

А. М. Смыслов, А. Д. Мингажев, К. С. Селиванов, М. К. Смылова, А. А. Мингажева

ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ЛОПАТКАХ ТУРБИНЫ ГТД ИЗ ЖАРОСТОЙКИХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Рассматривается возможность получения нанослойных жаростойких покрытий с использованием технологий, основанных на высокоэнергетических ионно-имплантационных и ионно-плазменных методах защитно-упрочняющей обработки и нанесения покрытий. Приводятся результаты исследования жаростойкости и предела выносливости деталей из никелевых жаропрочных сплавов. *Жаростойкость; нанослойные PVD покрытия; жаропрочные никелевые сплавы; ионно-имплантационные и ионно-плазменные технологии*

Газотурбинные установки и двигатели находят широкое применение в современной технике: двигатели самолетов и вертолетов, судовые газотурбинные двигатели, энергетические ГТУ и газоперекачивающие агрегаты. При этом основными деталями, определяющим эффективность, надежность, экономичность и ресурс работы, являются рабочие лопатки турбины. Длительная эксплуатация лопаточного аппарата турбины возможна лишь при условии изготовления рабочих лопаток из жаропрочных сплавов, например, на никелевой или кобальтовой основе, а также применения защитных жаростойких покрытий.

Известно [1], что в процессе эксплуатации лопатки подвергаются воздействию повышенных механических нагрузок, высоких температур и агрессивных сред. Результатом такого комплексного воздействия на деталь является ее быстрый выход из строя, что ограничивает назначенный и межремонтный ресурс изделия в целом. Для повышения работоспособности лопаток турбины используют различные жаростойкие покрытия [2], которые, при их достаточной стабильности в условиях эксплуатации, могут ощутимо снизить процессы разрушения основного материала детали и обеспечить ее работоспособность в условиях высоких температур.

Как показывает практика эксплуатации газовых турбин, наиболее перспективными материалами, используемыми для формирования жаростойких покрытий, являются сплавы систем: Me-Cr-Al-Y, где Me – это Ni, Co или их сочетание, а также сплавы, сочетающие Ni, Cr, Al, Si, Y, В. [3] Применяют как однослойные [4], так и двухслойные покрытия, например, с внешним слоем на основе алюминидов никеля

[5]. С точки зрения технологии нанесения жаростойких покрытий, хорошо зарекомендовали себя технологии, основанные на применении вакуумно-плазменных методов нанесения материалов [3]. При этом, одной из основных особенностей совершенствования указанных технологий является одновременное или последовательное использование целого ряда высокоэнергетических методов обработки и нанесения покрытия в одном технологическом цикле работы вакуумно-плазменной установки [6–8].

В частности, для нанесения многослойных покрытий на металлические детали применяют методы катодного распыления с использованием ионной очистки и ионно-имплантационной модификации материала поверхности детали [9, 10] Кроме того, повышение эксплуатационных свойств жаростойких покрытий обеспечивают сочетанием нескольких различных методов, например, нанесением ионно-плазменного слоя состава NiCrAlY с его последующим алитированием [11] или использованием покрытий сложных составов [12].

Многообразие применяемых технологий нанесения жаростойких покрытий объясняется, в частности, попытками снизить влияние таких отрицательных явлений как интенсивный диффузионный обмен между жаростойким слоем и основным материалом детали, приводящий к снижению эксплуатационных свойств лопаток турбин ГТД и ГТУ.

Обобщая вышеизложенное, одной из задач настоящих исследований ставилась разработка новой схемы ионно-плазменной обработки и технологии нанесения жаростойких покрытий на лопатки турбины ГТД из жаропрочных никелевых сплавов с целью повышения жаростойкости покрытия при одновременном обеспечении заданного уровня выносливости и циклической долговечности деталей с защитными покрытиями.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Сущностью разрабатываемой технологии [13] является применение комплекса защитно-упрочняющих обработок поверхности детали. Технология включает операции ионно-плазменной очистки и активации поверхности, ионно-имплантационного легирования, формирования внутреннего жаростойкого слоя и нанесение на него внешнего жаростойкого слоя.

Ионно-имплантационную обработку поверхности лопатки производили ионами Yb, Y, N. В качестве материала для формирования первого жаростойкого слоя использовали сплав состава: Cr – от 18 % до 30 %, Al – от 5 до 13 %, Y – от 0,2 до 0,65 %, Ni – остальное. В качестве материала для формирования внешнего жаростойкого слоя применяли сплав состава: Si – от 4,0 до 12,0 %; Y – от 1,0 до 2,0 %; Al – остальное. Нанесение внутреннего и внешнего жаростойкого слоев чередовали с периодической имплантацией ионами Yb, Y, N.

Особенностью ионно-имплантационной обработки внешнего жаростойкого слоя было то, что чередованием нанесения материала и имплантацией добивались образования субмикрослоев или нанослоев. Толщина внутреннего жаростойкого слоя составляла от 2 до 10 мкм, а количество субмикрослоев или нанослоев в жаростойком слое составляло от 80 до 200. Толщина

внешнего жаростойкого слоя составляла от 10 до 60 мкм, а количество субмикрослоев или нанослоев составляло от 200 до 1000.

Ионную имплантацию проводили при энергии ионов до 30 кэВ и дозе имплантации ионов от 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см². После нанесения покрытия проводили его диффузионный отжиг.

Режимы обработки образцов из никелевых сплавов и нанесения покрытия: ионная имплантация (N, Yb, Y) при энергии ионов до 30 кэВ и дозе имплантации ионов от 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см², диффузионный отжиг в вакууме при температуре 900 °С в течение 1 ч. Химический состав слоев и схема их чередования приведены в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Прогнозирование стойкости лопаток газовых турбин из никелевых сплавов (ЖС-6, ЖС-6У) с предлагаемыми жаростойкими покрытиями проводилась по результатам испытаний на выносливость и циклическую долговечность образцов в условиях высоких температур (870–950 °С) на воздухе.

В результате проведенных испытаний было установлено, что величина условного предела выносливости (σ_{-1}) образцов после ионно-плазменной обработки изменяется в диапазоне от 260 до 290 МПа (см. табл. 2).

Таблица 1

Схема ионно-плазменной обработки и химический состав покрытия образцов из никелевых сплавов ЖС-6, ЖС-6У

Группы образцов	Имплантируемые ионы		Внутренний слой покрытия	Внешний слой покрытия
	основы	покрытия		
1	Y	Y	Cr – 18%; Al – 5%; Y – 0,2%; Ni – ост.	Si – 4,0%; Y – 1,0%; Al – ост.
2	Yb	Y		
3	Yb	Yb		
4	Yb	N		
5	Y	N	Cr – 30%; Al – 13%; Y – 0,65%; Ni – ост.	Si – 12,0%; Y – 2,0%; Al – ост.
6	N	Yb		
7	Y	Yb		
8	Yb	Y		
9	N	Y	Cr – 22%; Al – 11%; Y – 0,5%; Ni – ост.	Si – 6,0%; Y – 1,5%; Al – ост.
10	Y	N		
11	Yb	Yb		
12	N	N		
13	Y	Y	Cr – 24%; Al – 8%; Y – 0,4%; Ni – ост.	Si – 8,0%; Y – 1,0%; Al – ост.
14	Yb	N		
15	N	N		
16	N	Y		
17	Y	Y	Cr – 26%; Al – 10%; Y – 0,3%; Ni – ост.	Si – 10 %; Y – 2,0%; Al – ост.
18	Yb	Y		
19	Yb	Yb		
20	Yb	N		

Таблица 2
Условный предел выносливости образцов
из никелевых сплавов ЖС-6, ЖС-6У
после обработки

Группы образцов	Никелевые сплавы, МПа	Группы образцов	Никелевые сплавы, МПа
1	260-285	11	275-290
2	265-290	12	280-300
3	265-290	13	270-295
4	270-300	14	275-290
5	280-295	15	265-290
6	275-290	16	280-300
7	260-290	17	280-295
8	270-300	18	270-280
9	280-295	19	265-280
10	275-290	20	280-300

Изотермическая жаростойкость покрытий оценивалась на образцах диаметром 10 мм и длиной 30 мм. Образцы покрытиями помещались в тигли и выдерживались на воздухе при температуре 1200 °С. Жаростойкость покрытий оценивалась по характерному времени (τ) до появления первых очагов газовой коррозии или других дефектов, которые определялись

путем визуального осмотра через каждые 50 ч испытаний при температуре 1200 °С. Взвешивание образцов вместе с окалиной производилось через 500 и 1000 ч испытаний, при этом определялась величина удельного прироста массы образца на единицу его поверхности по сравнению с исходным весом ΔP , г/м². Полученные результаты представлены в табл. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение жаростойкости покрытий и предела выносливости образцов из никелевых сплавов с покрытиями, нанесенными по разработанным способам (табл. 2 и 3), указывает на перспективность использования сочетаний высокоэнергетических методов упрочняющей обработки и нанесения жаростойких покрытий, основанных на ионно-имплантационных и ионно-плазменных методах для создания новых технологий, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств деталей с покрытиями, в частности с субмикро- и нанослойными покрытиями.

Таблица 3
Изотермическая жаростойкость образцов из никелевых сплавов ЖС-6, ЖС-6У после обработки

Группы образцов	Циклическая жаростойкость, циклов	Изотермическая жаростойкость		
		τ , ч	ΔP , г/м ²	
			500 ч	1000 ч
0*	550	350	7,4	13,1
1	750	650	6,1	10,4
2	700	600	5,8	9,8
3	800	700	6,3	10,1
4	900	750	4,4	8,8
5	850	700	5,9	9,1
6	900	850	3,6	7,9
7	950	850	3,4	7,8
8	700	600	6,2	9,9
9	900	850	4,1	8,7
10	800	700	5,7	10,2
11	900	800	4,5	8,8
12	750	650	5,6	9,7
13	750	600	5,8	10,1
14	900	800	4,3	9,9
15	850	750	4,9	9,4
16	900	850	4,4	8,8
17	800	700	5,1	8,9
18	800	650	5,4	8,7
19	850	700	5,3	9,3
20	800	700	5,7	9,9

Примечание. Звездочкой отмечен вариант обработки по действующей серийной технологии

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sudhangshu B.** High Temperature Coating. Elsevier Science and Technology Books, 2007. 300 p.
2. **Абраимов Н. В., Елисеев Ю. С.** Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 622 с.
3. **Tamarin Y.** Protective Coatings for Turbine Blades // ASM International. 2002. 217 p.
4. Protective coating for application to a substrate and method for manufacturing a protective coating // Патент США № 7422769. МПК В05D 3/04, 2008.
5. Coating system for superalloys // Патент США № 4080486. МПК В05D 3/04, 1978.
6. Способ нанесения ионно-плазменных покрытий и установка для его осуществления / А. М. Смыслов [и др.] // Патент РФ № 2380456, 2009.
7. Способ нанесения ионно-плазменного покрытия / А. М. Смыслов [и др.] // Патент РФ № 2375493, 2009.
8. Установка для комбинированной ионно-плазменной обработки и нанесения покрытий / А. М. Смыслов [и др.] // Патент РФ № 2380456, 2009.
9. Способ нанесения многослойного покрытия на металлические изделия // Патент РФ № 2228387. МПК С23С 14/06, опубл. 2004 г.
10. Способ получения комбинированного жаростойкого покрытия // Патент РФ № 1658652. МПК С23С 14/00, опубл. 2000 г.
11. **Коломыцев П. Т.** Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов. М.: Машиностроение, 1991. 146 с.
12. **Мубояджян С. А., Каблов Е. Н., Будиновский С. А.** Вакуумно-плазменная технология получения защитных покрытий из сложнолегированных сплавов // МиТОМ. 1995. № 2. С. 15–18.
13. Способ получения жаростойкого покрытия / А. М. Смыслов [и др.] // Заявка РФ № 2009116343 МПК С23С14/00, положительное решение от 30.08.2011 г.

ОБ АВТОРАХ

Смыслов Анатолий Михайлович, зав. каф. технологии машиностроения. Дипл. инженер по технологии машиностроения (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по произв-ву двигателей летательн. аппаратов (УГАТУ, 1983). Иссл. в обл. формирования свойств поверхности с использованием ионных, плазменных и электронных пучков в соответствии с условиями эксплуатации деталей.

Мингажев Аскар Джамильевич, доц. той же каф. Дипл. инженер по машинам и аппаратам химических производств (УНИ, 1976). Канд. техн. наук по технологии летательн. аппаратов и двигателей (УГАТУ, 1987). Иссл. в обл. жаростойких и термобарьерных покрытий применительно к деталям авиационной техники.

Смыслова Марина Константиновна, доц. каф. оборудования и технологии сварочн. произв-ва. Дипл. инженер по технологии машиностроения (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по технологии машиностроения (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. высокотвердых вакуумных ионно-плазменных покрытий с целью повышения эксплуатационных свойств рабочих лопаток турбомашин.

Селиванов Константин Сергеевич, доц. каф. технологии машиностроения. Дипл. инженер по технологии машиностроения (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по технологии машиностроения (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. физ.-хим., структурно-фазового состава и эксплуатационных свойств поверхности деталей после ее ионно-имплантационного и вакуумно-плазменного модифицирования.

Мингажева Алиса Аскарровна, асп. той же каф. Дипл. инженер по машинам и технологиям высокоэффективных процессов обработки (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. армированных теплозащитных покрытий для лопаток ГТД.