

Повышение несущей способности конструкционных элементов газотурбинных установок

На основе создания многофункциональных вакуум-плазменных (PVD) покрытий рассмотрена проблема повышения несущей способности элементов газотурбинных установок, в частности, титановых лопаток компрессора. Исследовано также, влияние PVD-покрытий вида TiN, (TiAl)N и (TiC)N на эрозионную стойкость циклическую прочность титанового сплава под воздействием температуры 350...640⁰С и частоты нагружения 10 кГц. Рассмотрено влияние на образцы и детали из титанового сплава с покрытиями изотермической и термоциклической ползучести. Рабочие температуры находятся в диапазоне 350...640⁰С. Предложена концепция управления характеристиками поверхностного слоя и эксплуатационными показателями, позволяющими получать гарантированный эффект упрочнения деталей газотурбинных установок.

конструкционные элементы, газотурбинные установки, несущая способность, PVD-покрытия, титановый сплав

Введение. Наиболее ценными конструкционными материалами для газотурбинных установок являются титановые сплавы. Эффективное применение титановых сплавов – превышение стальных сплавов в 2 раза по удельной прочности в диапазоне температур до 300⁰С. Предел прочности σ_b сложнотитановых сплавов достигает 1500 МПа при относительном удлинении при разрыве δ до 15%. Жаропрочные титановые сплавы эксплуатируются в интервале температур до 700⁰С. В двигателестроении наблюдается тенденция [2] замены сплавов на основе железа на титановые сплавы с целью

© Е.К. Соловых, 2011

повышения частоты вращения ротора, повышения давления и температуры на входе в турбину, снижения массы двигателя и увеличения удельного рабочего объема. Сдерживает применение титановых сплавов низкое сопротивление ползучести при температурах выше 550⁰С, невысокая вибрационная прочность, связанная с высокой чувствительностью к состоянию поверхности, а также взаимодействие с газовой средой при повышенных температурах и низкая эрозионная стойкость.

В практике поверхностного упрочнения титановых сплавов известно применение практически всех традиционных технологий упрочняющих покрытий. Хотя накоплен значительный опыт по улучшению механических и триботехнических характеристик титановых сплавов, достаточно удовлетворительного решения получено не было. Общим недостатком являлось то обстоятельство, что улучшение одной характеристики при нанесении покрытия приводило к существенному снижению остальных. Например, повышение эрозионной стойкости сопровождалось снижением предела выносливости и т.п.

Цель настоящей работы заключалась в повышении несущей способности деталей из титановых сплавов за счет нанесения многофункционального покрытия и разработке концепции управления технологией его формирования при одновременном повышении всего комплекса характеристик прочности и газообразивной стойкости.

Методы исследования. Для исследования технологического процесса нанесения вакуум-плазменных покрытий использован метод многофакторного планирования эксперимента и математической обработки статистических данных, позволяющий представить процесс формирования покрытий в виде функциональных

зависимостей входных и выходных параметров. В качестве критериев оптимизации были выбраны предел прочности, условный предел текучести, изотермическая и термоциклическая ползучесть в интервале температур до 700°C , предел высокочастотной многоциклового выносливости и интенсивность изнашивания абразивными частицами композиции «основа-покрытие». Выбирая управляемые факторы, к изучению технологического процесса формирования покрытий подходили комплексно учитывая влияние конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов.

В качестве технологии покрытий выбран метод PVD (физическое осаждение из парогазовой фазы), который является перспективным в промышленности как Украины, так и зарубежья. Технология нанесения включает три этапа: ионную очистку поверхности, плазмохимический синтез испаряемого материала в объеме камеры и на поверхности, а также конденсацию покрытия на детали. Использована модернизированная установка ННВ-6,6-И1 типа «Булат» с одновременным распылением материалов из трех катодов. Формирование поверхностного слоя происходит в импульсном режиме при наличии дополнительного нагревателя и устройства для сепарации плазменного потока [3, 4].

Для экспериментальных исследований влияния вакуум-плазменных покрытий TiN, (TiAl)N и (TiC)N на характеристики прочности и газоабразивной стойкости в качестве материала основы использован Ti-сплав ВТ20. Испытания проводили на лабораторных образцах, изготовленных из листового Ti-сплава толщиной 1,0 мм.

Испытания на кратковременную статическую прочность и пластичность при осевом растяжении проводили в соответствии ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 25.505-85 в жестком режиме со скоростью перемещения активного захвата ≈ 5 мм/мин, что приблизительно соответствует скорости нагружения $30 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{-1}$, с записью диаграммы растяжения в координатах «усилие - деформация».

Сравнительные испытания на изотермическую и термоциклическую ползучесть при фиксированном уровне нагрузки ($0,8\sigma_{\text{в}}$) проводили в условиях осевого растяжения при нагреве рабочей части образца путем фокусирования лучевой энергии в замкнутой оптической безинерционной системе. Это позволяет нагревать образец до 1000°C без влияния электромагнитопластического эффекта и осуществлять охлаждение образца со скоростью до 100 град/с. Характеристики термического цикла: $350^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 640^{\circ}\text{C}$, время нагревания – 10 с., охлаждения – 15 с [5].

Оценка влияния вакуум-плазменных покрытий на сопротивление многоциклового усталости титановых сплавов проводилась с помощью высокочастотных (до 10 кГц) ускоренных усталостных испытаний на консольный изгиб при нагреве образца от источника инфракрасного излучения до 640°C [6].

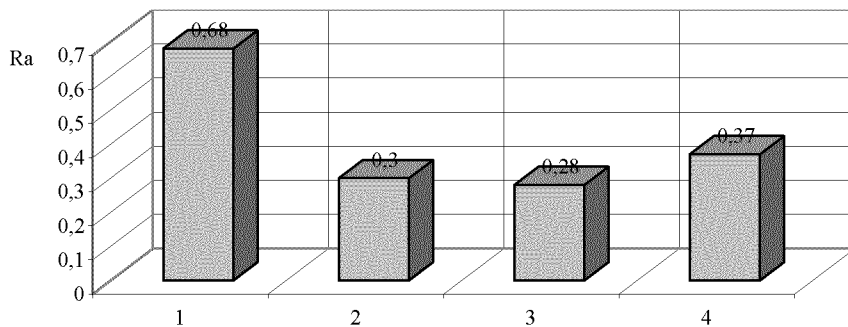
Сравнительные испытания на газоабразивную стойкость проводили с помощью центробежного ускорителя, позволяющего моделировать процессы изнашивания. Во время исследования в качестве абразива использовался кварцевый песок дисперсностью 200 мкм, длительность его влияния составляла 2 часа. Скорость вращения ротора центробежного ускорителя – 3000 об/мин, при этом скорость вылета частиц достигала 80 м/с. Образцы устанавливали под углами 30, 45, 75 и 90° к вектору скорости вылетающих из ротора частиц.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение.

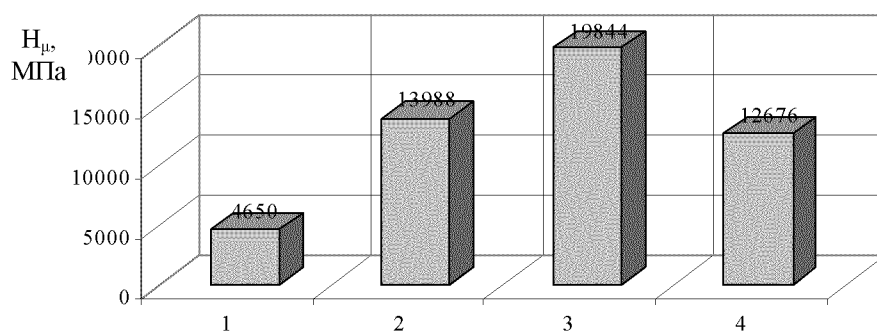
Для получения вакуум-плазменных покрытий TiN, (TiAl)N и (TiC)N с минимальной шероховатостью поверхности использовали сепаратор. Капельная фаза ионизированного потока, проходя через сепаратор, задерживается на его пластинах. Шероховатость поверхности титанового сплава ВТ20 с покрытиями определяли профилографом-профилометром 201ТО. Результаты приведены на рис. 1.

Исследования на микротвердость проводили согласно ГОСТ 9450-76 при помощи ПМТ-3, угол между противоположащими гранями алмазной пирамидки

составлял 136° при нагрузке 100 г. Результаты измерения микротвердости сплава ВТ20 без покрытия и с покрытиями TiN, (TiAl)N и (TiC)N приведены на рис. 2.



1 – без покрытия; 2 – с покрытием TiN; 3 – с покрытием (TiAl)N; 4 – с покрытием (TiC)N
Рисунок 1 – Значения шероховатости поверхности титанового сплава ВТ20

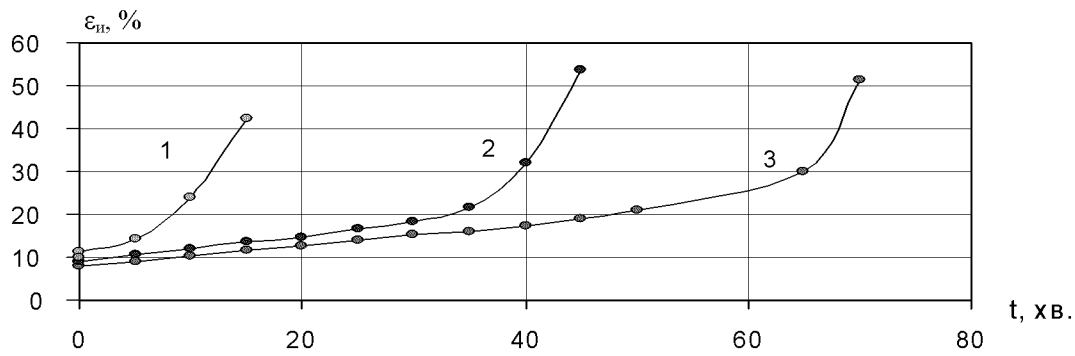


1 – без покрытия; 2 – с покрытием TiN; 3 – с покрытием (TiAl)N; 4 – с покрытием (TiC)N
Рисунок 2 – Микротвердость титанового сплава ВТ20

Испытания на изотермическую и термоциклическую ползучесть титанового сплава ВТ20 с вакуум-плазменными покрытиями проведены на установке «Щелкунчик» [5, 7]. Основными повреждающими факторами в ускоренных термоциклических испытаниях являются резкие теплосмены. Ползучесть при постоянной статической нагрузке является чувствительным инструментом для фиксации изменения состояния как покрытия, так и поверхности раздела «основа-покрытие».

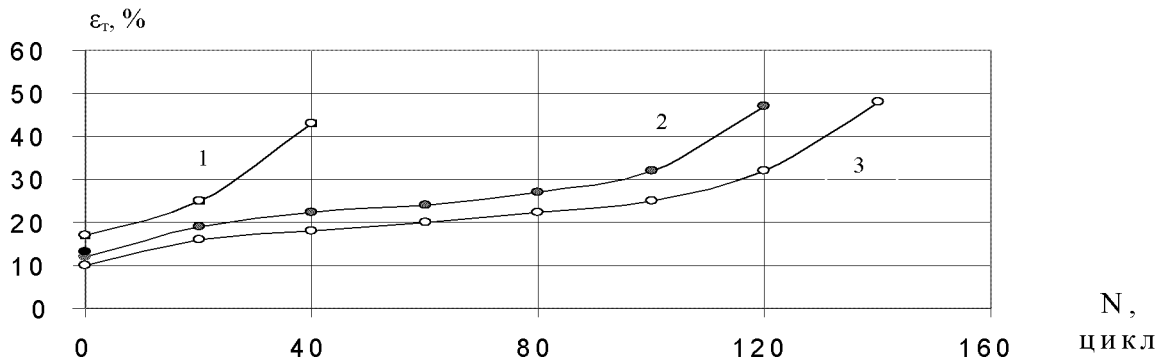
Кривые изотермической ползучести сплава ВТ20 с покрытием (TiAl)N приведены на рис. 3. Покрытие препятствует газонасыщению поверхностного слоя титанового сплава. Это резко снижает скорость ползучести, позволяет повысить температуру эксплуатации деталей [7].

На рис. 4 приведены кривые термоциклической ползучести сплава ВТ20 с покрытием (TiAl)N. Статическая нагрузка $0,8\sigma_{\text{в}}$. Нагрев и охлаждение образца осуществляли с максимальной скоростью до 100 град/с. Покрытие снижает скорость ползучести в 2...4 раза и повышает температурный интервал эксплуатации титанового сплава.



1 - без покрытия ($T = 590 \text{ }^{\circ}\text{C}$); 2 - покрытие (TiAl)N ($T = 623,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$); 3 - покрытие (TiAl)N ($T = 606,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Рисунок 3 – Кривые изотермической ползучести сплава VT20 с покрытием (TiAl)N



1 - без покрытия при $T=610 \leftrightarrow 390 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 - покрытие (TiAl)N при $T=623 \leftrightarrow 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
3 - покрытие (TiAl)N при $T=606 \leftrightarrow 389 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Рисунок 4 - Кривые термоциклической ползучести сплава VT20 с покрытием (TiAl)N

В качестве критериев оценки эрозионной стойкости использована потеря массы образца и интенсивность изнашивания K . Зависимость интенсивности изнашивания K титанового сплава VT20 от угла атаки абразива α приведена на рис. 5. Материал покрытия – (TiAl)N. В результате экспериментальных исследований установлено, что основным кинематическим параметром, определяющим характер разрушения материала, есть угол падения абразива. Максимальная интенсивность изнашивания титанового сплава, как с покрытием, так и без, наблюдается при угле атаки 75° . Кроме этого, определено, что в зависимости от параметров технологического процесса эрозионная стойкость титанового сплава с вакуум-плазменными покрытиями возрастает до 10 раз [8].



Рисунок 5 - Зависимость эрозионной износостойкости сплава ВТ20 от угла атаки абразива

Большинство покрытий на титановых сплавах, повышающих износостойкость, приводят к снижению предела многоциклового выносливости. Эта важнейшая характеристика определена на ультразвуковой установке при изгибных резонансных колебаниях образца с различными покрытиями при частоте нагружения 10 кГц [9].

Результаты сравнительных испытаний на усталость титанового сплава ВТ20 без покрытия и с покрытием (TiAl)N приведены на рис. 6 и 7. При этом, не смотря на некоторое повышение угла наклона кривых усталости на рис. 7, все варианты покрытий – TiN, (TiAl)N и (TiC)N – в целом повышают выносливость при данном числе циклов нагружения.

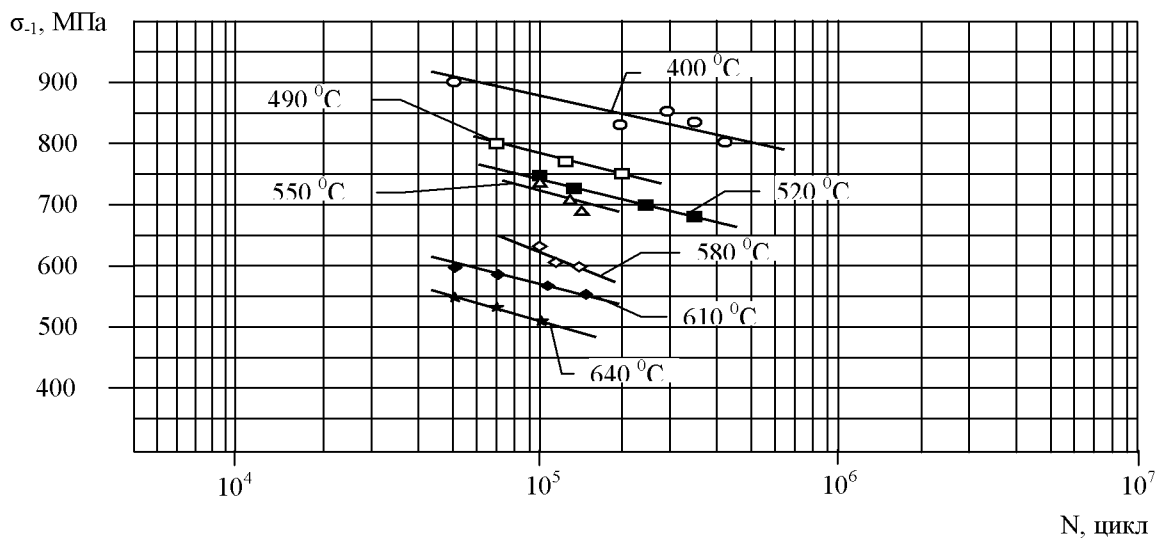


Рисунок 6 - Кривые усталости титанового сплава ВТ20 без покрытия

При решении задачи многокритериальной оптимизации технологический процесс характеризуется несколькими критериями. Вследствие этого возникает проблема выбора важности этих критериев и назначение им весовых коэффициентов. Поэтому и возникает задача определения некоторой компромиссной точки, которая в равной мере может удовлетворять всем требованиям (компромисс за Парето). При оптимизации, по результатам экспериментальных исследований, использован метод случайного поиска на основе ЛП_T равномерно распределенных случайных точек.

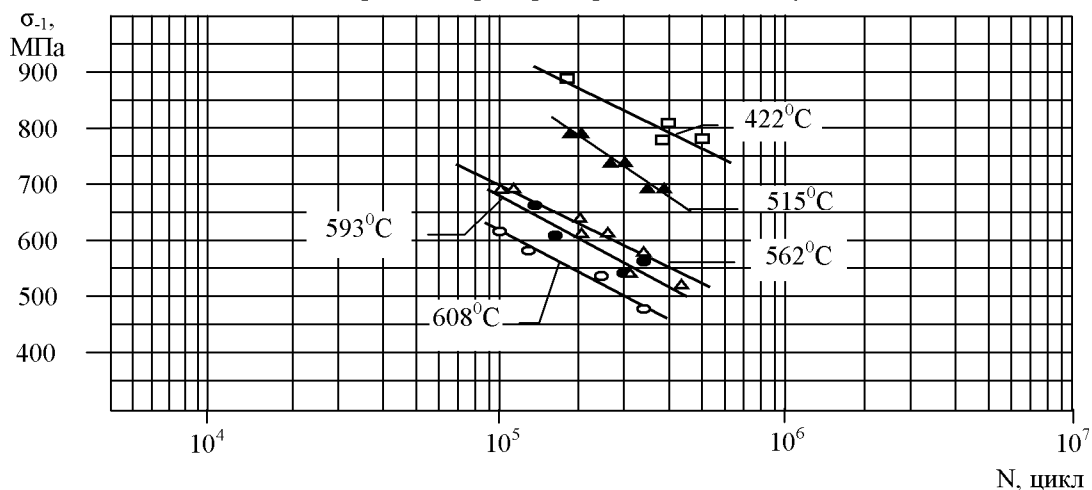


Рисунок 7 - Кривые усталости титанового сплава ВТ20 с покрытием (TiAl)N

Согласно методике математического планирования эксперимента [10], определение обобщенного критерия для каждого опыта экспериментальных испытаний состояло в использовании системы экспертных оценок, согласно которой каждому критерию оптимизации установлен “рейтинг” и рассчитаны весовые коэффициенты.

Наибольшее значение эффективности критерия качества (меньшее значение обобщенного критерия) отвечает покрытию (TiAl)N, реализованные в котором параметры технологического процесса и являются оптимальными.

Таким образом, в результате проведенной с использованием полученных математических моделей многокритериальной (компромисс за Парето) оптимизации было найдено оптимальное сочетание уровней факторов, которые влияют на критерии оптимизации: тип покрытия – покрытие (TiAl)N; толщина покрытия – $h_n = 6,5 \cdot 10^{-6}$ м; время ионной обработки – $t_{и.о.} = 405$ с; давление реакционного газа – $P_{р.г.} = 0,3602$ Па.

К тому же укажем, что конструкционные элементы из титановых сплавов с вакуум-плазменным покрытием (TiAl)N можно использовать при $T=593^{\circ}\text{C}$ без снижения эксплуатационных свойств. Это даст возможность на этапах создания (разработки и производства) газотурбинных установок вместо стальных материалов в качестве конструкционных материалов использовать титановые сплавы.

Оценка повышения ресурса конструкционных элементов газотурбинной установки за счет применения технологического процесса нанесения вакуум-плазменных покрытий состояла в определении комплексного показателя, базировавшегося на учете рангов, весовых коэффициентов и средних значений критериев оптимизации.

Благодаря повышению характеристик прочности и газообразивной стойкости титановых сплавов с вакуум-плазменными покрытиями повышаются показатели надежности конструкционных элементов газотурбинных установок: интенсивность отказов уменьшается в 3,01 раза, снижается вероятность возникновения отказа в 2,72 раза, возрастает наработка на отказ в 2,72 раза, уменьшается частота отказов в 2,73 раза при повышении их ресурса в 2,67 раза.

Выводы

1. Усовершенствована технология нанесения PVD-покрытий. Путем сепарации капельной фазы ионизированного потока материала покрытий существенно минимизирована шероховатость поверхности детали. На примере сплава BT20 шероховатость снизилась в среднем в два раза всех трех видов покрытий TiN, (TiAl)N и (TiC)N.

2. Измерение микротвердости сплава BT20 без покрытия и с покрытием TiN, (TiAl)N и (TiC)N показало существенное ее повышение в $\sim(1,5...4)$ раза.

3. На примере покрытия (TiAl)N показано, что скорость изотермической ползучести сплава BT20 снижается в $\sim(2...3)$ раза, а скорость термоциклической ползучести в $\sim(2...4)$ раза, что позволяет повысить температурный интервал эксплуатации деталей из титанового сплава. Таким образом, титановый сплав BT20 с покрытием (TiAl)N можно использовать при $T=600^{\circ}\text{C}$, что дает возможность применения титановых сплавов в ГТД вместо стальных метриалов.

4. Установлено, что максимальная интенсивность эрозионного изнашивания сплава BT20, как с покрытием, так и без покрытия, наблюдается при угле падения абразива 75° . При этом определено, что в зависимости от параметров технологии эрозионная стойкость сплава BT20 с покрытием (TiAl)N возрастает в 10 раз.

5. Покрытия TiN, (TiAl)N и (TiC)N, на принятой базе ограниченной выносливости, в целом повышают выносливость сплава BT20, как при нормальной, так и при повышенных температурах ($T=20...650^{\circ}\text{C}$).

6. Из решения задачи многокритериальной оптимизации установлено, что максимальное значение критерия качества отвечает покрытию (TiAl)N, реализованные в котором параметры технологического процесса и будут оптимальными.

8. Повышение ресурса элементов ГТД, за счет применения покрытий, обусловлено улучшенными характеристиками перечисленными в п.1-5, а также повышением соответствующих показателей надежности.

Список литературы

1. Повышение ресурса деталей ГТД из титановых сплавов / Богуслаев В.А., Долматов А.И., Жеманюк П.Д. и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2000. – 110 с.
2. Титановые сплавы в конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической техники / Б.А. Колачев, Ю.С. Елисеев, А.Г. Братухин, В.Д. Талалаев. - М.: МАИ, 2001. – 411 с.
3. З., С23С 14/24, С23С 14/26. Оpubл. 10.09.2007, Бюл. № 14.
4. Пат. 26322 Україна, МКП 7 С23С 14/00, С23С 14/26. Установка для вакуум-плазмового напилення: Ляшенко Б.А., Солових Є.К., Антонюк В.С.; Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. – № 2004032217; Заявл. 25.03.07; Оpubл. 10.09.2007, Бюл. №14 – 2 с.
5. Пат. 5174 Україна, МКП 7 С23С14/00. Установка для вакуум-плазмового напилення: Мірненко В.І., Ляшенко Б.А., Рутковський А.В., Петренко А.М.; Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. – № 20040705862; Заявл. 16.07.04; Оpubл. 15.02.05, Бюл. №2 – 3 с.
6. Солових Е.К., Ляшенко Б.А., Рутковский А.В. и др. Технологическое обеспечение вакуум-плазменных покрытий дискретной структуры // Технологические системы. – 2007, № 2. – С.22–27.
7. Пат. 2489 Україна, МКП 7 G01N3/00. Установка для дослідження зразків матеріалів на термомеханічну втому: Ляшенко Б.А., Трапезон О.Г., Рутковський А.В., Мірненко В.І., Бондар А.В.; Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. – № 2003076427; Заявл. 09.07.03; Оpubл. 17.05.04, Бюл. №5 – 3 с.
8. Мірненко В.І., Рутковський А.В., Петренко А.М. Вплив вакуум-плазмових покриттів на ізотермічну та термоциклічну повзучість титанового сплаву ВТ20 // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Черкаси: ЧДТУ. – 2004. – №1. – С. 41-45.
9. Ляшенко Б.А., Мірненко В.І., Рутковський А.В., Петренко А.М. Газообразивна стійкість титанового сплаву ВТ20 з вакуум-плазмовими покриттями // Проблеми трибології. – 2004. – №2. – С. 142-149.
10. Трапезон А.Г., Мирненко В.И., Бондарь А.В. Циклическая прочность титановых сплавов при нормальных и повышенных температурах в условиях высокой частоты нагружения // Вібрації в техніці та технологіях. – 2004. – №5(37). – С. 85-88.
11. Радченко С.Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении. – К.: ЗАО «Укрспецмонтажпроект», 1998. – 274 с.

Є. Солових

Підвищення несучої здібності конструкційних елементів газотурбінних устаткувань

На основе создания multifunctional vacuum plasma coats (PVD) покрытий рассмотрена проблема повышения несущей способности элементов газотурбинных установок, в частности, титановых лопаток компрессора. Исследовано также, влияние PVD-покрытий вида TiN, (TiAl)N и (TiC)N на эрозионную стойкость циклическую прочность титанового сплава под воздействием температуры 350...640⁰С и частоты нагружения 10 кГц. Рассмотрено влияние на образцы и детали из титанового сплава с покрытиями изотермической и термоциклической ползучести. Рабочие температуры находятся в диапазоне 350...640⁰С. Предложена концепция управления характеристиками поверхностного слоя и эксплуатационными показателями, позволяющими получать гарантированный эффект упрочнения деталей газотурбинных установок

E. Solovykh

Increase of carrying capacity of constructional elements of gas-turbine plants

On the base of creation of multifunctional vacuum plasma coats (PVD) the problem of increasing carrying capacity of elements in gas-turbine plants-titanium compressor blade is considered the article. The influence of PVD-coats like TiN, (TiAl)N and (TiC)N on erosion resistance, repeated strength of titanium alloy under the action of the temperature 350...640⁰С and loading frequency 10 kg-c is also investigated. The influence on the samples and details of titanium alloy with coats of exothermic and thermo cycling creepage is considered. The conception of control by characteristics of surface layer and operation indicators which allow to get the guaranteed effect of detail hardening of gas-turbine plants is suggested.

Одержано 18.03.11