

УДК 669.699

Соловых Е. К.¹, Гречанюк Н. И.², Ляшенко Б. А.³, Мирненко В. И.⁴, Липинская Н. В.³¹ Кировоградский Национальный технический университет. Украина, Кировоград² Институт проблем материаловедения им. И. М. Францевича НАН Украины. Украина, Киев³ Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. Украина, Киев⁴ Национальный университет обороны Украины. Украина, Киев

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Анотація

Запропонована методика багатокритеріальної оптимізації конструктивної схеми електронно-променевого теплозахисного покриття для лопаток турбін. Вхідні параметри – товщини керамічного шару і металевий підшару, а також товщини і кількість мікрошарів. Функції відгуку – параметри кривих ізотермічної і термоциклічної повзучості. Оптимізація знизилла швидкість повзучості на 35 % і підвищила довговічність на 40 % тільки корекцією конструктивної схеми.

Abstract

The technique of multicriteria optimization of design map of electron-beam thermobarrier coatings for turbine blades is suggested. Input parameters are the thicknesses of the ceramic layer and metal underlayer and the thicknesses and number of micro-layers. The response functions is the parameters of isothermal and thermal cycling creep curves. Optimization reduced the creep rate by 35 % and increased durability by 40 % only due to correction of the design map.

Введение

Разработка любого технологического процесса неизбежно связана с решением оптимизационных задач. В области создания упрочняющих защитных покрытий (УЗП) вопросы оптимизации занимают ключевое место. Это объясняется тем, что большое количество способов нанесения в сочетании с обшир-

ной номенклатурой материалов, из которых формируют покрытие, а также большое количество влияющих факторов предоставляет технологам широкий ряд альтернативных вариантов. В такой ситуации эффективность принимаемых решений будет зависеть от наличия удобных критериев для управления технологическим процессом.

Высокая чувствительность механических характеристик покрытия и основы к режимам нанесения особенно требует оптимизации и ведения технологического процесса по критериям прочности. Относительно влияния технологических режимов на служебные свойства УЗП имеются противоречивые данные [1].

Следует отметить различное толкование в технологиях и практике УЗП самого понятия «оптимизация». Так в работе [2] под оптимизацией электронно-лучевых технологий понимают опробование альтернативных вариантов подготовки промежуточного слоя покрытия. Отмечая эффективность оптимизации, которая позволяет увеличить в 2...5 раз долговечность покрытия, авторы используют изменение конструктивной схемы многослойного покрытия [3]. Подобные исследования, не использующие математическое планирование эксперимента, следует отнести к области поиска рациональных схем покрытия и режимов нанесения.

В теории, технологии и практике УЗП сложилось и успешно развивается новое направление – оптимизация технологических процессов по критериям прочности [4].

Широкие возможности в получении новых неорганических высокотемпературных материалов открывает электронно-лучевая технология. Главные достижения связаны с работами Института электро-



сварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Решающий вклад в создание электронно-лучевых покрытий внесла школа академика Б. А. Мовчана [5]. В последнее время визитной карточкой электронно-лучевой технологии стали теплозащитные керамические покрытия для рабочих охлаждаемых лопаток современных турбин высокого давления. Покрытие выполняет роль термического барьера, позволяя регулировать термонапряженное состояние рабочей лопатки в процессе ее эксплуатации и повысить в 4...6 раз ее ресурс [6].

Основной причиной разрушения многослойных ТЗП является их расслоение на границе раздела металл-керамика. Обеспечение достаточной адгезионной прочности ТЗП на протяжении всего периода эксплуатации за счет оптимизации свойств его составляющих является одной из основных задач повышения ресурса данного класса покрытий.

Первоочередной задачей при этом становится выбор оптимальной компоновки теплозащитного покрытия (ТЗП). Использование методов математического планирования эксперимента позволяет решить задачу оптимизации конструкции ТЗП по параметрам прочности на основе экспериментально установленных математических моделей. Модели устанавливают функциональную связь исследуемых параметров конструкции ТЗП и его прочности и долговечности.

Повышение долговечности ТЗП за счет изменения его конструкции наиболее целесообразно, т.к. при этом нет необходимости вносить какие-либо изменения в схему технологического процесса, что связано со значительными расходами. Корректировки в схеме конструкции ТЗП никак не ограничены возможностями электронно-лучевой технологии.

Цель работы

Оптимизация конструкционной схемы трехслойного ТЗП с целью выбора соотношения толщин различных слоев, наиболее оптимальных с точки зрения повышения прочности и долговечности ТЗП.

Объект исследования

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработана конструкция многослойного теплозащитного покрытия [7], каждый слой которого имеет собственное функциональное назначение. Верхний керамический слой, состоящий из диоксида циркония ZrO_2 , частично стабилизированного оксидом иттрия Y_2O_3 , обеспечивает тепловую защиту детали за счет низкого ($\lambda \approx 1$ Вт/мК) коэффициента теплопроводности керамики. Средний слой повышенной жаростойкости служит для защиты основы от коррозии и окисления. Для повышения термостабильности композиции этот слой выполняется в виде многочислен-

ных чередующихся металлических NiCrAlY и металлокерамических NiCrAlY+(3...5)%ZrO₂ микрослоев, количество которых может достигать нескольких сотен (500) и более. Нижний пластичный NiCrAlY связующий слой с пониженным содержанием алюминия служит для торможения и блокирования трещин, развивающихся с поверхности вглубь основы. Исходя из схемы конструкции покрытия были определены пять ее независимых параметров, изменение которых может привести к повышению долговечности композиции:

- толщина внешнего керамического слоя h_k ;
- толщина пластичного подслоя h_n ;
- толщина пары микрослоев h_m ;
- соотношение толщин металлического и металлокерамического микрослоев δ ;
- количество микрослоев N .

В качестве материала основы исследован жаропрочный никелевый сплав ЭИ-868.

Методика исследования

Непременным условием нормальной работы деталей ГТД является обеспечение минимального уровня пластических деформаций, а также минимальная скорость их накопления. Поэтому в качестве критериев прочности для функций отклика при планировании эксперимента приняты характеристики изотермической и термоциклической ползучести. При расчетах ГТД на прочность и долговечность эти характеристики необходимы конструкторам в первую очередь. Испытания на ползучесть проведены на модернизированной установке «Щелкунчик», использующей нагрев и охлаждение фокусированием лучистой энергии в оптически замкнутых зеркальных полостях [8–10].

Характеристики термического цикла: $773^\circ \leftrightarrow 1273^\circ$ К, время нагрева 20 сек, охлаждение – 30 сек. Статическая нагрузка 53 МПа. Изотермическая ползучесть определена при 1173° К. Использовали образцы стандартной формы и размеров [8].

Планирование эксперимента и статистический анализ проведен с помощью пакета прикладных программ ПРИАМ [11].

В качестве нулевой точки при планировании эксперимента приняты параметры конструкции ТЗП, для которого накоплен определенный опыт промышленной эксплуатации деталей ГТД с покрытиями данного типа [7]. В качестве входных параметров приняты: толщины внешнего керамического слоя $h_k(X_1)$, толщина пластичного подслоя $h_n(X_2)$, толщина пары микрослоев $h_m(X_3)$, соотношение толщин металлического и металлокерамического микрослоев (X_4), а также количество микрослоев $N(X_5)$. В эксперименте входные параметры менялись в интервалах: $X_1 = 20...200$ мкм; $X_2 = 20...70$ мкм; $X_3 = 0,3...10$ мкм; $X_4 = 0...1,0$; $X_5 = 10...150$ шт.

В качестве функций отклика приняты кривые изотермической и термоциклической ползучести. Каждая кривая ползучести характеризуется девятью параметрами: длительностью ползучести по стадиям τ_1 , τ_2 и τ_3 , величиной пластической деформации в конце каждого этапа ϵ_1 , ϵ_2 и ϵ_3 , скоростью ползучести на второй стадии $\dot{\epsilon}_2$, а также соотношениями длительности отдельных стадий ползучести $\tau'_1 = \tau_1/\tau_3$ и $\tau'_2 = \tau_2/\tau_3$.

Анализ результатов

Увеличение толщины керамического слоя от 30 до 80 мкм приводит к повышению продолжительности всех трех стадий ползучести и снижению скорости установившейся ползучести. Оно же сказывается на деформативности композиции: окончание первой и второй стадии происходит при более высоких уровнях пластической деформации по сравнению с базовым вариантом, а окончание третьей, т. е. разрушение образца — при более низких. Происходит также и относительное увеличение доли первой и особенно второй стадии в общем времени до разрушения.

Также существенное, но во всех случаях прямо противоположное влияние на те же функции отклика оказывает повышение толщины нижнего пластичного NiCrAlY-слоя от 25 до 45 мкм.

Ближе к моменту разрушения образцов более существенно начинают сказываться параметры микрослоистого композита, в частности, толщина пары микрослоев, которой соответствует переменная X_3 . Данный фактор никак не сказывается на характеристиках первой стадии ползучести. На второй стадии при уменьшении толщины пары микрослоев от 1,1 до 0,3 мкм происходит незначительное увеличение деформации ϵ_2 и параметра τ'_2 , а на третьей стадии ползучести происходит достаточно значительное повышение деформаций ϵ_3 .

Из этого можно сделать вывод, что влияние микрослоистого композита наиболее существенно начинает сказываться при значительных пластических деформациях, когда фактором, определяющим долговечность, становится уже не способность композиции их накапливать, а сопротивляться зарождению и развитию трещин с поверхности через покрытие к основе, т. е. данный слой способен не только ограничивать диффузионные процессы, повышая термостабильность системы, но также тормозить и блокировать трещины, развивающиеся через микрослой, благодаря наличию многочисленных границ раздела между слоями.

В отличие от изотермических испытаний, при термоциклических влияние параметров микрослоистого композита сказывается уже на первой стадии ползучести, причем это влияние наиболее существенно среди остальных параметров конструк-

ции ТЗП. Повышению продолжительности данной стадии соответствует снижение доли металлокерамического слоя в паре микрослоев до 0,3 (переменная X_4) и повышение количества микрослоев до 120 (переменная X_5). Отмеченное влияние данных параметров сохраняется также на 2-й и 3-й стадиях ползучести, причем члены уравнений регрессии, им соответствующие, также являются наиболее значимыми среди остальных.

Указанное отличие термоциклических испытаний от изотермических может быть связано с двумя причинами:

а) изменение во времени полей температур и напряжений приводит к резкой интенсификации диффузионных процессов между отдельными слоями покрытия и между покрытием и основой;

б) изменение напряжений в точке, в данном случае в слоях покрытия, по абсолютной величине и по знаку является основной причиной возникновения усталостных или термоусталостных трещин. Как уже отмечалось, функциональное назначение микрослоистого композита заключается в замедлении диффузионных процессов и замедлении роста термоусталостных трещин. Поэтому именно подавлением микрослоистым композитом тех процессов, которые присущи термоусталостному нагружению можно объяснить их самое значимое влияние среди остальных параметров конструкции ТЗП на продолжительность всех трех стадий ползучести.

Эти же независимые переменные X_4 и X_5 определяют уровень пластических деформаций к окончанию второй стадии. Значения деформаций к моменту разрушения определяют две другие переменные — толщина подслоя X_2 и толщина пары микрослоев X_3 .

Снижение доли металлокерамического слоя пластифицирует материал, способствует сглаживанию пиков напряжений в области имеющихся дефектов, замедляется трещинообразование, что в итоге приводит к повышению значения ϵ_2 , характеризующего способность композиции устойчиво накапливать пластические деформации. Увеличение количества микрослоев на данной стадии ползучести сказывается, по-видимому, прежде всего на замедлении диффузионных и коррозионных процессов, которые также приводят к охрупчиванию материала и зарождению трещин.

Влияние толщины нижнего пластичного подслоя (переменная X_2) и толщины пары микрослоев (переменная X_3) на стадии разрушения при ползучести можно связать с торможением и блокированием уже имеющихся трещин. Функциональное назначение пластичного NiCrAlY слоя с пониженным до 5...7% содержанием алюминия заключается именно в торможении трещин, развивающихся в направлении основы, на границе раздела основа-покрытие. Влияние толщины пары микрослоев абсолютно

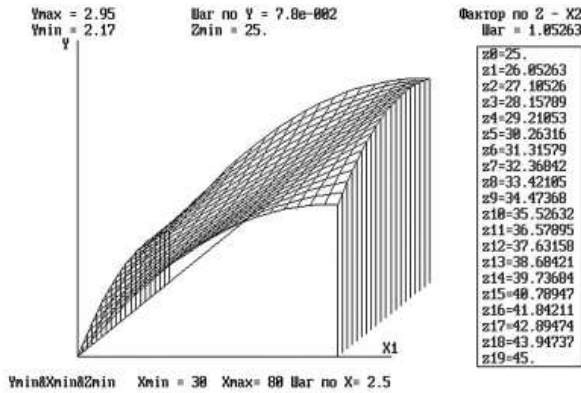


Рис. 1. График исследования поверхности отклика изотермической ползучести $Y_1 = f(X_1, X_2)$ в трехмерном пространстве

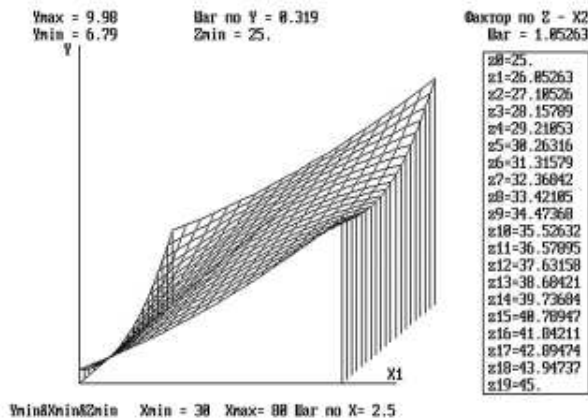


Рис. 2. График исследования поверхности отклика термоциклической ползучести $Y_2 = f(X_1, X_2)$ в трехмерном пространстве

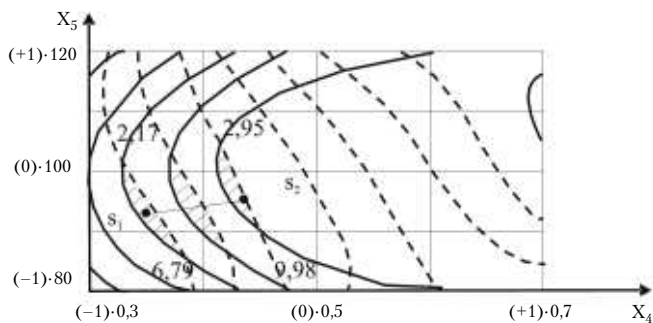


Рис. 3. Зависимость изотермической и термоциклической ползучести от значений соотношения толщины микрослоев (X_4) и количества микрослоев (X_5):
 - - - - - изотермическая ползучесть;
 ————— термоциклическая ползучесть

точно так же, как и в случае изотермических испытаний, проявляется только на третьей стадии ползучести — стадии разрушения.

Анализ характера разрушения образцов, испытанных при термоциклировании, показал его отличие от разрушения при постоянной температуре.

Установлено определяющее влияние параметров микрослойного композита на долговечность при термоциклировании и определено наиболее оптимальное по критерию прочности и долговечности их сочетание, каким оказалось: толщина металлического микрослоя — 0,35 мкм; толщина металлокерамического микрослоя — 0,15 мкм; суммарное количество микрослоев — 120.

В отличие от изотермических испытаний при термоциклических влияние параметров микрослоистого композита сказывается уже на первой стадии ползучести. Это влияние наиболее существенно среди остальных параметров конструкции ТЗП. Повышению длительности первой стадии ползучести соответствует снижение доли металлокерамического слоя δ в паре микрослоев и увеличение количества микрослоев N . Влияние этих факторов превалирует также на 2-й и 3-й стадиях ползучести. Эти же независимые переменные определяют уровень пластических деформаций к окончанию второй стадии. Поэтому необходимо найти компромиссное решение в конструктивной схеме ТЗП.

Для определенных факторов проведено графическое исследование их влияния на критерии оптимизации, характеризующие конструктивную схему многослойных электронно-лучевых ТЗП.

На основании результатов исследования получен геометрический образ функции отклика построением соответствующих геометрических поверхностей, представленных на рис. 1, 2. Визуальный анализ графиков позволяет определить то значение фактора, которое на протяжении всего времени воздействия оказывает наибольший эффект и отсеять те факторы, для которых интервал между наименьшим и наибольшим эффектом находится фактически в коридоре рассеивания.

Как следует из анализа экспериментальных результатов, наибольшее влияние на различие изотермической и термоциклической ползучести оказывают факторы X_4 (соотношение толщин микрослоев) и X_5 (количество микрослоев). Именно по этим факторам проведен поиск компромиссного решения.

Анализ полученных результатов экспериментальных исследований проведен с помощью графического метода, для чего по предварительно рассчитанным значениям построили изолинии параметров Y_1 и Y_2 в двухмерном пространстве в координатах X_4 и X_5 .

На рис. 3 показаны зависимости Y_1 и Y_2 от значений соотношения толщины микрослоев (X_4) и ко-

личества микрослоев (X_5). Хорда, соединяющая два центра поверхностей функций Y_1 и Y_2 , соответственно S_1 и S_2 , показывает направление потока оптимального решения.

Выводы

1. Значения конструктивных параметров ТЗП, обеспечивающих максимальное повышение долговечности системы основа-ТЗП, различны для изотермической и термоциклической ползучести.

2. Многокритериальная оптимизация с компромиссным решением для изотермических и термоциклических условий привела к снижению скорости установившейся ползучести на 35% в сравнении с базовым вариантом и к повышению долговечности ТЗП на 40%.

3. Коррекция параметров конструкции ТЗП не требует никаких изменений в оборудовании и в технологической цепочке. Необходимо лишь изменение в управляющей программе для системы ЧПУ.

Литература

1. Будилов В. В., Мухин В. С., Минаева О. Б. Защитные свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий на лопатках компрессоров ГТД // *Авиац. промышленность* — 1995, № 3–4. — С. 41–45.

2. Акрьмов В. А., Рабинович А. А., Малащенко И. С. и др. Оптимизация составов и технологии формирования теплозащитных покрытий турбинных лопаток судовых газотурбинных двигателей // Обеспечение коррозионной надежности лопаток газовых турбин. Санкт-Петербург, Судостроение, 1992. — С. 68–72.

3. Локтев А. 9 заблуждений о современных покрытиях // «Стружка» — декабрь 2004.

4. *Оптимизация* технологических процессов по критериям прочности // Межвуз. темат. науч. сб., Уфа: Авиац. ин-т, 1987. — 166 с.

5. Movchan V. A. EB-PVD technology in the gas industry: present and future // *J. Of Metals*. — 1996, № 11. — P. 40–45.

6. Жерздев С. В., Тamarin Ю. А., Лопатин Е. В. Керамические конденсированные покрытия — новое направление в создании систем поверхностной защиты деталей горячего тракта авиационных ГТД // Рос. науч.-техн. семинар «Поверхн. слой и эксплуат. свойства деталей машин», Москва, 12 мая, 1995: Тез. докл. — М., 1995. — С. 39–40.

7. Мовчан В. А., Гречанюк Н. И., Грабин В. В. Современное состояние и перспективы создания теплозащитных покрытий для лопаток АГТД // Электронно-лучевые и газотермические покрытия. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1988. — С. 5–12.

8. *Методы* ускоренных испытаний на термоциклическую ползучесть. ДСТУ 2637-94, Держстандарт України, Київ, 1994.

9. Пат. 25999 Украина, G01N 3/60. Установка для термоциклических исследований образцов материалов «Лускунчик» // Солових Е. К., Ляшенко Б. А., Долгов М. А. та ін. — Опубл. 27.08.2007, Бюл. № 13.

10. Пат. 25597 Украина, G01N 3/60. Установка для термоциклических исследований образцов материалов // Ляшенко Б. А., Долгов М. А., Иванченко О. В., Солових Е. К. — Опубл. 10.08.2007, Бюл. № 12.

11. Лапач С. Н., Радченко С. Г., Литвинчук Н. И. Пакет прикладных программ ПРИАМ. — Информационный листок о научно-техническом достижении № 88-007. — К.: УкрНИИНТИ, 1988. — 4 с.