

Технологические свойства турбинных лопаток с покрытиями
из сплавов циркония

В.М. Юров, М.К. Ибатов, В.С. Портнов

Карагандинский технический университет, Караганда, Казахстан

Аннотация. В работе исследуются покрытия $ZrFeCrNiNb$ на турбинных лопатках из стали 20X13. При ионно-плазменном нанесении покрытий на их структуру оказывают влияние параметры: давление азота в камере; потенциал основы; ток разряда дуги; свойства материала катода; температура детали. Экспериментальные данные показали, что микротвердость, коррозионная и жаростойкость полученных покрытий не уступает покрытиям градиентного типа $(Me-Cr-Al-Y)+(Me-Al-Cr-Y)$. Отличием от них является малый коэффициент трения ($\sim 0,112$), что увеличивает износостойкость турбинных лопаток в 7 раз.

Ключевые слова: покрытие, трение, микротвердость, азот, катод.

В г. Караганды на турбомеханическом заводе начали выпускать лопатки для паровых турбин Т-100/120-130-2 ТМЗ [1]. Лопатки выпускают из стали 20X13. Однако, взаимодействие лопаток с паром приводит к быстрому их износу. Нанесение на турбинные лопатки защитных покрытий задача непростая, но нужная [2-5]. В работе [6] был проведен подробный анализ методов нанесения покрытий на турбинные лопатки. Было показано, что перспективны покрытия из нитрида титана. Они получают на вакуумных установках плазменного типа с учетом высоковольтной импульсной стимуляции. Однако, они применимы для лопаток паровых турбин низкого давления из-за их невысокой температуры (~ 500 °С). Работа [7] основной упор делает на выяснение механизма эрозионных явлений турбинных лопаток. За них отвечают кавитационные процессы вследствие ударно-капельного действия влажного пара на лопатки. При таком воздействии пара на лопатки, в них возникают микро и макротрещины. Помимо этого, увеличивается плотность дислокаций, возникают дефекты кристаллической решетки. Далее, возникает взаимодействие между ними, приводя лопатки к усталостному разрушению. Очень большой объем работ по покрытиям для турбинных лопаток был проведен во Всероссийском институте авиационных материалов (ВИАМ) [8, 9]. Были созданы покрытия (до 1100 °С) градиентного типа из системы $(Me-Cr-Al-Y)+(Me-Al-Cr-Y)$, где Me – тугоплавкие металлы. Исследования таких покрытий проводят и в настоящее время [9], где меняют тип катодов на ионно-плазменной установке.

В настоящей работе мы изложим результаты исследования покрытия из нитридов системы $ZrFeCrNiNb$ и их технологические свойства на турбинных лопатках. Чтобы изготовить лопатку нужно проделать 18 операций (рис. 1).

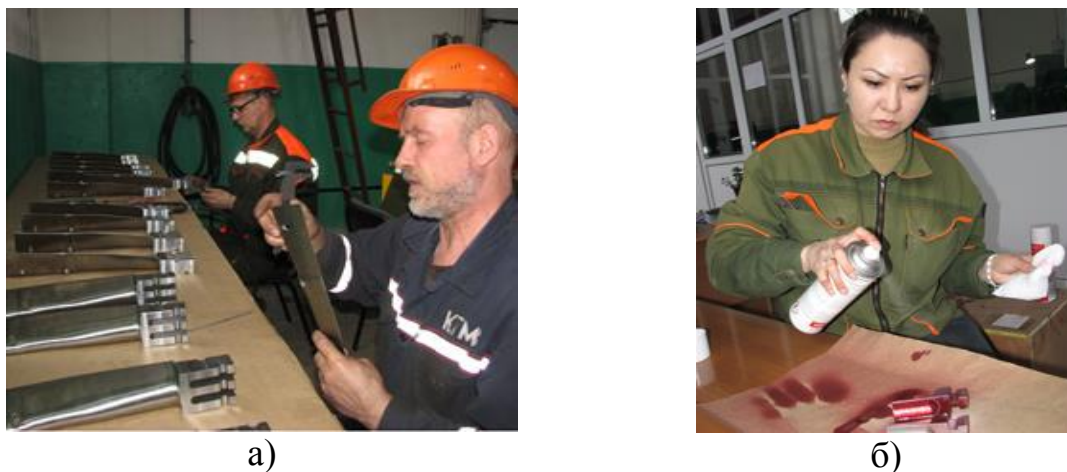


Рисунок 1. Измерение размеров (а) и анализ дефектов (б) турбинных лопаток

Напыление покрытий проводилось на установке ННВ-6.6И1 (рис. 2).



Рисунок 2. Общий вид установки ННВ-6.6И1 [10].

Подробно установка ННВ-6.6И1 и ее модернизация описана в работе [10]. Нас будет интересовать только генератор плазмы «ПИНК», изготовленный в институте сильноточной электроники СО РАН [11] и показанный на верхнем фланце камеры (рис. 1). Если изменить ток накала, то произойдет изменение эмиссии электронов с термокатода. Именно таким

образом регулируется ток разряда от десятков до сотен ампер. При этом напряжение горения может достигать несколько десятков вольт. Если через ПИНК пропускать азот, то мы имеем дело с азотированием детали за счет ионизации азота. Напыление и исследование покрытий проводилось на образцах из такой же стали 20X13, как и на турбинных лопатках (рис. 3).

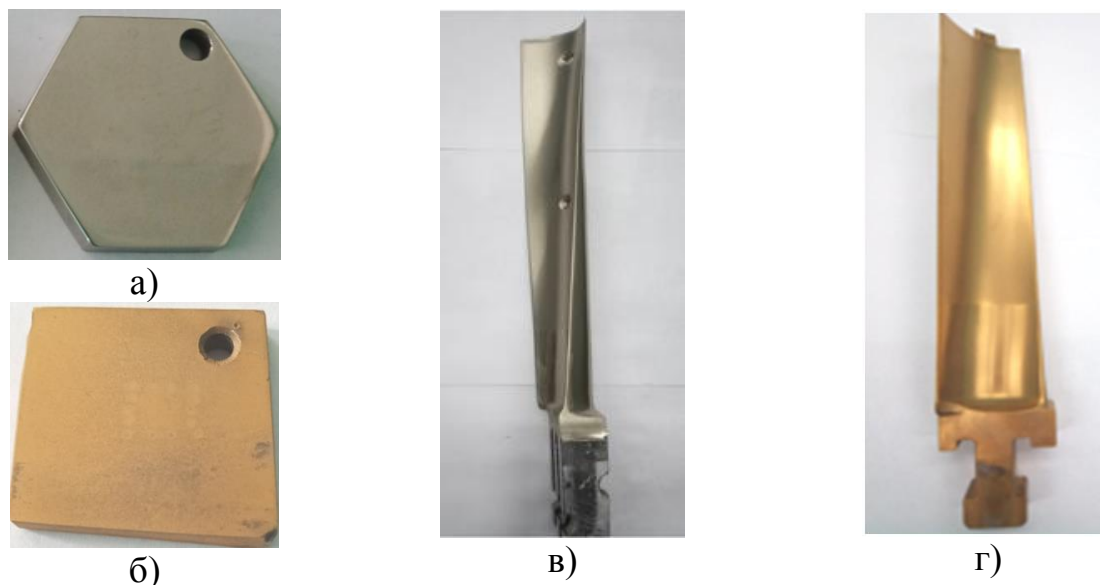
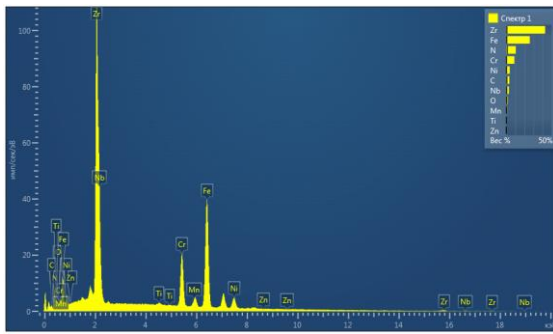


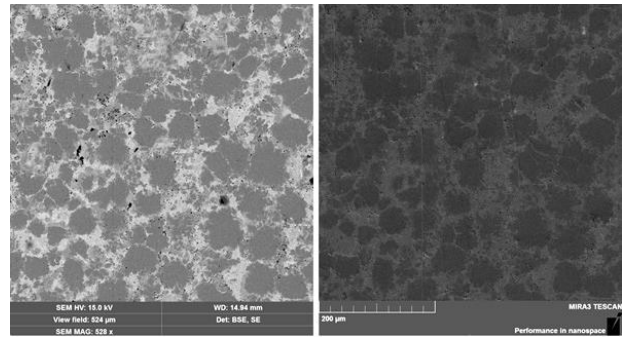
Рисунок 3. Образцы без покрытия (а) и с покрытием (б); турбинные лопатки без покрытия (в) и с покрытием (г).

Напыление проводилось с помощью двух катодов. Один катод был изготовлен из чистого циркония, а другой катод – из стали 12X18H10T. Нитриды получались с помощью генератора ПИНК путем прокачки азота. Электронно-микроскопическое определение покрытий проведено на растровом электронном микроскопе (REM) MIRA 3 фирмы TESCAN. Исследование количественного анализа элементов (РФЭС) покрытия проведено на электронном микроскопе JEOL JSM-5910. На атомно-силовом микроскопе (АСМ) JSPM–5400 проводилось сканирование поверхности покрытий полуконтактным методом с резонансной частотой колебаний 40-400 кГц. Для исследования упругих свойств использовался микротвердомер HVS-1000A. Для измерения коэффициента трения использовался разработанный нами прибор [12]. Коррозионная стойкость покрытия на образцах и лопатках исследовалась путем потери массы их покрытия по ГОСТ 9.908-85. Жаростойкость покрытий исследовалась в печи до 1100 °С согласно ГОСТ 6130-71. В результате нанесения покрытия с двух электродов в среде азота сформировался нитрид следующего состава – $(ZrFeCrNiNb)N$ (рис. 4а и табл. 1).

Из табл. 1 следует высокое содержание циркония в 3 раза превышающее содержание железа и в 4 раза - содержание азота. Покрытие получалось однородным (рис. 4а). Однородность полученного покрытия отчетливо видна на рис. 5. Наблюдается ячеистая наноструктура при напылении.



а)

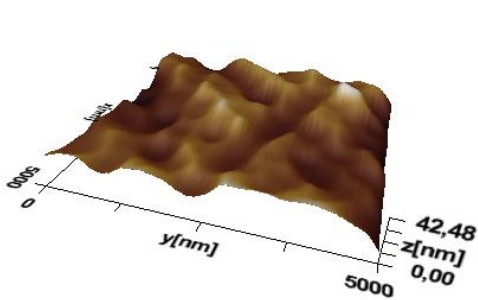


б)

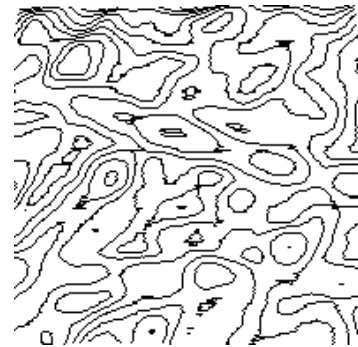
Рисунок 4. РФЭС (а); REM-изображения покрытия (ZrFeCrNiNb)N (б)

Таблица 1. Элементный состав покрытия в среде азота

Элемент	Тип линии	Условная концентрация	Отношение k	Вес. %
N	К серия	35,23	0,06272	12,53
Ti	К серия	0,76	0,00759	0,26
Cr	К серия	28,24	0,28243	9,00
Mn	К серия	2,65	0,02652	0,87
Fe	К серия	75,61	0,75606	24,37
Ni	К серия	10,36	0,10359	4,34
Zr	L серия	131,76	1,31757	49,63
Сумма:	-	-	-	100,00



а)



б)

Рисунок 5. АСМ-изображение покрытия (ZrFeCrNiNb)N в 3D проекциях (а) и его фрактальная структура (б)

Чтобы, в дальнейшем, сравнить полученные нами покрытия с уже известными нитридными покрытиями приведем их данные (табл. 2).

При нанесении покрытий на их структуру влияют параметры: давление азота в камере; потенциал основы; ток разряда дуги; свойства материала катода; температура детали. Поверхностная энергия равна по методике [13].

Таблица 2. Некоторые свойства нитридных покрытий

Нитрид	Температура плавления покрытия, °С	Микротвердость покрытия, ГПа	Электропроводность покрытия, мкОм ⁻¹ ·м ⁻¹	Поверхностная энергия покрытия, Дж/м ²
TiN	2945	20,0	40	0,474
ZrN	2955	16,0	18	0,518
HfN	3330	22,0	32	0,610
NbN	2320	14,0	78	0,670
TaN	3360	17,5	180	0,735

Таблица 3. Поверхностная энергия покрытия и температура образца

Покрытие	Температура подложки, °С			Энергия покрытия, Дж/м ²		
	350	400	450	0,872	0,985	0,864
(ZrFeCrNiNb)N						

Таблица 4. Микротвердость покрытий при температурах образца

Покрытие	Микротвердость, ГПа		
	350 °С	400 °С	450 °С
(ZrFeCrNiNb)N	14,0	14,8	13,9

Таблица 5. Поверхностная энергия покрытия от тока применяемой дуги

Покрытие	Ток дуги испарителя, А				Энергия покрытия, Дж/м ²			
	50	70	110	140	0,84	0,91	0,99	0,88
(ZrFeCrNiNb)N					2	0	8	5

Таблица 6. Микротвердость покрытий при различных токах дуги

Покрытие	Микротвердость, ГПа		
	70 А	110 А	140 А
(ZrFeCrNiNb)N	12,9	14,7	13,2

Таблица 7. Микротвердость покрытия от давления азота в камере

Покрытие	Микротвердость, ГПа		
	10 ⁻⁷ мм рт. ст.	10 ⁻⁶ мм рт. ст.	10 ⁻⁵ мм рт. ст.
(ZrFeCrNiNb)N	13,8	14,8	13,4

Таблица 8. Коэффициенты трения покрытий образца

Покрытие	Коэффициент трения		
	нержавеющая сталь	медь	алюминий
(ZrFeCrNiNb)N	0,112	0,218	0,278

Таблица 9. Скорость коррозии и наиболее коррозионно-стойкие стали

Покрытие	Скорость коррозии, г/м ² ·ч
(ZrFeCrNiNb)N	0,36
X23H28M3Д3Т	0,21
X23H27M3Т	0,26
X18H12M3Т	0,80

Из табл. 3 и 4 следует, что температуру турбинной лопатки нужно поддерживать в районе около 400 °С. Это связано с тем, что с ростом температуры происходит измельчение зерновой структуры материала. Такой эффект приводит к равномерности покрытия и увеличению его твердости, что наблюдается в эксперименте (рис. 4 и 5). Наблюдается, как указано выше, ячеистая структура покрытия. Такая структура наблюдается во многих кристаллах (рис. 6) [14, 15].

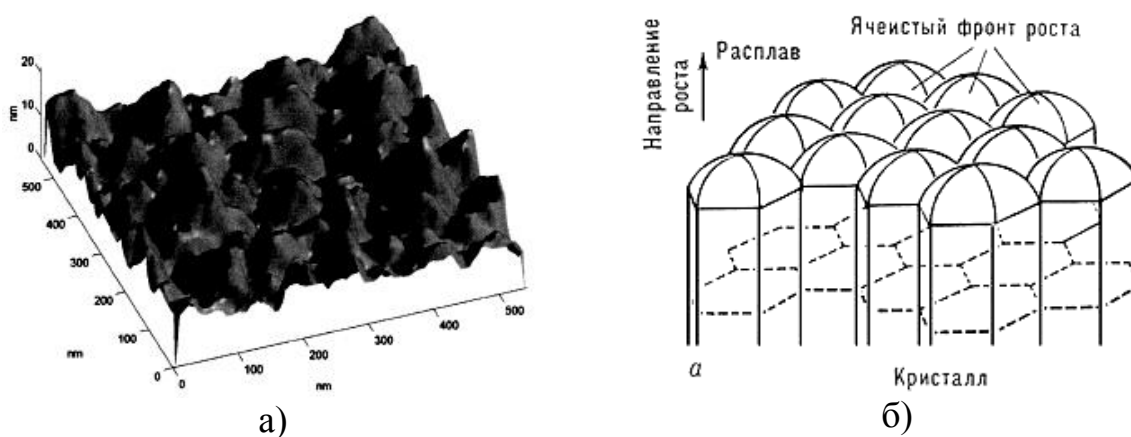


Рисунок 6. Фрагмент поверхности InSiAs [14], ячеистая структура кристалла при его выращивании из расплава [15].

Как правило, ячеистая структура наблюдается в многофазных покрытиях, к которым относится и наше покрытие (ZrFeCrNiNb)N. В работе [15] был сделан анализ причин возникновения ячеистой структуры. Среди них отмечены: механизм концентрационного переохлаждения; ячейки Бенара и конвективная неустойчивость; механизм формирования ячеистой дислокационной структуры; автоволновые процессы. Все эти механизмы

можно объединить одним признаком – они все происходят с учетом самоорганизации материи. В нашем случае, такой процесс самоорганизации происходит при следующих параметрах: температура турбинной лопатки $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$; ток дуги испарителя $I_A = 110\text{ A}$; давление азота в камере $P_A = 10^{-6}\text{ мм рт. ст.}$; опорное напряжение $U = 300\text{ В}$.

Увеличение тока дуги испарителя выше 120 A приводит к снижению совершенства структуры за счет возникновения большого количества капельной фазы. А если ток дуги меньше 70 A , то происходит уменьшение ионизации азота и происходит внедрение нейтральных частиц азота в матрицу покрытия. Эти нейтральные частицы приводят к увеличению концентрации дефектов в покрытии, что приводит к снижению твердости покрытия и увеличению коэффициента трения.

Микротвердость покрытия $(\text{ZrFeCrNiNb})\text{N}$ составляет около 15 ГПа , что довольно близко к нитридам тугоплавких металлов (табл. 2). Но коэффициент трения о сталь у нитридов тугоплавких металлов лежит в районе $0,75 \pm 0,80$, что значительно уступает нашему покрытию $k = 0,112$ (табл. 8). А коэффициент трения определяет износостойкость деталей, в том числе и турбинной лопатки. Поверхностная энергия нашего покрытия в среднем равна $\sigma = 0,998\text{ Дж/м}^2$ (табл. 3), что выше, чем у TiN и ZrN (табл. 2). Это еще раз подтверждает износостойкость нашего покрытия. Оценим теперь жаростойкость покрытия $(\text{ZrFeCrNiNb})\text{N}$, используя эмпирическую формулу $\sigma = 0,7 T_m$, где T_m – температура плавления [16]. По этой формуле мы получаем для температуры плавления покрытия - $T_m = 1426\text{ К} = 1153\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Скорость коррозии при $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ была определена по формуле: $v_K = \Delta m / S t$, где Δm – убыль (увеличение) массы; S – площадь образца; t – время изменения массы. Из табл. 9 видно, что скорость коррозии нашего покрытия не уступает наиболее коррозионно-стойким сталям.

Эксперимент показал, что микротвердость, коррозионная и жаростойкость полученных покрытий не уступает покрытиям градиентного типа. Отличием от них является малый коэффициент трения ($\sim 0,112$), что увеличивает износостойкость турбинных лопаток в 7 раз.

Библиографический список

1. Турбина паровая Т-100-130 ТМЗ. – Москва, 2009. - 307 с.
2. Мубояджян С.А., Лесников В.П., Кузнецов В.П. Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГТД. - Екатеринбург: Квист. - 2008. - 208 с.
3. Голубенцев А.В. Повышение усталостных характеристик рабочих лопаток ГТУ на основе совершенствования технологии литья и термической обработки. – Диссер. кандидата технических наук, Рыбинск, 2016. - 178 с.
4. Логунов А.В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин. - Рыбинск: Изд. «Газотурбинные технологии», 2017. - 854 с.
5. Настека В.В. Повышение эксплуатационных свойств литых лопаток

из жаропрочных никелевых сплавов за счет наноструктурирования поверхности. – Диссер. кандидата технических наук, Уфа, 2019. – 118 с.

6. Соболев О.В., Дмитрик В.В., Погребной Н.А., Пинчук Н.В., Мейлехов А.А. Апробация структурного подхода для оптимизации режимов получения покрытий, повышающих износостойкость лопаток турбин // Восточно-Европейский журнал, 2015, № 2/5(74). – С. 52-59.

7. Белоус В.А., Ищенко Г.И., Ищенко М.Г., Коваленко В.И., Мартыненко Л.И., Маринин В.Г. Исследование эрозии поверхностного слоя лопаточной стали 15X11МФ при микроударном воздействии // ВАНТ, 2018, № 2(114). – С. 119-124.

8. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // ВИАМ, 2012, №6. – С. 3-24.

9. Алексеев А.В., Орлов Г.В., Петров П.С. Анализ катодов на кобальтовой и никелевой основах методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии // ВИАМ, 2021, №7. – С. 19-29.

10. Юров В.М., Гученко С.А. Модернизация вакуумной установки магнетроном и плазменным источником // Межвузовский международный конгресс «Высшая школа: научные исследования», 2021, Том 1. – С. 120-135.

11. Григорьев С.В., Коваль Н.Н., Толкачев В.С. Дуговые разряды низкого давления с полым катодом и их применение в генераторах плазмы и источниках заряженных частиц // Изв. ВУЗов., 2001, Т. 44, № 9. – С. 28–35.

12. Юров В.М., Гученко С.А. Определение трения разнородных пар трибосопряжения // Школа науки, 2020, № 1(26). – С. 5-8.

13. Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А., Завацкая О.Н. Поверхностное натяжение упрочняющих покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия, 2014, № 1. - С. 33-36.

14. Цырлин Г.Э., Самсоненко Ю.Б., Петров В.Н. Наноструктурированный твердый раствор InSiAs, полученный на поверхности Si(001) методом молекулярно-пучковой эпитаксии // Письма в ЖТФ, 2000, Т. 26, № 17. - С. 59-66.

15. Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А., Завацкая О.Н. Образование ячеистой наноструктуры при формировании многофазных покрытий // Наноматериалы и нанотехнологии, 2012, № 2. – С. 17-24.

16. Рехвиашвили С.Ш., Кишტიкова Е.В. О температуре плавления наночастиц и наноструктурных веществ // Письма в ЖТФ, 2006, Т. 32, № 10. – С. 50-55.