

<https://doi.org/10.26160/2572-4347-2024-19-15-20>

ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ШИХТЫ С ДОБАВКАМИ КАРБИДОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ

Бирюков В.П.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,
Москва, Россия*

Ключевые слова: лазерная наплавка, микротвёрдость, коэффициент трения, интенсивность изнашивания, скорость скольжения, заедание.

Аннотация. В работе представлены результаты металлографических исследований и триботехнических испытаний образцов с лазерной наплавкой многокомпонентной порошковой шихтой на основе железа и кобальта с добавками ультрадисперсного порошка карбида титана на сталь 5ХНМ. Установлено, что коэффициенты трения покрытий с карбидами имели минимальные коэффициенты трения в исследуемом диапазоне давлений. Критические скорости скольжения до заедания были значительно выше, чем у материала основы. Износостойкость многокомпонентных покрытий и с добавками карбида титана в 2-3,66 раза выше, чем исходной стали.

IMPROVING THE TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF A MULTICOMPONENT CHARGE WITH CARBIDE ADDITIVES DURING LASER SURFACING

Biryukov V.P.

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian*

Keywords: laser surfacing, microhardness, coefficient of friction, wear intensity, sliding speed, jamming.

Abstract. The paper presents the results of metallographic studies and tribotechnical tests of samples with laser surfacing of a multicomponent powder charge based on iron and cobalt with additives of ultrafine titanium carbide powder on 5KhNiMo steel. It was found that the friction coefficients of coatings with carbides had minimal friction coefficients in the studied pressure range. The critical sliding speeds before the meeting were significantly higher than those of the base material. The wear resistance of monocomponent coatings and titanium carbide additives is 2-3.66 times higher than the initial steel.

Порошки на основе железа [1] с высокой износостойкостью были наплавлены с использованием лазера на подложку из стали 65Г. Покрытия имели градиентную микроструктуру, состоящую из рабочего слоя и переходного слоя с различным составом. Рабочий слой содержал карбиды $(Cr, Fe)_7C_3$ в качестве твердой фазы, что улучшало его твердость и износостойкость. Переходный слой имел большее количество мягкой фазы из-за более высокого содержания Ni, что повышало прочность сцепления между покрытием и подложкой. Покрытия демонстрировали однородную и плотную морфологию, отсутствие трещин и пор, а также мелкий размер зерен. Средняя

твёрдость покрытий составила 721 HV1, что более чем в три раза превышало твёрдость подложки. Коэффициент трения и удельная потеря массы покрытий составляли 0,42 и 0,0018 мг/м, соответственно, и были ниже, чем у подложки (0,48 и 0,036 мг/м). Покрытия продемонстрировали превосходную износостойкость и долговечность при испытаниях в почвенных резервуарах, показав снижение потери массы на 81,15% при использовании на лопастях роторных культиваторов.

Порошки на основе железа [2] и кобальта были успешно наплавлены на поверхности нержавеющей стали AISI 304 с использованием лазерной технологии. в качестве заменяющих материалов с превосходной износостойкостью и коррозионной стойкостью. Впоследствии были исследованы фазовый состав, микроструктура, кристаллографическая текстура, распределение микротвёрдости, износостойкость и коррозионная стойкость двух покрытий. Результаты показали, что покрытие на основе железа в основном состоит из фаз α -Fe и Cr_{23}C_6 , в то время как покрытие на основе кобальта в основном состоит из γ -Co и Cr_{23}C_6 . В двух покрытиях не было очевидной текстуры, а ориентация зерен имела случайный характер. Размер зерен покрытий на основе железа значительно меньше, чем у покрытий на основе кобальта. Средняя микротвёрдость покрытий на основе железа и кобальта составляла 704 и 502 HV соответственно. Одновременный эффект мелкозернистого упрочнения и второй фазы упрочнения обеспечивал высокую износостойкость покрытия на основе железа. Сочетание пассивной пленки, богатой Cr, и мелкодисперсных карбидов позволили получить высокую коррозионную стойкость покрытия на основе кобальта.

В работе [3] исследованы двухфазные высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), обладающие прочностью и пластичностью, и возможно более высокими трибологическими свойствами, чем однофазные в широком диапазоне температур. Покрытия $\text{Al}_x\text{CoCrFeNiMn}$ ($1 - x$) ($x = \text{от } 0 \text{ до } 1,0$) ВЭС были получены методом лазерной наплавки для изучения эволюции микроструктуры и износостойкости при трении без смазки покрытий с двойными фазами твёрдого раствора. Значительное улучшение микротвёрдости при $x = 0,8$ объясняется двухфазной микроструктурой, отличающейся иерархической архитектурой сплава и многомасштабной дислокационной сетью. Износостойкость однофазных покрытий с объемно-центрированной кубической (ОЦК) или гранцентрированной кубической (ГЦК) решеткой лучше, чем у двухфазных покрытий при комнатной температуре. При 20°C объемный износ достигает $4,54 \times 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ при $x = 0$ и $7,19 \times 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ при $x = 0,6$. Тем не менее, двухфазные покрытия обладают лучшей износостойкостью при высоких температурах, чем однофазные покрытия. При температуре 600°C объемный износ составлял $7,24 \times 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ при $x = 0$ и $5,13 \times 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ при $x = 0,6$, что значительно ниже, чем у однофазных покрытий.

Обработку технологии [4] лазерной наплавки проводили на образцах стали 40X с размерами $15 \times 20 \times 70$ мм. Первый слой наплавливали порошком на

основе железа Fe-Co-Cr-Mo, а наплавку второго слоя покрытия выполняли порошком на основе никеля Ni-Cr-B-Si с добавкой карбида вольфрама 40 масс.% (WC-W₂C) с размерами частиц 40-100 мкм. Для получения различных параметров наплавленных зон изменяли плотность мощности лазерного излучения в пределах 28-45 Дж/мм² (Fe-Co-Cr-Mo) и 32-86 Дж/мм² (Ni-Cr-B-Si+WC). Триботехнические испытания на абразивное изнашивание незакрепленным абразивным зерном проводили по схеме «широкая сторона образца с наплавленным покрытием, основа – кольцевая поверхность плоского резинового диска». В качестве абразива использовали кварцевый песок с размерами частиц 0,2-0,6 мм. Повышение плотности энергии излучения выше оптимальных значений приводило к растворению карбидов и снижению микротвердости. Установлено, что износостойкость второго слоя покрытия, полученного при плотности энергии 48 Дж/мм², значительно выше чем материала основы.

Целью работы является определение триботехнических свойств многокомпонентных металлокерамических покрытий полученных лазерной наплавкой с добавлением ультрадисперсных карбидов титана.

Для проведения экспериментальных работ использовали автоматизированный лазерный технологический комплекс ИМАШ РАН. Образцы изготавливали из стали 5ХНМ с размерами 12×20×70 мм. Для приготовления многокомпонентной шихты применяли порошки на основе железа Fe-Cr-Co-Mo и кобальта Co-Cr-W-Ni-B-Si в соотношении 3:1 соответственно с размерами частиц 45-150 мкм. Ультрадисперсный порошок карбида титана с размером частиц 0,5-16 мкм добавляли в шихту в количестве 5-7 масс.%. Шликерные покрытия наносили толщиной 0,78-0,9 мм. В качестве связующего материала использовали водный раствор оксиэтилцеллюлозы. Металлографические исследования, наплавленных покрытий, выполняли на микротвердометре ПМТ-3 при нагрузке 0,98 Н, металлографической системе ОМОС М 1000 и цифровом микроскопе АМ219. Для определения триботехнических характеристик наплавленных лазерным лучом покрытий проводили испытание при нормальной температуре по схеме: «широкая сторона плоского образца (наплавленный образец) – торец контрообразца втулки (сталь 40Х, 49-52 HRC)». Скорость скольжения и давление на образец изменялись дискретно в интервале 0,25-3,0 м/с и 1-5 МПа соответственно. Для смазки применяли гидравлическое масло МГЕ-10А.

Лазерную обработку образцов проводили на оптимальных режимах дефокусированным лучом и с поперечными колебаниями луча по нормали к вектору скорости лазерной наплавки. Металлографическими исследованиями определены высота и ширина наплавленных дорожек, размеры которых составили 0,62-0,78, 0,61-0,73 мм и 2,08-2,45 и 3,4-5,3 мм соответственно. Микротвердость стали 5ХНМ, зон наплавки многокомпонентной шихтой и с добавлением карбидов 5 и 7 масс% составила 365-440, 590-670, 640-730, 670-786, 710-820 HV соответственно. Площадь поперечного сечения единичного наплавленного валика в 1,6-2,1 раза больше при поперечных

колебаниях луча, чем при обработке расфокусированным лучом и производительность процесса увеличивалась пропорционально этим значениям в зависимости от режимов наплавки. На рисунке 1 представлены графики зависимостей коэффициентов трения от давления.

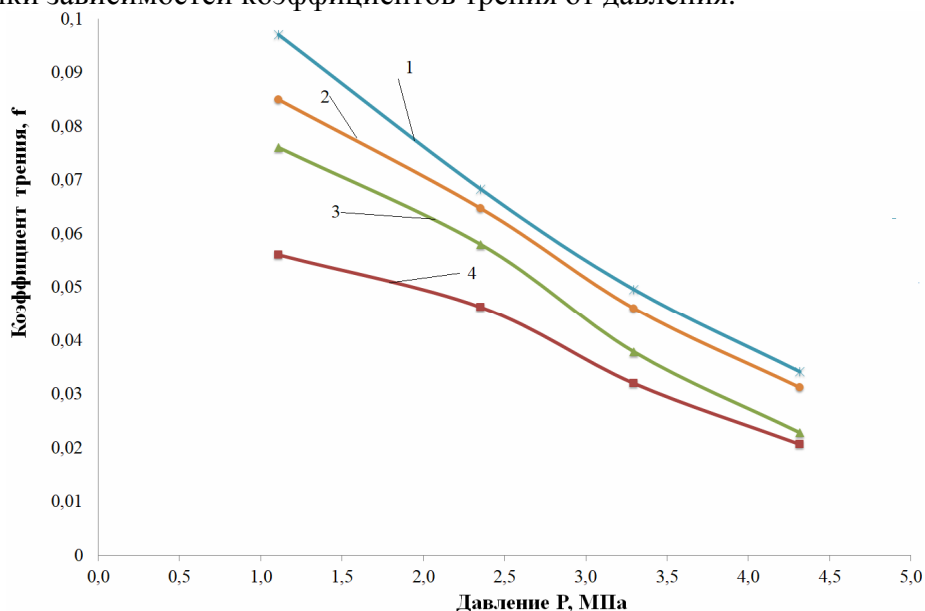


Рис. 1. Зависимость коэффициентов трения от давления: 1 – сталь 5XHM, 2 – Fe-Cr-Co-Mo+Co-Cr-W-Ni-B-Si, 3 – Fe-Cr-Co-Mo+Co-Cr-W-Ni-B-Si+5% TiC, 4 – Fe-Cr-Co-Mo+Co-Cr-W-Ni-B-Si+7% TiC

При возрастании давления наблюдалось снижение коэффициентов трения. Для многокомпонентного покрытия (рис. 1, кривая 2) с увеличением нагрузки с 1,0 до 4,4 МПа коэффициент трения снижался с 0,88 до 0,34. Минимальные коэффициенты трения 0,26-0,56 получены для покрытий с добавками 7 масс. % TiC. В таблице 1 представлены результаты определения критических частот вращения или скоростей скольжения, при которых происходило заедание в паре трения. В таблице 2 представлены результаты определения интенсивности изнашивания образцов при трении по контробразцам из стали 40X.

Табл. 1. Критическая частота вращения (скорость скольжения)

Номер образца	Наплавленный слой, основа	Критическая частота вращения / скорость скольжения, мин ⁻¹ /м/с
1	5XHM	450/0,66
2	Fe-Cr-Co-Mo+Co-Cr-W-Ni-B-Si	900/1,32
3	Fe-Cr-Co-Mo+Co-Cr-W-Ni-B-Si+5% TiC	1100/1,61
4	Fe-Cr-Co-Mo+Co-Cr-W-Ni-B-Si+7% TiC	1400/2,05

Табл. 2. Результаты испытаний на интенсивность изнашивания

Номер образца	Наплавленный слой, основа	Средняя интенсивность изнашивания образцов, I_{cp1} , и контрообразцов, I_{cp2}	
		$I_{cp1} \times 10^{-9}$	$I_{cp2} \times 10^{-9}$
1	5XHM	7,863	6,572
2	Fe-Cr-Co-Mo+Co-Cr-W-Ni-B-Si	3,872	6,639
3	Fe-Cr-Co-Mo+Co-Cr-W-Ni-B-Si+ +5% TiC	2,765	6,678
4	Fe-Cr-Co-Mo+Co-Cr-W-Ni-B-Si+ +7% TiC	2,147	6,715

Анализ полученных результатов по определению критических частот вращения, скоростей скольжения до заедания при постоянном давлении показал, что многокомпонентные покрытия и с добавками карбидов титана значительно превосходят исходную сталь 5XHM по этому критерию. Интенсивность изнашивания многокомпонентных покрытий и с добавками карбида титана значительно ниже материала основы.

Выводы

Проведенные исследования по лазерной наплавке многокомпонентной порошковой шихты и с добавками ультрадисперсных карбидов титана показали, что введение твердой фазы значительно повышало их микротвердость и увеличивало критические скорости скольжения до заедания пар трения. Производительность процесса лазерной наплавки с использованием поперечных колебаниях луча повышалась в среднем в 1,8 раза. Полученные покрытия превосходили материал основы по износостойкости.

Список литературы

1. Wu X., Feng S., Zhang W. Microstructure, phase composition and wear properties of iron-based gradient coatings by laser cladding on 65Mn steel // Surface and Coatings Technology. 2024, vol. 477, p. 130290. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.130290.
2. Jin F., Zhang S., Wu C.L. Zhang C.H., Sun X.Y., Bai X.L. Comparative Study on the Microstructure, Wear Behavior, and Corrosion Performance of Iron-Based and Cobalt-Based Coatings Fabricated by Laser Cladding // Journal of Materials Engineering and Performance. 2023, DOI: 10.1007/s11665-023-08821-5.
3. Liu H., Wang R., Wang Q., Chen P., Yang H., Hao J., Sun S., Liu X. Tribology behavior in laser clad dual-phase Al_xCoCrFeNiMn(1-x) high entropy alloys influenced by hierarchical interface architecture // Surface and Coatings Technology. 2023, vol. 471, p. 129895. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129895.
4. Бирюков В.П. Оптимизация технологии лазерной наплавки и ее влияние на свойства покрытий // Фотоника. – 2023. – Т. 17, №6. – С. 442-453. – DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.6.442.452.

References

1. Wu X., Feng S., Zhang W. Microstructure, phase composition and wear properties of iron-based gradient coatings by laser cladding on 65Mn steel // *Surface and Coatings Technology*. 2024, vol. 477, p. 130290. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.130290.
2. Jin F., Zhang S., Wu C.L. Zhang C.H., Sun X.Y., Bai X.L. Comparative Study on the Microstructure, Wear Behavior, and Corrosion Performance of Iron-Based and Cobalt-Based Coatings Fabricated by Laser Cladding // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023, DOI: 10.1007/s11665-023-08821-5.
3. Liu H., Wang R., Wang Q., Chen P., Yang H., Hao J., Sun S., Liu X. Tribology behavior in laser clad dual-phase Al_xCoCrFeNiMn(1-x) high entropy alloys influenced by hierarchical interface architecture // *Surface and Coatings Technology*. 2023, vol. 471, p. 129895. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129895.
4. Biryukov V.P. Optimization of laser surfacing technology and its effect on coating properties // *Photonics*. 2023, vol. 17, no. 6, pp. 442-453. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.6.442.452.

Бирюков Владимир Павлович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник laser-52@yandex.ru	Biryukov Vladimir Pavlovich – candidate of technical sciences, leading researcher
---	--

Received 10.03.2024