащиты (рис. 2).

Отечественные разработки КОП, представляющие охлаждаемую полую оболочку, превосходят по защитным показателям аналогичные зарубежные разработки (рис. 3) [9], обеспечивая в 2,5–3,0 раза более эффективную теплозащиту по сравнению с зарубежными аналогами [10].

Обеспечение высокого уровня эксплуатационных характеристик лопаток турбомашин в России основывается на особом технологическом подходе, выделяющем существенную значимость финишных защитно-упрочняющих технологий, позволяющих многократно повысить ресурс и надежность деталей. К подобным техно-

логиям относят, в частности, такие перспективные методы, как плазменное полирование и активация поверхности перед нанесением покрытий, высокоэнергетическая ионно-электронно-плазменная обработка и нанесение функциональных покрытий [11]. При разработке отечественных ГТУ большой мощности с применением передовых высокоэнергетических технологий они будут соответствовать по своим параметрам мировым аналогам в данном классе мощности [3].

Последнее можно проиллюстрировать схемой, представленной на рис. 4. На схеме показано, что даже при использовании более экономичного материала детали при относительно одинаковой технологии формования финишная обработка обеспечивает заданные эксплуатационные характеристики, а при необходимости позволяет значительно повысить их по сравне-

нию с замещаемым оригиналом. Так, например, комплексное исследование при реинжиниринге лопаток первой ступени турбины ГТУ SGT-600 «Балтика-25» (рис. 5, 6, таблица) позволило сделать заключение о наличии потенциала по обеспечению ресурса и надежности за счет применения интегрированных технологий при изготовлении новых лопаток и их ремонте при эксплуатации.

Сравнительные испытания аналогов жаростойких покрытий лопатки турбины ГТУ SGT-600 «Балтика-25» показали, что



Рис. 5. Лопатка первой ступени турбины ГТУ SGT-600 «Балтика-25», подвергнутая реинжинирингу

российские покрытия, полученные с использованием интегрированных высокоэнергетических ионно-имплантационных и ионно-плазменных технологий, обеспечивают увеличение жаростойкости в 2,6 раза и повышают предел выносливости лопаток с 230 до 270 МПа [12, 13].

Реализация проекта по реинжинирингу деталей ГТУ SGT-600

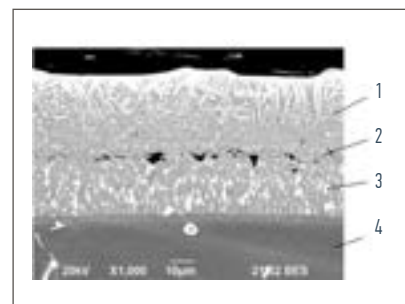


Рис. 6. Жаростойкое покрытие пера рабочей лопатки первой ступени турбины ГТУ SGT-600 «Балтика-25»: 1 – диффузионная зона 1; 2 – переходная зона; 3 – диффузионная зона 2; 4 – основной металл

Элементный состав покрытия НП первой ступени

Область анализа	Содержание элемента, %									
	Al	Si	Ti	Cr	Co	Ni	Mo	Ta	W	Pt
Покрытие	14,1	–	1,6	5,3	5,3	42,8	–	–	–	30,9
Диффузионная зона 1	9,8	1,4	3,1	9,5	6,6	39,9	–	–	4,6	25,1
Диффузионная зона 2	4,9	–	2,9	16,1	10,2	48,4	–	3,5	4,9	9,1
Основной металл	3,7	–	3,6	14,3	9,9	58,2	1,9	3,1	5,3	–

«Балтика-25» в рамках программы импортозамещения дает возможность конструкторам, исследователям и производителям провести анализ и сравнение научно-технических разработок ведущих компаний России и Европы, а также внедрить наиболее перспективные идеи в целях как повышения ресурса турбины ГТУ SGT-600, так и оптимизации эксплуатационно-ремонтных процессов. Данный проект может стать своего рода матрицей для тиражирования подхода при реинжиниринге широкого класса турбин.

Первые исследования в рамках проекта показывают, что потенциал для оптимизации конструкции лопаток ТВД достаточно высок. Широкий спектр российских жаропрочных никелевых сплавов и технологий их обработки составляет реальную конкуренцию за-

рубежным аналогам, а процессы обработки, подготовки, упрочнения и защиты поверхности уже сегодня значительно превосходят технологические процессы, применяемые на лопатках турбины ГТУ SGT-600 «Балтика-25».

ВЫВОДЫ

1. Интенсивная закупка Россией импортной техники и оборудования для энергетики привела к сокращению предприятий российского энергомашиностроения, что отрицательно сказалось на их развитии. Как следствие, страна получила зависимость от импорта техники и технологии.

2. Проводимая работа по импортозамещению критически важной продукции обеспечивает технологическую независимость России и позволяет производить продукт, по своим характеристикам не уступающий или превосходящий

зарубежные аналоги. При этом результатом исследований (НИР, НИОКР) является разработка новых технологий и материалов.

3. Использование достижений отечественной науки, а также инновационных технологических решений при ремонте и производстве расходных частей обеспечит значительное снижение затрат на жизненный цикл ГТУ SGT-600 «Балтика-25».

4. Исследования лопаток турбины ГТУ SGT-600 «Балтика-25» показали, что есть значительный потенциал для оптимизации конструкции и технологии изготовления лопаток ТВД на основе существующих отечественных научно-технических решений.

5. Полученные в ходе исследований результаты можно тиражировать в целях улучшения характеристик деталей и узлов эксплуатируемых ГПА. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Российский рынок энергооборудования: Аналитический обзор РБК. М., 2009 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://marketing.rbc.ru/research/562949965186617.shtml> (дата обращения: 12.04.2017).
2. Техническое задание на технологическое направление в рамках Постановления Правительства РФ № 1312 «Высокоэффективные газотурбинные установки большой мощности с улучшенными характеристиками по эксплуатационной надежности» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/napravlenie_Mnogotoplivnye_dvigateli.docx (дата обращения: 12.04.2017).
3. Царева И.Н., Тарасенко Ю.П., Фель Я.А. Постэксплуатационное состояние и технология продления ресурса лопаток турбины низкого давления газоперекачивающих агрегатов ГТК-25И // Вестник Самарского ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2006. № 2-1 (10). С. 149–153.
4. Смыслов А.М., Быбин А.А., Невьянцева Р.Р. и др. Оценка ремонтпригодности лопаток газоперекачивающих агрегатов // Теплоэнергетика. 2011. № 2. С. 30–35.
5. Военное обозрение. Первый советский стратегический бомбардировщик Ту-4. Январь 2013 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://topwar.ru/23565-pervyy-sovetskiy-strategicheskiy-bombardirovshchik-tu-4.html> (дата обращения: 12.04.2017).
6. История авиационного материаловедения. ВИАМ-80 лет: годы и люди / Под общ. ред. акад. РАН, проф. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012.
7. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой // Материаловедение. 1997. № 4. С. 32–38; № 5. С. 14–17.
8. Каблов Е.Н., Мубояджан С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 60–70.
9. Мухин В.С. Интегрированные вакуумные ионно-плазменные технологии обработки деталей ГТД. Физические основы, моделирование, проектирование. Уфа: Гилем, 2001. 216 с.
10. Патент РФ № 2210478. Способ изготовления полых металлических объектов / Б.Б. Мовчан, А.В. Корж, В. Топал. Заявл. 10.03.1997; опубл. 20.08.2003. Бюл. № 23.
11. Смыслов А.М., Мингажев А.Д., Селиванов К.С. и др. Ионно-плазменная технология формирования покрытий на лопатках турбины ГТД из жаростойких никелевых сплавов // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16. № 1 (46). С. 77–80.
12. Абраимов Н.В. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
13. Патент РФ № 2435872. Способ получения жаростойкого покрытия на лопатках турбин газотурбинных двигателей и энергетических установок / А.Д. Мингажев, А.А. Быбин, А.В. Новиков и др. Заявл. 01.02.2010; опубл. 10.12.2011. Бюл. № 34.