

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ Ti, Ni и WC, B<sub>4</sub>C С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ И ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ**

**Фомин В.М., Голышев А.А., Косарев В.Ф., Маликов А.Г., Оришич А.М., Ряшин Н.С., Филиппов А.А.**

*ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, Россия  
E-mail: smalik@ngs.ru*

**Введение**

Холодное газодинамическое напыление с поддержкой лазерного излучения (ЛХГН), является дальнейшим развитием технологии холодного газодинамического напыления (ХГН) [1] и относится к аддитивным технологиям (АТ) 3D печати металлических изделий. На сегодняшний день разрабатываются технологии создания покрытий с целью увеличения физико-механических характеристик, одним из которых является комбинированный метод создания покрытия с помощью ХГН с последующей обработкой лазерным излучением. В работах [2-3] продемонстрированы результаты по постобработке покрытий ХГН из титанового сплава, нержавеющей стали.

В настоящей работе впервые исследуется комбинированный метод получения металломатричного композиционного покрытия на основе металлов Ni, Ti и керамики B<sub>4</sub>C, WC заключающийся в последовательном применении ХГН и лазерной обработки. Для заданной толщины и различному по составу металлокерамических покрытий полученных ХГН методом, была проведена оптимизация параметров воздействия лазерного излучения: мощности и скорости перемещения, обеспечивающих формирование наплавочных треков с минимальной шероховатостью поверхности в отсутствие сфероидизации (дробления наплавленного валика на шарики) и пор.

**Методика эксперимента**

Для получения методом холодного газодинамического напыления композиционного покрытия типа «металлическая матрица + керамические включения» использовались абразивные порошки: B<sub>4</sub>C с медианными размерами частиц  $d_{50}$ , равными 2,9, 44, 64 и 75 мкм; WC  $d_{50} = 20$  мкм. В качестве металлической компоненты использовался порошок Ni ПНК-УТ-1 и порошок титана марки ПТОМ-1.

С помощью V-образного смесителя Venus FTLMV-02 были подготовлены смеси порошков с массовой концентрацией керамики 10-90%. В качестве подложек применялись пластины из сплава титана BT-20 размером 50×50×5 мм. Исследование микроструктуры осуществлялось методами электронной микроскопии с помощью сканирующего электронного микроскопа Zeiss EVO MA 15. Покрытия методом ХГН наносились с использованием дозатора и осесимметричным керамическим соплом Лавалья. Обработка лазерным излучением (ЛИ) полученных покрытий ХГН осуществлялась на созданном в ИТПМ СО РАН АЛТК «Сибирь 1», который включает непрерывный CO<sub>2</sub>-лазер мощностью до 5 кВт и длиной волны излучения 10,6 мкм.

Лазерное излучение с помощью линзы из ZnSe с фокусным расстоянием 304 мм фокусировалось вглубь материала, на поверхность и над материалом. Перетяжка фокуса  $\Delta f$  располагалась в -20 мм, 0, + 20 мм от верхней поверхности подложки. Наплавка осуществлялась в защитной атмосфере гелия [4].

**Результаты эксперимента**

На рис. 1 приведены типичные структуры ХГН металлокерамических покрытий полученные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) в режиме BSD детектора обратно-рассеянных электронов. Важно отметить, что размер частиц

керамики, ее доля в смеси и толщина слоя были различны, что позволяло исследовать влияние различных факторов на характеристики получаемой лазерной наплавки.

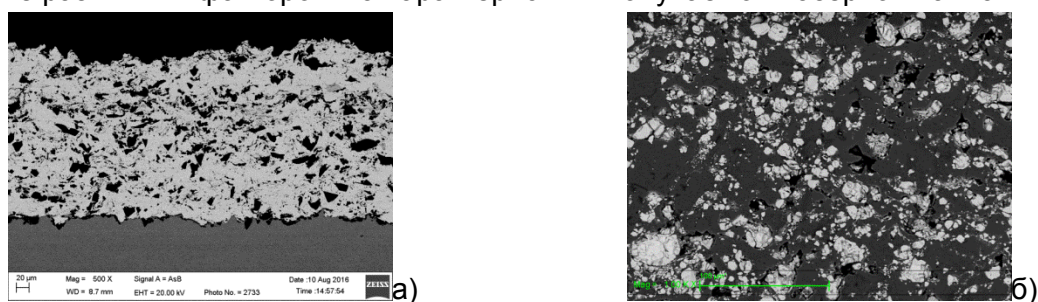


Рисунок 1-. Изображения микроструктуры поперечного сечения покрытия ХГН, полученные с помощью РЭМ.

а) Ni:B<sub>4</sub>C (30:70),  $d_{50}(B_4C) = 75$  мкм, б) Ti ПТОМ-1 (30%) / WC (70 %)

На рис. 2 представлены типичные изображения поперечного сечения треков после воздействия лазерного излучения на металлокерамическое ХГН покрытие.

Морфология треков меняется в зависимости, как от содержания керамики, так и от положения фокуса. С увеличением содержания керамики в исходной смеси происходит формирование более качественных треков. При воздействии лазерного излучения необходимо отметить, что структура трека зависела как от размера используемых частиц В<sub>4</sub>С, так и от их концентрации. В процессе создания толстых металлокерамических покрытий с керамикой В<sub>4</sub>С и различной металлической связкой обнаружено, что при толщине более 2 мм на поверхности формируемого покрытия развиваются кратеры. Данные кратеры снижают коэффициент напыления при толщине покрытия более 4 мм. При воздействии лазерного излучения на такие покрытия приводило к сильному ухудшению шероховатости поверхности. Качественных единичных треков при различных изменений режимов лазерного воздействия получить не удалось. Данный эффект возможно объясняется что проникновение из подложки титана в случае использования в качестве связки Ni приводило к активному протеканию реакции:  $3Ti + B_4C = TiC + 2TiB_2$ , что обуславливало за время прохождения лазерного излучения и существования расплава смену состава керамики. Мелкие, порядка 3 – 5 мкм, кристаллы В<sub>4</sub>С исчезали и формировались кристаллы TiC и TiB<sub>2</sub>. При использовании Ti в качестве металлической связки данная реакция происходила более активно.

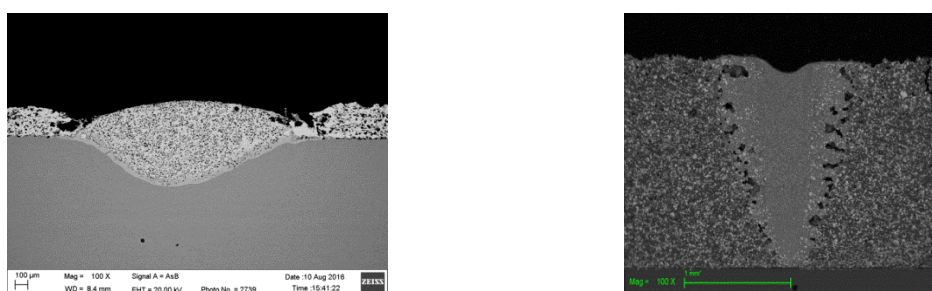


Рисунок 2- Изображения микроструктуры поперечного сечения лазерного трека полученные с помощью РЭМ.

а) Ni:B<sub>4</sub>C (30:70), толщина ХГН покрытия  $\approx 300$  мкм.

б) Ti:WC (30:70) толщина ХГН покрытия  $\approx 2$  мм.

В результате произвели смену керамики с В<sub>4</sub>С на WC, в качестве металлической связки использовался порошок Ti (рис. 2 б). Для данных покрытий оптимизировано лазерное воздействие для получения качественных единичных и массивов треков. При этом между треками массивов наблюдаются капельки застывшего металла, процесс сфероидизация, изменения шага между треками, изменения энергетических параметров лазерного воздействия не приводило к полному исчезновению капелек. Капельки сильно осложняли формирование и получение качественного второго слоя металлокерамического покрытия ХГН, для дальнейшего получения толстых покрытий.

Для борьбы со сфероидизацией в качестве металлической связки, были выбраны смесь порошка Ti 94% с добавлением Al 6%. Разработаны режимы создания толстых покрытий смеси порошков 40% WC + 60% (0,94Ti+0,06Al) методом ХГН и последовательным лазерным воздействием, толщиной 4 мм (рис. 3).

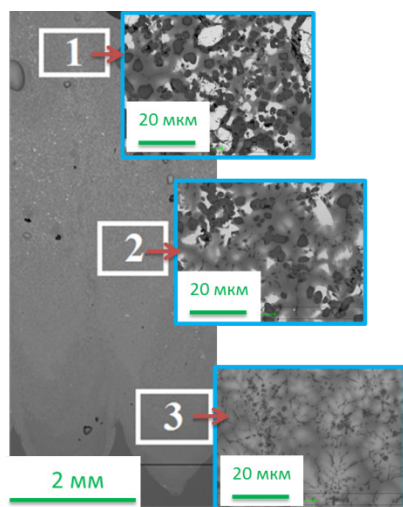


Рисунок 3 - Поперечное сечение структуры многослойного покрытия полученного последовательным нанесением ХГН и лазерным воздействием толщиной 4 мм. 40% WC + 60% (0,94Ti+0,06Al)

В полученном ХГН покрытии концентрация карбида вольфрама близка к исходной. После воздействия лазерного излучения на ХГН покрытие частички WC изменяют свой размер (уменьшаются) по сравнению с частицами в ХГН покрытии. Морфология структуры трека изменяется по высоте. Наблюдаются различные агрегаты от светлого до темного цвета расположенные вокруг твердого раствора. В верхней зоне преобладает карбид вольфрама. В средней зоне наблюдается равномерность распределения агрегатов в твердом растворе. В нижней зоне наблюдается преимущественно твердый раствор.

#### Результаты исследований

В результате определены условия формирования качественных единичных треков и многослойных покрытий в зависимости от мощности лазерного излучения, скорости и ширины пучка при максимальном объемном содержании  $W_4C$  и WC в покрытиях ХГН. На основе полученных экспериментальных данных создана стратегия послойного выращивания методом ХГН и последующим лазерным воздействием толстых ( $\approx 4$  мм) металлокерамических покрытий на основе 40% WC + 60% (0,94Ti+0,06Al).

**Благодарность.** Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №16-19-10300.

#### Литература

1. Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Фомин В. М., Клинков С. В. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / Издательская фирма «Физико-математическая литература (ООО «Физматлит»», 2010.
2. T. Marrocco, T. Hussain and et. Corrosion Performance of Laser Posttreated Cold Sprayed Titanium Coatings // Journal of Thermal Spray Technology 2011 V. 20. P. 909-917.
3. Sova A., Grigoriev S and et. Cold spray deposition of 316L stainless steel coatings on aluminium surface with following laser post-treatment // Surface and Coatings Technology 2013 V. 235 P. 283–289
4. Fomin V.M., Golyshev A.A. and et. Creation of heterogeneous materials on the basis of  $W_4C$  and Ni powders by the method of cold spraying with subsequent layer-by-layer laser treatment // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2017.V. 58 N. 5. P. 947–955.