

Настека В. В.

Nasteka V. V.

v.nasteka@adm.gazprom.ru

Публичное акционерное общество «Газпром», Санкт Петербург

Семенова И. П.

Semenova I. P.

semenova-ip@mail.ru

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

Большаков Б. О.

Bolshakov B. O.

bobolshakov@gmail.com

Научно-производственное предприятие «Уралавиаспецтехнология», Уфа

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

EFFECT OF MODIFICATION OF THE SURFACE LAYER OF HEAT- RESISTANT NICKEL ALLOY ON OPERATIONAL PROPERTIES

***Аннотация.** Метод ионной имплантации, широко применяемый в авиационной отрасли, может существенным образом изменять физико-химическое состояние поверхности и, как следствие, повышать эксплуатационные свойства лопаток турбины 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 ГПУ.

К наиболее перспективным способам обработки поверхности относится электролитно-плазменная полировка (ЭПП) в нейтральных

водных растворах солей низкой концентрации. В результате ЭПП с поверхности удаляется несколько микрометров наиболее богатого инородными включениями и загазованного слоя металла, исчезает направленная анизотропия, приобретенная в процессе механической обработки. Применение данного метода перед проведением упрочнения ионной имплантацией и нанесением вакуумных ионно-плазменных покрытий (ВПП) 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.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований влияния ЭПП и ионной имплантации лантаном жаропрочного никелевого сплава ЧС88У-ВИ на эксплуатационные характеристики. Показано, что экспериментальная обработка указанного сплава, позволяет повысить микротвердость поверхностных слоев сплава, усталостную и длительную прочность. Подобраны оптимальные режимы ЭПП, ионной имплантации, постимплантационного отжига. Результаты исследований планируется для внедрения в производство и ремонт деталей ГПУ.

Abstract. *The method of ion modification, widely used in the aviation industry, can significantly change the physical and chemical state of the surface and, as a result, increase the operating properties of the blades 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 excluding 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.

Electrolytic-plasma polishing (EPP) in neutral aqueous solutions of low-concentration salts is one of the most promising methods for surface treatment. 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 you 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 experimental studies of the effect of EPP and lanthanum ion implantation of heat-resistant Nickel alloy CHS88U-VI. It is shown, that the experimental treatment of this alloy makes it possible to increase the microhardness of the surface layers of the alloy, fatigue and long-term strength. The optimal modes of EPP, ion implantation, post-implantation annealing were selected. The research results are planned for the introduction of the production and repair of parts of the GPU.

Ключевые слова: жаропрочный сплав, электролитно-плазменное полирование, поверхностный слой, ионная имплантация, модифицирование материала, микротвердость.

Key words: heat-resistant alloy, electrolyte-plasma polishing, surface layer, ion implantation, material modification, microhardness.

Значительный эффект повышения эксплуатационных свойств материала лопаток 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 обработки и резко понизить температуру обработки. Важным преимуществом метода является отсутствие явной границы раздела фаз, заметного изменения размеров детали.

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 композиций, 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 обеспечивается тем, 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, служащие 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, следы моющих средств, физически и химически адсорбированных атомов, и молекул из остаточной атмосферы вакуумной камеры, а также микрогеометрия 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. 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 образование интерметаллидов. При этом, лантан, имеющий большое сродство с кислородом, образует оксиды La_2O_3 и перовскиты типа LaMeO_3 , (где Me – 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 $\text{pH} \approx 5,5$. Эксплуатационные характеристики отечественного сплава приведены в сравнении с наиболее распространённым, при производстве лопаток ГПУ импортного производства, зарубежным сплавом In792.

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. Многочисленные исследования по влиянию ЭПП на усталостные характеристики различных металлов и сплавов показывают, что снижение шероховатости поверхности за счет применения ЭПП на титановых сплавах приводит к увеличению предела выносливости до 15 %, на сталях до 10%. 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 рис. 1 представлена поверхность исследуемых образцов из сплава ЧС88-ВИ до и после полирования в водных растворах на основе лимоннокислых солей (при следующем соотношении компонентов, мас. %: 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 минут (при напряжении 260-320 В, при 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 минут полирования.

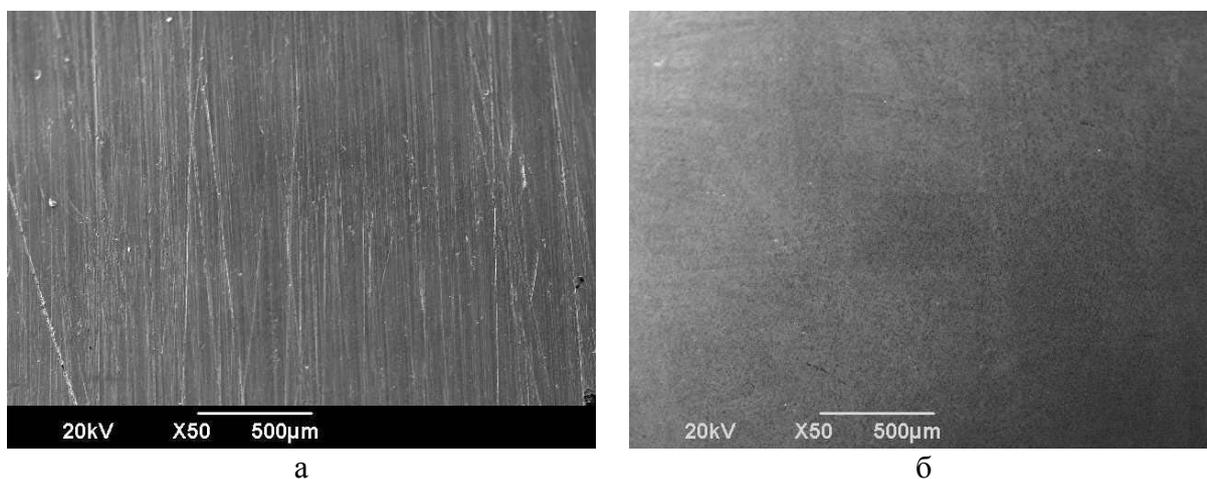
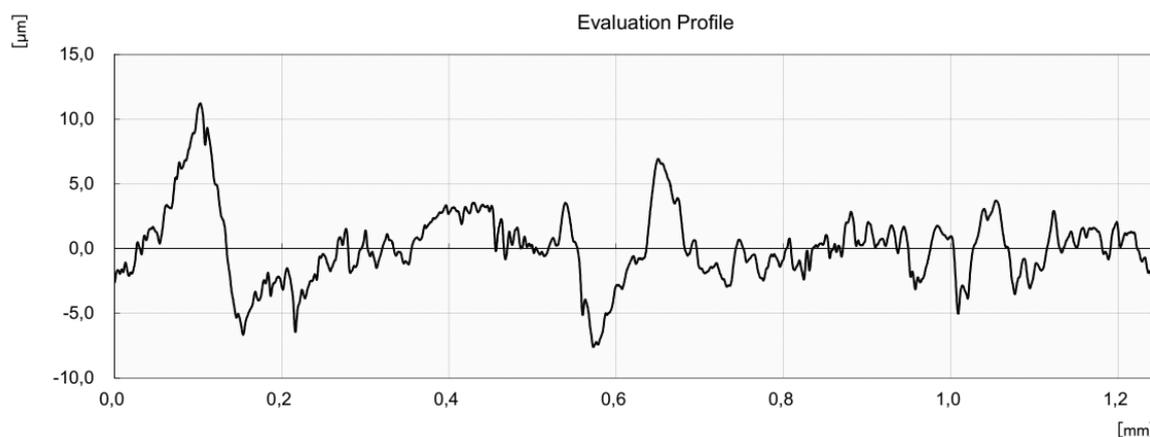
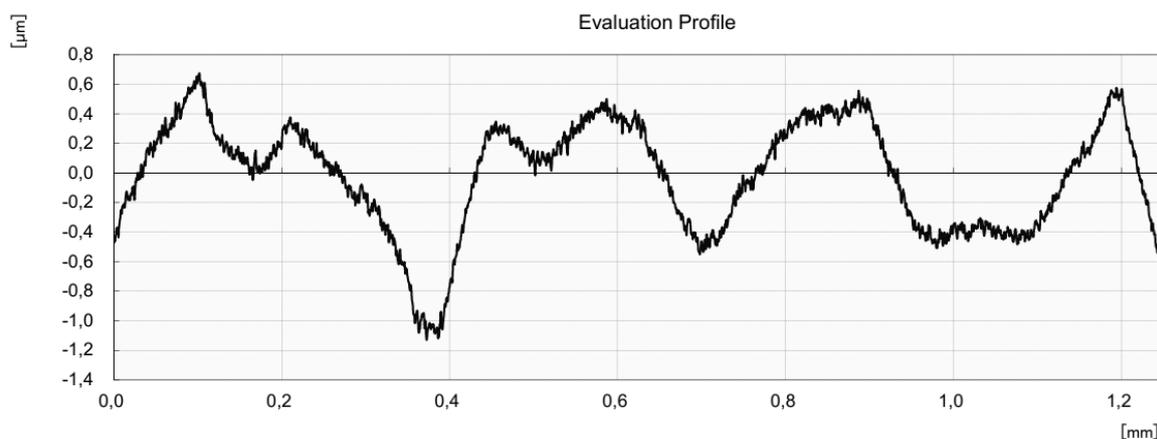


Рис. 1. Шероховатость поверхности сплава ЧС88-ВИ:
а) до ЭПП; б) после ЭПП

На рис. 2 представлен профиль шероховатости поверхности исследуемых образцов до и после ЭПП. Анализ профилограмм свидетельствует о снижении шероховатости поверхности с Ra 2,0 в исходном состоянии до Ra 0,3 после ЭПП.



а



б

Рис. 2. Профилограммы исследуемых образцов до (а) и после (б) 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 показала, что ЭПП несколько повышает величину микротвердости материала поверхностного слоя (с 2500 МПа до 2800 МПа). Аналогичные эффекты были получены 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].

Влияния комплексного модифицирования поверхности сплава ЧС88У-ВИ на его эксплуатационные свойства оценивалась 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 (рис. 3).

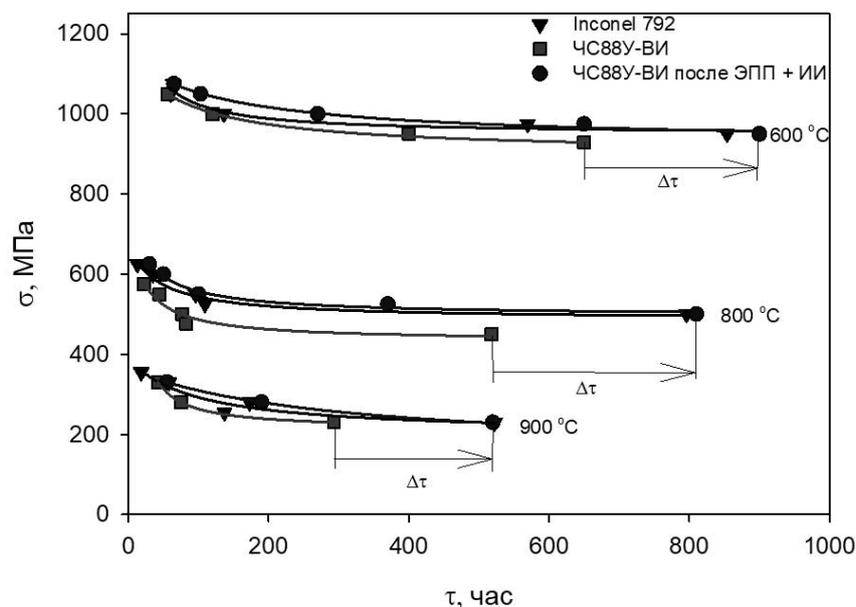


Рис. 3. Влияние комплексного модифицирования поверхности на длительную прочность

В области малых баз испытаний (высокие напряжения, малая долговечность), упрочняющий эффект от ионной имплантации La+ недостаточно сказывается на работоспособность сплавов (рис. 3). С увеличением базы и уменьшением нагрузок испытаний наблюдается более выраженное положительное влияние комплексной обработки поверхности на жаропрочность.

В условиях больших баз и малых нагрузок испытаний модификация поверхностного слоя La+ при высокотемпературной эксплуатации приводит к протеканию диффузионных процессов и, по-видимому, образованию дополнительных дисперсных фаз лантана в подповерхностной зоне, являющихся эффективными стопорами на пути движения дислокаций.

Положительное влияние комплексного модифицирования поверхности установлено и на характеристики усталостной прочности. Так предел выносливости модифицированных образцов превышает аналогичные показатели в исходном состоянии на 6 % (рис. 4.)

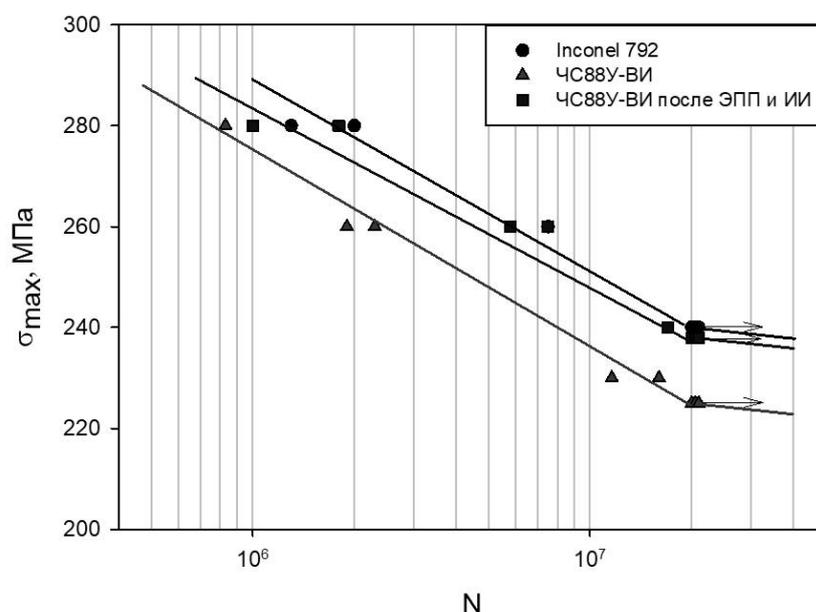


Рис. 4. Влияние комплексного модифицирования на предел выносливости

Выводы

1. Электролитно-плазменное полирование деталей из сплава ЧС88У-ВИ позволяет снизить шероховатость поверхности, удалить чужеродные элементы и загрязнения, повысить микротвердость поверхностного слоя с 2500 МПа до 2800 Мпа, и обеспечить качественную ионно-имплантационную обработку материала.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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., Лободаеа О.В., Таран И.И., Ших С.К. Ионно - лучевая обработка металлов, сплавов и керамических материалов. Минск: Изд-во ФТИ НАИБ, 1998. 220 с.

3. Ягодкин Ю.Д. Влияние ионной имплантации иттербием на жаростойкость никеля // Материаловедение и термическая обработка металлов. 1992. № 4. С. 15–17.
4. Каблов А.Н. Перспективы применения в авиадвигателестроении ионной технологии // Авиационная промышленность. 1992. №9. С.9-12.
5. Использование сильноточных импульсных электронных пучков для модификации свойств лопаток ГТД // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2003. №3. С. 41-49.
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., Лепаква О.К. Влияние ионной имплантации на внутреннее окисление и сопротивление ползучести сплава жсбу с защитным покрытием // Вестник ТГУ. Т.18. Вып.4. 2013.
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. Электролитно-плазменная обработка металлических изделий // Вектор науки ТГУ. 2012. Т. 22. № 4. С. 144-147.
13. Смылова М.К. 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.