

11. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект, 2008. 560 с.

12. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 352 с

УДК 621.7

К.А. Сахаров, Л.Е. Афанасьева
Тверской государственной технической университет

ПОРОШКОВАЯ ПЛАЗМЕННАЯ НАПЛАВКА ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ

© Сахаров К.А., Афанасьева Л.Е., 2024

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований микроструктуры и микротвердости износостойкого покрытия, полученного плазменно-порошковой наплавкой (использовали порошок марки Colmonoy 315-P2 на основе никеля). Показано, что линия сплавления имеет однородное строение. Сформировано прочное металлургическое сплавление между наплавкой и основой. (микротвердость наплавленного металла $5\ 300 \pm 60$ МПа).

Ключевые слова: износостойкое покрытие, плазменно-порошковая наплавка, система NiCrBSi, алюминиевая бронза, микроструктура, микротвердость.

PLASMA POWDER CLADDING OF WEAR-RESISTANT COATING

Abstract. The results of experimental studies of the microstructure and microhardness of a wear-resistant coating obtained by plasma-powder cladding are presented (nickel-based Colmonoy 315-P2 powder was used). It is shown that the fusion line has a homogeneous structure. A strong metallurgical fusion is formed between the surfacing and the base (microhardness of the deposited metal is $5\ 300 \pm 60$ MPa).

Keywords: wear-resistant coating, plasma-powder cladding, NiCrBSi system, aluminum bronze, microstructure, microhardness.

Для повышения срока службы новых деталей и ремонта изношенных часто используют порошковую наплавку. Она применяется в атомной, нефтехимической, горнодобывающей, оборонной промышленности, сельскохозяйственном машиностроении и многих других отраслях. В качестве присадочных материалов выбирают в основном порошки на основе никеля, кобальта, железа [1–4]. Сплавы на основе никеля имеют важное преимущество – способность сохранять твердость при повышенных температурах. Представителем таких сплавов являются порошковые присадочные материалы системы NiCrBSi.

В обзоре [5] дан сравнительный анализ микроструктуры, твердости, механических свойств, износостойкости наплавленных покрытий никелевых сплавов различных марок, полученных технологиями электродуговой, плазменной и лазерной наплавки. В работе [6] с помощью атомно-силового микроскопа было изучено наномасштабное трибологическое поведение покрытия Colmonoy 6, нанесенного на нержавеющую сталь с использованием метода наплавки плазменной дугой.

В статьях отмечается, что наибольшее распространение в мировой практике нанесения износостойких покрытий никелевых сплавов получили порошки системы NiCrBSi. Суперсплавы на основе никеля уже нашли широкое практическое применение, проведены обширные научные исследования, по результатам которых опубликована не одна сотня научных статей. Однако научный интерес к этим сплавам не снижается. Количество научных статей непрерывно растет год от года. Это связано прежде всего с высокими технологическими, механическими, эксплуатационными свойствами сплавов системы NiCrBSi, их потенциал раскрыт не полностью.

Износостойкие покрытия наносят различными способами: газотермическим напылением, электродуговой, лазерной, плазменной наплавкой и т.д. [5–8]. Известно, что структура и свойства покрытий, обладающих одинаковым составом, но полученных по различной технологии, могут значительно отличаться. Следовательно, важной задачей является контроль формирующегося структурного состояния материала покрытия для получения наилучшего комплекса эксплуатационных свойств [9].

Цель настоящей работы – металлографическими методами провести анализ структурного состояния покрытия состава NiCrBSi, полученного порошковой плазменной наплавкой.

Материалы и методы исследований. Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены образцы наплавленного металла. В качестве присадочного материала использовали порошок марки Colmonoy 315-P2, химический состав которого, согласно данным компании производителя, приведен в табл. 1. Гранулометрический состав порошка составляет 63–150 мкм.

Таблица 1. Химический состав порошка Colmonoy 315-P2, мас. %

В	С	Cr	Fe	Si	Al	Ni
1,5	0,25	4,5	1,2	3,5	1,0	Остальное

В качестве подложки использовали алюминиевую бронзу марки BrA9Ц8Н15, химический состав представлен в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав бронзы БрА9Ц8Н15, мас. %

Al	Si	P	Mn	Fe	Ni	Zn	Sn	Pb	Cr	Cu и примеси
6,298	0,487	0,016	0,178	0,959	15,960	7,108	0,124	0,096	0,417	Остальное

Известно, что при наплавке сплав состава NiCrBSi обладает очень высокой жидкотекучестью [5]. Чтобы исключить нежелательное растекание покрытия и получить лучшие свойства, перед его нанесением рекомендуется производить рифление поверхности основного металла. В настоящей работе перед наплавкой на поверхности бронзовой заготовки были отфрезерованы канавки глубиной 1,7 мм и шириной 6 мм.

Общий подогрев заготовки проводили с помощью высокочастотного индукционного нагревателя модели ВЧ-40АВ до 500–600 °С. На предварительно нагретую заготовку осуществляли порошковую наплавку на аппарате плазменной сварки и наплавки STARWELT PTA 150Н. На рис. 1 показан внешний вид одного из образцов.

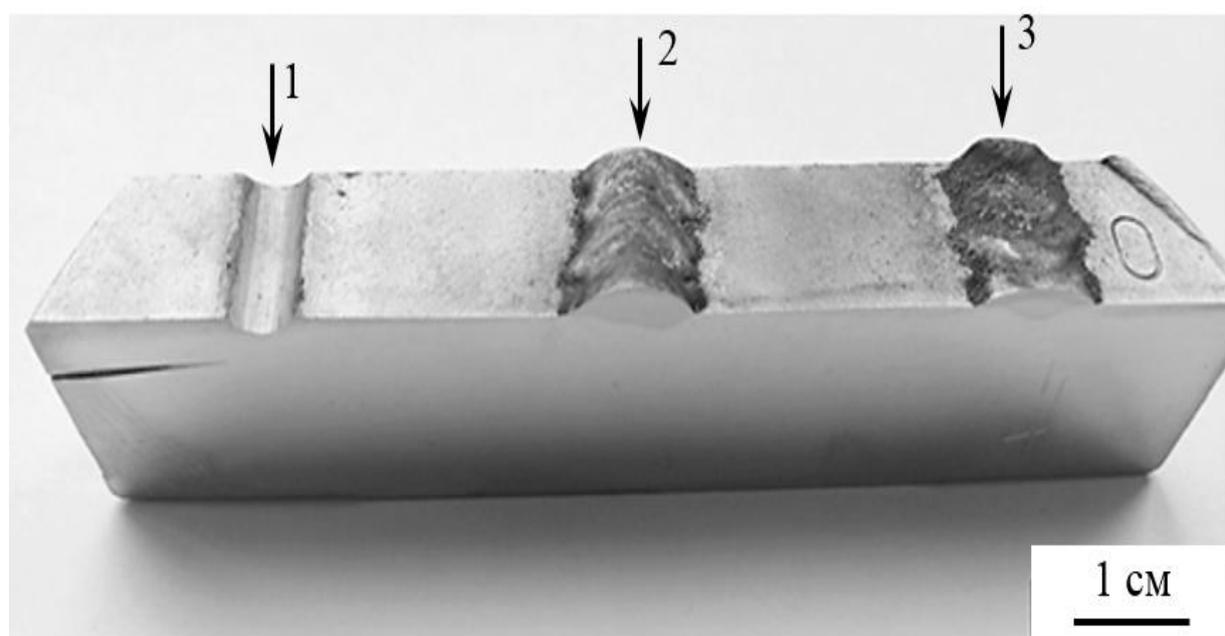


Рис. 1. Внешний вид одного из образцов

Для определения оптимального режима наплавки использовали разную силу тока. Первый валик получали при силе тока 66 А (на рис. 1 место его наплавки показано стрелкой 1). Выбранная сила тока была мала, при наплавке не образовалось металлургического сплавления с основой и наплавленный валик легко отделился. Второй валик наплавливали при силе тока 94 А, третий – 83 А (на рис. 1 эти валики отмечены цифрами 2 и 3 соответственно). Подача порошка оставалась неизменной и составляла 14–17 г/мин. При визуальном осмотре второй валик имел более

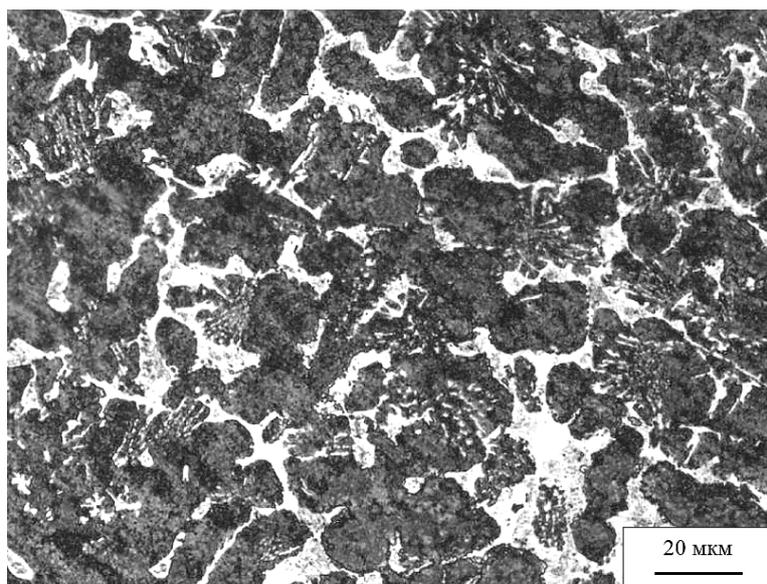
однородное строение по сравнению с третьим. Были проведены дополнительные исследования его микроструктуры и микротвердости.

Исследования микроструктуры структуры проводили на оптическом металлографическом микроскопе Carl Zeiss Axio Vert.A1MAT. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 согласно ГОСТ 9450-76 при усилии 1,96 Н. В качестве индентора применяли алмазную четырехгранную пирамидку с квадратным основанием.

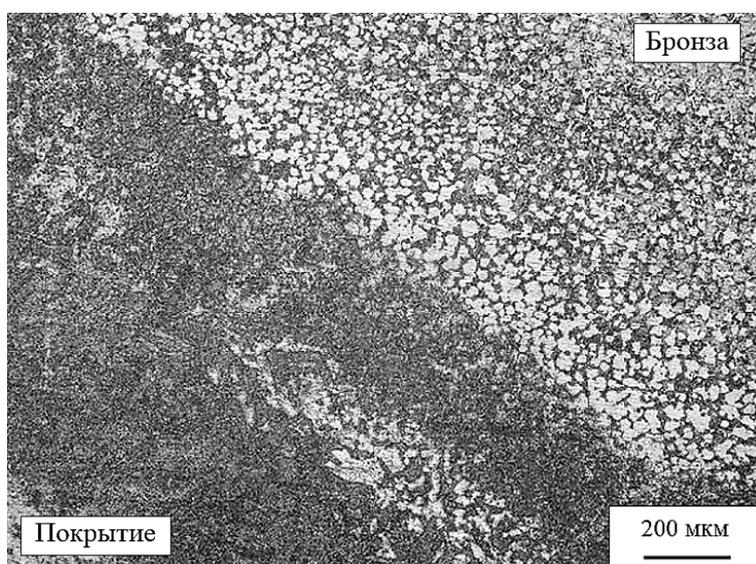
Результаты исследований. Плазменно-порошковая наплавка – это механизированный процесс, при котором источником теплоты служит сжатая дуга (плазма), а присадочным материалом выступают гранулированные металлические порошки, которые подаются в плазматрон транспортирующим газом с помощью специального питателя. Условия нагрева и охлаждения наплавленного металла играют главную роль в формировании микроструктуры и свойств покрытий.

На рис. 2 представлены изображения микроструктуры наплавленного покрытия. При кристаллизации сплава системы NiCrBSi вначале из жидкости выделяются первичные упрочняющие фазы: карбидные, боридные, а также сложные карбоборидные. На рис. 2а эти фазы выглядят светлыми. Затем растут дендриты γ -никеля (темные участки), и в последнюю очередь кристаллизуется самая легкоплавкая составляющая – эвтектика, состоящая из γ -никеля и Ni_3B , имеющая веерообразное строение. Размеры структурных составляющих зависят от скорости охлаждения расплавленной ванны. Чем быстрее скорость охлаждения расплава, тем меньше размер частиц упрочняющих фаз и выше степень легирования твердого раствора. Однако при больших скоростях охлаждения возможно возникновение значительных внутренних напряжений и трещин, чего допускать нельзя.

Линия сплавления (рис. 2б) имеет однородное строение, проплавление подложки незначительное. По мере приближения к поверхности подложки наблюдается частичное перемешивание материала наплавки и подложки. Степень перемешивание материала наплавки и подложки также оказывает большое влияние на свойства покрытия. Необходимо формировать наплавленный слой с малым коэффициентом перемешивания (0,10–0,15). Снижение этого коэффициента может привести к несплавлениям наплавки с основой, а увеличение – к нежелательному изменению химического состава и свойств покрытия за счет избыточного разбавления наплавленного металла материалом основы.



а



б

Рис. 2. Микроструктура (при поперечном шлифе): а – наплавленного покрытия; б – вблизи линии сплавления

На рис. 3 представлено распределение микротвердости (поперечный шлиф) в области линии сплавления. Характер изменения микротвердости отражает механизм получения металлургического сплавления наплавки с основой. Участок *A* соответствует наплавленному металлу с микротвердостью $HV = 5\,300 \pm 60$ МПа. Однородное распределение микротвердости косвенно свидетельствует о стабильности химического состава и структуры покрытия в этой области. Участок *B* является переходной зоной. Наблюдается градиентное изменение микротвердости, так как на этом участке происходит разбавление наплавленного NiCrBSi сплава материалом основы – бронзой. Участок *B* соответствует материалу основы.

Микротвердость алюминиевой бронзы существенно ниже никелевого сплава: $HV = 2\,550 \pm 100$ МПа.

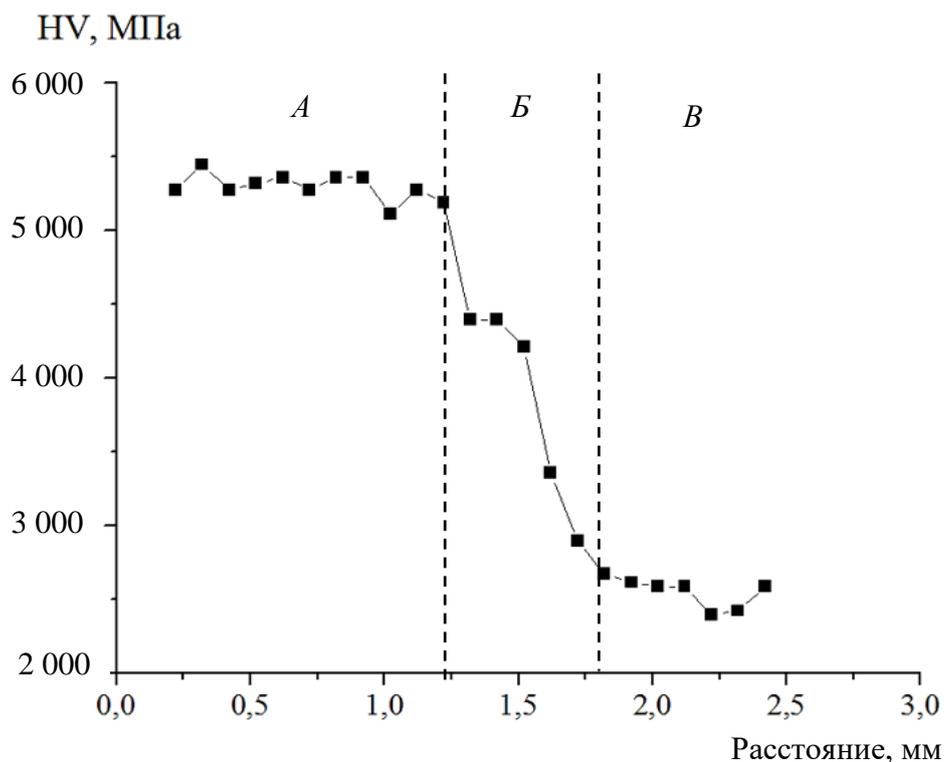


Рис. 3. Распределение микротвердости вблизи линии сплавления

Вывод. Проведенные исследования выявили гетерогенную микроструктуру наплавленного покрытия. В фазовый состав входят твердый раствор на основе никеля, обладающий повышенной пластичностью, и эвтектика, содержащая борид никеля и ряд упрочняющих фаз – карбидов, боридов и карбоборидов, обладающих повышенной твердостью. Микротвердость наплавленного слоя $HV = 5\,300 \pm 60$ МПа. Металлографические исследования подтвердили формирование прочного металлургического соединения наплавленного металла с основой. Проведенная работа показала высокую эффективность и производительность порошковой плазменной наплавки.

Библиографический список

1. The structural characteristics and contact loading behavior of gas powder laser clad CoNiCrW coating / R.A. Savrai [et al.] // Optics & Laser Technology. 2020. V. 126. 106079.
2. 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.

3. Афанасьева Л.Е., Раткевич Г.В., Новоселова М.В. Роль структурного фактора в повышении износостойкости Ni-Cr-B-Si покрытия после лазерной обработки // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2019. № 9. С. 55–60.

4. Афанасьева Л.Е., Сахаров К.А. Порошковая лазерная наплавка с помощью многоканального лазера // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2023. Т. 19. № 9. С. 400–404.

5. Balaguru S., Gupta M. Hardfacing studies of Ni alloys: A critical review // *Journal of materials research and technology*. 2021. V. 10. P. 1210–1242.

6. Role of interfacial shear strength in nanotribological behaviour of PTA deposited Colmonoy 6 coating on SS304 steel / V.P. Singh [et al.] // *Materials Letters*. 2023. V. 353. P. 135287.

7. Dashen W.Z. W. B. J., Xin X. M. L., Shiqin L. Effect of Co-Ni-Cr-W and Ni-Cr-B-Si alloy coatings upon the hot corrosion-fatigue resistance of several heat-resisting steels // *Journal of Chinese Society for Corrosion and protection*. 2009. V. 1. №. 4. P. 60–67.

8. Phase transformations in Co-Ni-Cr-W alloys during high temperature exposure to steam environment / J. Zhang [et al.] // *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2018. V. 39. P. 387–400.

9. Измайлов В.В., Новоселова М.В. О влиянии упрочняющей обработки поверхностей трения на ресурс трибосопряжения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 3 (15). С. 5–14.

УДК 621.891

Д.А. Зоренко
Тверской государственный технический университет

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ,
ПОДВЕРЖЕННЫХ АБРАЗИВНОМУ ИЗНАШИВАНИЮ,
ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ
ЗАЩИТНО-ДЕКОРАТИВНЫХ МДО-ПОКРЫТИЙ**

© Зоренко Д.А., 2024

Аннотация. Описаны варианты применения защитно-декоративных МДО-покрытий на подвергающихся абразивному изнашиванию рабочих поверхностях деталей из алюминиевых и титановых сплавов. Приведены основные триботехнические характеристики таких покрытий. Рассмотрены варианты получения анодно-искровых защитно-декоративных покрытий на титановых сплавах с использованием различных составов электролита.