

---

Научная статья

УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-139-153

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА УСТАНОВКЕ УМП-500

Д.С. Кашин<sup>1</sup>, П.А. Стехов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Рассмотрено влияние технологических параметров нанесения, таких как температура проведения процесса, продолжительность нанесения алюминидного покрытия и температура вакуумного отжига сформированного покрытия. При высоких температурах формируется равномерный слой алюминидного покрытия на всей поверхности образца, что даст возможность наносить покрытия на высокотехнологичные детали с развитой внешней и внутренними поверхностями, изготовленные с помощью аддитивного производства. Это позволит повысить эффективность и надежность современных газотурбинных двигателей.

**Ключевые слова:** никелевые сплавы, алитированный слой, газоциркуляционный метод, жаростойкость, диффузионные покрытия, алитирование

**Для цитирования:** Кашин Д.С., Стехов П.А. Исследование влияния технологических параметров нанесения покрытий на установке УМП-500 // Труды ВИАМ. 2026. № 2 (156). С. 139–153. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-139-153.

Scientific article

## STUDY OF THE IMPACT OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON COATING DEPOSITION USING THE UMP-500 UNIT

D.S. Kashin<sup>1</sup>, P.A. Stekhov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** This article investigates the influence of process parameters, such as process temperature, aluminide coating application time, and the vacuum annealing temperature of the formed coating. At high temperatures uniform aluminide coating layer forms across the entire specimen surface. This finding opens up opportunities for applying these coatings to high-tech components with complex external and internal geometries manufactured via additive manufacturing. Such an approach will ultimately enhance the efficiency and reliability of modern gas turbine engines.

**Keywords:** nickel alloys, aluminium layer, chemical vapor deposition, heat resistant, diffusion coating, aluminizing

**For citation:** Kashin D.S., Stekhov P.A. Study of the impact of technological parameters on coating deposition using the UMP-500 unit. *Trudy VIAM*, 2026, no. 2 (156), pp. 139–153. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-139-153.

### Введение

В настоящее время для увеличения ресурса основных деталей газотурбинных двигателей (ГТД) активно применяются различные защитные покрытия. Один из

наиболее эффективных методов – нанесение газоциркуляционных покрытий на лопатки турбин, которые обеспечивают превосходную защиту от высокотемпературного окисления. Наиболее перспективное направление – разработка и применение лопаток с интегрированной сложной системой внутренних каналов для обеспечения эффективного охлаждения при эксплуатации.

Жаростойкие покрытия выполняют важную функцию, защищая компоненты ГТД от высокотемпературной коррозии. Основная задача таких покрытий – создание барьера, предотвращающего взаимодействие материала изделия (обычно никелевых сплавов) с агрессивной средой. Алюминидные покрытия, формирующие на поверхности плотный слой оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), обеспечивают базовую защиту при температурах до 1000–1100 °С. Платиноалюминидные покрытия (благодаря добавлению платины) повышают устойчивость к термическим циклам и коррозии в серосодержащих средах, что особенно важно для авиационных двигателей, работающих в условиях загрязненной атмосферы.

Современные конструкции лопаток турбин включают сложные внутренние каналы охлаждения, которые снижают термическую нагрузку на материал за счет циркуляции холодного воздуха. Эти каналы имеют сложную геометрическую форму, что затрудняет нанесение покрытий традиционными методами, такими как плазменное напыление [1–7]. Нанесение покрытий газоциркуляционным методом решает эту проблему, обеспечивая равномерное осаждение покрытий даже в труднодоступных внутренних полостях, что делает его предпочтительным для защиты внутренних полостей деталей ГТД. Известно, что качество нанесенного покрытия критически влияет на его свойства, такие как прочность, сопротивление усталости и жаростойкость. Поэтому для обеспечения необходимых защитных свойств ключевой задачей является формирование равномерной структуры покрытия на всех поверхностях лопатки в процессе его нанесения [8–17]. Использование этого метода при нанесении покрытий позволит создавать лопатки с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Помимо защиты от окисления, жаростойкие покрытия также способствуют повышению термической эффективности двигателей, позволяя работать при более высоких температурах без риска деградации материала. Это особенно важно в контексте современных тенденций к увеличению мощности и снижению выбросов  $CO_2$ , что требует от ГТД более высоких рабочих температур и улучшенных характеристик.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионно- и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» ведутся работы по созданию новых составов и технологий нанесения покрытий газоциркуляционным методом [18].

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Материалы и методы

Нанесение газоциркуляционных покрытий осуществляли на установке типа УМП-500, которая представляет собой печь с герметично закрытым муфелем, в объеме которого находятся два испарителя хлоридов, вентилятор и дефлектор. Исследование проводили на цилиндрических образцах размером  $\varnothing 25 \times 3$  мм из жаропрочных сплавов на основе никеля.

Перед загрузкой в установку образцы подвергали пескоструйной обработке. В процессе алитирования в качестве галогенсодержащего компонента использовали хлорид алюминия. При высоких температурах эти газообразные соединения активно циркулируют внутри установки, обеспечивая равномерный контакт со всеми поверхностями

обрабатываемых изделий. Циркуляция газового потока осуществляется принудительно с помощью вентилятора. При контакте с поверхностью изделия галогениды алюминия диссоциируют и атомы алюминия осаждаются на поверхность детали. Далее галоген (в данном случае хлор) освобождается и возвращается в объем муфеля, в котором установлен источник алюминия, и процесс переноса повторяется.

В качестве изменяемых технологических параметров выбраны температура и продолжительность процесса, а также температура вакуумного отжига после нанесения алюминидного слоя. Параметры максимального давления в муфеле, масса загруженного хлорида, температура испарителей, скорость вентилятора и продолжительность вакуумного отжига оставались неизменными.

Всего рассмотрено восемь различных вариантов технологических параметров на двух жаропрочных сплавах ВЖМ5 и ЖС6У. В качестве базового технологического режима (образцы *Б1* и *Б2* в таблице) осаждения покрытия использован режим, позволяющий поднять температуру процесса на 100 °С без превышения максимальной рабочей температуры установки УМП-500.

Варианты технологических параметров процесса

Условный номер образца	Сплав	Температура процесса, °С	Продолжительность процесса, ч	Температура отжига, °С	Средний удельный привес, г/м <sup>2</sup>
1	ВЖМ5	$T_{\text{баз}} - 100$ °С	$\tau_{\text{баз}} + 2$ ч	$T_{\text{баз.отж}} - 50$ °С	5,83
2	ВЖМ5	$T_{\text{баз}} - 100$ °С	$\tau_{\text{баз}} + 2$ ч	$T_{\text{баз.отж}} + 50$ °С	6,16
3	ЖС6У	$T_{\text{баз}} - 100$ °С	$\tau_{\text{баз}} + 2$ ч	$T_{\text{баз.отж}} - 50$ °С	6,33
4	ЖС6У	$T_{\text{баз}} - 100$ °С	$\tau_{\text{баз}} + 2$ ч	$T_{\text{баз.отж}} + 50$ °С	5,75
5	ВЖМ5	$T_{\text{баз}} - 100$ °С	$\tau_{\text{баз}} - 2$ ч	$T_{\text{баз.отж}} - 50$ °С	3,20
6	ВЖМ5	$T_{\text{баз}} - 100$ °С	$\tau_{\text{баз}} - 2$ ч	$T_{\text{баз.отж}} + 50$ °С	2,96
7	ЖС6У	$T_{\text{баз}} - 100$ °С	$\tau_{\text{баз}} - 2$ ч	$T_{\text{баз.отж}} - 50$ °С	2,71
8	ЖС6У	$T_{\text{баз}} - 100$ °С	$\tau_{\text{баз}} - 2$ ч	$T_{\text{баз.отж}} + 50$ °С	2,79
9	ВЖМ5	$T_{\text{баз}} + 100$ °С	$\tau_{\text{баз}} + 2$ ч	$T_{\text{баз.отж}} - 50$ °С	21,77
10	ВЖМ5	$T_{\text{баз}} + 100$ °С	$\tau_{\text{баз}} + 2$ ч	$T_{\text{баз.отж}} + 50$ °С	21,36
11	ЖС6У	$T_{\text{баз}} + 100$ °С	$\tau_{\text{баз}} + 2$ ч	$T_{\text{баз.отж}} - 50$ °С	21,77
12	ЖС6У	$T_{\text{баз}} + 100$ °С	$\tau_{\text{баз}} + 2$ ч	$T_{\text{баз.отж}} + 50$ °С	22,67
13	ВЖМ5	$T_{\text{баз}} + 100$ °С	$\tau_{\text{баз}} - 2$ ч	$T_{\text{баз.отж}} - 50$ °С	15,28
14	ВЖМ5	$T_{\text{баз}} + 100$ °С	$\tau_{\text{баз}} - 2$ ч	$T_{\text{баз.отж}} + 50$ °С	15,61
15	ЖС6У	$T_{\text{баз}} + 100$ °С	$\tau_{\text{баз}} - 2$ ч	$T_{\text{баз.отж}} - 50$ °С	16,10
16	ЖС6У	$T_{\text{баз}} + 100$ °С	$\tau_{\text{баз}} - 2$ ч	$T_{\text{баз.отж}} + 50$ °С	15,85
<b>Б1</b>	<b>ВЖМ5</b>	$T_{\text{баз}}$	$\tau_{\text{баз}}$	$T_{\text{баз.отж}}$	<b>11,91</b>
<b>Б2</b>	<b>ЖС6У</b>	$T_{\text{баз}}$	$\tau_{\text{баз}}$	$T_{\text{баз.отж}}$	<b>12,90</b>

Примечание.  $T_{\text{баз}}$ ,  $\tau_{\text{баз}}$  – базовые температура и продолжительность технологического режима.

### Результаты

В качестве базового критерия оценки алюминидного слоя выбран средний удельный привес по образцам. Дополнительно проведены исследования для определения толщины алитированного слоя (рис. 1–9) и количества алюминия во внешнем слое, поскольку алюминидные покрытия состоят преимущественно из фазы  $\beta$ -NiAl, которая при окислении образует плотный слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , предотвращающий дальнейшее окисление материала подложки.

После проведения базового процесса на образцах из сплавов ВЖМ5 и ЖС6У наблюдается (рис. 1) сплошной слой с повышенным содержанием алюминия (>30 % (по массе)). Толщина алюминидного покрытия с диффузионной зоной составляет ~(10–12) мкм.

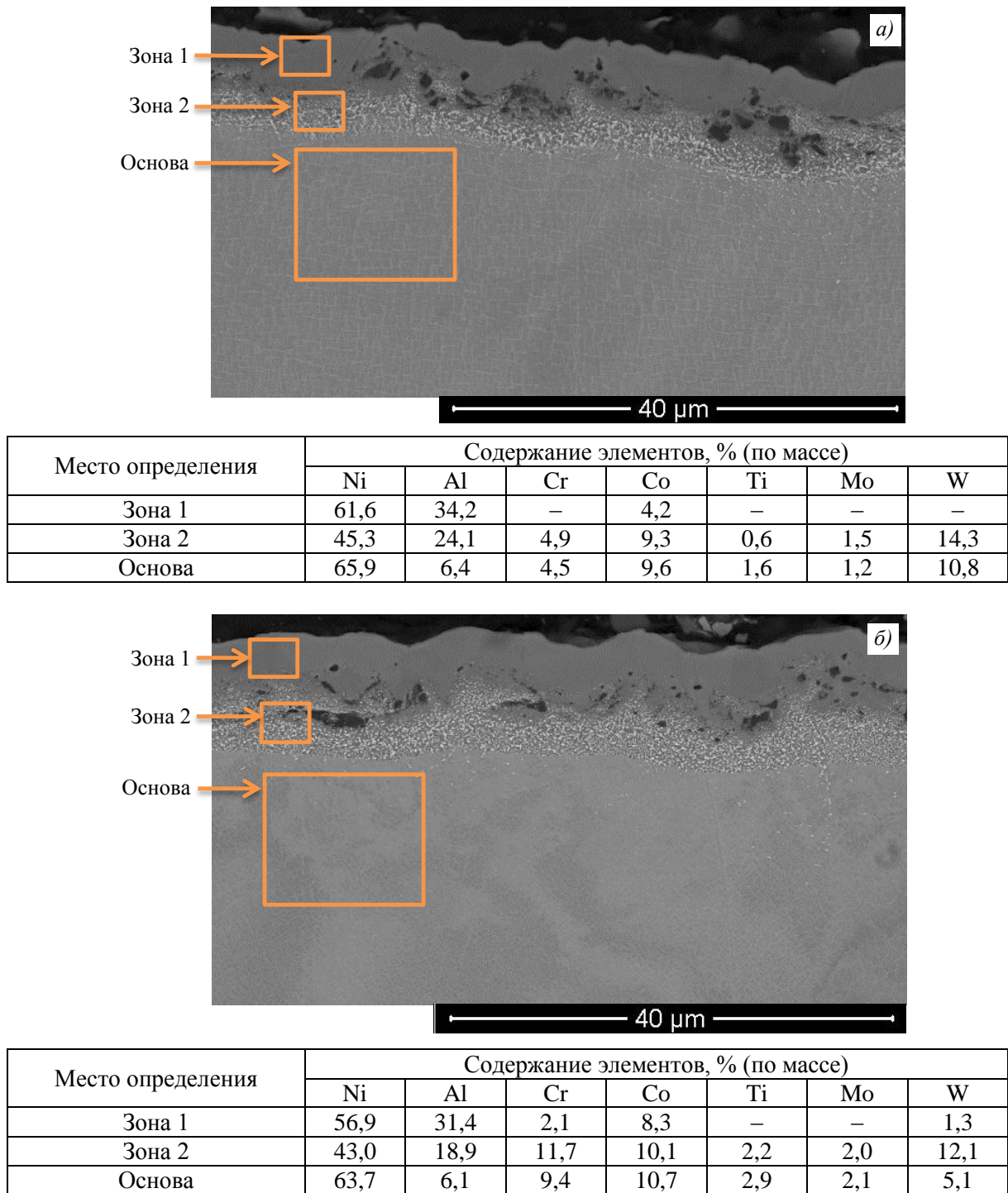
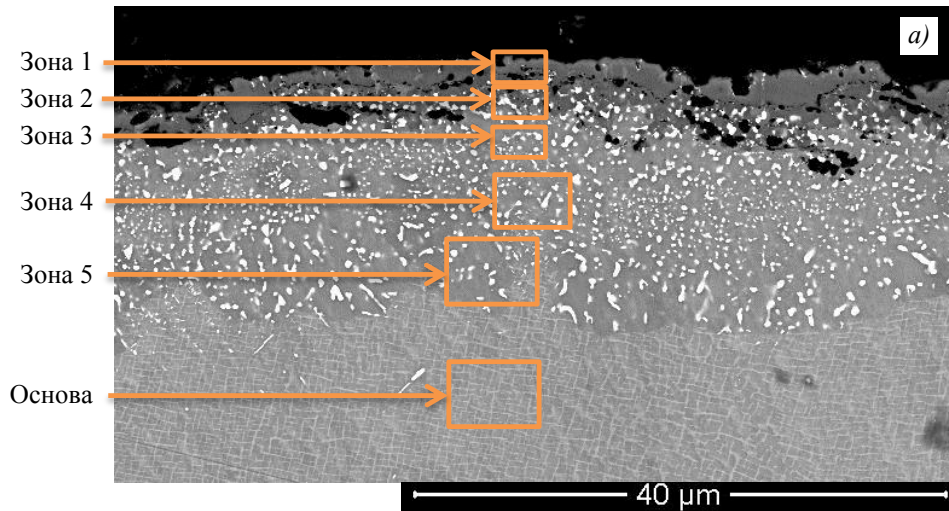


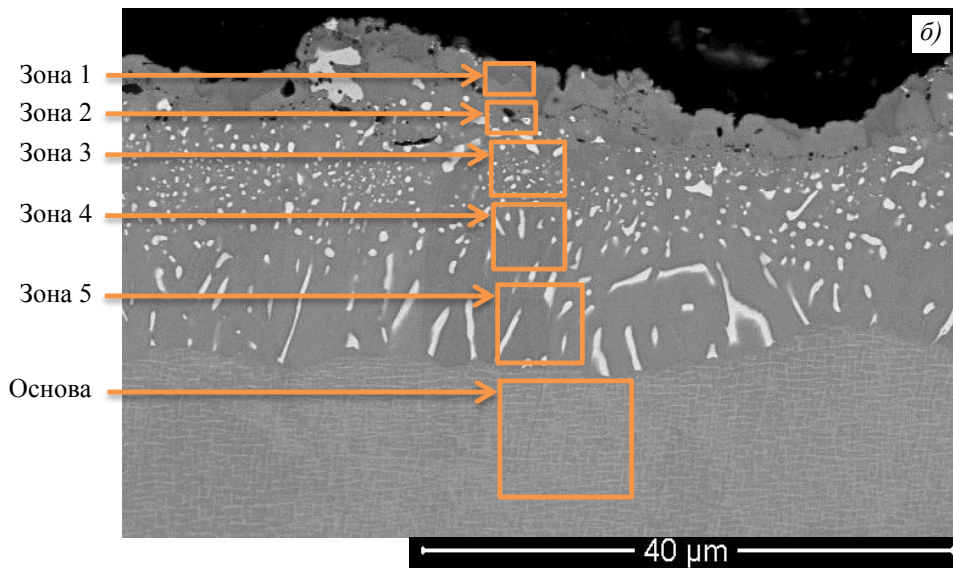
Рис. 1. Микроструктуры ( $\times 3200$ ) образцов *Б1* и *Б2* из сплавов ВЖМ5 (*а*) и ЖС6У (*б*) соответственно

На образцах из сплава ВЖМ5 при уменьшении температуры процесса на 100 °С и увеличении продолжительности процесса на 2 ч можно наблюдать (рис. 2, *а*) «рваный» внешний слой с содержанием алюминия ~22 % (по массе).

При увеличении температуры отжига на 100 °С верхний слой становится сплошным (рис. 2, *б*) и количество алюминия уменьшается до ~20 % (по массе). В обоих случаях (рис. 2) под покрытием образуется диффузионная зона с плавным уменьшением количества алюминия до ~7 % (по массе).



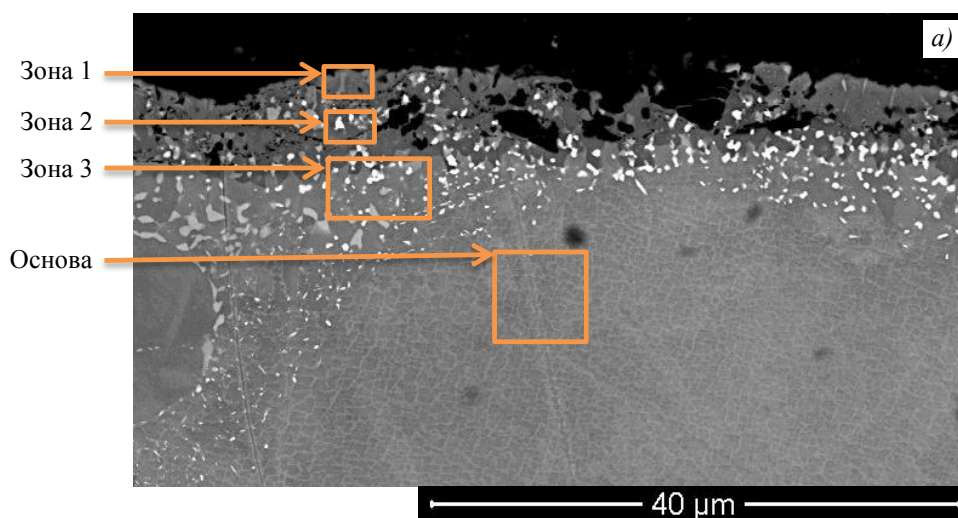
Место определения	Содержание элементов, % (по массе)						
	Ni	Al	Cr	Co	Ti	Mo	W
Зона 1	67,1	21,5	3,3	8,1	–	–	–
Зона 2	56,5	14,4	5,2	9,7	0,8	1,4	12,0
Зона 3	61,7	9,3	3,6	8,8	0,9	1,6	14,1
Зона 4	61,0	8,3	4,6	9,9	1,1	1,5	13,6
Зона 5	62,6	8,2	4,7	9,6	1,2	1,3	12,4
Основа	64,3	6,5	4,6	10,2	1,2	1,3	11,9



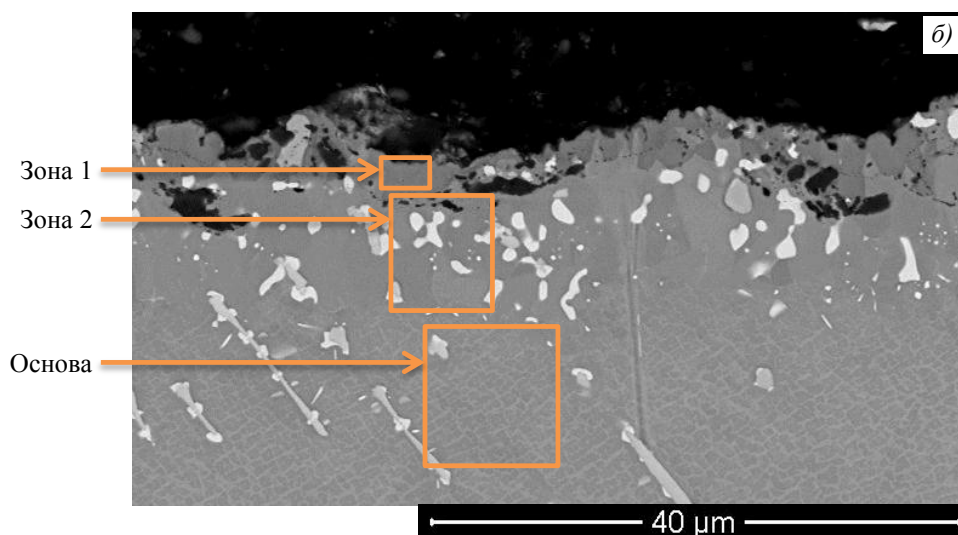
Место определения	Содержание элементов, % (по массе)						
	Ni	Al	Cr	Co	Ti	Mo	W
Зона 1	67,8	20,4	3,6	8,2	–	–	–
Зона 2	63,5	10,0	4,2	9,6	–	1,2	11,5
Зона 3	59,5	8,4	4,6	10,5	0,9	1,5	14,6
Зона 4	61,7	8,5	4,4	9,5	1,0	1,5	13,4
Зона 5	61,4	8,1	4,7	9,3	0,9	1,5	14,1
Основа	63,4	6,8	5,0	9,4	1,2	1,7	12,5

Рис. 2. Микроструктуры ( $\times 3200$ ) образцов 1 (а) и 2 (б) из сплава ВЖМ5

На образцах из сплава ЖС6У при проведении процесса алитирования при пониженной температуре формируется несплошной внешний слой толщиной  $\sim(2-5)$  мкм (рис. 3, а). При увеличении температуры вакуумного отжига можно наблюдать более активную диффузию внешнего слоя в основу (рис. 3, б).



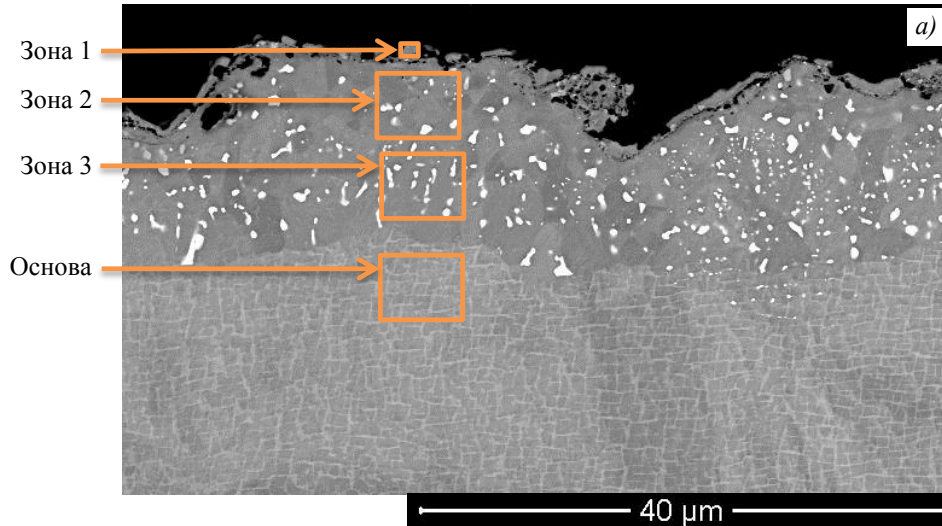
Место определения	Содержание элементов, % (по массе)						
	Ni	Al	Cr	Co	Ti	Mo	W
Зона 1	60,5	24,6	5,5	8,1	1,3	–	–
Зона 2	54,5	17,5	11,1	9,1	1,0	1,1	5,7
Зона 3	59,1	7,4	10,7	10,9	3,4	2,6	5,9
Основа	63,4	6,1	9,0	10,7	2,3	1,7	6,8



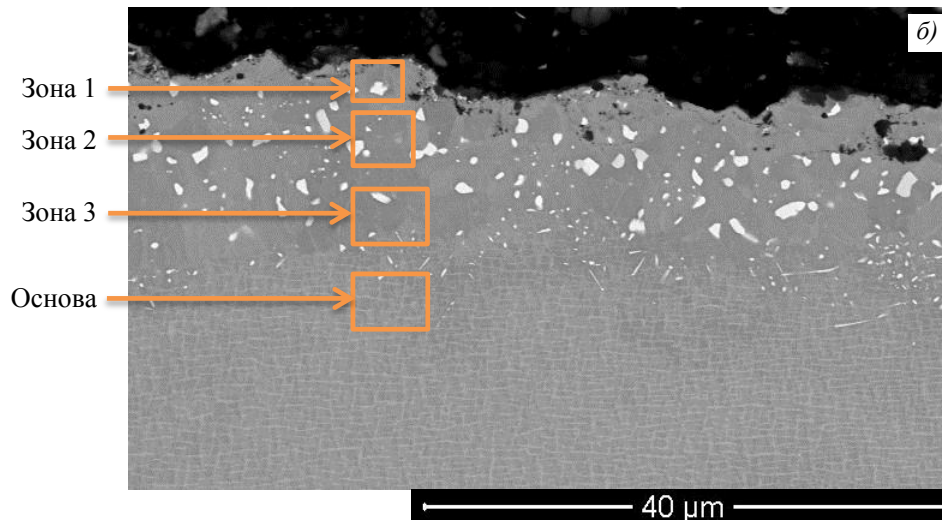
Место определения	Содержание элементов, % (по массе)						
	Ni	Al	Cr	Co	Ti	Mo	W
Зона 1	55,6	19,5	4,5	7,3	2,3	2,2	8,6
Зона 2	61,7	8,8	6,0	10,7	2,0	1,6	9,2
Основа	62,4	7,0	8,3	11,2	1,5	1,3	8,3

Рис. 3. Микроструктуры ( $\times 3200$ ) образцов 3 (а) и 4 (б) из сплава ЖС6У

При уменьшении времени газодиффузионного алитирования на образце из сплава ВЖМ5 с пониженной температурой вакуумного отжига наблюдаются (рис. 4, а) остатки внешнего слоя с содержанием алюминия до ~20 % (по массе). При увеличении температуры отжига практически весь внешний слой диффундировал в материал основы (рис. 4, б).



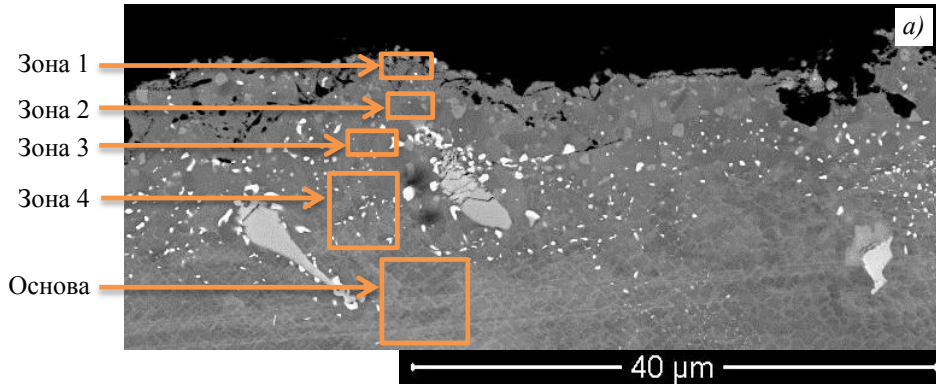
Место определения	Содержание элементов, % (по массе)						
	Ni	Al	Cr	Co	Ti	Mo	W
Зона 1	60,2	19,2	3,5	8,1	1,2	–	7,8
Зона 2	64,8	8,5	6,4	8,4	–	1,3	10,7
Зона 3	63,4	7,7	4,4	10,0	1,0	1,4	12,1
Основа	68,1	7,0	3,9	9,3	–	–	11,7



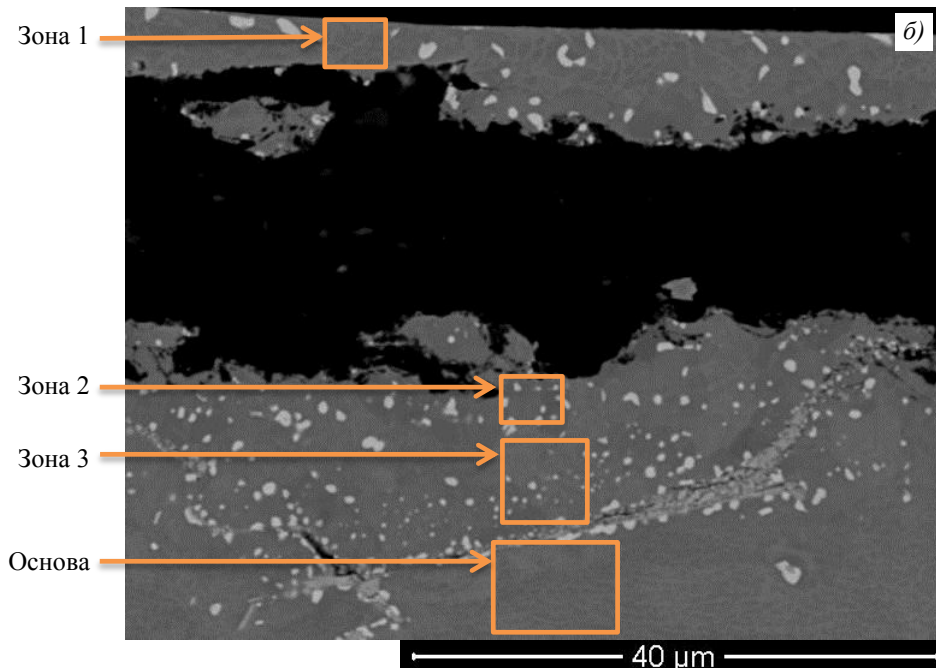
Место определения	Содержание элементов, % (по массе)						
	Ni	Al	Cr	Co	Ti	Mo	W
Зона 1	62,6	8,0	3,2	8,5	0,7	1,7	15,3
Зона 2	64,5	8,0	3,2	8,5	–	1,3	14,5
Зона 3	65,2	8,0	3,5	8,4	–	1,3	13,6
Основа	64,2	6,4	4,8	10,0	0,9	1,4	12,3

Рис. 4. Микроструктуры ( $\times 3200$ ) образцов 5 (а) и 6 (б) из сплава ВЖМ5

Меньшая продолжительность газациркуляционного алитирования на образцах из сплава ЖС6У, прошедших вакуумный отжиг с пониженной температурой, приводит к неполному образованию внешнего слоя (рис. 5, а), где содержание алюминия достигает 12 % (по массе). На образце из сплава ЖС6У при повышении температуры отжига полностью отсутствуют следы внешнего слоя (рис. 5, б). Предположительно при проведении процесса пробоподготовки произошло растрескивание диффузионной зоны.



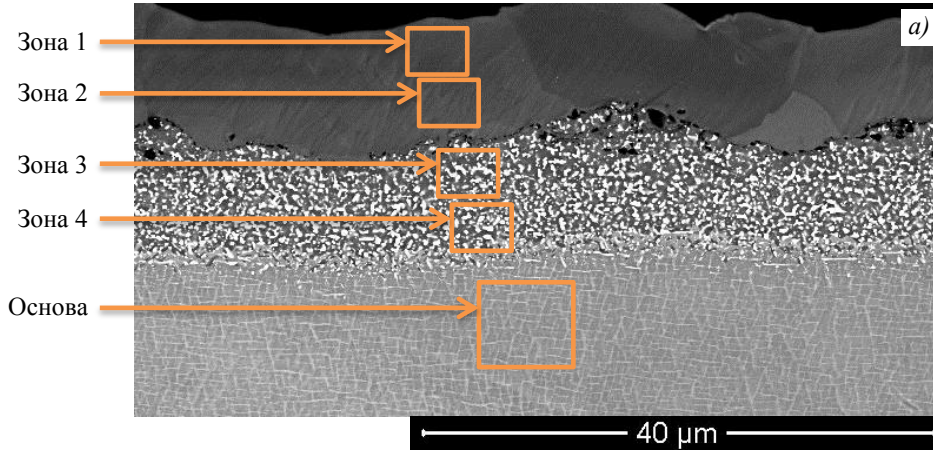
Место определения	Содержание элементов, % (по массе)						
	Ni	Al	Cr	Co	Ti	Mo	W
Зона 1	64,5	12,3	4,2	9,8	4,0	–	5,2
Зона 2	59,2	8,2	10,9	9,7	1,5	1,3	9,2
Зона 3	61,2	7,5	7,9	11,8	1,7	1,2	8,7
Зона 4	59,4	6,8	9,3	12,1	1,7	1,3	9,4
Основа	62,4	5,7	8,5	11,5	1,8	1,1	9,0



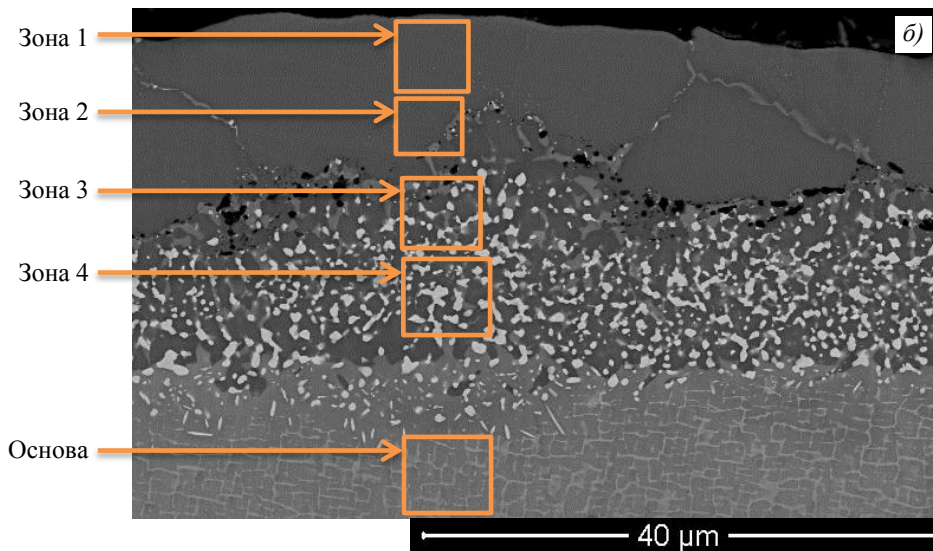
Элементы, % (по массе)	Содержание элементов, % (по массе)						
	Ni	Al	Cr	Co	Ti	Mo	W
Зона 1	65,2	6,8	9,9	5,9	1,9	1,6	8,7
Зона 2	56,8	10,2	5,3	9,4	4,5	4,0	9,8
Зона 3	66,2	7,2	9,9	6,4	2,2	1,9	6,2
Основа	62,7	6,1	9,8	11,3	2,6	1,9	5,6

Рис. 5. Микроструктуры ( $\times 3200$ ) образцов 7 (а) и 8 (б) из сплава ЖС6У

При проведении процесса алитирования при максимальной температуре с увеличенной продолжительностью наблюдается (рис. 6, а) сплошной внешний слой толщиной ~10 мкм с повышенным содержанием алюминия – от 28 до 35,5 % (по массе). При увеличении температуры отжига формируется внешний слой с содержанием алюминия 20–22 % (по массе) с большей толщиной (до ~15 мкм) и увеличивается диффузионная зона вглубь образца (рис. 6, б).



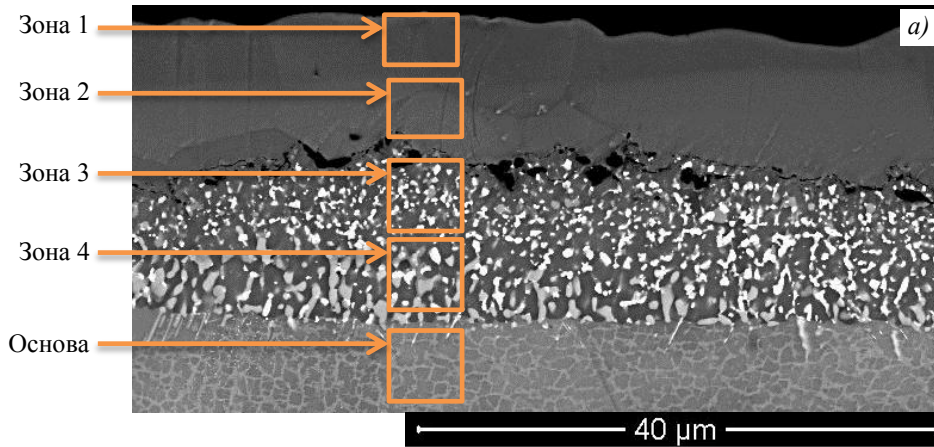
Место определения	Содержание элементов, % (по массе)						
	Ni	Al	Cr	Co	Ti	Mo	W
Зона 1	61,3	35,5	–	3,2	–	–	–
Зона 2	63,3	28,2	1,1	7,4	–	–	–
Зона 3	51,9	21,8	4,4	9,1	0,9	0,8	11,1
Зона 4	45,2	16,0	5,6	9,5	1,0	2,1	20,6
Основа	61,1	7,8	4,9	9,8	1,3	1,5	13,6



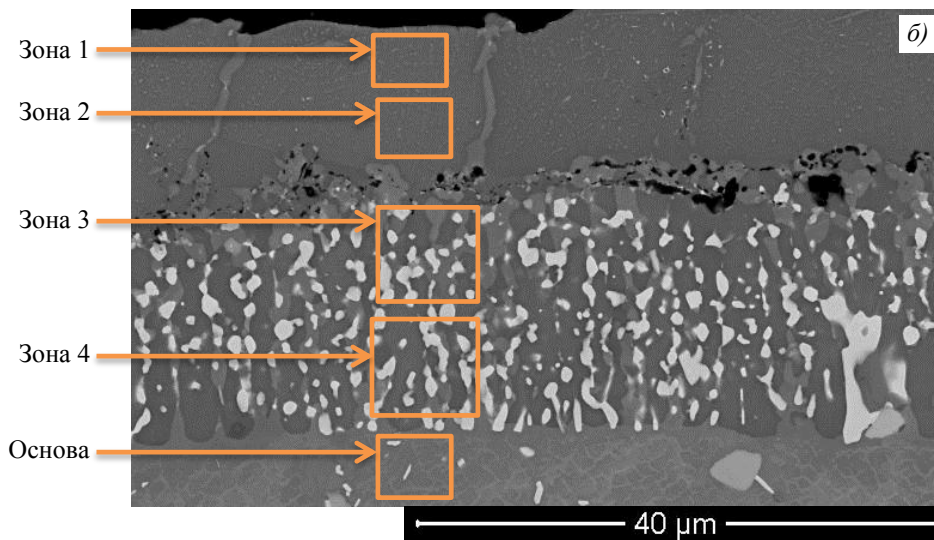
Место определения	Содержание элементов, % (по массе)						
	Ni	Al	Cr	Co	Ti	Mo	W
Зона 1	66,7	20,9	2,7	7,5	–	–	2,2
Зона 2	66,5	21,9	2,2	6,8	–	–	2,6
Зона 3	63,1	17,6	3,3	4,8	0,8	1,1	9,3
Зона 4	49,8	13,9	5,2	10,5	1,1	2,0	17,5
Основа	64,7	6,8	4,7	9,7	1,0	1,3	11,8

Рис. 6. Микроструктуры ( $\times 3200$ ) образцов 9 (а) и 10 (б) из сплава ВЖМ5

Осуществление процесса алитирования в условиях максимальной температуры в сочетании с увеличенной продолжительностью выдержки приводит к формированию непрерывного внешнего слоя толщиной ~10 мкм (рис. 7, а), характеризующегося повышенной концентрацией алюминия в диапазоне от 28 до 35,5 % (по массе). Увеличение температуры отжига приводит к утолщению внешнего слоя до ~15 мкм (рис. 7, б) с концентрацией алюминия 18–20 % (по массе), одновременно способствуя углублению диффузионной зоны в основу.



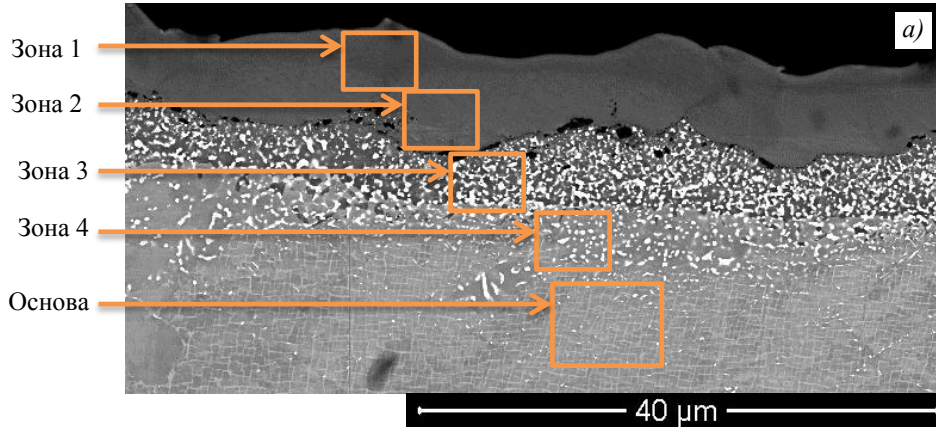
Место определения	Содержание элементов, % (по массе)						
	Ni	Al	Cr	Co	Ti	Mo	W
Зона 1	61,8	34,2	–	4,0	–	–	–
Зона 2	62,6	23,9	4,0	8,2	1,3	–	–
Зона 3	48,1	16,4	11,5	9,5	2,6	1,0	10,9
Зона 4	49,9	14,7	10,2	9,3	2,1	1,5	12,3
Основа	62,3	6,1	9,9	10,7	2,6	1,8	6,6



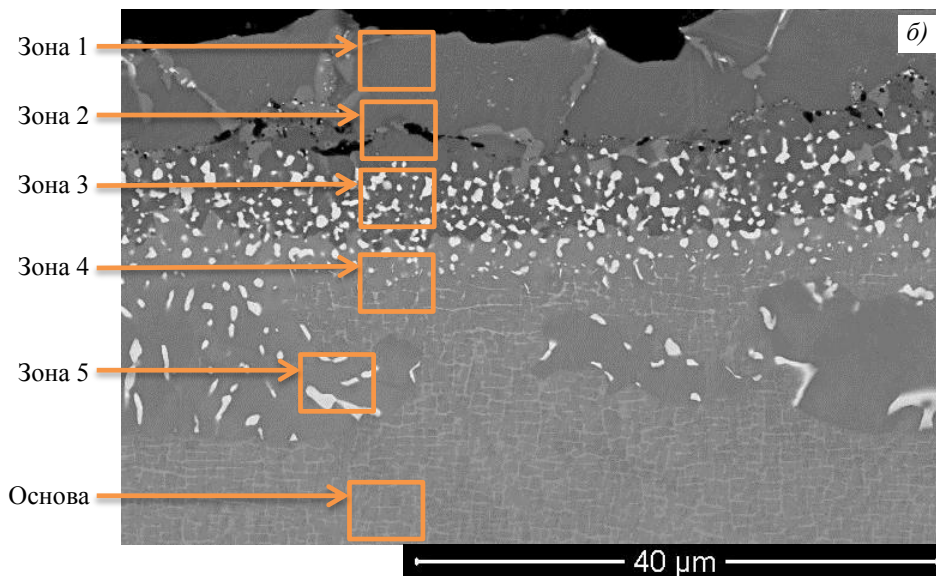
Место определения	Содержание элементов, % (по массе)						
	Ni	Al	Cr	Co	Ti	Mo	W
Зона 1	64,0	18,6	6,5	8,5	1,3	–	1,1
Зона 2	63,7	18,8	5,9	8,7	1,6	–	1,3
Зона 3	56,1	13,2	6,7	9,0	1,8	1,7	11,5
Зона 4	47,6	12,3	8,9	11,1	2,0	2,5	15,6
Основа	61,4	7,1	8,0	11,6	2,2	1,7	8,0

Рис. 7. Микроструктуры ( $\times 3200$ ) образцов 11 (а) и 12 (б) из сплава ЖС6У

При проведении процесса алитирования при максимальной температуре со сниженным временем процесса наблюдается (рис. 8, а) сплошной внешний слой толщиной до 7 мкм с повышенным содержанием алюминия – от 29 до 33,9 % (по массе). При увеличении температуры отжига формируется внешний слой с содержанием алюминия ~20 % (по массе) и увеличивается вглубь образца диффузионная зона (рис. 8, б).



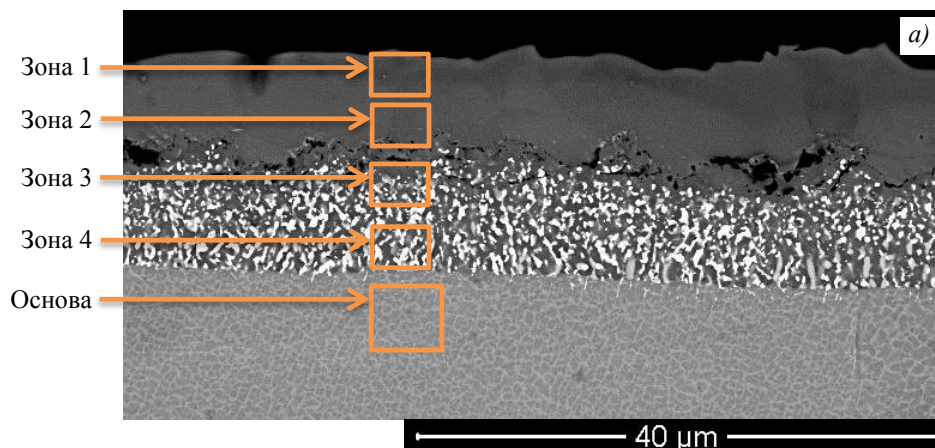
Место определения	Содержание элементов, % (по массе)						
	Ni	Al	Cr	Co	Ti	Mo	W
Зона 1	63,2	33,9	–	2,9	–	–	–
Зона 2	63,2	29,3	–	7,5	–	–	–
Зона 3	53,0	21,9	3,6	8,1	0,8	–	12,6
Зона 4	54,5	14,1	4,1	8,6	1,2	1,9	15,6
Основа	64,7	6,6	4,5	9,6	1,3	1,6	11,7



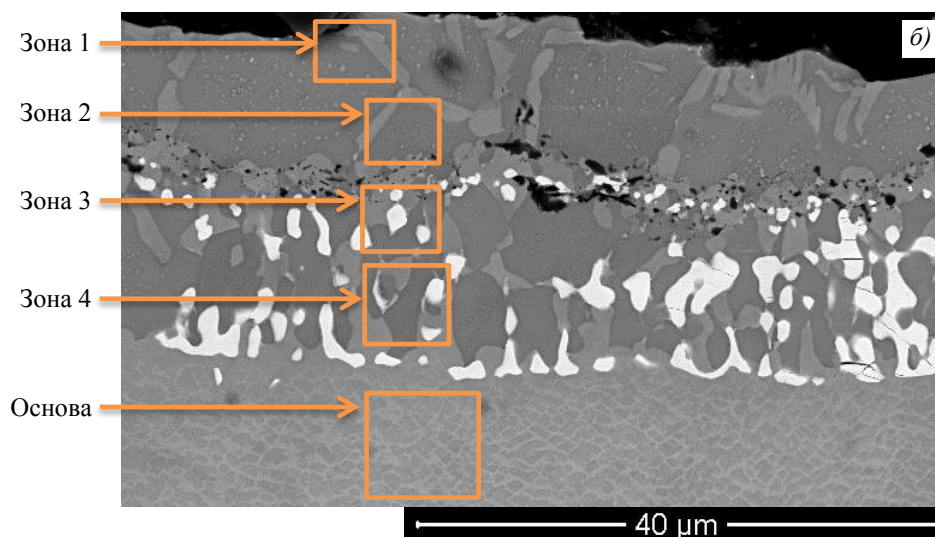
Место определения	Содержание элементов, % (по массе)						
	Ni	Al	Cr	Co	Ti	Mo	W
Зона 1	66,9	20,0	3,1	8,5	–	–	1,5
Зона 2	65,3	20,7	3,1	8,4	–	–	2,5
Зона 3	57,1	15,8	4,1	9,3	0,7	1,5	11,5
Зона 4	57,1	8,2	3,0	9,4	1,0	1,9	19,4
Зона 5	67,2	8,5	3,1	8,8	1,2	0,9	10,3
Основа	66,7	6,3	4,3	9,8	0,9	1,4	10,6

Рис. 8. Микроструктуры ( $\times 3200$ ) образцов 13 (а) и 14 (б) из сплава ВЖМ5

При проведении процесса алитирования при максимальной температуре со сниженным временем процесса наблюдается (рис. 9, а) сплошной внешний слой толщиной до 7 мкм с повышенным содержанием алюминия – от 29 до 33,8 % (по массе). При увеличении температуры отжига формируется внешний слой с содержанием алюминия ~19 % (по массе), одновременно способствуя углублению диффузионной зоны в основу (рис. 9, б).



Место определения	Содержание элементов, % (по массе)						
	Ni	Al	Cr	Co	Ti	Mo	W
Зона 1	63,2	33,8	–	3,0	–	–	–
Зона 2	62,0	28,4	2,2	7,4	–	–	–
Зона 3	50,4	13,0	10,6	9,7	1,7	1,3	13,3
Зона 4	48,7	12,9	9,7	10,5	1,9	1,9	14,4
Основа	61,8	5,7	9,1	10,6	1,7	1,4	9,7



Место определения	Содержание элементов, % (по массе)						
	Ni	Al	Cr	Co	Ti	Mo	W
Зона 1	62,5	19,1	7,4	8,4	1,7	–	0,9
Зона 2	63,6	17,7	6,3	8,9	1,8	–	1,7
Зона 3	57,2	18,8	7,0	8,8	1,8	0,9	5,5
Зона 4	48,9	12,9	9,6	10,0	1,7	2,1	14,8
Основа	63,1	6,0	8,6	10,8	1,6	1,4	8,5

Рис. 9. Микроструктуры ( $\times 3200$ ) образцов 15 (а) и 16 (б) из сплава ЖС6У

### Заключения

Процесс алитирования – важная технология для улучшения поверхностных свойств сплава, особенно в условиях высоких температур и агрессивных сред. Из анализа экспериментальных данных следует, что снижение температуры процесса алитирования на 100 °С от оптимального значения приводит к существенно худшим результатам. Основная проблема, возникающая при пониженной температуре, заключается в недостаточной скорости переноса алюминия на поверхность образцов. Диффузия атомов алюминия вглубь подложки – процесс, существенно зависящий от термической активации. При таких условиях на поверхности образцов можно наблюдать «рваную» структуру покрытия. Это указывает на неполное и неоднородное формирование защитного слоя. Вместо сплошного равномерного покрытия наблюдаются области, где формирование покрытия либо отсутствует, либо является крайне фрагментированным. Такая морфология делает покрытие неэффективным, поскольку оно не может обеспечить защиту от внешних воздействий.

При проведении процесса алитирования с повышенной температурой (в зависимости от продолжительности проведения процесса) наблюдается сплошной алюминидный слой толщиной от 7 до 15 мкм с содержанием алюминия во внешнем слое до 35 % (по массе). Следовательно, для увеличения толщины покрытия можно повышать температуру и продолжительность проведения процесса. Выбор температуры отжига влияет на диффузию алюминия из внешнего слоя покрытия в подложку. При повышении температуры можно наблюдать увеличение толщины внешнего слоя алюминидного покрытия с содержанием ~22 % (по массе) алюминия и увеличенной диффузионной зоной.

При температурах  $T_{\text{баз}}$  и более формируется равномерный слой алюминидного покрытия на всей поверхности образца, что дает возможность нанесения покрытия на детали с развитой внешней и внутренней поверхностями, в том числе изготовленных с помощью аддитивного производства. Это позволит повысить эффективность и надежность современных ГТД.

Газоциркуляционные процессы нанесения покрытий не имеют аналогов по возможности формирования защитных слоев на внутренних полостях и поверхностях деталей сложной геометрической формы, что делает их незаменимыми для целого ряда высокотехнологичных применений. Однако, несмотря на это преимущество, задача локальной защиты отдельных участков поверхности остается открытой. Решение проблемы прецизионного маскирования и направленного осаждения в газовой фазе требует дальнейших фундаментальных и прикладных исследований, которые позволят значительно расширить функциональные возможности и области применения данной технологии в современной промышленности.

### Список источников

1. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М., Неруш С.В., Крупнина О.А. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 1. Материалы и технологии синтеза // *Электротехнология*. 2022. № 1. С. 2–12. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-1-2-12.
2. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В., Базылева О.А., Мазалов И.С., Дынин Н.В. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 3. Адаптация и создание материалов // *Электротехнология*. 2022. № 4. С. 15–25. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-4-15-25.
3. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В., Базылева О.А., Мазалов И.С. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 4. Разработка жаропрочных материалов // *Электротехнология*. 2022. № 5. С. 8–19. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-5-8-19.
4. Щетинина Н.Д., Кузнецова П.Е., Дынин Н.В., Селиванов А.А. Сплавы на основе алюминия с добавками скандия и циркония в аддитивном производстве (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (64). С. 19–34. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.

5. Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Епишин А.И., Карашаев М.М., Елютин Е.С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов, легированных рением и рутением (обзор). Часть 2 // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). С. 3–22. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.
6. Неруш С.В., Свиридов А.В., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А., Тарасов С.А. Разработка технологии пайки деталей, полученных аддитивными технологиями, из металлопорошковой композиции на основе кобальта // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). С. 18–29. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-18-29.
7. Мараховский П.С., Баринов Д.Я., Шорстов С.Ю., Воробьев Н.Н. Вопрос создания физических и математических моделей тепло- и массопереноса при изготовлении деталей методом аддитивных технологий (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). С. 111–119. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-111-119.
8. Хасанова Л.А., Древняк В.В., Жуков А.А., Саадатибаи М. Анализ дефектов защитных покрытий в процессе их нанесения // *Научный вестник МГТУ ГА*. 2015. № 222. С. 207–212.
9. Симонов В.Н., Унчикова М.В., Пахомова С.А. Повышение качества хромоалитированных покрытий, полученных газоциркуляционным методом // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2016. № 2. С. 134–145. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-2-134-145.
10. Лесников В.П., Кузнецов В.П., Конакова И.П., Мороз Е.В. Конструирование комплексных защитных покрытий для монокристаллических охлаждаемых турбинных лопаток современных ГТД // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2012. № 3 (34). С. 211–216.
11. Бахрунов К.К. Механические свойства покрытий на никелевых жаропрочных сплавах, полученные циркуляционным хромоалитированием // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2011. № 7. С. 63–68.
12. Способ диффузионного хромоалитирования поверхности детали: пат. 2270880 Рос. Федерация; заявл. 29.09.04; опубл. 27.02.06.
13. Способ нанесения двухкомпонентных хром-алюминиевых покрытий на внутренние полости охлаждаемых рабочих лопаток газовых турбин и устройство для осуществления способа: пат. 2520237 Рос. Федерация; заявл. 28.02.12; опубл. 20.06.14.
14. Peng X. *Metallic Coatings for high-temperature oxidation resistance* // *Thermal Barrier Coatings: Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*. Woodhead Publishing, 2011. P. 53–74. DOI: 10.1533/9780857090829.1.53.
15. Способ защиты участков поверхности детали: пат. 2232205 Рос. Федерация; заявл. 06.09.02; опубл. 10.07.04.
16. Способ защиты поверхности лопатки: пат. 2252110 Рос. Федерация; заявл. 09.10.03; опубл. 20.05.05.
17. Diffusion Coating Mixtures: pat. US 4617202; appl. 09.10.81; publ. 14.10.86.
18. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

### References

1. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M., Nerush S.V., Krupnina O.A. New-generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts at FSUE VIAM. Part 1. Materials and synthesis technologies. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 1, pp. 2–12. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-1-2-12.
2. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V., Bazyleva O.A., Mazalov I.S., Dynin N.V. New-generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts at FSUE VIAM. Part 3. Adaptation and creation of materials. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 4, pp. 15–25. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-4-15-25.
3. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V., Bazyleva O.A., Mazalov I.S. New-generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts at VIAM. Part 4. Development of heat-resistant materials. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 5, pp. 8–19. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-5-8-19.

4. Shchetinina N.D., Kuznetsova P.E., Dynin N.V., Selivanov A.A. Aluminum alloys with additions of Sc and Zr in additive manufacturing (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), pp. 19–34. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 23, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.
5. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Karashaev M.M., Elyutin E.S. Single crystals of nickel-based superalloys alloyed with rhenium and ruthenium (review). Part 2. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 3–22. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 23, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.
6. Nerush S.V., Sviridov A.V., Afansiev-Khodykin A.N., Galushka I.A., Tarasov S.A. Development of brazing technology for parts obtained by additive technologies from cobalt based metal powder composition. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), pp. 18–29. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 23, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-18-29.
7. Marakhovskij P.S., Barinov D.Ya., Shorstov S.Yu., Vorobev N.N. On creation of physical and mathematical models of heat and mass transfer during manufacturing by additive technologies (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), pp. 111–119. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 23, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-111-119.
8. Khasanova L.A., Drevnyak V.V., Zhukov A.A., Saadatibai M. Analysis of defects in protective coatings during their application. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*, 2015, no. 222, pp. 207–212.
9. Simonov V.N., Unchikova M.V., Pakhomova S.A. Improving the Quality of Chrome-Aluminized Coatings Obtained by the Gas Circulation Method. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser.: Mashinostroyeniye*, 2016, no. 2, pp. 134–145. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-2-134-145.
10. Lesnikov V.P., Kuznetsov V.P., Konakova I.P., Moroz E.V. Design of Complex Protective Coatings for Single-Crystal Cooled Turbine Blades of Modern GTEs. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2012, no. 3 (34), pp. 211–216.
11. Bakhrunov K.K. Mechanical properties of coatings on nickel-based heat-resistant alloys obtained by circulation chromium aluminizing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*, 2011, no. 7, pp. 63–68.
12. *Method of diffusion chromium aluminizing of a part surface*: pat. 2270880 Rus. Federation; appl. 29.09.04; publ. 27.02.06.
13. *Method of applying two-component chromium-aluminum coatings to the internal cavities of cooled working blades of gas turbines and device for implementing the method*: pat. 2520237 Rus. Federation; appl. 28.02.12; publ. 20.06.14.
14. Peng X. Metallic Coatings for high-temperature oxidation resistance. *Thermal Barrier Coatings: Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*. Woodhead Publishing, 2011, pp. 53–74. DOI: 10.1533/9780857090829.1.53.
15. *Method of protecting surface areas of a part*: pat. 2232205 Rus. Federation; appl. 06.09.02; publ. 10.07.04.
16. *Method of protecting the blade surface*: pat. 2252110 Rus. Federation; appl. 09.10.03; publ. 20.05.05.
17. *Diffusion Coating Mixtures*: pat. US 4617202; appl. 09.10.81; publ. 14.10.86.
18. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

#### Информация об авторах

**Кашин Дмитрий Сергеевич**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Стехов Павел Александрович**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Dmitriy S. Kashin**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Pavel A. Stekhov**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 10.07.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 23.07.2025.

The article was submitted 10.07.2025; approved and accepted for publication after reviewing 23.07.2025.