



## ПОЛУЧЕНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТИТАНОВОЙ ОСНОВЕ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

**В. К. НАРВА**, д-р техн. наук, **А. В. МАРАНЦ**, инж. (Нац. исслед. техн. ун-т МИСиС, г. Москва, РФ)

Проведено исследование технологии лазерной наплавки на титановую подложку и анализ свойств градиентных покрытий систем Ti-Si и Ti-NiCr. Наплавка осуществлялась на лазерной установке Trumpf DMD 505 мощностью 5 кВт. Градиентное изменение свойств покрытий определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа, оптического светового микроскопа и рентгенофазовой дифракции. Анализ изменения твердости по толщине слоев проведен по HV методу. Установлена возможность получения качественных градиентных покрытий с целью улучшения свойств титановой основы.

*Ключевые слова:* лазер, лазерная наплавка, градиентные покрытия, титановая основа, фазовый состав, структура, твердость

Разработка и внедрение лазерных технологий на сегодня является перспективным направлением развития науки и техники. Одна из передовых лазерных технологий — лазерная наплавка позволяет наносить износостойкие, жаропрочные, коррозионностойкие градиентные и композиционные покрытия на геометрически сложные поверхности изделий [1], ее можно использовать также для восстановления изношенных деталей, нанесения защитных покрытий, изготовления объемных объектов [2]. При лазерной наплавке транспортировка порошка в зону лазерного воздействия осуществляется защитным газом-носителем. Материал, попадая в ванну расплава, которая образуется в приповерхностном слое лазерным лучом, расплавляется, частично смешивается с ним и обеспечивает высокую прочность сцепления наплавленного слоя с подложкой. Высокие скорости охлаждения при лазерной наплавке приводят к формированию в наплавленном материале уникальной структуры и свойств [3]. Благодаря тому, что при лазерной наплавке можно смешивать различные материалы в заданных пропорциях, создаются градиентные покрытия различного состава [2, 4].

Цель данной работы состояла в получении новых экспериментальных данных о влиянии параметров режима процесса лазерной наплавки на структуру и свойства покрытий градиентных материалов на основе титана.

Были получены градиентные покрытия на титановой подложке из материалов систем Ti-Si и Ti-NiCr, которые отличаются повышенными жаростойкостью и жаропрочностью. Для достижения этого выбраны составы поверхностных слоев

покрытия систем Ti-Si (70/30 мас. %), Ti-NiCr (70/30 мас. %). Для уменьшения внутренних напряжений между титановой подложкой и покрытием выполнены три промежуточных слоя, что позволило уменьшить разницу между значениями коэффициента термического расширения (КТР) покрытия и подложки, а также получить градиентное покрытие и высоколегированный поверхностный слой.

Составы покрытий как системы Ti-Si, так и Ti-NiCr варьировали введением кремния от 12 до 30 мас. % с шагом в 6 %. Толщина каждого слоя изменялась от 0,6 до 2,0 мм в зависимости от параметров режима лазерной наплавки (рис. 1). При нанесении слоев использовали распыленные порошки никрома (49,7 мас. % Ni) с размером частиц  $d = 60 \dots 160$  мкм, титана ( $d = 50 \dots 150$  мкм), кремния ( $d = 50 \dots 150$  мкм). Схема процесса лазерной наплавки приведена на рис. 2 [5].

Основными параметрами процесса лазерной наплавки, в значительной степени влияющими на структуру и свойства наплавленного материала, являются скорость подачи (расход) порошка, скорость передвижения сопла и мощность лазера. Для определения их влияния на свойства наплавки значения этих параметров варьировали в следующих диапазонах: скорость подачи порошка в зону лазерного воздействия (скорость вращения диска, подающего порошок) 3000...5000 об/мин,

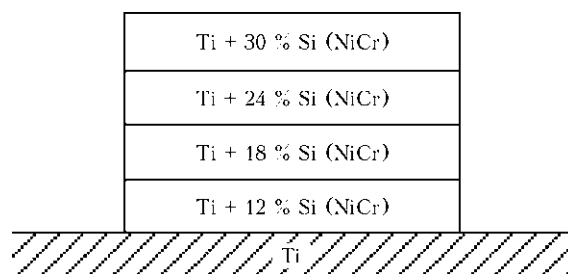


Рис. 1. Схема изменения состава слоев по высоте наплавки покрытия систем Ti-Si и Ti-NiCr

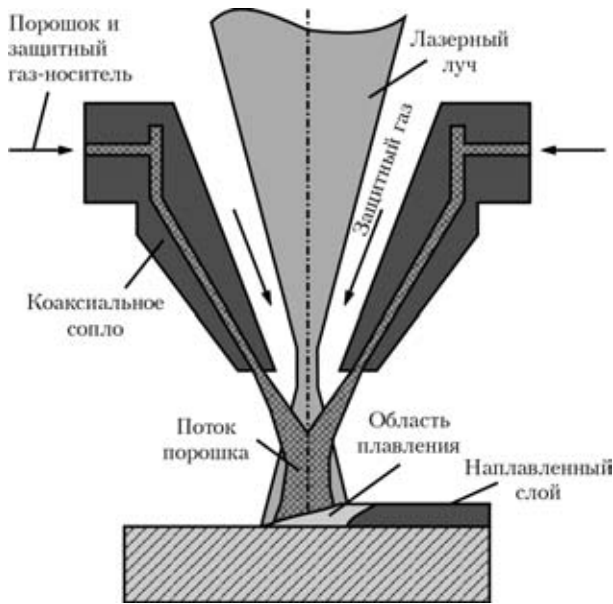


Рис. 2. Схема процесса лазерной наплавки

скорость передвижения сопла 500...1000 мм/мин. Мощность лазера составляла 5 кВт. Оценку влияния параметров процесса лазерной наплавки проводили с помощью рентгенофазового и микроструктурного анализов, электронной микроскопии, а также путем послойного определения твердости. Исследование микроструктуры осуществляли на оптическом и электронном микроскопах. Рентгенофазовый анализ был проведен при съемке на  $K_{Cu}$ -излучении с длиной волны 15,4 нм, шагом  $2^\circ$  с экспозицией на точку 5 с. Изменение твер-

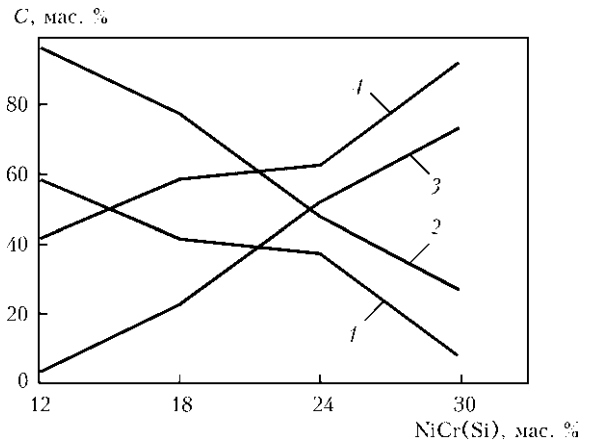


Рис. 4. Влияние содержания легирующего компонента NiCr(Si) на фазовый состав материалов систем Ti-Si и Ti-NiCr: 1 —  $\alpha$ -Ti; 2 —  $\beta$ -(Ti-Cr); 3 — NiTi<sub>2</sub>; 4 — Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>

дости по высоте покрытий определено по *HV* методу.

С целью визуального определения характера структуры (размера зерна, приблизительной оценки содержания фаз и их распределение) градиентных покрытий систем Ti-Si и Ti-NiCr использовали световой оптический микроскоп.

Изменение структуры металла покрытия исследовали по его высоте, а также при варьируемых параметрах режима процесса лазерной наплавки. При послойном рассмотрении структуры металла покрытия системы Ti-NiCr видно, что размер зерна уменьшается от нижнего к приповерхностному слою (рис. 3), что обусловлено термическим влиянием лежащих выше слоев, кото-

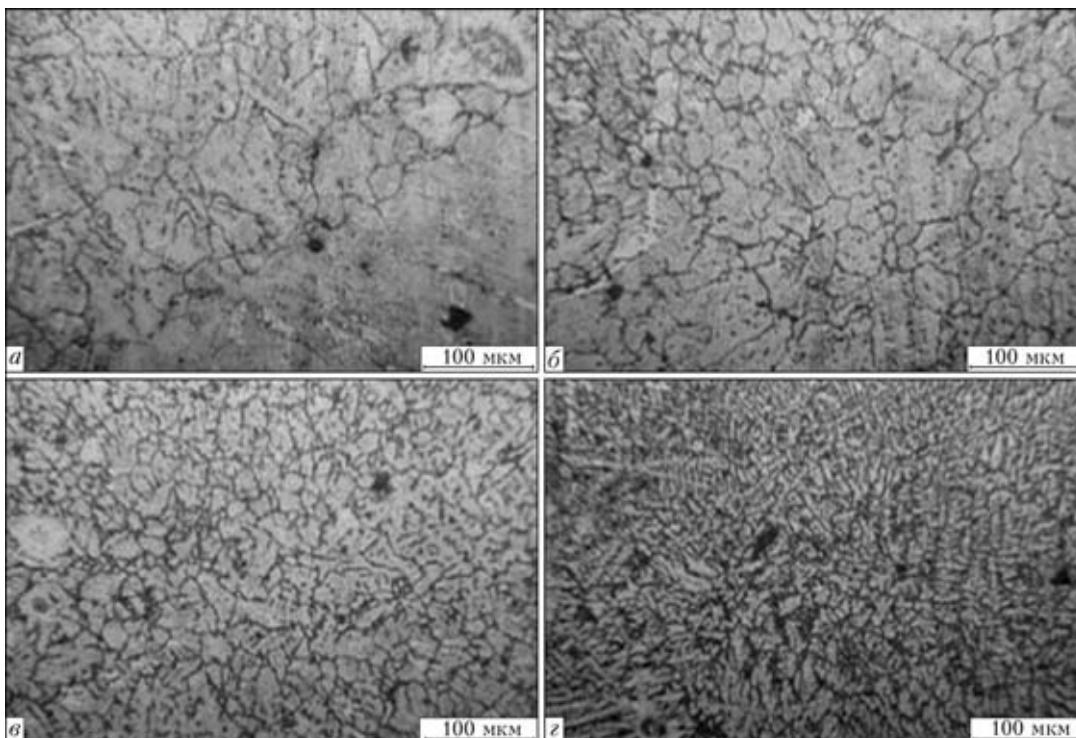


Рис. 3. Микроструктуры наплавки материала системы Ti-NiCr от подложки к приповерхностному слою: а — первый слой 12 мас. % NiCr; б — второй 18 мас. % NiCr; в — третий 24 мас. % NiCr; г — четвертый без % NiCr

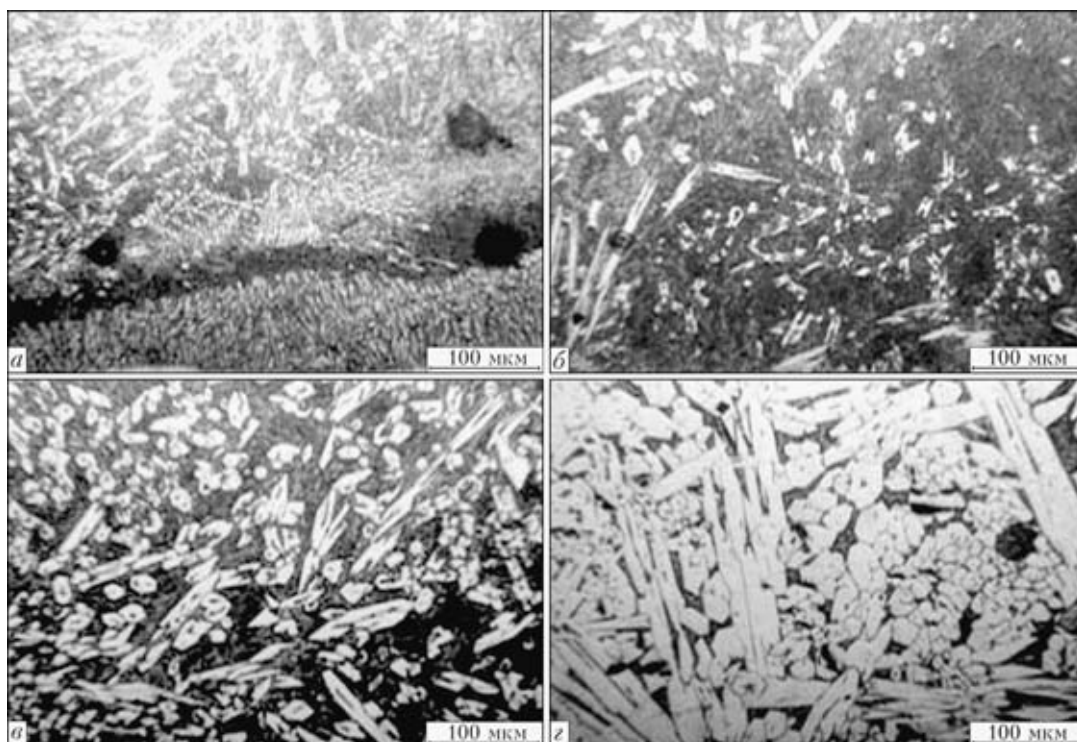


Рис. 5. Микроструктуры наплавки материала системы Ti-Si от подложки к приповерхностному слою: *a* — первый слой с 12 мас. % Si; *b* — второй с 18 мас. % Si; *v* — третий с 24 мас. % Si; *z* — четвертый с 30 мас. % Si

рое способствует увеличению размера зерна нижних слоев [6].

Основными фазами в структуре покрытия является твердый раствор  $\beta$ -(Ti-Cr) и интерметаллид  $\text{NiTi}_2$ . С повышением содержания легирующего компонента NiCr(Si) увеличивается массовая доля  $C$  образующихся интерметаллидных фаз (рис. 4).

Изменение варьируемых параметров (скорости подачи порошка  $v_{\text{п}}$  и передвижения сопла  $v_{\text{с}}$ ) оказывает значительное влияние на структуру металла покрытия. Так, при возрастании скорости передвижения сопла или уменьшении расхода порошка происходит уменьшение размера зерна [7], что объясняется увеличением скорости охлаждения в связи с уменьшением толщины слоев. При высокой скорости передвижения сопла в структуре покрытия остаются нерасплавленные частицы титана. Рентгеноспектральный анализ подтвердил их присутствие в приповерхностном слое образца покрытия, полученного при  $v_{\text{с}} = 1000$  мм/мин и  $v_{\text{п}} = 3000$  об/мин.

Фазовый состав сплава также зависит от параметров лазерной наплавки. Массовая доля выпадающей интерметаллидной фазы  $\text{NiTi}_2$  возрастает с увеличением скорости подачи порошка и уменьшается с повышением скорости передвижения подложки. Это связано с тем, что возрастание скорости подачи порошка приводит к увеличению толщины покрытия, а значит, более медленному его охлаждению. Чем дольше остывает покрытие, тем ближе его фазовый состав к равновесному

и тем больше интерметаллидной фазы успеет выделиться, увеличение скорости передвижения сопла влияет наоборот.

При послойном рассмотрении структуры металла покрытия системы Ti-Si определено увеличение содержания выпадающего силицида титана  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  и содержания легирующего компонента от подложки к покрытию (рис. 5), что подтверждается результатами рентгенофазового анализа (см. рис. 4).

На основании результатов исследований изменения фазового состава материалов системы Ti-Si в зависимости от варьируемых параметров можно сделать вывод, что содержание выпадающего силицида титана  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  возрастает с повышением скорости подачи порошка и уменьшается с повышением скорости передвижения сопла. Это связано с тем, что повышение скорости подачи порошка приводит к увеличению толщины покрытия, а значит, к более медленному его охлаждению. Чем дольше остывает покрытие, тем ближе его фазовый состав будет к равновесному и тем больше силицида титана успеет выделиться. Возрастание скорости передвижения сопла приводит к обратному результату.

Исследовали изменение твердости покрытий по высоте наплавленных слоев, а также влияние на нее параметров режима лазерной наплавки [8]. От подложки к поверхностному слою покрытия твердость постоянно возрастает у материалов как системы Ti-NiCr, так и Ti-Si, что обусловлено формированием твердых растворов и наличием

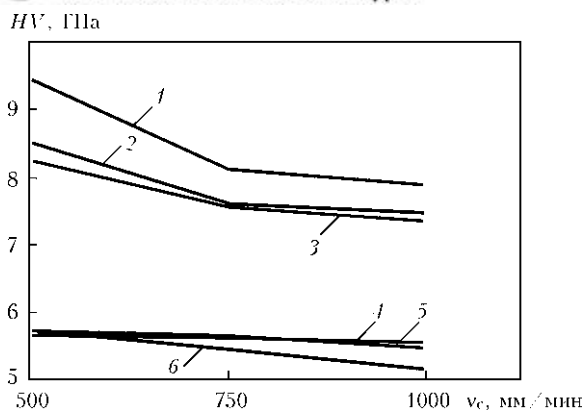


Рис. 6. Зависимость твердости поверхностных слоев покрытия от параметров режима лазерной наплавки материалов систем Ti-Si (1-3) и Ti-NiCr (4-6): 1, 6 —  $v_{п} = 6000$ ; 2, 5 — 4500; 3, 4 — 3000 об/мин

интерметаллидных и силицидных фаз в покрытии.

В зависимости от варьируемых параметров режима лазерной наплавки в покрытии системы Ti-NiCr твердость поверхностных слоев изменяется незначительно и в пределах приборной ошибки (рис. 6). Таким образом, можно сделать вывод, что изменение указанных параметров в широком диапазоне на твердость наносимого покрытия не влияет.

Для материалов системы Ti-Si характерна зависимость твердости от параметров режима лазерной наплавки. Твердость поверхностных слоев уменьшается с увеличением скорости передвижения сопла  $v_c$  и возрастает с увеличением скорости подачи порошка (рис. 6), поскольку повышение  $v_c$  ведет к уменьшению толщины покрытия, возрастанию скорости охлаждения и уменьшению массовой доли фазы  $Ti_5Si_3$  титана, которая не успевает выпасть, что подтверждается рентгенофазовым анализом. Аналогичное влияние оказывает и скорость подачи порошка.

### Выводы

1. Изучено влияние параметров режима лазерной наплавки (скорости подачи порошка и передвижения сопла) на структуру и свойства покрытий градиентного состава материалов систем Ti-NiCr и Ti-Si.

2. Установлено уменьшение размера зерна от нижнего слоя покрытия (Ti-12 мас. % NiCr) к по-

верхностному слою (Ti-30 мас. % NiCr) с уменьшением скорости подачи порошка (при  $v_c = 3000...5000$  об/мин) и увеличением скорости передвижения сопла до 500...1000 мм/мин, а также увеличение содержания интерметаллидов от нижнего слоя покрытия (Ti-12 мас. % NiCr или Si) к поверхностному (Ti-30 мас. % NiCr или Si) с увеличением скорости подачи порошка и уменьшением скорости передвижения сопла.

3. Установлено повышение твердости слоев покрытия по направлению к поверхностному слою, при этом изменение параметров режима процесса лазерной наплавки на твердость слоев материала Ti-NiCr влияет незначительно.

4. В материалах системы Ti-Si твердость поверхностных слоев уменьшается с повышением скорости передвижения сопла и возрастает с увеличением скорости подачи порошка.

5. Нанесение слоев материалов систем Ti-NiCr и Ti-Si способом лазерной наплавки можно рекомендовать для повышения твердости и износостойкости титановой основы.

1. *Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S.* Laser cladding. — CRC Press, 2005. — 110 p.
2. *Potential of direct metal deposition technology for manufacturing thick functionally graded coatings and parts for reactors components / L. Thivillon, Ph. Bertrand, B. Laget, I. Smurov // J. Nucl. Mater. — 2009. — 385. — P. 236-241.*
3. *Неровный В. М.* Теория сварочных процессов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. — 432 с.
4. *Thick Co-based coating on cast iron by side laser cladding: Analysis of processing conditions and coating properties / V. Ocelik, U. De Oliveira, M. De Boer, J. Th. M. De Hosson // Surface and Coatings Techn. — 2007. — 201, Iss. 12. — P. 5875-5883.*
5. *Laser-assisted direct manufacturing of functionally graded 3D objects / A. Yakovlev, E. Trunova, D. Grevey, M. Pilloz, I. Smurov // Ibid. — 2005. — 190. — P. 15-24.*
6. *Gaard A., Krakhmalev P., Bergstrom J.* Microstructural characterization and wear behavior of (Fe,Ni)-TiC MMC prepared by DMLS // *J. Alloys and Compounds.* — 2006. — 421. — P. 166-171.
7. *Wear resistance of WCp/duplex stainless steel metal matrix composite layers prepared by laser melt injection / A. M. De Nascimento, V. Ocelik, M. C. F. Lerardi, J. Th. M. De Hosson // Surface & Coatings Techn. — 2008. — 202. — P. 4758-4765.*
8. *Mechanical properties of parts manufactured by direct metal deposition technology / L. Thivillon, D. Novichenko, Ph. Bertrand, I. Smurov // Lasers in manufacturing: Proc. V Intern. WLT-conf. on lasers in manufacturing. — Muenich, 2009. — P. 99-103.*

Investigation of the technology for laser cladding on a titanium substrate and analysis of properties of graded materials of the Ti-Si and Ti-NiCr systems were carried out. Cladding was performed by using the «Trumpf DMD 505» laser unit with a power of 5 kW. A graded change in properties of the materials was determined by scanning electron microscopy, optical microscopy and X-ray diffraction. Analysis of hardness variations through thickness of the deposited layers was carried out by the HV method. The possibility of providing sound graded coatings in order to improve properties of the titanium substrate was proved.

Поступила в редакцию 20.12.2010