

PACS numbers: 62.20.Qr, 81.05.Ni, 81.30.Vx, 81.40.Pq

Износостойкость кобальт-карбидного эвтектического сплава в условиях газодинамического нагружения

Г. П. Дмитриева, Т. С. Черепова

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Акад. Вернадского, 36,
03680, ГСП, Киев-142, Украина*

В условиях равновесной эвтектической кристаллизации сплавов системы Co–Nb–Ti–C получен литой композит на основе кобальта с дисперсными частицами карбида (NbTi)C. Показано, что при динамическом контактном нагружении в интервале температур от 20 до 1000°C в агрессивной среде сгорания авиационного топлива эвтектический композит обладает высокой износостойкостью и может использоваться в качестве наплавочного материала, защищающего торцы бандажных полок рабочих лопаток турбины ГТД и ТВД от износа.

В умовах рівноважної евтектичної кристалізації стопів системи Co–Nb–Ti–C одержали ливарний природний композит на основі кобальту з дисперсними частинками карбиду (NbTi)C, який при динамічному контактному навантаженні в інтервалі температур від 20 до 1000°C в агресивному середовищі згоряння авіаційного палива має високу зносостійкість, що уможливило використовувати його як наплавочний матеріал для захисту контактувальних поверхонь робочих лопаток турбін ГТД та ТВТ від зношування.

The wear-resistant cobalt-based eutectic alloy with dispersed (Nb,Ti)C carbide particles is fabricated in condition of equilibrium eutectic crystallization of cobalt-carbide-system alloys for protection of the turbine-bucket bandage shells at high temperatures in the stream of the combustion residue of aviation fuel.

Ключевые слова: износостойкость, эвтектика, сплавы кобальта с карбидами, газотурбинные двигатели.

(Получено 1 июля 2013 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Ресурс авиационных двигателей в значительной мере определяется

надежной работой газовой турбины, ответственнейшими деталями которой являются рабочие лопатки, работоспособность которых во многом зависит от величины износа торцов их бандажных полок. Контактующие поверхности верхних бандажных полок являются одним из наиболее повреждаемых элементов рабочих лопаток турбины [1]. Износ бандажной полки на 0,5 мм вызывает почти десятикратное повышение вибрационных напряжений в пере лопатки, что может привести к усталостному разрушению последней и отказу двигателя в целом. Для защиты контактирующих поверхностей лопаток турбины от износа применяется литейный никелевый сплав ВЖЛ2, разработанный в ВИАМ [2], плавящийся в интервале 1240–1280°C, используемый при температурах до 900°C.

Задача исследования состояла в получении износостойкого материала для защиты торцов бандажных полок рабочих лопаток турбины высокого давления (ТВД) от износа при температуре выше 900°C.

В качестве основы сплава с требуемыми свойствами предпочтителен кобальт, поскольку по комплексу физико-механических и служебных свойств, в том числе высокотемпературной прочности, сопротивлению высокотемпературной коррозии на воздухе, свариваемости и износостойкости при повышенных температурах кобальтовые сплавы в качестве основы жаропрочных материалов являются более перспективными, чем никелевые [3].

Повышенной износостойкостью обладают материалы, у которых высокопрочная фаза диспергирована в относительно мягкой и пластичной матрице. Такие структуры в сплавах достигаются при кристаллизации эвтектик в системах кобальта с тугоплавкими карбидами. С термодинамической точки зрения эвтектические материалы исключительно стабильны в силу равновесных условий кристаллизации [4, 5]. При кристаллизации равновесной эвтектики формируется структура композита, в котором металлическая матрица армирована равномерно распределенными дисперсными кристаллами тугоплавкого карбида с толщиной, не превышающей 1 мкм. Металлическая основа сплава равномерно распределяет воспринимаемую нагрузку на карбидные кристаллы и придает ему вязкость, а карбидные кристаллы создают сопротивление перемещению дислокаций в объеме эвтектического зерна, обеспечивая прочность и износостойкость. Такие материалы отличаются стабильностью структуры и фазового состава вплоть до температур близких к температуре плавления, не требуя деформационной и термической обработки, а их износостойкость зависит от количества карбидной фазы [6].

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Сплавы для исследования были изготовлены дуговой плавкой нерас-

ходуемым вольфрамовым электродом в атмосфере очищенного аргона. В качестве шихтовых материалов использовали кобальт марки К0 (99,98%), хром электролитический ЭРХ (99,5%), титан йодидный ТИ-1 (99,9%), ниобий НБШ-00 (99,98%), алюминий марки А-995 (99,95%), вольфрам ПВТ (99,95%), молибден МШЧ-1 (99,98%), спектрально чистый графит.

Микроструктуру исследовали с помощью светового оптического микроскопа Neofot-32. Определение температур ликвидуса и солидуса в исследуемых сплавах выполнено методом дифференциального термического анализа (ДТА) на термоанализаторе ВДТА-8МЗ в атмосфере высокочистого гелия при контролируемой скорости нагрева–охлаждения от 20 до 80°/мин. Фазовый состав образцов установлен рентгенофазовым анализом на дифрактометре HZG-4 в $\text{CrK}\alpha$ -излучении по стандартной методике. Состав полученных сплавов контролировали методом флуоресцентного рентгеноспектрального анализа на спектрометре VRA-30.

Износостойкость определяли на газодинамическом стенде, в условиях максимально приближенных к условиям работы торцов бандажных полок рабочих лопаток газотурбинного двигателя по нагрузкам, уровням ускорений, скоростям нагрева и охлаждения, частотой вибраций, газовой среде (по методике [7]). Исследования проведены в изотермических условиях при температурах 20, 500, 800 и 1000°С и нагрузке 47 МПа.

Сплавы для промышленных испытаний выплавляли методом индукционной плавки в набивных тиглях из окиси алюминия или из окиси циркония. Плавка велась в атмосфере инертного газа — аргона или гелия с выдержкой на максимальном режиме расплавленного металла в течение пяти минут после полного растворения шихтовых материалов с целью полного перемешивания и усреднения состава сплава. Расплав выливали в стальную изложницу при температуре, на 200–300° превышающей температуру плавления сплава. Испытания в полетных условиях проведены с участием ГП ЗМКБ «ПРОГРЕСС» и ОАО «Мотор-Сич» (г. Запорожье).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Долю карбидной фазы в эвтектике для обеспечения высокой износостойкости можно увеличить, используя условия кристаллизации сплавов в системах кобальта с двумя монокарбидами тугоплавких металлов: $\text{Co-Me}'\text{C-Me}''\text{C}$ (где Me' и Me'' — металлы IVA и VA подгрупп). Такие системы имеют диаграммы состояния либо с невариантным эвтектическим равновесием, либо с моновариантным эвтектическим равновесием [8, 9]. Температура плавления тройной эвтектики, образующейся в случае невариантной эвтектической кристаллизации существенно ниже температуры плавления эвтек-

тик в граничных системах Co–MeC. В случае же моновариантной эвтектической кристаллизации температура плавления эвтектики в квазитройной системе возрастает от более легкоплавкой к менее легкоплавкой, а объемная доля карбида в эвтектике увеличивается.

При анализе условий кристаллизации сплавов установлено, что сплавы системы Co–NbC–TiC с моновариантной эвтектической реакцией кристаллизации наиболее полно отвечают требованиям получения на их основе композиционного износостойкого материала. На рисунке 1 представлено политермическое сечение диаграммы плавкости системы Co–NbC–TiC при отношении NbC:TiC = 1 [10], откуда следует, что температура плавления псевдобинарных двухфазных сплавов, фазовыми составляющими которых являются твердый раствор на основе кобальта и карбид (NbTi)C, находится в интервале 1390–1410°C, а содержание карбидной фазы в эвтектике составляет 10–11% мол. (12–13% масс.).

Комплекс легирующих элементов для упрочнения кобальтовой основы сплавов определен экспериментально в пределах (% масс.): 20–25% Cr, 1–3% Mo, 2–4% W, 1–2% Al с учетом того, что молибден повышает характеристики пластичности кобальта при кратковременном растяжении и испытаниях на длительную прочность, хром стабилизирует поверхность и участвует в карбидообразовании, вольфрам существенно упрочняет твердый раствор; алюминий усиливает поверхностное сопротивление окислению и горячей коррозии (до 700°C) [11]. При этом расчетное содержание углерода в сплавах, реализующее возможность получения достаточного количества карбидной фазы, превышало 2%.

Согласно данным ДТА, рентгенофазового (РФА) и микроструктурного (МСА) анализов легирование снижает температуру плавления до 1320–1340°C (см. табл. 1), не изменяя фазового и структур-

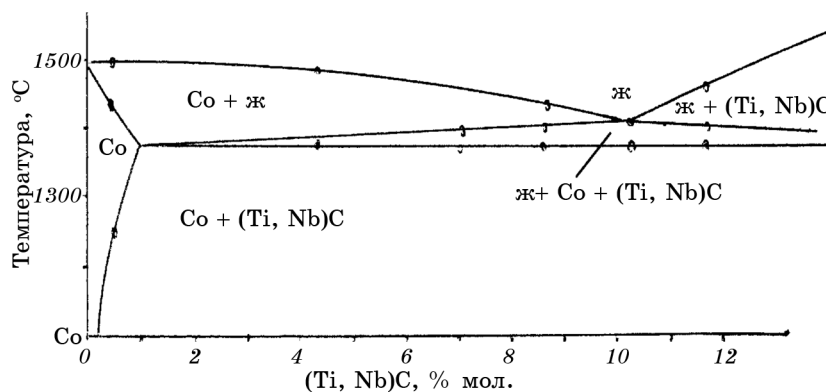


Рис. 1. Система сплавов Co–NbC–TiC — политермическое сечение 1–1 при постоянном соотношении содержания карбида.

ного состояния сплавов. Такое снижение вполне допустимо, так как существенно превышает рабочие температуры лопаток турбины ГТД и температуры технологических операций с ними, в частности использование припоев ВПр22, ВПр24 или ВПр36 при температуре 1280°C для наплавки пластин из износостойкого сплава на торцы бандажных полок.

Пригодность псевдобинарного эвтектического композита $Co + (NbTi)C$ для получения высокотемпературного износостойкого материала определяли испытаниями, проведенными на газодинамическом стенде ДКН-1, предназначенном для опробования конструктивно-технологических способов повышения износостойкости деталей в условиях динамического контактного нагружения при повышенных температурах в агрессивной среде сгорания авиационного топлива [12]. При этом в зоне контакта сопряженных деталей в результате сложной совокупности процессов трения протекают процессы схватывания, высокотемпературного окисления и усталостные процессы. Определяли величину объемного износа $I_V \cdot 10^6$ мм³/цикл за один цикл колебаний с базой испытаний $0,5 \cdot 10^6$ циклов, амплитудой взаимного перемещения 0,696 мм, частотой 33 Гц, при удельной нагрузке в контакте 47 МПа и при температурах от комнатной до 1000°C. Истинной величиной износа принимали среднее из трех измерений. Результаты испытаний отражены в табл. 1, где представлены температура плавления, износ (величина обратная износостойкости) и шихтовое содержание карбида в легированных разработанным комплексом элементов сплавах.

Испытания проводилось на серийных лопатках, снятых с двига-

ТАБЛИЦА 1. Объемный износ кобальт-карбидных легированных сплавов и ВЖЛ-2.

№ сплава	Объемная доля (NbTi)C, % мас.	Износ $I_V \cdot 10^6$ мм ³ /цикл при нагрузке 47 МПа,				Температура плавления ($\pm 10^\circ\text{C}$)
		20°C	500°C	800°C	1000°C	
1	8,0	2,9	–	–	–	1320
2	11,2	1,35	–	–	–	1330
3	13,7	1,35	–	–	–	1330
4	14,0	0,35	–	–	3,7	1320
5	15,8	0,60	–	–	–	1340
6	16,5	0,61	0,538	0,33	1,19	1340
7	16,7	0,75	–	–	2,7	1330
8	19,7	2,0	–	–	–	1330
ВЖЛ-2	–	–	1,35	0,95	4,5	1250

телей. С целью экономии энергетических затрат все исследуемые сплавы были испытаны при комнатной температуре, а наиболее износостойкие из них — при повышенных температурах. Для сравнения в табл. 1 приведены данные по износу применяемого серийного сплава ВЖЛ-2, испытанного в тех же условиях.

Из полученных результатов следует, что повышение температуры испытаний является существенно влияющим на износостойкость фактором и сопровождается усилением интенсивности изнашивания.

Результаты испытаний в специфических условиях высокотемпературного газодинамического нагружения свидетельствуют также о влиянии количества дисперсных карбидных частиц на износ исследованных сплавов. Сплавы с содержанием карбида $(\text{NbTi})\text{C}$ меньшим 14% масс. по причине недостаточного количества упрочняющей карбидной фазы (рис. 2, *а*) заметно изнашиваются (см. табл. 1). Увеличение содержания равноосных карбидных кристаллов в структуре материала сопровождается увеличением износостойкости, достигающей максимума в сплавах со структурой квазиэвтектики (рис. 2, *б*) при содержании 16–17% масс. $(\text{NbTi})\text{C}$, что определяется суммарным вкладом в упрочнение сплавов как эвтектических, так и первичных карбидных кристаллов (рис. 2, *б*). Дальнейшее увеличение объемной доли карбида приводит к некоторой потере свойств, что по данным микроструктурных исследований может быть вызвано частичным выкрошиванием при трении присутствующих в структуре крупных карбидных зерен дендритов, характерных для строения заэвтектических сплавов (рис. 2, *в*).

Исследование физико-механических характеристик полученного эвтектического композита показало существенное его преимущество перед используемым никелевым серийным сплавом ВЖЛ-2: износостойкость в 4 раза выше в аналогичных условиях испыта-

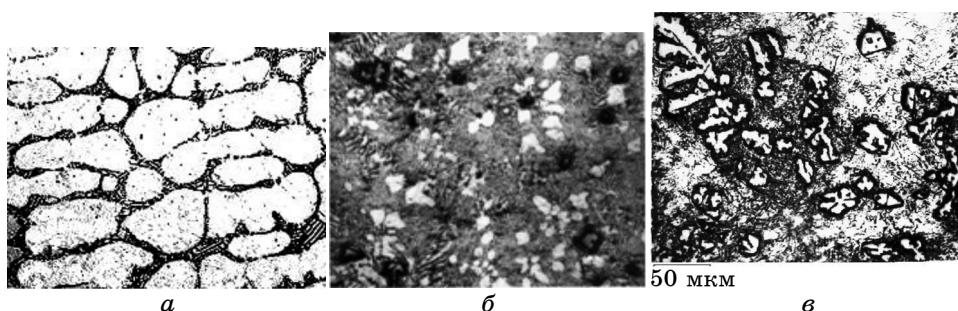


Рис. 2. Микроструктура легированных сплавов системы Co-NbC-TiC : *а* — доэвтектическая (сплав № 1), *б* — квазиэвтектическая (сплав № 6), *в* — заэвтектическая (сплав № 8).

ний, температура плавления порядка 1320°C и дифференциальный термический анализ фиксирует отсутствие каких-либо превращений в материале вплоть до температуры плавления в отличие от сплава ВЖЛ-2. Фазовый состав и структура стабильны до температур, превышающих рабочие температуры лопаток ТВД. Жидкотекучесть сплава делает возможным изготовление из него пластин методом точного литья, по конфигурации соответствующих форме контактных поверхностей бандажных полок. Свойства материала не изменяются при термообработке. Сплав защищен патентом [13], сертифицирован, определен техническими условиями промышленного производства, зарегистрированными в Госстандарте Украины.

Внедрение разработанного сплава под маркой ХТН-37 в производство авиационных двигателей в качестве наплавочного материала для защиты от износа наиболее повреждаемых элементов рабочих лопаток турбины — контактирующих поверхностей (торцов) верхних бандажных полок проведено совместно с предприятием ГП ЗМКБ «Прогресс» им. А. Г. Ивченко г. Запорожья. Ресурс полноразмерного двигателя Д18Т самолета АН 124 («Руслан») с рабочими лопатками ТВД, упрочненными сплавом ХТН-37, при полетных испытаниях составил 1150 циклов, что эквивалентно 4000 полетным часам. Серийный сплав ВЖЛ-2 прошел полетные испытания в аналогичных условиях на гарантийный ресурс 1000 часов [14]. Всесторонний анализ послеполетного состояния наплавленных пластин из кобальт-карбидного композиционного материала ХТН-37 показал его структурную и фазовую стабильность и отсутствие явных признаков окислительных процессов на его поверхности.

Кобальт-карбидные композиционные материалы на основе эвтектик, разработанные в ИМФ им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, являются предпочтительными материалами данного назначения в Украине и в России [15].

4. ВЫВОДЫ

Высокотемпературная износостойкость материала, полученного при равновесной кристаллизации эвтектики в системе Co-(NbTi)C обусловлена эвтектической структурой, в которой легированный твердый раствор на основе кобальта армирован дисперсными кристаллами карбида (NbTi)C, объемная доля которых составляет $\cong 16\%$. Фазовая и структурная стабильность, температура плавления, превышающая 1300°C, в сочетании с разработанной системой легирования резко снижают износ материала в специфических условиях динамического контактного нагружения в агрессивной среде сгорания авиационного топлива при температуре испытаний до 1000°C, что делает возможным применение его в качестве наплавочного материала ХТН-37 для повышения износостойкости торцов

бандажных полок рабочих лопаток ГТД и ТВД и увеличения гарантийного ресурса их эксплуатации.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Л. И. Ивченко, А. Я. Качан, *Вестник двигателестроения*, № 2: 160 (2008).
2. *Сплавы жаропрочные литейные вакуумной выплавки (ОСТ 1-90126-85)*.
3. *Жаропрочные сплавы для газовых турбин* (Ред. Р. Е. Шалин) (Москва: Металлургия: 1981).
4. Ю. Г. Гуревич, В. Н. Анциферов, Л. И. Савиных и др., *Износостойкие композиционные материалы* (Екатеринбург: УрО РАН: 2005).
5. М. И. Патечко, В. М. Голубец, М. В. Чернец, *Формирование и фрикционная стойкость эвтектических покрытий* (Киев: Наукова думка: 1993).
6. И. И. Портной, Б. Н. Бабич, И. Л. Светлов, *Композиционные материалы на никелевой основе* (Москва: Металлургия: 1979).
7. Й. Івченко, А. Г. Андрієнко, *Металознавство та обробка металів*, № 3: 62 (1996).
8. А. К. Шурин, Г. П. Дмитриева, Т. С. Черепова, *Порошковая металлургия*, № 11/12: 44 (1996).
9. А. К. Шурин, Г. П. Дмитриева, Т. С. Черепова, *Порошковая металлургия*, № 3/4: 86 (1997).
10. Г. П. Дмитриева, Т. С. Черепова, А. К. Шурин, *Порошковая металлургия*, № 4: 78 (1991).
11. *Суперсплавы II. Кн. 1* (Ред. Ч. Т. Симс, Н. С. Столофф, У. К. Хагель) (Москва: Металлургия: 1995),.
12. Л. И. Ивченко, А. Я. Качан, *Вестник двигателестроения*, № 2: 160 (2008).
13. А. К. Шурин, Г. П. Дмитриева, Т. С. Черепова и др., *Сплав на основе кобальта*, Патент Украины UA 8240A, C 22с 19/07 (Опубл. 29.03.96) (Бюл. № 1).
14. В. Л. Леонтьев, С. Д. Зиличихис, Э. В. Кондратюк, *Вестник двигателестроения*, № 4: 113 (2006).
15. Г. И. Пейчев, В. Е. Замковой, Н. В. Андрейченко, *Вестник двигателестроения*, № 2: 123 (2009).