

4. Головачев В.А., Петров Б.И., Филимошин В.Г., Шманев В.А. Электрохимическая размерная обработка деталей сложной формы.– М.: Машиностроение, 1969, с. 198.
5. Wei B., Lipkin D.M., Spitz L. Electrochemical system and process for stripping metallic coatings // Pat. 6352636 (US), Int. Cl<sup>7</sup> C25F 5/00, Mar. 5, 2002.
6. Амирханова Н.А., Невьянцева Р.Р., Белоногов В.А., Тимергазина Т.Н. Способ удаления покрытия с металлической подложки: Пат. 2094546 (РФ) //Бюл., № 24, 27.01.1997.
7. Черненко В.И., Снежко Л.А., Папанова И.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом. – Л.: Химия, 1991, 128 с.
8. Мубояджян С.А., Каблов Е.Н., Будиновский С.А., Фурин В.С. и др. Установка для нанесения защитных покрытий: Пат. 2187576 (РФ) //Бюл., № 21, 20.08.2002.
9. Мубояджян С.А., Каблов Е.Н., Помелов Я.А., Будиновский С.А. Способ обработки поверхности металлических изделий: Пат. 2165474 (РФ) //Бюл., №1, 20.04.2001.
10. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Павлов А.Ю. Способ удаления алюминидного покрытия на основе никеля: Пат. 2211261 (РФ) //Бюл., №24, 27.08.2003.
11. Будиновский С.А., Мубояджян С.А. Способ удаления жаростойкого металлического покрытия: Пат. 2228396 (РФ) //Бюл., № 13, 10.05.2004.

УДК 669.018.44:669.24

*С.А. Будиновский, С.А. Мубояджян*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЖАРОПРОЧНОСТИ ЛИТЕЙНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ЛОПАТОК ТУРБИН С НЕРЕГЛАМЕНТИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ МЕТОДАМИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ**

Развитие жаропрочных литейных никелевых сплавов (ЖС) для лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) различного назначения в настоящее время связывают в основном с увеличением в составе сплавов доли Re и Ta, что позволяет поднять температуру солидус сплава и температуру полного растворения основной упрочняющей фазы в системе – интерметаллида никеля Ni<sub>3</sub>Al ( $\gamma$ -фазы) [1, 2]. В ряде случаев предлагается вводить в состав сплава Ru, Ir или перейти к другим системам, например на основе NiAl (температура плавления 1638°C) или RuAl (температура плавления 1920°C) [3]. Общим для таких разработок является изменение свойств ЖС в нужном направлении путем объемного легирования материала. Это приводит к заметному росту стоимости современных ЖС и изготовленных из них лопаток турбин, которые, кроме того, должны иметь монокристаллическую структуру. В то же время известно, что применение методов поверхностной обработки материалов в ряде случаев позволяет существенно поднять их прочностные свойства [4]. Известные способы упрочнения поверхности, такие как ионная имплантация, лазерные и пучковые технологии обработки, не обеспечивают заметного прироста прочности ЖС из-за малой глубины модифицированного слоя. При высоких температурах процессы диффузии, релаксации напряжений, эволюции дислокационной структуры материала лопатки приводят к быстрой потере преимуществ модифицированного слоя по сравнению с остальной массой металла.

Целью данной работы является исследование возможности повышения прочности сплава типа ЖС6У при высоких температурах методами ионно-плазменной обработки поверхности в вакуумном дуговом разряде. Изменения элементного и фазового состава поверхности ЖС должны после обработки иметь глубину, соизмеримую с толщиной стенки рабочей лопатки турбины ТВД, – для авиационных ГТД эта толщина обычно составляет ~1 мм.

Упрочнение поверхности с использованием ионно-плазменных методов может быть достигнуто путем изменения состава поверхностного слоя ЖС легированием непосредственно в плазме вакуумного дугового разряда, нанесением на поверхность сплава упрочняющего покрытия, модифицированием состава поверхностного слоя ЖС при вакуумной термообработке композиции сплав–покрытие.

На предварительном этапе работы были изучены процессы взаимодействия поверхности образцов из сплавов ЖС6У и ЖС26 с металлической плазмой многокомпонентных никелевых сплавов. Ионно-плазменная обработка поверхности ЖС проводилась ионами металлов, извлекаемых из плазмы вакуумного дугового разряда при электрических потенциалах подложки 300–900 В и плотности тока около 100 А/см<sup>2</sup>. При потенциалах подложки менее 250–300 В имеет место конденсация металлической плазмы на поверхности с образованием слоя, состав которого значительно отличается от состава испаряемого сплава покрытия (катода вакуумной дуги) [5]. При больших потенциалах определяющим на поверхности является процесс ионного травления, скорость которого превышает скорость ионного насыщения поверхности. Это может быть использовано для глубокой очистки поверхности перед нанесением упрочняющих покрытий, но не позволяет провести ее легирование для повышения прочности. В связи с этим дальнейшие исследования в работе были направлены на изучение свойств композиции ЖС–многокомпонентное покрытие. Для ионно-плазменного упрочнения поверхности (ИПУ) ЖС использовались следующие типы покрытий:

*I* – покрытия из жаропрочных сплавов для монокристаллического литья;

*II* – покрытия на основе алюминидов никеля;

*III* – покрытия из карбидов металлов и их композиций с никелевой матрицей (типа «твердых сплавов»), полученные плазмохимическим способом из технически чистых металлов или никелевых сплавов, содержащих карбидообразующие элементы.

#### Методика экспериментов

Все рассмотренные в работе упрочняющие покрытия были получены ионно-плазменным методом [6]. В табл. 1 приведены составы использованных в работе сплавов (катодов) и указано, для какого вида ИПУ сплав предназначен.

Таблица 1

**Состав сплавов для проведения ИПУ поверхности ЖС**

Условный номер состава сплава или сплав	Содержание элемента, % (по массе)										Тип ИПУ (см. текст)
	Ni	Cr	Al	W	Ta	Re	Nb	Ti	Co	Mo	
1	Основа	6,2	5	7	7	–	–	–	–	4	I
2	««	5	8,4	5	–	1,2	–	1	–	3	
3	««	4	6	12	–	2	1	1	9	1,6	
4	««	9,1	8,9	–	5	11,1	3	–	–	–	II
5	««	5,6	4,1	4,8	10,2	2,1	–	–	–	–	
6	««	–	–	–	27,3	–	–	–	–	–	III
7	««	–	–	–	22,3	–	–	28,2	–	–	
BT1-0	–	–	–	–	–	–	–	99,9	–	–	
BX1	–	99,5	–	–	–	–	–	–	–	–	
СДП-2*	Основа	20	12	–	–	–	–	–	–	–	–

\* Жаростойкое покрытие, содержащее также 0,4% иттрия.

Подготовка поверхности образцов и нанесение упрочняющих покрытий проводились по серийной технологии на установках ТХПУ [7] при токах дуги 200±10 А и МАП-1(М) [8] при токах дуги 700±50 А. Скорость осаждения покрытия в экспериментах составила 18–21 мкм/ч. Перед нанесением покрытия проводилась глубокая очистка поверхности ЖС ионным травлением в плазме материала покрытия при электрических потенциалах подложки не менее 600 В. Это обеспечивало последующее осаждение упрочняющего покрытия на атомно-чистую поверхность.

Покрытия из карбидов титана и хрома толщиной 20±3 мкм были получены методом прямого плазмохимического синтеза при подаче в плазму дуги технически чистого ацетилена при давлении 10<sup>-1</sup>Па и потенциале подложки 150±10 В. Остальные покрытия были получены при потенциале подложки 5–10 В и имели толщину 60–80 мкм.

Для сплавов 6 и 7 (см. табл. 1) процесс осаждения шел в присутствии ацетилена при давлении 10<sup>-1</sup>Па. На образцы с покрытиями из сплавов 4 и 5 наносился второй слой из технически чистого алюминия, и в процессе вакуумной термообработки на поверхности образцов был сформирован слой из легированного алюминида никеля толщиной 40–50 мкм [9].

Для защиты упрочняющих слоев от окисления при высокотемпературных испытаниях на длительную прочность и выносливость, на поверхность всех образцов нано-

силось жаростойкое покрытие из сплава СДП-2 толщиной 40 мкм. Вакуумная термообработка образцов с покрытиями проводилась в лабораторной печи типа СНВЛ131 с вольфрамовым нагревателем по различным режимам при остаточном давлении не выше  $5 \cdot 10^{-1}$  Па.

Определение характеристик прочности образцов из жаропрочных сплавов с ИПУ проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ 10145 на испытательных машинах ZST 2/3-ВИЭТ и ГОСТ 25.502–79 на испытательных машинах МВП ВИАМ.

Металлографические и микрорентгеноспектральные исследования структуры и состава композиций ЖС–покрытие проводились на микроскопе Versamet-2 и приборе JCSM-733.

### Обсуждение результатов

В табл. 2 представлены результаты испытаний на длительную прочность образцов из сплава ЖС6У с упрочняющими покрытиями различных типов.

Таблица 2

#### Долговечность образцов из сплава ЖС6У при 1000°С и напряжении 170 МПа

Тип покрытия и режим термообработки	Количество образцов	Среднее время до разрушения, ч
Без покрытия + ТО*	6	(73,8±12,3)****
СДП-2 + ТО	3	75,0
Сплав 1** + СДП-2 + ТО	3	133,5
Сплав 2** + ТО + ТВО*** + СДП-2 + ТО	6	(124,3±32,9)****
Сплав 3** + ТО + СДП-2 + ТО	6	(124,2±19,9)****
Сплав 4** + Al + ТО + СДП-2 + ТО	3	118
Сплав 5** + Al + ТО + СДП-2 + ТО	3	115,5
Сплав 6** + СДП-2 + ТО	3	94,0
Сплав 7** + ТВО*** + СДП-2 + ТО	3	100,5
CrC + СДП-2 + ТО	3	54,0
TiC + СДП-2 + ТО	3	77,4

\* Термообработка по режиму: 1000°С, 4 ч.

\*\* Сплавы 1–7 – см. табл. 1.

\*\*\* Термовакuumная обработка при 1210°С, 25 ч.

\*\*\*\* Расчет величины стандартного отклонения выполнен для вероятности неразрушения  $p=0,95$  в пакете программ Ахим-7.

Видно, что нанесение упрочняющих покрытий из карбидов металлов или слоев типа «твердых сплавов» (сплавы 6 и 7 – см. табл. 1) не дало прироста долговечности образцов в процессе испытаний на длительную прочность. Для интерметаллидных ионно-плазменных покрытий – ИПУ с использованием сплавов 4 (11%Re) и 5 (10%Ta) – наблюдалась тенденция к увеличению долговечности (по сравнению с необработанными образцами). Наиболее стабильными и высокими оказались результаты ИПУ с использованием покрытий из жаропрочных сплавов 1 (ЖС40), 2 (ВКНА-25), 3 (ЖС36).

Были проведены исследования структуры и элементного состава композиций в исходном состоянии, после вакуумных термообработок по паспортным режимам отпуска (1000°С, 4 ч) или закалки (1270°С, 1,25 ч) сплава ЖС6У. При вакуумной термообработке композиций ЖС–упрочняющее покрытие наблюдается интенсивное диффузионное взаимодействие материалов покрытия и сплава. Например, в двухкомпонентное покрытие 6 из ЖС поступают все легирующие элементы, присутствующие в сплаве ЖС6У, за исключением ниобия. Покрытие после отжига содержит около 2% W; 1,5% Co; 1,2% Mo; 0,5% Ti. В обратном направлении идет диффузия тантала – содержание этого элемента составляет под покрытием на границе раздела 9,1%, а на глубине 100 мкм от границы более 0,5%. Причем после проведения термообработки композиции при температуре закалки сплава ЖС6У содержание тантала в покрытии снижается практически вдвое – с 28 до 16%, а глубина его проникновения в ЖС от границы сплав–покрытие составляет более 150 мкм (0,3%). Взаимодействие сплава ЖС6У с более сложным по составу покрытием 1 отличает-

ся тем, что присутствие в сплаве покрытия алюминия, хрома, молибдена, ниобия, вольфрама тормозит отток этих легирующих элементов из поверхностного слоя ЖС. Нанесение внешнего жаростойкого покрытия СДП-2 на поверхность упрочняющих покрытий с последующей термообработкой несколько изменяет картину, представленную выше. Например, для композиции покрытие 7 + СДП-2 (рис. 1) диффузия тантала происходит как в сплав ЖС6У, так и в покрытие СДП-2 на глубину 30–40 мкм, где содержание тантала составляет до 1,6%. Покрытие СДП-2 также легируется титаном, кобальтом, вольфрамом – содержание каждого из этих элементов в слое возрастает с нуля до 1,5–2%. Интересно отметить, что диффузия алюминия в слой из сплава 7 практически отсутствует, хотя его содержание в сплаве СДП-2 достигает 11%. В то же время хром, который обладает в никелевых сплавах относительно низкой диффузионной подвижностью, проникает на всю толщину покрытия 7 и его доля в слое составляет от 2 до 6%.

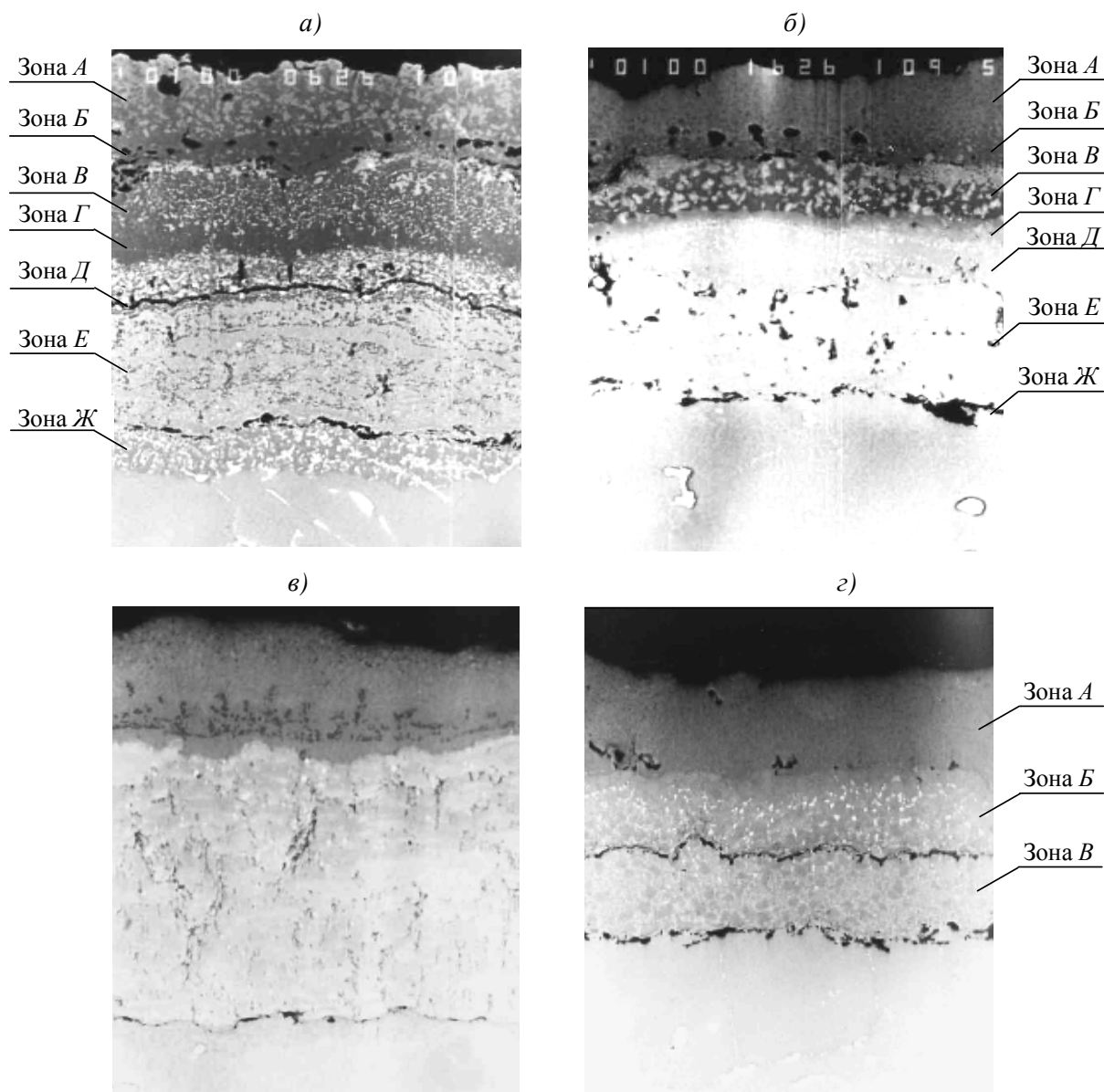


Рис. 1. Микроструктура поверхностного слоя образцов из сплава ЖС6У после ИПУ ( $\times 600$ ):  
*a* – сплав 4 + Al + TO + СДП-2 + TO (состав по зонам – см. табл. 3); *б* – сплав 5+Al+TO+  
 +СДП-2+ТО (состав по зонам – см. табл. 4); *в* – сплав 7+СДП-2+ТО; *г* – сплав 4+ТВО+  
 +СДП-2+ТО (состав по зонам – см. табл. 8)

Покрытия на основе алюминидов никеля, полученные из многокомпонентных никелевых сплавов 4; 5; алюминия и сплава СДП-2, имеют сложное многослойное строение. Результаты металлографических исследований таких покрытий представлены на рис. 1 и в табл. 3 и 4. Несмотря на сложность строения, в микроструктуре можно выделить внешний слой упрочняющего покрытия – зоны *А, Б* (см. рис. 1, *а, б*). Слой сформирован на основе сплава СДП-2 и содержит, как и сплав СДП-2, в значительном количестве хром (20–22%). Промежуточный слой (зоны *В, Г, Д*) образовался из моноалюминид никеля, полученного при термообработке покрытий 4+Al; 5+Al и поэтому содержит до 15–20% алюминия. Внутренний слой (зона *Е*) – то, что осталось от покрытий из сплавов 4 и 5. Основными фазовыми составляющими упрочняющих покрытий являются алюминиды никеля –  $\beta$ - и  $\gamma$ -фазы, соотношение которых в слое изменяется в соответствии с распределением алюминия по толщине покрытия. На периферии покрытия в зонах *А, Д, Е, Ж* основной фазовой составляющей в структуре является  $\gamma$ -фаза, хотя в слое присутствуют включения моноалюминид никеля и мелкодисперсные частицы карбидов. В центральной части покрытия – в зонах *Б, В, Г* – картина меняется на противоположную. С ростом доли алюминия в слое основной фазовой составляющей становится моноалюминид никеля ( $\beta$ -фаза). Следует отметить, что в отличие от всех рассмотренных ранее композиций, рений в композиции со сплавом 5 присутствует в качестве легирующего элемента во всех зонах, по всей толщине упрочняющего покрытия. Вольфрам, кобальт, тантал также легируют упрочняющее покрытие на всю его толщину.

Таблица 3

**Элементный состав покрытия: сплав 4 + Al + ТО\* + СДП-2 + ТО\***

Место анализа (см. рис. 1, <i>а</i> )	Содержание элементов, % (по массе)									
	Al	Cr	Ti	Mo	W	Ta	Re	Co	Nb	Ni
Зона <i>А</i>	9,3	22,3	–	–	0,5	1,0	0,3	1,9	0,6	Остальное
Зона <i>Б</i>	14,7	21,7	–	–	0,9	0,8	0,5	1,7	0,7	««
Зона <i>В</i>	15,9	5,9	–	–	0,7	2,1	1,2	1,7	0,8	««
Зона <i>Г</i>	21,3	4,1	–	–	1,1	1,8	0,9	0,9	0,6	««
Зона <i>Д</i>	9,8	10,7	0,1	0,5	1,6	4,3	6,0	1,0	3,1	««
Зона <i>Е</i>	8,1	9,9	0,7	0,8	3,3	3,7	4,8	2,7	2,7	««
Зона <i>Ж</i>	8,0	12,6	1,6	1,4	13,5	0,6	–	8,3	1,0	««
ЖС под зоной <i>Ж</i> на расстоянии, мкм:										
0	6,7	11,1	1,4	1,5	13,1	0,8	–	9,1	0,9	««
50	6,3	9,2	1,6	1,3	12,4	0,1	–	10,2	1,0	««

\* ТО – термообработка по режиму: 1000°C, 4 ч.

Таблица 4

**Элементный состав покрытия: сплав 5 + Al + ТО\* + СДП-2 + ТО\***

Место анализа (см. рис. 1, <i>б</i> )	Содержание элементов, % (по массе)									
	Al	Cr	Ti	Mo	W	Ta	Re	Co	Nb	Ni
Зона <i>А</i>	9,6	20,7	–	–	3,2	0,2	0,3	1,0	–	63,7
Зона <i>Б</i>	15,8	9,8	–	–	3,6	0,2	0,9	1,4	0,2	67,4
Зона <i>В</i>	10,9	10,0	–	0,1	4,2	3,6	1,1	1,8	0,2	67,2
Зона <i>Г</i>	15,6	4,9	–	0,1	3,4	1,8	0,5	0,9	0,1	72,8
Зона <i>Д</i>	7,9	3,3	0,1	0,1	5,2	4,4	0,6	0,9	0,3	76,6
Зона <i>Е</i>	6,6	2,7	0,1	0,1	5,0	11,2	1,2	0,9	0,3	71,7
Зона <i>Ж</i>	5,9	13,9	0,6	0,4	10,9	5,2	0,7	3,8	0,2	58,4
ЖС под зоной <i>Ж</i> на расстоянии, мкм:										
0	6,0	8,7	2,1	1,4	11,7	0,7	–	7,7	1,0	60,8
50	6,1	8,4	1,9	1,7	11,3	0,2	–	10,2	0,8	59,3

\* ТО – термообработка по режиму: 1000°C, 4 ч.

Таким образом, металлографический анализ композиций ЖС–упрочняющее покрытие показал два возможных пути ИПУ с использованием покрытия. Первый – это нанесение на поверхность ЖС покрытия из сплавов, близких ему по элементному и фазовому составу, но из-за особенностей легирования имеющих большую прочность в области высоких температур. Легирование поверхности ЖС элементами, повышающими температуры солидус и растворения упрочняющей  $\gamma'$ -фазы, происходит в процессе вакуумных термообработок композиции. Второй путь – формирование на поверхности ЖС легированного интерметаллидного слоя на основе  $\beta$ - и  $\gamma'$ -фаз с использованием поочередного нанесения слоев из никелевого сплава, легированного элементами, повышающими прочность ЖС, а затем – слоя алюминия или его сплава с последующей вакуумной термообработкой. Для прогнозирования поведения таких композиций при больших базах испытаний и высоких температурах необходимы дополнительные исследования, так как доступная информация по жаропрочным сплавам на основе моноалюминидов никеля ограничена и представляет собой результаты поисковых исследований. Проведение ИПУ деталей из ЖС с нерегламентированной структурой с использованием сплавов для монокристаллического литья представляется по результатам исследований наиболее целесообразным. В связи с этим работы были продолжены с использованием упрочняющих покрытий из сплавов 2 и 3 (далее по тексту ИПУ-2 и ИПУ-3).

В табл. 5 приведены результаты испытаний на длительную прочность образцов из сплава ЖС6У при температуре 1000°C и базах 10, 100 и 500 ч. Был проведен расчет средних и минимальных значений длительной прочности сплава ЖС6У с ИПУ для вероятности неразрушения 0,8. Результаты расчета представлены в табл. 6, где для сравнения также показаны паспортные характеристики длительной прочности сплава ЖС6У без ИПУ.

Таблица 5

Тип покрытия	Напряжение, МПа	Время до разрушения, ч
Без покрытия	255	7,5
	170	72; 82; 96,5
	180	84,3
	125	574,5
	130	580
СДП-2	170	56,5; 93; 68,5
ИПУ-3	255	9,5; 5
	170	109,5; 140; 105,5; 111; 156; 121,5; 111,5
	180	99; 100; 196,5
	125	638; 800,5
	130	667,5; 349,5; 513,8; 461,8; 481
ИПУ-2	255	7; 10,5
	170	122; 113; 95; 186
	180	83,5; 85,5; 77,5
	185	67,3; 97,5
	125	674,5; 512
	130	561; 585,6; 460,5; 442

Таблица 6

Предел длительной прочности\* сплава ЖС6У в исходном состоянии (по паспорту) и после ИПУ

Тип покрытия	$\sigma_{\tau}^{1000}$ , МПа, при базе испытаний $\tau$ , ч			
	10	100	500	1000
Без покрытия со структурой: равноосной направленной	250 / 220	170 / 140	120 / 100	100 / 80
	280 / 225	185 / 145	135 / 105	120 / 90
ИПУ-2	250 / 230	175 / 160	130 / 115	110 / 95
ИПУ-3	240 / 225	175 / 160	130 / 115	110 / 95

\* В числителе – средние значения, в знаменателе – минимальные.

Представленные данные показывают, что ИПУ поверхности образцов из сплава ЖС6У обеспечивает прирост длительной прочности сплава в условиях испытаний. Квота превосходства возрастает с увеличением базы испытаний и составляет не менее 10 и 15% соответственно для средних и гарантированных значений прочности на базах 500 и 1000 ч. Обращает на себя внимание, что по уровню минимально гарантированных значений длительной прочности образцы с ИПУ превосходят образцы из сплава ЖС6У с направленной структурой, что, видимо, объясняется исключением влияния поверхностного фактора на прочностные свойства образцов при проведении ИПУ.

Результаты исследования структуры и состава поверхности образцов из сплава ЖС6У с покрытиями ИПУ-2 и ИПУ-3 в исходном состоянии и после испытаний на длительную прочность представлены в табл. 7; 8 и на рис. 2.

Таблица 7

**Элементный состав поверхности сплава ЖС6У с покрытием ИПУ -3**

Состояние материала	Место анализа (см. рис. 2, а, б, в)	Содержание элементов, % (по массе)								
		Al	Cr	Ti	Mo	W	Co	Nb	Re	Ni
Исходное	Зона А	7,6	21,3	–	0,2	0,7	1,2	–	–	Остальное
	Зона Б	7,8	8,9	0,8	1,2	7,4	4,9	0,2	1,8	
	На расстоянии от границы ЖС, мкм:									
	0	7,5	6,7	1,6	1,8	7,6	7,0	0,7	0,4	–«–
	100	5,7	8,1	2,4	1,3	11,8	10,4	0,8	–	–«–
После испытания на длительную прочность ( $\sigma_{100}^{1000} = 170$ МПа)	Зона А	4,6	18,9	0,1	2,0	1,7	2,2	0,3	0,4	–«–
	Зона Б	6,0	10,4	0,7	2,2	3,1	3,4	0,8	1,3	–«–
	На расстоянии от границы ЖС, мкм:									
	0	6,2	9,3	1,1	2,1	5,2	4,4	0,9	1,0	–«–
	20	5,8	8,9	1,8	2,1	9,2	7,9	1,1	0,3	–«–
	100	6,1	8,8	2,0	1,3	11,8	10,1	0,1	–	–«–

Таблица 8

**Элементный состав поверхности сплава ЖС6У с покрытием ИПУ-2**

Состояние материала	Место анализа (см. рис. 2, г)	Содержание элементов, % (по массе)								
		Al	Cr	Ti	Mo	W	Co	Nb	Re	Ni
Исходное (микроструктура – см. рис. 1, г)	Зона А	9,7	18,9	0,2	0,4	1,9	3,2	–	0,1	Остальное
	Зона Б	9,4	7,1	1,3	0,8	4,2	3,2	–	0,5	
	Зона В	8,7	6,9	1,2	1,9	6,1	5,3	–	1,9	–«–
	На расстоянии от границы ЖС, мкм:									
	0	7,2	6,3	1,2	1,8	8,2	7,5	0,7	0,3	–«–
	100	5,8	8,7	2,3	1,2	12,2	10,3	0,9	–	–«–
После испытания на длительную прочность ( $\sigma_{100}^{1000} = 170$ МПа)	Зона А	5,3	16,2	0,2	1,8	4,3	4,1	0,4	1,2	–«–
	Зона Б	7,5	10,3	1,2	1,6	9,2	6,6	0,7	1,3	–«–
	На расстоянии от границы ЖС, мкм:									
	0	7,7	9,8	1,6	1,2	8,7	6,9	1,0	0,2	–«–
	100	5,8	8,9	2,4	1,4	10,8	10,1	1,2	–	–«–

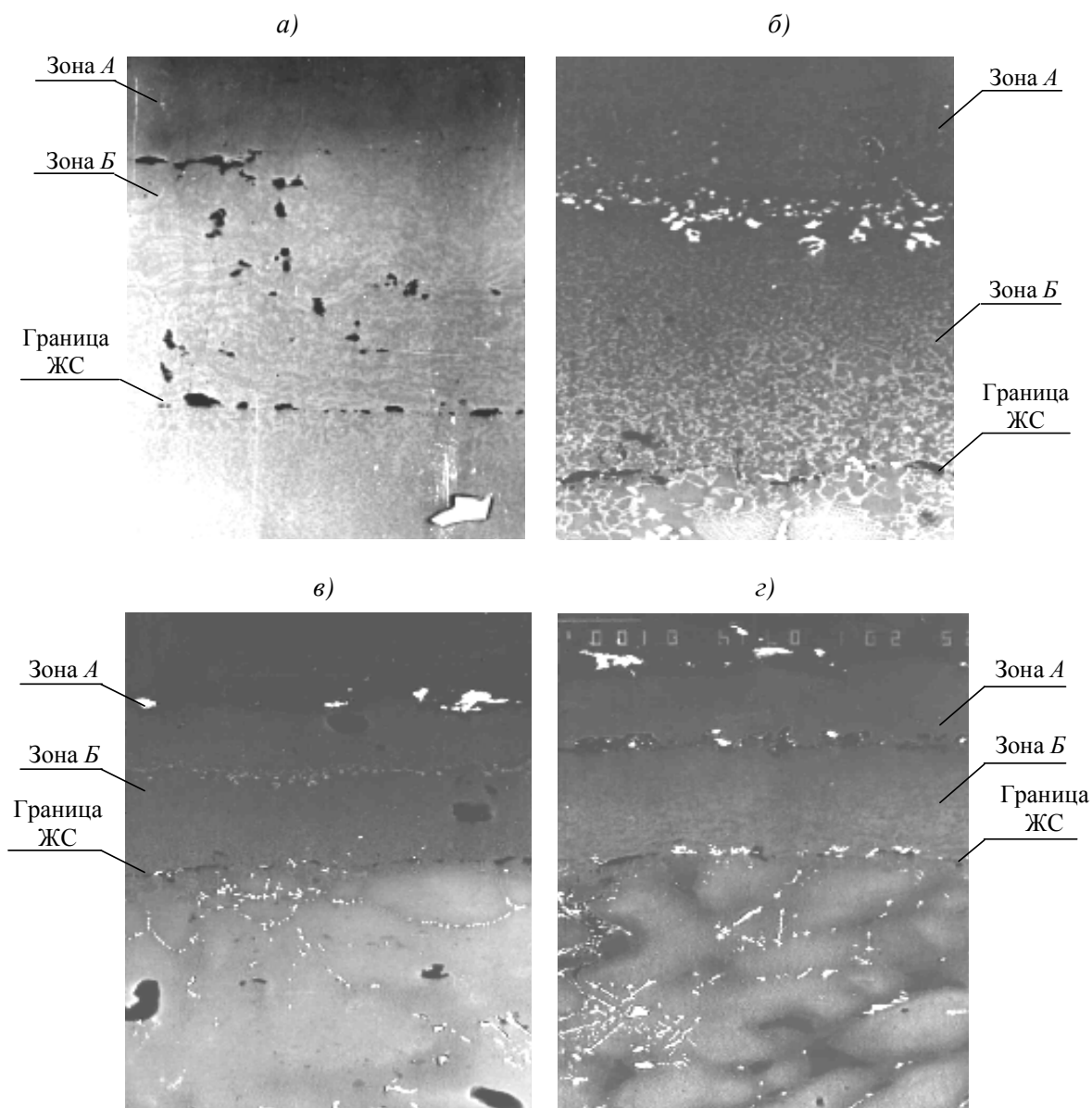


Рис. 2. Микроструктура (*а, б* –  $\times 600$ ; *в, г* –  $\times 200$ ) поверхности сплава ЖС6У с ИПУ в исходном состоянии (*а*) и после испытаний на длительную прочность (*б, в, г*) при  $1000^{\circ}\text{C}$  на базе 100 ч ( $\sigma_{100}^{1000^{\circ}} = 170$  МПа):

*а, б, в* – ИПУ-3; *г* – ИПУ-2

В обоих случаях внешний слой композиций (зона А) с высоким содержанием хрома и алюминия обеспечил защиту ЖС от окисления в процессе испытаний. На поверхности образца с ИПУ-3 упрочняющее покрытие сохранило двухзонное строение. Все легирующие элементы по толщине покрытия распределены достаточно равномерно, в том числе рений. Внутренний слой образца с ИПУ-3 (зона Б) близок по составу сплаву основы, но содержит меньше кобальта (3,4%) и вольфрама (3,3%) при дополнительном легировании рением (1,3%). Структура внутреннего слоя представляет собой смесь мелкодисперсных  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз размером 2–3 мкм, т. е. аналогична структуре сплава основы ЖС6У, хотя и менее совершенна. Состав самого сплава ЖС6У практически не изменился по сравнению с исходным составом, за исключением легирования его поверхности рением на глубину менее 10 мкм. Упрочняющее покрытие ИПУ-2 претерпе-



ло в процессе испытаний более существенные изменения. В центральной части слоя, на границе исходных слоев из сплавов 2 (см. табл. 1) и СДП-2 сформировалась пористость. Основной фазовой составляющей слоя из сплава 2 является  $\gamma$ -фаза, растворимость хрома в которой ограничена. Поэтому, при взаимодействии исходных слоев в области температуры испытаний, хром, содержащийся в сплаве СДП-2 в значительном количестве (около 20%), не может скомпенсировать встречной диффузией проникновение в слой тугоплавких элементов из основы, что приводит к образованию пористости. В остальном, по составу и структуре, упрочняющее покрытие ИПУ-2 аналогично покрытию ИПУ-3.

Из полученных результатов следует, что эффект упрочнения сплава ЖС6У может быть связан с формированием на поверхности образцов слоя жаропрочного сплава, близкого по элементному и фазовому составу сплаву ЖС6У, но дополнительно легированного рением, и зоны диффузионного взаимодействия этого слоя с основой, также содержащей рений. Общая толщина упрочняющего слоя составляет более 100 мкм.

Была проведена оценка влияния ИПУ на усталостную прочность образцов из сплавов ЖС6У и ЖС26У. Результаты испытаний представлены в табл. 9. Малое количество испытанных образцов не позволяет однозначно судить о влиянии ИПУ на выносливость сплавов. Однако в ряде случаев образцы из сплава ЖС6У с ИПУ при напряжении 380 МПа прошли более  $2 \times 10^7$  цикл при 900°C, в то время как паспортная характеристика составляет 300 МПа. Проведение ИПУ для сплава ЖС26У, как минимум, не ухудшило его усталостной прочности.

Таблица 9

Результаты испытаний на усталость при 900°C

Тип покрытия	Условный предел выносливости $\sigma_{-1}$ , МПа, сплава	
	ЖС6У	ЖС26У
Без покрытия	300	220–260 (по паспорту: 260–290; для ВНК: 290–310)
СДП-2	300	–
ИПУ-3	260	260–300
ИПУ-2	260	300–340

Следует отметить, что применение методики испытаний на выносливость, предназначенной для оценки свойств жаропрочных сплавов на образцах с диаметром рабочей части 7 мм, не позволяет выявить влияние на выносливость сплава ИПУ, которое изменяет свойства поверхности на глубину 80–100 мкм. Дальнейшие исследования, проведенные на рабочих лопатках турбины с толщиной стенки около 1000 мкм, соизмеримой с толщиной упрочненного слоя, подтвердили это. В рамках работы была подвезгнута обработке опытная партия лопаток турбины высокого давления ГТД АЛ-31Ф для проведения испытаний на виброусталость по методике ФГУП «ММПП "Салют"». Результаты этих испытаний показывают, что проведение ИПУ поверхности пера позволяет увеличить усталостную прочность рабочих лопаток на базе испытаний  $2 \times 10^7$  цикл со 180 до 210–230 МПа.

### Выводы

1. Упрочнение поверхности ЖС с равноосной структурой может быть достигнуто изменением состава поверхностного слоя при термовакуумной обработке композиции сплав–многокомпонентное упрочняющее покрытие. Использование для ИПУ покрытия, содержащего тантал и рений, и термообработки по режиму отпуска или закалки сплава основы приводит к формированию на поверхности детали упрочняющего слоя толщиной около 100 мкм, легированного элементами, входящими в состав покрытия и ЖС. Слой обладает большей прочностью и термической стабильностью благодаря легированию упрочняющей  $\gamma$ -фазы танталом, а матрицы сплава – рением [10].

2. Для упрочнения поверхности рабочих лопаток турбин с равноосной структурой могут быть использованы покрытия из сплавов, близких по элементному составу ЖС для монокристаллического литья. Легирование поверхности ЖС с равноосной структурой элементами покрытия, повышающими его прочность, происходит как в процессе вакуумных термообработок, так и при дальнейшей эксплуатации детали. Изменение состава поверхности сплава ЖС6У с использованием для ИПУ покрытий из сплавов ЖС36 или ВКНА-25 позволило увеличить его длительную прочность при температуре 1000°С на базах испытаний 500–1000 ч на 10–15% по сравнению с паспортными характеристиками сплава.

3. Процесс ИПУ поверхности ЖС может быть совмещен с ремонтом лопаток турбин, бывших в эксплуатации, которые требуют восстановления геометрических размеров профильной части пера.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б., Толораия В.Н., Гаврилин О.С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1997, 336 с.
2. Петрушин Н.В., Светлов И.Л. Физико-химические и структурные характеристики жаропрочных никелевых сплавов //Металлы, 2001, №2, с. 63–73.
3. Поварова К.Б., Казанская Н.К., Дроздов А.А., Сачков О.А. Тугоплавкий интерметаллид RuAl как основа нетрадиционных жаропрочных сплавов //Металлы, 2001, №3, с. 35–47.
4. Калинин Б.А. Радиационно-пучковые технологии обработки конструкционных материалов //Физика и химия обработки материалов, 2001, №4, с. 5–16.
5. Мубояджян С.А., Каблов Е.Н., Будиновский С.А. Вакуумно-плазменная технология получения защитных покрытий из сложнолегированных сплавов //Металловедение и термическая обработка металлов, 1995, №2, с. 15–18.
6. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей //Конверсия в машиностроении, 1999, №2, с. 42–47.
7. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Вакуумно-плазменная технология высоких энергий – прогрессивный метод получения износостойких покрытий на деталях ГТД //В сб.: Новые технологические процессы и надежность ГТД. – М.: ОНТИ ЦИАМ, 1981, №7(31), с. 1–11.
8. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Промышленная установка МАП-1 для нанесения защитных покрытий различного назначения //Авиационная промышленность, 1995, №7–8, с. 44–48.
9. Будиновский С.А., Мубояджян С.А. Эффективность двухстадийной ионно-плазменной технологии получения легированных диффузионных алюминидных покрытий на жаропрочных никелевых сплавах //Металловедение и термическая обработка металлов, 2003, №5, с. 27–32.
10. Будиновский С.А., Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Способ упрочнения изделия из литейного сплава на никелевой основе: Пат. 2230822 (РФ) //Бюл., № 17, 20.06.2004.