

УДК 669.018.45

О.Г. Оспенникова¹, В.Н. Подъячев¹, Ю.В. Столянков¹

ТУГОПЛАВКИЕ СПЛАВЫ ДЛЯ НОВОЙ ТЕХНИКИ

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-5-5

Современное развитие инновационной техники (прежде всего, авиационной и ракетно-космической) выдвигает требования к материалам, способным работать в условиях высоких температур, при которых традиционные никелевые сплавы применяться не могут. Задача создания новых жаропрочных, в том числе тугоплавких, сплавов приобретает в настоящее время особое значение – не только в авиационной отрасли, в связи с разработкой высокоэкономичных газотурбинных двигателей нового поколения, но и в других отраслях промышленности. В качестве перспективного направления исследований в этой области следует считать разработку композиций на основе тугоплавких металлов и сплавов на их основе, которые сохраняют значительную прочность вплоть до 1300–2500°C. Среди этих металлов по совокупности свойств выделяются металлы «большой четверки» – вольфрам, тантал, молибден, ниобий, которые как в чистом виде, так и в виде сплавов, получили достаточно широкое применение в различных отраслях промышленного производства.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, тугоплавкие металлы и сплавы, вольфрам, тантал, молибден, ниобий.

Modern development of innovative equipment (primarily aviation and aerospace) makes demands to materials capable to work at high temperatures in which traditional nickel alloys cannot work. The problem of creating new heat resistant including refractory alloys acquires nowadays particular significance not only in the aircraft industry in connection with development of high-economic gas turbine engines of new generation, but also in other industries. One of the promising scientific and research directions in this field is the refractory metals and alloys development which keep considerable durability up to temperatures of 1300–2500°C. Among the metals of the kind the «big four» – tungsten, tantalum, molybdenum, niobium are outstanding that both in pure or as alloys widely used in various industrial fields.

Keywords: heat resistant nickel alloys, refractory metals and alloys, tungsten, tantalum, molybdenum, niobium.

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

Применяемые в настоящее время в качестве материала для рабочих лопаток ГТД жаропрочные сплавы на основе никеля представляют собой высоколегированные многокомпонентные системы [1]. Требуемая структура литейных сплавов достигается термической обработкой, а в случае деформируемых сплавов – термопластической обработкой. Жаропрочность материала обеспечивается высоким содержанием вторичной γ' -фазы, оптимизацией ее размера и необходимым мисфитом. Однако в настоящее время максимальная рабочая температура таких сплавов не превышает 1100°C, что обусловлено разупрочнением материала из-за уменьшения объемной доли упрочняющей фазы и ее огрубления. Для исключения влияния объемных диффузионных процессов при высоких температурах в состав жаропрочных никелевых сплавов вводят дорогостоящие тяжелые металлы, такие как вольфрам, молибден, рений, рутений.

Одним из перспективных направлений повышения рабочих температур является использование материалов на основе моноалюминида никеля, упрочненного частицами оксидов алюминия, скандия, иттрия, лантана и других РЗМ, с направленной структурой и незначительной долей поперечных границ [2]. При оптимальном содержании упрочняющей фазы и обеспечении квазимонокристаллической структуры композиционного материала на основе моноалюминида никеля с содержанием 2,5% (объемн.) оксида иттрия, композиционный материал обеспечивает высокие жаропрочные свойства при температурах вплоть до 1500°C, а при температурах 1200°C и выше превосходит по прочности все жаропрочные сплавы на основе никеля. В таких материалах отмечено повышение сопротивления ползучести при температурах 800–1500°C, причем свойства возрастают при повышении температуры, что также позволяет говорить о возможности использования такого сплава при температурах >1500°C [3–5].

Таким образом, в настоящее время актуальным направлением развития в области разработки новых конструкционных жаропрочных материалов является достижение максимально высоких температур плавления материалов. Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 9.3. «Тугоплавкие жаропрочные сплавы, включая сплавы на основе элементов платиновой группы и эвтектические» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [6–8].

Материалы и методы

Из металлов «большой четверки» – вольфрама, тантала, молибдена и ниобия – наибольшей температурой плавления обладает вольфрам ($T_{пл}=3387^\circ\text{C}$), применение которого возможно вплоть до температуры 3000°C. Если первоначально основным методом получения полуфабрикатов и изделий из вольфрама и его сплавов являлась порошковая металлургия [9, 10], то в настоящее время развитие методов вакуумного электродугового и электронно-лучевого переплава дало возможность изготавливать изделия из литых заготовок [11].

Проводимые на протяжении ряда лет исследования по проблеме хладноломкости вольфрама имели целью повышение его технологических свойств. Большинство исследователей придерживается мнения [12], что температура перехода в хрупкое состояние ($T_{х.п}$) повышается с увеличением содержания примесей – в первую очередь, примесей внедрения. Существенное снижение температуры $T_{х.п}$ отмечается у вольфрама максимальной чистоты, а в монокристаллическом состоянии удается снизить эту характеристику до 20°C и ниже. Вместе с этим легирование вольфрама элементами, связывающими примеси внедрения, также способствует повышению его пластичности [13]. Состав и свойства некоторых вольфрамовых сплавов, разработанных в ВИАМ, приведены в табл. 1.

Особенностью сплава ВВ4 (табл. 1) является его относительно высокая пластичность (6,5%) при комнатной температуре, при которой другие вольфрамовые сплавы совершенно хрупкие. Благодаря высокой технологической пластичности слитки из сплава ВВ4 поддаются ковке и прокатке на лист любой толщины. Сплав не склонен к расслоению, из него можно получать различный прокат: прутки, трубки, проволоку, листы, ленту, фольгу.

Как и все тугоплавкие металлы, вольфрам требует защиты при работе в окислительной среде при высоких температурах (>500°C). В качестве защиты используются покрытия силицидного типа.

Таблица 1

Состав и механические свойства вольфрамовых сплавов

Сплав (полуфабрикат)	Состав, % (по массе)	Температура испытания, °С	σ, МПа	δ	ψ	σ ₁₀₀ , МПа
				%		
ВВ2 (пруток)	(0,03–0,05) Nb	600	300	35	70	–
		1500	140	48	90	60
		2000	80	60	95	12
ВВ2У (пруток)	(0,03–0,05) Nb+ +(0,05–0,1) С	300	510	18	18	–
		1500	170	63	84	75
		2000	40	118	98	12
ВВ3 (пруток)	(2,0–4,0) Мо+ +(0,1–0,3) Re	400	450	45	35	–
		1500	180	16	60	–
		1800	100	52	88	30
ВВ4 (лист)	(25–27) Re+ +(3,0–5,0) Мо	20	1980	6,5	–	–
		400	1430	12	–	–
		1500	520	15	–	45

Тантал и его сплавы в качестве конструкционного материала для работы при высоких температурах имеют весьма ограниченное применение. В основном тантал используется в чистом виде в радиоэлектронике для различного рода приборов. Наиболее известным является сплав системы Та–10% W.

Наиболее широкое применение из металлов рассматриваемой группы имеет молибден, что обусловлено почти вдвое меньшей плотностью (10,2 г/см²) по сравнению с вольфрамом, а также благодаря своим прочностным характеристикам. Кроме того, преимуществами молибдена и его сплавов являются значительно более высокая, чем у вольфрама технологичность, возможность получения сварных соединений с удовлетворительным сочетанием прочности и пластичности, что недостижимо для вольфрамовых сплавов.

Прочностные и жаропрочные характеристики молибденовых сплавов позволяют применять их в деталях и конструкциях, длительно работающих под нагрузкой при температурах 1500–1700°С и кратковременно – до 2000°С. Одним из направлений применения молибденовых сплавов является использование листовых конструкций в виде экранов, различных накладок, нагревателей и других деталей. В данном случае наиболее высокие требования предъявляются к технологическим характеристикам материала: свариваемости, способности к штамповке, сохранению достаточной пластичности после многократных нагревов выше температуры рекристаллизации. Другой областью применения является использование объемных заготовок, предназначенных для изготовления толстостенных и монолитных конструкций. В этом случае от металла требуется хорошая механическая обрабатываемость и повышенные жаропрочные свойства.

Основным направлением в разработке высокопластичных и технологичных сплавов молибдена является максимально возможная очистка их от примесей внедрения при одновременном введении элементов, упрочняющих твердый раствор. Значительный эффект очистки сплава достигается применением двойного вакуумного переплава, включая электронно-лучевую плавку.

Состав и механические свойства некоторых из разработанных в ВИАМ сплавов приведены в табл. 2.

Повышение жаропрочных свойств молибденовых сплавов достигается гетерогенизацией их структуры путем введения углерода и карбидообразующих элементов. Дополнительное легирование сплавов ниобием и повышение содержания углерода до 0,5% (по массе) приводит к дальнейшему повышению их жаропрочности (табл. 2).

Примером может служить сплав ВМЗ, который при содержании углерода 0,2% (по массе) и суммарном содержании карбидообразующих элементов 3,0–3,5% (по массе) имеет при температуре 1400°C длительную прочность 160 МПа на базе 100 ч.

Таблица 2

Состав и механические свойства молибденовых сплавов

Сплав (полуфабрикат)	Состав, % (по массе)	Температура испытания, °С	σ, МПа	δ, ψ		σ ₁₀₀ , МПа
				%		
ВМ1 (пруток)	(0,08–0,2) Zr+ +(0,01–0,02) С	20	800	18	56	–
		1200	–	–	–	80
		1500	110	54	94	–
		1800	40	62	99	–
ВМ1 (лист)	(0,08–0,2) Zr+ +(0,01–0,02) С	20	850	12	–	–
		1200	360	16	–	–
		1400	–	–	–	25
		1600	–	–	–	16
ВМ2 (пруток)	(0,25–0,4) Zr+ +(≤0,2) Ti+ +(≤0,02) С	20	750	10	30	–
		1200	450	13	80	160
		1500	160	15	70	25
		1800	90	18	–	–
ВМЗ (пруток)	(0,3–0,6) Zr+ +(0,8–1,3) Ti+ +(0,25–0,5) С+ +(1,0–1,8) Nb	20	520	5	8	–
		1400	310	24	50	160
		1800	120	48	6,5	–
ВМВ36 (пруток)	(32–36) W+ +(0,05–0,2) Ti+ +(0,03–0,2) С	20	490	0	0	–
		1800	90	100	87	–
		2100	40	110	92	–

Молибден и его сплавы при работе на воздухе при температурах >600°C легко окисляются с образованием летучих оксидов молибдена, поэтому применение сплавов для изделий, работающих в окислительной среде, зависит от используемых покрытий. Опыт применения различного рода покрытий показал, что лучшими являются покрытия дисилицидного типа. Они обеспечивают защиту молибденовых деталей от окисления до температур 1700–2000°C с ресурсом от нескольких секунд до 100 ч в зависимости от условий их работы. Основными видами покрытий для молибденовых сплавов являются:

- покрытия, состоящие из дисилицида молибдена, легированные с целью повышения термостойкости и пластичности ниобием, хромом, алюминием, титаном и другими элементами;
- покрытия дисилицидного типа с барьерными подслоями, создаваемыми с целью снижения диффузии кремния вглубь металла, и верхними слоями из дисилицидов молибдена и дисилицидов соответствующих металлов;
- комплексные покрытия, состоящие из дисилицидных подслоев и верхних оксидных слоев, наносимых газоплазменным или плазменным напылением;
- безобжиговые покрытия, наносимые напылением, окунанием, обмазкой и т. д., предназначенные для защиты изделий больших габаритов (обшивка и др.); могут наноситься на термодиффузионные покрытия с целью повышения их надежности;
- металлические покрытия (хромовые, хромоникелевые и др.), применяющиеся для защиты изделий, работающих при температурах 900–1350°C.

Все перечисленные виды покрытий практически не влияют на механические и жаропрочные свойства молибденовых сплавов. Большинство из них имеет высокий ко-

эffiциент излучения (0,7–0,8) до температур 1700–2000°C. Некоторые из них могут выполнять роль теплозащиты.

Из рассматриваемых в данной статье металлов «большой четверки» особый интерес представляет ниобий. Являясь аналогом тантала (оба элемента V группы Периодической системы Д.И. Менделеева), ниобий по сравнению с танталом обладает значительно меньшей плотностью (8,6 г/см³ против 16,6 г/см³); имеет относительно небольшой модуль упругости при 20°C (110 ГПа), который практически не меняется вплоть до 1500°C, вследствие чего его сплавы можно применять для нагруженных деталей при высоких температурах [14]. Ниобий по комплексу важнейших физико-химических, механических и технологических свойств является наиболее перспективным материалом для новой техники – обладает высокой прочностью и жаропрочностью. В отличие от многих тугоплавких металлов (W, Mo, Cr и др.), хрупких при комнатной температуре, чистый ниобий имеет высокую пластичность при комнатной и отрицательных температурах (до -196°C) и исключительные технологические свойства; прекрасно деформируется в холодном состоянии, допуская обжатия до 90%. По способности к ковке, штамповке он стоит в ряду наиболее пластичных металлов. В отличие от молибдена и вольфрама ниобий сваривается всеми видами сварки, хорошо паяется [15]. Ниобий весьма стойкий материал в условиях облучения γ -лучами, обладающий малой величиной поперечного захвата тепловых нейтронов и высоким сопротивлением термической усталости. Все указанные свойства делают ниобий и его сплавы ценным конструкционным материалом для использования в атомной энергетике и ракетной технике.

В табл. 3 приведены составы и свойства некоторых ниобиевых сплавов, разработанных в ВИАМ. Сплавы относятся в основном к системам Nb–Mo–Zr и Nb–W–Zr, в которые для создания гетерофазной структуры введен углерод в количестве 0,1–0,4% (по массе). Дополнительный прирост жаропрочности ниобиевых сплавов достигается в результате комплексного карбонитридного упрочнения путем введения в сплав при плавке азота в количестве 0,2–0,45% (по массе). Дальнейшее повышение жаропрочности ниобиевых сплавов осуществляли применяя соответствующие режимы деформации и термической обработки. Так, эффективным способом повышения прочностных характеристик в области температур 20–800°C и жаропрочности при температуре $\geq 1100^\circ\text{C}$ является термическая обработка, состоящая из закалки и старения.

Благодаря большим возможностям по легированию ниобия можно рассчитывать на создание на его основе жаропрочных сплавов с повышенной жаростойкостью. Однако в результате проведенных исследований установлено, что легирующие элементы, повышающие жаростойкость – такие как Ti, Cr, Al, Ni, Fe и др., существенным образом снижают жаропрочность сплавов, а в ряде случаев и их технологичность. В связи с этим исследования велись по двум направлениям: разработка жаропрочных ниобиевых сплавов и разработка покрытий для их защиты. Разработано несколько сплавов на основе систем Nb–Ti–Al и Nb–Ti–Mo, обладающих повышенной жаростойкостью, но имеющих низкую жаропрочность ввиду наличия в них титана. Сплав ВН7 (табл. 3), обладающий большой пластичностью и хорошей свариваемостью, может рассматриваться как плакирующий материал для листовых жаропрочных ниобиевых сплавов. Сплав ВН8 при своей достаточно низкой плотности может быть использован для изготовления крупногабаритных сварных экранов и сопел двигателей, работающих в изделиях одноразового действия – в вакууме без защитных покрытий и с защитными покрытиями при температурах до 1500°C. Сплав ВН10 рассматривался как перспективный материал для изготовления лопаток компрессора ГТД с рабочей температурой до 700–750°C.

Таблица 3

Состав и свойства некоторых ниобиевых сплавов

Сплав (полуфабрикат)	Состав, % (по массе)	Температура испытания, °С	σ, МПа	δ	ψ	σ ₁₀₀ , МПа
				%		
ВН2А (лист)	(3,5–4,7) Мо+ +(0,5–0,9) Zr+ +(≤0,08) С	20	850	5	–	–
		1100	450	10	–	150
ВН3 (пруток)	(4,0–5,2) Мо+ +(0,8–2,0) Zr+ +(0,08–0,16) С	20	530	20	75	–
		1100	260	22	80	160
		1200	240	26	85	–
ВН4 (пруток)	(8,5–10,5) Мо+ +(1,0–2,0) Zr+ +(0,25–0,4) С	20	810	16	33	–
		1100	700	14	38	320
		1200	550	15	47	–
		1300	–	–	–	100
ВН6 (пруток)	(8,5–10,5) Мо+ +(2,5–3,5) Zr+ +(0,1–0,2) С+ +(0,2–0,4) N	1500	170	24	30	–
		20	900	14	17	–
		1100	–	–	–	340
		1200	650	9	40	210
ВН7 (лист)	(40–42) Ti+ +(3,0–7,0) Al	1300	–	–	–	120
		1500	280	23	80	–
		20	620	25	–	–
		700	350	20	–	–
ВН8 (лист)	(20–23) Ti+ +(5,0–7,0) Мо+ +(0,7–1,4) Zr	1100	50	100	–	–
		20	620	20	–	–
		700	370	13	–	250
ВН9 (пруток)	(10–15) W+ +(2,5–5,0) Мо+ +(0,8–1,0) Zr	1100	110	46	–	15
		20	630	27	38	–
		1200	310	18	31	140
		1600	150	25	38	–
ВН10 (пруток)	(32–36) Ti+ +(8,0–9,0) Al+ +(3,0–5,0) V+ +(0,5–2,5) Zr	2000	60	45	51	–
		20	1170	14	27	–
		700	940	20	–	28
		800	590	–	–	–

Проблема разработки нового класса высокотемпературных композитов состава Nb–Si, состоящих из ниобиевой матрицы и упрочняющей фазы в составе силицидов ниобия, в настоящее время является крайне актуальной [15]. В качестве легирующих элементов используют хром, гафний, титан. Так, при плотности на уровне 6,6–7,2 г/см³ материал остается работоспособным при температурах на 200°С выше рабочих температур монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов [16–18].

В процессе реализации проекта по созданию и промышленному освоению нового поколения металлических наноструктурированных конструкционных материалов ведутся разработки жаропрочных ниобиевых сплавов на основе системы Nb–Si [19] в области эвтектики Nb–Nb₃Si, технологии изготовления изделий из них, в том числе методом направленной кристаллизации [20].

Как и другие рассматриваемые тугоплавкие сплавы, сплавы на основе ниобия легко окисляются на воздухе при температурах >400°С, в связи с чем они требуют защиты от окисления. При этом следует иметь в виду, что вследствие высокой растворимости кислорода в ниобии, кроме получения на поверхности оксидов ниобия, всегда имеет место растворение кислорода в металле, что приводит к повышению его твердости и охрупчиванию. Наиболее распространенными покрытиями для ниобиевых спла-

вов являются термодиффузионные покрытия систем Cr–Ti–Si, Cr–Al–Si, Cr–Ti–Si–Fe–V и ряд других, наносимых из шликера или в виде порошков. Разработанные для ниобиевых сплавов покрытия обеспечивают их работоспособность при температурах 1100–1200°C на спокойном воздухе в течение 150–800 ч. Указанные покрытия предназначены для защиты относительно небольших по габаритам деталей. Конкретный состав покрытия и технология его нанесения выбираются с учетом конфигурации деталей и условий их эксплуатации. Крупногабаритные детали типа теплозащитных экранов, сопел и др. не могут быть защищены термодиффузионными методами. Их изготавливают из плакированного (сплавом ВН8) ниобиевого сплава с последующим нанесением на готовую конструкцию силицидных покрытий методом плазменного или газоплазменного напыления.

Следует иметь в виду, что кроме описанных выше представителей «большой четверки», особое место среди тугоплавких металлов занимает хром как металл, имеющий наиболее высокое сопротивление газовой коррозии. Высокая температура плавления (1870°C) и сравнительно низкая плотность (7,2 г/см³) делают хром весьма привлекательным для использования в качестве конструкционного материала в газотурбостроении. Среди разработанных в настоящее время сплавов на основе хрома можно выделить две группы сплавов: малолегируемые (представителем которой является сплав ВХ2И) и высоколегируемые (сплав ВХ4). Состав и механические свойства этих сплавов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Состав и свойства некоторых сплавов на основе хрома

Сплав (полуфабрикат)	Состав, % (по массе)	Температура испытания, °С	σ , МПа	δ , %	КСУ, кДж/м ²	σ_{100} , МПа
ВХ2И (лист)	(0,1–0,2) Ti+ +(0,1–0,35) V+ +(0,3–0,06) Y	20	350	3	10	–
		800	270	35	450	–
		1300	50	25	200	20
ВХ4 (лист)	(0,08–0,25) Ti+ +(0,1–0,4) V+ +(1,0–3,0) W+ +(31–35) Ni	20	1000	9	50	–
		800	530	14	350	–
		1150	45	35	300	5

Существенным недостатком хрома является его природная хрупкость, однако эта проблема в значительной степени решена и созданы сплавы, способные работать в изделиях авиационной техники [21]. Хром и его малолегируемые сплавы практически не используются в серийном производстве в качестве конструкционного материала. Высоколегируемый сплав ВХ4 длительное время применяется для изготовления различного типа форсунок, завихрителей горючей смеси и устройств, обеспечивающих ламинарный поток продуктов горения в двигателе. Сплав обладает высокой коррозионной стойкостью в продуктах горения высокосернистого дизельного топлива. В серийном производстве хром и его сплавы используются в качестве покрытий для повышения износостойкости трущихся деталей и узлов, стойкости ударного инструмента. Общеизвестно применение электролитического, плазменного и газового хромирования для повышения коррозионной стойкости деталей различного назначения. Хром и его специальные сплавы нашли широкое применение в серийном производстве различных современных приборов. Например, Россия является монополистом в производстве мессбауэровских источников, применяемых в качестве гамма-излучателей в гамма-резонансной спектроскопии [22].

Результаты

В диапазоне температур от 1300 до 2500°C лидером является вольфрам, применение которого возможно вплоть до 3000°C, что позволяет считать его наиболее тугоплавким металлом из рассматриваемой группы. Основной проблемой при практическом применении вольфрама и сплавов на его основе является хрупкость. Повышения пластичности удалось добиться посредством введения в состав сплава 25–27% (по массе) Re и 3,0–5,0% (по массе) Mo, что в значительной степени повысило стоимость сплава и изделий из него, однако такого рода легирование позволяет проводить ковку сплава с последующей прокаткой для получения проката различного сортамента – от листовых заготовок и лент до фольги, а также прутков, трубок, проволоки.

Далее в ряду тугоплавких металлов и сплавов находится молибден. По своим прочностным и жаропрочным свойствам сплавы на основе этого металла могут использоваться в составе деталей и конструкций, длительно работающих под нагрузкой при температурах 1500–1700°C и кратковременно – до 2000°C. Так, сплав ВМЗ, содержащий углерод в количестве 0,2% (по массе), а также карбидообразующие элементы на уровне 3,0–3,5% (по массе), имеет при температуре 1400°C длительную прочность 160 МПа на базе 100 ч.

Ниобий обладает высокой прочностью и жаропрочностью, прекрасно деформируется в холодном состоянии, сваривается всеми видами сварки, хорошо паяется, причем его механические свойства остаются практически неизменными вплоть до 1500°C. Это в совокупности делает его ценным конструкционным материалом для использования в атомной энергетике и ракетной технике. Сплав ВН7, содержащий 40–42% (по массе) Ti и 3,0–7,0% (по массе) Al, высокопластичен, обладает хорошей свариваемостью и может рассматриваться как плакирующий материал для листовых жаропрочных ниобиевых сплавов. Сплав ВН8, в который введены 20–23% (по массе) Ti, 5,0–7,0% (по массе) Mo и 0,7–1,4% (по массе) Zr, обладая относительно низкой плотностью, может быть использован для изготовления крупногабаритных сварных экранов и сопел двигателей, работающих в изделиях разового действия в вакууме при температурах до 1500°C. Сплав ВН10, содержащий 32–36% (по массе) Ti, 8,0–9,0% (по массе) Al, 3,0–5,0% (по массе) V и 0,5–2,5% (по массе) Zr рассматривался как перспективный материал для изготовления лопаток компрессора ГТД с рабочей температурой до 700–750°C.

Особо следует отметить хром, который, имея высокую температуру плавления (1870°C), может использоваться как конструкционный материал в газотурбостроении. Выделяют низколегированный сплав марки ВХ2И, содержащий 0,1–0,2% (по массе) Ti, 0,1–0,35% (по массе) V, 0,3–0,06% (по массе) Y, 0,08–0,25% (по массе) Ti, и высоколегированный сплав марки ВХ4, содержащий 0,1–0,4% (по массе) V, 1,0–3,0% (по массе) W, 31–35% (по массе) Ni, высокая коррозионная стойкость в продуктах горения высокосернистого дизельного топлива которого обеспечила его применение для изготовления различных типов изделий, стойких к воздействию продуктов горения.

Обсуждение и заключения

При рассмотрении возможности применения металлов «большой четверки» и сплавов на их основе, следует учесть тот факт, что эти металлы обладают очень низкой жаростойкостью и могут использоваться без защитных покрытий при высоких температурах только в нейтральных или восстановительных средах, вакууме, а также в среде некоторых расплавленных металлов. При использовании тугоплавких металлов в окислительной среде при высоких температурах на них необходимо наносить специальные защитные покрытия. По этой причине одновременно с разработкой новых композиций сплавов стоит задача по усовершенствованию защитных покрытий для них, поскольку ни одно из существующих в настоящее время покрытий не обеспечивает гарантированной

защиты изделий от высокотемпературной газовой коррозии. Решением этой сложной технологической проблемы может быть, например, создание многослойных композиций, в которых каждый слой выполняет различные функции – соединительные, оксидообразующие, теплозащитные и др. [23].

ЛИТЕРАТУРА

1. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2006. 632 с.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.02.2015).
4. Колобов Ю.Р., Каблов Е.Н., Козлов Э.В. и др. Структура и свойства интерметаллидных материалов с наночастицами упрочнением. М.: МИСиС, 2008. 328 с.
5. Столянков Ю.В. Жаропрочные металлические композиционные материалы конструкционного назначения на основе интерметаллидов никеля (обзор) // *Композиты и наноструктуры*. 2016. №4 (в печати).
6. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // *Редкие земли*. 2014. №3. С. 8–13.
7. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. матер.; 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
8. 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.
9. Гращенков Д.В., Щетанов Б.В., Ефимочкин И.Ю. Развитие порошковой металлургии жаропрочных материалов // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2011. №5. С. 13–26.
10. Гращенков Д.В., Щетанов Б.В., Ефимочкин И.Ю. Развитие порошковой металлургии жаропрочных материалов // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2011. №6. С. 10–20.
11. Савицкий Е.М., Поварова К.Б., Макаров П.В. Металловедение вольфрама. М.: Металлургия, 1978. 223 с.
12. Савицкий Е.М., Бурханов Г.С. Металловедение сплавов тугоплавких и редких металлов. М.: Наука, 1971. 352 с.
13. Гаврилюк М.И., Подъячев В.Н. Исследование свойств сплавов вольфрама, легированных углеродом, танталом, ниобием и цирконием // *МиТОМ*. 1975. №4. С. 24–27.
14. Захарова Г.В., Попов А.И., Жорова А.П., Федин Б.В. Ниобий и его сплавы. М.: Металлургиздат, 1961. 380 с.
15. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Ефимочкин И.Ю. Высокотемпературные Nb–Si-композиты // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2011. №SP2. С. 164–173.
16. Светлов И.Л. Высокотемпературные ниобий-кремниевые композиты – замена монокристаллическим никелевым жаропрочным сплавам // *Двигатель*. 2010. №5. С. 36–37.
17. Светлов И.Л. Высокотемпературные ниобий-кремниевые композиты // *Материаловедение*. 2010. №9. С. 29–38.
18. Светлов И.Л. Высокотемпературные ниобий-кремниевые композиты // *Материаловедение*. 2010. №10. С. 18–27.

19. Карпов М.И., Внуков В.И., Коржов Т.С. и др. Структура и механические свойства жаропрочного сплава системы Nb–Si эвтектического состава, полученного методом направленной кристаллизации // Деформация и разрушение материалов. 2012. №12. С. 2–8.
20. Кузьмина Н.А., Бондаренко Ю.А. Исследование фазового состава и структуры ниобий-кремниевого композита, полученного методом направленной кристаллизации в жидкометаллическом охладителе // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №5. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.06.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-3-3.
21. Воронин Г.М., Кишкин С.Т., Панасюк И.О., Подъячев В.Н., Сивакова Е.В. Тугоплавкие сплавы в изделиях авиационной и космической техники // Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков: науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 1994. С. 264–273.
22. Подъячев В.Н., Демонис И.М., Баранова О.А. Лаборатория тугоплавких сплавов ВИАМ и ее первый руководитель А.С. Строев. К 55-летию со дня организации // История науки и техники. 2013. №4. С. 19–25.
23. Кашин Д.С., Стехов П.А. Защитные покрытия для жаропрочных сплавов на основе ниобия // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №6. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.09.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-1-1.