

УДК 621.152

К вопросу об эффективности импортозамещения в наукоемких областях производства газоперекачивающего оборудования

В. В. Настека¹, С. В. Новиков², А. М. Смыслов³

¹⁻³nii-at@ugatu.su

¹ООО «Газпром добыча Кузнецк»

^{2,3}ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 20.03.2020

Аннотация. Рассмотрена возможность применения авиационных газотурбинных двигателей в качестве привода для газоперекачивающих агрегатов, а также отечественного жаропрочного сплава ЧС88У-ВИ взамен импортного Инконель 792 при изготовлении рабочих лопаток турбины; технологии обработки поверхности пера, включающей электролитно-плазменное полирование и имплантацию ионами лантана, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств деталей.

Ключевые слова: привод газоперекачивающего агрегата; газотурбинный привод; лопатки турбины из сплава Инконель 792; электролитно-плазменное полирование и ионная имплантация поверхности пера.

Газовая промышленность является важной, динамически развивающейся отраслью экономики России, одна из основных целей которой – обеспечение высокой экономической эффективности и конкурентоспособности отрасли на международном рынке. Сегодня протяженность магистральных газопроводов ОАО «Газпром» составляет более 150 тыс. км. В состав газотранспортной системы ОАО «Газпром» входит около 400 компрессорных станций, включающих более 4100 газоперекачивающих агрегатов (ГПА), в которых используется газотурбинный привод (ГТП) (около 88 %) [1].

Однако с введением в 2014 г. экономических санкций в газовой отрасли России возникли определенные трудности, связанные с осуществлением закупок импортного оборудования и его комплектующих для обеспечения эксплуатации газоперекачивающих станций. В ответ на это Правительство РФ утвердило план мероприятий по снижению зависимости топливно-энергети-

ческого комплекса от импорта товаров и услуг, направленный на снижение доли импортного оборудования, технических устройств и комплектующих для нужд нефтегазового производства.

Это обстоятельство послужило причиной изыскания промышленностью России собственных возможностей. В частности, наметились следующие подходы для решения проблем импортозамещения в области газоперекачивающего оборудования:

- 1) ремонт оборудования;
- 2) использование отечественного оборудования;
- 3) производство импортозамещающего оборудования.

Положительным моментом всех вышеперечисленных подходов является возможность инвестиций в собственную науку, производство и экономику и, как следствие, повышение суверенитета страны.

В Российской Федерации накоплен огромный опыт разработки и производства

газотурбинных авиационных двигателей, которые являются научно-технологической и конструкторской базой для создания высокоэффективных ГТП для ГПА.

При этом анализ зарубежного опыта разработок ГТП позволил выявить следующие их особенности [2]:

1. За базовые варианты при разработке ГТП берутся конструкции авиационных ГТД, которые с учетом специфики эксплуатации наземных газотурбинных установок (ГТУ) существенно дорабатываются до использования их в качестве наземных газовых турбин при одновременном обеспечении повышенного ресурса работы.

2. При разработке и производстве ГТП используются научно-технические достижения авиадвигателестроения.

3. Возможность дальнейшего совершенствования и доводки конструкции и технологии изготовления ГТП.

Возможность использования авиационных ГТД как научно-технологической и конструкторской базы для создания высокоэффективных ГТП связана также с задачами конверсии объектов авиационной техники и предприятий, решение которых – одна из важнейших целей развития современной экономики. Как показывает мировая практика создания ГТУ, использование высокоэффективных, наукоемких авиационных ГТД, техника и технология которых находятся на достаточно высоком уровне развития и совершенства, является крайне эффективным подходом.

Конвертирование авиационных ГТД осуществляется с учетом новых задач и требований, связанных со спецификой применения двигателя в наземных условиях [3–6]:

1) экономически оправданная себестоимость конвертируемого двигателя;

2) высокая эксплуатационная надежность и ресурс работы в различных климатических условиях;

3) легкость транспортировки, монтажа, обслуживания и ремонта;

4) использование в качестве топлива природного газа;

5) высокая экологичность.

В то же время одним из основных отличий эксплуатационных характеристик на-

земных ГТП от авиационных ГТД является значительный (от 50 до 100 тыс. ч) ресурс. Это требует особого подхода к разработке материалов для деталей ГТП, главным образом для деталей из жаропрочных сплавов, а также привлечения для повышения надежности и ресурса финишных защитно-упрочняющих технологий, основанных на новых наукоемких подходах. В частности, условия эксплуатации ГТП предполагают значительный эрозионный износ лопаток из-за большой вероятности попадания в двигатель абразивных частиц.

Практика создания конвертируемых двигателей позволила выявить следующие основные направления проектно-конструкторских и технологических работ при создании ГТП на базе авиационного двигателя [7]:

1) использование в качестве базового объекта для создания ГТП всего авиационного ГТД;

2) использование в качестве базовых объектов отдельных узлов авиационного ГТД;

3) использование научно-технического, конструкторского и технологического опыта, накопленного при разработке и производстве авиационного двигателестроения.

Однако, учитывая различные требования к ресурсу авиационных ГТД и наземных ГТП, необходимо применять материалы с высокими эксплуатационными свойствами и технологиями защитно-упрочняющей обработки. Первые два из вышеприведенных направлений не позволяют создать достаточно приемлемый вариант ГТП. Поэтому последнее направление, связанное с использованием опыта разработки и производства авиационных ГТД, является наиболее целесообразным, поскольку позволяет не только создать ГТП, соответствующий по характеристикам требуемым условиям эксплуатации, но и обеспечить дальнейшее совершенствование техники и технологии в этой области за счет применения новых наукоемких технологий и конструкторских решений.

С точки зрения импортозамещения при ремонте для замены изношенных деталей в ГТП, находящихся в настоящее время в эксплуатации, необходимо более актив-

ное использование инжиниринга. Например, основываясь на опыте авиадвигателестроения, при изготовлении лопаток ГТД достаточно эффективно используются методы 3D прототипирования. В частности, изготовление изделий методами 3D прототипирования осуществляется одним экструдером, при этом рабочим материалом является металлический порошок. Лопатки могут изготавливаться из различных сплавов, например жаропрочных или титановых. При этом структура материала лопаток представляет собой проницаемый спеченный порошок [8].

В качестве примера использования авторами настоящей статьи наукоемкого подхода с привлечением опыта, накопленного при разработке и производстве авиационного двигателестроения, а также применения прогрессивных технологических приемов для решения вопросов импортозамещения в областях производства газоперекачивающего оборудования, можно привести следующее.

Известно, что повышение надежности и ресурса ГПА в значительной мере определяется качеством слоя, формируемого на поверхности таких наиболее ответственных деталей, как лопатки турбины ГТУ. При этом повышение эксплуатационных свойств материала указанных деталей по таким характеристикам, как жаростойкость и термоусталость, могут быть обеспечены высокоэнергетическими технологиями защитно-упрочняющей обработки, основанными на ионно-плазменных методах. В первую очередь это относится к технологиям, основанным на эффекте ионно-имплантационного модифицирования поверхностного слоя материалов, которые успешно используются при производстве авиационных газовых турбин [9–11]. Это объясняется, в частности, тем, что ионно-имплантационные технологии кардинально отличаются от традиционных методов диффузионного насыщения поверхности. По сравнению с традиционными методами химико-термической обработки имеют принципиально иной подход, основанный на активном характере процессов поверхностного легирования материала детали. Ионно-плазменные технологии поз-

воляют достичь многократного повышения ресурса деталей [12, 14].

Технология ионной модификации может существенным образом изменять физико-химическое состояние поверхности детали. Выбирая атомы легирующего элемента и режимы облучения, этот метод способен обеспечить высокую прочность поверхностного слоя, изменить концентрацию, пространственное распределение дислокаций и иных дефектов структуры, обеспечить формирование мелкодисперсных высокопрочных выделений [10].

Промышленные жаропрочные никелевые сплавы содержат легирующие элементы, уменьшающие их окисление [15], важнейшими из которых являются алюминий и хром. Эти же элементы входят в состав многих жаростойких сплавов, используемых для получения защитных покрытий. В жаропрочные сплавы вводят также 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. При этом 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 выражается в том, что присутствие РЗМ в оксидной пленке на поверхности металла приводит к снижению активности кислорода, уменьшению внутренних напряжений, затрудняя ее скалывание [15].

Известен факт [9, 11], что при ионной имплантации в поверхностном слое возникает множество точечных дефектов, которые, собираясь в кластеры и взаимодействуя друг с другом, создают сложную сетку дислокаций, служащую барьером для дальнейшей диффузии кислорода в подложку. 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 [16].

Состояние поверхности, формирующееся при высокоэнергетическом воздействии ионов, зависит и от качества предварительной обработки детали. 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 микрогеометрии поверхности влияет на качественные характеристики модифицированного слоя обрабатываемого материала [17]. В этой связи обеспечение ювенильно чистой поверхности за счет эффективного удаления с нее чужеродных веществ, а также минимальной шероховатости поверхности является весьма актуальной задачей получения качественного модифицированного слоя.

Ионная бомбардировка – один из перспективных методов подготовки поверхности материалов [18], который используется непосредственно перед ее обработкой. Обработка поверхностей деталей из жаропрочных никелевых сплавов в промышленности проводится также химическим и электрохимическим методами, однако они связаны с высокой агрессивностью растворов и сложностью обеспечения требуемого качества и свойств поверхности [19].

В то же время наиболее перспективным методом обработки поверхности различных сплавов является электролитно-плазменное полирование (ЭПП), обладающее высокими экологическими свойствами [20, 21], позволяющее обеспечить наиболее благоприятное состояние поверхностного слоя материалов для дальнейшей обработки ионно-плазменными и ионно-имплантационными методами.

Сплав ЧС88У-ВИ – высоколегированный сплав на никелевой основе. При ионно-имплантационной обработке сплава наибольшее влияние имплантируемый ион будет оказывать на упрочняющую фазу,

которой в никелевых сплавах является γ' -фаза Ni₃Al. 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 с никелем. При этом лантан, имеющий большое сродство с кислородом, образует оксиды La₂O₃ и перовскиты типа LaMO₃ (M – элемент, входящий в подложку), имеющие высокую степень стехиометрии.

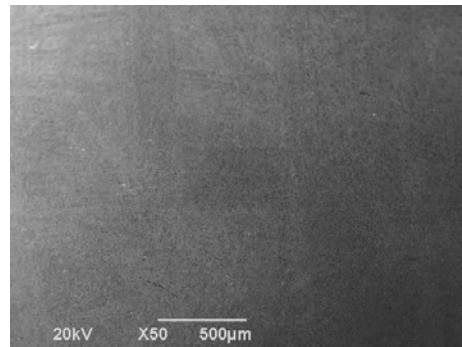
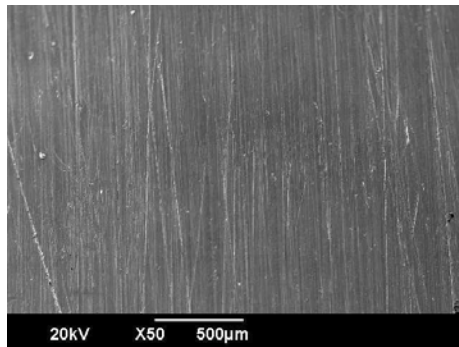
В качестве объекта исследования были взяты образцы из сплава ЧС88-ВИ, полученные по технологии изготовления лопаток турбины методом равноосной кристаллизации. Образцы подвергались стандартной термической обработке. Перед упрочнением ионной имплантацией образцы подвергались электролитно-плазменной обработке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

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 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 двузамещенный 2-18, вода). Время полирования подбиралось эмпирическим путем, в процессе полирования постепенно увеличивалось до достижения нужных показателей шероховатости и составило около 2 мин (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 мин полирования.

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. 1. Шероховатость поверхности сплава ЧС88-ВИ:

а – до ЭПП; б – после ЭПП

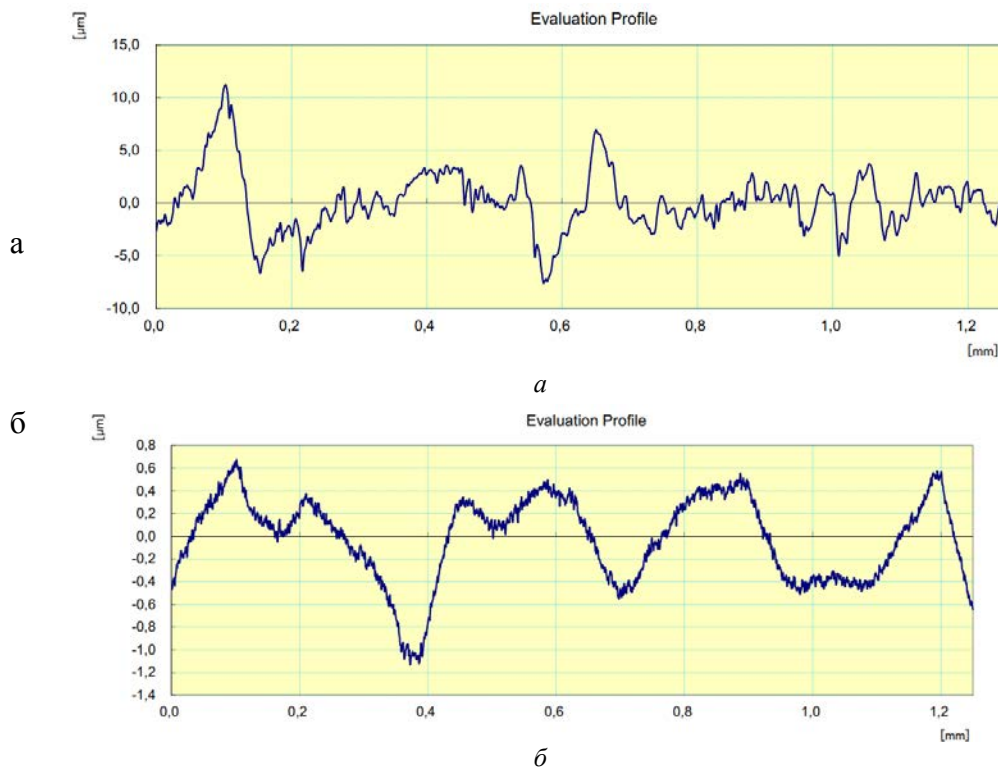


Рис. 2. Профилограммы исследуемых образцов:

а – до ЭПП; б – после ЭПП

Одним из критериев оценки модифицированной поверхности является микротвердость. Измерение микротвердости проводили на автоматическом микротвердометре EMCO-TEST DuraScan 50 при нагрузке $P = 10$ Н.

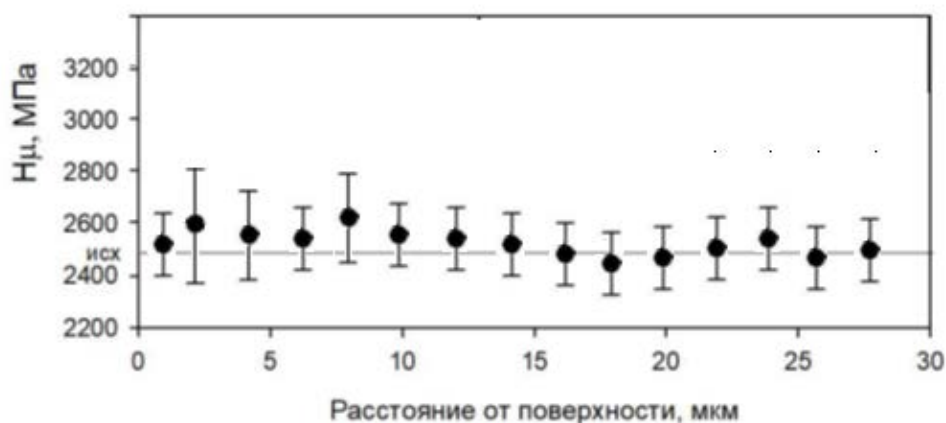
Оценка влияния электролитно-плазменной обработки и ионной имплантации на микротвердость поверхностных слоев сплава ЧС88-ВИ (рис. 3) показала, что ЭПП несколько повышает величину микротвердости материала поверхностного слоя (с 2500 МПа до 2800 МПа). Аналогичные эффекты были получены также при обработке этим методом легированных сталей [22].

Последующая ионно-имплантационная обработка поверхностного слоя сплава ЧС88-ВИ ионами La позволяет повысить микротвердость материала поверхностного слоя до 4000 МПа. Полученные результаты свидетельствуют об изменениях структуры поверхностного слоя по глубине до 25 мкм. Такое сверхглубинное изменение структуры имплантируемой поверхности можно объяснить эффектом дальнего действия [16]. 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

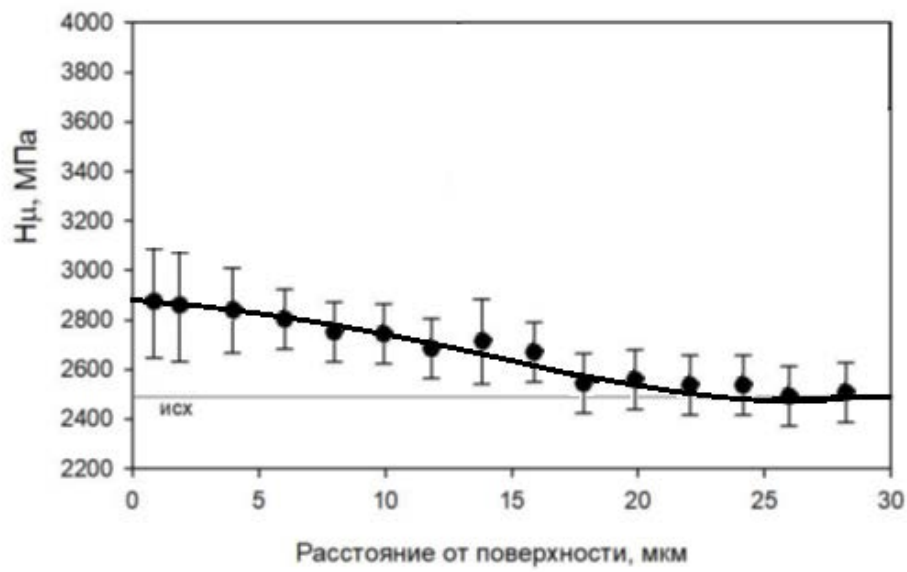
La. Наряду с диффузионными процессами важную роль в проявлении эффекта дальнего действия играет образование дислокационной структуры на глубине вплоть до 30 мкм: в объединенной зоне каскадов атомных столкновений в результате диффузионной перестройки образуются различные вакансионные дефекты и дислокационные структуры, которые растут и трансформируются в условиях повышенной концентрации точечных дефектов (вакансий).

Влияние комплексной ионно-плазменной технологии на детали из сплава ЧС88У-ВИ, на его эксплуатационные свойства оценивалось по результатам испытаний на длительную и усталостную прочность. Исследования 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. 4).

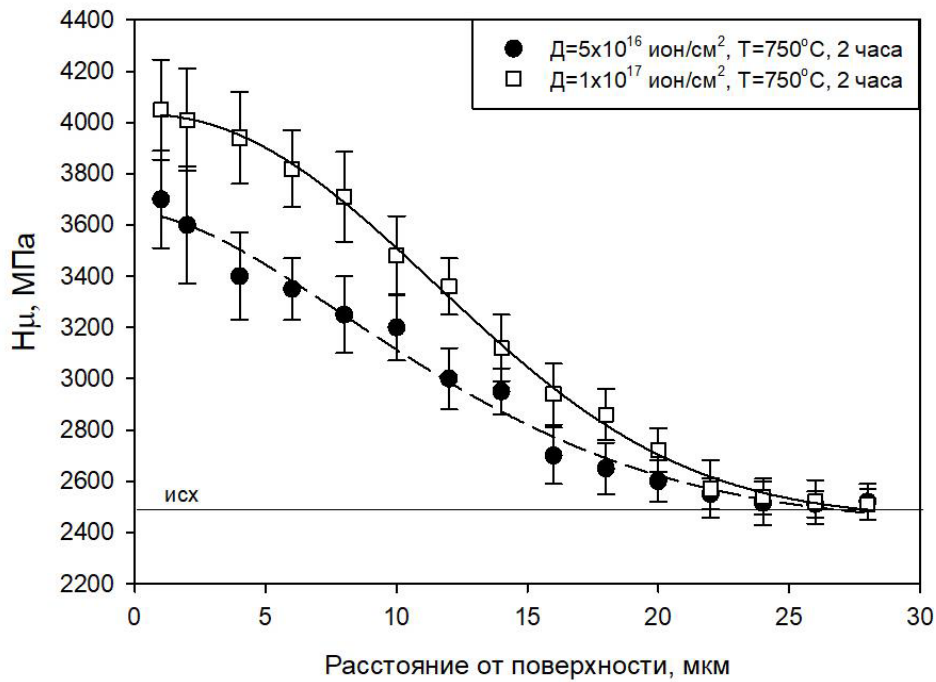
В области малых баз испытаний (высокие напряжения, малая долговечность) упрочняющий эффект от ионной имплантации La⁺ недостаточно сказывается на работоспособности сплавов (рис. 4). С увеличением базы испытаний наблюдается более выраженное положительное влияние комплексной обработки поверхности на жаропрочность.



a



б



в

Рис. 3. Изменение величины микротвердости по глубине поверхностного слоя после ЭП, ионной имплантации и вакуумного отжига:
а – исходное состояние; *б* – после ЭП; *в* – после ЭП, ионной имплантации и постимплантационного отжига

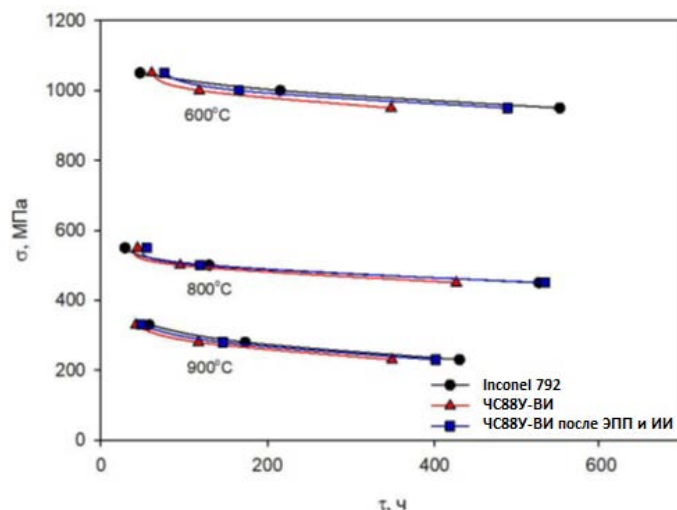


Рис. 4. Влияние комплексного модифицирования поверхности на длительную прочность

В условиях больших баз 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, а также повышающих адгезионную прочность оксидных пленок, образующихся на поверхности. Образующаяся система дислокаций, а также выделение фаз лантана в поверхностном слое повышают прочность поверхности матрицы, приводя к смягчению опасных пиковых напряжений путем эстафетной передачи деформации и, как

следствие, снижают опасность хрупкого разрушения.

Положительное влияние комплексного модифицирования поверхности установлено и на характеристики усталостной прочности. Так, предел выносливости модифицированных образцов превышает аналогичные показатели в исходном состоянии (рис. 5).

Выводы

1. Газовая промышленность является важной, динамически развивающейся отраслью экономики России. Одна из основных ее целей – обеспечение высокой экономической эффективности и конкурентоспособности отрасли на международном рынке.

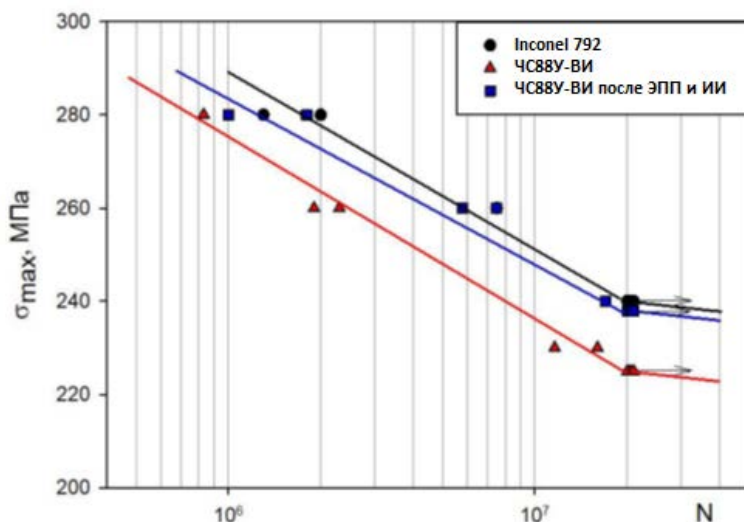


Рис. 5. Влияние комплексного модифицирования на предел выносливости образцов

2. Для решения проблем импортозамещения в области газоперекачивающего оборудования наметились следующие подходы:

- ремонт оборудования;
- использование отечественного оборудования;
- производство импортозамещающего оборудования.

3. В Российской Федерации накоплен огромный опыт разработки и производства газотурбинных авиационных двигателей, которые являются научно-технологической и конструкторской базой для создания высокоэффективных ГТП для ГПА.

4. Анализ международного опыта разработок ГТП позволил выявить следующие их особенности:

- за базовые варианты при разработке ГТП берутся конструкции авиационных ГТД, которые с учетом специфики эксплуатации наземных ГТУ существенно дорабатываются до использования их в качестве наземных газовых турбин при одновременном обеспечении повышенного ресурса работы;

- при разработке и производстве ГТП используются научно-технические достижения авиадвигателестроения;

- осуществляется дальнейшее совершенствование и доводка конструкции и технологии изготовления ГТП.

5. К основным направлениям проектно-конструкторских и технологических работ при создании ГТП на базе авиационного двигателя относятся:

- использование в качестве базового объекта для создания ГТП всего авиационного ГТД;

- использование в качестве базовых объектов отдельных узлов авиационного ГТД;

- использование научно-технического, конструкторского и технологического опыта, накопленного при разработке и производстве авиационного двигателестроения.

6. Технологии обработки деталей, основанные на ионно-имплантационных и электролитно-плазменных процессах, существенным образом изменяют физико-химическое состояние поверхности детали, поз-

воляют значительно повысить эксплуатационные характеристики (усталостную и длительную прочность) деталей ГПА и тем самым обеспечить конкурентные преимущества в сравнении с зарубежными аналогами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Седых А. Д., Лезнов А. С., Барцев И. В.** Тенденции развития центробежных компрессоров, применяемых в газовой промышленности // Труды VI международного симпозиума «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования». СПб., 2000. С. 14–17. [А. Д. Sedyh, А. С. Leznov, I. V. Barcev, "Trends in the development of centrifugal-flow compressors used in the gas industry", in *Proc. 6th International Symposium "Consumers-Manufacturers of compressor and compressor equipment"*, pp. 14-17, 2000.]

2. **Научно-техническая политика** ОАО «Газпром» в области газоперекачивающей техники [Электронный ресурс]. URL: <http://www.turbine.ru/12878-nauchno-tehnicheskaya-politika-oao-gazprom-v-oblasti-gazoperekachivayushey-tehniki.html> (дата обращения 11.10.2019). [(2019, Oct. 11). *Scientific and technical policy of Gazprom in the field of gas pumping equipment* [Online], (in Russian). Available: <http://www.turbine.ru/12878-nauchno-tehnicheskaya-politika-oao-gaz-prom-v-oblasti-gazoperekachivayushey-tehniki.html>]

3. **Идельсон А. М.** Моделирование как метод исследования и доводки серийных авиационных ГТД // Проектирование и доводка авиационных и газотурбинных двигателей. Самара, 1985. С. 45–52. [А. М. Idel'son, "Modeling as a method of research and development of serial aviation gas turbine engines", (in Russian), in *Proektirovanie i dovodka aviacionnyh i gazoturbinnnyh dvigatelej*, 1985, pp. 45-52.]

4. **Николаев В. В., Рыжинский И. Н.** Наземное применение газотурбинных двигателей авиационного типа // Газотурбинная энергетика под маркой «НК»: сб. статей. Самара, 2005. С. 12–16. [V. V. Nikolaev, I. N. Ryzhinskij, "Ground-based use of aircraft-type gas turbine engines", (in Russian), in *Gazoturbinnaya e nergetika pod markoj "NK"*, 2005, pp. 12-16.]

5. **Гриценко Е. А., Идельсон А. М.** Некоторые вопросы конвертирования авиационных ГТД // Новые технологические процессы и надежность ГТД. М.: ЦИАМ, 1992. С. 42–51. [Y. A. Gritsenko, A. M. Idelson, "Some questions of converting aviation GTE", (in Russian), in *Novye tekhnologicheskie processy i nadezhnost' GTD*, 1992, pp. 42-51.]

6. **Авиационные ГТД** в наземных установках / С. П. Изотов и др. М.: Машиностроение, 1984. 228 с. [S. P. Izotov, et. al., *Aircraft gas turbine engines in ground installations*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1984.]

7. **Теория** и проектирование газотурбинных и комбинированных установок: Учебник для вузов / Ю. С. Елисеев и др. М.: МГТУ, 2000. 640 с. [YU. S. Eliseev, et. al., *Theory and Design of Gas Turbine and Combined Installations: A Textbook for High Schools*, (in Russian). Moscow: MG TU, 2000.]

8. **Проектирование** композитной сопловой лопатки методом 3D прототипирования / Б. Е. Байгалиев и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4 (3). С. 612–614. [B. E. Baygaliev, et. al. "Designing of the composite nozzle blade by the 3D prototy-

ping", (in Russian), in *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, vol. 18, no. 4 (3), pp. 612-614, 2016.]

9. **Диденко А. Н., Лигачев А. Е., Куракин И. Б.** Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 184 с. [A. N. Didenko, A. E. Ligachev, I. B. Kurakin, *The effect of charged particle beams on the surface of metals and alloys*, (in Russian). Moscow: Energoatomizdat, 1987.]

10. **Ионно-лучевая** обработка металлов, сплавов и керамических материалов / А. В. Белый и др. Минск: ФТИ, 1998. 220 с. [A. V. Belyj, et. al., *Ion-beam processing of metals, alloys and ceramic materials*, (in Russian). Minsk: FTI, 1998.]

11. **Ягодкин Ю. Д., Дальский А. А., Шадрин О. А.** Влияние ионной имплантации иттербием на жаростойкость никеля // *Материаловедение и термическая обработка металлов*. 1992. № 4. С. 15–17. [Yu. D. Yagodkin, A. A. Dal'skij, O. A. Shadrin, "The effect of ion implantation with ytterbium on the heat resistance of nickel", (in Russian), in *Materialovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, no. 4, pp. 15-17, 1992.]

12. **Перспективы** применения в авиадвигателестроении ионной технологии / Е. Н. Каблов и др. // *Авиационная промышленность*. 1992. № 9. С. 9–12. [E. N. Kablov, et. al., "Prospects for the use of ion technology in aircraft engine manufacturing", (in Russian), in *Aviacionnaya promyshlennost'*, no. 9, pp. 9-12, 1992.]

13. **Использование** сильноточных импульсных электронных пучков для модификации свойств лопаток ГТД / А. Г. Пайкин и др. // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2003. № 3. С. 41–49. [A. G. Pajkin, et. al., "The use of high-current pulsed electron beams to modify the properties of GTE blades", (in Russian), in *Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii*, no. 3, pp. 41-49, 2003.]

14. **Смыслов А. М., Невьянцева Р. Р., Быбин А. А.** Высокотемпературная коррозия сплава ЦНК7П с защитным алюминидным покрытием // *Защита металлов*. 2004. Т. 40, № 5. С. 553–556. [A. M. Smyslov, R. R. Nev'yanceva, A. A. Bybin, "High-temperature corrosion of nickel alloy TsNK7P with a protective aluminide coating", (in Russian), in *Zashchita metallov*, vol. 40, no. 5, pp. 553-556, 2004.]

15. **Афанасьев Н. И., Лепакова О. К.** Влияние ионной имплантации на внутреннее окисление и сопротивление ползучести сплава жсбу с защитным покрытием // *Вестник ТГУ*. 2013. Т. 18, № 4. С. 1714–1716. [N. I. Afanas'ev, O. K. Lepakova, "Influence of ion implantation on internal oxidation and creep resistance of alloy", (in Russian), in *Vestnik TGU*, vol. 18, no. 4, pp. 1714-1716, 2013.]

16. **Гусева М. И.** Ионная имплантация в металлах // *Поверхность. Физика, химия, механика*. 1982. № 4. С. 27–50. [M. I. Guseva, "Ion implantation in metals", (in Russian), in *Poverhnost'. Fizika, himiya, mekhanika*, no. 4, pp. 27-50, 1982.]

17. **Радиационные** технологии модификации поверхности. 1. Ионная очистка и высокодозовая имплантация / В. А. Белоус и др. // *Физическая инженерия поверхности*. 2003. Т. 1, № 1. С. 40–48. [Belous V. A., et. al., "Radiation technology surface modification. 1. Ion purification and high-dose implantation", (in Russian), in *Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti*, vol. 1, no. 1, pp. 40-48, 2003.]

18. **Особенности** электролитно-плазменного травления жаростойких покрытий с поверхности деталей из жаропрочных никелевых сплавов / С. В. Попова и др. // *Труды*

ВИАМ. Электронный журнал. 2016. № 2. С. 32–38. [S. V. Popova, et. al., "The feature of electrolytic plasma etching of heat resistant coatings from parts surface of high-temperature nickel alloys", (in Russian), in *Trudy VIAM. Elektronny zhurnal*, no. 2, pp. 32-38, 2016.]

19. **Веселовский А. П., Кюбарсэп С. В., Ушомирская Л. А.** Особенности электролитно-плазменной обработки металлов в нетоксичных электролитах // *Металлообработка*. 2002. № 6. С. 29–31. [A. P. Veselovskij, S. V. Kyubarsep, L. A. Ushomirskaya, "Features of electrolytic-plasma processing of metals in non-toxic electrolytes", (in Russian), in *Metalloobrabotka*, no. 6, pp. 29-31, 2002.]

20. **Воленко А. П., Бойченко О. В., Чиркунова Н. В.** Электролитно-плазменная обработка металлических изделий // *Вектор науки ТГУ*. 2012. Т. 22, № 4. С. 144–147. [A. P. Volenko, O. V. Bojchenko, N. V. Chirkunova, "Electrolytic-plasma treatment of metals", (in Russian), in *Vektor nauki TGU*, vol. 22, no. 4, pp. 144-147, 2012.]

21. **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 20×13 // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2011. № 7 (84). С. 25–28. [M. K. Smyslova, D. R. Tamindarov, A. B. Samarkina, "Effect of electrolytic-plasma treatment on physico-chemical state surface and mechanical properties of steam turbine blades steel 20×13", (in Russian), in *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, no. 7 (84), pp. 25-18, 2011.]

22. **Мартыненко Ю. В.** Эффекты дальнего действия при ионной имплантации // *Итоги науки и техники. Серия Пучки заряженных частиц и твердого тела*. 1993. Т. 7. С. 82–109. [Yu. V. Martynenko, "Long-range effects of ion implantation", (in Russian), in *Itogi nauki i tekhniki. Seriya Puchki zaryazhennyh chastic i tverdogo tela*, vol. 7, pp. 82-109, 1993.]

ОБ АВТОРАХ

Новиков Сергей Владимирович, проф., дипл. экономиста (УГАТУ, 1999), канд. экон. наук. Иссл. в обл. управления в социально-экономических системах.

Настека Вадим Викторович, генеральный директор «Газпром добыча Кузнецк», дипл. инженера (РГУ нефти и газа, 1997), канд. техн. наук. Иссл. в обл. обеспечения эксплуатационных свойств нагруженных деталей газовых турбин.

Смыслов Анатолий Михайлович, проф. каф. технологии машиностроения, дипл. инженера-механика (УГАТУ, 1973). Д-р техн. наук по ионно-имплантационному модифицированию поверхности (УГАТУ, 1994). Иссл. в обл. повышения эксплуатационных свойств деталей ГТД.

METADATA

Title: On efficiency of import substitution in knowledge-intensive areas of gas pumping equipment production.

Authors: V. V. Nasteka¹, S. V. Novikov², A. M. Smyslov³

Affiliation: ¹ Gazprom Kuznetsk Russia.

^{2,3} Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹⁻³ nii-at@ugatu.su

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 1 (87), pp. 55-65, 2020. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The article considers the possibility of using aircraft gas turbine engines as a drive for gas pumping units, as well as domestic heat-resistant alloy ЧС88У-ВИ, instead of imported Inconel 792, in the manufacture of turbine rotor blades and the technology of processing the surface of the feather, which includes electrolytic-laser polishing and implantation with lanthanum ions, which ensure improvement of their operational properties.

Key words: gas reprocessing unit drive; gas turbine drive; Inconel 792 alloy turbine blades; electrolyte plasma polishing and ion implantation of feather surface.

About authors:

Novikov Sergey Vladimirovich, Professor, Dipl. Economist (UGATU, 1999), PhD in economics. Research in the Field of Management in Socio-Economic Systems.

Nasteka Vadim Viktorovich, General Director of Gazprom dobycha Kuznetsk, Dipl. Engineer (RSU Oil and Gas, 1997), PhD of technical sciences. Research in the Field of Ensuring Operational Properties of Loaded Parts of Gas Turbines.

Smyslov Anatoly Mikhailovich, Prof. of Department of Engineering Technology, Dipl. mechanical engineer (UGATU, 1973). Dr. of Technical Sciences Ion implantation surface modification sciences (UGATU, 1994). Research in the area of improvement of operating properties of gas turbine parts.