

И.Н. Шиганов, П.Е. Самарин

## МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ КАРБИДАМИ КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ОПЛАВЛЕНИЯ

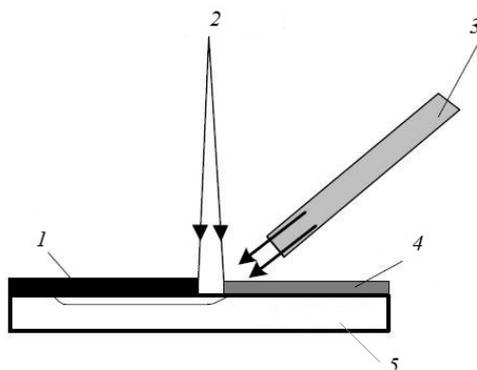
*Рассмотрена технология модифицирования поверхности сталей, алюминиевых и титановых сплавов методом лазерного оплавления. Наиболее перспективно использовать карбид кремния в качестве основного элемента при модифицировании поверхности. Проведены исследования по подбору материала связующего вещества при создании шликера, а также эксперименты по модифицированию поверхности алюминиевого сплава АМгб при оплавлении шликерного слоя на основе карбида кремния.*

**E-mail:** [niikmtp@mx.bmstu.ru](mailto:niikmtp@mx.bmstu.ru)

**Ключевые слова:** модифицирование поверхности, лазерное оплавление, шликерное покрытие, карбид кремния.

Структура и свойства поверхности и приповерхностных слоев деталей машин определяют их функциональные и эксплуатационные характеристики: износостойкость, коррозионная стойкость, жаростойкость и др. Существует достаточно много технологических процессов, позволяющих регулировать или перестраивать поверхностные слои деталей машин. В статье рассмотрена технология модифицирования поверхности детали методом лазерного оплавления предварительно нанесенного покрытия или шликерного покрытия.

Процесс представляет собой совместное плавление лазерным излучением легирующего компонента и подложки, в результате чего осуществляется легирование тонкого поверхностного слоя и изменение его свойств (рис. 1). Так, существенно увеличивается твердость



**Рис. 1. Схема процесса лазерного оплавления шликерного слоя:**

1 — модифицированный слой; 2 — лазерный луч; 3 — защитный газ; 4 — предварительно нанесенный слой; 5 — подложка

поверхности, значительно возрастает теплостойкость, износостойкость, жаропрочность и различные комбинации этих характеристик. Применение лазерного метода нагрева позволяет модифицировать поверхность детали в локальных участках, не нагревая при этом всю деталь, сохраняя ее исходные свойства и значительно снижая коробления.

В зависимости от требуемых свойств поверхности детали, а также материала, из которого он изготовлен, модифицирование осуществляют различными упрочняющими элементами.

По данным работы [1], модифицирование сталей проводилось составами, содержащими бор (В) и вольфрам (W). Вольфрам, как карбидообразующий элемент, придает легированной поверхности значительную теплостойкость, а бориды железа обладают высокой твердостью при нормальных и повышенных температурах и хорошей сопротивляемостью износу. Структурные исследования показывают на образование в тонком поверхностном слое глубиной 0,3...0,5 мм сложной микроструктуры, состоящей из пересыщенной  $\alpha$ -фазы, мелкодисперсных боридов вольфрама ( $W_2B_5$ ), а также боридов железа ( $Fe_2B$ ), ( $Fe_3B$ ) с микротвердостью около 13 000 МПа. В результате указанной обработки теплостойкость данных групп сталей может быть значительно повышена. Микротвердость в зоне оплавления составляет 12 000...14 000 МПа. При температуре отпуска до 650 °С не происходит значительного снижения микротвердости в зоне легирования, после четырехчасового отпуска при температуре 750 °С микротвердость падает до 7 000 МПа. Исследования на жаростойкость показывают, что интегральная микротвердость упрочненного слоя сохраняется до температур 600...650 °С, причем высокая микротвердость отдельных структурных составляющих сохраняется до более высоких температур.

В работе [2] рассмотрен пример лазерного легирования поверхности алюминиевого сплава АА6061. На поверхность сплава предварительно наносился порошок, содержащий частицы карбида кремния размерами 6 и 45 мкм, а также смесь 20...60 % порошка карбида кремния с порошком материала основы АА6061 размером частиц менее 40 мкм. Согласно результатам экспериментов, максимальная толщина предварительно наносимого слоя, при которой формируется качественное покрытие, составляет 80 мкм. Однако для получения большего по толщине покрытие необходимо к порошку карбида кремния добавлять порошок основы АА6061, который при расплавлении служит матрицей композиционного слоя, образуемого на поверхности основного сплава. Композиционный слой имеет износостойкость, значительно превышающую износостойкость основного металла.

#### Химический состав сплава АА6061, %

Si .....	0,4...0,8
Fe .....	0,7
Cu .....	0,15...0,40

Mn .....	0,15
Mg .....	0,8...0,12
Cr .....	0,04...0,35
Zn .....	0,25
Ti .....	0,15
Другие элементы .....	Одиночно 0,05; итог 0,15
Al .....	Остаток

В работе [3] рассмотрено легирование титанового сплава Ti6Al4V при предварительном нанесении покрытия из карбида кремния размером частиц 45 мкм. На поверхности сплава удалось получить композиционный слой твердостью 650...800 HV при твердости основного сплава 300 HV. При лазерном легировании поверхности образуются высокотемпературные керамические фазы TiC, TiSi и Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>. Состав фаз изучался с помощью рентгеноспектрального анализа на основе метода энергетической дисперсии (EDXRD).

В работе [4] рассмотрено получение на поверхности титанового сплава Ti6Al4V высокотемпературного барьерного покрытия с использованием метода лазерного оплавления предварительно нанесенного покрытия на основе никеля и карбида кремния. Исследовались различные сочетания предварительно наносимого покрытия: 80 % Ni и 20 % SiC; 50% Ni и 50 % SiC; 60 % Ni и 40 % SiC; 100 % SiC. Легированный слой состоял из дендритов и интерметаллидных включений. Было установлено, что степень населенности дендритов зависит от состава покрытия и режимов лазерной обработки. Твердость покрытия составила 600...1200 HV, что в 3—6 раз выше твердости титановой основы. Наличие силицидов титана (TiNiSi, Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, TiSi) и никелида (NiTi<sub>2</sub>) на поверхности легированного покрытия было подтверждено рентгеновским анализом. Такие интерметаллидные фазы повышают высокотемпературные свойства титана и его сплавов. Для определения фазового состава легированной поверхности проводился рентгеноструктурный анализ на основе метода энергетической дисперсии. Диффузия покрытия или легирующих элементов в области лазерного легирования исследовались с помощью технологии вторичной ионной масс-спектропии (SIMS). Таким образом, технология модифицирования поверхности методом лазерного оплавления предварительно нанесенного покрытия весьма эффективный и технологичный метод.

Одной из важных технологических проблем указанной технологии является подбор материала связующего вещества при создании шликерного слоя, так как он существенно влияет на качество получаемого слоя. До настоящего времени целенаправленных работ в этом направлении не проводилось. К материалу связующего вещества предъявляются следующие требования:

— материал должен обеспечивать минимальную адгезию к подложке и прочность шликерного слоя для удержания порошка на поверхности в любых пространственных положениях;

- нанесенный слой должен полностью выгорать и не взаимодействовать с легирующим компонентом и подложкой;
- должно обеспечиваться легкое нанесение и удаление остатков после оплавления;
- материал должен быть нетоксичным и иметь относительно низкую стоимость.

Эксперименты по подбору материала связующих веществ проводились на роботизированном комплексе (рис. 2), который состоит из про-



**Рис. 2. Экспериментальная установка**

мышленного робота ABB IRB 2400, иттербиевого волоконного лазера ЛС-4-К мощностью 4 кВт фирмы НТО «ИРЭ-Полнос», а также сварочной головки Y50 с фокусным расстоянием  $F = 300$  мм. В качестве связующих веществ использовались такие материалы, как цапонлак, силикатный клей, клей «Момент», полиэфирная смола, сухой спирт. Основными критериями выбора материала связующих веществ были усадка после высыхания, технологичность приготовления шликера, наличие продуктов горения. Результаты проведенных экспериментов по оплавлению связующих веществ представлены в таблице.

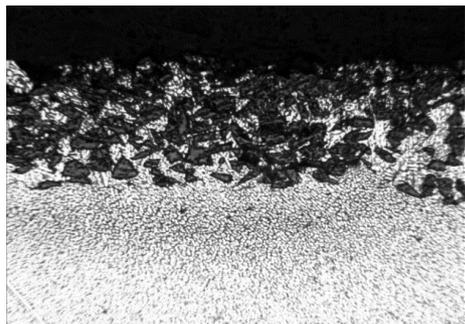
Проведенные эксперименты по выбору связующего вещества показали, что наиболее технологичным веществом, соответствующим большинству предъявляемых требований, является сухой спирт. В результате его обработки не образуется дополнительных продуктов сгорания, а также не возникает существенных проблем при приготовлении и его нанесении на поверхность. Это положительно влияет на качество модифицированного слоя.

Следующий этап исследования рассматриваемой технологии — проведение экспериментов по оплавлению покрытия, состоящего из зеленого карбида кремния размером частиц 14 мкм. Толщина предварительно нанесенного слоя составляла 0,1 мм. Покрытие наносилось на предварительно подготовленные образцы из алюминиевого сплава АМг6 размером 50×50×5 мм.

## Результаты экспериментов по оплавлению различных связующих веществ

Материал	Усадка	Технологичность приготвления шликера	Наличие продуктов сгорания	Особенности оплавления
Цапонак	Сильная усадка после высыхания	Вследствие низкой вязкости трудно добиться равномерного распределения частиц по толщине слоя	Отсутствуют	Сильное выгорание соседних областей
Силикатный клей	Отсутствует	Быстрое время отвердевания не позволяет тщательно размешать частицы порошка и нанести шликер на поверхность	Характерный остаток белого цвета	Разрушение нанесенного слоя вблизи области лазерного воздействия
Клей «Момент»	Небольшая усадка	Быстрое время отвердевания не позволяет тщательно размешать частицы порошка и нанести шликер на поверхность	Остаток черного цвета	Сильное выгорание соседних областей
Полиэфирная смола	Отсутствует	Достаточно вязкая, реакция полимеризации начинается только после введения катализатора	Сажа	Несильное выгорание соседних областей
Сухой спирт	Отсутствует	Простога приготовления, времени достаточно для перемешивания порошка и последующего нанесения на поверхность	Выгорает без образования дополнительных продуктов	Требуется просушивание слоя перед оплавлением

Оплавление проводилось на режимах со следующими параметрами: скорость обработки 2 м/мин; диаметр пятна излучения 3 мм; мощность излучения 1...3 кВт; защита осуществлялась аргоном с расходом 25 л/мин. Микроструктуры поверхностного слоя, полученного после обработки, показаны на рис. 3.

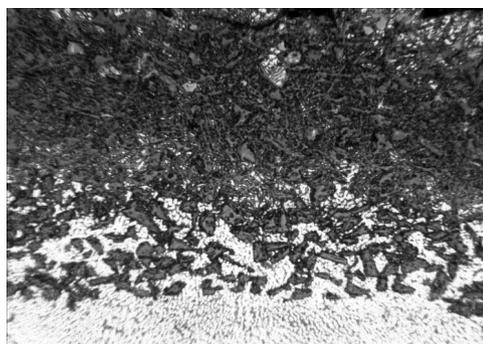


*a*



*б*

**Рис. 3. Микроструктуры модифицированной поверхности сплава АМг6 при мощности обработки  $P = 1$  (а), 2 (б) и 3 (в) кВт**



*в*

При обработке на мощности 1 кВт частицы порошка внедрились в подложку и равномерно распределились по толщине основного металла (рис. 3, а). Глубина проникания частиц не превышает 50 мкм при глубине проплавления основного металла 1,5 мм. При обработке на мощностях 2 и 3 кВт в полученном слое можно выделить два участка. Первый участок состоит из отдельных частиц карбида кремния, распределенных в основном металле, а второй — представляет собой слой из переплавленных и коагулированных частиц карбида кремния. Причем этот слой образовался над поверхностью основного металла. Следует отметить, что глубина проникания частиц карбида кремния в основной металл также не превышает 50 мкм при глубине проплавления основного металла 2 и 3 мм на мощностях 2 и 3 кВт соответственно.

Такое формирование слоя можно объяснить тем, что частицы карбида кремния плохо смачиваются расплавом алюминия. В процессе кристаллизации ванны расплава частицы вытесняются к поверхности. В результате усиление мощности лазерного излучения

приводит к увеличению глубины проплавления основного металла, но не вызывает увеличение толщины модифицированного слоя.

Согласно литературным данным, значительное количество кремния в основном металле способствует увеличению жидкотекучести расплава, что особенно важно при реализации жидкофазных процессов. Кремний подавляет интенсивное межфазное взаимодействие между расплавом и армирующими частицами карбида кремния [5].

Указанные обстоятельства накладывают определенные ограничения на выбор материала подложки по содержанию кремния. В рассматриваемом случае сплав АМгб не содержит большого количества кремния, что привело к образованию модифицированного слоя малой толщины.

Для увеличения толщины модифицированного слоя на поверхности алюминиевых сплавов необходимо смешивать частицы упрочнителя с порошкообразным материалом подложки, имеющим достаточно высокое содержание кремния или других элементов, с последующим оплавлением этой композиции. Это увеличит смачиваемость частиц упрочнителя и глубину проникания в подложку.

**Выводы.** Технология модифицирования поверхности методом лазерного оплавления шликерных покрытий широко применяется при модифицировании сталей, титановых и алюминиевых сплавов. Использование карбида кремния в качестве упрочнителя позволяет повысить износостойкость алюминиевых и титановых сплавов. Применение сухого спирта как связующего вещества при создании шликера представляется наиболее технологичным. При получении модифицированного слоя на алюминиевых сплавах, содержащих менее 7 % кремния, необходимо к частицам упрочнителя добавлять порошок основного металла.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Металлургические особенности лазерного легирования // <http://laser-fti.narod.ru/Alumin.htm>.
2. CHu T. N. Baker AA6061Al-SiC Surface MMC's Produced by Laser Processing // Proceeding softCCM-10, Whistler, B.C., Canada, August 1995. — P. 183—190.
3. Selvan J., Subramanian K. Ti-SiC Composite and TiC Ceramic Layer Formation on Ti6Al4V Surface by Laser Alloying of Pre-Placed SiC Coating // Advanced Performance Materials 6. 1999. — P. 71—83.
4. Selvan J.S., Subramanian K. High-temperature Thermal Barrier Coating Formation by Laser Alloying of CP-Ti with Pre-placed Ni-SiC Coating// Journal of materials science. 2003. No. 38. — P. 4783—4801.
5. Михеев Р.С. Разработка износостойких дисперсно-наполненных композиционных материалов и покрытий из них: Дис. ... канд. техн. наук. — М., 2010.

Статья поступила в редакцию 11.09.2012