

УДК 621.791

РАЗРАБОТКА ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК ДЛЯ СВАРКИ, НАПЛАВКИ, НАПЫЛЕНИЯ**Ю. С. КОРОБОВ^{1,2}, Б. А. ПОТЕХИН³, М. А. ФИЛИППОВ²,
В. И. ШУМЯКОВ², Ю. С. ДАВЫДОВ², Н. М. РАЗИКОВ²**¹ Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина³ Уральский государственный лесотехнический университет Екатеринбург, Россия

UDC 621.791

DEVELOPMENT OF ECONOMICALLY ALLOYED FLUX-CORED WIRES FOR WELDING, SURFACING, THERMAL SPRAYING**YU. S. KOROBOV, B. A. POTEKHIN, M. A. FILIPPOV, V. I. SHUMYAKOV,
YU. S. DAVYDOV, N. M. RAZIKOV**

Аннотация. Выполнен комплекс исследований по разработке и применению экономнолегированных порошковых проволок для получения покрытий различного назначения: износостойкого вида Fe–C–Cr–Al–Ti со структурой метастабильного аустенита; жаростойкого вида (Fe–Cr–Al), дополнительно легированных Ti, Si, B, Y; антифрикционного вида композитной структуры «бронза–мартенситно-стареющая сталь». Покрытия отличаются повышенной стойкостью к механическим и тепловым нагрузкам различных типов. Приведены примеры применения покрытий, полученных дуговой и лазерной сваркой/наплавкой, дуговой и газопламенной металлизацией в машиностроении, энергетике, металлургии.

Ключевые слова: порошковая проволока, метастабильный аустенит, антифрикционная бронза, жаростойкость, дуговая сварка, лазерная наплавка, дуговая металлизация, газопламенное напыление.

Abstract. A set of studies on the development and use of economically alloyed flux-cored wires for performing coatings for various purposes was carried out. The wires include the following: wear-resistant type Fe–C–Cr–Al–Ti with the structure of metastable austenite; heat-resistant type of Fe–Cr–Al, additionally alloyed with Ti, Si, B, Y; antifriction composite of «bronze–maraging steel» structure. Coatings are characterized by increased resistance to mechanical and thermal loads of various types. Examples of the application of coatings obtained by arc and laser welding/surfacing, arc and flame spraying in mechanical engineering, power engineering, and metallurgy are presented.

Keywords: flux-cored wire, metastable austenite, antifriction bronze, heat resistance, arc welding, laser surfacing, arc spraying, flame spraying.

В качестве материалов для получения износо- и жаростойких покрытий газотермическим напылением, дуговой и лазерной наплавкой перспективны экономнолегированные порошковые проволоки. Авторами выполнен комплекс

исследований по разработке и применению таких проволок для получения покрытий различного назначения: износостойкого вида Fe–C–Cr–Al–Ti со структурой метастабильного аустенита, жаростойкого вида фехралей (Fe–Cr–Al), дополнительно легированные Ti, Si, B, Y, антифрикционного вида композитной структуры «бронза–мартенситно–стареющая сталь».

Покрyтия со структурой метастабильного аустенита. Материалы с метастабильным аустенитом (МСА) в качестве основной структурной составляющей отличаются экономичностью легирования, высокой стойкостью при износе (абразивном, эрозионном, кавитационном и др.). Это обусловлено тем, что в процессе приложения значительных внешних нагрузок (свыше 2500 МПа) в таких материалах происходит деформационное преобразование микрогетерогенной структуры МСА в дисперсный мартенсит, сопровождающееся синергетическими эффектами. Во-первых, увеличение доли мартенситной фазы в структуре ведет к росту твердости. Во-вторых, энергия внешней нагрузки, которая воздействует на поверхность, рассеивается вследствие микроТРИП-эффекта деформационного превращения метастабильного аустенита в мартенсит, что вызывает релаксацию микронапряжений в поверхностных слоях. Также происходит снижение напряжений в покрытии вследствие снижения интервала температур протекания структурных мартенситных превращений [1]. При этом мартенситное превращение происходит с крайне высокой скоростью, порядка 10^{-7} с. Это быстрее примерно на порядок, чем время самых динамичных внешних механических воздействий.

Основы такого подхода в 1950-х гг. разработали наши предшественники из Института физики металлов УрО РАН и УрФУ – академик В. Д. Садовский, профессора И. Н. Богачев и М. И. Разиков с сотрудниками [2]. Было показано, что у металла с МСА-структурой, подвергающегося внешним воздействиям, наблюдается значительное повышение свойств за счет реализации внутреннего ресурса самого материала. Данный эффект положительно проявился при различных видах износа (абразивный, адгезионный, эрозионный, кавитационный) и динамических воздействий, где уровень нагрузок соответствует приведенным выше.

Указанные особенности реализованы в порошковых проволоках для получения покрытий дуговой металлизацией, дуговой наплавкой против абразивного, адгезионного [3, 4] и кавитационного при наличии гидроабразива [5–7] износа, лазерной наплавкой против адгезионного износа [8], для сварки соединений из броневых (среднеуглеродистых среднелегированных) сталей, подвергающихся баллистическим воздействиям [9]. Для особо жестких видов ударно-абразивного воздействия на основании расчетов фазового состава и структуры наплавки в состав проволок добавлены карбидо- и боридообразующие элементы [10].

Жаростойкие покрытия для условий износа и коррозии до 800 °С. Распространенным материалом для работы в условиях износа и коррозии при

температурах до 800 °С являются Fe–Cr–Al сплавы, которые обладают высокой жаростойкостью за счет формирования на их поверхности при нагреве пленки Al_2O_3 , которая характеризуется высокой температурой плавления, химической и термической стабильностью. Для предупреждения развития локальной высокотемпературной коррозии (ЛВК) сплавы легируют Ti, Si, что приводит к образованию термодинамически стабильных и жаростойких карбидов TiC и подокисного диффузионно-барьерного слоя оксида SiO_2 . При этом предотвращается формирование карбидов $(Fe,Cr)_7C_3$ и нитридов AlN, инициирующих ЛВК, а на поверхности сплавов при нагреве формируется преимущественно пленка Al_2O_3 . Легирование Y обеспечивает повышение прочности сцепления пленки Al_2O_3 с основным металлом в процессе циклических нагревов. Наличие элементов внедрения (B, N, C) приводит к образованию упрочняющих избыточных фаз – боридов, карбидов, нитридов или фаз смешанного состава. Целенаправленное формирование таких фаз, в частности за счет легирования B, перспективно для повышения износостойкости при повышенных температурах.

В металлизационных покрытиях из Fe–Cr–Al порошковых проволок проявляются эффекты, аналогичные сплошным материалам. Однако имеются отличия, поскольку окисление происходит как по поверхности, так и по ламеллярным слоям, образующимся при формировании покрытия. Также влияние оказывают особенности формирования газотермических покрытий [11].

На основе анализа закономерностей изменения жаростойкости с применением физико-химического и нейросетевого моделирования [12, 13] разработана гамма порошковых проволок базовой системы легирования Fe–Cr–Al с добавлением Ti, Si, Y, B для жаростойких применений. Их химический состав оптимизирован по критерию минимального окисления покрытия с учетом влияния технологических параметров процесса металлизации и исходного состава распыляемой проволоки. Путем варьирования соотношения легирующих элементов получены и исследованы составы, эффективно работающие до 500 °С при наличии абразивного воздействия и до 800 °С в условиях газовой коррозии [14].

Покрyтия для антифрикционных применений. Для подшипников скольжения, работающих при высоких нагрузках и скоростях относительного скольжения, распространенными антифрикционными материалами являются оловянистые бронзы вида БрО10, баббиты вида Б83 и алюминиевые бронзы, легированные Fe вида БрАЖ 9-4. У оловянистых бронз ограниченная свариваемость из-за горячих трещин, обусловленных интерметаллидами. Баббиты отличаются низкой технологичностью при сварке. Поэтому эти материалы применяют в виде литья, у которого высокий уровень брака и низкий коэффициент использования металла. У бронзы БрАЖ 9-4 выше механическая прочность и она отличается хорошей свариваемостью. Однако у нее ниже антифрикционные свойства в сравнении с аналогами.

В качестве альтернативы разработан новый класс материалов композитной структуры, включающей дендриты из мартенситно-старееющей стали на основе Fe, Ni и бронзовую матрицу, заполняющую междендритные пространства [15]. Указанные дендриты выполняют роль упрочняющей фазы, аналогично интерметаллидам в распространенных антифрикционных материалах (баббитах, оловянистых и алюминиевых бронзах). Однако в отличие от последних, они не только обеспечивают низкий коэффициент трения и высокую стойкость против износа, но и обладают высокой стойкостью против образования горячих трещин, характерного дефекта при сварке/наплавке типовых бронз.

Направления применений. Совместно с предприятиями по изготовлению сварочных материалов (ЗСМ, Екатеринбург и др.) налажен выпуск порошковых проволок указанных классов диаметром 1,2...2,0 мм, что позволяет использовать их для технологичных способов наплавки/напыления [16].

В сварных соединениях высокопрочных среднелегированных сталей резко снижена склонность к образованию холодных трещин шва при высокой стойкости к внешним динамическим нагрузкам [9].

У напыленных МСА-покрытий полученные характеристики твердости (51...53 HRC) и адгезионной прочности (43...45 МПа) достаточны для обеспечения надежности на деталях типового применения. Это шейки валов/осей под подшипники качения и скольжения, рабочие поверхности штоков гидроцилиндров, плоские направляющие, подверженные высоким динамическим нагрузкам [4, 17].

При наплавке слои с МСА-структурой метастабильного аустенита отличаются высокой надежностью при различных видах внешних воздействий. Это крановые колеса, плунжеры гидропрессов, гребные винты, рабочие органы землеройных машин и др. Их износостойкость повышена в 2–5 раз в сравнении с базовыми вариантами [18, 19]. Покрытия на лопатках паровых турбин показали одинаковую стойкость со стеллитовыми против кавитационно-эрозионного износа за 5-летний период наблюдений [7].

Cr13Al5B5Y покрытия, полученные дуговой металлизацией, имеют тот же уровень жаростойкости при 700 °С, что и аустенитные стали, и на один-два порядка выше по сравнению с котельными сталями перлитного (12Х1МФ) и мартенситно-ферритного (1Х12В2МФ) классов. Хлор-индуцированная коррозия происходит главным образом на поверхности, толщина продукта коррозии на поверхности покрытия аналогична покрытию на основе никеля (Inconel 625). Микротвердость составила $HV_{0,05}$ (1220 ± 50). Износостойкость выше в сравнении с альтернативами, например относительно стали Ст20, в 12 раз [14].

Применение покрытий композитной структуры «бронза–мартенситно-старееющая сталь» дает следующие возможности:

– замена цельнобронзовых деталей трения (плунжеры гидросистем, запорная арматура) на стальные с бронзовым покрытием, экономия бронзы 3...5 кг на деталь;

– увеличение ресурса подшипников скольжения и повышение технологичности их изготовления за счет замены применяемых антифрикционных материалов. В типовых условиях жидкостного трения ($P = 1$ МПа, $V = 3$ м/с, путь трения – 100 км) износ покрытий из композитных бронз ниже в сравнении с альтернативами (табл. 1). При этом коэффициент трения на уровне баббитовых покрытий при нагрузках – до 5 МПа.

Табл. 1. Относительный износ антифрикционных покрытий

Материал	БрЖНА 12-7-1, ДН	Баббит Б83, ГН/ПН	БрО10, литье	Бронза DT-CuAl18, ДН
Относительный износ	1	3,2/1,4	2,1	1,3
<i>Примечание – ДН – дуговая наплавка; ГН – газовая наплавка; ПН – плазменное напыление</i>				

Выводы.

1. На основе анализа высокотемпературных физико-химических взаимодействий при напылении/наплавке разработана гамма порошковых проволок для нанесения покрытий различного назначения: износостойкого вида Fe–C–Cr–Al–Ti со структурой метастабильного аустенита; жаростойкого вида Fe–Cr–Al, дополнительно легированных Ti, Si, B, Y; антифрикционного из композитной бронзы. Покрытия отличаются повышенной стойкостью к соответствующим нагрузкам в сравнении с альтернативами.

2. Освоено производство порошковых проволок указанных классов диаметром 1,2...2,0 мм, что позволяет использовать их для технологичных способов наплавки/напыления.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Структура», номер госрегистрации 122021000033-2).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Филиппов, М. А.** Износостойкие стали для отливок: монография / М. А. Филиппов, А. А. Филиппенков, Г. Н. Плотников. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2009. – 358 с.
2. **Счастливцев, В. М.** Роль принципа метастабильности аустенита Богачёва – Минца при выборе износостойких материалов / В. М. Счастливцев, М. А. Филиппов // МИТОМ. – 2005. – № 1. – С. 6–9.
3. Метастабильный хромистый аустенит как структурный фактор повышения износостойкости наплавленного металла и напыленных покрытий / Ю. С. Коробов [и др.] // *Металловеды и металлурги* / Под ред. С. С. Черняка. – Иркутск: ИГУПС, 2013. – С. 40–46.
4. An Influence of Strain-Induced Nucleation of Martensitic Transformations on Tribological Properties of Sprayed and Surfaced Depositions / Yu. S. Korobov [et al.] // *Proc. from ITSC*. – 2016. – P. 694–699.
5. The effect of martensitic transformation on the cavitation erosion resistance of a TiG-deposited Fe–Cr–C–Al–Ti layer / Yu. S. Korobov [et al.] // *Surface and Coating Technology*. – 2021. – P. 1–13.
6. Сравнительная стойкость против кавитационной эрозии аустенитных сталей различного уровня метастабильности / Ю. С. Коробов [и др.] // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 61–72.

7. Восстановление разрушенной защиты входных кромок рабочих лопаток паровых турбин путем наплавки кавитационно-стойких слоев со структурой метастабильного аустенита / В. Л. Мазуровский [и др.] // Газотурбинные технологии. – 2022. – № 4. – С. 6–10.

8. Особенности превращения метастабильного аустенита в мартенсит, деформации при лазерной наплавке порошковой проволокой 60Cr7TiAl / Н. В. Гохфельд [и др.] // Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63, вып. 12. – С. 1967–1973.

9. Особенности структуры сварного соединения среднеуглеродистой хромистой стали, содержащей метастабильный аустенит / Ю. С. Коробов [и др.] // Материаловедение. – 2019. – № 6. – С. 3–7.

10. **Королёв, Н. В.** Метод расчетного определения фазового состава и структуры износостойких наплавочных сплавов / Н. В. Королёв, О. В. Пименова, В. Н. Бороненков // Сварочное производство. – 2002. – № 4. – С. 11–16.

11. High-Temperature Oxidation Behavior of Fe–25Cr–5Al Arc Spraying Coatings / Yu. Korobov [et al.] // Proc. from ITSC. – 2012. – P. 729–733.

12. Разработка порошковых проволок для дуговой металлизации жаростойких покрытий на основе нейросетевого моделирования / Ю. С. Коробов [и др.] // Сварка и диагностика. – 2014. – № 5. – С. 20–25.

13. Порошковые проволоки Fe–Cr–Al для дуговой металлизации жаростойких покрытий / Ю. С. Коробов [и др.] // Сварка и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 61–64.

14. Arc-Sprayed Fe-Based Coatings from Cored Wires for Wear and Corrosion Protection in Power Engineering / Yu. S. Korobov [et al.] // Coatings. – 2018. – P. 1–15.

15. **Potehkin, B. A.** Development of Composite Bronzes Reinforced by Steel Dendrites / B. A. Potehkin, A. S. Khristolyubov, A. Yu. Zhilyakov // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2018. – Vol. 59, № 5. – P. 527–532.

16. Порошковые проволоки для износо- и жаростойкой наплавки и напыления / Ю. С. Коробов [и др.] // Автоматическая сварка. – 2017. – № 10. – С. 62–63.

17. **Коробов, Ю. С.** Рациональный подход к восстановлению деталей оборудования газотермическим напылением / Ю. С. Коробов, В. И. Шумяков, А. С. Прядко // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2013. – № 3. – С. 17–21.

18. **Кулишенко, Б. А.** Electrodes for wear-resistant overlay of parts, subjected to abrasive and impact-abrasive action / B. A. Kulishenko, A. N. Balin, M. A. Filippov // Сварочное производство. – 2004. – № 11. – С. 28–32.

19. **Разиков, Н. М.** Разработка электродов для восстановления деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания / Н. М. Разиков, М. Н. Разиков, А. П. Мажирин // Сварка и диагностика: сб. докл. МНТК. – Екатеринбург, 2013. – С. 103–106.

E-mail: yukorobov@gmail.com.