

**Изменение фазового состава структуры покрытий,  
обработанных лазерным излучением**

Температура поверхностного слоя, °С	Прочность сцепления, МПа	Основная фаза
800	60-65	Ti <sub>2</sub> Ni + TiNi <sub>3</sub>
1200	100-130	TiO <sub>2</sub> + TiNi <sub>3</sub>
1300	190	TiO <sub>2</sub>

Рентгеноструктурным анализом установлено появление фазы TiO<sub>2</sub> и практически исчезновение TiNi-фазы в покрытии при температуре, близкой к температуре плавления подложки.

Таким образом, при обработке лазерным лучом плазменных покрытий из сплава ПН55Т45 происходит увеличение прочности сцепления с подложкой от 60 до 190 МПа, т.е. до 3 раз и более.

Данную технологию получения покрытий можно использовать для высоконагруженных пар трения – деталей машин и оборудования металлургического, энергетического, химического, нефтедобывающего и других производств, где требуются высокая износостойкость, устойчивость к коррозии.

При использовании технологии нанесения плазменных никель-титановых покрытий с последующей лазерной обработкой на шейки крупногабаритных валов – типа роторов нефтяных насосов износостойкость повышается в 1,5–2 раза.

УДК 621.793

Н. В. Спиридонов, В. В. Зенкевич

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ ОКИСИ АЛЮМИНИЯ

*Белорусская государственная политехническая академия  
Минск, Беларусь*

Основными требованиями к режимам лазерной обработки осажденных покрытий из окиси Al являются создание условий перехода g- в α-модификацию кристаллической решетки, получение плотной, беспористой структуры и прочной связи с подложкой, исходя из чего и должны задаваться параметры теплового процесса.

Анализ явлений, протескающих при обработке покрытий концентрированными потоками энергии, показал, что для получения качественных поверхностных слоев из керамических материалов тепловой процесс должен протекать в режиме спекания без

расплавления подложки и покрытия. В противном случае будет происходить сворачивание покрытия из-за большого краевого угла смачивания. Вследствие инертности материала по отношению к подложке, отсутствия диффузионных процессов на границе “покрытие-подложка”, большого различия коэффициентов линейного расширения, необходимо вводить промежуточный слой материала для активизации контакта.

Так как в рассматриваемой модели отсутствует расплавление и затвердевание материалов покрытия и подложки, была поставлена упрощенная плоская тепловая задача, относящаяся к прямым граничным задачам теплопроводности со следующими условиями:

- материал покрытия – оксид алюминия ( $Al_2O_3$ );
- материал основы – сталь 45;
- пористость покрытия ( $\Pi$ ) – 0,1–0,2;
- толщина покрытия ( $\delta$ ) – 0,5 мм;
- плотность мощности лазерного излучения в пятне нагрева ( $q_0$ ) – 1,6–3,4 кВт/см<sup>2</sup>;
- скорость перемещения луча ( $V$ ) – 11,7–20 мм/с;
- мощность лазерного излучения ( $P$ ) – 800 Вт.

При постановке задачи сделаны следующие допущения:

а) теплофизические свойства оксида алюминия и стали не зависят от температуры;

б) распределение плотностей мощности на поверхности покрытия в пределах зоны воздействия лазерного луча – равномерное;

в) в связи с допущением б) и большим значением отношения  $D/\delta \geq 12$  ( $D$  – диаметр пятна напыления на поверхности покрытия), тепловой поток вглубь материала считаем плоско-параллельным;

г) в связи с малой толщиной подслоя из сплава ПХ20Н80 или терморезирующего порошка ПТ-НА-01, считаем покрытие нанесенным непосредственно на основу из стали 45.

Таким образом, трехмерная в общем случае тепловая задача сводится к одномерной задаче теплопроводности с граничными условиями 3-го рода и дискретным изменением теплофизических свойств среды ( $Al_2O_3$ -сталь) по координате. Граничным условием в данном случае является действие на поверхности покрытия поверхностного источника тепла, время действия которого в каждой из точек поверхности эквивалентно времени нахождения этой точки в зоне воздействия лазерного излучения.

В связи с большим числом варьируемых параметров (плотность мощности лазерного излучения –  $q$ ; скорость передвижения луча –  $V$ ; пористость –  $\Pi$ ; теплопроводность –  $\lambda$ ; температуропроводность –  $a$ ), вычислительный эксперимент организован по типу полного факторного эксперимента  $2^4$  в методе ортогонального планирования. Число варьируемых – факторов равно четырем ( $\Pi$ ;  $\lambda$ ,  $a$ ;  $q$ ;  $V$ ). Функцией отклика является температура  $T$ .

Согласно [1], температура в покрытии толщиной  $\delta$  определяется уравнением:

$$T = T_0 + \theta \frac{q \cdot \delta}{\lambda} \quad (1)$$

где  $T$  – температура в покрытии, К;  $T_0$  – постоянная температура, установившаяся при нагреве на границе основы и слоя  $Al_2O_3$ , К;  $\delta$  – толщина покрытия, м;  $\theta$  – параметр температуры.

Температура, установившаяся на границе основы и слоя  $Al_2O_3$  при лазерной обработке, определенная экспериментально с помощью термопары, составляет  $T_0 = 558\text{--}573$  К. Для последующих расчетов принимаем значения  $T_0 = 573$  К.

Параметр температуры  $\theta$  определяем согласно [1] с использованием следующих уравнений:

$$\theta = 1 - \eta - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \times \sin[\mu_n(1 - \eta)] \exp(-\mu_n F_0) \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_n &= (2n - 1) \times \frac{\pi}{2} \\ A_n &= (-1)^{n+1} \times \frac{2}{\mu_n^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$F_0 = \frac{a \cdot \tau}{\delta} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{x}{\delta} \quad (5)$$

где  $\tau$  – время с момента начала воздействия поверхностного источника тепла, с;  $x$  – расстояние точки внутри слоя покрытия от поверхности, м;  $F_0$  – безразмерный критерий Фурье.

Задаваясь значениями  $x$  и  $t$ , по уравнениям (2)–(5) рассчитываем параметр  $q$  и по уравнению (1) определяем значение температуры:  $T = f(x, \tau)$ .

Полученные зависимости температуры от глубины слоя оксида алюминия (рис. 1) имеют линейный характер. При различных режимах лазерной обработки можно получить в покрытии достаточно широкий диапазон температур. Исходя из поставленных задач исследований, были исключены из рассмотрения режимы, при которых на большой глубине достигалась температура выше температуры плавления оксида алюминия – 2323 К, а также режимы, при которых не достигалась вообще, либо достигалась на небольшой глубине температура нижней границы перехода  $\gamma\text{-}Al_2O_3$  в  $\alpha\text{-}Al_2O_3$  и спекания оксида алюминия. При остальных режимах обработки в покрытии до глубины 0,2–0,35 мм достигаются температуры, достаточные для спекания оксида алюминия и перехода  $\gamma\text{-}Al_2O_3$  в  $\alpha\text{-}Al_2O_3$ , т. е. 1223–1753 К.

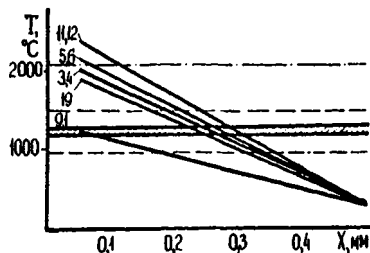


Рис. 1. Зависимость температуры ( $T$ ) в слое  $Al_2O_3$  от глубины ( $x$ ) ( $\tau=1c$ ):

- - линия температуры плавления  $Al_2O_3$  ( $2050^\circ C$ );
- - линии граничных температур, при которых происходит переход  $\gamma-Al_2O_3$  в  $\alpha-Al_2O_3$  и спекание оксида алюминия ( $950$  и  $1480^\circ C$ );
- ///////** - зона оптимальной температуры перехода  $\gamma-Al_2O_3$  в  $\alpha-Al_2O_3$  и спекания оксида алюминия ( $1200-1300^\circ C$ );

Зависимости температуры покрытия из оксида алюминия на глубине 0,2 мм от времени, начиная с момента воздействия луча лазера, показывают, что нагрев покрытия наиболее интенсивно происходит в первые 0,2–0,4 с, и затем в пределах до 1 с температура покрытия остается практически постоянной. Для режимов, когда в покрытии до глубины 0,2–0,35 мм достигаются температуры, достаточные для спекания оксида алюминия и перехода  $\gamma-Al_2O_3$  в  $\alpha-Al_2O_3$ , скорости нагрева покрытия изменяются от  $3,5 \cdot 10^3$  до  $6,9 \cdot 10^3$  град/с, т.е. составляют в среднем  $5 \cdot 10^3$  град/с.

Таким образом, при лазерной обработке в покрытии достигаются температуры, достаточные для спекания оксида алюминия и перехода  $\gamma-Al_2O_3$  в  $\alpha-Al_2O_3$ . Согласно литературным данным, процесс спекания оксида алюминия и перехода  $\gamma-Al_2O_3$  в  $\alpha-Al_2O_3$  достаточно длителен. Так, спекание оксида алюминия при 1573 К [2] продолжается 8 часов, а  $\gamma-Al_2O_3$  переходит в  $\alpha-Al_2O_3$  при 1733–1753 К за 45 минут [3]. Однако известно [4], что спекание прессованных образцов, их усадка и переход  $\gamma-Al_2O_3$  в  $\alpha-Al_2O_3$  происходит тем эффективнее, чем быстрее достигается конечная температура.

Высокая скорость нагрева покрытия при лазерной обработке приводит к значительному ускорению процесса спекания и уплотнения покрытий из  $\gamma-Al_2O_3$ . То же самое можно сказать и о времени перехода  $\gamma-Al_2O_3$  в  $\alpha-Al_2O_3$ , которое при высоких скоростях лазерного нагрева стремится ко времени, затрачиваемому на нагрев. Более того, т.к. скорость охлаждения после лазерной обработки также весьма велика, при охлаждении в покрытии должна фиксироваться высокотемпературная а-модификация оксида алюминия.

Для уточнения режимов лазерной обработки были построены зависимости температуры нагрева покрытия из оксида алюминия на глубине  $x = 0,2$  мм при времени,

начиная с момента воздействия луча лазера  $t = 1$  с, от плотности мощности поверхностного теплового источника (рис. 2).

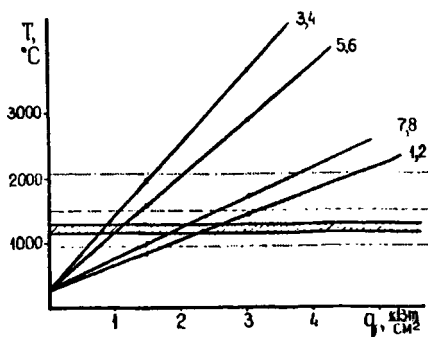


Рис. 2. Зависимость температуры покрытия из оксида алюминия ( $T$ ) от плотности мощности поверхностного теплового источника ( $q$ ) ( $x=0,2$  мм;  $\tau=1$  с):

----- — линия температуры плавления  $Al_2O_3$  ( $2050^\circ C$ );

----- — линии граничных температур, при которых происходит переход  $\gamma-Al_2O_3$  в  $\alpha-Al_2O_3$  и спекание оксида алюминия ( $950$  и  $1480^\circ C$ );

////// — зона оптимальной температуры перехода  $\gamma-Al_2O_3$  в  $\alpha-Al_2O_3$  и спекания оксида алюминия ( $1200-1300^\circ C$ );

Используя зависимости рис. 1 и рис. 2, был произведен выбор режимов лазерной обработки, которые позволяют произвести спекание покрытия из  $Al_2O_3$  и добиться перехода  $\gamma-Al_2O_3$  в  $\alpha-Al_2O_3$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. — Л.: Энергия, 1976. — 352 с.
2. Вяльцев А.М. Исследование условий получения и свойств плазменных окисных покрытий. // Исследования в обл. новых материалов. — Киев, 1977. — С.149–153.
3. Аппен А.А. Температуроустойчивые неорганические покрытия. — М.-Л.: Химия, 1976. — 296 с.
4. Некоторые аспекты спекания чистых окислов /С.Тейхнер, Р.Кейла, Дж.Эльстон, Ф.Жуле, А.Буррас, Б.Франсуа, П.Вернон//Керамика. Сборник трудов 1 и 2 конференций британского голландского керамических обществ. Металлургия. — М., 1967. — 228 с.