

Термомеханическая усталость защитных покрытий лопаток турбин

Е.Б.Качанов, Ю.А.Тамарин (СЦ «Материал»)

ВВЕДЕНИЕ

Повышение температуры газа в турбинах авиационных двигателей, создание лопаток с высокой эффективностью охлаждения привели к росту термических напряжений в лопатках. Трещины термической усталости лопаток стали одним из наиболее распространенных дефектов лопаток. Создание исследовательских методов изучения свойств жаропрочных сплавов и покрытий в условиях циклического воздействия температур и напряжений и некоторые принципы расчетов долговечности лопаток с покрытиями рассмотрены в ряде работ опубликованных в последние годы [1, 2, 3, 4].

Возникновение трещин термо-механической усталости в покрытиях связано с особенностями работы системы "покрытие - сплав" в условиях высоких термических напряжений и деформаций. Покрытие, защищает поверхность лопаток от окисления, но в тоже время оно создает на ее поверхности дополнительные напряжения и деформации, которые могут приводить к появлению трещин в покрытии и снижению циклической долговечности лопатки. В случае высоких деформаций в покрытии скорость возникновения трещин термо-механической усталости в покрытии может превышать скорость повреждения поверхности лопаток от окисления. Нанесение покрытия в этом случае приводит к уменьшению циклической долговечности лопаток.

В таблице 1 приведены результаты расчета циклической долговечности покрытий с различными составами и свойствами на наиболее термически нагруженной точке поверхности лопатки турбины из сплава MAR-M200. Расчеты проведены по величине напряжений и деформаций, возникающих в покрытии под действием центробежных сил, изгибающих моментов, неравномерности теплового состояния лопатки и термических напряжений из-за различий коэффициентов линейного расширения покрытия и защищаемого сплава.

Таблица 1. Расчетное число циклов N_{Rc} до появления трещин в защитном покрытии на выходной кромке лопаток.

Покрытие	N_{Rc} , число циклов
Ni20Co20Cr12Al	1800
Ni20Cr12Al	12500
Ni7Cr12Al	141000
Ni8Cr18Al	76500
Ni5Cr25Al	15500

Высокая циклическая долговечность покрытий Ni7Cr12Al и Ni8Cr18Al объясняется хорошей согласованностью коэффициентов линейного расширения этих покрытий и жаропрочного сплава лопатки, особенно при температурах от 20 до 600°C, а также высокими значениями предела текучести и предела прочности покрытия во всем рабочем диапазоне температур.

Экспериментальная часть

Выбор состава покрытия и способа его нанесения

Создание покрытия необходимого состава с требуемыми физическими и механическими свойствами весьма непростая задача из-за различных ограничений налагаемых

технологическими аспектами формирования покрытий. К таким ограничениям относятся проблемы производства материалов покрытия - порошков, катодов, слитков; изменения химического состава материалов происходящие в процессе нанесения покрытия и т.п.

Для создания покрытия для сплава CMSX-4 был выбран метод электро-дугового нанесения покрытий в вакууме (известен так же как ионно-плазменный метод). Этот метод широко используется для нанесения покрытий на лопатки турбин [5]. Достоинством метода является относительная простота технологии и возможность формирования плотного покрытия сложного состава содержащего тугоплавкие элементы.

Для создания покрытия был выбран состав, который по результатам расчетов и ранее проведенных исследований должен обладать высоким сопротивлением термической усталости. Основой состава является никель. Покрытия на основе никеля имеют при температурах выше 1000 °С высокие характеристики стабильности по сравнению с системами на основе кобальта. Тантал (4-6%) в составе покрытия способствует образованию фазы типа Ni₃(Al,Ta) с высокой термодинамической стабильностью и с близким к сплаву CMSX-4 термическим коэффициентом линейного расширения. Концентрация хрома (12-14%) в выбранном составе ниже чем в традиционных составах. Это сделано с целью повышения стабильности покрытия при температурах выше 1100 °С. Гафний и кремний (1,5 и 1,5%) введены в состав покрытия для улучшения характеристик жаростойкости и сопротивления горячей коррозии [6].

На образцы для исследования свойств было нанесено два варианта покрытий. Первый вариант покрытия (П-1) толщиной ~ 80 мкм нанесен при испарении катода изготовленного из специального сплава. После нанесения образцы с покрытием отжигались при 1080 С в течении 2 часов, затем обрабатывались микрошариками и повторно отжигались в вакууме при 1080 С в течении 2 часов. Покрытие имеет плотную, мелкозернистую структуру типичную для покрытий получаемых методом электро-дуговым методом. Средний химический состав покрытия приведен в таблице 2.

Таблица 2. Средний химический состав покрытия П-1.

Химический состав, %					
Al	Cr	Co	Ta	Re	Hf
6.5	12.4	7.6	4.5	0.3	0.4

Второй вариант покрытия для исследований нанесен в два этапа. На первом этапе нанесен слой толщиной ~80 мкм из того же сплава по технологии описанной выше. На втором этапе на поверхность слоя П-1 электродуговым методом наносился слой сплава Al-5%Si-1.5%Y в количестве ~40 г/м². После отжига при 1080 оС в течение 2 часов на поверхности формировался диффузионный слой толщиной ~50 мкм. Общая толщина покрытия П-2 составляла ~80 мкм. Средний химический состав внешней и внутренней зон покрытия приведен в таблице 3.

Таблица 3. Средний химический состав внешней и внутренней зон покрытия П-2

Химический состав, %						
Зоны	Al	Cr	Co	Ta	Re	Hf
внешняя	17.0	7.5	6.5	2.0	0.2	-
внутренняя	6.8	16.9	8.1	4.5	1.1	0.5

Внешняя зона покрытия П-2 состоит из β -фазы. Она имеет типичную структуру для диффузионных покрытий получаемых электродуговым методом. Под слоем β -фазы расположена многофазная зона формирующаяся при диффузионном отжиге.

Для сравнения свойств покрытий были также изготовлены образцы сплава CMSX-4 с покрытием LCO-22. Покрытие толщиной ~ 100 - 120 мкм наносилось из порошка (Со-основа; 32%Ni; 21%Cr; 7.5%Al; 0.5%Y) плазменным методом в вакууме (LPPS) по технологии применяющейся для лопаток турбин.

Термомеханические усталостные испытания

Для выполнения этой части работы была разработана специальная методика термомеханических испытаний образцов с покрытиями по схеме с управляемой нагрузкой [7]. При упругом деформировании материала образца эта схема дает принципиально одинаковый результат, что и схема испытаний с управляемой деформацией, но является существенно более простой при практической реализации. Условия термомеханических усталостных испытаний образцов выбраны близкими к условиям работы выходной кромки лопатки, где покрытия испытывают наибольшие термомеханические усталостные нагрузки.

При проведении испытаний использованы: режим противофазного изменения температуры и нагрузки; ассиметричный цикл изменения нагрузки без выдержки при максимальной температуре цикла (рис.1).

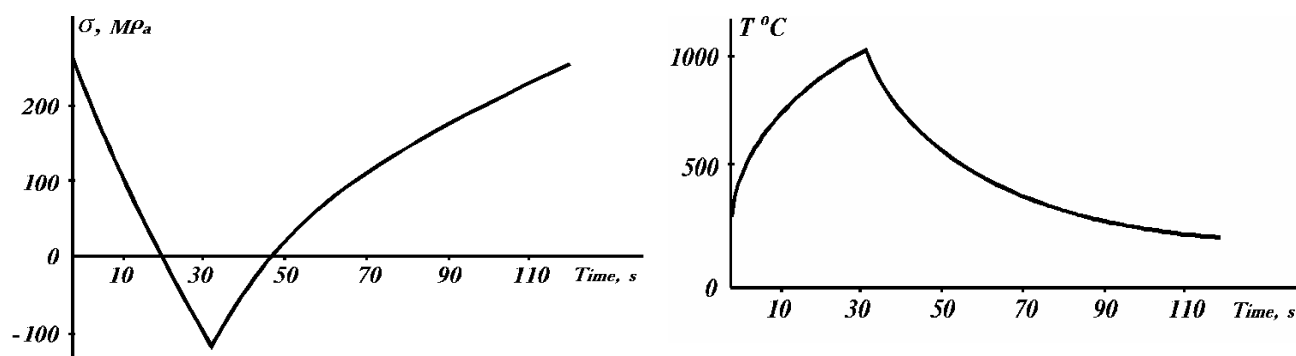


Рис.1. Изменение напряжений прикладываемых к образцу в процессе полциклов сжатия и растяжения (а) и соответствующее изменение температуры (б).

Для определения условий нагружения образца в течение цикла испытаний, в зоне с максимальной температурой было проведено измерение деформаций. На поверхность образца приваривались метки из проволоки диаметром 0.05мм. С помощью оптического измерительного устройства измерялось расстояние между метками при минимальной и максимальной температурах цикла при одновременном механическом нагружении. Затем рассчитывалась полная деформация в центральной зоне образца. На рис.2 показана зависимость размаха полной деформации в центре образца от размаха прикладываемых напряжений.

Для каждого варианта покрытия термоциклические усталостные испытания проведены для трех уровней амплитуды напряжения в образце. В итоге по результатам экспериментов построена кривая малоциклового усталости в координатах “Размах напряжений ($\Delta\sigma$, МПа) - долговечность (N, циклы)”.

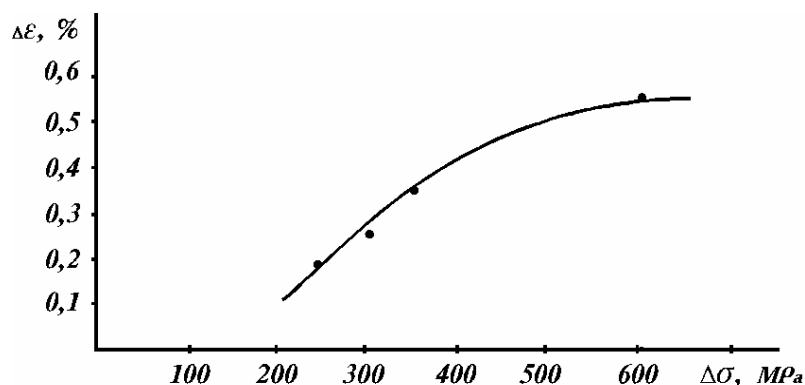


Рис.2. Зависимость размаха деформаций в центральной зоне образца от размаха прилагаемых напряжений $\Delta\sigma$.

Для проведения термомеханических испытаний использованы круглые сплошные образцы из сплава CMSX-4 диаметром 6.5 мм. Нагрев образцов производился путем пропускания через них электрического тока, плотностью $I=20\text{A}/\text{мм}^2$. Синхронно с температурным циклом, производилось нагружение образца с помощью гидравлического нагружающего устройства. Основные режимы нагружения образцов приведены в таблице 4.

Таблица 4. Режимы нагружения образцов

№	Температура, оС	Напряжения	Размах напряжений
1	100	$\sigma_{\text{растяжения}} = +200\text{MPa}$	$\Delta\sigma_{\Delta} = 350\text{MPa}$
	1100	$\sigma_{\text{сжатия}} = -150\text{MPa}$	
2	100	$\sigma_{\text{растяжения}} = +200\text{MPa}$	$\Delta\sigma = 300\text{MPa}$.
	1100	$\sigma_{\text{сжатия}} = -100\text{MPa}$	
3	100	$\sigma_{\text{растяжения}} = +200\text{MPa}$	$\Delta\sigma = 250\text{MPa}$
	1100	$\sigma_{\text{сжатия}} = -50\text{MPa}$	

Долговечность покрытия определялась по моменту образования трещин на поверхности. Контроль за образованием трещин осуществлялся оптическим методом и методом неразрушающей капиллярной дефектоскопии. Разрешающая способность использованных методов: протяженность трещины - $\geq 0,5$ мм, глубина проникновения - $\sim 0,05$ мм.

При описании результатов испытаний используется следующая терминология: **долговечность покрытия** - число циклов до появления трещины (трещин) на поверхности образца с покрытием; **долговечность сплава CMSX-4** - число циклов до появления трещины (трещин) на поверхности образца без покрытия; **долговечность образца** - число циклов до разрушения образца с покрытием или без покрытия.

Сплав CMSX-4 без покрытия

Значения долговечности сплава CMSX-4 без покрытий, испытанных по описанной методике, интересны для их сравнения с долговечностью покрытий и анализа влияния покрытий на свойства сплава. После обнаружения трещин на поверхности испытания продолжались до момента разрушения образцов. Результаты испытаний приведены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты испытаний образцов CMSX-4 без покрытий.

Число циклов до появления первой трещины	Число циклов до разрушения образца	Размах напряжений, $\Delta\sigma$, МПа
2850	3630	150-500
6190	6510	150-500
-	4840	150-500
15780	16950	150-300
20420	21820	150-200
48670	-	100-200
24120	25480	100-200
41270	44860	50-200

Исследование изломов образцов показало, что они характерны для разрушения при TМF испытаниях с невысоким размахом напряжений. Очаг появления трещины расположен на поверхности образца. Трещина развивается вглубь образца и приводит к его разрушению. Основное число циклов испытания затрачивается на образование трещин на поверхности образца. Долговечность образца с возникшей трещиной составляет 8-20% от общей долговечности испытываемого образца.

Покрытие LCO-22

Результаты испытаний образцов с покрытием LCO-22 представлены на рис. 3. Внешний вид трещин, частота их распределения по поверхности подобны трещинам термической усталости покрытий образующимся на поверхности лопаток. Трещины расположены по всей длине образца и имеются в зонах, где максимальная температура не превышает 1000 С. Появлению трещин предшествует накопление пластических деформаций в покрытии, образование пористости и небольших надрывов, которые затем постепенно сливаясь формируют трещину термической усталости.

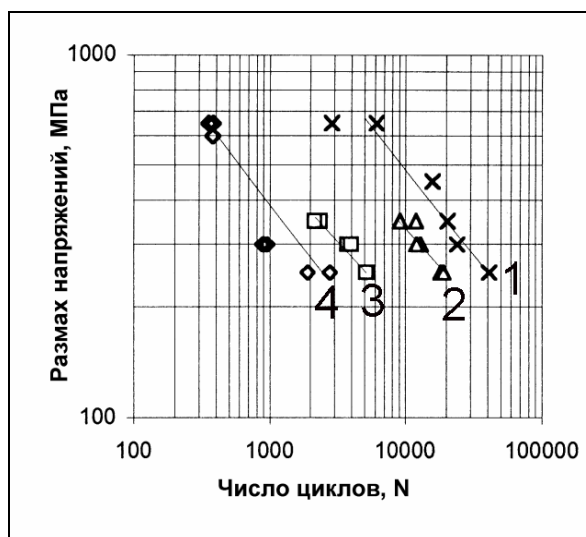


Рис. 3. Долговечность образцов CMSX-4 без покрытия (1), и CMSX-4 с покрытием П-2 (2), П-1 (3), LCO-22 (4).

Скорость развития трещин в сплаве CMSX-4 значительно ниже чем в покрытии. Если трещины протяженностью ~80-100 мкм в покрытии были зафиксированы после ~1000 циклов, то за последующие 3100 циклов глубина их проникновения в сплав составляет не более 100-120 мкм

Покрытие П-1

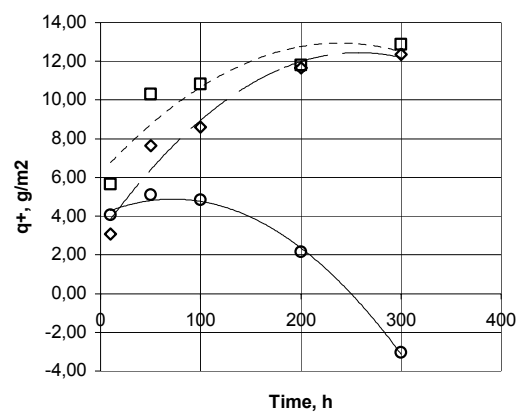
Результаты испытаний образцов с покрытием П-1 представлены на рис. 3. Механизм образования трещин их внешний вид и распределение по поверхности идентичны рассмотренному для образцов с покрытием LCO-22. Долговечность покрытия П-1 выше чем покрытия LCO-22 в 4 раза при размахе напряжений $\sigma_{\Delta} = 300\text{MPa}$ и в 2 раза при размахе напряжений $\sigma_{\Delta} = 250\text{MPa}$.

Покрытие П-2

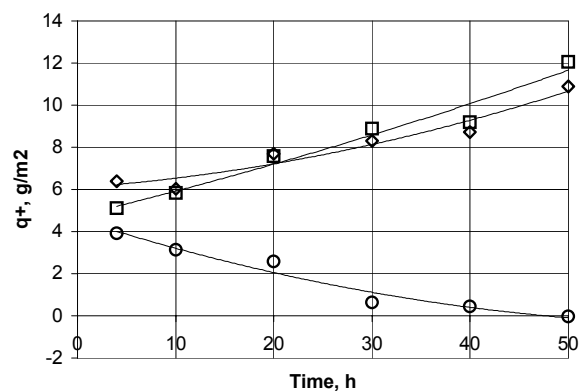
Результаты испытаний образцов с покрытием П-2 представлены на рис. 3. Механизм образования трещин их внешний вид и распределение по поверхности идентичны рассмотренному для образцов с покрытием LCO-22 и П-1. Долговечность покрытия П-2 выше чем покрытия LCO-22 в 13 раз при размахе напряжений $\sigma_{\Delta} = 300\text{MPa}$ и в 8 раз при размахе напряжений $\sigma_{\Delta} = 250\text{MPa}$. Полученные результаты, близки к ожидаемым в соответствии с расчетами (таблица 1, покрытие Ni8Cr18Al).

Испытания жаростойкости

Сравнительные испытания жаростойкости покрытий проведены в воздушной атмосфере при температурах 1100 С и 1150 С. Для испытаний использованы цилиндрические образцы диаметром 8 мм и высотой 30 мм. Периодически образцы извлекались из печи и производилось их взвешивание. Потеря защитных свойств покрытия определялась по моменту уменьшения массы образцов, связанному с осыпанием защитных оксидов. Для каждого варианта покрытия испытаны по три образца. Результаты проведенных испытаний приведены на рис. 4 а, б.



а



б

Рис.4. Результаты испытаний жаростойкости при 1100 °С (а) и 1150 °С (б). LCO-22 (о), П-1 (◇), П-2 (□).

При температурах 1100 °С и 1150 °С покрытие LCO-22 толщиной 100 мкм имеет невысокую жаростойкость. Условный порог начала осыпания защитных оксидов при 1100 С составляет 75-100 часов. При 1150 °С осыпание оксидов наачинается уже после первых 4 часов испытаний.

Жаростойкость покрытий П-1 и П-2 значительно выше. При 1100 °С момент начала осыпания оксидов для обоих покрытий составляет 250 часов. При 1150 °С за время испытаний 50 часов на обоих покрытиях осыпания оксидов не происходит. Высокие

характеристики жаростойкости для покрытий П-1 и П-2 объясняются их легированием комплексом элементов способствующих образованию защитных оксидов (Ta, Hf, Si) и улучшающих адгезию защитных оксидов на поверхности.

Испытания горячей коррозии

Испытания горячей коррозии проведены по методике предложенной в работе [8]. Суспензия изготовленная из солей и оксидов на основе этилового спирта (66.2%Na₂SO₄; 1.8%V₂O₅; 20.4%Fe₂O₃; 8.3%NiO; 3.3%CaO) равномерно наносится на обезжиренную поверхность образцов в количестве 120 г/м².

Образцы покрытые суспензией помещаются в замкнутом контейнере в печь с заданной температурой. Периодически образцы извлекаются из контейнера для осмотра и взвешивания. При этом определяется удельное уменьшение - q^- или увеличение массы образцов - q^+ (г/м²). Моментом разрушения покрытия является резкое увеличение или уменьшение массы образцов. За величину, характеризующую **коррозионную долговечность покрытий**, принимается интервал времени от начала испытания образцов до момента разрушения покрытия хотя бы на одном участке поверхности.

Результаты проведенных испытаний приведены в таблице 6. Выявленные закономерности горячей коррозии исследуемых покрытий не отличаются от обычно наблюдаемых. Кинетические зависимости имеют три области: начального стабильного окисления, неравновесной коррозии, обусловленной повреждением оксидной пленки за счет ее сульфидирования, и области интенсивной горячей коррозии и разрушения покрытия. У покрытий П-1 и П-2 все три указанные области наблюдаются только при 900 С. При 800 и 850 С наблюдается только первая область, т.к. за 6000 часов испытаний оба покрытия находятся еще в условиях стабильного окисления.

Таблица 6. Долговечность покрытий в условиях испытаний сульфидной коррозии.

Покрытие	Метод нанесения	Долговечность, часы		
		800 °С	850 °С	900 °С
П-1, 80 μm	Эл. дуговой	>6000	3500	1000
П-2, 80 μm	Эл. дуговой	>6000	4000	1000
Ni20Co20Cr10AlY, 120 μm	Электр. лучевой	4500	2500	600
Co23Cr11AlY, 120 μm	Электр. лучевой	4500	1500	700

Полученные результаты подтверждают результаты ранее проведенных исследований по положительному влиянию тугоплавких элементов (Hf) на сопротивление покрытий горячей коррозии [6]. Результаты испытаний показывают возможность создания покрытий с хорошим сопротивлением горячей коррозии с невысоким содержанием хрома и кобальта.

Обсуждение полученных результатов

«Идеальным» покрытием с высоким сопротивлением термо-механической усталости может быть покрытие имеющее физические и механические свойства идентичные защищаемому жаропрочному сплаву [1]. Создать такое покрытие вряд ли возможно, т.к. тонкий слой поликристаллического покрытия не может иметь механические свойства современного монокристаллического жаропрочного сплава. Однако, использование максимально возможного сближения характеристик покрытия и защищаемого сплава правильное направление при создании покрытий с высоким сопротивлением термической усталости.

Использованная методика термомеханических испытаний с противофазным изменением температур и напряжений позволяет создать условия имитирующие напряженно-деформированное состояние возникающее в покрытиях на поверхности лопаток турбин. При выбранных условиях испытаний прилагаемые нагрузки увеличивают напряжения сжатия возникающие в покрытиях при высоких температурах и увеличивают напряжения растяжения в области низких температур. Принятая методика испытаний позволяет выявить различия в сопротивлении покрытий появлению и развитию трещин термической усталости.

Анализ изломов образцов после испытаний термической усталости показывает, что во всех случаях очаг зарождения трещин располагается на поверхности образцов, а строение излома соответствует излому образующемуся при приложении переменных нагрузок. Трещины в покрытиях образуются после накопления значительных остаточных деформаций. Испытания выявили значительное различие между временем до появления трещин термической усталости на образцах без покрытий и с различными покрытиями.

Для сравнения все результаты испытаний приведены в таблице 7. Долговечность покрытия LCO-22 составляет всего 6-8% от долговечности сплава CMSX-4 без покрытия. Таким образом, при наличии в лопатке турбины зон с размахом напряжений близких к использованным при испытаниях, на их поверхности в покрытии LCO-22 появятся многочисленные трещины термической усталости. Появление этих трещин на лопатках может быть неожиданным, т.к. при расчетах долговечности лопаток расчеты долговечности покрытий как правило не проводятся.

Таблица 7. Сравнение долговечности образцов сплава CMSX-4 без покрытия и с различными покрытиями при испытаниях термомеханической усталости.

Размах напряжений, $\Delta\sigma$ МПа	Долговечность, циклы/%			
	CMSX-4	LCO-22	П-1	П-2
650	2850/100%	368/13%	-	-
350	20420/100%		2840/14%	10550/52%
300	24120/100%	911/4%	4178/17%	12484/52%
250	41270/100%	2330/6%	6592/16%	18587/45%

Как и предполагалось, изменяя физико-механические свойства покрытий можно существенно влиять на их долговечность. Покрытие П-1 имеет долговечность в 2-4 раза большую, чем покрытие LCO-22.

Высокие значения долговечности получены и на покрытии П-2. Состав и свойства этого покрытия близки к покрытию Ni8Cr18Al в таблице 1. Долговечность покрытия П-2 в 8-10 раз выше чем у покрытия LCO-22 и составляет 45-52% от долговечности сплава CMSX-4. Такая долговечность связана главным образом с хорошим соответствием термических коэффициентов линейного расширения покрытия и сплава CMSX-4. Однако, нельзя исключить и влияние технологических факторов формирования внешнего диффузионного слоя из жидкой фазы на основе расплавленного алюминия. Наличие внешнего диффузионного слоя, также оказывает благоприятное воздействие на долговечность покрытия. Как известно, в диффузионных покрытиях, в отличие от нанесенных покрытий, в области температур ниже 900 оС имеются остаточные напряжения сжатия.

Выбранная методика испытаний на образцах диаметром 6.5 мм не позволяет установить, как влияет появление трещин в покрытии на долговечность образцов сплава CMSX-4. Сравнение числа циклов до разрушения образцов без покрытий с

образцами с покрытиями показывает, что количество разрушенных образцов и полученные результаты не достаточны для объективной оценки этого влияния.

Соответствие между полученными результатами по долговечности покрытий на образцах и их долговечностью на лопатках зависит от условий работы лопаток на двигателе. При кратковременных циклических испытаниях двигателей с высокими термическими нагрузками имеется большая вероятность соответствия долговечности покрытий на лопатках значениям полученным на образцах при лабораторных испытаниях. В случае длительных испытаний двигателей значительное влияние на их результаты будут оказывать такие характеристики покрытий как жаростойкость и сопротивление горячей коррозии. Покрытия П-1 и П-2 обладают высоким сопротивлением окислению и горячей коррозии. Высокая коррозионная долговечность новых покрытий объясняется их легированием тугоплавкими элементами - танталом, гафнием, а так же кремнием.

Заключение

Покрытие П-2, имеет долговечность при термомеханических испытаниях в 8-10 раз большую чем у покрытия LCO-22. Покрытие имеет высокие значения жаростойкости и сопротивления горячей коррозии. Покрытие П-2 формируется методом электродугового нанесения по двух этапной технологии включающей нанесение подслоя и диффузионного покрытия.

Reference

1. Tamarin Y.A., Protective Coatings for Turbine Blades, ASM-International, 2002, 247 p.
2. Nozhnitsky Y.A., Doulnev R.A., Sundyrin V.G., Damage Mechanisms for Thermomechanical Fatigue of Aircraft Engines Materials. 81st Meeting of the AGARD SMP, held in Banff, Canada from 2-4 October 1995, and published in CP-559.
3. Rybnikov A.I., Getsov L.B., Materials at High Temperatures, 1995, v.13, No 3, pp.125-131
4. Halford G.R., Meyer T.G., Nelson R.S., Nissley D.M., Fatigue Life Prediction Modeling for Turbine Hot Section Materials, NASA Technical Memorandum 100291, Prepared for the 33rd Int'l Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition Sponsored by ASME, Amsterdam, The Netherlands, June 5-9, 1988, с.72-81
5. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Помелов Я.А., Авиационные материалы на рубеже 20-21 веков. Москва, ОНТИ ВИАМ, 1994, с.314-324
6. Никитин В.И., Тамарин Ю.А., Забродина Н.В., Коррозионные и механические свойства защитных покрытий, Сборник "Водно-химический режим и коррозия энергетического оборудования", Ленинград, ЦКТИ, №201, 1986, с.
7. Tamarin Y.A., Sundyrin V.G., Bychkov N.G., High Temperature Surface Engineering, Book 693, Published by IOM Communications Ltd, Cambridg, 2000, p.157-169
8. Никитин В.И., Коррозия и защита лопаток газовых турбин. Ленинград, Машиностроение, 1987, 289 стр.