

УДК 621.785.51

Механические свойства покрытий на никелевых жаропрочных сплавах, полученные циркуляционным хромоалитированием

К.К. Бахрунов

В статье приводятся модифицированные диффузионные покрытия, полученные циркуляционным методом. Показан сравнительный анализ покрытий, полученных циркуляционным и порошковым методами. Приведены результаты по термостойкости, длительной прочности и механические свойства покрытий.

Ключевые слова: диффузионное насыщение, циркуляционное хромоалитирование, термоусталость, алитирование.

In article are considered the reception of modified diffusion coverings by a circulating method on the basis of a choice of rational working gas environment. There was analyzed opportunity of reduction of the contents in a superficial layer of coverings of refractory of elements lowering heat resistance of coverings. The results on thickness and kinetics of reception of coverings are given.

Keywords: circulating diffusive saturation, coating.

Актуальной задачей современного машиностроения является повышение физико-механических свойств поверхностей никелевых жаропрочных сплавов за счет нанесения модифицированных диффузионных покрытий.

В настоящее время в производстве применяется двухстадийное диффузионное насыщение порошковым способом. При изучении структуры покрытий, получаемых двухстадийным порошковым хромоалитированием (ХА) и циркуляционным алитированием [1], на основе рентгеноспектральных исследований выявлены темные включения, т.е. наличие мелкодисперсных частиц оксида алюминия — Al_2O_3 . При насыщении в порошках анализ показал, что в структуре ХА покрытий источником образования Al_2O_3 является остаточная воздушная атмосфера в рабочей камере, включая влагу, кислород, порошковые смеси хрома и алюминия, это также обусловлено обдувкой покрытий электрокорундом между стадиями нанесения, например, после первой стадии никельхромирования в порошках. Азот может попадать в камеру при диссоциации NH_4Cl , а также из окружающего воздуха.

Указанные недостатки можно устранить за счет применения циркуляционного ХА. Созданный в МГТУ им. Н.Э. Баумана способ нанесения одно- и многокомпонентных покрытий позволяет получать равномерные покрытия на наружных и внутренних поверхностях лопаток ГТД,



БАХРУНОВ

Константин Константинович
кандидат технических наук, доцент кафедры «Металловедение и технологии обработки материалов»
(Восточно-Сибирский государственный технологический университет),
г. Улан-Удэ

снизить материальные и трудовые затраты и является экологически безопасным.

Качество покрытия существенно зависит от чистоты поверхности деталей, поэтому рекомендуется оснастку, образцы и источник диффундирующих элементов тщательно очистить от загрязнений и оксидов с помощью ацетона, бензина и пескоструйной обработки [2, 3]. Покрытия наносили на никелевые образцы НП2, образцы и лопатки из сплавов ЖС6У, ЖС26У, ЖС32. Химический состав сплавов приведен в табл. 1.

В качестве источника газовой среды использовали зеленоватого цвета, шестиводный хлористый никель $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (ГОСТ 4038—79). Изучались условия термического обезвоживания. Предварительно источник NiCl_2 подвергли трехкратному нагреву при температурах 175 °С в течение 8 ч, 250 °С — 8 ч, 500 °С — 1 ч для удаления влаги. Цвет источника во время нагрева изменялся с зеленого на желтый. Давление паров хлористого никеля показано в табл. 2 [4, 5].

Исходным источником хрома и алюминия для нанесения покрытий служил гранулированный сплав Cr-Al при различном соотношении компонентов Al:Cr % масс. 1:1, 2:3, 3:7. В качестве геттера для связывания кислорода и остатков воздуха применяли гранулированный сплав NiY (ТУ 48-0531-464—93).

Предварительно покрытие наносили на лабораторной установке. Схема лабораторной циркуляционной установки, представленной на рис. 1, отличается от установки в работе [1] более совершенным вентилятором, разрабо-

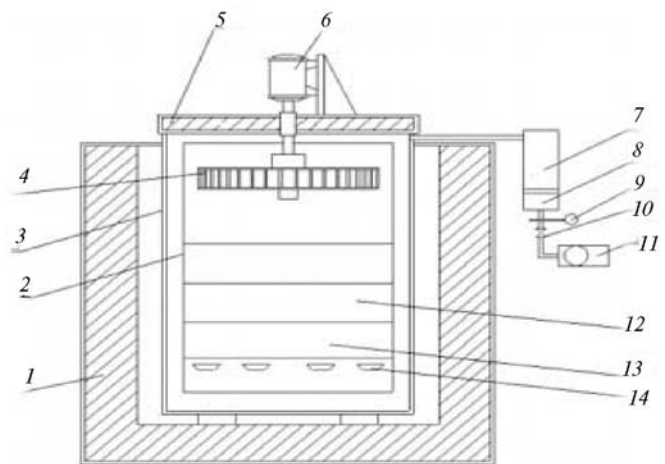


Рис. 1. Схема лабораторной циркуляционной установки:

- 1 — нагревательная печь; 2 — садка деталей с оснасткой;
- 3 — муфель; 4 — вентилятор; 5 — крышка муфеля;
- 6 — электродвигатель; 7 — испаритель; 8 — фильтр;
- 9 — вакуумметр; 10 — вентиль; 11 — вакуумный насос;
- 12 — место для образцов; 13 — место для источника диффундирующего элемента; 14 — тигли с галоидным источником

таным автором, что позволило обеспечить интенсивное движение газового потока.

В печь с футеровкой и электронагревателями установлен муфель (3), имеющий крышку (5) с водоохлаждающей системой. Крыльчатка центробежного вентилятора (4) входит в полость цилиндрического направляющего муфеля, в котором устанавливается садка деталей (2) в оснастке. Диаметр рабочего пространства лабораторной установки 150 мм, высота 200 мм. В замкнутом рабочем пространстве установки обеспечивается возможность приведения газовой среды в циркуляционное движение за счет вращения вентилятора. Муфель (3), направляющая оснастка (2), кожух теплового экрана

Таблица 1

Химический состав сплавов ЖС6У, ЖС26У, ЖС32

Сплав, ат. (%)	Cr,%	Al,%	C,%	Ti,%	W,%	Mo,%	Nb,%	Co,%	Fe,%	Si,%	Ta, Re,%	Ni,%
ЖС6У	8—9,5	5,6—6,0	0,17	2—2,9	9,5—11	1,2—2,4	0,8—1,2	9,5—10	<1,0	<0,3	—	54,5—62
ЖС26У	4,3—5,6	5,6—6,3	0,15	0,9—1,3	10,9—12,5	0,8—1,4	1,2—1,6	8—10	<1,0	<0,3	—	59,6—66
ЖС32	4,3—5,6	5,6—6,3	0,15	—	7,7—9,5	0,8—1,4	1,4—1,8	8—10	<1,0	<0,3	3,5—4,5	60—65

Таблица 2

Давление паров NiCl_2

T, °С	773,9	879,5	925,9	927,5	972,7	979,3
p, мм. рт.ст.	13,6	134,8	335,7	338,1	617,3	664,5

крышки (5) изготовлены из сплава ХН78Т, достаточно коррозионностойкого в галоидных средах.

Оснастка состоит из четырех уровней, размещение материалов варьировали для обеспечения свободного движения газового потока.

Через вентиль (10), испаритель (7) и фильтр (8) рабочее пространство камеры соединено с форвакуумным насосом (11). Работа на установке начинается с загрузки в муфел приспособления (оснастки) с образцами (рис. 3) и материалами. Далее установку герметизировали и производили откачку воздуха до разрежения около $\sim 6,5$ Па, давление в камере контролировали вакуумметром (9), затем вентиль (10) закрывали и проводили проверку установки на натекание. Натекание в объеме муфеля не должно превышать 0,66 л·Па/с. Затем проводили нагрев садки до рабочей температуры.

Нагрев осуществляли в двухзонной печи, оснащенной для регулирования температуры самопищущим автоматическим прибором — КСП 4 (ТУ 25-05.1290—75). Максимальная рабочая температура в печи 1050 °С. В качестве датчиков для измерения температуры в зонах печи применяли хромель-алюмелевые термопары с градуировкой ХА. При температуре 500 °С проводили обезвоживание источника газовой среды в течение одного часа при включенном насосе. По окончании выдержки проводился дальнейший нагрев до рабочей температуры. При достижении температуры 600 °С необходимо закрыть запорный вентиль (10), и отключить насос до достижения температуры в камере 800 °С. Затем включаем вентилятор (4), скорость вращения которого регулировалась с помощью ременной передачи и составляла ~ 1000 об/мин. Длительность обработки увеличивали по отношению к заданной по технологии на 10 мин с учетом инерционности нагрева камеры по отношению рабочих термопар.

Были разработаны два режима одно- и двухстадийного циркуляционного ХА.

Качество получаемых диффузионных покрытий циркуляционным методом подтверждается испытаниями лопаток.

Внешний вид лопаток после проведения первой стадии никельхромирования показал, что покрытия имеют равномерный цвет на всех

поверхностях лопаток (рис. 2). Толщина и содержание хрома соответствуют предъявляемым требованиям. В пределах указанных режимов ХТО получены идентичные двухслойные структуры покрытий, различавшиеся поверхностной концентрацией алюминия, хрома и толщиной диффузионного слоя. На всех никелевых образцах и сплавах образуется граница раздела между ХА слоем и основой сплава.

Для повышения пластичности разработаны режимы термовакуумной обработки, проводимые при температуре старения никелевых сплавов.

В результате рентгеноструктурного анализа после двухстадийного способа циркуляционного ХА установлено:

- микроструктура идентична получаемым покрытиям на лабораторной установке, как на чистом никеле, так и на сплаве ЖС6У (рис. 2). При этом толщина покрытия составляет 28...30 мкм;
- при никельхромировании образца из сплава ЖС6У (рис. 2, б), наблюдается образо-

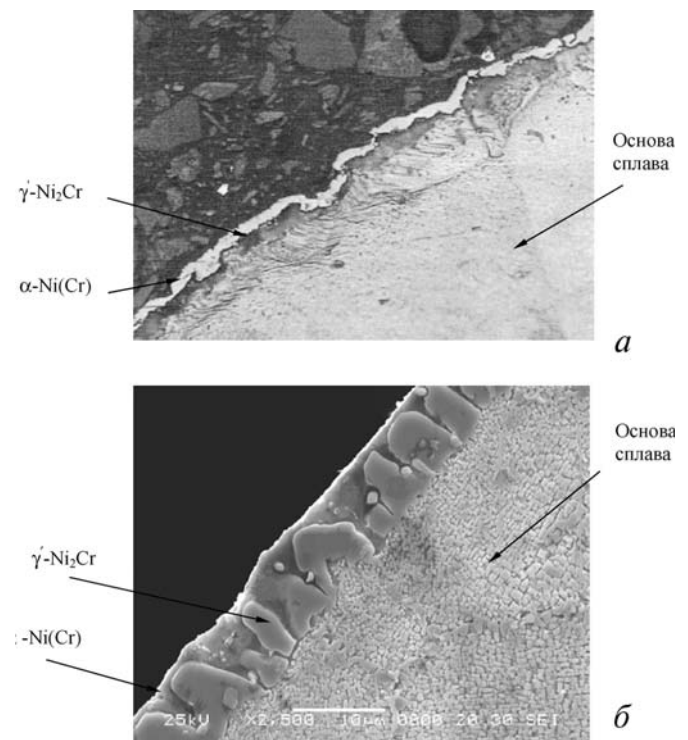


Рис. 2. Микроструктуры покрытий после первой стадии диффузионного насыщения циркуляционное хромирование при температуре 1000 °С в течение 4...6 ч:

- а — никелевый образец (НП2), $\times 500$;
- б — образец из сплава ЖС6У, $\times 2500$

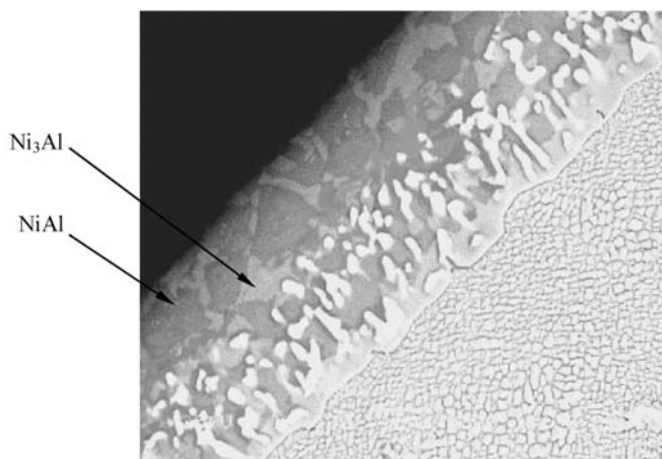


Рис. 3. Структура покрытия на лопатке ГТД из сплава ЖС6У после циркуляционного ХА и термовакуумной обработки, $\times 1500$

вание в наружном слое α -фазы твердого раствора хрома в никеля с концентрацией до 25% хрома. Средний слой $\alpha + \gamma$ -фазы является смесью твердого раствора никеля и хрома с содержанием 30% хрома и 40% никеля. Внутренний слой — γ -фаза твердого раствора хрома и других элементов сплава в никеле, с содержанием 16...30% Cr. При этом толщина покрытия равна 10...15 мкм;

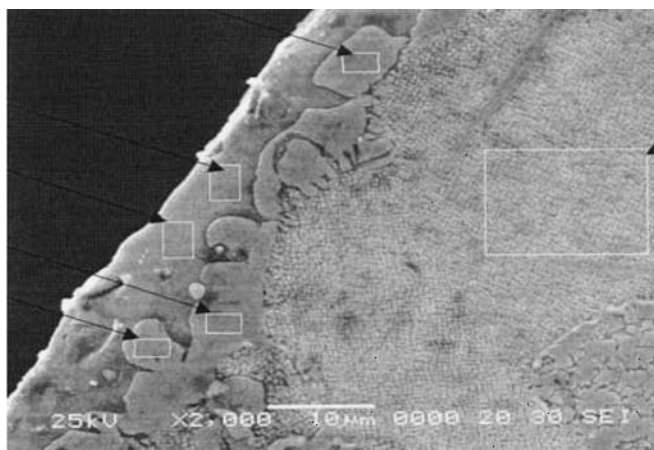
- после проведения второй стадии ХА структура покрытий идентична покрытиям, получаемым по вышеуказанному одностадийному циркуляционному ХА. При этом толщина всего покрытия составляет 38...45 мкм.

Структуры покрытий на сплавах ЖС26У, ЖС32 идентичны покрытию полученному на сплаве ЖС6У.

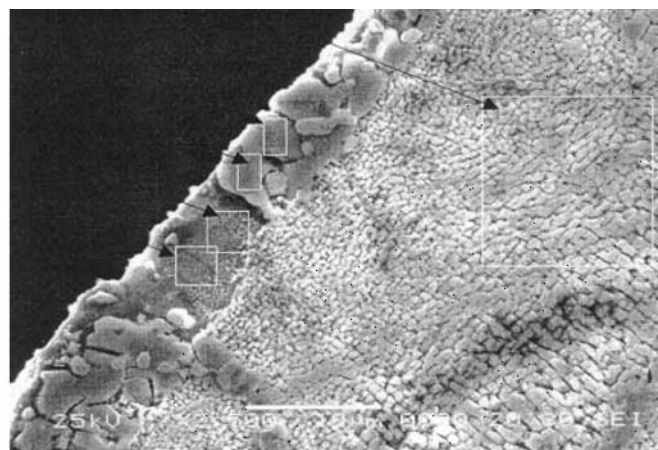
На рис. 3 представлена двухслойная микроструктура покрытия на лопатке ГТД из сплава ЖС6У, полученная одностадийным способом циркуляционного ХА. Хромирование лопаток ГТД (рис. 4, б) позволяет получить покрытия идентичные полученным при хромировании порошковым методом (рис. 4, а).

Согласно рентгеноструктурному и микро-рентгеноспектральному анализам в покрытиях, наблюдается граница раздела между ХА слоем и основой сплава. Наружный слой (рис. 5) состоит из NiAl+Ni₃Al-фазы, внутренний слой представляет гетерогенную многофазную структуру, состоящую из NiAl+Ni₃Al-фаз и карбидов. Химический анализ показал, что на поверхности концентрация Al составляет 16...20%, а Cr — 6...8%. Общая толщина покрытия 30...35 мкм.

Сравнительные испытания натуральных свойств лопаток турбины, прошедших двухстадийное ХА, согласно вышеуказанным режимам на термостойкость проводили на стенде 8УТС путем циклического нагрева лопаток в газовом потоке продуктов сгорания топлива до температуры 1000 °С с последующим охлаждением сжатым воздухом до температуры 200 °С. Продолжительность цикла составляла 240 с: 120 с — нагрев, 120 с — охлаждение.



а



б

Рис. 4. Структуры покрытий на лопатках ГТД из сплава ЖС6У после хромирования, полученная: а — порошковым методом при температуре 1000 °С в течение 4 ч, толщина покрытия 10...12 мкм, $\times 2000$; б — циркуляционным методом, толщина покрытия 10...15 мкм, $\times 1500$

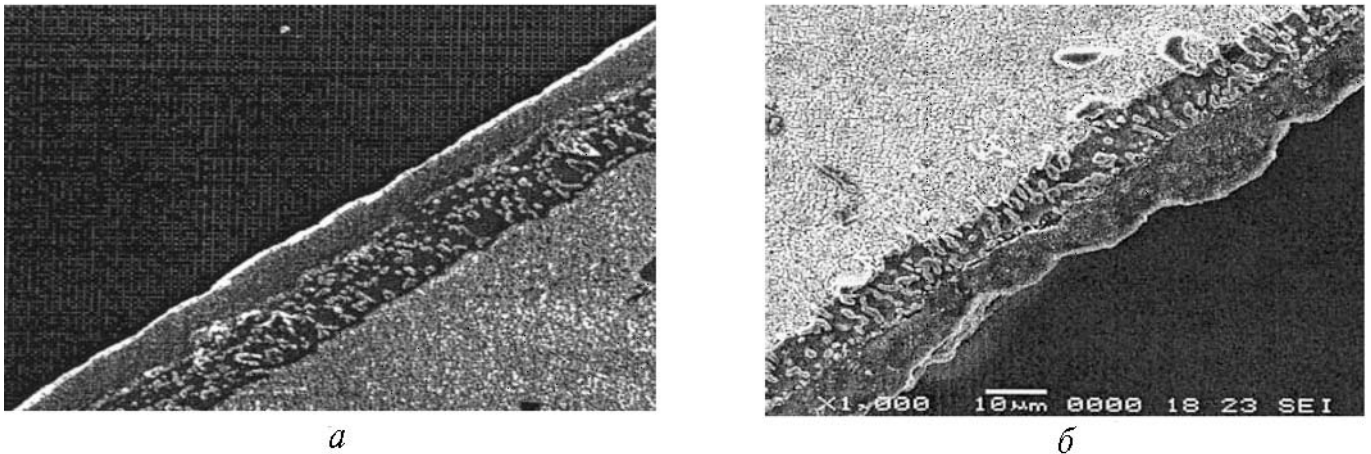


Рис. 5. Структура покрытия на лопатке ГТД из сплава ЖС6У после хромоалитирования и термовакуумной обработки:
а — наружная поверхность; *б* — внутренняя поверхность, $\times 1000$

Сравнительный анализ испытаний материала лопаток турбины на длительную прочность и механические свойства после ХА (см. табл. 1) показало, что уровень длительной прочности соответствует требованиям ТУ на лопатки ($T_{исп} = 975\text{ }^{\circ}\text{C}$ при напряжении $\sigma = 230\text{ МПа}$ и времени до разрушения $\tau \geq 40\text{ ч}$). Механические свойства при комнатной температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ материала лопаток показали удовлетворительные результаты по кратковременной прочности — 1015 МПа , δ — $5,6\%$, что соответствуют требованиям ТУ.

Определение объемных остаточных напряжений в готовых рабочих лопатках ТВД проводилось методом полного освобождения (по методике ВИАМ) в два этапа: вырезкой исследуемых темплетов с наклеенными датчиками (тензорезисторами) по спинке и корыту, а затем разрезкой этих темплетов по внутренним элементам лопатки. Вырезку и разрезку темплетов проводили электроэрозионным способом. При этом глубина хромоалюминидного покрытия лопаток составляла на наружной поверхности $30...35\text{ мкм}$ и во внутренних полос-

тях $10...15\text{ мкм}$. Наклейку тензорезисторов типа КФ4П1-3-100-В-12 в радиальном и окружном направлении выполняли согласно принятой в серийном производстве схеме. Всего исследовали по 16 мест на каждой лопатке. Готовые лопатки выдержали испытания по уровню объемных остаточных растяжений, укладываемые в рамки ТУ: по сжатию 100 МПа , по растяжению 50 МПа .

По результатам усталостных испытаний все лопатки прошли заданный режим испытаний без признаков разрушения.

Окончательно изготовленные лопатки в количестве шести штук были испытаны на вибростенде на усталостную прочность при комнатной температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на контрольный уровень: при напряжении $\sigma_b = 180\text{ МПа}$, характеризуется превышением установленного числа циклов $N = 2 \cdot 10^7$ циклов. Результаты усталостных испытаний — положительные: все характеристики лопаток, снимавшиеся в процессе испытаний, оказались стабильными; данные осмотра методом ЛЮМ-10В, данные металлографических исследований подтверди-

Таблица 1

Результаты испытаний материала лопаток турбины на прочность

Лопатка	Механические свойства		Предел длительной прочности		
	σ_b , * МПа	δ , %*	Напряжение, МПа	Температура испытания, $^{\circ}\text{C}$	Количество часов до разрушения
№ 1	1015	5,7	230	975	40-снят
№ 2	1033	5,6	230	975	40-снят
По ТУ	(850)	(4,0)	230	975	(40)

* При температуре испытания $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ли отсутствие каких-либо дефектов (трещин, сколов и др.), что соответствует требованиям технических условий. В покрытии формируются благоприятные сжимающие напряжения.

На рис. 6 видно, что термостойкость лопаток ХА циркуляционным методом, в 1,3–1,5 раза выше термостойкости лопаток, полученных порошковым методом. Судя по протяженности трещин при одинаковой наработке лопаток, интенсивность развития их в лопатках, ХА порошковым методом, более высокая, чем в случае циркуляционного ХА. Лучшие значения по термостойкости никелевых сплавов, ХА циркуляционным методом, по сравнению с аналогичными характеристиками, полученными другими методами насыщения, объясняются, очевидно, высоким качеством покрытий, в частности, более чистым их составом по примесям, лучшей пластичностью, меньшей пористостью и лучшей стабильностью по толщине.

Проведенные испытания на лопатках позволили сделать заключение о том, что после применения двухстадийного циркуляционного ХА получены покрытия, не уступающие по свойствам покрытиям, получаемым при порошковом методе. Для дальнейшего повышения защитных свойств рекомендуется применение одностадийного циркуляционного ХА. Данный способ позволяет исключить между стадиями нанесения (никельхромированием и ХА) переходной зоны, где содержания включений Al_2O_3 вызваны во время обдувки покрытия после первой стадии никельхромирования электрокорундом.

Исходя из полученных результатов и проведенных исследований, представленных в работе, утверждает, что для повышения защиты наружных и внутренних поверхностей лопаток ГТД следует использовать двухстадийный способ циркуляционного ХА, сочетающий три диффундирующих элемента (никель, хром, алюминий). Для экономии ресурсов и повышения технологичности процесса ХА рекомендуется применения одностадийного способа. Данный способ способствует устранению переходной зоны, где возможно наличие дефектов структур между нанесенными стадиями, что имеет место при получении покрытий в порошках.

Разработанные способы циркуляционного ХА являются целесообразными в использовании, наряду с другими методами защиты поверхности,

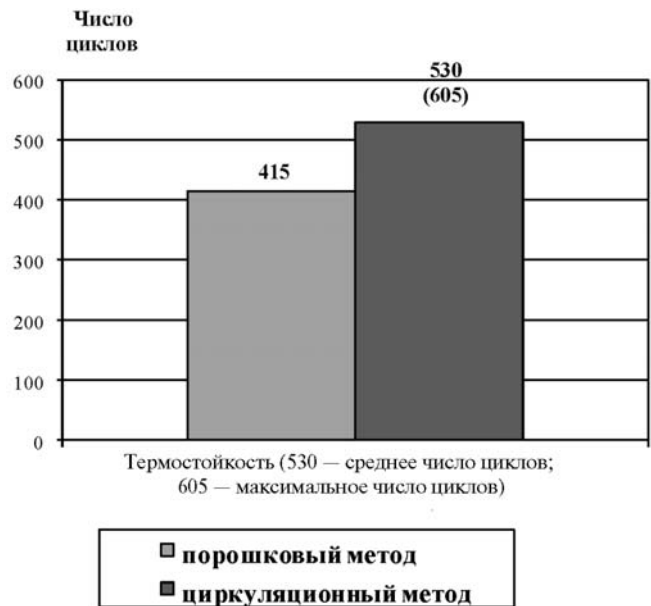


Рис. 6. Сравнение термостойкости хромоалитированных покрытий, полученных порошковым и циркуляционным методами на образцах и лопатках ГТД из сплава ЖС6У

оказывающими благоприятное воздействие на наиболее важные эксплуатационные свойства лопаток ГТД, такие как сопротивление термической усталости и термостойкости.

Литература

1. Циркуляционный метод получения диффузионных покрытий на деталях газотурбинных двигателей и перспективы его развития / Б.Н. Арзамасов, А.К. Белявский, А.В. Логунов, Г.Б. Строганов // Вестник машиностроения. 1991. № 11. С. 43–48.
2. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. М.: Л.В.М. СКРИПТ. Машиностроение, 1995. 832 с.
3. Ларин Н. И. Алитирование. М.: Гизместпром, 1947. 33 с.
4. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
5. Фурман А.А. Неорганические хлориды (химия и технология). М.: Химия, 1980. 416 с.
6. Бахрунов К.К. Разработка процессов диффузионного насыщения поверхностей охлаждаемых лопаток газовых турбин. V Международная научно-техническая конференция: / УГТУ УПИ им. первого президента Б.Н. Ельцина. Екатеринбург, 2009. Т. 1. С. 43–48.
7. Бахрунов К.К. Изучение процессов диффузионного насыщения на основе термодинамического моделирования. «Физические основы современного материаловедения». АЛГТУ им. Ползунова. Барнаул, 2010. Т. 1. С. 55–57.

Статья поступила в редакцию 02.06.2011 г.