

ПОРОШКОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА ИЗНОСОСТОЙКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ

Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук, К.А. САХАРОВ, асп.

Тверской государственный технический университет
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ludmila.a@mail.ru

© Афанасьева Л.Е., Сахаров К.А., 2024

Методом порошковой лазерной наплавки получено металлокерамическое покрытие NiCrBSi–WC на конструкционной стали 40Х. Показано, что при наплавке высоколегированной порошковой смеси с помощью многоканального лазера формируется практически беспористое покрытие, обеспечивается металлургическое сплавление с основой. Отмечено, что линия сплавления однородна по строению, и это подтверждает высокую однородность интегрального тепловложения во время наплавки данным типом лазера. Установлено, что благодаря высоким скоростям нагрева и охлаждения расплава при порошковой лазерной наплавке растворение карбидов WC в ванне расплава незначительное. Выделение хрупкой фазы на границе карбид-металлическая матрица не выявлено.

Ключевые слова: микроструктура, металлокерамическое покрытие, порошковая лазерная наплавка, многоканальный лазер.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-21-26

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных видов применения сплавов на основе никеля является нанесение наплавки и напыления износостойких и коррозионностойких покрытий различными методами [1–9]. Для повышения эксплуатационных свойств нанесенного слоя нередко применяют порошковые смеси, содержащие частицы высокотвердых соединений, например карбидов WC, TiC, а также некоторых других.

Анализ практического использования износостойких покрытий показывает, что для работы в тяжелых условиях их качество и свойства не всегда удовлетворяют предъявляемым требованиям. Нанесенные покрытия могут иметь слабое адгезионное сцепление с основой и отслаиваться, содержать поры, трещины и в целом обладать недостаточно высокой прочностью [1–3]. При дуговой наплавке из-за большого тепловложения возможно глубокое проплавление основы, что изменяет химический состав покрытия [9].

Одним из передовых современных методов нанесения покрытий является порошковая лазерная наплавка, которая имеет ряд преимуществ по сравнению с другими традиционными методами. За счет точного контроля энергетических параметров порошковая лазерная наплавка позволяет решить часть отмеченных выше проблем [3–7, 10, 11]. Для нанесения композиционных покрытий в настоящей работе использовали многоканальный лазерный CO₂-излучатель (40 лучей) отечественной разработки мощностью 3 кВт с оптимизированным распределением плотности мощности в пятне (патент РФ № 2580350) [11]. В отличие от однолучевых, эти лазеры имеют более однородное распределение плотности мощности излучения в зоне обработки.

Цель работы – изучить структурное состояние армированного частицами карбида вольфрама никелевого покрытия, полученного порошковой лазерной наплавкой с помощью многоканального лазера.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

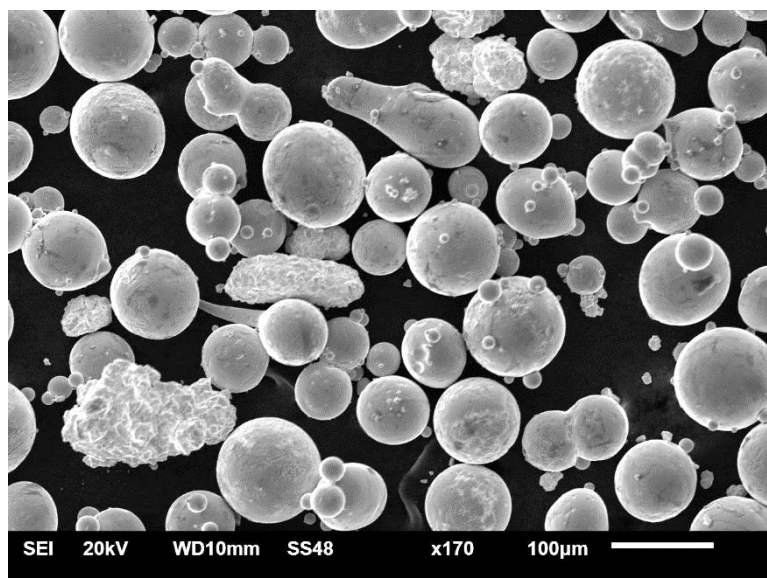
В качестве материала подложки использовали конструкционную сталь 40Х (ГОСТ 4543-71). Порошковую смесь ПС-12НВК-01 (ГОСТ 28377-89), состоящую из карбида вольфрама WC в количестве 35 % и гранулированного порошка марки ПГ-10Н-01 (ТУ 48-19-383-91) состава % (масс.) 0,6...1,0 С; 14...20 Cr; 2,8...4,2 В; 4,0...4,5 Si; 3,0...7,0 Fe (остальное – Ni), предварительно наносили на поверхность подложки с использованием специального трафарета и равномерно распределяли. Наплавку выполняли с помощью непрерывного лазерного излучения на комплексе модели АЛТКУ-3 на следующих режимах: мощность – 2,4 кВт, скорость сканирования луча – 5 мм/с, диаметр пятна на обрабатываемой поверхности – 6 мм. Перекрытие валиков – 30 %.

Исследования микроструктуры проводили с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Vert.A1MAT и растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM-6610LV. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазного индентора в виде пирамиды согласно ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002). При измерении микротвердости металлической матрицы использовали нагрузку на индентор 0,98 Н, твердости карбидных частиц – 0,29 Н.

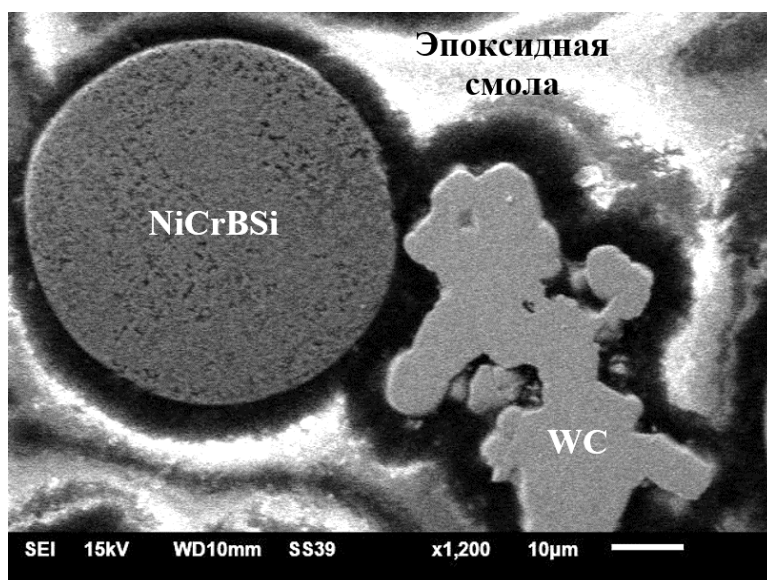
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 представлены РЭМ-изображения порошковой смеси и ее шлиф в эпоксидной смоле. Порошок никелевого сплава имеет размер частиц 25...120 мкм, получен методом газоструйного распыления расплава. У частиц в основном сферическая форма, на поверхности некоторых из них встречаются сателлиты. Карбиды WC имеют произвольную форму. В статье [2] отмечается, что форма частиц карбида вольфрама (сферическая или произвольная) не оказывает заметного влияния на износостойкость покрытий. В то же время существует очевидное преимущество в использовании более крупных частиц размером 750...1 200 мкм в жестких условиях эксплуатации, а покрытия с более мелкими частицами (40...160 мкм) улучшают сопротивление износу в условиях скольжения.

Известно, что карбид WC обладает благоприятным сочетанием свойств, высокой твердостью, некоторой пластичностью, хорошей смачиваемостью расплавом. По сравнению с карбидами других переходных металлов WC имеет более высокий модуль упругости, меньший коэффициент термического расширения, стабильность свойств при нагреве вплоть до 1 000 °С [12]. Высокая плотность энергии при наплавке и длительность термического воздействия могут вызвать значительное растворение карбида WC в матрице, в результате возможно образование сложных карбидов (η -фазы), которые существенно охрупчивают покрытие и снижают его эксплуатационные свойства. Если плотности энергии и время воздействия при наплавке недостаточны, то диффузная граница по поверхности карбидов не успеет образоваться, керамика и матрица могут быть плохо связаны. Для получения качественного покрытия с требуемыми свойствами необходимо тщательно выбирать и обосновывать технологические режимы наплавки.



(a)



(б)

Рис. 1. РЭМ-изображения порошковой смеси (а) и ее шлифа (б)

На рис. 2 дано изображение непрочного шлифа наплавленного образца. Толщина полученного покрытия – около 0,7 мм. Линия сплавления параллельна поверхности покрытия, однородна по строению. Распределение частиц WC в наплавленном металле равномерное. Пор и трещин в плоскости шлифа не обнаружено. Частицы WC имеют микротвердость HV_{30} около $20\,200 \pm 800$ МПа; частицы сплава NiCrBSi – HV_{100} около $7\,900 \pm 350$ МПа. Микротвердость металлической матрицы наплавленного покрытия выше, $HV_{100} = 9\,000 \pm 150$ МПа. Повышение микротвердости матрицы композиционного покрытия, если сравнивать с микротвердостью отдельных металлических частиц, возможно, связана с влиянием подповерхностных карбидов WC.

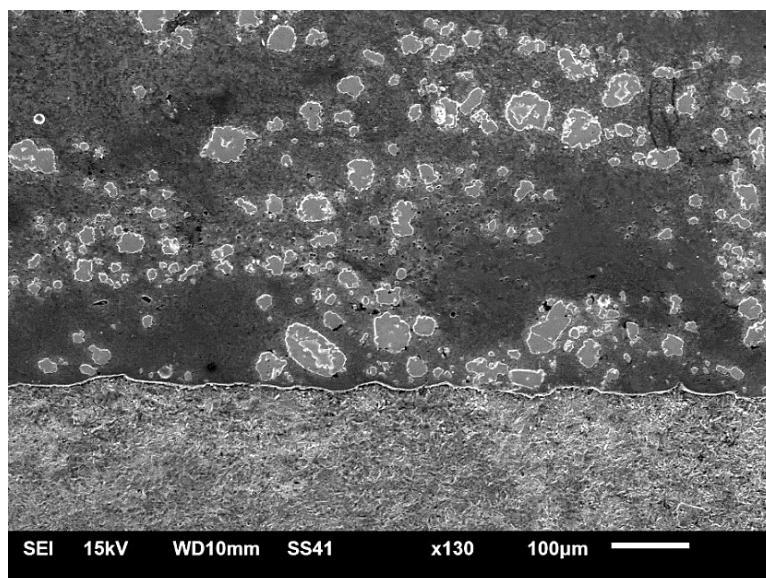


Рис. 2. РЭМ-изображение наплавленного покрытия
вблизи линии сплавления с основой

При формировании наплавленного слоя частицы никелевого сплава полностью расплавляются и смачивают карбиды WC. В первую очередь при наплавке должна сформироваться диффузная граница по поверхности карбидов, чтобы керамика и металлическая матрица были хорошо связаны и обеспечивалась высокая прочность. Для анализа качества полученного покрытия использовали селективное химическое травление шлифов реактивом Мураками (это одна часть 20%-го водного раствора KOH или NaOH и одна часть 20%-го водного раствора $K_3[Fe(CN)_6]$), позволяющее выявить наличие хрупкой η -фазы по границам частиц карбидов [13]. Исследования протравленных шлифов с помощью оптической микроскопии показали, что заметного растворения карбидов вольфрама в материале матрицы не наблюдается и η -фаз не образуется (рис. 3).

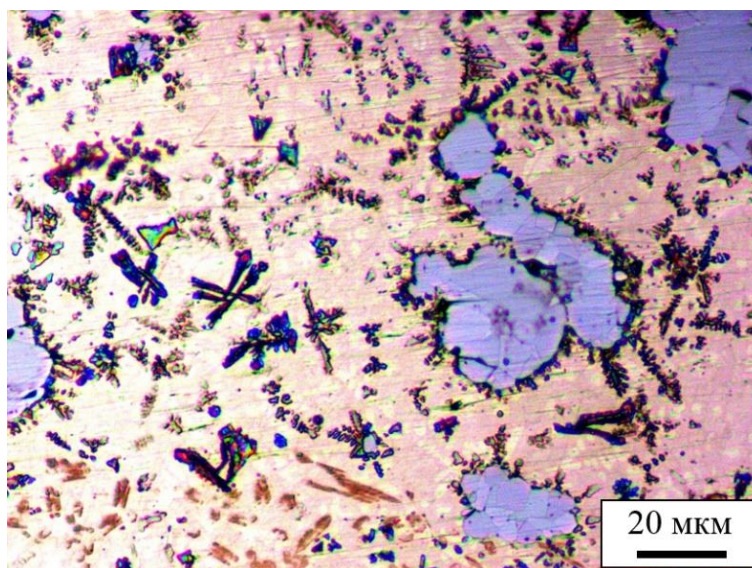


Рис. 3. Микроструктура покрытия. Оптическая микроскопия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом порошковой лазерной наплавки на конструкционную сталь 40Х было нанесено композиционное покрытие толщиной 0,7 мм. Использовали высоколегированную порошковую смесь NiCrBSi–WC. Распределение частиц WC в наплавленном металле равномерное. Пор и трещин в плоскости шлифа не выявлено. Частицы WC имеют микротвердость HV_{30} около $20\ 200 \pm 800$ МПа. Микротвердость металлической матрицы $HV_{100} = 9\ 000 \pm 150$ МПа. Селективное химическое травление шлифов реактивом Мураками не выявило хрупкую η -фазу по границам частиц карбидов. При высоких скоростях нагрева и охлаждения расплава, которые обеспечивает технология лазерной наплавки, заметного растворения карбидов вольфрама в материале матрицы не наблюдается. Получено высококачественное износостойкое покрытие благодаря тому, что используемый многоканальный CO₂-лазер имеет высокую степень однородности интегрального тепловложения в зоне обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tobar M.J., Alvarez C., Amado J.M., Rodríguez G., Yáñez A. Morphology and Characterization of Laser Clad Composite NiCrBSi–WC Coatings on Stainless Steel // *Surface and Coatings Technology*. 2006. V. 200. № 22–23. P. 6313–6317.
2. Deschuyteneer D., Petit F., Gonon M., Cambier F. Influence of Large Particle size – up to 1.2 mm – and Morphology on Wear Resistance in NiCrBSi/WC Laser Cladded Composite Coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2017. V. 311. P. 365–373.
3. Lisiecki A., Kurc-Lisiecka A. Laser Cladding of NiCrBSi/WC + W₂C Composite Coatings // *Coatings*. 2023. V. 13. № 3. P. 576.
4. Афанасьева Л.Е., Раткевич Г.В. Лазерная наплавка покрытия NiCrBSiFe–WC с помощью многоканального лазера // *Письма о материалах*. 2018. Т. 8. № 3 (31). С. 268–273.
5. Афанасьева Л.Е., Раткевич Г.В., Новоселова М.В. Роль структурного фактора в повышении износостойкости Ni – Cr – В – Si-покрытия после лазерной обработки // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2019. № 9. С. 55–60.
6. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л. Формирование композиционного покрытия NiCrBSi–TiC с повышенной абразивной износостойкостью методом газопорошковой лазерной наплавки // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2013. № 11. С. 38–44.
7. Li Q., Lei T.C., Chen W.Z. Microstructural Characterization of WCp Reinforced Ni–Cr–B–Si–C composite coatings // *Surface and Coatings Technology*. 1999. V. 114. Is. 2-3. P. 285–291.
8. Appiah A.N.S., Bialas O., Czupryński A., Adamiak M. Powder Plasma Transferred Arc Welding of Ni-Si-B + 60 wt% WC and Ni-Cr-Si-B + 45 wt% WC for Surface Cladding of Structural Steel // *Materials*. 2022. V. 15. № 14. P. 4956.
9. Барчуков Д.А., Цыгвинцев А.В., Афанасьева Л.Е. Особенности формирования структуры и свойств быстрорежущей стали при импульсно-дуговой наплавке // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 4 (4). С. 16–22.
10. Югов В.И. Эффективное направление развития лазерной технологии – создание лазерных комплексов // *Главный механик*. 2020. № 1. С. 38–50.
11. Патент РФ 2580350. *Устройство для упрочнения поверхности детали* / Югов В.И. [и др.]; Заявл. 05.11.2014. Оpubл. 10.04.2016. Бюл. № 10.

12. Курлов А.С., Гусев А.И. Фазовые равновесия в системе WC и карбиды вольфрама // *Успехи химии*. 2006. Т. 75. № 7. С. 687–708.

13. Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления: справ. изд. М.: Металлургия. 1988. 400 с.

Для цитирования: Афанасьева Л.Е., Сахаров К.А. Порошковая лазерная наплавка износостойкого композиционного покрытия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 21–26.

POWDER LASER CLADDING OF A WEAR-RESISTANT COMPOSITE COATING

L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc., K.A. SAKHAROV, Postgraduate

Tver State Technical University

22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: ludmila.a@mail.ru

Metal-ceramic NiCrBSi-WC coating on 40X structural steel has been obtained by laser powder surfacing method. It is shown that cladding of high-alloyed powder mixture with the help of multichannel laser forms practically porous coating and provides metallurgical alloying with the base. It is noted that the fusion line is homogeneous in structure, and it confirms high homogeneity of integral heat input during cladding by this type of laser. It is established that due to high speeds of heating and cooling of the melt during powder laser cladding the dissolution of WC carbides in the melt bath is insignificant. No emission of brittle phase at the carbide-metal matrix interface was detected.

Keywords: microstructure, metal-ceramic coating, laser powder surfacing, multi-channel laser.

Поступила в редакцию/received: 19.11.2023; после рецензирования/revised: 30.11.2023;
принята/accepted: 05.12.2023

УДК 621.891

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, В.В. НОВИКОВ, канд. техн. наук,
О.О. НОВИКОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: vnvkv@yandex.ru

© Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., 2024

Исследованы триботехнические характеристики инновационного материала, представляющего собой композиционное покрытие с матрицей из оксида алюминия и наполнителями из нанодисперсного магнетита и микродисперсных дисульфида молибдена, графита. Установлено, что минимальные значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания при сохранении высоких прочностных свойств материалов достигаются при концентрации дисперсных частиц в электролите: для

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 1 (21), 2024*