

УДК 621.357.7

Р.К. Салахова<sup>1</sup>, А.Б. Тихообразов<sup>1</sup>

### ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-60-67

*Представлены результаты исследования термостойкости хромовых покрытий, полученных в различных электролитах хромирования, при циклической термообработке при температурах 400, 650 и 800°C. Изучено влияние высокотемпературного воздействия на степень снижения микротвердости хромовых покрытий и установлены предельные температуры эксплуатации хромового покрытия. Показано, что легирование хромового покрытия молибденом обеспечивает высокую стойкость хромо-молибденового покрытия к воздействию температур до 650°C. Проведены металлографические исследования структуры хромовых покрытий после их термообработки при температуре 650°C в течение полного цикла испытаний. Представлены результаты испытаний жаростойкости хромовых покрытий весовым методом.*

**Ключевые слова:** хромовое покрытие, электролит хромирования, термостойкость, термообработка, соединения молибдена, адгезия, микротвердость.

R.K. Salakhova<sup>1</sup>, A.B. Tikhobrazov<sup>1</sup>

### THERMAL RESISTANCE OF ELECTROLYTIC CHROMIUM COATINGS

*The paper presents the results of a study of heat resistance of the chromium coatings obtained in different electrolytes of chromium plating, during cyclic heat treatment at 400, 650 and 800°C. The influence of high temperature effects on the degree of reduction of the microhardness of chromium platings has been studied and the critical temperature of its degradation has been determined. It is shown that the alloying of chrome-molybdenum coatings ensures high durability chrome-molybdenum coatings for temperature action up to 650°C. Metallographic investigations of the structure of the chromium coatings after their heat treatment at a temperature of 650°C during the complete testing cycle. The results of testing the heat resistance of chromium coatings by the gravimetric method are presented.*

**Keywords:** chrome plating, chrome plating electrolyte, heat resistance, heat treatment, molybdenum compounds, adhesion, microhardness.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

#### Введение

В настоящее время авиационная промышленность остается одним из наиболее высокотехнологичных секторов экономики, потребляющих наукоемкую продукцию и функциональные материалы с принципиально улучшенным комплексом свойств [1]. Реализация задач, сформулированных в рамках разработанных стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки, обеспечит существенный прорыв в различных отраслях отечественной экономики и повысит долю технологий пятого технологического уклада в России [2]. Основой успешного воплощения стратегических направлений развития материалов и технологий является использование заложенных в них инновационных идей и перспективных концептов, определяющих облик техники будущего [3].

Достижение принципиально новых показателей эксплуатационной надежности конструктивных материалов, в том числе в области авиацион-

ной, невозможно без совершенствования технологий поверхностного упрочнения и способов физико-химической обработки поверхности, основным из которых является электрохимический или гальванический способ защиты поверхности деталей. Из гальванических процессов в машиностроительной отрасли самым востребованным был и остается процесс электролитического хромирования, применение которого продолжается уже почти полтора века. Это связано с уникальными, присущими только электролитическому хрому свойствами: высокая твердость, повышенное сопротивление износу, химическая стойкость, гидрофобность и отражательная способность. Ни одно другое электролитическое покрытие не выполняет такого большого числа различных практических функций, как хромовое покрытие. В настоящее время совершенствование технологий традиционного хромирования направлено на разработку новых составов электролитов, обеспечивающих снижение экологической нагрузки

данного процесса (разбавленные и «трехвалентные» электролиты [4–6]), и процессов осаждения композиционных хромовых покрытий путем введения в растворы соединений IV, V, VI групп элементов (цирконий, ванадий, тантал, молибден, вольфрам), а также микро- и наноразмерных частиц различной природы [7–9].

В авиационной промышленности область применения электролитического хрома, как правило, ограничивается защитой деталей от износа и приданием поверхностям высоких антифрикционных свойств. Использование хромового покрытия в ответственных деталях гидравлических систем (шасси, механизация крыла), шарнирно-болтовых соединений, а также в узлах повышенного абразивного износа обеспечивает повышение ресурса деталей и конкурентоспособности современной авиатехники [10, 11]. Процесс хромирования в авиации применяется также для восстановления размеров деталей неподвижных соединений и малонагруженных деталей подвижных соединений (ремонтные технологии).

Дальнейшее развитие отечественного авиастроения, особенно военной и специальной авиационной техники, требует постоянной эволюции материалов и технологий их обработки [12, 13]. В данном случае совершенствование технологии электролитического хромирования необходимо направить на обеспечение многофункциональности хромового покрытия, что позволит использовать такое покрытие не только как абразивно-износостойкое, но и, например, как теплозащитное.

Известно, что рабочая температура эксплуатации традиционного хромового покрытия, полученного из стандартных электролитов хромирования (ГОСТ 9.305–84), не превышает 450°C. Как видно из данных рис. 1, твердость стандартного хромового покрытия остается неизменной до 400°C, соответственно характер кристаллической решетки также не меняется [14].

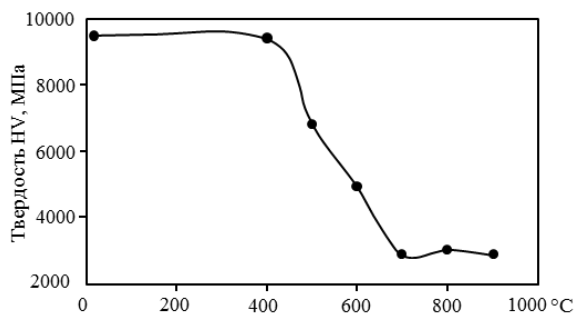


Рис. 1. Зависимость твердости стандартных хромовых покрытий от температуры термообработки на воздухе (режимы осаждения: температура электролита 55°C, плотность тока 55 А/дм<sup>2</sup>)

После нагрева покрытия до 500°C происходит частичная рекристаллизация, а при 700°C и более –

полная рекристаллизация хромового покрытия с образованием отдельных слоев сплава хром-железо и слоя нитридов (азот из воздуха и стали) [15]. Твердость хрома в результате рекристаллизации уменьшается более чем в 5 раз, а средняя величина поперечника зерен – более чем в 50 раз [16].

Таким образом, создание многофункциональных (как износостойких, так и жаростойких) хромовых покрытий позволит расширить область применения хромирования в авиации – от привычного хромирования деталей планера до хромирования деталей, подверженных высокотемпературному воздействию, т. е. деталей газотурбинного двигателя (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ).

Проблема высоких температур в авиации решается, с одной стороны, повышением жаропрочности и жаростойкости применяемых материалов и конструктивными методами создания специальных систем охлаждения деталей, с другой стороны, применением жаростойких и теплозащитных покрытий. В настоящее время в качестве жаростойких теплозащитных покрытий, используемых в основном для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД, применяются алюминиевые, электронно-лучевые и многослойные ионно-плазменные покрытия [17–19].

Целью данной работы является исследование термостойкости хромовых покрытий, полученных в электролитах в присутствии соединений молибдена, в сравнении со стандартными хромовыми покрытиями путем анализа снижения микротвердости хромовых покрытий после термообработки до 800°C; установление критических температур, при которых электролитический хром теряет механическую прочность (твердость) и оценка возможности использования легированных хромовых покрытий в ГТД и ГТУ, в частности в секции компрессора низкого давления.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие, защитные и теплозащитные покрытия», комплексной научной проблемы 17.2. «Шликерные, газодинамические и комбинированные покрытия для деталей из углеродистых сталей, в том числе высокопрочных» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [3].

#### Материалы и методы

Для проведения исследований изготовлены образцы из жаропрочного никелевого сплава с хромовыми покрытиями, полученными из следующих электролитов хромирования: стандартный (универсальный) сульфатный электролит по ГОСТ 9.305–84; саморегулирующийся сульфатно-кремнефторидный [14]; саморегулирующийся с

Таблица 1

Состав электролитов хромирования

Вид электролита	Состав электролита					Электропроводность, См/м	Выход по току (ВТ), %
	CrO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sr <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	K <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	Соли молибдена		
Стандартный	+	+	–	–	–	55–63	12–14
Саморегулирующийся сульфатно-кремнефторидный	+	–	+	+	–	52–60	17–18
Саморегулирующийся с добавками солей молибдена	+	–	+	+	+	48–56	15–16

добавками солей молибдена. Основные характеристики электролитов хромирования представлены в табл. 1.

Термообработку образцов с хромовыми покрытиями проводили в муфельной печи СНОЛ при циклическом воздействии температур 400 и 650°C в течение 99 ч и 800°C в течение 27 ч (один цикл: 9 ч – выдержка в печи; 15 ч – охлаждение на воздухе). Таким образом, продолжительность испытаний образцов при температурах 400 и 650°C составила 11 циклов, при температуре 800°C: 3 цикла.

Для оценки жаростойкости хромовых покрытий выполнено взвешивание хромированных образцов до и после термообработки на аналитических весах VIBRA HTR-220 SE.

Толщину покрытия определяли с помощью микрометра цифрового МКЦ 25-0,001 мм путем замера толщины образца до и после осаждения покрытия, а также металлографическим методом с использованием инвертируемого микроскопа Olympus GX-41.

Микротвердость хромовых покрытий измеряли с помощью микротвердомера ПМТ-3М.

Структуру хромовых покрытий исследовали путем анодного электролитического травления шлифов в растворе щавелевой кислоты [20].

#### Результаты и обсуждение

На образцы из жаропрочного сплава осаждали толстые хромовые покрытия – толщиной

>250 мкм. Выбор такой толщины объясняется тем, что для жаропрочных сплавов авиационного назначения востребована в основном ремонтная технология хромирования с целью восстановления геометрических размеров, посадочных и контактных поверхностей изношенных деталей. Ремонтная технология основывается на принципе послойного (аддитивного) наращивания осадок хрома до размеров, указанных в конструкторской документации.

Для формирования покрытий, прочно сцепленных с подложкой, хромирование проводили при режимах, обеспечивающих осаждение покрытий с положительным градиентом микротвердости по толщине покрытия [21]. Технологическая схема подготовки поверхности сплава под осаждение хромовых покрытий (операции пескоструйной обработки, обезжиривания, травления, активация, наложение ударного тока) из саморегулирующихся электролитов хромирования аналогична схеме подготовки сплава перед осаждением стандартного хромового покрытия по ГОСТ 9.305–84. Градиент микротвердости хромовых покрытий получали путем варьирования плотности тока и температуры электролита в процессе электролиза. Режимы хромирования для получения градиентных хромовых покрытий толщиной 300–350 мкм представлены в табл. 2–4.

Хромирование в саморегулирующемся электролите хромирования с добавкой солей молибдена

Таблица 2

Режимы электролиза из стандартного электролита хромирования

Плотность тока, А	Температура элемента, °С	Время осаждения, мин	Микротвердость, ГПа
30–35	65–70	120	От 5,2
50–60	55±3	До получения покрытия толщиной >250 мкм	От 8,9 до 10,1

Таблица 3

Режимы электролиза из саморегулирующегося сульфатно-кремнефторидного электролита хромирования

Плотность тока, А	Температура элемента, °С	Время осаждения, мин	Микротвердость, ГПа
30–35	65–70	90	От 7,5
50–60	55±3	До получения покрытия толщиной >250 мкм	От 9,2 до 10,8

Таблица 4

Режимы электролиза из саморегулирующегося электролита хромирования с добавкой солей молибдена

Плотность тока, А	Температура элемента, °С	Время осаждения, мин	Микротвердость, ГПа	Содержание молибдена в покрытии, % (по массе)
От 25	От 65	До 100	От 7,5	0,3–0,5
От 50	От 60	До получения покрытия толщиной >250 мкм	От 8,9 до 10,9	

при режимах, указанных в табл. 4, обеспечивает массовое содержание молибдена в покрытии в количестве 0,3–0,5% (по массе).

В каждом из указанных электролитов изготовлено по 15 образцов с хромовыми покрытиями (3 партии образцов), по 5 шт. от каждой партии подвергнуты циклической термообработке при температурах 400, 650 и 800°С.

В табл. 5 представлены фотографии внешнего вида образцов с хромомолибденовыми покрытиями в сравнении со стандартными хромовыми покрытиями после термообработки в течение 3 циклов.

Видно, что при повышении температуры термообработки цвет стандартного хромового покрытия меняется от желто-коричневого (преимущественно оксиды CrO<sub>3</sub>) до насыщенного темно-зеленого (оксиды Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, «хромовая зелень»), а цвет хромомолибденового покрытия определяется наличием в окалине оксидов молибдена различной валентности (Mo<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mo<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – температура термообработки до 400°С, MoO<sub>3</sub> – температура термообработки от 600°С) и изменяется от коричнево-зеленого до фиолетово-зеленого.

Представленные фотографии иллюстрируют, что после выдержки хромированных образцов при температуре 800°С в течение 3 циклов (27 ч) наблюдаются сколы стандартного хромового покрытия по границам крупной сетки трещин и осыпание хромомолибденового покрытия с образова-

нием мелкой сетки трещин на подложке. Для образцов с хромовым покрытием, полученным из саморегулирующегося сульфатно-кремнефторидного электролита, наблюдается та же картина, что и для хромомолибденового покрытия. Таким образом, вся партия образцов (15 шт.), подвергнутых высокотемпературному воздействию при 800°С, снята с испытаний как непрошедшая контроль на прочность сцепления хромового покрытия с подложкой.

Наряду с изучением зависимости термостойкости хромовых покрытий от способа их получения (вид электролита, режимы осаждения), исследована зависимость степени снижения микротвердости покрытий от времени выдержки при указанных ранее температурах. С этой целью проведены промежуточные измерения микротвердости хромовых покрытий после термообработки образцов в течение 9 и 27 ч (табл. 6).

Полученные данные свидетельствуют о высокой термостойкости всех видов хромовых покрытий при температуре 400°С, наблюдается снижение микротвердости за 27 ч термообработки не более 5%. При нагреве образцов до 650°С в первые 9 ч испытания происходят резкое падение микротвердости стандартного хромового покрытия (в 2 раза), заметное уменьшение микротвердости хромового покрытия (в 1,65 раза) и незначительное снижение микротвердости хромомолибденового покрытия – в 1,15 раза.

Таблица 5

Внешний вид хромированных образцов после термообработки в течение 3 циклов

Температура термообработки, °С					
400		650		800	
Стандартное хромовое покрытие	Хромомолибденовое покрытие	Стандартное хромовое покрытие	Хромомолибденовое покрытие	Стандартное хромовое покрытие	Хромомолибденовое покрытие

Таблица 6

Микротвердость хромовых покрытий после термообработки образцов в течение 9 и 27 ч

Вид хромового покрытия	Микротвердость, ГПа				
	до термообработки	после термообработки при температуре, °С			
		400		650	
		9 ч	27 ч	9 ч	27 ч
Стандартное (ГОСТ 9.305–84)	9,6	9,4	9,2	4,5	4,0
Из саморегулирующегося сульфатно-кремнефторидного электролита	10,4	10,25	10,25	6,2	6,0
Хромомолибденовое	10,8	10,8	10,8	9,2	9,2



Рис. 2. Внешний вид хромированных образцов после термообработки при температуре 400 (а, в) и 650°С (б, з) в течение 11 циклов:

а, б – стандартное хромовое покрытие; в, з – хромомолибденовое покрытие

Полный цикл термообработки образцов при температуре 400 и 650°С составил 99 ч (11 циклов). На рис. 2 представлен внешний вид образцов со стандартными и хромомолибденовыми покрытиями после термических испытаний в течение 11 циклов.

Видно, что термообработка образцов при 650°С продолжительностью 99 ч приводит к образованию окалины темно-зеленого цвета для стандартного хромового покрытия и окалины зелено-

вато-черного цвета для хромомолибденового покрытия с визуально просматриваемой сеткой микротрещин.

Для оценки влияния термического воздействия на степень снижения микротвердости хромовых покрытий на жаропрочном сплаве проведены измерения микротвердости покрытий до и после термической обработки образцов. Результаты исследований микротвердости покрытий представлены в табл. 7.

Таблица 7

Степень снижения микротвердости хромовых покрытий толщиной 260–360 мкм при термообработке в течение 11 циклов (99 ч)

Вид хромового покрытия	Микротвердость, ГПа				
	до термообработки	после термообработки			
		400°С	% снижения	650°С	% снижения
Стандартное (ГОСТ 9.305–84)	9,6	7,7	20	2,4	75
Из саморегулирующегося сульфатно-кремнефторидного электролита	10,4	9,4	10	3,6	65
Хромомолибденовое (0,5% (по массе) Мо)	10,8	10,8	–	7,8	28



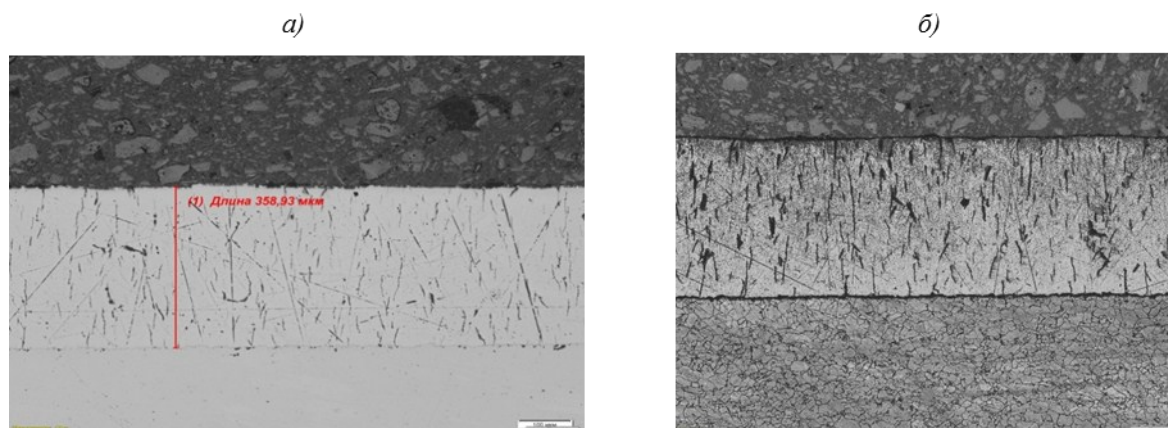


Рис. 3. Металлографическое исследование стандартного хромового покрытия после термообработки при 650°C в течение 11 циклов (99 ч):

*a* – нетравленный шлиф; *б* – шлиф после анодного травления

Как видно из данных табл. 7, при выдержке хромовых покрытий при 400°C в течение 11 циклов (99 ч) микротвердость стандартного хромового покрытия снижается на 20%; хромового покрытия, осажденного из саморегулирующегося сульфатно-кремнефторидного электролита – на 10%, тогда как микротвердость покрытия, легированного молибденом, остается без изменений. Термообработка хромовых покрытий при высоких температурах (650°C в течение 99 ч) приводит к полной деградации микротвердости стандартного хромового покрытия до уровня микротвердости жаропрочного сплава (2,3–3,0 ГПа, 75%); к критическому снижению микротвердости хромового покрытия, полученного из саморегулирующегося сульфатно-кремнефторидного электролита (до 3,6 ГПа, 65%), а микротвердость хромового покрытия, содержащего 0,5% (по массе) молибдена, при вышеуказанных режимах обработки снижается на 28% (с 10,8 до 7,8 ГПа). Полученный уровень снижения микротвердости свидетельствует о достаточно высокой стойкости хромомолибденового покрытия к воздействию температур до 650°C. Сравнительный анализ результатов

испытаний позволяет утверждать, что именно легирование хромового покрытия молибденом обеспечивает повышение рабочей температуры эксплуатации хромового покрытия до 650°C.

Известно, что при термообработке гальванических покрытий происходит изменение структуры осадок в результате деформационных дислокаций, вызванных сокращением объема осадок (при выделении из них водорода, полиморфных превращениях и др.), а также первичной (формирование новых зерен с более совершенной структурой, чем исходные) и вторичной (аномальный рост отдельных зерен) рекристаллизацией [22].

Результаты металлографического исследования структуры стандартного и хромомолибденового покрытия после термообработки образцов при температуре 650°C в течение 11 циклов представлены на рис. 3 и 4. Видно, что термообработка стандартных хромовых покрытий при температуре 650°C в течение 99 ч приводит к поперечному микрорастрескиванию хромовых покрытий. Образование трещин, вероятно, объясняется релаксацией внутренних напряжений растяжения, вызванных сокращением объема осадок при

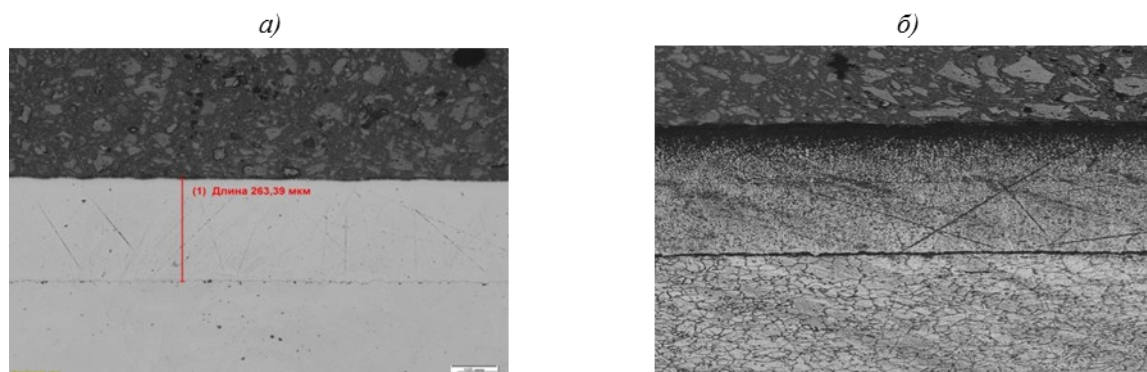


Рис. 4. Металлографическое исследование хромомолибденового покрытия после термообработки при 650°C в течение 11 циклов (99 ч):

*a* – нетравленный шлиф; *б* – шлиф после анодного травления

Результаты испытаний хромовых покрытий на жаростойкость

Вид хромового покрытия	Относительный привес образцов, г/(дм <sup>2</sup> ·ч)
Стандартное (ГОСТ 9.305–84)	$1,55 \cdot 10^{-3}$
Из саморегулирующегося сульфатно-кремнефторидного электролита	$1,23 \cdot 10^{-3}$
Хромомолибденовое	$1,4 \cdot 10^{-3}$

десорбции из них атомарного водорода. При анодном травлении поперечного шлифа хром легче растворяется по границам микротрещин, трещины, соответственно, расширяются и становятся более видимыми (рис. 3).

Структура хромовых покрытий, легированных молибденом, после термообработки при 650°C в течение 99 ч остается неизменной и выглядит однородной даже после анодного травления. Это позволяет утверждать, что на поверхности жаропрочного сплава при режимах, указанных в табл. 4, формируются беспористые хромомолибденовые покрытия с низкими напряжениями растяжения.

Следует отметить, что термообработка образцов при 400°C в течение 99 ч не вызывает заметного изменения структуры всех исследуемых видов хромовых покрытий.

Наряду с термостойкостью хромовых покрытий проведены исследования их жаростойкости. Под жаростойкостью (окалиностойкостью) понимают способность материала противостоять химическому разрушению поверхности на воздухе или в газовых средах в процессе эксплуатации при температуре >550°C. Поэтому испытанию на жаростойкость хромовых покрытий была подвергнута партия образцов, прошедшая термообработку при температуре 650°C. Для оценки жаростойкости использовался весовой метод (по увеличению массы образца) – взвешивание образцов производили до и после термообработки, не удаляя окалину с поверхности образца. Количество кислорода, соединившегося с хромовым покрытием образцов, при прочих равных условиях находится в зависимости от площади поверхности

образцов. В качестве критерия жаростойкости образцов принят их привес, т. е. количество оксидов, образовавшихся при испытании образцов в течение 11 циклов, отнесенное к площади поверхности образцов до испытания и единице времени испытания. Результаты испытаний хромовых покрытий на жаростойкость при температуре 650°C (11 циклов) представлены в табл. 8.

Полученные низкие значения относительного привеса образцов позволяют утверждать, что при температуре 650°C (11 циклов) жаростойкость (окалиностойкость) всех видов хромовых покрытий высокая, общий привес окалины не превышает 0,1% (отношение привеса массы образца к его исходной массе). Видно, что жаростойкость хромовых покрытий, полученных из саморегулирующегося электролита, несколько выше, чем хромового покрытия, осажденного из стандартного электролита, а наличие в хромовом покрытии молибдена, в свою очередь, незначительно снижает жаростойкость покрытия.

#### Заключения

Легирование хромового покрытия молибденом в количестве 0,3–0,5% (по массе) обеспечивает стойкость покрытий к воздействию температур до 650°C, что приводит к повышению допустимой рабочей температуры эксплуатации хромовых покрытий с 400 до 650°C. Этот факт позволит расширить область применения электролитического хромового покрытия, включая хромирование конструктивных элементов, работающих при повышенных температурах – в частности деталей, используемых в холодной секции (до 600°C) компрессора низкого давления ГТД.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
2. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука и жизнь, 2013. 128 с.
3. 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.
4. Виноградов С.С. Создание экологически безопасного гальванопроизводства на основе рационализации водоотведения и реагентного метода очистки стоков // Гальванотехника и обработка поверхности. 2009. Т. 17. №3. С. 24–29.
5. Тюриков Е.В., Тихообразов А.Б., Салахова Р.К. Исследование свойств разбавленного саморегулирующегося электролита хромирования, содержащего наноразмерные частицы оксида алюминия // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №6. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.01.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-6-6.

6. Салахова Р.К. Хромирование в электролите, содержащем соли трехвалентного хрома и нанопорошки, как альтернатива хромированию из стандартных электролитов // Известия Самарского научного центра РАН. 2008. Т. 1. Спецвып. С. 77–82.
7. Павлов Л.Н., Ветлугин Н.А., Кудрявцев В.Н. Электроосаждение сплава Cr–W // Успехи в химии и химической технологии. 2013. Т. 27. С. 59–63.
8. Гадалов В.Н., Серебровский В.В., Щеренкова И.С. и др. Структура и свойства электролитических хромовых покрытий с ультрадисперсным сверхтвердым наполнителем // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №3. С. 39–45.
9. Водопьянова С.В., Мингазова Г.Г., Фомина Р.Е. Влияние органической добавки на процесс хромирования с наночастицами  $Al_2O_3$  // Вестник Казанского технологического университета. 2011. №11. С. 191–195.
10. Молчанов В.Ф. Эффективность и качество хромирования деталей. Киев: Техника, 1979. 228 с.
11. Гаркунов Д.Н., Поляков А.А. Повышение износостойкости деталей конструкций самолетов. М.: Машиностроение, 1974. 199 с.
12. Виноградов С.С., Демин С.А. Термостойкое защитное неорганическое композиционное покрытие // Перспективные материалы. 2013. №12. С. 19–24.
13. Болдырев А.И., Жачкин С.Ю., Болдырев А.А., Пеньков Н.А. Получение хромовых покрытий с заданными свойствами методом гальваноконтантного осаждения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. №12-1. С. 12–16.
14. Солодкова Л.Н., Кудрявцев В.Н. Электролитическое хромирование. М.: Глобус, 2007. 191 с.
15. Плетнев Д.В., Брусенцова В.Н. Основы технологии износостойкого хромирования. М.: Машгиз, 1953. 143 с.
16. Шлугер М.А. Ускорение и усовершенствование хромирования деталей машин. М.: Машгиз, 1961. 140 с.
17. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия для лопаток компрессора газотурбинных двигателей // Электротехнология. 2016. №10. С. 23–38.
18. Гаямов А.М., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Выбор жаростойкого покрытия для жаропрочного никелевого рений-рутенийсодержащего сплава марки ВЖМ4 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №1. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.01.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-1-1.
19. Будиновский С.А., Смирнов А.А., Матвеев П.В., Чубаров Д.А. Разработка теплозащитных покрытий для рабочих и сопловых лопаток турбины из жаропрочных и интерметаллидных сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №4. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.01.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-5-5.
20. Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления: справочник. М.: Металлургия, 1988. 398 с.
21. Салахова Р.К., Тихообразов А.Б., Назаркин Р.М. Получение положительного градиента микротвердости как способ повышения адгезии электролитических хромовых покрытий // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №3 (63). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.01.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-77-85.
22. Поветкин В.В., Ковенский И.М. Структура электролитических покрытий. М.: Металлургия, 1989. 136 с.