

УДК 620.1:669.25

Д.П. Фарафонов¹, М.Л. Деговец¹, А.М. Розалев¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗНОСОСТОЙКИХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА ДЛЯ РЕМОНТА И УПРОЧНЕНИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-5-5

Представлены результаты исследований жаропрочных износостойких сплавов на основе кобальта систем Co–Cr–W–C и Co–Cr–Mo–Si. С целью выбора состава износостойкого сплава для получения высокочистой металлопорошковой композиции, предназначенной для ремонта и упрочнения рабочих лопаток турбин высокого давления (ТВД) методом лазерной наплавки, проведены сравнительные исследования свойств экспериментальных сплавов на основе кобальта. По результатам исследований определены сплавы, обладающие оптимальными свойствами по износостойкости, жаростойкости, свариваемости, которые могут быть использованы для разработки технологии получения из них порошковых композиций методом атомизации.

Ключевые слова: износостойкость, коэффициент трения, фреттинг-коррозия, газотурбинные двигатели, металлопорошковые композиции, жаропрочные сплавы.

In article results of researches of heat resisting wear-resistant alloys on the basis of cobalt (systems Co–Cr–W–C, Co–Cr–Mo–Si) are provided. For the purpose of choice of composition of wear-resistant alloy for receiving the high-pure metalpowder composition designed for repair and hardening of high-pressure turbines blades by method of laser welding, comparative researches of properties of experimental cobalt-based alloys are conducted. By results of researches the alloys possessing optimum properties on wear resistances, heat resistance, weldability which can be used for development of technology of receiving from them powder compositions by atomization method are defined.

Keywords: wear resistance, friction coefficient, fretting corrosion, gas turbine engines, metalpowder compositions, hot strength alloys.

¹Федеральное 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

Ресурс газотурбинных двигателей в значительной мере определяется надежностью работы газовой турбины, рабочие лопатки которой являются одними из самых нагруженных деталей, которые подвергаются длительному воздействию высокотемпературного газового потока и работают в сложнапряженных условиях. Поэтому рабочие лопатки изготавливают из наиболее высокожаропрочных, дорогостоящих сплавов на основе никеля и кобальта – суперсплавов. Однако, несмотря на высокую жаропрочность, суперсплавы в условиях работы турбины склонны к коррозии, высокотемпературному окислению и эрозии. Кроме того, рабочие лопатки изнашиваются в результате контактного взаимодействия торцов с элементами статора и постоянного контакта бандажных полков соседних лопаток в колесе.

Лопатки с бандажными полками, имеющими на боковых торцах контактные площадки для обеспечения жесткости связи всех лопаток после их сборки в колеса,

широко применяются в современных ГТД. Такое соединение лопаток способствует повышению их вибрационной прочности. В условиях высоких температур и в результате динамического контактного нагружения бандажные полки турбинных лопаток наиболее интенсивно изнашиваются. Кроме того, в диапазоне температур 700–1100°C при виброконтактном динамическом нагружении имеет место процесс высокотемпературной фреттинг-коррозии, который приводит к износу и повреждаемости рабочих поверхностей [1–10].

Эффективным способом увеличения долговечности лопаток является упрочнение бандажных полок износостойкими сплавами на основе никеля, кобальта или интерметаллида Ni_3Al , содержащими в своем составе карбиды, бориды, фазы Лавеса и др. [2–6].

Упрочнение бандажных полок рабочих лопаток износостойкими сплавами производится двумя методами: наплавкой и напайкой. Наплавку можно производить вручную аргоно-дуговым методом в импульсном режиме или в автоматизированном режиме с использованием специального оборудования, обеспечивающего сканирование (или прямое измерение обрабатываемой детали), разработку 3D-модели детали и наплавляемого объема и собственно лазерную адаптивную газопорошковую наплавку.

Для ремонта поврежденных (изношенных) поверхностей лопаток предпочтительным является метод автоматизированной лазерной наплавки [11–17]. В качестве основного расходного материала при лазерной наплавке применяются порошки износостойких сплавов заданного гранулометрического состава.

Материал для упрочнения бандажных полок и ремонта лопаток должен обладать высокой износостойкостью, высокими прочностными характеристиками, стойкостью к высокотемпературному окислению и коррозии, высоким качеством свариваемости и низкой склонностью к трещинообразованию. Всем этим требованиям в большей степени удовлетворяют сплавы на основе кобальта с карбидным и/или интерметаллидным упрочнением [18–20].

Данная работа посвящена исследованию жаропрочных износостойких сплавов на основе кобальта систем $Co-Cr-W-C$ и $Co-Cr-Mo-Si$. С целью выбора состава износостойкого сплава для получения высокочистой металлопорошковой композиции, предназначенной для ремонта и упрочнения рабочих лопаток турбин высокого давления (ТВД) методом лазерной наплавки, проведены сравнительные исследования свойств экспериментальных сплавов на основе кобальта.

Работа выполнена в рамках реализации комплексных научных направлений 9.7. «Высокотемпературные деформируемые сплавы и композиционные материалы, упрочненные тугоплавкими металлическими волокнами и частицами, истираемые уплотнительные материалы» и 10.3. «Технологии атомизации для получения мелкодисперсных высококачественных порошков сплавов на различной основе для аддитивных технологий и порошков припоев для пайки» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Сплавы, применяемые для упрочнения рабочих лопаток турбины ГТД, отличаются повышенной износостойкостью и прочностью. Обычно это сплавы на основе системы $Co-Cr-W$, содержащие большое количество углерода.

Хром является обязательным компонентом всех износостойких сплавов на основе кобальта, так как он имеет ключевое значение в образовании карбидов с различным соотношением Cr/C , способствующих твердорастворному упрочнению этих сплавов. Кроме того, хром повышает сопротивление сплава окислению и горячей коррозии. Оптимальным для сплавов на основе системы $Co-Cr-W-C$ является концентрация хрома

20–30%. При больших содержаниях хрома происходит образование топологически плотноупакованных (ТПУ) фаз, что приводит к охрупчиванию сплава [21].

Карбиды образуются при содержании в составе сплава углерода – обычно до 3%. Как правило, чем выше содержание в сплаве углерода, тем выше его износостойкость, но ниже пластичность и жаропрочность (за счет снижения температуры плавления). При высоком содержании углерода могут образовываться вторичные карбиды (уже при температурах 700–800°C), что отрицательно сказывается на пластичности сплава. Однако отрицательное влияние большого количества углерода можно уменьшить при введении в состав сплава бора и никеля. Бор придает сплаву дополнительную прочность за счет образования карбоборидов и боридов. При введении бора также образуется легкоплавкая боридная эвтектика, способная залечивать горячие трещины (оптимальное содержание – от 0,015 до 0,1% (по массе)). При введении в состав сплава никеля (а также железа) стабилизируется твердый раствор за счет подавления превращений в кобальтовой матрице. Присутствие большого количества никеля позволяет сохранять стабильную аустенитную структуру гранцентрированной кубической решетки кобальтовой матрицы при повышенных температурах и исключает ее превращение в структуру гексагональной плотноупакованной решетки при низких температурах. Это дает возможность применения таких сплавов в циклических условиях знакопеременных температур. По некоторым данным оптимальное содержание никеля в сплаве на основе Co–Cr–W составляет 8–10%.

Тугоплавкие элементы молибден и вольфрам используют главным образом для твердорастворного упрочнения жаропрочных кобальтовых сплавов. Стойкость к высоким температурам кобальтовым сплавам придает высокое содержание вольфрама. Вольфрам повышает температуру плавления кобальтовых сплавов, прочность твердого раствора и участвует в карбидообразовании. При большом содержании вольфрама происходит образование ТПУ фаз, снижение пластичности и коррозионной стойкости, а также жаростойкости сплава. Оптимальное содержание вольфрама составляет 8–20%.

Молибден, так же как и вольфрам, повышает прочность твердого раствора и участвует в карбидообразовании. Применение молибдена повышает пластичность сплавов, но снижает температуру плавления и жаропрочность.

В особую группу следует выделить сплавы на кобальтовой основе с фазами Лавеса. Эти сплавы характеризуются полным отсутствием вольфрама и большим содержанием молибдена (22–29% (по массе)). Их используют в особо тяжелых условиях работы – коррозионная среда и высокие температуры. Рабочая температура может находиться в диапазоне значений 800–1000°C. Фазы Лавеса – прочные интерметаллидные фазы, которые выделяются в кобальтовых сплавах вследствие добавления в них молибдена и кремния. Содержание углерода в таких сплавах минимально возможное, поскольку большое количество карбидных выделений в сочетании с наличием фаз Лавеса может привести к охрупчиванию материала.

В качестве карбидообразователей используют такие элементы, как Ta, Nb, Zr и Hf, образующие монокарбиды MC, дополнительно повышающие износостойкость и прочность сплавов.

Дополнительное упрочнение и повышение износостойкости сплавов – стеллитов – в некоторых случаях достигается образованием силицидов. В ГП ЗМКБ «Прогресс», где активно идут исследования износостойких кобальтовых сплавов, в частности разработаны и серийно применяются сплавы марок ХТН-61 и ХТН-62 для рабочих лопаток первой ступени с рабочей температурой на бандажных полках до 1100°C, установлено оптимальное соотношение W/Si, обеспечивающее структурную и фазовую стабильность сплава марки ВЗК. Установлено, что оптимальное соотношение W/Si

достигается при содержании 10% вольфрама и 0,5% кремния, что позволяет повысить температурный уровень работоспособности сплава марки ВЗК на 200–250°C, который составляет 1000–1050°C. При этом верхняя граница легирования вольфрамом не должна превышать 10,5% (по массе), что может привести к снижению структурной и фазовой стабильности.

Сплавы марок ХТН-61 и ХТН-62 отличаются высоким содержанием ниобия. Повышение износостойкости этих сплавов достигается за счет образования карбидов типа MC на основе ниобия. Сплавы также содержат небольшое количество алюминия, что отличает их от других сплавов.

В составе как отечественных, так и зарубежных сплавов часто встречается ванадий, который применяется в качестве карбидообразующего элемента. Ванадий более сильный, чем W, Mo, Cr, карбидообразующий элемент, который образует высокотвердые, мелкодисперсные карбиды, повышающие износостойкость стеллита.

Значительного улучшения стойкости жаропрочных кобальтовых сплавов к окислению можно достичь путем введения добавок редкоземельных металлов. Введение в состав сплава Y и La в количестве 0,08–0,15% (по массе) заметно повышает стойкость к окислению жаропрочных кобальтовых сплавов.

В табл. 1 представлены выбранные составы экспериментальных сплавов, представляющие интерес для разработки технологии получения из них порошковых композиций методом атомизации.

Таблица 1

Экспериментальные композиции износостойких сплавов на основе кобальта		
Условный номер композиции сплава	Основа сплава	Основные легирующие элементы
1	Co–Cr–W–C	Zr, Ni, Si, Ti
2	Co–Cr–W–C	Ni, Fe, Si
3	Co–Cr–W–C	V, B, Ni
4	Co–Cr–W–C	V, Zr, Si
5	Co–Cr–W–C	Mo, Nb, Al
6	Co–Cr–Mo–Si	Ni, C

Выплавку экспериментальных составов проводили в вакуумной индукционной печи полунепрерывного действия ВИАМ-1НК в магнетитовых тиглях емкостью 40 кг. Масса плавок составляла 34–35 кг. Металл заливали при температуре 1530–1580°C в стальные трубы с внутренним диаметром 90 мм с втулкой и шайбой. Полученные слитки диаметром ~90 мм и длиной 600 мм обтачивали, а стружку брали для определения химического состава. Переплавление экспериментальных составов проводили в вакуумной индукционной печи УППФ-У в магнетитовых тиглях. Масса плавок составляла 7,5–8,5 кг.

Из заготовок, полученных после передела, изготовлены образцы для исследования износостойкости и коэффициента трения сплавов на лабораторной машине трения И-47 при однонаправленном трении скольжения в соответствии с СТО 1-595-35-515–2016 при температурах 20 и 1100°C, удельной нагрузке на образцы 2 МПа и скорости скольжения 250 об/мин.

Исследование жаростойкости экспериментальных композиций износостойкого сплава на кобальтовой основе проводили на цилиндрических образцах $\varnothing 10$ мм и высотой 20 мм в электропечи. Условия испытаний: температура нагрева 1100°C; продолжительность выдержки 20; 40; 60; 80 и 100 ч. Измерение массы образцов проводили через каждые 20 ч выдержки.

Испытания на твердость по Роквеллу проводили на цилиндрических образцах $\varnothing 20$ мм и высотой 20 мм на универсальном твердомере DuraVision 300.

Исследование микроструктуры экспериментальных композиций износостойкого сплава на кобальтовой основе проводили методом растровой электронной микроскопии по РТМ1.2А-096–2000.

Исследование свариваемости экспериментальных композиций износостойкого сплава на кобальтовой основе проводили на образцах квадратной формы 50×50 мм толщиной 3 мм. Определяющим показателем является критическая скорость деформации при сварке, которая должна быть $V_{кр} \geq 2,8$ мм/мин, в соответствии с чем и выбирали диапазон скоростей при испытании.

Результаты

По результатам газового анализа выплавленных заготовок экспериментальных сплавов на кобальтовой основе установлено, что содержание газовых примесей во всех экспериментальных композициях не превышает 0,004% (по массе) по кислороду и 0,006% (по массе) по азоту, что обусловлено применением вакуумных технологий выплавки как при получении шихтовых заготовок, так и при их переплаве. На рис. 1 представлены структуры экспериментальных сплавов, полученные методом растровой электронной микроскопии.

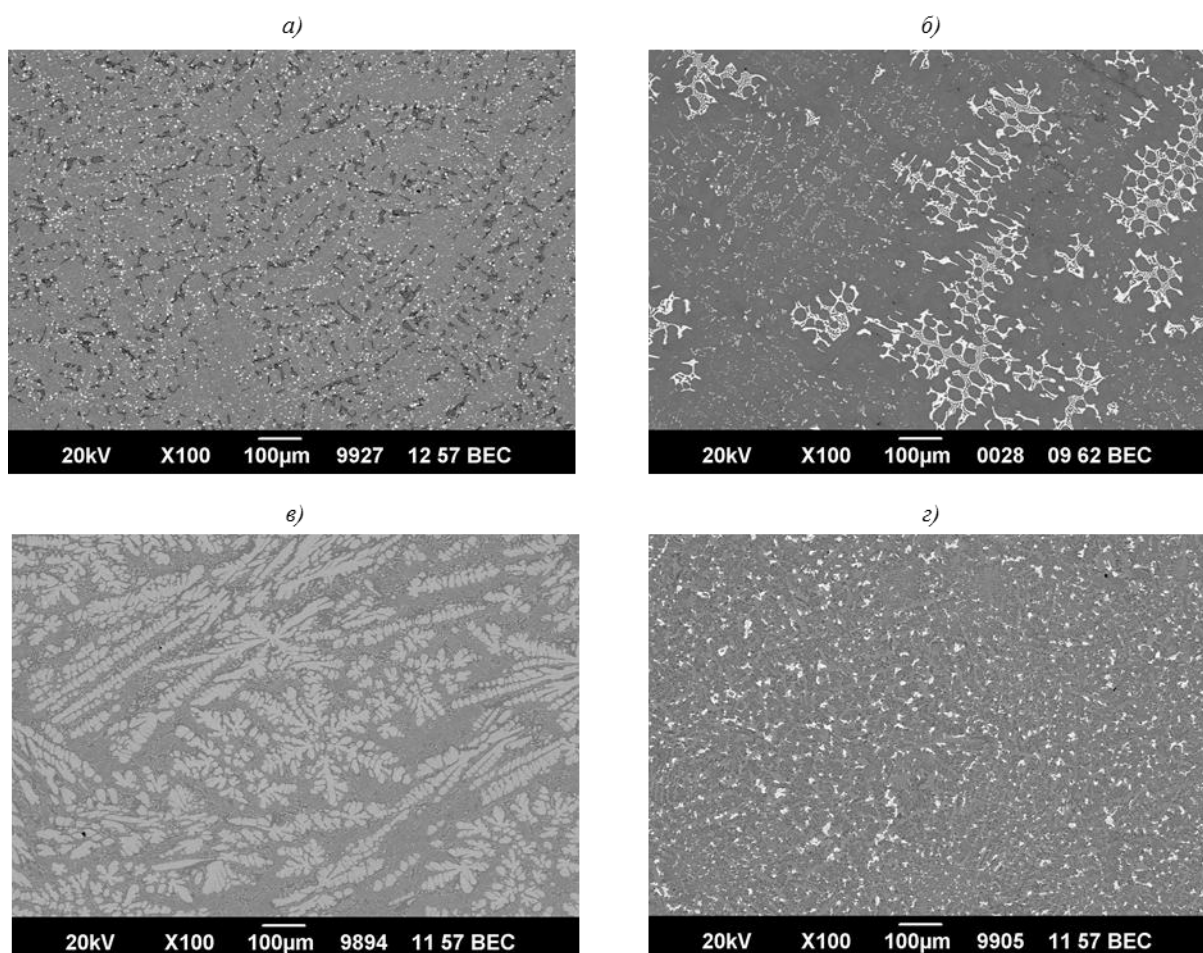


Рис. 1. Микроструктура экспериментальных композиций сплавов 1 (а), 2 (б), 6 (в) и 4 (г) – см. табл. 1

Рентгенофазовым анализом подтверждено, что все исследованные сплавы имеют гетерофазную структуру. Основой сплавов 1 и 2 является твердый раствор на основе кобальта и никеля, а упрочняющей фазой – карбиды типа TiC и W₂C – для состава 1 и типа Fe₆W₆C и Cr₂₃C₆ – для состава 2, при этом в составе 1 присутствуют и силициды хрома типа CrSi₂. Для композиции сплава 6 основной является фаза Лавеса типа Co₃Mo₂Si, характеризующаяся высокой твердостью, и Co–Ni твердый раствор. Основой сплавов составов 3 и 4 является твердый раствор на основе кобальта, в структуре которого наблюдаются карбиды на основе тугоплавких металлов, а основой композиции сплава 5 является твердый раствор на основе кобальта, упрочненный карбидами на основе ниобия.

По результатам проведенных сравнительных испытаний триботехнических свойств экспериментальных сплавов при комнатной и повышенной температурах (до 1100°C) установлено, что при комнатной температуре характер износа, вид поверхностей трения, наличие продуктов износа для всех испытанных сплавов приблизительно одинаковы. Все сплавы характеризуются высокой износостойкостью в условиях испытаний. Меньший износ и коэффициент трения имеют сплавы с условными обозначениями 4; 5 и 6. Наименьший коэффициент трения (0,25) – у образцов из сплава 5. Наименьшая интенсивность износа ($1,93 \cdot 10^{-8}$) – у образцов из сплава 6.

В высокотемпературной области характер изнашивания принципиально изменяется и различен для каждого конкретного сплава. По результатам испытаний тех же образцов (после удаления следов износа с поверхностей трения) при повышенной температуре (1100°C) при той же нагрузке и скорости скольжения установлено:

- сплавы составов 3 и 5 характеризуются значительным разрушением поверхности вследствие воздействия нагрева, их можно считать не износостойкими при температуре 1100°C;

- образцы из композиции сплава 4 после нагрева сохранили свою форму (значительных разрушений визуально не обнаружено), однако при приработке образцов при нагрузке 200 Н наблюдалось значительное разрушение поверхностей трения – в продуктах износа присутствовали частицы размером до 1 мм и более, поэтому дальнейшие испытания этой композиции не проводились;

- коэффициент трения сплава состава 1 уменьшается, повышается его износостойкость, что можно объяснить структурными изменениями поверхностей трения образцов и влиянием образующихся на поверхности сплава продуктов окисления;

- коэффициент трения и износостойкость сплавов составов 2 и 6 при температуре 1100°C изменяются незначительно в сравнении с результатами испытаний при комнатной температуре;

- наименьший коэффициент трения (0,23) и интенсивность износа ($7,24 \cdot 10^{-8}$) при температуре 1100°C имеет композиция сплава 1.

В табл. 2 представлены результаты оценки склонности к образованию горячих трещин при сварке экспериментальных составов.

Как видно из приведенных в табл. 2 данных, все композиции характеризуются достаточно высокой свариваемостью. Отдельно следует отметить, что, кроме композиций сплавов 1 и 5, трещины при увеличении скорости деформации сварного соединения сверх критического уровня образуются не в сварном шве, а в основном материале, что также характеризует высокую свариваемость данных материалов.

В табл. 3 представлены результаты определения твердости шести экспериментальных композиций.

Таблица 2

**Результаты оценки склонности к образованию горячих трещин при сварке
экспериментальных составов**

Условный номер композиции сплава	Критическая скорость деформации $V_{кр}$, мм/мин	Наличие (+)/отсутствие (-) трещин	
		в зоне деформации	в основном металле
1	3,64	–	–
	3,9	–	–
	4,35	–	–
	4,64	+	–
2	3,1	–	–
	3,64	–	–
	3,9	–	+
	4,35	–	+
3	3,1	–	–
	3,64	–	–
	3,9	–	+
	4,35	–	+
4	2,48	–	–
	2,87	–	–
	3,1	–	–
	3,64	–	+
	3,9	–	+
5	3,1	–	–
	3,64	–	–
	3,9	–	–
	4,35	+	–
6	2,48	–	–
	2,87	–	–
	3,1	–	–
	3,64	–	+
	3,9	–	+

Таблица 3

**Результаты испытания на твердость экспериментальных композиций
износостойких сплавов на кобальтовой основе**

Условный номер композиции сплава	Твердость по Роквеллу HRC (среднее значение)
1	34,8
2	48,2
3	53,7
4	53,1
5	51,9
6	52,9

По результатам испытаний установлено, что наивысшей твердостью обладают образцы сплава состава 3, среднее значение которых равно 53,7 единиц HRC, а твердость образцов остальных композиций (за исключением состава 1) находится на высоком уровне – около или более 50 HRC.

По результатам исследования жаростойкости экспериментальных композиций при температуре 1100°C и выдержке до 100 ч установлено, что наилучшей жаростойкостью по привесу массы обладают образцы сплава состава 6 (0,549 г/(м²·ч)), затем составов 1 (2,191 г/(м²·ч)) и 2 (2,651 г/(м²·ч)). После 40 ч выдержки образцы сплава состава 3

были сняты с испытаний в связи с разрушением. На образцах сплавов составов 4 и 5 после 80 ч выдержки появились следы разрушения. На рис. 2 представлены образцы из сплавов на основе кобальта, характеризующихся наибольшей стойкостью к окислению при 1100°C, после проведенных испытаний.

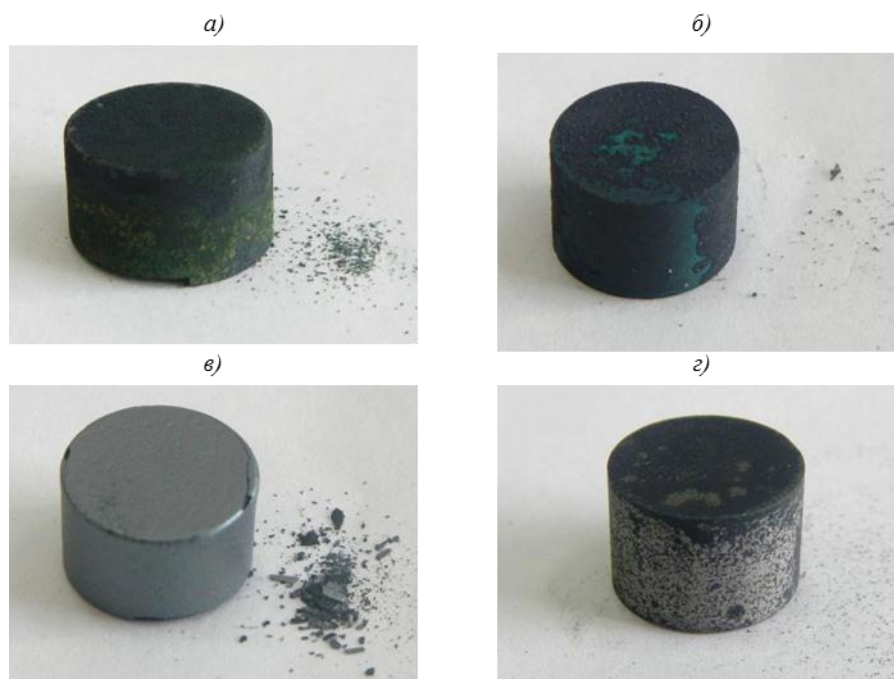


Рис. 2. Образцы после испытаний на жаростойкость при 1100°C сплавов составов 1 (а), 2 (б) и 6 (г) после 100 ч выдержки и композиции сплава 4 (в) после 80 ч выдержки

Составы оксидов на поверхности сплавов и составы сплавов под оксидами требуют дальнейшего детального изучения.

Обсуждение и заключения

По результатам проведенных исследований экспериментальных композиций износостойких сплавов на кобальтовой основе установлено, что все экспериментальные композиции характеризуются высокой износостойкостью и свариваемостью при комнатной температуре. При повышенных температурах износостойкость сплавов и характер изнашивания принципиально изменяется и различен для каждого конкретного сплава – некоторые композиции не являются износостойкими ввиду их сильного окисления при температуре 1100°C и не могут рассматриваться в качестве материала для разработки порошковой композиции.

Оптимальным сочетанием износостойкости (при температурах 20 и 1100°C), твердости, жаростойкости при 1100°C и свариваемости обладают сплавы композиций 1 и 2 – на основе системы Co–Cr–W–C, содержащие в своем составе ванадий и никель (до 10% (по массе)), а также сплав состава б – на основе системы Co–Cr–Mo–Si, износостойкость которого обусловлена значительным образованием в структуре фаз Лавеса типа Co_3Mo_2Si . Эти композиции могут быть использованы для проведения дальнейших исследований и разработки технологии получения из них порошковых композиций методом атомизации, предназначенной для ремонта и упрочнения рабочих лопаток турбин высокого давления методом лазерной наплавки.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Tobar M.J., Amado J.M., Alvarez C. et al. Characteristics of Tribaloy T-800 and T-900 coatings on steel substrates by laser cladding // *Surface and Coatings Technology*. 2008. Vol. 202. P. 2297–2301.
3. Петрик И.А., Перимировский И.А. Дальнейшее развитие технологии упрочнения бандажных полок лопаток турбины из жаропрочных сплавов // *Технологические системы*. 2001. №3 (9). С. 90–92.
4. Пейчев Г.И., Замковой В.Е., Андрейченко Н.В. Сравнительные характеристики износостойких сплавов для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2010. №9 (76). С. 102–104.
5. Дмитриева Г.П., Черепова Т.С., Косорукова Т.А., Ничипоренко В.И. Структура и свойства износостойкого сплава на основе кобальта с карбидом ниобия // *Металлофизика и новейшие технологии*. 2015. Т. 37. №7. С. 973–986.
6. Мигунов В.П., Чатынян Л.А., Иванов Е.В., Антонова Г.С., Соловьева Т.А. Износостойкие и антифрикционные материалы для узлов трения // *Авиационная промышленность*. 1982. №8. С. 71–73.
7. Пейчев Г.И., Милосердов А.Б., Андрейченко Н.В. Исследование легкоплавких эвтектик в микроструктуре износостойкого сплава ХТН-61 // *Вестник двигателестроения*. 2012. №1. С. 211–214.
8. Тихомирова Т.В., Гайдук С.В. Исследование методом CALPHAD влияния отношения вольфрама к кремнию на фазовый состав и характеристические температуры кобальтового сплава // *Вестник двигателестроения*. 2014. №2. С. 206–210.
9. Тихомирова Т.В., Гайдук С.В., Беликов С.Б. Исследование влияния содержания никеля на фазовый состав и характеристические температуры кобальтового сплава методом CALPHAD // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2015. №10. С. 45–48.
10. Пейчев Г.И., Замковой В.Е., Андрейченко Н.В. Разработка аналога износостойкого сплава ХТН-61 повышенной жаростойкости для газотурбинных двигателей // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. №8 (44). С. 11–13.
11. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 7–17.
12. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // *Автоматическая сварка*. 2013. №10. С. 23–32.
13. Евгенов А.Г., Неруш С.В., Василенко С.А. Получение и опробование мелкодисперсного металлического порошка высокохромистого сплава на никелевой основе применительно к лазерной LMD-наплавке // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №5. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-4-4.
14. Неруш С.В., Евгенов А.Г., Ермолаев А.С., Рогалев А.М. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава на никелевой основе для лазерной LMD-наплавки // *Вопросы материаловедения*. 2013. №4 (76). С. 98–107.
15. Неруш С.В., Евгенов А.Г. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава марки ЭП648-ВИ применительно к лазерной LMD-наплавке, а также оценка качества наплавки порошкового материала на никелевой основе на рабочие лопатки ТВД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №3. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-1-1.
16. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Оспенникова О.Г., Семенов Б.И., Семенов А.Б., Королев В.А. Металлопорошковые композиции жаропрочного сплава ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ в технологиях селективного лазерного сплавления, лазерной газопорошковой наплавки и высокоточного литья полимеров, наполненных металлическими порошками // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2016. №9 (678). С. 62–80.

17. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // Интеллект и технологии. 2015. №2 (11). С. 52–55.
18. Соловьева Т.А., Задыбина Т.Б., Бунтушкин В.П. Применение износ- и жаростойких сплавов для упрочнения лопаток ГТД // Авиационная промышленность. 1982. №8. С. 25–26.
19. Фарафонов Д.П., Мигунов В.П., Алешина Р.Ш. Исследование триботехнических характеристик материалов, применяемых для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток турбин ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2016. №S1 (43). С. 24–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-24-30.
20. Фарафонов Д.П., Базылева О.А., Роголев А.М. Сплавы для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток ГТД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №9. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-7-7.
21. Sims C.T. Superalloys 1984 // TMS-AIME. 1984. P. 399.