

Научная статья

УДК 621.791.011

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30404>



Г.М. Михайловский <sup>✉</sup>, В.В. Нгуен, П.К. Захаров

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Иркутск, Россия

<sup>✉</sup> [dog7820038@gmail.com](mailto:dog7820038@gmail.com)

## ФОРМИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ СЛОЕВ ДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРШКОВЫХ ПРОВОЛОК

*Аннотация.* Проблема повышения износостойкости деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания, является очень важной на сегодняшний день. Существует большое количество технологий и систем легирования, применяемых для создания износостойких слоев. Перспективной технологией с точки зрения производительности и получения слоев наплавки большой толщины является наплавка с использованием порошковых проволок. В статье рассмотрено формирование слоев с использованием порошковых проволок, с последующим исследованием микроструктуры, микротвердости и проведением рентгеноструктурного анализа. Результаты показывают, что применение наплавки в среде защитных газов и порошковых проволок позволяет получать качественные покрытия без поверхностных дефектов в виде трещин и пор. Также данные микроструктуры показывают, что при наплавке проволокой ПП-НП80Х20Р3Т происходит формирование дендритной структуры с карбидами хрома по границам зерен, а также для слоев выполненных с проволокой ПП-НП80Х20Р3Т характерно наибольшее значение твердости по сравнению с другими проволоками рассматриваемыми в данной работе.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, карбид хрома, микротвердость, износостойкие покрытия, мартенсит.

*Для цитирования:*

Михайловский Г.М., Нгуен В.В., Захаров П.К. Формирование износостойких слоев дуговой наплавкой с использованием порошковых проволок // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 4. С. 53–64. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30404>



G.M. Mihailovskiy ✉, V.V. Nguyen, P.K. Zakharov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

✉ [dog7820038@gmail.com](mailto:dog7820038@gmail.com)

## FORMATION OF WEAR-RESISTANT LAYERS BY ARC WELDING USING FLUX-CORED WIRES

*Abstract.* The problem of increasing the wear resistance of parts operating under conditions of abrasive wear is very important today. There are many technologies and alloying systems used to create wear-resistant layers. A promising technology in terms of productivity and obtaining thick surfacing layers is arc welding using flux-cored wires. The article discusses the formation of layers using flux-cored wires, followed by the study of microstructure, microhardness, and X-ray diffraction analysis. The results show that the use of arc welding in shielding gases and flux-cored wires allows one to obtain high-quality coatings without surface defects such as cracks and pores. Also, microstructure data show that when arc welding performs with ПП-НП80Х20Р3Т wire, a dendritic structure with chromium carbides is formed along the grain boundaries, and layers made with ПП-НП80Х20Р3Т wire are characterized by the highest hardness value compared to other wires considered in this work.

*Keywords:* arc welding, chromium carbide, microhardness, wear-resistant coatings, martensite.

### *Citation:*

Mihailovskiy G.M., Nguyen V.V., Zakharov P.K., Formation of wear-resistant layers by arc welding using flux-cored wires, *Global Energy*, 30 (04) (2024) 53–64, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30404>

**Введение.** На сегодняшний день в областях сельского хозяйства, энергетической, нефтегазовой и атомной промышленности существует необходимость в износостойких покрытиях для повышения долговечности работы изделий и экономически эффективной работы предприятий [1].

Износостойкость как общая характеристика сопротивления изнашиванию является одним из основных факторов, определяющих экономическую эффективность использования машин и изделий данной конфигурации. По причине износа деталей машин происходит ухудшение их функциональных качеств и энергетических показателей работы, снижается производительность, растет вероятность отказа [2].

Так, при эксплуатации изделий наиболее интенсивно изнашиваются поверхностные слои, взаимодействующие с твердыми породами, абразивными частицами, и поэтому свойства поверхностных слоев имеют ключевую роль в сопротивляемости изделий износу [3–5].

Наплавка – важный технологический процесс для получения заданных характеристик материала. Так, например, для деталей сельскохозяйственной промышленности, инструментов и др. возможно повышение длительности работы в 3–8 раз при использовании наплавки [6; 7].

Существуют различные методы для нанесения износостойких слоев: электрохимические процессы плавания, напыление, плавление нанесенных паст с использованием высококонцентрированных источников теплоты, и др. [8–10].

Однако использование технологий наплавки с применением дуговых процессов позволяет получать наплавленные слои большей по сравнению с другими технологиями толщины и ведет к повышению производительности процесса. В работе [14] рассмотрены процессы дуговой наплавки, и выводы, полученные авторами, указывают на то, что наиболее предпочтительными с точки зрения производительности и качества получаемых слоев являются наплавка с использованием

покрытых электродов, наплавка под слоем флюса и наплавка открытой дугой либо с применением защитного газа.

Так, наплавка с использованием порошковой проволоки (Flux Core Arc Welding, FCAW) рассматривается в литературе как технология с высокими показателями производительности и вариативности. Помимо этой, в работах последних лет рассматриваются технологии наплавки с использованием проволок сплошного сечения, с использованием нескольких проволок, что позволяет контролировать химический состав наплавленного металла в течение всего процесса наплавки, технологии с подачей порошка, а также гибридные технологии с использованием второго источника теплоты [11].

На сегодняшний день существует большое количество сплавов, используемых для получения износостойких слоев. Основными группами этих сплавов являются сплавы на основе железа, никеля, кобальта и вольфрама. Однако не железосодержащие сплавы довольно дороги, что ограничивает их применяемость. Так, авторы [15] указывают, что сплавы на основе железа зарекомендовали себя как недорогие материалы, способные конкурировать с более дорогими сплавами на основе кобальта и никеля.

При выполнении износостойких слоев могут использоваться различные системы легирования. Так, авторы [12] указывают, что система легирования Fe-Cr-C дает высокие показатели износостойкости. Авторы [13] рассматривают систему легирования Fe-Cr-C-B, при использовании которой можно получить высокие показатели микротвердости, сопоставимые или большие, чем при использовании добавок Nb. Однако при использовании данной системы легирования возможно повышение хрупкости наплавленного слоя. Авторы [9] указывают, что при наплавке электродами с содержанием марганца 10% при добавке бора 0,3% наблюдается значительное повышение стойкости к кавитационному эрозионному износу по сравнению со сплавом без добавки бора.

В работах [6; 12; 15] указывается, что микротвердость, хоть и является одним из показателей износостойкости, не всегда указывает на наибольшую износостойкость материала. Исходя из этого, в работе [6] авторы указывают, что на износостойкость значительно влияет структура материала, а именно наличие карбидов и твердых фаз, располагающихся в вязкой матрице.

Из проведенного литературного анализа следует, что методы дуговой наплавки являются наиболее эффективными для получения износостойких слоев с высокой производительностью. Формирование микроструктуры с высокой микротвердостью и присутствием твердых фаз имеет первостепенное значение для обеспечения высоких показателей износостойкости материала.

Целью исследования является формирование износостойких слоев на поверхности низкоуглеродистой стали с использованием технологии дуговой наплавки порошковыми проволоками. Для достижения поставленной цели проведены исследования микроструктуры, измерения твердости, определение фазового состава наплавленных слоев.

#### **Материалы и методы исследования**

В качестве основного материала использовалась сталь Ст3сп (ГОСТ 380–2005), с химическим составом: С – 0,14–0,22%; Si – 0,15–0,30%; Mn – 0,4–0,65%. Образцы из Ст3сп были вырезаны в виде пластин размерами 80×50×12 мм и отшлифованы наждачной бумагой до зернистости 1200. Для наплавки использовались порошковые проволоки диаметром 1,6 мм: ПП-НП80Х20Р3Т; ПП-НП30Х4Г2М; ASM 4440-GS. Перед выполнением наплавки проволоки просушивались в шкафу в течение 2-х часов при температуре 150–180°C. Химический состав проволок ПП-НП80Х20Р3Т и ПП-НП30Х4Г2М, согласно ГОСТ 26101-84, а также химический состав проволоки ASM 4440-GS, согласно паспорту, приведены в табл. 1.

Комплекс для выполнения наплавки схематически показан на рис. 1. Основными узлами комплекса являются промышленный робот CRP RH14-10-W и источник питания Megmeet Arsten Plus 400.

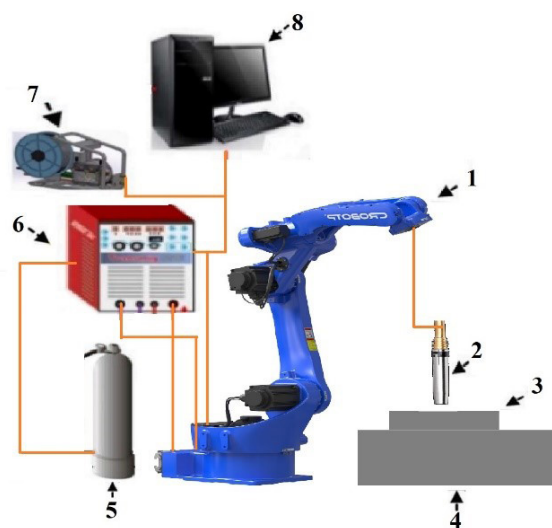


Рис. 1. Схема комплекса для наплавки: 1 – промышленный робот; 2 – сварочная горелка; 3 – основа для наплавки; 4 – сварочный стол; 5 – баллон с защитным газом; 6 – источник питания; 7 – механизм подачи проволоки; 8 – система управления

Fig. 1. Scheme of the welding complex: 1 – industrial robot; 2 – welding torch; 3 – base for welding; 4 – welding table; 5 – cylinder with shielding gas; 6 – power supply; 7 – wire feed mechanism; 8 – control system

Таблица 1

**Химический состав проволоки**

Table 1

**Chemical composition of the wires**

Марка проволоки	Массовая доля элемента, %								
	C	Cr	Mn	Si	Mo	Ti	B	S	P
ПП-НП30Х4Г2М (ГОСТ 26101-84)	0,30– 0,45	3,30– 4,80	1,40– 2,20	0,50–1,00	0,60– 1,00	–	–	0,040	0,040
ПП-НП80Х20Р3Т (ГОСТ 26101-84)	0,50– 1,00	18,00– 23,00	Не более 1,00	Не более 1,00	–	0,10– 0,80	2,70– 3,60	0,040	0,040
ASM 4440-GS	0,4	17,0	0,5	0,6	–	0,5	–	0,040	0,040

Для всех проволок постоянными параметрами были сварочный ток 200 А, напряжение 24 В, скорость сварки 10 мм/с. Данные параметры были подобраны на аппарате для механизированной сварки Logch и являются оптимальными для качественного формирования наплавленного слоя.

Наплавка производилась с использованием газовой смеси  $Ag/CO_2$  82/18. Объем подачи газа 10 л/мин. Наплавка выполнялась в два слоя с охлаждением образцов между слоями до 250–300°C.

После выполнения наплавки образцы вырезались с помощью отрезного станка Discotom-100/-10. Затем отрезанный образец запрессовывали в полимерную смолу прессом Полилаб С50А. Для изучения структуры упрочненных слоев исследованы сечения образца, перпендикулярные поверхности слоя и направлению перемещения наплавки. Полирование проведено с использованием алмазных суспензий с зернистостью (9 мкм, 6 мкм и 3 мкм).

Заключительная операция полирования выполнена на сукне, смоченном водным раствором с частицами оксида кремния размером 1 мкм. Поверхность исследуемого образца считается готовой после полирования, если она становится плоской, блестящей и не имеет царапин от



Рис. 2. Образцы после дуговой наплавки порошковыми проволоками:  
а – ПП-НП30Х4Г2М; б – ПП-НП80Х20Р3Т; в – ASM 4440-GS

Fig. 2. Samples after arc welding with flux-cored wires:  
a – ПП-НП30Х4Г2М; б – ПП-НП80Х20Р3Т; в – ASM 4440-GS

шлифования. Для выявления микроструктуры подготовленного образца после полирования был использован раствор ( $\text{HNO}_3/\text{HCl} = 1:3$ ). Для снятия и обработки изображений микроструктуры исследуемого образца использовались камера и программное обеспечение Tour View.

Микроструктура полученного наплавленного слоя исследовалась на микроскопе MET-2 при увеличениях в диапазоне от  $\times 50$  до  $\times 1000$  в режиме светлого поля.

Исследование фазового состава покрытий после плазменной наплавки проводилось на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000 с использованием  $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Образцы сканировали в режиме пошагового сканирования в диапазоне  $5\text{--}85^\circ$  с шагом  $5^\circ$  при 40 кВ и 40 мА. Для определения макротвердости использовался твердомер ТК-2М. Для определения микротвердости использовался микротвердомер Shimadzu HNV-2Т с системой автоматического считывания размеров отпечатков. Измерение микротвердости проводилось под нагрузкой 988 мН (HV0.1), время выдержки 5 с. По каждому образцу была сделана кривая распределения микротвердости по глубине.

### Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены образцы после дуговой наплавки в среде защитного газа порошковыми проволоками. Поверхность образцов имеет характерные следы наплавки в виде волнистых линий (или валиков), которые образовались при наложении порошковых проволок на поверхность. Видны темные участки с незначительными дефектами, такими как поры или включения, однако крупных трещин не наблюдается.

На поверхности присутствуют темные и светлые области, а также общая высокая шероховатость, характерные для слоев выполняемых с использованием дуговых процессов наплавки. Однако на поверхности не наблюдается трещин и пористости, из чего можно сделать вывод, что использование порошковых проволок с дополнительной газовой защитой позволяет формировать покрытия без дефектов.

На рис. 3 представлена микроструктура поверхностного слоя после дуговой наплавки порошковой проволокой ПП-НП30Х4Г2М. Видно, что поверхностный слой состоит из нескольких характерных слоев. Верхний слой характеризуется мелкозернистой структурой, что типично для наплавленного слоя после быстрого охлаждения. В области, расположенной ближе к наплавленной зоне, где длительность охлаждения была больше, наблюдалось увеличение размера зерен. Это происходит в результате рекристаллизации и роста зерен под воздействием тепла. Зерна в этой области имеют более крупный размер и округлую форму по сравнению с основной матрицей. Результаты рентгенограммы (рис. 4) показали, что в поверхностном слое после дуговой наплавки присутствует мартенсит, т.е. пересыщенный твердый раствор углерода в системе  $\alpha\text{-(Fe, Cr)}$ .



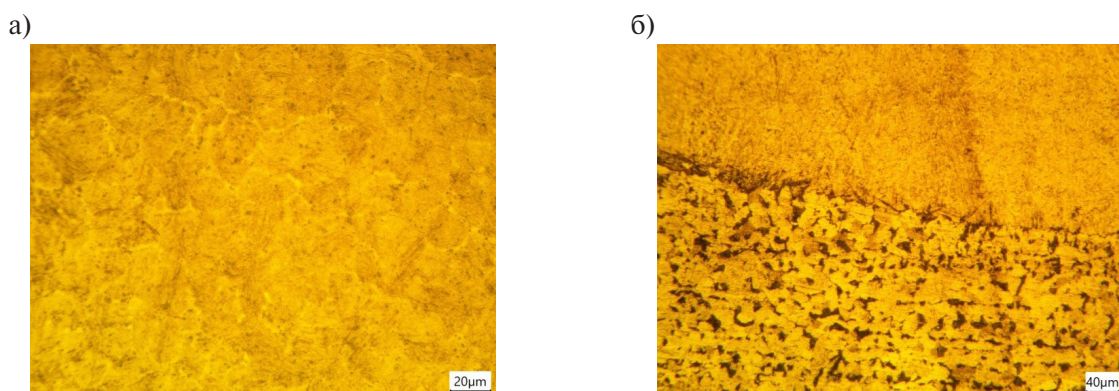


Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя после дуговой наплавки ПП-НП30Х4Г2М:  
а – верхний слой; б – линия сплавления с основным металлом

Fig. 3. Microstructure of the surface layer after arc welding with ПП-НП30Х4Г2М:  
a – top layer; b – fusion line with the base metal

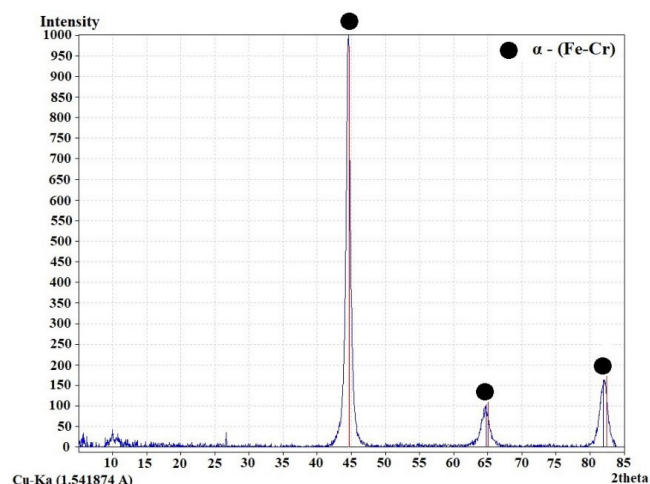


Рис. 4. Рентгенограмма образца после дуговой наплавки ПП-НП30Х4Г2М

Fig. 4. X-ray image of the sample after arc welding with ПП-НП30Х4Г2М

В процессе плавления железа и хрома при высоких температурах, обычно превышающих 1500°С, атомы хрома растворяются в расплаве железа, образуя однородную жидкую фазу. В этом состоянии атомы хрома и железа свободно перемещаются в расплаве. При охлаждении расплава происходит кристаллизация железа, в результате которой атомы хрома замещают атомы железа в кристаллической решетке, образуя твердый раствор замещения  $\alpha$ -(Fe,Cr).

На рис. 5 представлена микроструктура поверхностного слоя после дуговой наплавки порошковой проволокой ПП-НП80Х20Р3Т. По всей глубине покрытия наблюдается рост дендритных структур. Дендриты расположены беспорядочно, что характерно для процесса быстрого охлаждения при дуговой наплавке. Линия сплавления четко видна между наплавленным слоем и основным металлом. В переходной зоне между наплавленным слоем и основным металлом отсутствуют дефекты в виде микротрещин и пор. Рядом с линией сплавления расположена зона термического влияния (ЗТВ), для которой характерно увеличение размера зерен.

На рис. 6 представлена рентгенограмма образца после дуговой наплавки ПП-НП80Х20Р3Т. В поверхностном слое образца обнаружен твердый раствор  $\alpha$ -(Fe,Cr) и карбиды хрома  $Cr_{23}C_6$ . При

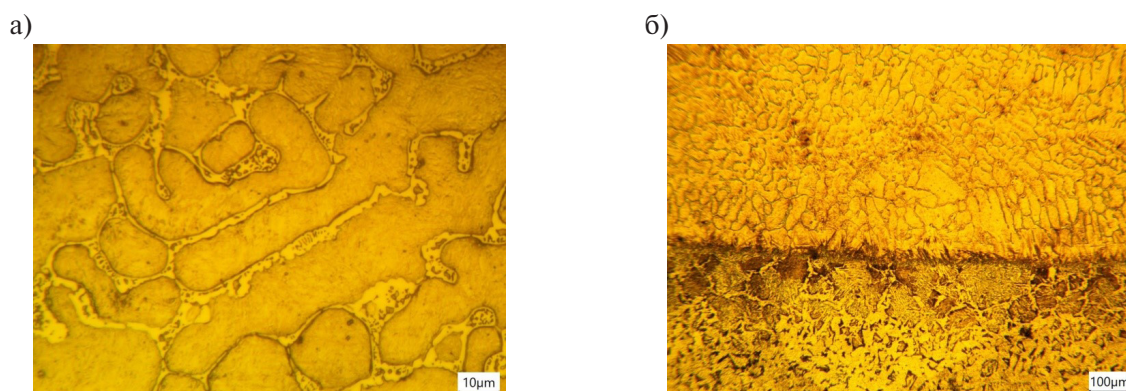


Рис. 5. Микроструктура поверхностного слоя после дуговой наплавки ПП-НП80Х20Р3Т:  
а – верхний слой; б – линия сплавления с основным металлом

Fig. 5. Microstructure of the surface layer after arc welding with ПП-НП80Х20Р3Т:  
а – top layer; б – fusion line with the base metal

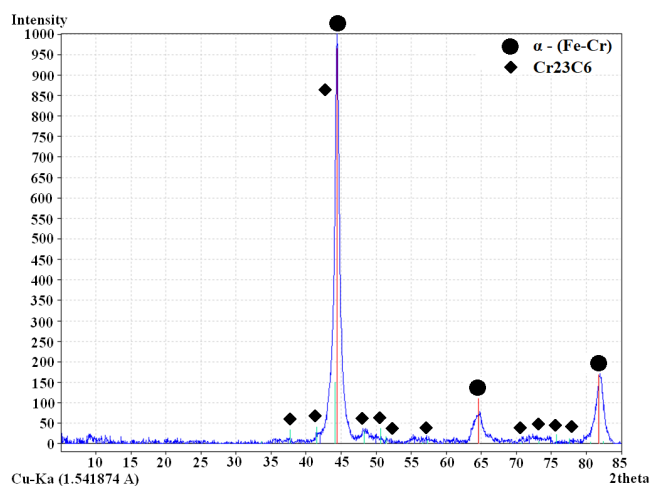


Рис. 6. Рентгенограмма образца после дуговой наплавки ПП-НП80Х20Р3Т

Fig. 6. X-ray image of the sample after arc welding with ПП-НП80Х20Р3Т

высоких температурах хром и углерод растворяются в железе. При охлаждении из аустенитного состояния углерод начинает диффундировать и стремится образовывать более стабильные соединения с хромом. В результате этого процесса хром вступает в реакцию с углеродом, образуя карбиды. Хром обладает высокой способностью к образованию карбидов, что приводит к выделению этих соединений вдоль границ зерен  $\alpha$ -(Fe,Cr). Карбиды  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  начинают формироваться в диапазоне температур от  $600^\circ\text{C}$  до  $900^\circ\text{C}$ .

На рис. 7 представлена микроструктура поверхностного слоя после дуговой сварки ASM 4440-GS. Зерна имеют неправильную многогранную форму, характерную для мартенситных структур, полученных в результате дуговой сварки. Границы зерен хорошо видны и представляют собой характерные темные линии.

Согласно рентгеновским данным, показанным на рис. 8, в поверхностном слое были обнаружены твердый раствор  $\alpha$ -(Fe,Cr) и карбиды хрома  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  и  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ . На рис. 7а отчетливо видно, что карбиды сформировались на границах зерен  $\alpha$ -(Fe,Cr). После охлаждения из высокотемпературной фазы углерод и хром диффундируют к границам зерен, которые обладают более высокой

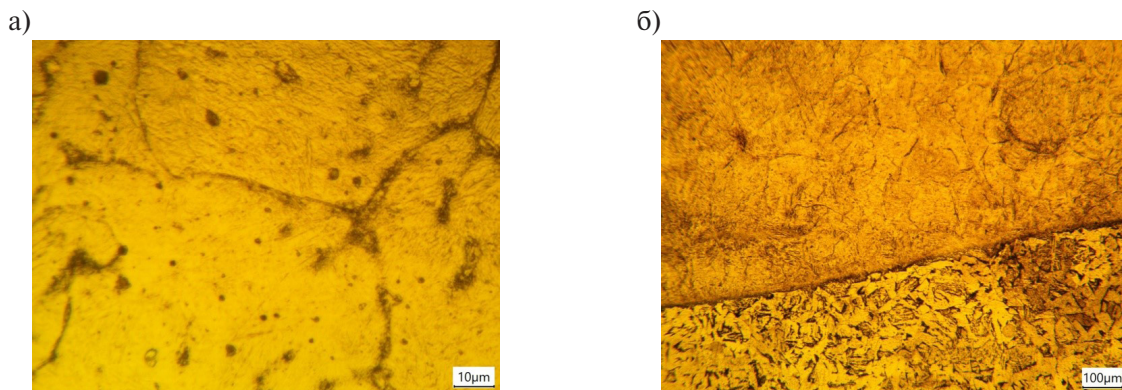


Рис. 7. Микроструктура поверхностного слоя после дуговой наплавки ASM 4440-GS:  
а – верхний слой; б – линия сплавления с основным металлом

Fig. 7. Microstructure of the surface layer after arc welding with ASM 4440-GS:  
a – top layer; b – fusion line with the base metal

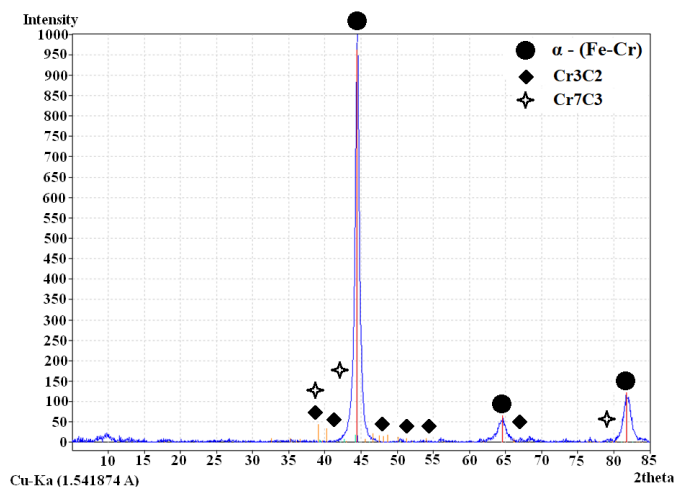


Рис. 8. Рентгенограмма образца после дуговой наплавки ASM 4440-GS

Fig. 8. X-ray image of the sample after arc welding with ASM 4440-GS

энергией по сравнению с внутренними областями зерен, что делает их предпочтительными местами для образования вторичных фаз, таких как карбиды хрома.

Средние значения макротвердости полученных наплавленных покрытий: ПП-НП80Х20Р3Т – 57 HRC; ПП-НП30Х4Г2М – 48 HRC; ASM 4440-GS – 51 HRC.

На рис. 9 представлено распределение микротвердости по глубине покрытий, полученных методом дуговой наплавки. Покрытие, полученное после наплавки порошковой проволокой ПП-НП80Х20Р3Т, характеризуется высокой и стабильной твердостью в диапазоне до 4,5 мм от поверхности, которая составляет 786–880 HV. Вблизи глубины 4,5 мм наблюдается резкое снижение твердости, что обусловлено переходом от основного слоя покрытия к материалу подложки, характеризующемуся меньшей твердостью. Покрытие из ПП-НП30Х4Г2М имеет микротвердость в диапазоне 646–826 HV. На глубине 3,0 мм происходит резкое снижение твердости, что указывает на приближение к подложке. Твердость покрытия из порошковой проволоки ASM 4440-GS составляет 668–768 HV вблизи поверхности и резко снижается на глубине 2,5 мм, что обусловлено переходом к подложке.



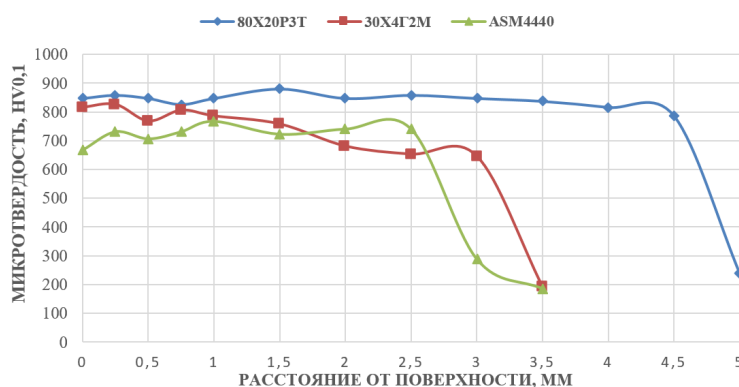


Рис. 9. Распределение микротвердости от поверхности покрытий после дуговой наплавки

Fig. 9. Distribution of microhardness from the surface of coatings after arc welding

### Заключение

Результаты исследования показали, что дуговая наплавка порошковыми проволоками обеспечивает формирование покрытий с высокой степенью однородности без дефектов, таких как трещины и поры. Покрытия, полученные методом дуговой наплавки в среде защитного газа с использованием различных порошковых проволок, обладают специфическими микроструктурными и фазовыми характеристиками. Покрытие из ПП-НП30X4Г2М характеризуется мелкозернистой мартенситной структурой в наплавленном слое. В его фазовом составе присутствует пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -(Fe,Cr). Покрытие из ПП-НП80X20P3Т имеет дендритную структуру, характерную для быстрого охлаждения, и содержит карбиды хрома  $Cr_{23}C_6$ , которые расположены вдоль границ зерен  $\alpha$ -(Fe,Cr). Покрытие ASM 4440-GS отличается многогранной формой зерен, характерной для мартенситных структур, и содержит карбиды хрома  $Cr_3C_2$  и  $Cr_7C_3$ , которые расположены на границах зерен. Наличие этих карбидов повышает твердость и износостойкость покрытия, делая его более прочным и долговечным в условиях интенсивного абразивного воздействия.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Durmuş H., Çömez N., Gül C., Yurddaşkal M., Yurddaşkal M. Wear performance of Fe-Cr-C-B hardfacing coatings: Dry sand/rubber wheel test and ball-on-disc test, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 77 (2018) 37–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.07.006>
- [2] Buchely M.F., Gutierrez J.C., León L.M., Toro A. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear*, 259(1–6) (2005) 52–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.002>
- [3] Eremin E.N., Losev A.S., Borodikhin S.A., Ponomarev I.A. Wear resistance and characteristics of the friction surface of the coating metal with carbide-boride-nitride-intermetallic alloying, 2019 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 681 (2019) 012012. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/681/1/012012>
- [4] Будко С.И., Зуева Д.С. Увеличение ресурса плужных лемехов восстановлением их заправкой лучевидного износа // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2007. Т. 1, № 6. С. 84–89.
- [5] Veinthal R., Sergejev F., Zikin A., Tarbe R., Hornung J. Abrasive impact wear and surface fatigue wear behaviour of Fe–Cr–C PTA overlays, *Wear*, 301 (2013) 102–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.077>
- [6] Singla Y.K., Maughan M.R., Arora N., Dwivedi D.K. Enhancing the wear resistance of iron-based alloys: A comprehensive review of alloying element effects, *Journal of Manufacturing Processes*, 120 (2024) 135–160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.04.038>

- [7] **Foley A.G., Chisholm C.J., McLees V.A.** Wear of ceramic-protected agricultural subsoilers, *Tribology International*, 21(2) (1988) 97–103. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(88\)90081-3](https://doi.org/10.1016/0301-679X(88)90081-3)
- [8] **Балановский А.Е., Нгуен В.В., Астафьева Н.А., Гусев Р.Ю.** Структура и свойства низкоуглеродистой стали после плазменной наплавки борсодержащей обмазки // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2023. Т. 25, № 2. С. 93–103. DOI: <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2023-25.2-93-103>
- [9] **Wells T.C.** A review of surface treatments and coatings, *Surfacing Journal*, 9(4) (1978) 2–9.
- [10] **Wang X., Zhang Z., Zhao Y., Hu Z., Li X.** Macroscopic morphology and properties of cobalt-based laser cladding layers on rail steel based on pulse shaping, *Optics & Laser Technology*, 168 (2024) 109940.
- [11] **de Sousa J.M.S., Gil G.S., dos Santos Barbosa M., Garcia D.N., Lobato M.Q., Machado P.C.** Tribological performance under abrasive wear of Fe-Cr-C+Nb coating deposited by FCAW process, *Wear*, 523 (2023) 204824. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204824>
- [12] **Pourasiabi H., Gates J.D.** Effects of chromium carbide volume fraction on high-stress abrasion performance of NbC-bearing high chromium white cast irons, *Wear*, 498–499 (2022), 204312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204312>.
- [13] **Ivanov O., Prysazhnyuk P., Lutsak D., Matvienkiv O., Aulin V.** Improvement of abrasion resistance of production equipment wear parts by hardfacing with flux-cored wires containing boron carbide/metal powder reaction mixtures, *Management Systems in Production Engineering*, 28(3) (2020) 178–183. DOI: <https://doi.org/10.2478/mspe-2020-0026>
- [14] **Henderson J.L., Bulloch J.H.** Alloy classification of hardfacing materials, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 47(2) (1991) 127–158. DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(91\)90096-K](https://doi.org/10.1016/0308-0161(91)90096-K)
- [15] **Berns H., Fischer A.** Microstructure of Fe-Cr-C hardfacing alloys with additions of Nb, Ti and, B, *Metallography*, 20(4) (1987) 401–429. DOI: [https://doi.org/10.1016/0026-0800\(87\)90017-6](https://doi.org/10.1016/0026-0800(87)90017-6)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**МИХАЙЛОВСКИЙ Георгий Максимович** – аспирант, *Иркутский национальный исследовательский технический университет, без степени.*

E-mail: [dog7820038@gmail.com](mailto:dog7820038@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1147-782X>

**НГУЕН Ван Винь** – аспирант, *Иркутский национальный исследовательский технический университет, без степени.*

E-mail: [nguyenvanh190596@gmail.com](mailto:nguyenvanh190596@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6514-9015>

**ЗАХАРОВ Павел Константинович** – магистрант, *Иркутский национальный исследовательский технический университет, без степени.*

E-mail: [dimaleonov26@mail.ru](mailto:dimaleonov26@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1897-2788>

## REFERENCES

- [1] **H. Durmuş, N. Çömez, C. Gül, M. Yurddaşkal, M. Yurddaşkal,** Wear performance of Fe-Cr-C-B hardfacing coatings: Dry sand/rubber wheel test and ball-on-disc test, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 77 (2018) 37–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.07.006>

- [2] **M.F. Buchely, J.C. Gutierrez, L.M. León, A. Toro**, The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear*, 259(1–6) (2005) 52–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.002>
- [3] **E.N. Eremin, A.S. Losev, S.A. Borodikhin, I.A. Ponomarev**, Wear resistance and characteristics of the friction surface of the coating metal with carbide-boride-nitride-intermetallic alloying, 2019 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 681 (2019) 012012. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/681/1/012012>
- [4] **S.I. Budko, D.S. Zueva**, The increase in resources plowshares restore their xiphoid surfacing wear, *Konstruirovaniye, ispol'zovanie i nadezhnost' mashin sel'skokhoziaistvennogo naznacheniia* [Design, use and reliability of agricultural machinery], 1(6) (2007) 84–89.
- [5] **R. Veinthal, F. Sergejev, A. Zikin, R. Tarbe, J. Hornung**, Abrasive impact wear and surface fatigue wear behaviour of Fe–Cr–C PTA overlays, *Wear*, 301 (2013) 102–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.077>
- [6] **Y.K. Singla, M.R. Maughan, N. Arora, D.K. Dwivedi**, Enhancing the wear resistance of iron-based alloys: A comprehensive review of alloying element effects, *Journal of Manufacturing Processes*, 120 (2024) 135–160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.04.038>
- [7] **A.G. Foley, C.J. Chisholm, V.A. McLees**, Wear of ceramic-protected agricultural subsoilers, *Tribology International*, 21(2) (1988) 97–103. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(88\)90081-3](https://doi.org/10.1016/0301-679X(88)90081-3)
- [8] **A.E. Balanovsky, V.V. Nguyen, N.A. Astafieva, R.Yu. Gusev**, Structure and properties of low carbon steel after plasma-jet hard facing of boron-containing coating, *Metal Working and Material Science*, 25(2) (2023) 93–103. DOI: [10.17212/1994-6309-2023-25.2-93-103](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2023-25.2-93-103)
- [9] **T.C. Wells**, A review of surface treatments and coatings, *Surfacing Journal*, 9(4) (1978) 2–9.
- [10] **X. Wang, Z. Zhang, Y. Zhao, Z. Hu, X. Li**, Macroscopic morphology and properties of cobalt-based laser cladding layers on rail steel based on pulse shaping, *Optics & Laser Technology*, 168 (2024) 109940.
- [11] **J.M.S. de Sousa, G.S. Gil, M. dos Santos Barbosa, D.N. Garcia, M.Q. Lobato, P.C. Machado**, Tribological performance under abrasive wear of Fe-Cr-C+Nb coating deposited by FCAW process, *Wear*, 523 (2023) 204824. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204824>
- [12] **H. Pourasiabi, J.D. Gates**, Effects of chromium carbide volume fraction on high-stress abrasion performance of NbC-bearing high chromium white cast irons, *Wear*, 498–499 (2022), 204312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204312>.
- [13] **O. Ivanov, P. Prysyazhnyuk, D. Lutsak, O. Matvienkiv, V. Aulin**, Improvement of abrasion resistance of production equipment wear parts by hardfacing with flux-cored wires containing boron carbide/metal powder reaction mixtures, *Management Systems in Production Engineering*, 28(3) (2020) 178–183. DOI: <https://doi.org/10.2478/mspe-2020-0026>.
- [14] **J.L. Henderson, J.H. Bulloch**, Alloy classification of hardfacing materials, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 47(2) (1991) 127–158. DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(91\)90096-K](https://doi.org/10.1016/0308-0161(91)90096-K)
- [15] **H. Berns, A. Fischer**, Microstructure of Fe-Cr-C hardfacing alloys with additions of Nb, Ti and, B, *Metallography*, 20(4) (1987) 401–429. DOI: [https://doi.org/10.1016/0026-0800\(87\)90017-6](https://doi.org/10.1016/0026-0800(87)90017-6)

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Georgiy M. MIHAILOVSKIY** – *Irkutsk National Research Technical University.*

E-mail: [dog7820038@gmail.com](mailto:dog7820038@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1147-782X>

**Van Vinh NGUYEN** – *Irkutsk National Research Technical University.*

E-mail: [nguyenvanh190596@gmail.com](mailto:nguyenvanh190596@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6514-9015>

**Pavel K. ZAKHAROV** – *Irkutsk National Research Technical University.*

E-mail: [dimaleonov26@mail.ru](mailto:dimaleonov26@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1897-2788>

**Поступила: 08.10.2024; Одобрена: 28.10.2024; Принята: 30.10.2024.**

**Submitted: 08.10.2024; Approved: 28.10.2024; Accepted: 30.10.2024.**