В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. Г. Серов, Р. Е. Новиков

ЛОКАЛЬНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ТИТАНА МЕДЬЮ*

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Исследовано влияние параметров лазерной обработки медной плакировки, нанесенной на поверхность титана с помощью сварки взрывом и последующей прокатки, на структуру и фазовый состав формирующихся покрытий. Показано, что легирование титана медью приводит к формированию в зоне переплава интерметаллидов (купридов титана), что способствует значительному росту износостойкости поверхностного слоя. При испытании на изнашивание о закрепленный абразив износостойкость покрытия, в сравнении с титановым сплавом ВТ1-0, выше в 2 раза.

Ключевые слова: титан, медь, лазерная обработка, покрытия, куприды титана, износостойкость.

V. G. Shmorgun, O. V. Slautin, A. G. Serov, R. E. Novikov

LOCAL ALLOYING OF TITANIUM COPPER

Volgograd State Technical University

The influence of the parameters of laser processing of copper plating deposited by explosion welding and subsequent rolling on the titanium surface on the structure and phase composition of the coatings is studied. It is shown that alloying titanium with copper leads to the formation of intermetallic compounds (titanium cuprides) in the remelting zone, which contributes to a significant increase in the wear resistance of the surface layer. When tested for wear on a fixed abrasive, the wear resistance of the coating is 2 times higher than that of VT1-0 titanium alloy.

Keywords: titanium, copper, laser processing, coatings, titanium cuprides, wear resistance.

Введение

Лазерные технологии позволяют успешно решать проблему создания материалов с задан-

ным комплексом свойств путем целенаправленного формирования структуры их поверхностного слоя. При лазерном легировании форми-

© Шморгун В. Г., Слаутин О. В., Серов А. Г., Новиков Р. Е., 2020.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-38-20101.

рующиеся поверхностные слои имеют высокий уровень твердости [1], теплостойкости [1–3], износостойкости [1, 4, 5], коррозионной стойкости [1, 6] и других характеристик. Процессы локального легирования реализуются посредством как импульсного [1, 2], так и непрерывного [1, 4–9] лазерного излучения. При этом могут применяться различные схемы обработки «с перекрытием» [1, 2, 4, 5, 8, 9] и без него [1, 2, 10].

Анализ работ [1, 4–9], посвященных исследованию процесса лазерного поверхностного легирования показывает, что лазерное излучение, направленное на обрабатываемую поверхность, частично поглощается, а частично отражается. Вследствие поглощения в зоне действия лазерного излучения начинает действовать интенсивный источник теплоты [1]. Известно, что при плотностях мощности излучения $10^5 \dots 10^6$ Вт/см² происходит активный локальный разогрев поверхности, при котором на поверхности ванны расплава (жидкой фазы) образуется парогазовая фаза [11]. При лазерном легировании происходят взаимосвязанные процессы теплопереноса и микрометаллургические процессы. При перемещении лазерного луча расплавленный металл вследствие явления теплопереноса (интегрального действия давления пара, разницы сил поверхностного натяжения в центральной и хвостовой частях ванны расплава, турбулентных течений расплава) отесняется в хвостовую часть ванны [1]. В момент существования жидкого металла благодаря термокапиллярной конвекции Марангони происходит перемешивание расплавленной легирующей композиции с металлической матрицей [12]. При этом происходит насыщение поверхности легирующими элементами, образование химических соединений, частичная гомогенизация в зоне жидкого металла [1, 3, 7]. При кристаллизации металла ванны расплава образуется легированный слой. При повышении плотности мощности излучения более 10^6 Вт/см² наблюдается переход в режим кинжального проплавления, характеризующегося образованием парогазового канала в ванне расплава [1].

Целью настоящей работы явилось исследование особенностей формирования зоны переплава при лазерной обработке слоистой (медь М1 + титан ВТ1-0) системы.

Материалы и методы исследования

Образцы для исследования были получены из сваренных взрывом и прокатанных листов биметалла медь М1 + титан ВТ1-0. Сварка мед-

ных (1,0 мм) и титановых (5,0 мм) листов проводилась по плоскопараллельной схеме. Их прокатку осуществляли на стане «ДУО» (диаметр валков 130 мм) без подогрева, натяжения и правки с обжатием за один проход (0,3–0,4 мм). Конечная толщина медной плакировки (δ) перед лазерной обработкой составляла 200–800 мкм. Лазерную обработку проводили на установке ТЛ 1200. Скорость перемещения лазерной головки (V) изменяли от 0,8 до 1,2 м/мин при диаметре пятна 1,2 мм. Металлографические исследования осуществляли с применением оптической (модульный моторизованный микроскоп Olympus BX61 с фиксацией изображения цифровой камерой DP-12) и электронной (растровый электронный микроскоп Versa 3D) микроскопии.

Микрорентгеноспектральный анализ проводили на электронном микроскопе Versa 3D с использованием энергодисперсионного спектрометра EDAX Trident XM 4. Фазовый состав оценивали с помощью рентгенофазового анализа на дифрактометре Bruker D8 Advance.

Моделирование температурных полей при лазерной обработке биметалла осуществляли с помощью пакета программ COMSOL Multiphysics, обладающего необходимой гибкостью в постановке связанных мультифизических задач и в задании граничных условий для отдельных слоев композита. COMSOL имеет готовый модуль Laser Heating, позволяющий решать связанные теплофизические задачи.

Испытания на изнашивание методом Хрущева-Бабицева проводили на установке аналоге машины Х4-Б, предназначенной для испытания материалов на изнашивание о закрепленный абразив (шлифовальная бумага КК19ХВ зернистостью 32-Н), при статической нагрузке 3,5 Н. Движение образца, сопряженного с истирающей поверхностью, осуществлялось по спирали Архимеда, что при диаметре шлифовальной бумаги 340 мм обеспечивало путь длиной 30 м.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим процессы, происходящие при формировании структуры поверхностных слоев при лазерном легировании титана. Схема процесса показана на рис. 1. Образец с тонким слоем меди, предварительно нанесенным на поверхности методом сварки взрывом, при движении под лазерным лучом локально оплавляється, медь переходит в объем жидкой ванны металла, которая затем кристаллизуется.

Рис. 1. Схема процесса локального лазерного легирования:

1 – образец из сплава ВТ1-0, движущийся со скоростью V ; 2 – легированная дорожка; 3 – ванна расплава; 4 – лазерный пучок; 5 – фокусирующая система; 6 – защитный газ; 7 – медная плакировка

Поскольку титан имеет низкий коэффициент теплопроводности, металл в ванне расплава разогревается до очень высоких температур (рис. 2). Глубина ванны расплава при этом небольшая. Так как в центре луча наблюдается максимум энергии, а к периферии луча его энергия уменьшается, металл оказывается нагретым неравномерно. В работах [1, 2, 10–13] показано, что это способствует возникновению кругового характера движения жидкости, направленного от поверхности металла к периферии и вглубь ванны расплава. С одной стороны, где к ванне расплава прилегает холодный, не нагретый лазерным лучом металл, теплоотвод осуществляется интенсивнее, чем со стороны металла, уже подверженного влиянию лазерного излучения. Движение металла происходит

от областей с более высокой температурой к менее нагретым областям. Вихревой характер движения жидкости приводит к ее интенсивному перемешиванию, что способствует получению гомогенной структуры, а малая длительность процесса позволяет сохранить высокую концентрацию меди. Экспериментальные данные (рис. 3) показывают достаточно однородное распределение меди и титана по сечению зоны переплава, а, следовательно, на главенствующую роль конвективного массопереноса в сравнении с диффузионным. Результаты исследований показали, что в зоне переплава образуются дендритные фрагменты на основе интерметаллида Ti_2Cu (≈ 35 ат. % Cu и 65 ат. % Ti) и $\beta TiCu_4$ (≈ 77 ат. % Cu и 24 ат. % Ti), междендритное пространство между которыми заполнено интерметаллидом $TiCu_2$ (≈ 77 ат. % Cu и 23 ат. % Ti) (рис. 4).

Рис. 2. Моделирование температурных полей при лазерной обработке биметалла М1+ВТ1-0

Рис. 3. Структура зоны переплава с распределением химических элементов в центральной ее части после лазерной обработки ($\delta = 0,4$ мм, $V = 0,8$ м/мин)

Рис. 4. СЭМ изображение зоны переплава

Диффузия элементов из зоны переплава в зону термического влияния происходит на глубину 35–40 мкм (рис. 5). Вследствие конвективного перемешивания расплава по мере удаления от поверхности, перехода от фаз с большей концентрацией меди к фазам с меньшей концентрацией не происходит. Все фазы в легированной зоне по глубине перемешаны примерно равномерно. Размер зоны переплава зависит, в основном, от энергетического параметра излучения

$$E = P/(d_{\text{л}} \cdot V),$$

где E – удельная энергия (Дж/мм²), P – мощность излучения, Вт; $d_{\text{л}}$ – диаметр луча, мм; V – скорость наплавки, мм/с; и толщины медной плакировки (рис. 6).

Рис. 5. СЭМ изображение зоны термического влияния и расположение точек определения элементного состава (результаты в таблице)

Результаты точечного энергодисперсионного анализа

Точка	Элемент	Масс. %	Ат. %	Ошибка %	Фазовый состав
1	Ti	42,82	49,84	1,92	TiCu
	Cu	57,18	50,16	2,46	
2	Ti	59,85	66,42	1,71	Ti2Cu,
	Cu	40,15	33,58	2,72

Рис. 6. Влияние энергетического параметра излучения и толщины медной плакировки на размер зоны переплава

Поскольку легирование титана медью приводит к формированию в зоне переплава интерметаллидов (купридов титана), это способствует значительному росту микротвердости и износо-

стойкости поверхностного слоя. При испытании на изнашивание о закрепленный абразив износостойкость покрытия в сравнении с титановым сплавом BT1-0 увеличилась в 2 раза.

Выводы

1. Несмотря на научный и практический интерес лазерные технологии поверхностной обработки титана и сплавов на его основе в настоящее время не получили должного развития и внедрения. Причиной этого является недостаточная изученность общих закономерностей изменения свойств обрабатываемых сплавов в зависимости от фазового и структурного состояния при их легировании в условиях сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения, что сдерживает разработку конкретных рабочих технологий и рекомендаций прикладного характера.

2. Предварительное нанесение тонкого слоя меди с помощью сварки взрывом и обработки давлением на поверхность титана и последующее его проплавление лазерным лучом совместно с основой позволяет получать плотные беспористые покрытия на основе купридов титана.

3. Высокие значения износостойкости покрытия обеспечиваются за счет образования в его структуре интерметаллидов βTiCu_4 , Ti_2Cu и TiCu_2 .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.
2. Коваленко, В. С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера / В. С. Коваленко, Л. Ф. Головкин, В. С. Черненко. – Киев: Техніка, 1990. – 192 с.
3. Бураков, В. А. Повышение теплостойкости быстрорежущих сталей лазерным легированием / В. А. Бураков, Г. И. Бровер, Н. М. Буракова // Металловедение и терм. обработка мет. – 1985. – № 11. – С. 2–6.
4. Лихошва, В. П. Лазерное легирование узлов трения / В. П. Лихошва, А. П. Шатрава, Л. А. Бондарь // Процессы литья. – 2007. – № 3. – С. 35–37.
5. Application of high power diode laser (HPDL) for alloying of X40CrMoV5-1 steel surface layer by tungsten carbides / L. A. Dobrzanski, M. Bonek, E. Hajduczek, A. Klimpel // J. of Mat. Proc. Tech. – 2004. – № 155-156. – С. 1956–1963.
6. Zhong M., Liu W., Zhang H. Corrosion and wear resistance characteristics of NiCr coating by laser alloying with powder feeding on grey iron liner // Wear. – 2006. – 260, Issues 11-12. – P. 1349–1355.
7. Anandan S., Pityana L., Majumdar J. D. Structure property correlation in laser surface alloyed AISI 304 stainless steel with WC + Ni + NiCr // Ibid. – 2012. – Vol. 536. – P. 159–169.
8. Microstructure, microhardness, composition, and corrosive properties of stainless steel 304 I. Laser surface alloying with silicon by beam-oscillating method / Y. Isshiki, J. Shi, H. Nakai, M. Hashimoto // Applied Physics A. – 2000. – 70, Issue 4. – P. 395–402.
9. Majumdar J. D. Development of wear resistant composite surface of mild steel by laser surface alloying with silicon and reactive melting // Mater. Lett. – 2008. – Vol. 62. – P. 4257–4259.
10. Чудина, О. В. Комбинированные технологии поверхностного упрочнения конструкционных сталей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / О. В. Чудина. – М.: Моск. гос. автомобил.-дорож. ин-т, 2003. – 46 с.
11. Технологические лазеры: справочник: В 2 т. / Г. А. Абилюсеев, В. С. Голубев, В. Г. Гонтарь и др.; под общ. ред. Г. А. Абилюсеева. – М.: Машиностроение, 1991. – Т. 1. Расчет, проектирование и эксплуатация, 1991. – 432 с.
12. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layer in manufacturing / J.-P. Kruth, G. Levy, F. Klocke, T. H. Childs // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2007. – 56, Issue 2. – P. 730–759.
13. Бирюков, В. П. Влияние распределения плотности мощности лазерного луча на повышение износостойкости поверхностей трения / В. П. Бирюков // Вестн. машиностроения. – 2008. – № 3. – С. 33–36.

УДК 669.058:669-122.4

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-2-237-16-22

В. Ф. Даненко, Л. М. Гуревич, С. А. Булаева, Г. В. Понкратова, М. А. Скалкин

ПРОИЗВОДСТВО КРУГЛОЙ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ С ПЛАКИРУЮЩИМ СЛОЕМ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: omd@vstu.ru

Выполнен сравнительный анализ способов изготовления круглой биметаллической заготовки для производства проволоки: сварка взрывом; совместная горячая прокатка (пакетная прокатка). Приведены результаты экспериментальных исследований сопротивления срезу и отрыву при определении прочности соединения слоев, показавшие, что надежное сцепление между слоями достигается при изготовлении заготовки обоими способами.

Ключевые слова: биметалл, сердечник, плакирующий слой, сварка взрывом, горячая прокатка, напряжение, срез, отрыв, соединение слоев, прочность, проволока.