

Н. Ю. ДУДАРЕВА

ПОВЕРХНОСТНОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЛОПАТОК ГТД ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ Mg-B МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Исследовано влияние концентрации силикатно-щелочного электролита и электрических режимов процесса микродугового оксидирования (МДО) на свойства модифицированного поверхностного слоя, формируемого на заготовках лопаток ГТД из композиционного материала на основе Mg-B. Показана возможность упрочнения поверхностей лопаток ГТД из композиционного материала на основе Mg-B. Получены уравнения регрессии, связывающие значения концентрации электролита и электрических режимов с толщиной и микротвердостью МДО-слоя. *Лопатки ГТД; упрочнение; микродуговое оксидирование; поверхность; микротвердость; композиционные материалы*

ВВЕДЕНИЕ

Разрабатываемые газотурбинные двигатели (ГТД) пятого и шестого поколений требуют улучшения удельных показателей при одновременном повышении надежности и ресурса. Дальнейшие разработки по развитию ГТД связаны с повышением скорости и температуры газов перед турбиной [1]. В этих условиях происходит рост термомеханической напряженности лопаток, что в свою очередь приводит к усложнению их конструкции. От надежности лопаток двигателя в наибольшей степени зависит ресурс газотурбинных двигателей в целом, и, соответственно, безопасность полетов. Кроме высоких температур, лопатки подвергаются действию набегающего потока газов; коррозии, вследствие контакта с отработавшими газами; а также испытывают большие центробежные нагрузки [1]. Проблему надежности газовых турбин авиадвигателей можно решить только путем разработки и внедрения качественно новых технологий, как в области материалов, так и в области методов обработки.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В перспективных двигателях пятого и шестого поколений на первых ступенях применяются лопатки из металлокомпозитов, где в матрице из алюминиевого или магниевых сплава располагаются армирующие нити из бора или углерода. Однако такие лопатки нуждаются в защите от износа и эрозии, а лопатки из магниевых сплавов – дополнительно в защите от возгорания. Решить вышеперечисленные проблемы можно посредством формирования на поверхности лопаток упрочненного слоя, позво-

ляющего увеличить не только их жаропрочность и коррозионную стойкость, но и заметно повысить прочность и износостойкость, что, в свою очередь, позволило бы увеличить их ресурс.

Известно, что оксид магния обладает очень высокой температурой плавления (2825 °С) и благодаря этому свойству он широко применяется в производстве огнеупорных материалов. Кроме того, оксид магния обладает высокой твердостью и износостойкостью [2]. Поэтому нанесенная или сформированная на поверхности магниевых лопаток оксидная пленка должна повысить их износостойкость, ресурс, а также расширить диапазон рабочих температур ГТД.

В данной работе рассматривается возможность использования метода микродугового оксидирования (МДО) для формирования упрочненного слоя на поверхности лопаток из композиционного материала на основе Mg-B. Метод МДО позволяет создавать на поверхности заготовок модифицированный слой, состоящий из оксида металла подложки [3].

Цель данной работы – исследование возможности упрочнения лопаток ГТД из композиционных материалов на основе Mg-B методом МДО.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Гипотеза данной работы строится на следующих положениях:

1. Известно, что метод МДО используется для создания упрочненных поверхностных слоев на деталях из вентильных металлов, то есть металлов, на поверхности которых при атмосферном воздействии образуется диэлектрическая оксидная пленка. К таким металлам относятся тантал, титан, алюминий и магний. Кроме

того, на настоящий момент разработаны технологии нанесения МДО-слоев на детали из магниевых сплавов, а также алюминиевых сплавов, содержащих магний, например МЛ5, АМг1, АМг3, АМг5 [3, 4]. Это дает основание предположить, что и на поверхности лопаток из композитных материалов на основе Mg-B также возможно получить модифицированный слой методом МДО.

2. При МДО-обработке на поверхности деталей формируется слой, состоящий из оксида металла подложки, то есть МДО-слой, полученный на поверхности детали из магниевого сплава, будет состоять из оксида магния, который имеет высокую твердость – 5,5–6 по шкале Мооса (микротвердость 6–7 ГПа). В связи с тем, что твердость поверхности напрямую связана с ее износостойкостью, МДО-слой позволит повысить и износостойкость лопаток ГТД.

Если верны вышеприведенные положения гипотезы, то методом МДО можно создать на поверхности лопаток ГТД из композиционного материала на основе Mg-B модифицированный поверхностный слой, обладающий повышенной твердостью.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе анализа литературы [3, 4] было установлено, что для обработки магниевых сплавов предпочтительными являются значения концентраций компонентов электролита от 1 до 2 г/л КОН и от 1 до 8 г/л для Na_2SiO_3 . Напряжение на электродах было выбрано на минимально возможных для рабочей установки уровнях, чтобы предотвратить травление поверхности лопатки в процессе обработки. Продолжительность процесса упрочнения составила от 30 до 60 минут.

Обработке подвергались заготовки лопаток ГТД из композиционного материала на основе Mg-B (рис. 1) после предварительного шлифования поверхности, которое проводилось с целью удаления с нее оксидной пленки, образовавшейся в атмосфере.

Обработка МДО проводилась в электролитической ванне с использованием силикатно-щелочного электролита, представляющего собой раствор КОН и Na_2SiO_3 в дистиллированной воде. В качестве факторов эксперимента были выбраны:

- концентрация КОН в электролите – $C_{\text{КОН}}$, г/л;
- концентрация Na_2SiO_3 в электролите – $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}$, г/л;

- емкость конденсаторной батареи установки – C , мкФ;
- продолжительность обработки – t , ч.



Рис. 1. Заготовка лопатки ГТД из композиционного материала на основе Mg-B

Уровни факторов и их значения приведены в табл. 1.

Температура электролита в процессе обработки контролировалась при помощи термометра и не превышала 22°C. Качество МДО-слоя оценивалось по значениям микротвердости (H_μ) и толщины (h) получаемого модифицированного слоя, а также по его внешнему виду (наличие боровых нитей на поверхности, однородности, наличие муллита).

Таблица 1

Уровни и значения факторов

| Нормированные значения факторов | Фактические значения факторов | | | |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-----------|---------|
| | $C_{\text{КОН}}$, г/л | $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}$, г/л | C , мкФ | t , ч |
| | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 |
| -1 | 1,0 | 1,0 | 100 | 0,50 |
| 0 | 1,5 | 2,5 | 150 | 0,75 |
| +1 | 2,0 | 4,0 | 200 | 1,00 |
| Шаг | 0,5 | 1,5 | 50 | 0,25 |

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты эксперимента представлены в табл. 2. Замеры микротвердости МДО-слоя проводились на цифровом стационарном микротвердомере HVS-100 при нагрузке $P = 200$ г как математическое ожидание по трем измерениям. Нагрузка для измерения микротвердости выбиралась на основании рекомендаций [3, 4]. Толщина упрочненного слоя замерялась при помощи портативного толщиномера ТТ-210 с универсальным датчиком FN. Микротвердость поверхности образца без упрочнения составляла $H_\mu = 0,26$ ГПа. На многих режимах, определяющих факторное пространство, качество слоя по-

лучалось неудовлетворительным – наблюдался выход боровых нитей на поверхность образца и вытравливание магниевое сплава (рис. 2, а). На рис. 2, б приведен образец с качественным МДО-слоем, который был получен в опыте № 6 (табл. 2).

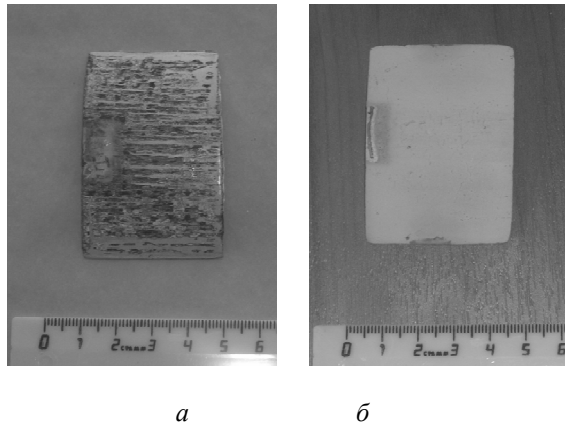


Рис. 2. Образцы лопаток ГТД из композиционного материала на основе Mg-B с поверхностью, упрочненной методом МДО: а – некачественный слой с боровыми нитями на поверхности; б – качественный слой

Таблица 2

План и результаты экспериментов

| № опыта | Факторы | | | | Микро-твердость H_{μ} , ГПа | Толщина, h , мкм |
|---------|---------|-------|-------|-------|---------------------------------|--------------------|
| | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | | |
| 1 | - | - | - | - | 1,6 | 33,6 |
| 2 | + | - | - | + | 1,5 | 12,3 |
| 3 | - | + | - | + | 1,2 | 29,4 |
| 4 | + | + | - | - | 1,1 | 27,5 |
| 5 | - | - | + | + | 2,9 | 27,1 |
| 6 | + | - | + | - | 7,1 | 13,3 |
| 7 | - | + | + | - | 3,4 | 34,3 |
| 8 | + | + | + | + | 2,2 | 25,9 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3,4 | 14,1 |

Основываясь на теории планирования эксперимента [5], были получены эмпирические зависимости влияния концентраций компонентов электролита, электрических режимов и продолжительности процесса МДО на значения микротвердости (H_{μ}) и толщины (h) МДО-слоя, сформированного на поверхности лопаток ГТД:

$$H_{\mu} = -14,81708 + 5,67917C_{\text{KOH}} + 1,81083C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} + 0,08043C + 10,725t - 0,89167C_{\text{KOH}} C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} - 0,00605C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} C - 0,0535Ct - 3,63tC_{\text{KOH}}; \quad (1)$$

$$h = 100,77708 - 28,24083C_{\text{KOH}} - 5,81083C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} - 0,22805C - 57,265t + 4,12833C_{\text{KOH}} C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} + 0,01462C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} C + 0,2477Ct + 8,77tC_{\text{KOH}}; \quad (2)$$

где H_{μ} – микротвердость упрочненного МДО-слоя, ГПа;
 h – толщина упрочненного слоя, мкм;
 C_{KOH} – концентрация KOH в растворе электролита, г/л;

$C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}$ – концентрация Na_2SiO_3 в растворе электролита, г/л;

C – емкость конденсаторной батареи установки, мкФ;

t – продолжительность обработки, ч.

Результаты расчета по вышеприведенным формулам расходятся с результатами эксперимента в среднем на 21% для толщины МДО-слоя и на 39% для микротвердости.

Анализируя полученные уравнения, можно утверждать, что наибольшее влияние на качество МДО-слоя оказывает концентрация KOH в электролите и продолжительность обработки. Увеличение количества KOH приводит к повышению микротвердости поверхности и снижению толщины МДО-слоя, аналогичным образом действует и фактор времени. Однако не следует проводить процесс обработки более 1 часа, так как вследствие параллельно происходящего процесса разрушения формируемого МДО-слоя активными компонентами электролита, армирующие боровые нити выходят на поверхность образцов, ухудшая качество упрочненного слоя.

ВЫВОДЫ

По результатам проведения работы можно сделать следующие выводы:

1. Показана возможность упрочнения поверхности лопаток ГТД из композиционных материалов на основе Mg-B методом МДО.

2. Получены эмпирические зависимости влияния значений концентраций составляющих электролита, емкостей конденсаторов и времени обработки на толщину и микротвердость поверхностного слоя.

Максимальное значение микротвердости МДО-слоя, сформированного на лопатках ГТД, составило 7,11 ГПа, что в 27,3 раза превышает величину микротвердости исходного материала.

Таким образом, основываясь на полученных в ходе данной работы результатах, было установлено, что методом МДО можно получать модифицированные поверхностные слои на поверхности лопаток ГТД, изготовленных из композиционного материала на основе Mg-B. При этом МДО-слои имеют микротвердость, в 27,3 раз превышающую микротвердость материала подложки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей / Под ред. А. М. Ахмедзянова. Уфа: УГАТУ, 2000. 454с.
2. **Самсонов Г. В., Куми О. П.** Физико-химические свойства окислов. М., 1978.
3. Микродуговое окислирование: теория, технология, оборудование / И. В. Суминов [и др.]. М.: ЭКОМЕТ, 2005.
4. **Чуфистов О. Е., Симцов В. В., Якушев Д. А.** Влияние режимов микродугового окислирования на структуру, фазовый состав и свойства формируемых окисдных слоев / Сб. науч. тр. Ч. 9. М.: МИФИ, 2001. С. 40–41.
5. **Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.

ОБ АВТОРЕ



Дударева Наталья Юрьевна, доц. каф. ДВС. Дипл. инж. по технол. машиностр. (УГАТУ, 1994). Канд. техн. наук по тепл. двигателям (там же, 1999). Иссл. в обл. износостойких покрытий деталей двигателей.