

# СОВРЕМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. МАТЕРИАЛЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Абдулкаев Э.Р., Осипов Е.В.  
Оренбургский государственный университет  
Аэрокосмический институт, г. Оренбург

## 1 Коррозионно-эрозионностойкие покрытия

При разработке новых покрытий для газотурбинных двигателей, а в частности для лопаток, которые изготавливаются из стали или титана были созданы коррозионно-эрозионностойкие покрытия. Также создавались композитные покрытия, в основе которых на верхней части внедрялись слои из нитридов (TiN, ZrN), нижней части чистого металла и карбида металла (Ti). Такие покрытия имели толщину от 19 до 22 мкм.

Для увеличения коррозионно-эрозионной стойкости покрытия применили осаждение материала путём ассистирования, что позволило в несколько раз повысить характеристики материала, а для нанослойных материалов этот метод позволил повысить коррозионно-эрозионную стойкость более чем в 10 раз. Большой стойкостью обладают покрытия с толщиной нанослоёв 60-90 нм. Также возможно применение и слоистых покрытий, таблица 1.

Таблица 1 – Коррозионно-эрозионная стойкость и жаростойкость материалов из стали и титанового сплава с покрытием.

Металл + покрытие	Толщина покрытия, мкм	Относительный коррозионный износ	Коррозионная стойкость, (мг/см <sup>2</sup> )	Жаростойкость (100 часов), (мг/см <sup>2</sup> )	Микротвёрдость, МПа
Многослойные покрытия					
ЭП790+TiC+Cr	23	16,4	0,3	0,015	22990
С	25	6,5	0,32	0,015	22900
ЭП790+ВЖЛ+1+Cr	-	1	3,5	0,7	-
Без покрытия					
BT7M+ZrN	17	16,1	0,3	0,153	22900
Без покрытия	-	1	0,6	0,130	-
ЭП766+(NiCrTiAl)+CrC	22	49	1,70	0,151	-
Без покрытия	-	1	4,3	0,307	-
Нанослойные покрытия					
ЭП766+TiN	17	0,1	1,60	0,21	23450
Без покрытия	-	1	0,06	0,27	-

Для сплавов из титана по результатам анализа видно, что наиболее подходящим коррозионно-эрозионным нанослоем является покрытие TiN, для стали NiCrTiAl.

## **2 Жаростойкие покрытия на основе перспективных титановых сплавов**

При использовании титановых сплавов в температурных условиях выше 700°C существует большая вероятность насыщения сплава кислородом. Для предотвращения этого процесса были разработаны жаростойкие покрытия, которые содержат особый барьерный слой, не допускающий химического взаимодействия самого титана от внешнего жаростойкого покрытия. Барьерный слой представляет собой оксид титана или карбид, а в качестве жаростойкого слоя был выбран сплав СДП-1, рисунок 7.



Рисунок 7 – Лопатки компрессора высокого давления из титана.

В результате испытаний было выявлено, что наиболее подходящим покрытием для протекции сплава от насыщения кислородом является

TiO+СДП-1. Такое покрытие имеет наиболее высокую термическую устойчивость и предотвращает испарение с поверхности сплава легирующих элементов.

По специальной методике были испытаны образцы из титанового сплава BT41 на коррозионную стойкость, а также на жаростойкость, таблица 2.

Таблица 2 – Коррозионная стойкость и жаростойкость материалов из титанового сплава BT41

Покрытие	Удельная масса, мг/см <sup>2</sup>	
	Жаростойкость при 600°С	Коррозионная стойкость при 600°С
Без покрытия	0,500	1,220
TiC	1,880	10,09
TiO	1,280	-0,04
СДП-1	0,070	0,140
TiC+СДП-1	0,072	0,063
TiO+СДП-1	0,041	0,049

С целью найти изменения в структуре материала были проведены лабораторные анализы состава сплавов до и после испытаний. Было выявлено, что наибольшую термическую стабильность показало покрытие TiO+СДП-1, так как барьерный промежуток между основным слоем и верхним обеспечивает уменьшение явления диффузии, что приводит к снижению проницательной способности кислорода.

### 3 Материалы с эффектом памяти формы

За последние пятнадцать лет широкое распространение в науке и машиностроении получили интеллектуальные материалы и материалы с памятью формы. Отличительной чертой от других видов материалов является наличие в них специальных датчиков или устройств, которые реагируют на различные изменения внешней среды или непосредственное воздействие на материал. В результате структура материал способна самостоятельно перестраиваться и изменять геометрические параметры.

При температуре фазового превращения, материалам с памятью формы, например никелид титана, придают нужные геометрические параметры, затем геометрию материала могут изменить, а при повторном нагревании он заново приобретёт те параметры, которые были заложены.

Конструкции из таких материалов широко используются в космической технике, авиации, ракетостроении, благодаря этому улучшаются характеристики летательных аппаратов, уменьшается уровень вибраций и шума, а также становится возможным в режиме реального времени отслеживать состояние материала. Из таких материалов создают различные силовые приводы для манипуляторов, прессы статического нагружения, домкратов, саморазворачивающихся антенн для преобразования солнечной энергии, соединения трубопроводов.

Однако есть и минусы, которые не позволяют использовать такие сплавы повсеместно. Существуют трудности в управлении и контроле фазовых превращений, соблюдения точных заданных форм, невозможно точно предсказать, как поведёт себя материал, также усталость и

неспособность в больших количествах перестроений сохранять точную геометрию.

Благодаря термоупругим бездиффузионным изменениям стало возможно получать материалы с памятью формы, рисунок 8. Интерес такие материалы представляют ещё и потому что, после пластической деформации, которые испытывает материал при прикладывании нагрузки, способны восстанавливаться, сохраняя прочностные качества.

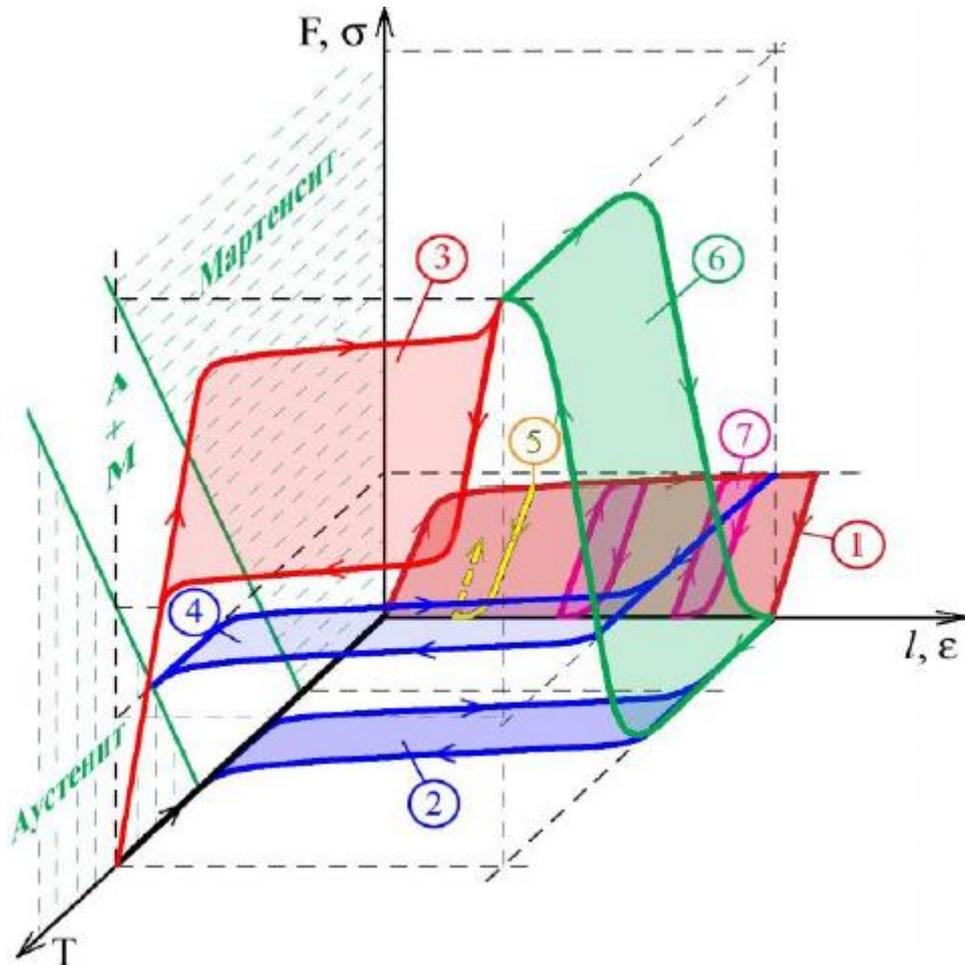


Рисунок 8 – Эффекты памяти формы при мартенситном превращении:

1 – однократный эффект памяти формы; 2 – многократнообратимый эффект памяти формы; 3 – псевдоупругость; 4 – псевдотермичность; 5 – резиноподобный эффект; 6 – создание и затухание реактивных напряжений; 7 – тренировка сплава.

Интересной особенностью материалов с памятью формы является способность сохранять соседство атомов при больших деформациях от 10 до 20 процентов кристаллической решётки, рисунок 9. Такое явление получило название неупругая деформация.

Температурная фаза, при которой материалу задаются геометрические параметры образуется тонкими, определённо ориентированными в плоскости плоскопараллельными пластинками.

Свойства		стали с ЭПФ	Ti-Ni	Cu-Zn-Al
Физические	Температура плавления, °С		1300	950-1020
	Плотность, г/см <sup>3</sup>		6,5	7,8-8,0
	Теплопроводность 20°С		8,6(М);18(А)	84 - 120(А)
	Коэффициент температур.расширения		6,6(М);11(А)	17(А)16-18(М)
	Коррозионная стойкость	высокая	высокая	удовл. (Al, бр.)
	Биосовместимость	хорошая	высокая	низкая
Механические	Предел прочности, МПа	до 1600	800-1100	400-800
	Удлинение при разрыве, %	30	15,5-20 (А) 40-50 (М)	10-15 (М)
	Предел текучести, МПа	до 1100	50-300 (М) 100-800 (А)	150-300 (М) 150-350 (А)
	Модуль Юнга, ГПа	200	28 (М) 75-80 (А)	70 (М) 70-100 (А)
	Усталостная прочность, МПа (N=10 <sup>6</sup> )		350	270
	Размер зерна, мкм		20-100	50-150
	Мехобработка	хорошая	удовлетв.	плохая
Функциональные	ТИМП, °С		-100 ÷ +200	-200 ÷ +120
	Гистерезис, °С		20-30	5-20
	Обратимая деформация 1-го ЭПФ, %	3	8	5
	N<100		6	1
	N<10000		2	0,8
	N<1000000		0,5	0,5
	многократного ЭПФ, %		4-5	2-4
	Демпфирование, % SDC	-	15-20	30-85
	Псевдоупругая деформация, %			
	монокристалла		10	10
поликристалла		4-10	2	
Макс. реактивные напряжения, МПа		600-900	500-700	
Производительность, Дж/г		1-4	1	
Себестоимость	низкая	высокая	средняя	

Рисунок 9 – Характеристики сплава Ti-Ni и других материалов с памятью формы

Эффект обратимой памяти формы представляет большой интерес, так как позволяет многократно обратить деформацию используя температуру и не применяя каких-либо внешних воздействий.

#### Список литературы

1. Харрисон Дж.Д., Ходгсон Д.Е. Использование сплавов системы Ti-Ni в механических и электрических соединениях // Эффект памяти формы в сплавах / Под ред. В.А. Займовского. – М.: Металлургия, 1979. – С. 429-434.

2. Вольченко Д.А. Сплавы с памятью формы // *Автомобильная промышленность*. – 1991. – №8. – С. 30-31.

3. Peel C.J. *Advances in materials for aerospace* // *The Aeronautical Journal*. – 1996. – Vol. 100. – pp. 487-503.

4. Noor A.K. et al. *Frontiers of the material world* // *Aerospace America*. – 1998. – Vol. 36, No. 4. – pp. 24-31

5 Мубояджян С.А. Особенности осаждения из двухфазного потока многокомпонентной плазмы вакуумно-дугового разряда, содержащего микрокапли испаряемого материала // *Металлы*. 2008. №2. С. 21-35.