

УДК 669.017:629.7.023.22

**В. Л. ГРЕШТА¹, Д. В. ТКАЧ¹, А. В. КЛИМОВ¹, Е. Г. СОТНИКОВ²,
З. В. ЛЕХОВИЦЕР², Л. П. СТЕПАНОВА¹**¹ *Запорожский национальный технический университет, Украина*² *АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина*

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ЖАРСТОЙКИХ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ГТД

Представлены результаты исследования микроструктуры и фазового состава уплотняющего теплозащитного покрытия, применяемого в турбинах газотурбинных двигателей, полученного на основе КНА-82 с добавлением различных по составу легирующих элементов, содержащих иттрий, что позволит увеличить жаростойкость получаемого материала и повысить температуры эксплуатации разрабатываемого покрытия. Установлены особенности формирования фазового состава покрытий в зависимости от внесенной легатуры. Показано, что в процессе нанесения покрытий различных составов были сформированы различные интерметаллиды, что в дальнейшем необходимо учитывать при разработке плотных, стойких к окислению и изнашиванию покрытий.

Ключевые слова: *радиальный зазор; уплотняющее покрытие; жаропрочность; жаростойкость; эрозионная стойкость; легатура, шихта*

Введение

Одной из приоритетных задач авиадвигателестроения является снижение потребления топлива, что достигается повышением коэффициента полезного действия (КПД) современных газотурбинных двигателей (ГТД) [1]. Поскольку повышение КПД обеспечивают за счет повышения температуры, что может привести к снижению срока службы деталей горячей части двигателя. При этом необходимо учитывать, что величина радиального зазора между ротором и статором значительно влияет на коэффициент полезного действия турбины [2, 3]. Следовательно обеспечение требуемой величины зазора в процессе эксплуатации двигателя является одной из приоритетных задач.

Для обеспечения необходимой величины зазоров турбины применяют уплотнительные покрытия сложного состава. При этом к ним предъявляется ряд несколько противоречивых требований, т.к. с одной стороны они должны обеспечивать высокую адгезию и эрозионную стойкость материала уплотнения с материалом основы в условиях повышенных температур, а с другой стороны – низкую работу врезания, что обеспечит минимальные зазоры и позволит существенно уменьшить износ торцевой поверхности лопатки [4]. Кроме того актуальным остается обеспечение высокой жаропрочности и жаростойкости этих покрытий. В работе [5] установлено, что уплотнительные вставки значительно подвержены высокотемпературному износу. Причем такой

дефект был выявлен у 10 % уплотнительных вставок турбореактивных двигателей, отработавших ресурс до 1-го ремонта, и у 25 % вставок, отработавших межремонтный ресурс. Однако совершенствованию состава уплотнительных теплозащитных покрытий турбины ГТД уделяется недостаточно внимания [6-10]. Возможно это связано с тем, что повышение температуры газа в турбине привело к необходимости разработки теплозащитных покрытий на лопатки авиационного двигателя, поскольку жаропрочность материалов, применяемых для их изготовления, не может быть обеспечена в процессе гарантированного срока службы деталей турбины.

На сегодняшний день на АО «Мотор Сич» применяют уплотнительные покрытия на основе модифицированной никель-кремниевой губки (КНА-82) и твердой смазки (графит + BN). Применение такого материала при температурах порядка 1150 °С не может гарантировать сохранение стабильной величины зазора в процессе эксплуатации, поэтому актуальна разработка уплотняющего покрытия, которое могло бы успешно применяться в условиях столь высоких температур.

Свойства и работоспособность покрытий существенно зависят от остаточных напряжений, которые возникают в процессе их получения, а также в большей степени от структурных факторов. Образование в покрытии определенной структуры с наличием тугоплавких интерметаллидов и нитридов может в значительной мере повысить температурные режимы и эрозионную стойкость работающих дета-

лей. В работе [11] были проведены предварительные исследования по разработке состава уплотняющего теплозащитного покрытия, применяемого в турбине ГТД и сделаны предварительные выводы. Поэтому установлению влияния химического состава лигатуры на наличие фазовых составляющих в структуре покрытий необходимо было уделить особое внимание.

Таким образом, целью данной работы является установление фазового состава уплотняющих теплозащитных прирабатываемых покрытий различных по составу, что позволит выбрать наиболее оптимальный состав покрытия и повысить жаропрочность, жаростойкость, прирабатываемость и эрозионную стойкость материала.

1. Материалы и методы исследования

Покрытия получены с использованием специальной технологии с вариацией шихтовых материалов. Уплотнительное покрытие КНА-82 успешно применялось в авиационных двигателях АО «Мотор Сич» с более низкой температурой газа в турбине, поэтому было принято решение в шихту приготавливаемую по серийной технологии вносить лигатуру содержащую иттрий. Лигатура была представлена тремя различными составами с различной комбинацией и содержанием иттрия:

- 1 состав – Ni-Y,
- 2 состав – Y,
- 3 состав – Co-Ni-Cr-Al-Y.

Покрытие наносилось газопламенным методом на специально подготовленные образцы (рис. 1). На материал основы предварительно наносился жаростойкий подслоу, который представлял собой никелевый сплав содержащий компоненты (Al и Cr), для повышения жаростойкости. Это обеспечивало как сопротивление высокотемпературной коррозии, так и высокую адгезионную прочность уплотняющего покрытия с материалом основы.



Рис. 1. Внешний вид напыленных образцов

Для определения химического состава шихты и покрытия применяли спектральный анализ. Микро-

структуру покрытия изучали с помощью микроскопа Zeiss Axio Observer.

Определение фазового состава шихтовых материалов и напыленного покрытия проводили рентгеноструктурным анализом в медном излучении на модернизированном дифрактометре ДРОН, оснащенном микропроцессорным модулем. Наличие управляющей специализированной программы позволило эффективно проводить обработку и анализ дифрактограмм, что повысило чувствительность выявления фаз, присутствующих в небольших количествах в исследуемых образцах.

Монохроматизация дифракционных отражений осуществлялась при помощи монохроматора, установленного перед сцинтилляционным счетчиком для фильтрации β – излучения. Дифрактограммы снимали в диапазоне углов отражения в интервале $11^\circ \dots 75^\circ$.

Качественный фазовый состав структурных составляющих проводили по стандартной методике [12] путем сравнения расчетных экспериментальных значений межплоскостных расстояний $d_{\text{НКЛ}}$ со справочными данными [13, 14]. Достоверность полученных результатов подтверждалась анализом соответствующих диаграмм состояния двойных систем [15] с учетом химического состава шихтовых материалов и покрытия.

2. Анализ полученных результатов

Исследование микроструктуры полученных покрытий позволило установить, что в процессе напыления формируется пористая структура с равномерным распределением структурных составляющих (рис. 2).

В площади шлифа всех вариантов опытных покрытий отсутствуют трещины и сколы, внешний вид покрытий мало различается. Это, вероятно, связано с тем, что для установления особенностей распределения фаз и их морфологии необходимо провести исследования при больших увеличениях.

В ходе исследований было определено содержание иттрия в лигатуре, полученной шихте и нанесенном покрытии (табл. 1), что в дальнейшем позволило регулировать количество иттрия для получения фаз, обеспечивающих высокие показатели жаропрочности и жаростойкости покрытия.

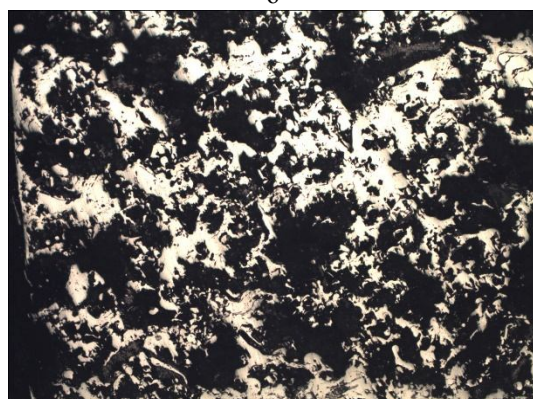
Отсняты дифрактограммы исходных материалов: нитрида бора, порошка ПН70Ю30 (КНА), чистого иттрия, лигатуры никеля с иттрием, а также покрытия ВКНА. В исходном порошке ПН70Ю30 обнаружены следующие фазы: Ni и NiAl. Покрытие ВКНА имело фазовый состав Ni, NiAl и Ni₃Al. В порошке лигатуры никеля с иттрием выявлены фазы: Y и Ni₅Y.



а



б



в

Рис. 2. Микроструктура покрытий после нанесения на основу: а – состав №1; б - состав №2; в - состав №3 (x100)

Проведено изучение фазового состава в структуре покрытий с более сложными исходными материалами (табл. 2).

Таблица 2

Исходные материалы и фазовый состав покрытий

Исходные материалы	Фазовый состав покрытия
КНА-82 +состав №1	Ni, BN, NiAl, Y, Ni ₅ Y, Ni ₂ Si
КНА-82 +состав №2	Ni, BN, NiAl, Ni ₃ Al, Y, Ni ₂ Si
КНА-82 +состав №3	Ni, BN, Ni ₃ Al, Co ₂ Al ₅ , CoCr ₂ , CrSi, Ni ₂ Si

Основой всех трех составов (табл. 2) служил КНА-82, который представлял собой смесь исходного порошка КНА (никелевый порошок, кристаллический кремний, графит, нитрид бора, алюминиевый порошок с добавками карбамида и натриевого жидкого стекла как связки) в общем количестве 90%, а также порошка ВКНА(10%).

Различие в составах определялось добавками порошка лигатуры никеля с иттрием (№1) и чистого иттрия (№2). В состав №3 введен порошок на основе лигатуры, содержащей металлы Co, Ni, Cr, Al, Y.

Дифрактограммы покрытий приведены на рис. 3-5, а также в таблицах 3-5 с результатами фазового рентгеноструктурного анализа.

В покрытиях всех составов выявлены фазы никеля и нитрида бора, последний присутствует в меньшем количестве в покрытии состава №3 по сравнению с составами №1 и №2. Добавка чистого иттрия не приводит к образованию фазы Ni₅Y в процессе формирования покрытия. Химическое соединение Ni₅Y выявлено только в составе №1 с добавками порошка лигатуры никеля с иттрием.

Фаза NiAl выявлена в покрытиях составов №1 и №2. Силицид никеля Ni₂Si в покрытиях всех составов присутствует в небольших количествах, т.к. на дифрактограммах наблюдаются наиболее сильные линии, причем некоторые из них совпадают с линиями других фаз. Наиболее сложным по фазовому составу является покрытие №3. Выявленные интерметаллиды имеют сложные типы кристаллических решеток, которые не относятся к кубической сингонии и, поэтому, содержат большое количество линий зачастую слабых по интенсивности, что приводило к определенным сложностям при идентификации той или иной фазы.

Известно, что интерметаллиды на основе никеля являются одной из фазовых составляющих многих материалов, применяемых в турбинах ГТД и предназначенных для длительной эксплуатации в условиях высоких температур [16].

Таблица 1

Содержание иттрия (% мас.)

	Лигатура	Шихта	Покрытие
КНА-82 + состав №1	18,4	0,3	0,3
КНА-82 + состав №2	99	2,3	2,1
КНА-82 + состав №3	0,7	0,1	0,1

В покрытии на основе КНА-82 присутствуют фазы никеля и нитрида бора, как основные, а также в небольших количествах фазы Ni₂Al₃ и Ni₂Si.

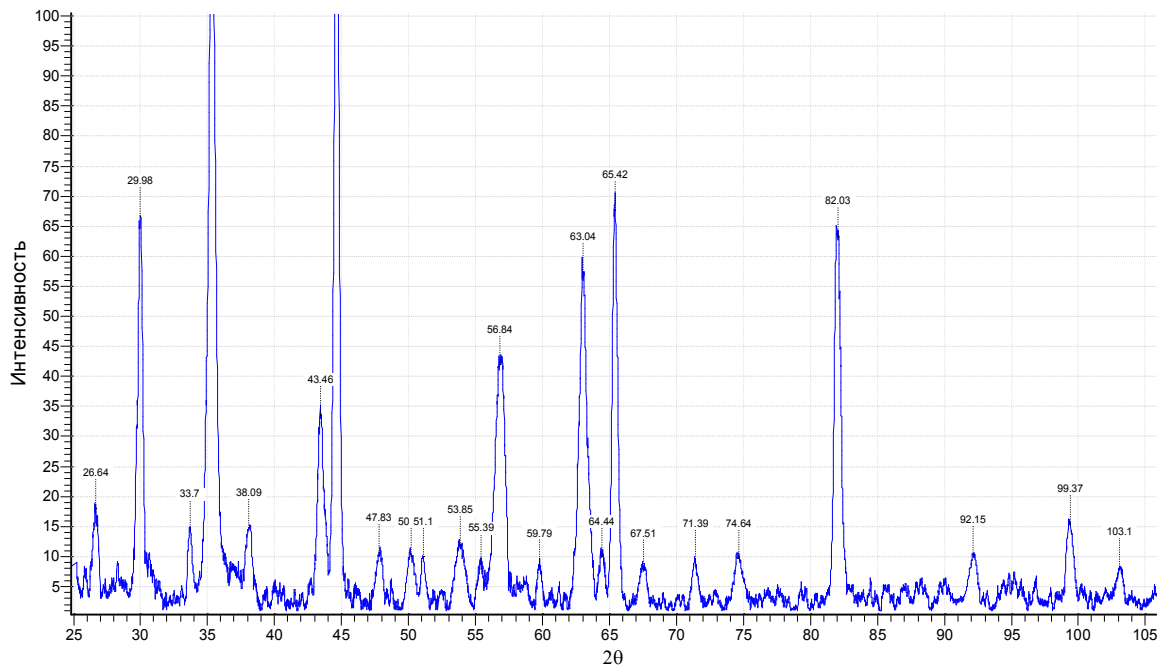


Рис. 3. Дифрактограмма покрытия КНА-82 +состав №1

Таблица 3

Межплоскостные расстояния d_{HKL} (Å) и интенсивности экспериментальных и справочных данных для выявленных фаз в покрытии с исходным составом №1

Экспериментальные данные			Справочные данные											
Угол θ град	d_{HKL}	I	BN		Ni		NiAl		Ni ₂ Si		Y		Ni ₅ Y	
			d_{HKL}	I	d_{HKL}	I	d_{HKL}	I	d_{HKL}	I	d_{HKL}	I	d_{HKL}	I
26,64	3,35	13	3,32	100					3,28	сл	3,36	19		
29,98	2,98	48					2,89	сл			2,98	100		
33,7	2,66	10											2,66	22
35,34	2,54	96											2,97	7
38,09	2,36	11											2,36	100
43,46	2,08	24	2,06	3										
44,64	2,03	100			2,04	100	2,04	сп	2,03	ос				
47,83	1,90	8							1,98	с	1,90	30		
50,19	1,82	7	1,82	8					1,85	с				
51,1	1,79	7			1,77	50							1,80	20
53,85	1,70	9							1,71	с	1,74	7		
55,39	1,66	6	1,66	10			1,67	сл	1,65	сп				
56,84	1,62	30							1,62	сп				
59,79	1,55	6	1,55	12							1,56	10	1,57	28
63,04	1,47	41	1,47	10					1,50	сп				
64,44	1,45	7									1,45	10	1,45	10
65,42	1,43	49					1,44	сп	1,44	сп				
67,51	1,39	6									1,37	10		
71,39	1,32	7	1,32	8			1,35	сп	1,35	сп			1,33	сп
74,64	1,27	7	1,25	20	1,25	40					1,27	6		
82,03	1,17	46	1,17	50										
92,15	1,07	7	1,08	40	1,07	10	1,09	с	1,09	с				
99,37	1,01	11			1,02	10	1,04	с	1,04	с				
103,1	0,98	6	0,99	20							0,98	5		

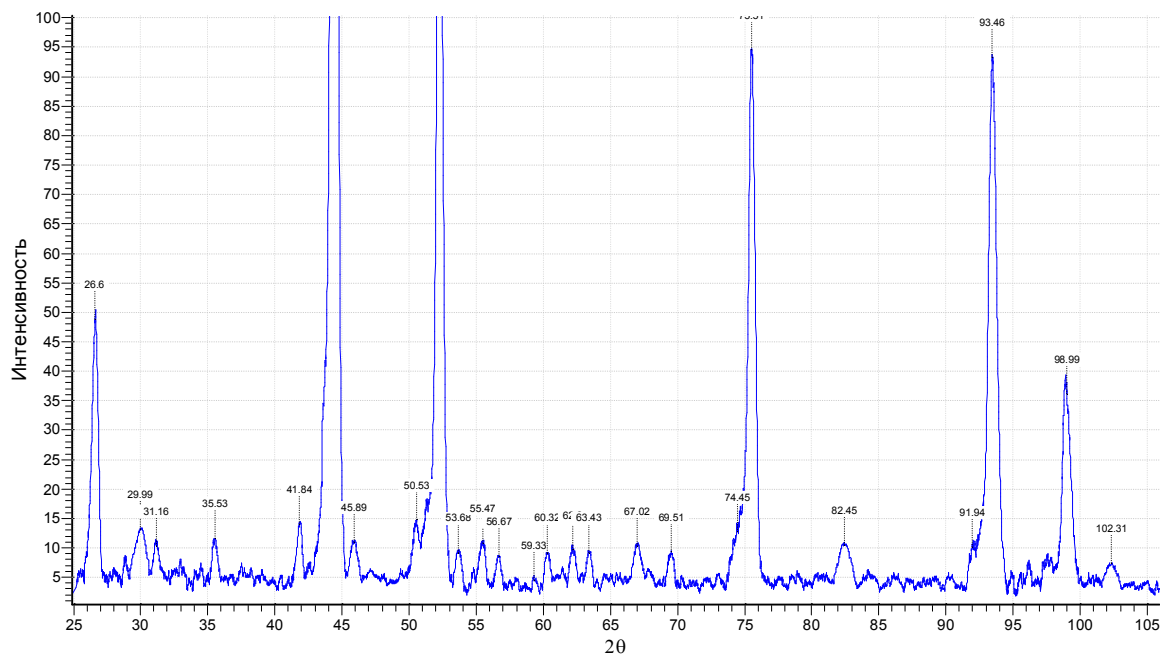


Рис. 4. Дифрактограмма покрытия КНА-82 +состав №2

Таблица 4

Межплоскостные расстояния d_{HKL} (Å) и интенсивности экспериментальных и справочных данных для выявленных фаз в покрытии с исходным составом №2

Экспериментальные данные			Справочные данные											
			BN		Ni		NiAl		Ni ₃ Al		Ni ₂ Si		Y	
Угол θ град	d_{HKL}	I	d_{HKL}	I	d_{HKL}	I	d_{HKL}	I	d_{HKL}	I	d_{HKL}	I	d_{HKL}	I
26,6	3,35	12	3,32	100									3,36	19
29,99	2,98	3											2,98	10
31,16	2,87	2					2,89	сл			2,87	сл		
35,53	2,53	3							2,52	сл	2,49	сл	2,46	22
41,84	2,16	3	2,17	9										
44,4	2,04	100	2,06	3	2,04	100	2,04	сп	2,06	с	2,03	ос		
45,89	1,98	3									1,98	сл	2,01	38
50,53	1,81	4	1,82	8										
52,27	1,75	38			1,77	50								
53,68	1,71	2					1,67	сл						
55,47	1,66	3	1,66	8							1,65	сп		
56,67	1,62	2									1,62	сп		
59,33	1,56	1	1,55	12									1,56	10
62,2	1,49	2											1,50	10
63,43	1,47	2	1,47	12			1,44	сп	1,45	сл			1,45	12
67,02	1,40	2											1,39	8
69,51	1,35	2									1,35	сп		
74,45	1,27	3					1,29	сл						
75,51	1,26	23			1,25	40			1,25	сл	1,26	сп	1,26	6
82,45	1,17	3					1,18	сп	1,19	сл				
91,94	1,07	2							1,07	сл				
93,46	1,06	22			1,07	60					1,04	с		
98,99	1,01	9	1,02	сл	1,02	сл	1,03	сп						
102,3	0,99	2											0,99	8

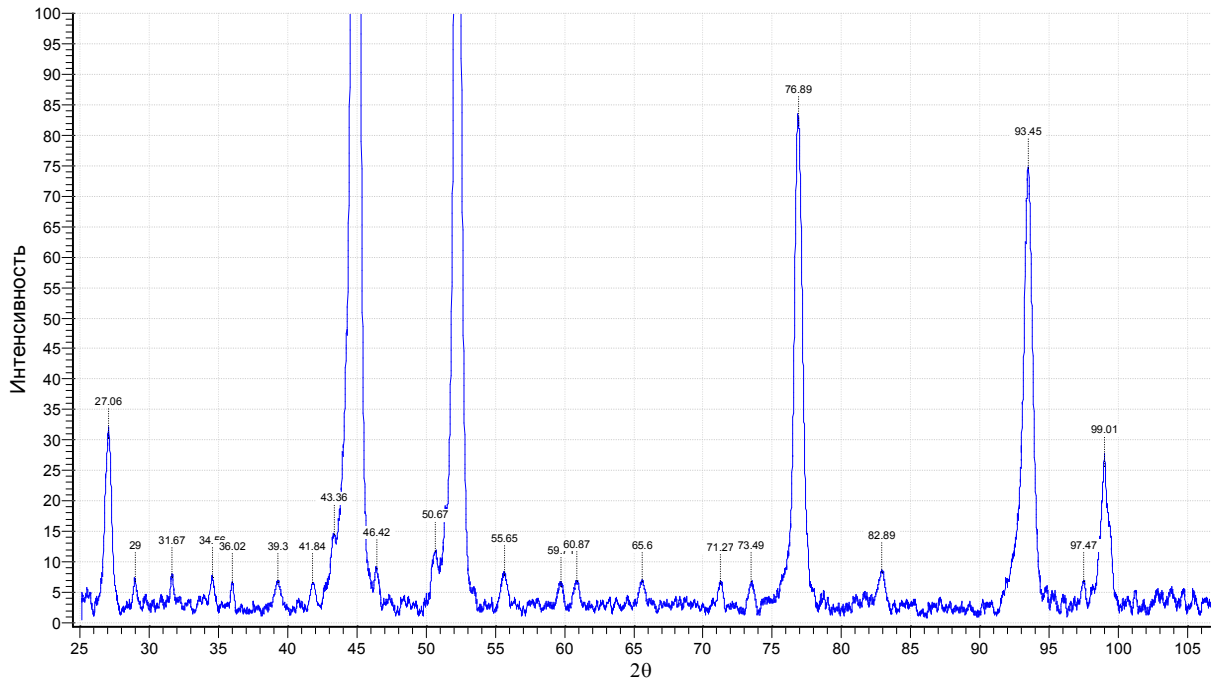


Рис. 5. Дифрактограмма покрытия КНА-82 +состав №3

Таблица 5

Межплоскостные расстояния d_{HKL} (Å) и интенсивности экспериментальных и справочных данных для выявленных фаз в покрытии с исходным составом №3

Экспериментальные данные			Справочные данные													
			Ni		BN		Co ₂ Al ₃		Ni ₂ Si		Ni ₃ Al		CoCr ₂		CrSi	
Угол θ град	d_{HKL}	I	d_{HKL}	I	d_{HKL}	I	d_{HKL}	I	d_{HKL}	I	d_{HKL}	I	d_{HKL}	I	d_{HKL}	I
27,06	3,30	6			3,32	100	3,33	30	3,28	сл					3,27	10
29,00	3,08	1					3,06	50								
31,67	2,83	2							2,87	сл						
36,02	2,49	1							2,49	сл						
39,30	2,29	1					2,37	20					2,26	ср		
41,84	2,16	1			2,16	50	2,13	80	2,12	с			2,12	с		
43,36	2,09	3							2,03	с	2,06	с	2,06	ср	2,07	50
44,91	2,02	100	2,04	100			2,02	80	1,98	ос			2,01	с		
46,42	1,96	2					1,92	100					1,95	с	1,89	40
50,67	1,80	2			1,81	80	1,8	30					1,82	ос		
52,27	1,75	41	1,77	50							1,78	ср	1,75	ср		
55,65	1,65	2			1,66	70	1,67	30	1,65	ср			1,66	сл		
59,71	1,55	1			1,54	12										
60,87	1,52	1					1,52	20	1,5	ср						
65,60	1,42	1							1,44	ср					1,4	10
71,27	1,32	1			1,32	20			1,35	ср			1,33	сл		
73,49	1,29	1					1,29	80							1,28	4
76,89	1,24	17	1,25	40	1,25	40	1,26	90	1,23	ср	1,25		1,23	сл	1,84	20
82,89	1,16	2											1,17	сл	1,16	4
93,45	1,06	16	1,07	10							1,08	ср			1,06	12
97,47	1,03	1	1,02	10					1,04	ср	1,02	ср				
99,01	1,01	5													1,01	сл

Как видно из табл. 1 в покрытиях различных составов наблюдаются такие интерметаллиды никеля как NiAl и Ni₃Al. Эти соединения имеют различное сопротивление изнашиванию при высоких температурах. В работе [16] показано, что износостойкость NiAl в пять раз выше износостойкости Ni₃Al, следовательно присутствие фазы NiAl в покрытиях состава №1 и №2 должно повышать их сопротивление высокотемпературному износу. Поскольку в покрытиях были выявлены другие интерметаллидные соединения и силициды, очевидно, что износостойкость этих соединений будет отличаться, однако данные о влиянии этих соединений на сопротивление износу отсутствуют. В работе [17] было установлено, что внесение в покрытия иттрия и кремния в качестве легирующих элементов ведет к повышению их стойкости абразивному износу. Таким образом, можно ожидать положительное влияние этих соединений на трибологические характеристики в полученных покрытиях.

Заключение

В данном исследовании были установлены особенности формирования фазового состава опытных покрытий в зависимости от используемой лигатуры. Показано, что в процессе нанесения покрытий, отличающихся по составу, были сформированы различные интерметаллиды, которые имеют определенное сопротивление износу. Поскольку на данный момент отсутствует информация о влиянии интерметаллидов и силицидов на сопротивление покрытий высокотемпературному износу, необходимо установить особенности трибологических характеристик покрытий опытных составов. В дальнейшем это необходимо учитывать при разработке плотных, стойких к окислению и эрозионному изнашиванию покрытий. Также необходимо установить особенности распределения и морфологию фаз в опытных покрытиях и их влияние на трибологические характеристики покрытий.

Учитывая тот факт, что уплотнительное покрытие должно сохранять свои эксплуатационные характеристики в условиях температур порядка 1150 °С, необходимо провести их высокотемпературные испытания

Литература

1. Кофман, В. М. *Определение коэффициента полезного действия турбины ГТД по параметрам неравномерных газовых потоков [Текст] / В. М. Кофман // Вестник УГАТУ. Авиационная и ракетно-космическая техника. – 2012. – Т. 16, № 5 (50). – С. 28–40.*
2. Бондарчук, П. В. *Разработка методики рас-*

чёта системы управления радиальными зазорами в турбине ГТД [Текст] / П. В. Бондарчук, А. Ю. Тисарев, М. В. Лаврушин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 3 (34). – С. 272–278.

3. Иноземцев, А. А. *Вопросы оптимизации радиальных зазоров ТВД авиационного ГТД [Текст] / А. А. Иноземцев, С. В. Бажин, М. А. Снитко // Вестник двигателестроения. – 2012. – № 2. – С. 149–154.*

4. Мехерван, Д. *Эксплуатационная готовность и надежность современных промышленных газотурбинных двигателей [Текст] / Д. Мехерван, П. Бойс // Газотурбинные технологии. – 2005. – № 2. – С. 2–9.*

5. *Эксплуатационные повреждения турбореактивных двухконтурных авиационных двигателей с форсажной камерой сгорания [Текст] / Б. С. Карпинос, А. В. Коровин, А. П. Лобунько [и др.] // Вестник двигателестроения. – 2014. – № 1. – С. 18–24.*

6. *Газотермические уплотняющие (прирабатываемые) покрытия [Текст] / В. А. Фролов, Б. В. Рябенко, А. В. Курдюков [и др.] // Сварочное производство. – 2008. – № 10. – С. 42–44.*

7. *Уплотнительные материалы для проточного тракта ГТД [Текст] / В. П. Мигунов, Д. П. Фарафонов, М. Л. Деговец [и др.] // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 94–97.*

8. Кравец, А. А. *Получение прирабатываемого жаростойкого покрытия на проставках ТК методом HVOF [Текст] / А. А. Кравец, Е. И. Гордиенко, О. А. Корогод [и др.] // Вестник двигателестроения. – 2014. – № 2. – С. 197–200.*

9. Новиков, А. В. *Жаростойкое прирабатываемое покрытие для надроторных вставок стационарных газовых турбин [Текст] / А. В. Новиков, А. Г. Кочарян, А. А. Быбин // Газовая промышленность. – 2015. – №4 (721). – С. 43–46.*

10. *Срабатываемые, износостойкие и теплозащитные покрытия для деталей газового тракта турбины, компрессора и камеры сгорания ГТД [Текст] / В. А. Барвинок, И. Л. Шитарев, В. И. Богданович [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – №3(19). – 2009. – С. 11–28.*

11. *Разработка состава теплозащитного покрытия на детали газотурбинных двигателей, работающих в условиях высоких температур [Текст] / Е. Г. Сотников, З. В. Леховицер, В. Л. Грешта, [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 10(127). – С. 6–10.*

12. Русаков, А. А. *Рентгенография материалов [Текст] / А. А. Русаков. – М. : Атомиздат, 1977. – 480 с.*

13. Миркин, Л. И. *Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов [Текст] / Л. И. Миркин. – М. : Гос. изд-во физ. мат. литературы, 1961. – 863 с.*

14. Миркин, Л. И. *Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов : справочник. [Текст] / Л. И. Миркин. – М. : Машино-*

строение, 1979. – 134 с.

15. Лякишева, Н. П. *Диаграммы состояния двойных металлических систем : справочник : в 3 т. [Текст]. – М. : Машиностроение, 1996. – Т. 1. – 992 с., Т. 2 – 1024 с., Т. 3. – кн. 1. – 872 с., Т. 3. – кн. 2. – 448 с.*

16. Влияние состава покрытий на основе интерметаллидов никеля на механизмы их изнашивания в условиях высокотемпературных трибо испытаний [Текст] / А. П. Уманский, Е. Н. Полярус, А. Д. Костенко [и др.] // *Проблемы трибологии.* – 2012. – № 3. – С. 123-127.

17. Износостойкость и жаростойкость вакуумно-дуговых покрытий на основе TiN и TiAlN с добавками Si и Y [Текст] / И. И. Аксенов, В. А. Белоус, А. Н. Григорьев [и др.] // *Вопросы атомной науки и техники.* – 2011. – № 4. – С. 169-173

References

1. Kofman, V. M. *Opređenje koeficienta poleznog dejstvija turbiny GTD po parametram neravnomyh gazovyh potokov* [Determination of the efficiency of the turbine GTD by parameters of nonuniform gas flows]. *Vestnik UGATU. Aviacionnaja i raketno-kosmicheskaja tehnika*, 2012, vol. 16, no. 5 (50), pp. 28-40.

2. Bondarchuk, P. V., Tisarev, A. Ju., Lavrushin, M. V. *Razrabotka metodiki raschjota sistemy upravlenija radial'nymi zazorami v turbine GTD* [Method development management system for calculating radial gaps in a turbine GTE]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta*, 2012, vol. 3 (34), pp. 272-278.

3. Inozemcev, A. A., Bazhin, S. V., Snitko, M. A. *Voprosy optimizacii radial'nyh zazorov TVD aviacionnogo GTD* [Questions of optimization of radial clearance turboprop aircraft GTE]. *Vestnik dvigatelestroenija*, 2012, no. 2, pp. 149-154.

4. Mehervan, D., Bojs, P. *Ekspluatacionnaja gotovnost' i nadezhnost' sovremennyh promyshlennyh gazoturbinnnyh dvigatelej* [Operational readiness and reliability of modern industrial gas turbine engines]. *Gazoturbinnnye tehnologii*, 2005, no. 2, pp. 2-9.

5. Karpinos, B. S., Korovin, A. V., Lobun'ko, A. P., Vedishheva, M. Ju. *Ekspluatacionnye povrezhdenija turboreaktivnyh dvuhkonturnykh aviacionnyh dvigatelej s forsazhnoj kameroj sgoranija* [Operational damage turbofan aircraft engine with afterburner combustion chamber]. *Vestnik dvigatelestroenija*, 2014, no. 1, pp. 18-24.

6. Frolov, V. A., Rjabenko, B. V., Kurdjukov, A. V., Shifrin, V. V. *Gazotermicheskie uplotnjajushhie (prirabatyvaemye) pokrytija* [Gas-thermal sealing (burnished) coatings]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2008, no. 10, pp. 42-44.

7. Migunov, V. P., Farafonov, D. P., Degovec, M. L., Stupina, T. I. *Uplotnitel'nye materialy dlja protochnogo trakta GTD* [Sealing materials for the flow path GTE]. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 5, pp. 94-97.

8. Kravec, A. A., Gordienko, E. I., Korogod, O. A., Prochan, V. G. *Poluchenie prirabatyvaemogo zharostojkogo pokrytija na postavkakh TK metodom HVOF* [Getting burned in a heat-resistant coating on the spacers by TK HVOF]. *Vestnik dvigatelestroenija*, 2014, no. 2, pp. 197-200.

9. Novikov, A. V., Kocharjan, A. G., Bybin, A. A. *Zharostojkoe prirabatyvaemoe pokrytie dlja nadrotornykh vstavok stacionarnykh gazovyh turbin* [Heat resistant coating for nadrotorny burnished inserts stationary gas turbines]. *Gazovaja promyshlennost'*, 2015, no. 4 (721), pp. 43-46.

10. Barvinok V. A., Shitarev, I. L., Bogdanovich, V. I., Dokukina, I. A., Karasjov V. M. *Srabatyvaemye, iznosostojkie i teplozashhitnye pokrytija dlja detalej gazovogo trakta turbiny, kompressora i kamery sgoranija GTD* [Fire, abrasion -resistant and heat-resistant coatings for gas turbine tract parts of the compressor and turbine engine combustion chamber]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta*, 2009, vol. 3 (19), pp. 11-28.

11. Sotnikov, E. G., Lehovicer, Z. V., Greshta, V. L., Klimov, A. V., Tkach, D. V. *Razrabotka sostava teplozashhitnogo pokrytija na detali gazoturbinnnykh dvigatelej, rabotajushhij v uslovijah vysokih temperatur* [Development of a thermal barrier coating for details turbine engine, workers at high temperatures]. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 2015, no. 10 (127), pp. 6-10.

12. Rusakov, A. A. *Rentgenografija materialov* [Radiography materials]. Moscow, Atomizdat Publ., 1977. 480 p.

13. Mirkin, L. I. *Spravochnik po rentgenostrukturalnomu analizu polikristallov* [Guide to X-ray analysis of polycrystalline]. Moscow, Gos. izd-vo fiz. mat. literatury Publ., 1961. 863 p.

14. Mirkin, L. I. *Rentgenostrukturalnyj kontrol' mashinostroitel'nykh materialov : spravochnik* [X-ray control of engineering materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979 134 p.

15. Ljakisheva, N. P. *Diagrammy sostojanija dvojnnykh metallicheskih sistem : spravochnik v 3 t.* [Diagrams of binary metallic systems : manual : in 3 vol.], Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996, vol. 1 – 992 p., vol. 2 – 1024 p., vol. 3, b. 1 – 872 p., vol. 3, b. 2 – 448 p.

16. Umanskij, A. P., Poljarus, E. N., Kostenko, A. D., Terent'ev, A. E. *Vlijanie sostava pokrytij na osnove intermetallidov nikelja na mehanizmyh iznashivaniya v uslovijah vysokotemperaturnykh triboispytaniij* [Effect of coating composition based on nickel intermetallic mechanism wear under high triboispytany], *Problemi tribologii*, 2012, no. 3, pp. 123-127.

17. Aksenov, I. I., Belous, V. A., Grigor'ev, A. N., Ermolenko, I. G., Zadneprovskij, Ju. A. *Iznosostojkost' i zharostojkost' vakuumno-dugovykh pokrytij na osnove TiN i TiAlN s dobavkami Si i Y* [Abrasion resistance and heat resistance of the vacuum-arc coatings based on TiN and TiAlN with additions of Si and Y], *Voprosy atomnoj nauki i tehniki*, 2011, no. 4, pp. 169-173.

Поступила в редакцию 28.05.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф., профессор кафедры физического материаловедения В. Е. Ольшанецкий, Запорожский национальный технический университет, Украина.

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВОГО СКЛАДУ ЖАРОСТІЙКИХ УЩІЛЬНЮЮЧИХ ПОКРИТТІВ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬ В ГТД

В. Л. Грешта, Д. В. Ткач, О. В. Климов, Є. Г. Сотніков, З. В. Леховіцер, Л. П. Степанова

Представлено результати дослідження мікроструктури і фазового складу ущільнюючого теплозахисного покриття, що застосовується в турбінах газотурбінних двигунів, отриманого на основі КНА-82 з додаванням різних за складом лігатур, що містять ітрій, це дозволить збільшити жаростійкість одержуваного матеріалу і підвищити температури експлуатації розроблювального покриття. Встановлено особливості формування фазового складу покриттів в залежності від внесеної лігатури. Показано, що в процесі нанесення покриттів різних складів були сформовані різні інтерметаліди, що в подальшому необхідно враховувати при розробці щільних, стійких до окислення і ерозійного зношування покриттів.

Ключеві слова: радіальний зазор; ущільнююче покриття; жароміцність; жаростійкість; ерозійна стійкість; лігатура, шихта.

INVESTIGATION OF PHASE COMPOSITION OF HEAT RESISTANT SEALER COAT USED IN GTE

V. L. Greshtha, D. V. Tkach, A. V. Klimov, E. G. Sotnikov, Z. V. Lihovitsler, L. P. Stepanova

The results of investigation of the microstructure and phase composition of the heat-seal coating used in the turbines of gas turbine engines, based on the obtained KPA-82 by adding different hardeners composition containing yttrium, which will increase the heat resistance of the resulting material and increase the operating temperature of the developed coating. The peculiarities of the phase composition of the coatings according to the introduced ligation. It has been shown that various intermetallic compounds, that in the future should be considered in the development of dense, resistant to oxidation and wear coatings were formed during the coating of various compositions.

Key words: radial clearance; seal coating; heat resistance erosion resistance; ligature, charge.

Грешта Виктор Леонидович - канд. техн. наук, профессор кафедры физического материаловедения Запорожского национального технического университета, Украина.

Ткач Дарья Владимировна - канд. техн. наук, доцент кафедры физического материаловедения Запорожского национального технического университета, Украина, e-mail: odarka_ua@hotmail.com

Климов Александр Владимирович - канд. техн. наук, декан инженерно-физического факультета Запорожского национального технического университета, Украина.

Сотников Евгений Георгиевич – начальник цеха №3 АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.

Леховицер Зоя Васильевна – канд. техн. наук, доцент, начальник бюро отдела главного металлурга АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.

Степанова Любовь Петровна - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры физического материаловедения Запорожского национального технического университета, Украина.

Greshtha Viktor Leonidovich - Candidate of Technical Science, Professor of Dept. of Physical materials science, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine.

Tkach Daria Vladimirovna - Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Physical materials science, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine, e-mail: odarka_ua@hotmail.com

Klimov Aleksandr Vladimirovich - Candidate of Technical Science, Associate Professor, Dean of Engineering Physics Faculty, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine.

Sotnikov Eugene Georgievich - head of the shop №3 JSC "Motor Sich", Zaporizhzhya, Ukraine.

Lekhovitser Zoya Vasilevna - Candidate of Technical Science, Associate Professor, Head Office department chief metallurgist JSC "Motor Sich", Zaporizhzhya, Ukraine.

Stepanova Lyubov Petrovna - Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Physical materials science, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine.