

УДК 621.793

Е.К. Фень

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Рассмотрены основные физико-механические свойства жароизносостойких и жарокоррозионностойких покрытий, нанесенных детонационным и сверхзвуковым плазменным методами. Показано, что перспективными методами нанесения таких покрытий являются детонационный и сверхзвуковой плазменный.

Детали авиационной техники работают в различных условиях эксплуатации: агрессивной среде, низких и высоких температурах, различных знакопеременных нагрузках, высоких скоростях и т.п. Поэтому для каждого вида условий работы деталей и конструкций требуется свой материал покрытия. Для износостойких покрытий, в основном, целесообразно использовать материалы на основе самофлюсов (Ni-Cr-B-Si-C) с добавками других металлов, карбидов титана и хрома с рабочими температурами до 700 – 750 °С. Такие материалы значительно практичнее покрытий на основе карбида вольфрама со связкой из кобальта или никеля (типа ВК-20 или ВН-20) с рабочей температурой до 500 – 540 °С.

Введение алюминия в состав материала покрытия на основе самофлюсов позволяет получать повышенную прочность сцепления покрытия с основой, так как, взаимодействуя с никелем в процессе напыления, он образует соединение типа NiAl. Медь в составе материала покрытия способствует увеличению его износостойкости, т.е. является сухой смазкой. Такую же функцию выполняет дисульфид молибдена при комнатной и повышенных температурах. Введение молибдена в состав покрытия приводит к взаимодействию его с никелем в процессе напыления с образованием γ и β -фаз (MoNi_3 , Mo_3Ni_4), выделением боридов никеля, которые обеспечивают более высокую твердость материала покрытия. Марганец в составе материала покрытия способствует при быстром охлаждении расплава образованию аморфно-микроструктурной структуры покрытия. Карбид титана увеличивает износостойкость материала покрытия как при комнатной, так и повышенных температурах, и улучшает прочность сцепления покрытия с основой. Карбид хрома, как и двойной карбид титана и хрома, действует так же, как и карбид титана, но, кроме того, еще и увеличивает жаростойкость покрытий.

Для жаростойких покрытий применяют материалы на основе Ni-Cr-Co-Al-Y с различными добавками других металлов или соединений с рабочими температурами до 900 – 1000 °С, материал типа ВКНА (ТУ 14-1-1790-76) с рабочей температурой до 850 °С. Систематизации по назначению и использованию таких материалов покрытий нет.

Жаростойкие и жарокоррозионностойкие покрытия с рабочей температурой до 1000 – 1200 °С разработаны на основе нихрома и редкоземельных материалов с введением в их состав различных металлов, металлоидов и тугоплавких соединений.

Для увеличения износостойкости покрытий применяют медь, кремний, карбиды титана, ванадия, вольфрама, хрома, нитриды алюминия, кремния, бора, дисульфид молибдена.

Прочность сцепления покрытия с основой повышается за счет применения тугоплавких переходных металлов III-VI групп, жаростойкость, термостойкость и коррозионная стойкость покрытий – за счет применения металлов (гафний, тантал, вольфрам), металлоидов (кремний, бор) и боридов, которые способствуют получению

аморфно-микроструктурных структур. Окислительную стойкость покрытиям придает оксид кремния и сам кремний, который при высоких температурах окисляется и образует оксид SiO_2 .

Износостойкие порошки получали методом распыления из расплавов входящих в них компонентов (металлов и металлоидов) и в дальнейшем механическим смешиванием распыленного материала и карбидов в специальных смесителях. Жаростойкие и жарокоррозионностойкие порошки материалов получали методом распыления основных компонентов и в зависимости от входящих в них элементов и соединений методом плакирования или конгломерирования.

Данные материалы покрытий наносили различными газотермическими методами на подложки из следующих марок сталей и сплавов: 40Х, ЭИ598, 30ХГСН2А, Х18Н10Т, ВТЗ-1, ЖС6У, ВЖЛ-12У и др.

Для детонационного метода нанесения покрытий использовали установку АДУ-3Сл, где в качестве энергоносителя применяли ацетилено-кислородную смесь с добавками азота, а для сверхзвукового плазменного напыления – установку "Киев-7" с энергоносителями "пропан-бутан – воздух" или "метан – воздух". При получении одинаковых физико-механических свойств покрытий предпочтителен сверхзвуковой плазменный метод, который в 10-15 раз производительнее детонационного и позволяет использовать дешевые газовые смеси.

Детонационный метод целесообразнее применять тогда, когда площадь детали, на которую наносится покрытие, небольшая (например, опора гироскопа), так как при этом расход напыляемого материала значительно меньше, чем при сверхзвуковом напылении.

Обычно для детонационного метода применяют порошки с частицами размером 40 – 60 мкм, а для сверхзвукового плазменного напыления – 60 – 80 мкм. Входящие в состав данных порошков тугоплавкие соединения берут с частицами размером 10 – 40 мкм для их лучшего расплавления в струях детонации или плазмы.

Основные физико-механические свойства материалов покрытий типа ПКТСРЗ, ПНХАИ и ПНХАИТГ (ТУ и ТИ ИПМ 406-52-90, 467-52-90 и 466-52-90) и некоторых других подробно рассмотрены в работах [1 – 9].

Были разработаны износостойкие покрытия (ПНХАБ, ПКТХСРЗ, ПКТСР, ПКТХСР, ПКТХАСР) и жаростойкие материалы (ПНХАИ-І, ПНХАИЛЬ, ПНХАИЛ, ПНХАЛ, ПНХАИМ), на которые получены авторские свидетельства или патенты.

Металлографические исследования были проведены на микроскопе "Neophot-2". Исследования износостойких покрытий показали, что микроструктура их представляет собой условно двухфазную структуру – светлые поля внедрения в серой фазе (с включениями тугоплавких соединений), которые состоят из мельчайших чередующихся между собой слоев. Микроструктура жаро-, износо-, коррозионных покрытий, в основном, имеет слоистый характер.

Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре ДРОН-3,0 в монохроматизированном $\text{Mo}_{\text{K}\alpha}$ излучении. На рентгенограммах износостойких покрытий, полученных детонационным методом, присутствуют линии, принадлежащие фазе с ГЦК-решеткой твердого раствора на основе никеля, и линии фазы с кубической решеткой типа ТiВ, изоморфной структурой алмаза. Данные покрытия, полученные сверхзвуковым плазменным методом, представляют собой аморфно-микроструктурную структуру.

Основу жаро-, износо-, коррозионностойких покрытий составляет γ -твердый раствор хрома в никеле. Пористость покрытий, полученных разными газотермическими методами, составляет 1 – 3 %.

Микротвердость покрытий Нц измеряли на приборе ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76. Для износостойких покрытий светлая фаза всегда имеет микротвердость ниже серой фазы, а

карбидные включения могут иметь твердость до 30 ГПа. Твердость по Роквеллу (HRA) измеряли на приборе ТК-201 по ГОСТ 9013-75. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Образцы с покрытиями толщиной 200 – 250 мкм и шероховатостью поверхности $R_z = 0,63 - 0,32$ испытывали на износ на воздухе при комнатной температуре (при сухом трении скольжении) на машине трения 2070 СМТ-1 (по ГОСТ 26614-85) при нагрузке $P = 1$ МПа и скоростях скольжения $V = 0,03 - 0,7$ м/с и на машине трения МТ-66 при нагрузке $P = 1$ МПа и скоростях скольжения $V = 1 - 2$ м/с с контртелом из сплава ВК-8.

Испытание на износ при фреттинге на воздухе проводили на машине трения МФК-1 [10], используя для этого пару образцов с одноименным покрытием (толщина и шероховатость поверхности покрытия такая же, как и при испытании при сухом трении скольжении). Режимы испытаний: удельная нагрузка $P = 5$ МПа, $P = 20$ МПа, амплитуда виброперемещений $A = 0,1$ мм, $A = 1,0$ мм, частота колебаний $f = 30$ Гц, температура испытаний $T = 20$ °С и $T = 300 - 800$ °С, база испытаний $N = 2,5 - 5 \cdot 10^5$ циклов. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Химическим и рентгеноспектральным анализами установлено, что в условиях сухого трения скольжения на воздухе материал подложки существенно не влияет на закономерность трения и износа износостойких и жаростойких покрытий. При низких скоростях скольжения 0,03 – 0,1 м/с износ больше, чем при скоростях более 0,1 м/с. Увеличение скорости приводит к стабилизации процесса, а при скоростях скольжения 0,3 м/с и более практически не сказывается на изменении характеристик трения и износа исследуемых покрытий, так как при этом устанавливается устойчивое равновесие между процессами активации и пассивирования и таким образом обеспечивается полное подавление процессов схватывания. Образующиеся пленки оксидов (вторичных структур) на поверхности покрытий, являющиеся как бы смазкой, были изучены на электронографе ЭМР-100.

Коэффициенты трения исследуемых покрытий зависят от скорости скольжения на воздухе и мало чем отличаются друг от друга вследствие преобладания окислительного износа. На коэффициент трения покрытий, главным образом, влияют состав и свойства оксидных пленок, образующихся при трении. Коэффициент трения равен 0,2 – 0,35 в зависимости от нагрузки и скорости скольжения. У таких материалов образуется устойчивая оксидная пленка.

Прочность сцепления покрытий (толщиной 200 – 250 мкм) с подложками определяли по методике "конусного штифта" с диаметром иглы в основании 2,0 – 2,5 мм [11]. Данный диаметр иглы обоснован многочисленными исследованиями, которые показали объективную картину сцепления покрытия с подложкой. Меньший диаметр иглы показывает завышенную прочность, а больший – заниженную. Разрушение образцов после испытаний в большинстве случаев носит когезионный характер, т.е. прочность сцепления частиц покрытия между собой была меньше, чем прочность сцепления частиц покрытия с основой. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Жаростойкость покрытий, т.е. кинетику высокотемпературного окисления, изучали методом ДТА на дериватографе "θ-1000" при скорости нагрева 10 °С/мин в интервале температур от 20 до 1000 – 1100 °С. Образцы помещали в керамический тигель с засыпкой из Al_2O_3 для устранения флуктуации теплового потока вблизи рабочей поверхности образца. Были оценены удельное изменение массы образца Δm и скорость окисления $V = \Delta m / \tau$. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Остаточные напряжения в покрытиях определяли методом послойного стравливания напряженных слоев по методу Н.Н. Давиденкова [12]. Во всех материалах покрытий присутствуют напряжения сжатия, максимум которых 300–350 Мпа находится на расстоянии 30–40 мкм от подложки. По мере удаления от подложки остаточные напряжения уменьшаются в направлении поверхности покрытия, где происходит их полная релаксация.

Таблица 1

Твердость и износостойкость покрытий

Материал покрытия	Твердость		Износостойкость						
			при сухом трении скольжения			при износе на фреттинг, мкм			
	H _c	HRA	$V = 0,3 \text{ м/с},$ $P = 1 \text{ МПа},$ $\text{мм}^3/1000 \text{ м}\cdot\text{см}^2$	$V = 1 \text{ м/с},$ $P = 1 \text{ МПа},$ мкм/км	$V = 1 \text{ м/с},$ $P = 2 \text{ МПа},$ мкм/км	$P = 5 \text{ МПа},$ $A = 1 \text{ мм},$ $f = 30 \text{ Гц},$ $T = 20 \text{ }^\circ\text{C},$ $N = 2,5 \cdot 10^5 \text{ цикл.}$	$P = 5 \text{ МПа},$ $A = 1 \text{ мм},$ $f = 30 \text{ Гц},$ $T = 300 - 500 \text{ }^\circ\text{C},$ $N = 2,5 \cdot 10^5 \text{ цикл.}$	$P = 20 \text{ МПа},$ $A = 0,1 \text{ мм},$ $f = 30 \text{ Гц},$ $T = 20 \text{ }^\circ\text{C},$ $N = 5 \cdot 10^5 \text{ цикл.}$	$P = 20 \text{ МПа},$ $A = 1 \text{ мм},$ $f = 30 \text{ Гц},$ $T = 600 - 800 \text{ }^\circ\text{C},$ $N = 2,5 \cdot 10^5 \text{ цикл.}$
ПНХАБ	7,0-7,7	67-68	14	16	20	40	48	8	-
ПКТХСРЗ	7,5-8,5	78	14	15	25	22	40	6	-
ПКТСР	7,5-11,0	78-79	-	-	-	28	34	8	-
ПКТХАСР	6,8-7,8	74	15	9	14	20	25	14	-
ПКТХСР	7,0-8,5	68	-	-	-	30	36	12	-
ПНХАИ-1	5,2-6,5	64-66	-	-	-	-	-	35	7,0
ПНХАИЛБ	6,0-12,3	73	23-24	54	78	16	18	-	5,0
ПНХАИЛ	5,8-7,0	68-69	20-23	25	38	23	24	14	5,5
ПНХАЛ	5,0-6,8	66-68	23-25	68	110	23	29	15	5,5
ПНХАИМ	4,3-5,1	63-65	18-20	72	115	25	28	30	6,0

Таблиця 2

Прочность сцепления и жаростойкость покрытий

Материал покрытия	Прочность сцепления покрытия с основой, МПа					Жаростойкость за 6 ч испытаний, г/м ²	
	Сталь 40Х	ВТЗ-1	ЭИ598	ЖС6У	ВЖЛ-12У	1000 °С	1100 °С
ПНХАБ	45-55	60-67	40-45	-	-	-	-
ПКТХСРЗ	70	68-75	55-60	-	-	-	-
ПКТСР	-	68-70	-	-	-	-	-
ПКТХАСР	-	72	-	-	-	-	-
ПКТХСР	56	-	-	-	-	-	-
ПНХАИ-1	44-46	88-90	48	56-58	-	4,0	7,2
ПНХАИЛБ	46-48	88-96	56	85-88	56	15,0	48,0
ПНХАИЛ	44-50	75-82	68-70	68-70	-	-	-
ПНХАЛ	47-57	74-83	60-66	68-70	56	5,0	11,5
ПНХАИМ	48-53	97-100	70-80	82-88	65-67	0,6	1,1

Результаты всех испытаний, по определению среднего значения физико-механических свойств покрытий, обрабатывались в соответствии с ГОСТ 23.211-80. Изучалась целесообразность применения скандия в жароизносостойких покрытиях в виде легирующих добавок. Разработаны несколько видов сплавов для газотермических покрытий, содержащих скандий или совместно скандий и иттрий [13], метод легирования материалов покрытий не чистым скандием из-за его высокой стоимости на международном рынке, а непосредственно лигатурой (алюминий-скандий) с довольно невысокой рыночной стоимостью. Исследованы некоторые физико-механические свойства покрытий со скандием, которые показали перспективность применения таких материалов в напылении жароизносостойких покрытий.

Рассмотренные материалы для газотермических покрытий и методы их нанесения могут найти широкое применение в авиационной промышленности Украины. За основу получения данных материалов для покрытий выбрана, в основном, сырьевая база Украины.

Список литературы

1. Алфинцева Р.А., Фень Е.К., Рачек А.П., Малышкин В.В. Износостойкость детонационных покрытий на основе самофлюсующегося сплава ПГ-СРЗ// Трение и износ. – 1975. – VI. – №6. – С. 1128 – 1131.
2. Фень Е.К., Алфинцева Р.А., Рачек А.П. Детонационные покрытия из самофлюсующихся сплавов типа ПГ-СРЗ// Технология и организация производства. – 1987. – №3. – С. 53 – 54.
3. Упрочнение деталей ГТД нанесением детонационных покрытий / В.И. Трефилов, Р.А. Алфинцева, Е.К. Фень и др. // Авиационная промышленность. – 1988. – №12. – С. 19 – 20.
4. Безвольфрамовые износостойкие покрытия / Н.М. Кулешов, Е.К. Фень, Р.А. Алфинцева и др. // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Технология авиационного двигателестроения. – 1989. – Вып.1. – С. 41 – 45.
5. Фень Е.К., Алфинцева Р.А., Прихно И.Г., Рачек А.П. Износостойкость детонационных покрытий из порошков на основе нихрома при сухом трении скольжении// Порошковая металлургия. – 1989. – №6. – С. 86 – 89.
6. Фень Е.К. Износостойкость газотермических жаростойких покрытий на основе композиционных материалов при виброконтантном нагружении, обработанных микроплазменным методом// Защитные покрытия на металлах. – 1992. – Вып.26. – С. 77 – 78.
7. Фень Е.К., Алфинцева Р.А., Фень-Ковалева Д.А. Основные физико-механические свойства износо- и жаростойких газотермических покрытий из материалов на основе нихрома //Порошковая металлургия. – 1997. – №1/2. - С. 123 – 126.
8. Фень Е.К. Композиционные порошковые материалы для газотермического нанесения износостойких и жаростойких покрытий// Тр. междунар. конф. "Упрочнение и защита поверхности газотермическим и вакуумным напылением". – К. – 1990. – С. 86 – 90.
9. Физико-механические свойства покрытий из композиционных материалов, полученных сверхзвуковым плазменным напылением / Е.К. Фень, Р.А. Алфинцева, С.В. Петров и др. // Защитные покрытия на металлах. – 1994. – Вып.28. – С. 61 – 63.
10. Голего И.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. – К: Техніка, 1970. – 271 с.
11. Шаривкер С.Ю., Ляшенко Б.А., Ришин В.В., Астахов Е.А. Исследование прочности сцепления детонационно-напыленных покрытий// Проблемы прочности. – 1973. – №3. – С. 35 – 38.
12. Давиденков Н.Н. Измерение остаточных напряжений// ЖТФ. – Вып.1. – 1931.
13. Фень Е.К. Перспективное использование скандия при создании жароизносостойких газотермических покрытий// Тугоплавкие соединения. Получение, свойства и применение. – К. – Тр. ИПМ НАНУ. – 1999. – С. 114 – 117.

Стаття надійшла до редакції 3 жовтня 2000 року.