

УДК 621.891. 22

## ПОВЫШЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЕЙ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ЛЕГИРОВАНИИ

© 2023 г. В. П. Бирюков<sup>а</sup> \*, А. Н. Принц<sup>а</sup>, А. А. Якубовский<sup>а</sup>

<sup>а</sup>ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, 119334 Россия

\*E-mail: laser-52@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.07.2022 г.

После доработки 11.07.2022 г.

Принята к публикации 18.07.2022 г.

В работе рассмотрен процесс лазерного легирования нержавеющей стали порошками на основе железа, содержащими Fe–Co–Cr–Mo и добавками нано карбидов тантала. Показано, что коэффициенты трения модифицированных слоев содержащих TaC значительно ниже, а износостойкость выше, чем без карбидов и в 2.2 раза выше материала основы. Установлено, что производительность лазерного легирования с поперечными колебаниями луча выше, чем при обработке расфокусированным лучом в 2–3 раза.

**Ключевые слова:** лазерное легирование, износостойкость, коэффициент трения

**DOI:** 10.56304/S2079562922050086

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Низкоуглеродистая нержавеющая сталь, применяемая в аэрокосмической, атомной, транспортной и других отраслях промышленности обладает превосходной коррозионной стойкостью, но низкими триботехническими свойствами. Лазерное легирование нержавеющей стали [1] нано карбидом вольфрама (WC) на глубину 190 мкм позволило получить среднюю микротвердость в модифицированном слое 762HV и значительно снизить коэффициент трения, по сравнению со сталью SS 316L.

При использовании мелкодисперсного порошка WC размером около 1 мкм, нанесенного на поверхность образца толщиной 0.3 мм в виде шликерного покрытия, производили лазерное легирование поверхности нержавеющей стали AISI 316 твердотельным лазером мощностью 2.5 кВт с 50% перекрытием дорожек [2]. Сопротивление кавитационной эрозии увеличивалось более чем в 30 раз, по сравнению с исходной сталью при микротвердости легированного слоя 1000 HV. Глубина легированного слоя составляла 0.31–0.4 мм.

Порошок карбида хрома (Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) и карбида титана (TiC) порошок был нанесен на сталь 316 и подвергнут воздействию Nd:YAG лазера мощностью 300 Вт [3]. Лазерное легирование образцов выполняли диаметром луча 0.95 мм при скорости его перемещения 5 мм/с с 75% наложением доро-

жек. Глубина легированного лазером слоя образцов составляла 100–150 мкм. Была получена микротвердость в диапазоне 450–900 HV. Заметное улучшение износостойкости наблюдалось при испытании на износ слоев, армированных карбидом титана.

Частицы карбида вольфрама (WC) наносили [4] на штамповую сталь для горячей обработки H13 для последующего лазерного легирования. Микротвердость легированного слоя увеличилась с увеличением массовой доли частиц WC, и этот слой обладал более высокой износостойкостью и более низким коэффициентом трения. Эксперименты по лазерной наплавке стали H13 проводились с использованием иттербиевой волоконной системы IPG мощностью 4 кВт. Обработку осуществляли при мощности лазера 2000 Вт, диаметре лазерного пятна 4 мм скорости сканирования 240 мм/мин при расходе порошка 15 г/мин, с перекрытием дорожек 60%. Для наплавки использовали порошок Fe104 с размером частиц 100–140 мкм, и с добавлением WC 3%, 6% и 9% в состав шихты. Испытания на трение и износ выполняли по схеме диск (сталь GCr15 690–710 HV) – колодка (наплавленный образец) при частоте вращения 200 мин<sup>-1</sup>, нагрузке 150Н и времени цикла 2 ч без смазочного материала. Наибольшую износостойкость показало покрытие с содержанием 9% WC, которая превысила в 2.5 раза материал основы.

Лазерное поверхностное легирование [5] азот-содержащих покрытий на нержавеющей стали AISI 1020 выполняли для повышения ее коррозионной стойкости. Легирующие материалы, порошки Fe–Cr–Ni–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и Fe–Cr–Mn–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, которые были предварительно смешаны перед лазерным облучением. Экспериментальные результаты показали, что содержание азота в обработанных лазером сплавах Fe–Cr–Ni–Si–N и Fe–Cr–Mn–Si–N может достигать 0.38 и 0.83 мас. % соответственно. Однако по стойкости к точечной коррозии Fe–Cr–Mn–Si–N уступал нержавеющей сталям 316L и P900N.

Лазерное поверхностное легирование [6, 7] с использованием элементов (Si, Cr, C, Mo, Mn, Ni) и соединений сплавов (AlSiFe, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и NiCrSiB) выполняли на нержавеющей стали UNS S31603. Шликерные покрытия наносили на поверхность образцов толщиной 0.15 мм. Лазерное поверхностное легирование проводилось с использованием излучения непрерывных Nd:YAG и CO<sub>2</sub> – лазеров. Обработку производили при мощности лазера 800–1200 Вт, диаметром пятна 3.5 мм, с перекрытием дорожек 42–64%, скорости сканирования луча составляли 5 и 25 мм/с, в среде аргона, при расходе 20 л/мин. Глубина легированных слоев составляла 0.23–0.39 мм. Было установлено, что образцы, легированные Co, Ni, Mn, C и NiCrSiB, содержали аустенит в качестве основной фазы, а карбиды и бориды в качестве второстепенных фаз. Для образцов, легированных Cr и Mo, основной фазой был феррит. Значительное улучшение стойкости к кавитационной эрозии и коррозионной стойкости не может быть достигнуто одновременно в этом типе процесса легирования.

Модификация поверхности нержавеющей стали AISI 316 порошком никелида титана NiTi со средним размером частиц 10 мкм выполнялась с использованием Nd:YAG лазера [8]. Обработку производили при мощности излучения 500–900 Вт, диаметре луча 3 мм, скорости перемещения 25–55 мм/с, с 50% перекрытием дорожек. Результаты показали, что при оптимальных параметрах лазерной обработки может быть получен легированный слой толщиной 250 мкм. Стойкость легированных слоев к кавитационному износу может быть повышена в десятки раз по сравнению со сталью 316.

Авторы [9] сообщили о получении поверхности без трещин и пор, модифицированной AISI 316 путем лазерной обработки с использованием слоев толщиной 0.5 мм различных составов SiC–Fe–Ni–Cr. Процесс лазерного легирования выполняли на CO<sub>2</sub>–лазере при мощности излучения 2.0–3.3 кВт,

скорости перемещения 1.0–2.0 м/мин, диаметре луча 3 мм. Микроструктура зон легирования почти однородна по всей исследованной области с твердостью около 700 HV.

Лазерное легирование порошка AISI 316 [10] смешанного с 33, 50, и 67% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> проведено на стали AISI 316. Порошок карбида хрома растворялся в процессе плавления с образованием ряда карбидов, которые повышали твердость материала. Результаты показали улучшение износостойкости легированного слоя с 33% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> при скольжении и хорошую устойчивость к точечной коррозии.

Нержавеющая сталь AISI 304 [11] была подвергнута лазерному легированию WC + Ni + NiCr с использованием непрерывного излучения Nd:YAG лазера, мощностью 5 кВт. Максимальная твердость легированных слоев составляла 1350 HV. Износостойкость и коррозионная стойкость были значительно улучшены благодаря высокой твердости.

Лазерной модификации подвергали поверхности на SS 316L [12] с использованием гидроксипатита для медицинского применения. Результаты показали, что с увеличением подводимой энергии лазера с 32 до 59 Дж/мм<sup>2</sup> толщина модифицированной поверхности увеличилась с  $0.222 \pm 0.012$  до  $0.355 \pm 0.006$  мм, в то время как средняя твердость поверхности незначительно снизилась с  $403 \pm 18$  HV<sub>0.3</sub> до  $372 \pm 8$  HV<sub>0.3</sub>.

Однако эта область лазерной обработки остается недостаточно изученной в отношении режимов и количества вводимых легирующих добавок.

Целями настоящих исследований являются повышение коррозионной стойкости при высоких температурах и триботехнических свойств легированных слоев нержавеющей стали.

## 2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛЕГИРОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения экспериментальных работ применяли автоматизированный лазерный технологический комплекс ИМАШ РАН. В качестве материала для подложки использовали нержавеющую сталь 20X13. Размеры образцов составляли 15 × 20 × 70 мм. Для легирования использовали порошковый материал Fe–Co–Cr–Mo применяемый для узлов трения работающих в условиях высокотемпературной коррозии с размером частиц 50–140 мкм и с добавками нано порошка карбида тантала (TaC) 10 мас. % с фракцией 40–100 нм. Шликерные покрытия наносили толщиной 0.3–0.4 мм со связующим веществом на водной основе. Лазерное легирование выполняли при мощности излучения 700–1000 Вт, скорости

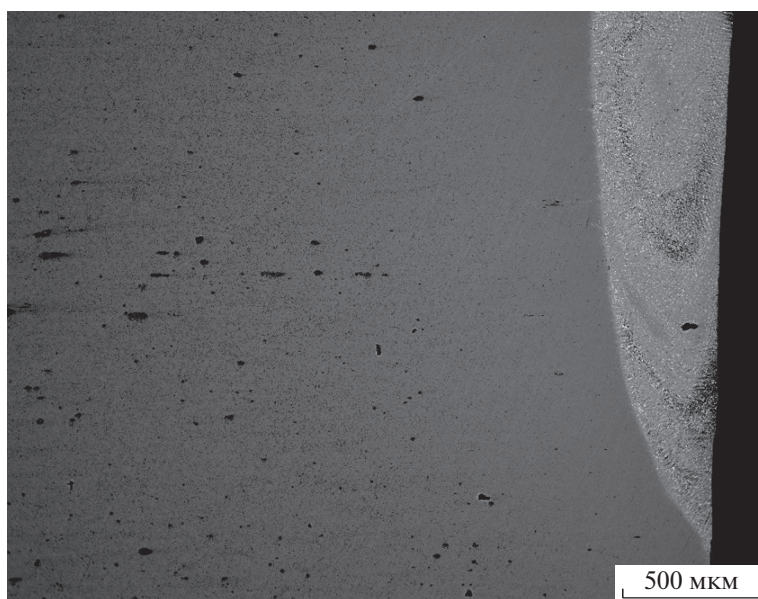


Рис. 1. Микрошлиф зоны легирования стали 20X13 порошком Fe–Co–Cr–Mo + 10%TaC.

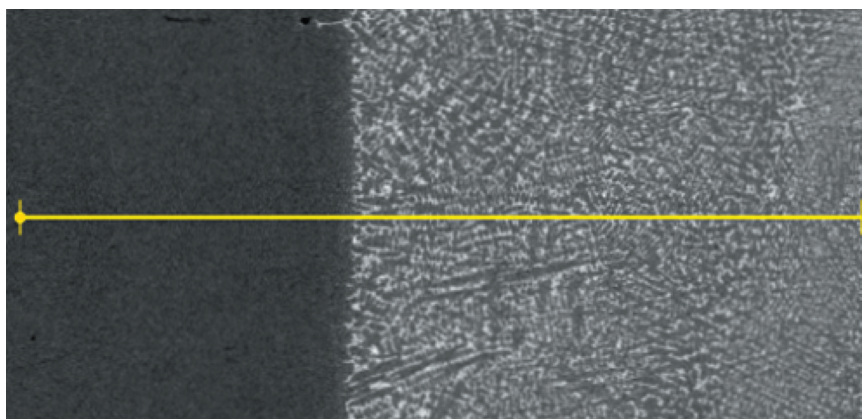


Рис. 2. Зона перехода от основы к легированному слою порошком Fe–Co–Cr–Mo.

перемещения луча 3–5 мм/с, диаметром лазерного пятна 1.2–2.2 мм, с поперечными колебаниями 216 Гц. Окончательную обработку партии образцов выполняли на оптимальных режимах. Перед испытаниями на трение и износ образцы шлифовали. Испытания выполняли на машине трения с использованием схемы плоскость (легированный образец после шлифования) – кольцевая поверхность контробразца (сталь 40X, 49–54HRC).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 представлен микрошлиф легированного образца. Ширина зоны легирования состав-

ляла 1.1–2.0 и 3.8–4.6 мм при глубине слоя 0.3–0.4 и 0.29–0.38 мм при легировании расфокусированным и колеблющимся лучом соответственно. Из представленных данных по геометрическим параметрам зон легирования следует, что при поперечных колебаниях лазерного луча производительность процесса возрастает в 2–3 раза по сравнению с легированием расфокусированным лучом. Микротвердость легированных зон порошками Fe–Co–Cr–Mo и Fe–Co–Cr–Mo + 10%TaC составила 520–552 HV и 560–670 HV, что значительно выше, чем материала основы стали 20X13 (260–300 HV).

На рис. 2 и 4 представлены зоны перехода от основы к легированному слою порошками Fe–

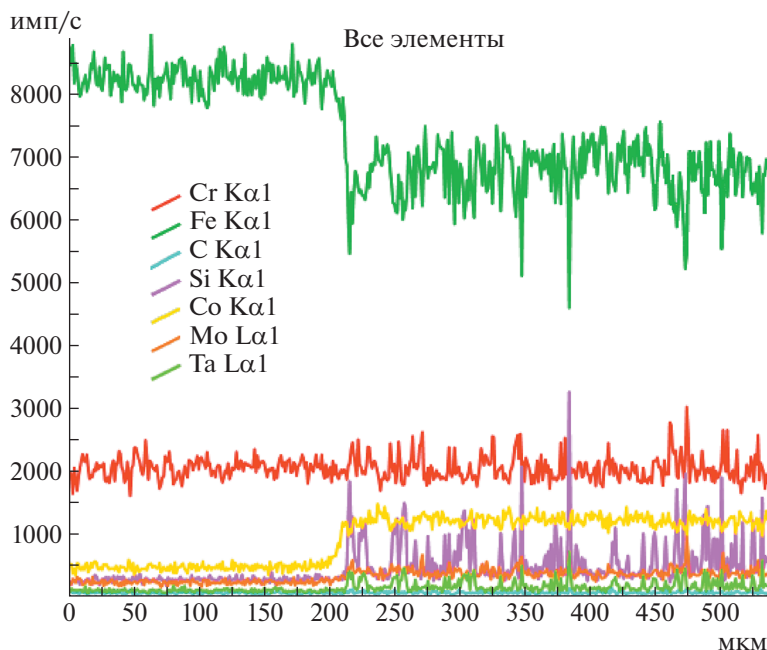


Рис. 3. Результаты элементного анализа основы и зоны легирования порошком Fe–Co–Cr–Mo.

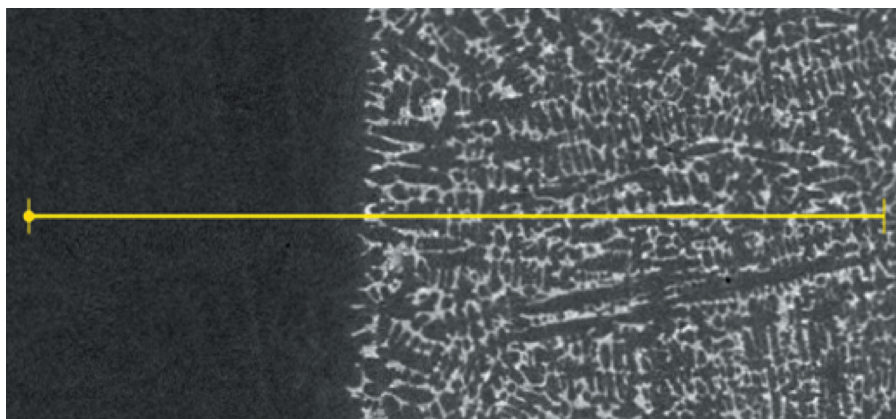


Рис. 4. Зона перехода от основы к легированному слою порошком Fe–Co–Cr–Mo + 10%TaC.

Co–Cr–Mo и Fe–Co–Cr–Mo + 10%TaC соответственно. В них отсутствуют дефекты в виде пор и трещин. Элементный состав материала основы и легированных слоев показан на рис. 3 и 5. Результаты анализа элементного состава свидетельствуют о том, что все легирующие элементы распределены по глубине слоя достаточно равномерно. Количество хрома в легированных слоях не ниже, чем в подложке, но добавка кобальта и молибдена повышает жаропрочность и высокотемпературную коррозионную стойкость модифицирован-

ных слоев, а при введении порошка нано карбида тантала повышается их микротвердость.

Из проведенных триботехнических испытаний следует, что интенсивность изнашивания материала основы стали 20X13 составила  $5.67 \cdot 10^{-9}$ , легированного лазерным лучом с поперечными колебаниями слоя Fe–Co–Cr–Mo и Fe–Co–Cr–Mo + 10%TaC –  $3.83 \cdot 10^{-9}$  и  $2.75 \cdot 10^{-9}$  соответственно. Минимальный коэффициент трения получен при легировании композиционным материалом с добавкой 10%TaC.

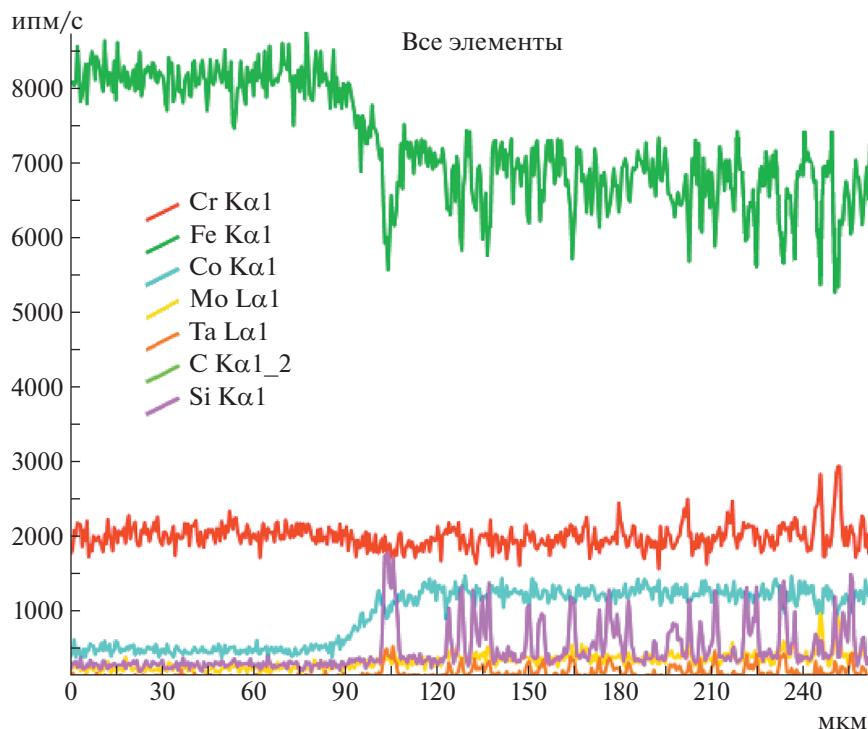


Рис. 5. Результаты элементного анализа основы и зоны легирования порошком Fe—Co—Cr—Mo + 10%TaC.

Лазерное легирование нержавеющей сталей позволит повысить их ресурс работы в экстремальных условиях, при повышенных температурах, в перегретом водяном паре, коррозионно-активных средах и других. Введение нано карбидов тантала способствует не только повышению микротвердости легированных слоев, но и их износостойкости. Процесс лазерного легирования может быть применен при изготовлении лопаток турбин для повышения эрозионной и коррозионной стойкости при высоких температурах их рабочих поверхностей, других деталей, работающих в тяжелых условиях эксплуатации.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технология лазерного легирования нержавеющей сталей для повышения высокотемпературной коррозионной стойкости и износостойкости модифицированных слоев в экстремальных условиях эксплуатации. Полученные легированные слои не имели дефектов в виде трещин и пор. Легирующие элементы распределены равномерно по глубине модифицированных зон. Износостойкость легированных поверхностей значительно выше при введении нано порошка карби-

да тантала, чем без него и превышает материал основы в 2.2 раза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Krishnakumari A., Saravanan M., Sarvesh J. // Lasers Manuf. Mater. Process. 2021. V. 8 (2). P. 201.
2. Lo K.H. et al. // Surf. Coat. Technol. 2003. V. 165 (3). P. 258.
3. Tassin C. et al. // Surf. Coat. Technol. 1995. V. 76–77. P. 450.
4. Lu J.Z. et al. // Surf. Coat. Technol. 2019. V. 369. P. 228.
5. Cheng H.C. et al. // Surf. Coat. Technol. 1996. V. 79 (1–3). P. 67.
6. Kwok C.T., Cheng F.T., Man H.C. // Mater. Sci. Eng. A. 2000. V. 290 (1–2). P. 55.
7. Kwok C.T., Cheng F.T., Man H.C. // Mater. Sci. Eng. A. V. 290 (1–2). P. 74.
8. Chiu K.Y., Cheng F.T., Man H.C. // Mater. Sci. Eng. A. 2005. V. 392 (1–2). P. 348.
9. Sastikumar D et al. // Lasers Eng. 2006. V. 16 (5). P. 447.
10. Betts J.C. // J. Mater. Process. Technol. 2009. V. 209 (11). P. 5229.
11. Majumdar J.D. // Phys. Proc. 2013. V. 41. P. 335.
12. Balla V. K. et al. // Mater. Sci. Eng. 2013. V. 33 (8). P. 4594.

## **Increase High-Temperature Corrosion Resistance and Tribotechnical Properties of Surface Steels During Laser Alloying**

**V. P. Biryukov<sup>1, \*</sup>, A. N. Prince<sup>1</sup>, and A. A. Yakubovsky<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

*\*e-mail: laser-52@yandex.ru*

Received July 11, 2022; revised July 11, 2022; accepted July 18, 2022

**Abstract**—The paper considers the process of laser alloying of stainless steel with iron-based powders containing Fe—Co—Cr—Mo and additives of nano-carbides of tantalum. It is shown that the friction coefficients of modified layers containing TaC are significantly lower, and the wear resistance is higher than without carbides and 2.2 times higher than the base material. It has been found that the performance of laser doping with transverse beam oscillations is 2–3 times higher than when processing with a defocused beam.

**Keywords:** laser alloying, wear resistance, coefficient of friction