

УДК 621.438-226.739.6

## ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА СОСТАВА ПОДСЛОЯ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ

А.М. АМУИ, Г.Р. МИРХОСЕЙНИ, А. ДЖАФАРИ, М. СААДАТИБАИ

В статье рассматривается применение математического моделирования при конструировании теплозащитного покрытия для рабочих лопаток турбины ГТД. Представлены результаты математического моделирования и проводится сравнение с экспериментальными данными. Полученные результаты позволяют выбирать состав подслоя для нанесения металлического слоя теплозащитного покрытия.

**Ключевые слова:** теплозащитное покрытие, моделирование, металлический подслой, аппроксимация.

В настоящее время для защиты деталей элементов горячего тракта газотурбинного двигателя (ГТД) применяются теплозащитные покрытия (ТЗП). Конструктивно ТЗП состоит из наружного керамического слоя и внутреннего – металлического. Важным элементом в конструкции ТЗП является металлический подслой. Свойства ТЗП во многом определяются свойствами металлического подслоя [1, 3, 5].

Возникает вопрос – как обеспечить долговечность ТЗП. Для обеспечения долговечности металлического подслоя в его состав вводят различные химические элементы (Cr, Al, Hf, Ta, Si, Y и другие) в зависимости от предназначения (обеспечение жаростойкости, стабильности, термостойкости). Вводимые в подслой химические элементы, не однозначно влияют на долговечность ТЗП. Существует множество работ [1–4], в которых проведены исследования по влиянию того или другого элемента на служебные характеристики покрытия. Но в то же время отсутствуют работы по исследованию комплексного влияния вводимых в покрытие элементов на долговечность покрытия. Поэтому зачастую выбор состава подслоя определялся по таким исследованиям или интуитивно.

Для обеспечения заданной долговечности ТЗП выбор состава первого слоя теплозащитного покрытия требует проведения множества лабораторных экспериментов. Это требует больших как экономических, так и трудовых затрат.

Поэтому в рамках данной работы была решена задача по рациональному подбору химического состава катода для нанесения жаростойкого покрытия на лопатку турбины ГТД с целью улучшения его эксплуатационных свойств.

На практике часто приходится сталкиваться с задачей сглаживания экспериментальных данных – задача аппроксимации. Основная задача аппроксимации – построение приближенной (аппроксимирующей) функции, наиболее близко проходящей около данных точек или около данной непрерывной функции. Впоследствии эта зависимость может быть использована при управлении процессами для расчета прогнозируемых значений показателя качества.

Эмпирические формулы служат для аналитического представления опытных данных. В простейшем случае задача аппроксимации экспериментальных данных выглядит следующим образом.

Пусть есть какие-то данные, полученные практическим путем (в ходе эксперимента или наблюдения), которые можно представить парами чисел  $(x, y)$ . Зависимость между ними отражает таблица.

Зависимость между парами чисел

|       |       |       |       |     |       |
|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| $x_i$ | $x_0$ | $x_1$ | $x_2$ | ... | $x_n$ |
| $y_i$ | $y_0$ | $y_1$ | $y_2$ | ... | $y_n$ |

На основе этих данных требуется подобрать функцию  $y = \varphi(x)$ , которая наилучшим образом сглаживала бы экспериментальную зависимость между переменными и по возможности точно отражала общую тенденцию зависимости между  $x$  и  $y$ , исключая погрешности измерений и случайные отклонения. Это значит, что отклонения  $y_i - \varphi(x_i)$  в каком-то смысле были бы наименьшими [1.3, 1.8, 1.23].

Обычно задача аппроксимации распадается на две части.

1. Сначала устанавливают вид зависимости  $y = f(x)$  и соответственно вид эмпирической формулы, то есть решают, является ли она *линейной*, *квадратичной*, *логарифмической* или какой-либо другой.

2. После этого определяются численные значения неизвестных параметров выбранной эмпирической формулы, для которых приближение к заданной функции оказывается наилучшим.

Обычно определение параметров при известном виде зависимости осуществляют по *методу наименьших квадратов*. При этом функция  $\varphi(x)$  считается наилучшим приближением к  $f(x)$ , если для нее сумма квадратов невязок  $\varepsilon_i = f(x_i) - \varphi(x_i)$  или отклонений «теоретических» значений  $\varphi(x_i)$ , найденных по эмпирической формуле, от соответствующих опытных значений  $y_i$  имеет наименьшее значение по сравнению с другими функциями, из числа которых выбирается искомое приближение.

$$\sigma = \sum_{i=0}^n [f(x_i) - \varphi(x_i)]^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

Используя методы дифференциального исчисления, метод наименьших квадратов формулирует аналитические условия достижения суммой квадратов отклонений  $\sigma$  (1). Построение эмпирической функции сводится к вычислению входящих в нее параметров, так чтобы из всех функций такого вида выбрать ту, которая лучше других описывает зависимость между изучаемыми величинами. То есть сумма квадратов разности между табличными значениями функции в некоторых точках и значениями, вычислениями по полученной формуле, должна быть минимальна своего наименьшего значения.

В работе для выбора состава катода для нанесения металлического слоя ТЗП использовали программу *Arprox*, предназначенную для получения функций аппроксимации многопараметрических зависимостей (в том числе со сложной топологией) и последующего их использования для расчета и анализа.

В соответствии с назначением программа позволяет получить функцию аппроксимации (поверхность отклика) сложной многопараметрической зависимости, которую можно использовать для углубленного анализа (интерполяции, сглаживания функции, оценки топологии и т.п.), а также при решении задач, заменяя исходную зависимость полученной поверхностью отклика.

Основными понятиями программы являются. Поверхность отклика (ПО) – математически описанная и программно реализованная зависимость параметров откликов от входных переменных, заменяющая исходные программные модули анализа, которые на основе физического моделирования устанавливают зависимость откликов модели от входных переменных.

Полное описание ПО – совокупность числовых данных, однозначно описывающих используемый метод аппроксимации, структуру аппроксимирующей зависимости, области определения, значения коэффициентов и другие данные, необходимые для реализации расчета значения аппроксимирующей функции одного параметра отклика для произвольно заданного (в пределах области определения) вектора входных переменных.

Вектор входных переменных – одномерный массив вещественных чисел заданного типа, определяющий значения всех переменных, зависимость от которых рассматривается при построении поверхностей отклика.

Вектор параметров отклика – одномерный массив вещественных чисел заданного типа, включающий совокупность параметров отклика модели для одного вектора входных переменных.

Полное описание совокупности поверхностей отклика – набор полных описаний аппроксимирующих функций для всех компонент вектора параметров.

В качестве варьируемых переменных при решении данных задач рассматривались концентрации элементов химического состава катода: Ni, Cr, Al, Y, Ta, Si, Hf, W.

В качестве исходных данных для построения математической модели использовались результаты лабораторных испытаний покрытий, в которых металлический слой получен из различных катодов.

С использованием данной математической модели была решена задача по рациональному подбору химического состава катода металлического слоя для ТЗП лопаток турбины ГТД. Ниже представлена физическая постановка данных задач оптимизации и структурная схема математической модели (рис. 1).

Варьируемые переменные: концентрации в катоде Cr (0...40 %), Al (0...90 %), Y (0...3 %), Ta (0...15 %), Si (0...5 %), Hf (0...3 %), W (0...15 %).

Критерии:

- Минимизация влияния на долговечность ТЗП при испытаниях на жаростойкость.

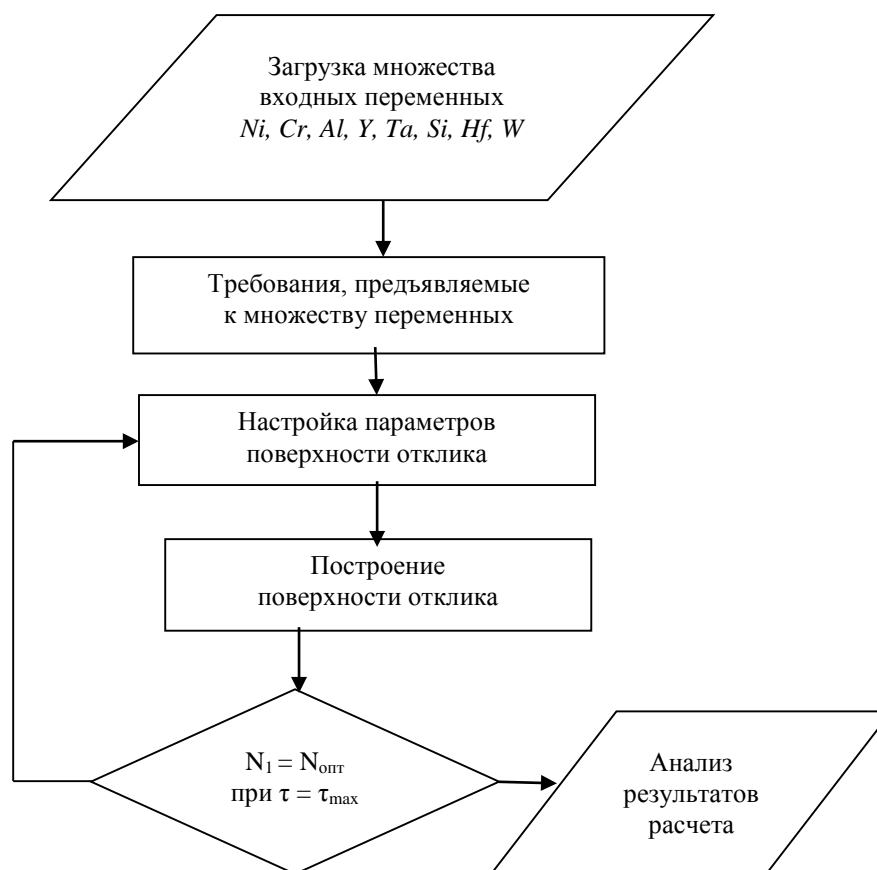


Рис. 1. Структурная схема математической модели

Установлено [1, 4, 5], что для обеспечения высоких защитных свойств покрытия в нем целесообразно присутствие следующих элементов: Ni, Al, Cr, W, Ta, Y, Si, Hf. Встает вопрос определения концентраций легирующих элементов. В работе с помощью математической модели была решена задача подбора рационального состава первого слоя комбинированного покрытия.

Полученные в результате решения задач множества Парето-оптимальных решений представлены на рис. 2. Из представленных результатов видно, что при заданной стоимости катода

существует компромисс между привесом и изменением толщины. Увеличение стабильности покрытия, выраженное в неизменении толщины покрытия, в этих условиях приводит к увеличению привеса. Снижение стоимости катода приводит к ухудшению обоих эксплуатационных показателей покрытия: увеличению изменения толщины и привеса.

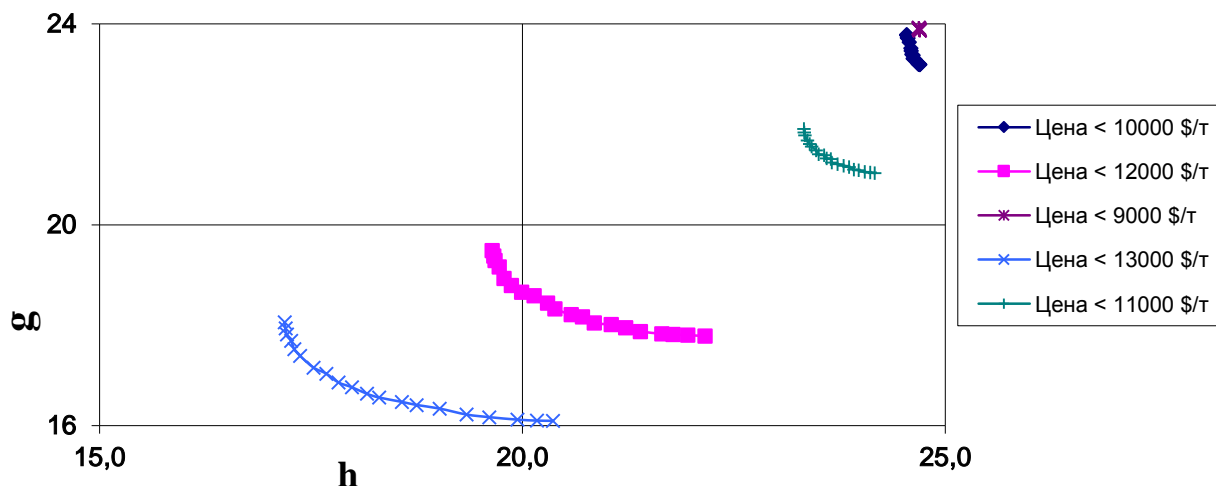


Рис. 2. Результаты решения задач множества Парето-оптимальных решений

Таким образом, в зависимости от имеющихся средств выбрать состав металлического подслоя для ТЗП с учетом предъявляемых к нему требований по свойствам.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С.** Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 622 с.
2. **Елисеев Ю.С., Абраимов Н.В., Крымов В.В.** Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении. М.: Высшая школа, 1999. 525 с.
3. **Miller R.A.** Thermal Barrier Coatings for Aircraft Engines – History and Directions. Thermal Barrier Workshop. NASA CP 3312, 1995. P. 17.
4. Stecura St. Two – Lager TB Systems for Ni-Al-Mo Alloy omol Effects of Alloy Thermal Expansion on System – Life. Ceramic Bull. 1982. Vol. 62. № 2. P. 256–262.
5. **Мубояджян С.А.** Теплозащитные покрытия для деталей перспективных газотурбинных двигателей / С.А. Мубояджян, Ю.И. Головин, Д.С. Горлов, Н.Г. Бычков, А.Р. Лепешкин, А.В. Першин, А.Д. Рекин // Новые технологические процессы и надежность ГТД. М.: ЦИАМ, 2008. Выпуск №7. С. 158–170.

## APPLICATION OF MATHEMATICAL SIMULATION TO CHOOSE THE COMPOSITION OF THE THERMAL PROTECTION COATING OF UNDERLAYER

**Amouei A.M., Mirhosseini G.R., Jafari A., Saadatibaei M.**

The article considers the use of mathematical modeling while designing thermal protection coating for GTE turbine blades. The results of mathematical simulation are presented and comparison with experimental data is given. The obtained results allow to choose the composition of a underlayer to cover the metal layer of thermal protection coating.

**Key words:** thermal protection coating, modeling, metal underlayer approximation.

## REFERENCES

1. **Abraimov N.V., Eliseev Ju.S.** Himiko-termicheseskaja obrabotka zharoprochnyh stalej i splavov. M.: Internet Inzhiniring, 2001. 622 s.
2. **Eliseev Ju.S., Abraimov N.V., Krymov V.V.** Himiko-termicheseskaja obrabotka i zashhitnye pokrytija v aviadvigatelestroenii. M.: Vysshaja shkola. 1999. 525 s.
3. **Miller R.A.** Thermal Barrier Coatings for Aircraft Engines – History and Directions. Thermal Barrier Workshop. NASA CP 3312. 1995. P. 17.
4. Stecura St. Two – Lager TB Systems for Ni-Al-Mo Alloy omol Effects of Alloy Thermal Expansion on System – Life. Ceramic Bull. 1982. Vol. 62. № 2. P. 256–262.
5. **Mubojadzhan S.A.** Teplozashhitnye pokrytija dlja detalej perspektivnyh gazotur-binnyh dvigatelej / S.A. Mubojadzhan, Ju.I. Golovin, D.S. Gorlov, N.G. Bychkov, A.R. Lepeshkin, A.V. Pershin, A.D. Rekin. Novye tehnologicheskie processy i nadezhnost' GTD. M.: CIAM, 2008. Vypusk № 7. S. 158–170.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Амуи, АлиМохаммад**, окончил МАТИ в 2000, область научных интересов – технология газотурбинных двигателей.

**Мирхосейни, ГоламРеза**, окончил МАТИ в 2000, область научных интересов – технология газотурбинных двигателей.

**Джафари, Абед**, окончил ИИМ Iran в 2011, область научных интересов – технология газотурбинных двигателей.

**Саадатибаи Мехди**, аспирант МГТУ ГА, область научных интересов – технология производства и ремонт авиационной техники.