

УДК: 621.9.016, 536.331

НАПЛАВЛЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ, СОДЕРЖАЩИХ ТУГОПЛАВКИЕ МЕТАЛЛЫ

© 2024 г. К. И. Олейник^{a, b, *}, И. С. Бахтеев^b, А. С. Русских^a,
Т. В. Осинкина^a, Е. М. Жилина^a

^a Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

^b Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

*e-mail: 1007o1007@gmail.com

Поступила в редакцию 11.10.2023 г.

После доработки 02.11.2023 г.

Принята к публикации 08.11.2023 г.

В работе рассматривается возможность нанесения покрытия Al–Zr–V–Nb в виде порошка с фракцией 0.063 мм и влажностью 0.33%, измеренной с использованием прибора AND MX-50, на подложку из стали 08X18H10. Наплавление проводилось при использовании лазерного комплекса в составе источника лазерного излучения ЛС-5 и робота KUKA KR-60 ha в защитной атмосфере аргона. Продувку газом осуществляли перед процессом наплавления 0.3 с и после 1 с. Для надежного скрепления порошка-покрытия (Al–Zr–V–Nb) с поверхностью материала-основы (сталь 08X18H10) перед наплавлением на сталь была нанесена смесь порошка с поливиниловым спиртом. Согласно данным, полученным на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 40, оптимальный режим наплавления порошка Al–Zr–V–Nb на материал основы соответствует мощности в 250 Вт при скорости обработки 0.5 м/с и толщине покрытия 0.6 мм. При более низкой мощности 230 Вт покрытие не может качественно расплавиться, и в связи с этим, происходит недостаточное проплавление металла основы металлом покрытия (адгезия), вследствие чего наблюдается частичное отслоение. Если же увеличить мощность до 270 Вт, то металл основы и подложки так же отлично взаимодействуют друг с другом и создают прочный монослой покрытия, как и при оптимальном режиме, но при охлаждении, из-за значительной разницы в скоростях охлаждения (пластинка стали 08X18H10 не успевает охлаждаться со скоростью материала покрытия), происходит растрескивание и появление микротрещин. Таким образом, возникает необходимость дальнейшего увеличения числа проходов или же дополнительного оплавления для создания надежного покрытия с отсутствием несплошностей и островков. При этом замеры микротвердости по Виккерсу (HV) при наплавке покрытия Al–Zr–V–Nb показали повышение значений более чем в два раза по сравнению с материалом-основой, что является достаточным основанием для использования порошка Al–Zr–V–Nb в качестве упрочняющего покрытия для стали 08X18H10.

Ключевые слова: лазерная наплавка, наплавочный материал, порошок, тугоплавкий металл, микротвердость, сталь 08X18H10, Al–Zr–V–Nb

DOI: 10.31857/S0235010624010073

ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач промышленности является создание деталей с высокими эксплуатационными свойствами. Для достижения этого могут быть применены различные варианты термической обработки, пластические деформации поверхностей, химико-термическая обработка, создание покрытий и т.д. [1].

В качестве методов получения таких изделий в машиностроении могут быть использованы технологии газотермического напыления, лазерной наплавки, детонационного напыления и дуговой сварки [2–7].

Метод лазерной наплавки является наиболее точным, надежным и производительным для нанесения различных сплавов и получения улучшенных материалов с повышенными прочностными характеристиками [8] и широко используется для уменьшения износа, улучшения механических свойств [9] и повышения коррозионной стойкости поверхности материала [10, 11], продления срока службы (эксплуатационных свойств), а также восстановления изношенных ранее поверхностей [12–14]. Этот процесс имеет ряд преимуществ. Например, он может быть экономически целесообразен при производстве или ремонте в таких отраслях, как сельское хозяйство, газовая промышленность, энергетика и др.

Развитие методов наплавки привело к разработке и исследованию высокоэффективных наплавочных материалов [1, 15]. Важнейшим фактором, влияющим на свойства и производительность наплавленных компонентов, является выбор сплава покрытия и основного сплава [16, 17].

В связи с высокой микротвердостью, наличием повышенных характеристик износостойкости и коррозионной стойкости данное покрытие может применяться для нанесения на поверхность деталей, машин и инструментов, в которых данные физико-химические и механические свойства имеют приоритетное значение [18, 19].

Кроме этого, выбор четырехкомпонентного сплава был обусловлен желанием проверить возможности наплавки тугоплавкого материала на подложку из стали, рассмотреть распределение компонентов на границе подложка–сплав, исследовать диффузию компонентов в материал подложки.

Широко известно, что тугоплавкие сплавы обладают высокой прочностью и микротвердостью [20–24], а также некоторой коррозионной стойкостью [25, 26], которая необходима для получения надежных и долговечных покрытий. Работа направлена на исследование возможности наплавки тугоплавкого сплава Al–Zr–V–Nb на подложку из стали. Тугоплавкие сплавы, содержащие цирконий, ванадий и ниобий, позволяют покрытию выдерживать нагрузки при высоких температурах, повышают микротвердость материала и имеют хорошее сплавление (адгезию материала основы и материала покрытия) [27].

МЕТОДИКА

Материалом-основой была взята сталь 08X18H10, выступающая подложкой с размером 50x50x1 мм. Материалом покрытия выступал сплав Al–Zr–V–Nb, полученный методом алюминотермического восстановления из оксидов [28, 29], предварительно измельченный в вибрационном истирателе. Размер фракции и однородность полученного порошка определяли с помощью сита с размером ячейки 0.063 мм. На приборе AND MX-50 производили определение влажности порошка, которая составила 0.33%. Толщина насыпанного слоя, которая составляла 0.8 мм, контролировалась вставными пластинами, помещенными сверху металла-основы и имеющими вырез под зону обработки (диаметр выреза 32 мм). Продувку производили перед наплавлением – 0.3 с и после наплавки – 1 с аргоном

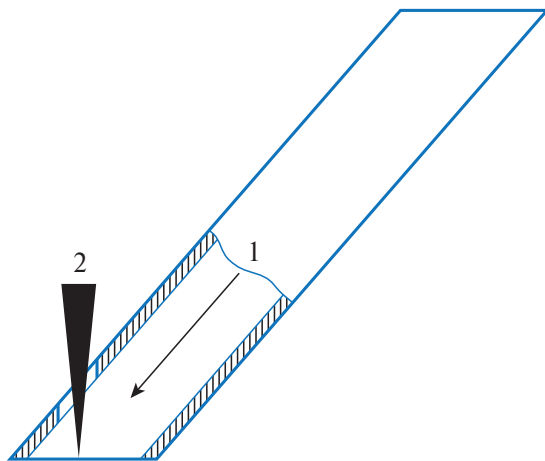


Рис. 1. Система защиты путем подачи защитного газа (1 — аргона) при работе лазерного излучателя (2) с материалом покрытия (порошок Al—Zr—V—Nb).

высшего сорта (ГОСТ 10157-2016) с чистотой 99.993%. В зону обработки подавался поток аргона, выполненный по схеме (рис. 1).

Расход газа составлял от 8 до 10 л/мин. Для скрепления порошка с материалом основой (сталь 08X18H10) перед наплавлением на сталь была нанесена смесь из поливинилового спирта и порошка Al—Zr—V—Nb. Для наплавления был использован лазерный комплекс (рис. 2) с источником лазерного излучения ЛС-5 и роботом KUKA KR-60 ha.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Сделано три прохода по одному слою при наплавлении порошка Al—Zr—V—Nb на сталь 08X18H10 (рис. 3.) с различными режимами обработки (табл. 1). Время перенастройки оборудования на новую позицию составляло около 5 мин. Влияние зоны термического воздействия не учитывалось, так как с учетом высоких скоростей обработки ширина соответствует наплавленному слою (величина погонной энергии была минимальна).

Оценку качества наплавления проверяли на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 40. Полученные результаты представлены на рис. 4.

Из рис. 4а видно, что в связи с недостаточной мощностью лазера термическая зона покрытия была недостаточно хорошо сформирована и при подготовке шлифа произошло отрывание наплавляемого порошка от стали, что показывает необходимость увеличения интенсивности подаваемого на металл лазерного излучения (мощности).

Из рис. 4б можно сделать вывод, что наплавление прошло успешно. По расположению порошка на металле-основе видна необходимость дальнейшего увеличения количества числа проходов или необходимость в процессе оплавления для создания надежного покрытия с отсутствием несплошностей и островков.

На рис. 4в хорошо просматривается наличие монослоя, а также растрескивание, которое произошло из-за различных скоростей охлаждения и высоких внутренних напряжений.

Замеры микротвердости по Виккерсу (рис. 5) проводились с усилием 5 г, продолжительность нагрузки составляла 10 с. Экспериментальные данные о химическом составе материала основы, порошка, а также образцов покрытия для второго и третьего прохода

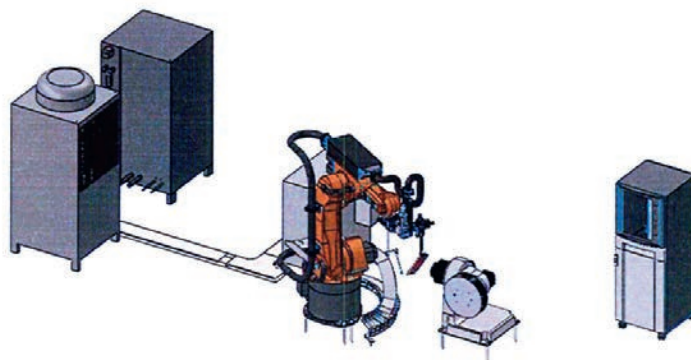


Рис. 2. Общий вид лазерного комплекса.

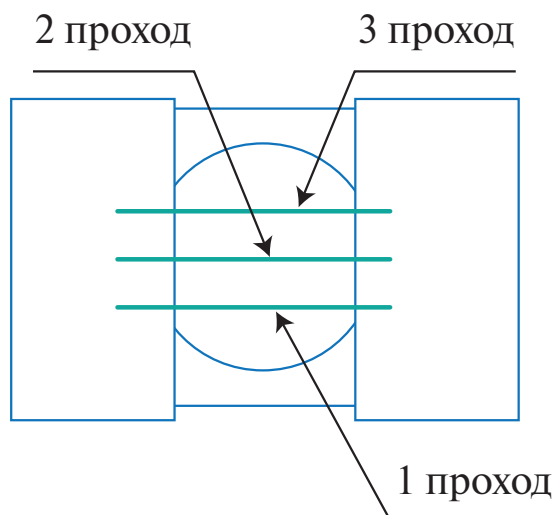


Рис. 3. Схематический чертеж расположения проходов при наплавлении

Таблица 1. Режимы обработки наплавлением порошка Al–Zr–V–Nb на сталь 08X18H10

Показатель	1-й проход	2-й проход	3-й проход
Мощность, Вт	230	250	270
Скорость обработки, м/с	0.5		
Толщина покрытия, мм	0.6		
Изменение фокусного расстояния ($f = 200$ мм), мм	0	5	

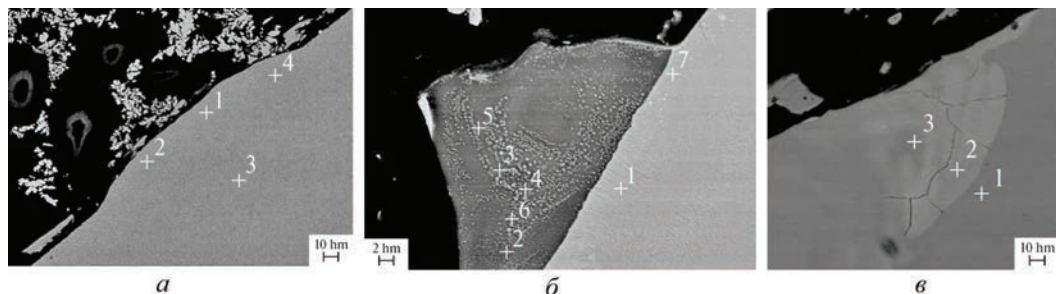


Рис. 4. Микроструктура покрытия Al–Zr–V–Nb по сечению для проходов: *а* — первого, *б* — второго, *в* — третьего. Цифрами изображены места измерения химического состава.

представлены в табл. 2. Данные для образца покрытия при первом проходе не указаны ввиду отсутствия контакта с материалом подложки.

Значения микротвердости материала-основы и материала-наплавки в первом и втором режиме незначительно отличались друг от друга, так как один наплавленный слой не может обеспечить полного покрытия всего металла-основания монослоем Al–Zr–V–Nb. При третьем режиме видно значительное увеличение микротвердости покрытия, аналогичный результат мог получиться и на второй дорожке с покрытием при нанесении большего количества слоев.

Визуальное изображение отпечатков, полученных при измерении микротвердости методом Виккерса, представлено на рис. 5.

Из рисунка 5*а* видно, что при всех трех проходах на поверхности наблюдается сформированная зона наплавления, в зоне III находится значительное количество микротрещин, которые невозможно обнаружить без значительного увеличения.

На рисунке 5*б* представлено увеличенное изображение образцов. Видно, что в некоторых точках зоны I и II площади отпечатка индентора минимальны, это может быть связано с частичной диффузией материала покрытия в материал подложки. Точные численные значения экспериментальных результатов по определению микротвердости методом Виккерса представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что наиболее высокие значения микротвердости получены в III области, среднее значение $HV = 443$, в то время как в I и II зонах $HV = 239$. Из этого следует необходимость увеличения количества слоев или применение процесса оплавления для более значительного упрочнения и, тем самым, повышения прочностных характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования определен оптимальный режим наплавления порошка Al–Zr–V–Nb на материал основы (сталь 08X18H10). Он соответствует мощности в 250 Вт при скорости обработки 0.5 м/с и толщине покрытия 0.6 мм. Полученные данные по микротвердости показали, что при наплавке покрытия Al–Zr–V–Nb конечная микротвердость может повышаться более чем в два раза по сравнению с материалом-основой.

Высокая температура плавления материала покрытия позволит использовать полученный образец при более высоких температурах, чем материал подложки без покрытия. Результаты работы указали на необходимость дальнейшего увеличения числа проходов

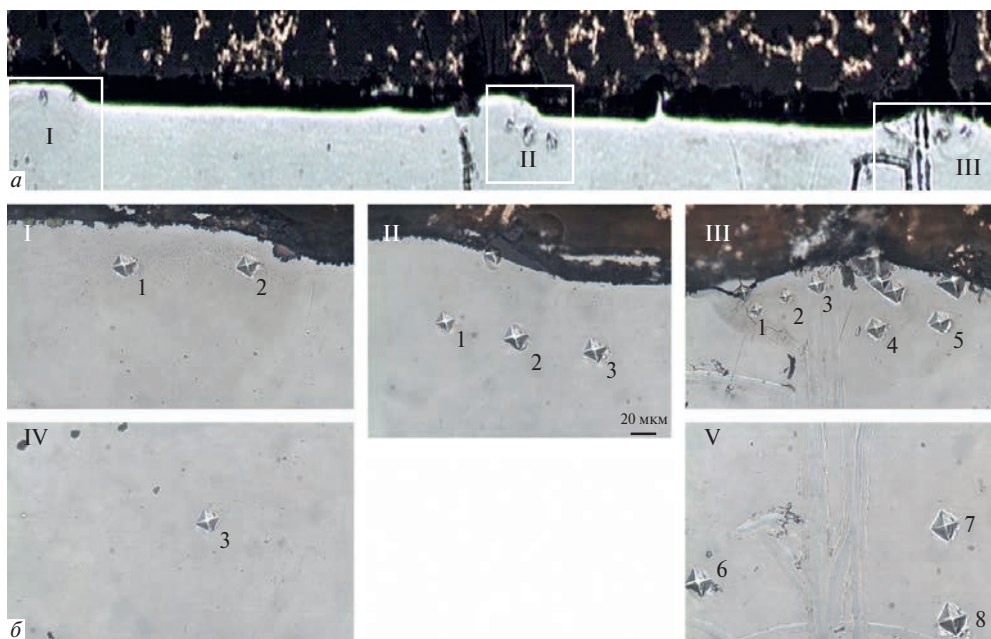


Рис. 5. Расположение точек измерения микротвердости: *a* — общий вид, *б* — увеличенное изображение (I, II, III — нумерация наплавов, IV, V — нумерация материала-основы, 1–8 — отпечатки индентора).

Таблица 2. Химический состав материала основы и покрытий

Элемент	Сталь 08X18H10	Порошок для покрытия	Покрытие при режиме 1	Покрытие при режиме 2	Покрытие при режиме 3
	Атомный %				
Al	—	59.42	—	70.55	16.05
Zr		9.19		25.29	5.37
Nb		12.67		3.17	8.25
V		18.71		0.99	9.13
Cr	16.16	—	16.86	16.5	10.44
Mn	7.97		7.35	7.61	5.04
Fe	75.86		75.79	75.83	45.68

Таблица 3. Значение микротвердости материала основы и покрытий по методу Виккерса (HV)

Нумерация наплавов	Материал	Номер отпечатка индентора	Значение микротвердости (HV)
I	Покрытие	1, 2	168, 310
	Основа	3	251
II	Покрытие	1, 2, 3	317, 201, 201
	Основа	-	—
III	Покрытие	1, 2, 3, 4, 5	677, 644, 345, 286, 262
	Основа	6, 7, 8	192, 185, 188

или применение процесса оплавления для создания надежного покрытия с отсутствием несплошностей и островков.

Работа выполнена по Государственному заданию ИМЕТ УрО РАН с использованием оборудования ЦКП “Урал-М”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девойно О.Г., Кардаполова М.А. и др. Технология формирования износостойких покрытий на железной основе методами лазерной обработки. Вып. БНТУ. Минск, 2020.
2. Chen J.H., Chen P.N., Lin C.M. et al. Microstructure and wear properties of multicomponent alloy cladding formed by gas tungsten arc welding (GTAW) // *Surf. Coatings Technol.* 2009. **203**. № 20–21. P. 3231–3234.
3. Sethi A.K. Studies on hard surfacing of structural steel by gas thermal spraying process // *Materials Today: Proceedings*. 2020. **21**. P. 1436–1440.
4. Furman E.L., Usoltsev E.A., Bakhteev I.S. et al. Effect of laser heat treatment on structure and wear resistance of cobalt stellite // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. **1396**. № 1. P. 12016.
5. Momin A.G., Khatri B.C., Chaudhari M. et al. Parameters for cladding using plasma transfer arc welding — A critical // *Materials Today: Proceedings*. 2023. **77**. P. 614–618.
6. Ulianitsky V.Y., Korchagin M.A., Gavrilov A.I. et al. FeCoNiCu Alloys obtained by detonation spraying and spark plasma sintering of high-energy ball-milled powders // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2022. **31**. № 4. P. 1067–1075.
7. Ulianitsky V.Y., Rybin D.K., Ukhina A.V. et al. Structure and composition of Fe–Co–Ni and Fe–Co–Ni–Cu coatings obtained by detonation spraying of powder mixtures // *Materials Letters*. 2021. **290**. P. 129498.
8. Lv Y., Lei L., Sun L., Cui B. Improvement of the wear resistance of 20CrMnTi steel gear by discrete laser surface melting // *Optics and Laser Technology*. 2023. **165**. № 1. P. 109598.
9. Bukhari S., Husnain N., Siddiqui F. et al. Effect of laser surface remelting on microstructure, mechanical properties and tribological properties of metals and alloys: A review // *Optics and Laser Technology*. 2023. **165**. P. 109588.
10. Kalainathan S., Sathyajith S., Swaroop S. Effect of laser shot peening without coating on the surface properties and corrosion behavior of 316L steel // *Optics and Lasers in Engineering*. 2012. **50**. № 12. P. 1740–1745.
11. Qiao Q., Cristino V., Tam L., Kwok C. Corrosion properties of Ti–Ni–Cu coatings fabricated by laser surface alloying // *Corrosion Science*. 2023. **222**. P. 111426.
12. Xiao Y., Sun C., Wu X. et al. Restoration of pure copper motor commutator for aviation by laser powder deposition // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. **23**. P. 5796–5806.

13. Cosma C., Moldovan M., Simion M., Balci N. Impact of laser parameters on additively manufactured cobalt-chromium restorations // *Journal of Prosthetic Dentistry*. 2022. **128**. № 3. P. 421–429.
14. Savinkin V.V., Kolisnichenko S.N., Kuznetsova V.N. et al. Substantiation of the optimal mix of multi-component pulverulent composition used for laser restoration // *Materials Chemistry and Physics*. 2023. **295**. № December 2022. P. 127208.
15. Rodríguez Ripoll M., Ojala N., Katsich C. et al. The role of niobium in improving toughness and corrosion resistance of high speed steel laser hardfacings // *Materials and Design*. 2016. **99**. № 6. P. 509–520.
16. Madadi F., Shamanian M., Ashrafizadeh F. Effect of pulse current on microstructure and wear resistance of Stellite6/tungsten carbide claddings produced by tungsten inert gas process // *Surface and Coatings Technology*. 2011. **205**. № 17–18. P. 4320–4328.
17. Abed H., Malek Ghaini F., Shahverdi H. Characterization of $\text{Fe}_{49}\text{Cr}_{18}\text{Mo}_7\text{B}_{16}\text{C}_4\text{Nb}_6$ high-entropy hardfacing layers produced by gas tungsten arc welding (GTAW) process // *Surface and Coatings Technology*. 2018. **352**. P. 360–369.
18. Wang M., Ma Z., Xu Z., Cheng X. Designing V_xNbMoTa refractory high-entropy alloys with improved properties for high-temperature applications // *Scripta Materialia*. 2021. **191**. P. 131–136.
19. Pang J., Zhang H., Zhang L. et al. A ductile $\text{Nb}_{40}\text{Ti}_{35}\text{Al}_{15}\text{V}_{10}\text{Ta}_5\text{Hf}_3\text{W}_2$ refractory high entropy alloy with high specific strength for high-temperature applications // *Materials Science and Engineering: A*. 2022. **831**. P. 142290.
20. Ларионов А.В., Таранов Д.В., Рылов А.Н. и др. Разработка технологии получения и апробация нового азоти углеродсодержащего прекурсора на основе ванадия и алюминия для выплавки лигатуры V–Al–N–C // *Перспективные материалы*. 2023. **5**. С. 56–65.
21. Гуляева Р.И., Пикулин К.В., Мансурова А.Н. и др. Фазообразование при алюминотермическом восстановлении титана из его оксидов со структурами анатаза и рутила // *Неорганические материалы*. 2023. **59**. № 2. С. 139–149.
22. Larionov A.V., Pikulin K.V., Zhidovinova S.V., Udoyeva L.Y. Yttrium effect on the structural-phase state in situ of Mo — 15.3 V — 10.5 Si composite // *Perspektivnye Materialy*. 2020. **7**. P. 19–28.
23. Pérez R.J., Massih A.R. Thermodynamic evaluation of the Nb–O–Zr system // *Journal of Nuclear Materials*. 2007. **360**. № 3. P. 242–254.
24. Демиров А.П., Сергеев В.С., Блинков И.В. и др. Термическая стабильность и электрохимическое поведение arc-PVD покрытий Ti–Al–Mo–Ni–N // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2020. **56**. № 2. С. 181–185.
25. Осипенко М.А., Харитонов Д.С., Макарова И.В. и др. Изучение коррозионного поведения модифицированных анодно-оксидных покрытий на сплаве алюминия АД31 // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2021. **57**. № 3. С. 312–321.
26. Карфилов Э.А., Русанов Б.А., Сидоров В.Е. и др. Коррозионно-электрохимическое поведение аморфных сплавов Al–Ni–Co–Nd // *Расплавы*. 2022. № 2. С. 189–195.
27. Кайбичев А.В., Кайбичев И.А. Межэлектродный перенос элементов расплава Fe–Al (50 мас. %) в электрическом поле // *Расплавы*. 2022. № 2. С. 214–220.
28. Zhilina E.M., Russkikh A.S., Krasikov S.A. et al. Synthesis of high-entropy alloy AlTiZrVNb by aluminothermic reaction // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2022. **67**. № 6. P. 888–891.
29. Balakirev V.F., Osinkina T.V., Krasikov S.A. et al. Joint metallothermic reduction of titanium and rare refractory metals of group V // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021. **62**. № 2. P. 190–196.

HARDFACING OF MULTICOMPONENT ALLOYS CONTAINING REFRACTORY METALS

Oleinik K.I.^{1,2}, Bakhteev, I. S.², Russkih A.S.¹, Osinkina T.V.¹, Zhilina E.M.¹

¹*Institute of Metallurgy, Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia.*

²*Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia*

The paper considers the possibility of coating Al–Zr–V–Nb in the form of a powder with a fraction of 0.063 mm and a humidity of 0.33%, measured using the AND MX-50 device, on a substrate made of 08Cr18Ni10 steel. The deposition was carried out using a laser complex consisting of a laser radiation source LS-5 and a robot KUKA KR-60 ha in a protective argon atmosphere. Gas purging was carried out before the deposition process of 0.3 s and after 1 s. For reliable bonding of the coating powder (Al–Zr–V–Nb) with the surface of the base material (Steel 08Cr18Ni10), a mixture of powder with polyvinyl alcohol was applied to the steel before deposition. According to the data obtained on the Carl Zeiss EVO 40 scanning electron microscope, the optimal mode of deposition of Al–Zr–V–Nb powder on the base material corresponds to a power of 250 Watts at a processing speed of 0.5 m/s and a coating thickness of 0.6 mm. At a lower power of 230 W, the coating cannot melt qualitatively and, in this regard, insufficient penetration of the base metal by the coating metal (adhesion) occurs, resulting in partial detachment. If the power is increased to 270 W, then the base metal and the substrate interact with each other just as well and create a strong monolayer of the coating, as in the optimal mode, but when cooling, due to a significant difference in cooling speeds (the 08Cr18Ni10 steel plate does not have time to cool at the speed of the coating material), cracking occurs and the appearance of microcracks. Thus, there is a need to further increase the number of passes or an additional melting process to create a reliable coating with no discontinuities and islands. At the same time, measurements of Vickers microhardness (HV) during surfacing of the Al–Zr–V–Nb coating showed an increase in HV values by more than two times compared to the base material, which is a sufficient reason for using Al–Zr–V–Nb powder as a strengthening coating for 08Cr18Ni10 steel).

Keywords: laser cladding, hardfacing, surfacing material, powder, refractory metals, microhardness, steel 08Cr18Ni10

REFERENCE

1. Devojno O. G., Kardapolova M.A., Kalinichenko A.S., Zharskij V.V., Vasilenko A.G. *Texnologiya formirovaniya iznosostojkix pokry'tij na zheleznoj osnove metodami lazernoj obrabotki* [Technology of formation of wear-resistant coatings on an iron base using laser processing methods]. Minsk, 2020. [In Russian].
2. Chen J.H., Chen P.N., Lin C.M. et al. Microstructure and wear properties of multicomponent alloy cladding formed by gas tungsten arc welding (GTAW) // *Surf. Coatings Technol.* 2009. **203**. № 20–21. P. 3231–3234.
3. Sethi A.K. Studies on hard surfacing of structural steel by gas thermal spraying process // *Materials Today: Proceedings.* 2020. **21**. P. 1436–1440.
4. Furman E.L., Usoltsev E.A., Bakhteev I.S. et al. Effect of laser heat treatment on structure and wear resistance of cobalt stellite // *Journal of Physics: Conference Series.* 2019. **1396**. № 1. P. 12016.
5. Momin A.G., Khatri B.C., Chaudhari M. et al. Parameters for cladding using plasma transfer arc welding — A critical // *Materials Today: Proceedings.* 2023. **77**. P. 614–618.

6. Ulianitsky V.Y., Korchagin M.A., Gavrilov A.I. et al. FeCoNiCu Alloys obtained by detonation spraying and spark plasma sintering of high-energy ball-milled powders // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2022. **31**. № 4. P. 1067–1075.
7. Ulianitsky V.Y., Rybin D.K., Ukhina A.V. et al. Structure and composition of Fe–Co–Ni and Fe–Co–Ni–Cu coatings obtained by detonation spraying of powder mixtures // *Materials Letters*. 2021. **290**. P. 129498.
8. Lv Y., Lei L., Sun L., Cui B. Improvement of the wear resistance of 20CrMnTi steel gear by discrete laser surface melting // *Optics and Laser Technology*. 2023. **165**. № 1. P. 109598.
9. Bukhari S., Husnain N., Siddiqui F. et al. Effect of laser surface remelting on microstructure, mechanical properties and tribological properties of metals and alloys: A review // *Optics and Laser Technology*. 2023. **165**. P. 109588.
10. Kalainathan S., Sathyajith S., Swaroop S. Effect of laser shot peening without coating on the surface properties and corrosion behavior of 316L steel // *Optics and Lasers in Engineering*. 2012. **50**. № 12. P. 1740–1745.
11. Qiao Q., Cristino V., Tam L., Kwok C. Corrosion properties of Ti–Ni–Cu coatings fabricated by laser surface alloying // *Corrosion Science*. 2023. **222**. P. 111426.
12. Xiao Y., Sun C., Wu X. et al. Restoration of pure copper motor commutator for aviation by laser powder deposition // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. **23**. P. 5796–5806.
13. Cosma C., Moldovan M., Simion M., Balc N. Impact of laser parameters on additively manufactured cobalt-chromium restorations // *Journal of Prosthetic Dentistry*. 2022. **128**. № 3. P. 421–429.
14. Savinkin V.V., Kolisnichenko S.N., Kuznetsova V.N. et al. Substantiation of the optimal mix of multi-component pulverulent composition used for laser restoration // *Materials Chemistry and Physics*. 2023. **295**. № December 2022. P. 127208.
15. Rodríguez Ripoll M., Ojala N., Katsich C. et al. The role of niobium in improving toughness and corrosion resistance of high speed steel laser hardfacings // *Materials and Design*. 2016. **99**. № 6. P. 509–520.
16. Madadi F., Shamanian M., Ashrafizadeh F. Effect of pulse current on microstructure and wear resistance of Stellite6/tungsten carbide claddings produced by tungsten inert gas process // *Surface and Coatings Technology*. 2011. **205**. № 17–18. P. 4320–4328.
17. Abed H., Malek Ghaini F., Shahverdi H. Characterization of Fe₄₉Cr₁₈Mo₇B₁₆C₄Nb₆ high-entropy hardfacing layers produced by gas tungsten arc welding (GTAW) process // *Surface and Coatings Technology*. 2018. **352**. P. 360–369.
18. Wang M., Ma Z., Xu Z., Cheng X. Designing V_xNbMoTa refractory high-entropy alloys with improved properties for high-temperature applications // *Scripta Materialia*. 2021. **191**. P. 131–136.
19. Pang J., Zhang H., Zhang L. et al. A ductile Nb₄₀Ti₂₅Al₁₅V₁₀Ta₅Hf₃W₂ refractory high entropy alloy with high specific strength for high-temperature applications // *Materials Science and Engineering: A*. 2022. **831**. P. 142290.20.
20. Larionov A.V., Taranov D.V., Ry'lov A.N. et al. Razrabotka tekhnologii polucheniya i aprobatsiya novogo azoti uglerodsoderzhashhego prekursora na osnove vanadiya i alyuminiya dlya vyplavki ligatury V–Al–N–C [Development of technology for the production and testing of a new nitrogen and carbon-containing precursor based on vanadium and aluminum for smelting V–Al–N–C master alloy] // *Perspektivnye materialy*. 2023. **5**. P. 56–65. [In Russian].
21. Gulyaeva R.I., Pikulin K.V., Mansurova A.N. et al. Fazoobrazovanie pri alyuminotermicheskom vosstanovlenii titana iz ego oksidov so strukturami anataza i rutila [Phase formation during aluminothermal reduction of titanium from its oxides with anatase and rutile structures] // *Neorganicheskie materialy*. 2023. **59**. № 2. P. 139–149. [In Russian].
22. Larionov A.V., Pikulin K.V., Zhidovinova S.V., Udova L.Y. Yttrium effect on the structural-phase state in situ of Mo – 15.3 V – 10.5 Si composite // *Perspektivnye Materialy*. 2020. **7**. P. 19–28.
23. Pérez R.J., Massis A.R. Thermodynamic evaluation of the Nb–O–Zr system // *Journal of Nuclear Materials*. 2007. **360**. № 3. P. 242–254.
24. Demirov A.P., Sergevnn V.S., Blinkov I.V. et al. Termicheskaya stabil'nost' i elektroximicheskoe povedenie arc-PVD pokrytij Ti–Al–Mo–Ni–N [Thermal stability and electrochemical behavior of

- arc-PVD coatings Ti–Al–Mo–Ni–N] // Fizikoximiya poverxnosti i zashhita materialov. 2020. **56**. № 2. P. 181–185. [In Russian].
25. Osipenko M.A., Xaritonov D.S., Makarova I.V. et al. Izuchenie korrozionnogo povedeniya modifitsirovannykh anodno-oksidnykh pokrytij na splave alyuminiya Ad31 [Study of corrosion behavior of modified anodic-oxide coatings on ad31 aluminum alloy] // Fizikoximiya poverxnosti i zashhita materialov. 2021. **57**. № 3. P. 312–321. [In Russian].
26. Karfidov E.A., Rusanov B.A., Sidorov V.E. et al. Korrozionno-elektroximicheskoe povedenie amorfnykh splavov Al–Ni–Co–Nd [Corrosion-electrochemical behavior of amorphous Al–Ni–Co–Nd alloys] // Rasplavy. 2022. № 2. P. 189–195. [In Russian].
27. Kajbichev A.V., Kajbichev I.A. Mezhelektroodnyj perenos elementov rasplava Fe–Al (50 mas. %) v elektricheskom pole [Interelectrode transfer of Fe–Al melt elements (50 wt %) in an electric field] // Rasplavy. 2022. № 2. P. 214–220. [In Russian].
28. Zhilina E.M., Russkikh A.S., Krasikov S.A. et al. Synthesis of high-entropy alloy AlTiZrVNb by aluminothermic reaction // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2022. **67**. № 6. P. 888–891.
29. Balakirev V.F., Osinkina T.V., Krasikov S.A. et al. Joint metallothermic reduction of titanium and rare refractory metals of group V // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2021. **62**. № 2. P. 190–196.