ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЧС88У-ВИ ПРИ ИОННО-ИМПЛАНТАЦИОННОМ МОДИФИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

ELECTROLYTIC-PLASMA PROCESSING OF HIGH-TEMPERATURE NICKEL ALLOY CHS88U-VI AT ION-IMPLANT SURFACE LAYER MODIFICATION

В. В. Настека
Vadim V. Nasteka

Публичное акционерное
общество «Газпром»,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

Public company «Gazprom»,
Saint-Petersburg,
Russian Federation

И. П. Семенова
Irina P. Semenova

Уфимский государственный
авиационный технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Aviation
Technical University,
Ufa, Russian Federation

И. Р. Кузеев
Iskander R. Kuzeev

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technical University,
Ufa, Russian Federation

Надежность и ресурс газоперекачивающих установок (ГПУ) в значительной мере определяются наличием, составом и качеством защитных покрытий, создаваемых на поверхности деталей, особенно на наиболее нагруженных – лопатках турбины. Однако ресурс покрытий, содержащих в основном комплекс компонентов типа Ni-Cr-Al-Y, ограничен.

Метод ионной модификации может существенным образом изменить физико-химическое состояние поверхности и, как следствие, повысить эксплуатационные свойства лопатки в целом. Целенаправленно выбирая атомы легирующей примеси и режимы облучения с помощью метода ионной имплантации, можно обеспечить высокую прочность поверхностного или подповерхностного слоя, изменить концентрацию и пространственное распределение дислокаций и иных дефектов структуры, обеспечить формирование мелкодисперсных высокопрочных выделений.

По сравнению с традиционными методами химико-термической обработки ионная имплантация позволяет в десятки раз сократить время обработки и резко понизить температуру обработки. Важным преимуществом метода является отсутствие явной границы раздела фаз, заметного изменения размеров детали. Данное обстоятельство позволяет исключить проблемы, которые приходится решать при разработке технологии нанесения покрытия, такие как обеспечение адгезионной прочности, минимального влияния на прочностные свойства детали, совместимости с основой. Качество поверхности оказывает значительное влияние на предел выносливости и коррозионную стойкость лопаток газоперекачивающих установок.

Наиболее перспективным методом обработки поверхности является электролитно-плазменное полирование (ЭПП) в нейтральных водных растворах солей низкой концентрации. В результате ЭПП с поверхности удаляется несколько микрон более богатого инородными включениями и газированного слоя металла, исчезает направленная анизотропия, приобретенная в процессе механической обработки. Применение данного метода перед проведением упрочнения ионной имплантацией и нанесением вакуумных ионно-плазменных покрытий позволяет совместить в одной операции обезжиривание, травление и активацию поверхности, что, в свою очередь, позволяет повысить эффективность ионной имплантации, а также улучшить свойства и адгезию покрытия к основному металлу.

Ключевые слова

жаропрочный сплав,
электролитно-плазменное
полирование, поверхностный слой,
ионная имплантация,
модифицирование материала,
высокотемпературный отжиг,
микротвердость, лантан

В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния ЭПП на ионно-имплантационную модификацию ионами лантана жаропрочного никелевого сплава ЧС88У-ВИ. Показано, что комплексная обработка указанного сплава, включающая ЭПП, ионную имплантацию ионами лантана, постимплантационный отжиг, позволяет повысить такие характеристики сплава, как микротвердость, усталостную и длительную прочность. Проведены исследования режимов комплексной упрочняющей обработки сплава ЧС88У-ВИ. Подобраны оптимальные режимы ЭПП, ионной имплантации, постимплантационного отжига. Результаты исследований планируются для внедрения в производство и ремонт деталей ГПУ.

The reliability and service life of gas pumping units (GPU) are largely determined by the presence, composition and quality of protective coatings created on the surface of the parts, especially on the most loaded ones – turbine blades. However, the service life of coatings containing mainly a complex of components of the Ni-Cr-Al-Y type is limited. The method of ion modification can significantly change the physical and chemical state of the surface and, as a result, increase the operating properties of the blade as a whole. Purposefully choosing atoms of doping admixture and modes of irradiation using the ion implantation method, it is possible to provide high strength of the surface or subsurface layer, change the concentration and spatial distribution of dislocations and other structural defects, ensure the formation of fine high-strength precipitates.

Compared with traditional methods of chemical and thermal treatment, ion implantation can reduce the processing time by dozens of times and dramatically reduce the processing temperature. An important advantage of the method is the absence of an explicit phase boundary, a noticeable change in the size of the part. This circumstance allows to exclude the problems that have to be solved in the development of coating technology, such as providing adhesive strength, minimal impact on the strength properties of the part, compatibility with the base. The surface quality has a significant impact on the endurance limit and corrosion resistance of the GPU blades.

The most promising method of surface treatment is electrolyte-plasma polishing (EPP) in neutral aqueous solutions of low concentration salts. As a result, the EPP from the surface removes several micrometers of the most rich in foreign inclusions and a polluted layer of metal, disappears directional anisotropy acquired during machining. The use of this method before the hardening of ion implantation and the application of vacuum ion-plasma coatings allows to combine in one operation degreasing, etching and activation of the surface, which in turn improves the efficiency of ion implantation, as well as improve the properties and adhesion of the coating to the base metal.

The article presents the results of theoretical and experimental studies of the effect of EPP on ion-implantation modification of heat-resistant Nickel alloy CHS88U-VI by lanthanum ions. It is shown that the complex processing of the alloy, including EPP, ion implantation of lanthanum ions, post-implantation annealing can improve such characteristics of the alloy as microhardness, fatigue and long-term strength. Investigations of the modes of complex hardening treatment of alloy CHS88U-VI. The optimal modes of EPP, ion implantation, post-implantation annealing were selected. The results of the research are planned for the introduction of the production and repair of parts of the GPU.

Key words

heat-resistant alloy,
electrolyte-plasma polishing,
surface layer, ion implantation,
material modification,
high temperature annealing,
microhardness, lanthanum

Введение

Проблема повышения надежности и ресурса газоперекачивающих агрегатов (ГПА) в значительной мере определяется наличием, составом и качеством упрочненного поверхностного слоя, создаваемого на поверхности

наиболее нагруженных деталей — лопаток турбины ГТУ.

Значительный эффект повышения эксплуатационных свойств материала деталей по таким характеристикам, как жаростойкость и термоусталость обеспечивают различные

вакуумные ионно-плазменные методы обработки материалов. При этом все более широкое распространение получают технологии, основанные на эффекте ионно-имплантационного модифицирования поверхностного слоя материалов. В производстве газовых турбин используются технологии ионно-имплантационной обработки [1–3], имеющие, по сравнению с традиционными методами диффузионного насыщения поверхностного слоя материалов, принципиально иную природу, основанную на активном характере процессов поверхностного легирования материала детали и позволяющие достичь, по сравнению с обычными методами защитно-упрочняющей обработки, многократного повышения ресурса деталей [4, 5].

Метод ионной модификации как технологический метод воздействия на поверхностный слой может существенным образом изменить его физико-химическое состояние. Целенаправленно выбирая атомы легирующей примеси и режимы облучения с помощью метода ионной имплантации, можно обеспечить высокую прочность поверхностного или подповерхностного слоя, изменить концентрацию и пространственное распределение дислокаций и иных дефектов структуры, обеспечить формирование мелкодисперсных высокопрочных выделений [2]. По сравнению с традиционными методами химико-термической обработки ионная имплантация позволяет в десятки раз сократить время и резко понизить температуру обработки. Важным преимуществом метода является отсутствие явной границы раздела фаз, заметного изменения размеров детали. Данное обстоятельство позволяет исключить проблемы, которые приходится решать при разработке технологии нанесения покрытия, такие как обеспечение адгезионной прочности, минимального влияния на прочностные свойства детали, совместимости с основой [6].

В составе промышленных жаропрочных никелевых сплавов содержатся легирующие элементы, уменьшающие их окисление [6]. Важнейшими из указанных легирующих элементов являются алюминий и хром, которые также являются составляющими многих жаростойких сплавов, используемых для получения защитных покрытий. Кроме того, в жаропрочные сплавы вводят в небольших количествах элементы, оказывающие положительное влияние на жаростойкость, такие как

Zr, Y, Si, элементы группы редкоземельных металлов (РЗМ): La, Ce, Hf, Zr, Yb и др. Многочисленные исследования показывают, что элементы из группы РЗМ имеют большое сродство к кислороду и сере, образуя тугоплавкие оксиды и сульфиды. В свою очередь, образующиеся дисперсные фазы на границе металл – оксид, усиливают адгезию оксидной пленки с металлом, препятствуя ее дальнейшему росту и последующему отслаиванию. Благоприятное влияние РЗМ на жаростойкость сплавов в том, что присутствие РЗМ в оксидной пленке на поверхности металла приводит к снижению активности кислорода, уменьшению внутренних напряжений, затрудняя ее скалывание [6].

Одним из способов изменения физико-химического состояния поверхности металла, который может существенно влиять на механизм окисления, является ионная бомбардировка. В частности, ионная имплантация или поверхностное легирование ионами различных элементов приводит к возникновению в поверхности множества точечных дефектов, которые, собираясь в кластеры и взаимодействуя друг с другом, создают сложную сетку дислокаций, служащих барьером для дальнейшей диффузии кислорода в подложку. Важным фактором в изменении характера окисления поверхности металла является вид имплантируемого иона. Значительное влияние на окисляемость сплава при высокой температуре оказывают термостабильные окислы с высокой степенью стехиометрии, препятствующие диффузии кислорода из среды в поверхность. К таким элементам относятся Al, Y, Th и элементы группы РЗМ (La, Yb, Ta и др). Были получены положительные результаты по жаростойкости ряда никелевых сплавов в сочетании с покрытием Ni-Cr-Al-Y и ионной имплантацией [7].

Однако процесс ионно-имплантационной обработки материала в значительной степени зависит от состояния поверхности, подвергающейся высокоэнергетическому воздействию ионов. Наличие чужеродных химических элементов, оксидных слоев, часто микрочастиц абразива и полировальной пасты, следов моющих средств, физически и химически адсорбированных атомов и молекул из остаточной атмосферы вакуумной камеры, а также микрогеометрии поверхности влияет на качественные характеристики модифицированного слоя обрабатываемого материала [8]. В этой связи

обеспечение чистой поверхности за счет эффективного удаления с нее чужеродных веществ, а также обеспечение минимальной шероховатости поверхности является весьма актуальной задачей обеспечения качественного модифицированного слоя.

Одним из методов подготовки поверхности материалов является очистка ионной бомбардировкой [9]. Но данный метод имеет определенные ограничения по возможности удаления поверхностных загрязнений и используется непосредственно перед обработкой поверхности. Кроме того, он практически не способен уменьшить микрогеометрию поверхности и в зависимости от вида загрязнений не всегда может быть эффективно использован. Обработка поверхностей деталей из жаропрочных никелевых сплавов в промышленности проводится также химическим и электрохимическим методами, однако эти методы связаны с высокой агрессивностью растворов, а также сложностью обеспечения требуемого качества и свойств поверхности [10].

В то же время наиболее перспективным методом обработки поверхности различных сплавов является электролитно-плазменное полирование, обладающее высокими экологическими свойствами [11, 12], позволяющее обеспечить наиболее благоприятное состояние поверхностного слоя материалов для дальнейшей обработки ионно-плазменными и ионно-имплантационными методами.

Сплав ЧС88У-ВИ является высоколегированным сплавом на никелевой основе. При ионно-имплантационной обработке сплава наибольшее влияние имплантируемый ион будет оказывать на упрочняющую фазу, которой в никелевых сплавах является γ' -фаза Ni_3Al . В жаропрочном никелевом сплаве γ' -фаза имеет упорядоченную ГЦК-решетку, с атомами алюминия, находящимися в вершинах куба, и атомами никеля, центрирующими грани. Учитывая значительную разницу в атомных радиусах La и Al, Ni, после ионной имплантации можно ожидать искажение кристаллической решетки γ' -фазы и, как следствие, ее упрочнение. Поскольку поверхность сплава непосредственно после ионной имплантации представляет собой метастабильную систему, то при последующем воздействии температуры она будет стремиться к термодинамическому равновесию. В соответствии с равновесными фазовыми диаграммами состояния лантана возможно образова-

ние интерметаллидов, как с никелем. При этом лантан, имеющий большое сродство с кислородом, образует оксиды La_2O_3 и перовскиты типа LaMO_3 (M – элемент, входящий в подложку), имеющие высокую степень стехиометрии.

В качестве объекта исследования были взяты образцы из сплава ЧС88-ВИ, полученные по технологии изготовления лопаток турбины методом равноосной кристаллизации. Образцы подвергались стандартной термической обработке. Перед упрочнением ионной имплантацией образцы подвергались электролитно-плазменной обработке в составе водных растворов на основе лимоннокислых солей с $\text{pH} \approx 5,5$.

Известно, что усталостные трещины всегда зарождаются на поверхности детали вблизи явных концентраторов напряжения, которыми являются видимые забоины и царапины, частицы хрупких фаз и т. д. Проведенные авторами эксперименты показали, что снижение шероховатости поверхности за счет применения ЭПП на титановых сплавах приводит к увеличению предела выносливости до 15 %. Следовательно, применение технологии ЭПП к жаропрочным никелевым сплавам потенциально может привести к увеличению предела выносливости материалов лопаток ГПА, а в совокупности с технологическими решениями защиты поверхности к повышению их рабочего ресурса.

На рисунке 1 представлена поверхность исследуемых образцов из сплава ЧС88-ВИ до и после полирования в водных растворах на основе лимоннокислых солей (при следующем соотношении компонентов, % масс.: аммоний лимоннокислый двухзамещенный 2–18, вода — остальное). Время полирования подбиралось эмпирическим путем и в процессе полирования постепенно увеличивалось до достижения нужных показателей шероховатости и составило около 2 мин (при напряжении 260–320 В, температуре 60–80 °С). В процессе ЭПП происходит сглаживание поверхности исследуемых образцов. Царапины и риски, оставшиеся на поверхности изделия от серийной технологии полировки, уменьшаются и становятся незаметными уже после 2 мин полирования.

На рисунке 2 представлен профиль шероховатости поверхности исследуемых образцов до и после ЭПП. Анализ профилограмм свидетельствует о снижении шероховатости

а)

б)

а) до ЭПП; б) после ЭПП

Рисунок 1. Шероховатость поверхности сплава ЧС88-ВИ

поверхности с $Ra\ 2,0$ в исходном состоянии до $Ra\ 0,3$ после ЭПП.

Одним из критериев оценки модифицированной поверхности является микротвердость. Измерение микротвердости проводили на автоматическом микротвердомере EmcoTest DuraScan 50 при нагрузке $P = 10\ Н$.

Оценка влияния электролитно-плазменной обработки и ионной имплантации на микротвердость поверхностных слоев сплава ЧС88-ВИ (рисунок 3) показала, что ЭПП несколько повышает величину микротвердости материала поверхностного слоя (с 2500 до 2800 МПа). Аналогичные эффекты были по-

а)

б)

Рисунок 2. Профилограммы исследуемых образцов до (а) и после (б) ЭПП

лучены также при обработке этим методом легированных сталей [13].

Последующая ионно-имплантационная обработка поверхностного слоя сплава ЧС88-ВИ ионами La позволяет повысить микротвердость материала поверхностного слоя до 4000 МПа. Полученные результаты свидетельствуют о более глубоких изменениях структуры поверхностного слоя по глубине до 25 мкм. Такое сверхглубинное изменение структуры имплантируемой поверхности можно объяснить эффектом дальнего действия [14]. В процессе ионной бомбардировки тяжелыми ионами La в условиях нагрева облучаемой поверхности и тем более при последующих отжигах активируется подвижность атомов матрицы и легирующих примесей, что способствует диффузионной миграции атомов La. Наряду с диффузионными процессами важную роль в проявлении эффекта дального

действия играет образование дислокационной структуры на глубине вплоть до 30 мкм: в объединенной зоне каскадов атомных столкновений в результате диффузионной перестройки образуются вакансионные петли дислокаций, которые растут и трансформируются в условиях повышения концентрации точечных дефектов (вакансий).

Влияние комплексного модифицирования поверхности сплава ЧС88У-ВИ на его эксплуатационные свойства оценивалось по результатам испытаний на длительную и усталостную прочность. Проведенные испытания показали, что при больших значениях рабочих напряжений отмечается незначительное увеличение долговечности образцов из сплава ЧС88У-ВИ, подвергнутого ЭПП и ионной имплантации La + по сравнению с исходными значениями (рисунок 4).

а) исходное состояние; б) после ЭПП;
в) после ЭПП, ионной имплантации и постимплантационного отжига

Рисунок 3. Изменение величины микротвердости по глубине поверхностного слоя после ЭПП, ионной имплантации и вакуумного отжига

В области малых баз испытаний (высокие напряжения, малая долговечность) упрочняющий эффект от ионной имплантации La+ недостаточно сказывается на работоспособности сплавов (рисунок 4). С увеличением базы испытаний наблюдается более выраженное

положительное влияние комплексной обработки поверхности на жаропрочность.

В условиях больших баз испытаний модификация поверхностного слоя La+ при высокотемпературной эксплуатации приводит к протеканию диффузионных процессов и, видимо, к образованию дополнительных дис-

Рисунок 4. Влияние комплексного модифицирования поверхности на длительную прочность

персных фаз лантана в подповерхностной зоне, являющихся эффективными стопорами на пути движения дислокаций, а также повышающих адгезионную прочность оксидных пленок, образующихся на поверхности. Образующаяся система дислокаций, а также выделение фаз лантана в поверхностном слое повышают прочность матрицы, приводя к смягчению опасных пиковых напряжений пу-

тем эстафетной передачи деформации, и, как следствие, снижают опасность хрупкого разрушения.

Установлено положительное влияние комплексного модифицирования поверхности и на характеристики усталостной прочности. Так, предел выносливости модифицированных образцов превышает аналогичные показатели в исходном состоянии на 6 % (рисунок 5).

Рисунок 5. Влияние комплексного модифицирования на предел выносливости

Выводы

1. Электролитно-плазменное полирование деталей из сплава ЧС88У-ВИ позволяет снизить шероховатость поверхности, удалить чужеродные элементы и загрязнения и обеспечить качественную ионно-имплантационную обработку материала.

2. Электролитно-плазменное полирование позволяет повысить микротвердость поверх-

ностного слоя сплава ЧС88У-ВИ с 2500 до 2800 МПа, дальнейшая ионно-имплантационная обработка ионами La⁺ с постимплантационным отжигом позволяет повысить микротвердость материала поверхностного слоя до 4000 МПа. Толщина упрочненного слоя составляет порядка 25 мкм.

3. При значительных рабочих напряжениях происходит небольшое, по сравнению

с необработанным материалом, повышение долговечности сплава ЧС88-ВИ, подвергнутого ЭПП и ионной имплантации La⁺. При увеличении базы испытаний на жаропрочность повышается долговечность обработанного материала. Предел выносливости модифицированных образцов сплава ЧС88-ВИ

превышает аналогичные показатели в исходном состоянии на 6 %.

4. Усталостная и длительная прочность образцов из сплава ЧС88-ВИ, подвергнутых модифицированию, выше, чем у образцов из сплава в исходном состоянии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Диденко А.Н., Лигачев А.Е. Куракин И.Б. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 184 с.

2. Белый А.В., Кукареко В.А., Лободаева О.В., Таран И.И., Ших С.К. Ионно-лучевая обработка металлов, сплавов и керамических материалов. Минск: Изд-во ФТИ НАНБ, 1998. 220 с.

3. Ягодкин Ю.Д. Влияние ионной имплантации иттербием на жаростойкость никеля // Металловедение и термическая обработка металлов. 1992. № 4. С. 15–17.

4. Каблов А.Н. Перспективы применения в авиационном двигателестроении ионной технологии // Авиационная промышленность. 1992. № 9. С. 9–12.

5. Пайкин А.Г., Львов А.Ф., Шулов В.А., Ночовная Н.А., Энгелько В.А. Использование сильноточных импульсных электронных пучков для модификации свойств лопаток газотурбинных двигателей // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2003. № 3. С. 75–83.

6. Смыслов А.М. Высокотемпературная коррозия сплава ЦНК7П с защитным алюминидным покрытием // Защита металлов. 2004. Т. 40. № 5. С. 553–556.

7. Афанасьев Н.И., Лепакова О.К. Влияние ионной имплантации на внутреннее окисление и сопротивление ползучести сплава ЖС6У с защитным покрытием // Вестник тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. Вып. 4. С. 1714–1716.

8. Гусева М.И. Ионная имплантация в металлах // Поверхность. Физика, химия, механика. 1982. № 4. С. 27–50.

9. Белоус В.А., Лапшин В.И., Марченко И.Г., Неклюдов И.М. Радиационные технологии модификации поверхности. Ионная очистка и высокодозовая имплантация // Физическая инженерия поверхности. 2003. Т. 1. № 1. С. 40–48.

10. Попова С.В., Мубояджан С.А., Будиновский С.А., Добрынин Д.А. Особенности электролитно-плазменного травления жаростойких покрытий с поверхности деталей из жаропрочных никелевых сплавов // Труды ВИАМ. Электронный журнал. № 2. 2016.

11. Веселовский А.П. Особенности электролитно-плазменной обработки металлов в нетоксичных электролитах // Металлообработка. 2002. № 6. С. 29–31.

12. Воленко А.П., Бойченко О.В., Чиркунова Н.В. Электролитно-плазменная обработка металлических изделий // Вектор науки ТГУ. 2012. Т. 22. № 4. С. 144–147.

13. Смыслова М.К. Таминдаров Д.Р., Самаркина А.Б. Влияние электролитно-плазменной обработки на физико-химическое состояние поверхности и механические свойства лопаток паровых турбин из стали 20Х13 // Авиационно-космическая техника и технология. 2011. № 7 (84). С. 25–28.

14. Мартыненко Ю.В. Эффекты дальнего действия при ионной имплантации // Итоги науки и техники. 1993. Т. 7. С. 82–109.

REFERENCES

1. Didenko A. N., Ligachev A. E. Kurakin I. B. *Vozdeistvie puchkov zaryazhennykh chastits na poverkhnost' metallov i splavov* [Influence of Charged Particles Beams on the Metals and Alloys Surface] Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 184 p. [in Russian].

2. Belyi A.V., Kukareko V.A., Lobodaeva O.V., Taran I.I., Shikh S.K. *Ionno-luchevaya obrabotka metallov, splavov i keramicheskikh materialov* [Ion-Beam Treatment of Metals, Alloys and Ceramic Materials]. Minsk, FTI NANB Publ., 1998. 220 p. [in Russian].

3. Yagodkin Yu.D. Vliyanie ionnoi implantatsii itterbiem na zharostoikost' nikelya [Effect of Ion Implantation of Ytterbium on the Heat Resistance of Nickel]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* — *Metal Science and Heat Treatment*, 1992, No. 4, pp. 15–17. [in Russian].

4. Kablov A.N. Perspektivy primeneniya v aviadvigatelistroenii ionnoi tekhnologii [Prospects of Ion Technology Application in Aircraft-Engine-Building]. *Aviatsionnaya promyshlennost'* — *Aviation Industry*, 1992, No. 9, pp. 9–12. [in Russian].

5. Paikin A.G., L'vov A.F., Shulov V.A., Nochovnaya N.A., Engel'ko V.A. Ispol'zovanie sil'notochnykh impul'snykh elektronnykh puchkov dlya modifikatsii svoystv lopatok gazoturbinykh dvigatelei [Using of High-Current Pulsed Electron Beams for Gas Turbine Engine Blades Properties Modification]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* — *Engineering & Automation Problems*, 2003, No. 3, pp. 75–83. [in Russian].

6. Smyslov A.M. Vysokotemperaturnaya korroziiya splava TsNK7P s zashchitnym alyuminidnym pokrytiem [High-Temperature Corrosion of Nickel Alloy Tsnc7p with a Protective Aluminide Coating]. *Zashchita metallov* — *Protection of Metals*, 2004, Vol. 40, No. 5, pp. 553–556 [in Russian].

7. Afanas'ev N.I., Lepakova O.K. Vliyanie ionnoi implantatsii na vnutrennee okislenie i soprotivlenie polzuchesti splava ZHS6U s zashchitnym pokrytiem [Influence of Ion Implantation on Internal Oxidation and Creep Resistance of Alloy ZHS6U with Protective Coating]. *Vestnik Tambovskogo universiteta Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki* — *Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2013, Vol. 18, Issue 4, pp. 1714–1716. [in Russian].

8. Guseva M.I. Ionnyaya implantatsiya v metallakh [Ion Implantation in Metals]. *Poverkhnost'. Fizika, khimiya, mekhanika* — *Physics, Chemistry and Mechanics of Surfaces*, 1982, No. 4, pp. 27–50. [in Russian].

9. Belous V.A., Lapshin V.I., Marchenko I.G., Neklyudov I.M. Radiatsionnye tekhnologii modifikatsii poverkhnosti. Ionnaya ochistka i vysokodozovaya implantatsiya [Ion Beam Technologies of Surface Modification. Ion Cleaning and High Dose Implantation]. *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti — Physical Surface Engineering*, 2003, Vol. 1, No. 1, pp. 40–48. [in Russian].

10. Popova S.V., Muboyadzhn S.A., Budinovskii S.A., Dobrynin D.A. Osobennosti elektrolitno-plazmennogo travleniya zharostoikikh pokrytii s poverkhnosti detalei iz zharoprochnykh nikelovykh splavov [The Feature of Electrolytic Plasma Etching of Heat Resistant Coatings from Parts Surface of High-Temperature Nickel Alloys]. *Trudy VIAM. Elektronnyi zhurnal — Electronic Scientific Journal* «Proceedings of VIAM», 2016, No. 2, p. 4. [in Russian].

11. Veselovskii A.P. Osobennosti elektrolitno-plazmennoi obrabotki metallov v netoksichnykh elektrolitakh [Peculiarities of Electrolyte and Plasma Treatment of Metals in Non-Toxic Electrolytes]. *Metallrobrabotka — Metalworking*, 2002, No. 6, pp. 29–31. [in Russian].

12. Volenko A.P. Boychenko O.V., Chirkunova N.V., Elektrolitno-plazmennaya obrabotka metallicheskih izdelii [Electrolyte-Plasma Treatment of Metals]. *Vektor nauki TGU — Vector science Togliatti State University*, 2012, Vol. 22, No. 4. pp. 144–147. [in Russian].

13. Smyslova M.K., Tamindarov D.R., Samarkina A.B. Vliyanie elektrolitno-plazmennoi obrabotki na fiziko-khimicheskoe sostoyanie poverkhnosti i mekhanicheskie svoystva lopatok parovykh turbin iz stali 20Kh13 [Effect of Electrolytic-Plasma Treatment on Physico-Chemical State Surface and Mechanical Properties of Steam Turbine Blades Steel 20Kh13]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya — Aerospace Engineering and Technology*, 2011, No. 7 (84), pp. 25–28. [in Russian].

14. Martynenko Yu.V. Effekty dal'nodeistviya pri ionnoi implantatsii [in Russian]. *Itogi nauki i tekhniki — Journal of Mathematical Sciences*, 1993, Vol. 7, pp. 82–109. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Настека Вадим Викторович, заместитель начальника Департамента — начальник Управления ПАО «Газпром», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Vadim V. Nasteka, Deputy Head Department — Head of Directorate, Gazprom PJSC, Saint-Petersburg, Russian Federation

e-mail: v.nasteka@adm.gazprom.ru

Семенова Ирина Петровна, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт физики перспективных материалов, УГАТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Irina P. Semenova, Doctor of Engineering Sciences, Leading Researcher, Research Institute of Physics of Advanced Materials, USATU, Ufa, Russian Federation

e-mail: semenova-ip@mail.ru

Кузеев Искандер Рустемович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Iskander R. Kuzeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: kuzeev2002@mail.ru