

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОГО ЧУГУНА, ПОЛУЧЕННЫХ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКОЙ И УПРОЧНЕННЫХ СФЕРОРЕЛИТОМ

А.В. Ишков, В.В. Иванайский, Н.Т. Кривочуров, А.В. Щеголев,
В.Ф. Аулов, В.П. Лялякин

В статье описано получение, исследована структура и определена сравнительная износостойкость новых покрытий из высокохромистого чугуна, предназначенных для упрочнения рабочих органов сельскохозяйственных машин. Для повышения износостойкости и придания новых потребительских качеств покрытиям осуществлена их модификация сферическим карбидом вольфрама $WC-W_2C$ - сферорелитом. Покрытия получали индукционной наплавкой базовой шихты на основе высокохромистого чугуна марки ПГ-УС25 и боратного флюса для индукционной наплавки марки П-0,66, модифицированной добавкой до 5...10 мас. % сферорелита $WC-W_2C$, вводимом в комплексе с карбидом бора B_4C . Свойства полученных покрытий сравнивали с материалом-основой (сталь 65Г), покрытием, полученным из базовой шихты и с покрытиями, упрочненными 25...30 мас. % керметом $Cr_3C_2/ПГ-УС25$, полученным методом СВС.

Показано, что введение в базовую шихту указанного комплекса позволяет повысить твердость наплавленных до 1000...1200 HV_{100} а износостойкость в 3,1...4,5 раза по отношению к материалу-основе, и в 1,3...1,8 раза по отношению к базовому (не упрочненному) материалу. Наблюдаемые изменения структуры и свойств покрытий объясняются образованием новых фаз, эффектом Шарпи и дисперсионным упрочнением. Однако, наибольшей износостойкости в проведенных тестах удается достичь у материала, модифицированного СВС-керметом $Cr_3C_2/ПГ-УС25$, который добавляется в базовую шихту за счет уменьшения доли металлического компонента.

Ключевые слова: высокохромистый чугун, сферорелит, индукционная наплавка, упрочняющее покрытие, изнашивание, боридная эвтектика, карбиды $WC-W_2C$, B_4C , Cr_3C_2 .

ВВЕДЕНИЕ

Рабочие поверхности металлических деталей испытывают значительные локальные деформации, знакопеременные нагрузки, удары, нагрев и пр., изменяющие их структуру и свойства и вызывающие их изнашивание. Износ деталей приводит к изменению их микро- и макрогеометрии, нарушает нормальную работу сопряжений, снижает надежность машин и, в конечном счете, выводит технику из строя [1]. Интенсивному износу подвержены и рабочие органы сельскохозяйственных машин, которые также страдают и от коррозии, вызванной специфическими свойствами обрабатываемого ими материала (животные и растительные биологические среды, растительные остатки, почва) [2].

Для продления срока службы и сохранения параметров этих деталей их поверхность упрочняют покрытиями из высокохромистых чугунов - сплавов и композиционных материалов систем Fe-Cr-C, Fe-Cr-C-B и др. [3]. Эти материалы широко распространены в России и

за рубежом [4, 5], а упрочняющие покрытия могут быть нанесены на деталь различными методами [6, 7].

Тем не менее, износостойкость этих материалов, в отдельных случаях (молотки дробилок, ножи измельчителей, лемехи, лопасти смесителей и др.), может оказаться недостаточной [8].

Существующие методы повышения износостойкости этих материалов базируются: на разработке новых наплавочных материалов, на основе различных d-металлов или сплавов [9]; введении в существующие материалы дополнительных компонентов (наночастиц, сверхтвердых карбидов, керамики и др.) [10-12]; изменении природы контактного взаимодействия с реализацией эффекта Шарпи [1]; формировании в покрытии или на его границах новых износостойких фаз [13-16] и др.

Однако, наиболее перспективным, с технической точки зрения, является введение в готовые наплавочные материалы небольших количеств (до 5 мас. %) активных добавок, например

известного модификатора сухого трения MoS_2 [17], что позволяет без существенных изменений использовать для нанесения покрытий известную высокопроизводительную технологию индукционной наплавки [3, 7].

Для формирования упрочняющих покрытий из высокохромистого чугуна на поверхности рабочих органов сельскохозяйственных машин методом индукционной наплавки в промышленности широкое применение получили материалы марок ПГ-С27 и ПГ-УС25 [4]. Ранее нами уже были исследованы аналогичные покрытия из чугуна марки ПГ-УС25, армированные добавкой до 5 мас. % W_4C [18], а также покрытия, армированные добавкой до 25...30 мас. % кермета $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{ПГ-УС25}$, полученного методом СВС [19]. Покрытия наплавляли слоем 0,2...0,3 мм на лезвие детали-ножа комбайна, при этом их износостойкость увеличилась в 2,5...3,1 раза.

Сферический порошок карбида вольфрама - сферорелит, является новым, перспективным материалом для упрочнения различных деталей, а также придания новых свойств известным покрытиям на основе Ni, Fe, Cr [20]. Этот уникальный продукт на основе одного из самых твердых, прочных ($\text{HV}=2200$ МПа, $\sigma=700$ ГПа) и термически стойких материалов в промышленности - WC, получается по оригинальной технологии центробежного распыления его слитков. При этом гранулы имеют правильную, строго сферическую форму, а благодаря распылению слитков из эвтектической смеси карбидов WC- W_2C , дополнительно легированной d-металлами - стабильный состав и мелкозернистую структуру, что обеспечивает высокую технологичность порошку и дополнительное повышение твердости материала.

Однако при промышленной модификации упрочняющих, износостойких покрытий WC, и сферорелитом в частности, используются более высокоэнергетические, но гораздо менее производительные методы их нанесения, чем ТВЧ-технология: плазменная, электродуговая и газопламенная наплавки [10, 12, 13]. Поэтому создание покрытий из высокохромистого чугуна, упрочненного сферорелитом, с помощью метода индукционной наплавки актуально.

Целью настоящей работы являлось получение методом индукционной наплавки покрытий из высокохромистого чугуна марки ПГ-УС25, упрочненных 5...10 мас. % сферорелита КВС-5, исследование их структуры и свойств.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходных реагентов использовали: порошок твердого сплава ПГ-УС25, производства ОАО «Полема», г. Тула (ГОСТ21448-75); шлиф. порошок карбида бора

W_4C , зернистостью 10 (ГОСТ 5744-85); сферический карбид вольфрама (сферорелит) марки КВС-5 (опытная партия), производства НПП ООО «Ресурс-1», НТК «Институт электросварки им.Е.О Патона» НАН Украины, г. Киев (ТУ У 24.1-19482355-001:2010); порошок терморегулирующий ПТ-19Н-01, производства ДП «Торезский завод наплавочных твердых сплавов», г. Торез (ТУУ322-19-004-96); а также боратный флюс для индукционной наплавки П-0,66 [7], производства ОАО «Анитим», г. Барнаул. Все порошковые металлические и флюсовые материалы перед приготовлением шихты просушивали, измельчали и просеивали через сита, с диаметром ячейки 0,350 и 0,125 мм, соответственно.

Покрытия получали индукционной наплавкой базовой шихты, содержащей, мас. %: ПГ-УС25 - 85; флюс П-0,66 - остальное [3]. Компоненты дозировали по весу и смешивали в биконусном смесителе в течение 0,5...1 ч. Модификатор (комплекс сферорелит + W_4C) вводили в шихту за счет уменьшения металлической (до 75 мас. %) или неметаллической (до 10 мас. %) части.

Наплавку покрытий осуществляли на ТВЧ-установке ЭЛСИТ-100/75 с водоохлаждаемым одновитковым щелевым индуктором, выполненным из профилированной медной трубки $\varnothing 15$ мм, нанося готовую шихту слоем, толщиной 2-3 мм, на экспериментальные образцы из стали 65Г, размером $50 \times 20 \times 5$ мм, и нагревая их токами высокой частоты (65...75 кГц) до температуры 1150...1250 °С, в течение 45...60с. На полученных образцах проводили оптимизацию составов и отработку технологии, оценивая состояние их поверхности и твердость HRCэ (пресс ТК-2).

Металлографические исследования проводили на микроскопе CARL ZEISS AXIO OBSERVER-Z1 M и микротвердометре МН-6 по стандартным методикам ASTM: E 3, E 407, E 1558, E 883, E 384. Рентгенофазовый анализ продуктов проводили на дифрактометре ДРОН-6 (Cu , K_α -излучение, $\lambda=1,5418$ Å), идентификацию фаз - в пакете программ PDWin, используя картотеки: PDF-2, ICDD.

Рентгенофлуоресцентный микроанализ проводили на РЭМ Philips SEM515 с микроанализатором EDAX ECON IV.

Износостойкость определяли по оригинальной методике, объединяющей тесты при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы ГОСТ 23.208-79 (ASTM G174-04(2017)), и по схеме палец-диск ASTM G99 (2010), на специальном лабораторном трибометре, нагрузка $40...45 \pm 0,25$ Н, внутренний стандарт - сталь 65Г, закаленная до 55...57 HRCэ.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2019

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОГО ЧУГУНА, ПОЛУЧЕННЫХ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКОЙ И УПРОЧНЕННЫХ СФЕРОРЕЛИТОМ

Относительный износ определяли взвешиванием образцов на весах ВЛК-500, с точностью $\pm 0,01$ г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Использованная нами опытная партия сферорелита КВС-5, дополнительно легирована до 0,5...0,8 мас. % Со, что позволяет получить продукт с твердостью до 3100 МПа, при составе образца, мас. %: W 95,8-96,0; С 3,8-4,0; Fe<0,11; Со 0,5-0,8; С(свободный) 0,02-0,05, фракция продукта \varnothing 0,25-0,5 мм.

Сложность получения монолитных покрытий из высокохромистого чугуна, при их модификации карбидом вольфрама, с помощью ТВЧ-технологии, объясняется техническим противоречием между рабочей температурой этого процесса 1100...1200 °С [7], температурами плавления карбидов 2500...2800 °С, образующихся в системе W-C [21], а также температурами плавления 1400...1500 °С металлокерамических материалов типа ВК на кобальтовой связке [3, 7]. Большая разница температур и малое время процесса не позволяют получить качественное, монолитное покрытие.

Пробные эксперименты по упрочнению ПГ-УС25 только одним сферорелитом КВС-5, взятом в количестве до 5 мас. %, как и ожидалось, не дали должного эффекта. В полученных покрытиях гранулы карбида вольфрама не образовали металлической связи с высокохромистым чугуном и выкрашивались из слоя даже при изготовлении изолированных образцов. Кроме того, из-за резкого различия в механических свойствах, коэффициентах термического расширения и температурой плавления сферорелита и твердого сплава, в покрытиях при выкрашивании образовались трещины.

Известно, что эффективность модификации и качество покрытий могут быть улучшены путем увеличения адгезии на границе гранул сферорелита с высокохромистым чугуном при температуре его плавления 1100...1200 °С. Эта задача может быть решена путем использования карбида вольфрама в покрытиях, полученных по ТВЧ-технологии не в чистом виде, а в составе специальных комплексов - смесей с веществами, способными химически взаимодействовать одновременно как с поверхностью модификатора, так и материала-связки, причем их активность должна проявляться при температурах ниже 1100...1300 °С. Таким компонентом наплавочной шихты может стать карбид бора W_4C , который в условиях ТВЧ-нагрева, как показано нам ранее [3, 22] вступает в реакцию с компонентами твердого сплава и наплавляемой стальной поверхностью, образуя в объеме и на фазовых границах различные продукты:

эвтектику Fe-B, бориды Fe_2B , FeB, карбориды $Fe, Me(C, B)_3$, борированный аустенит $Fe, Me_{23}(C, B)_6$ где: Me - легирующий металл(ы), что также подтверждают данные работ [14, 23].

Высокая реакционная способность W_4C в условиях ТВЧ-нагрева и его введение в состав комплекса с WC, обосновывается также и топомехимической реакцией, протекающей между этим веществом и железом, стали с образованием легкоплавкой 960...980 °С эвтектики Fe-B [23]. Указанные обстоятельства позволяют предположить вовлечение в физико-химические, адгезионные процессы на фазовых границах и карбидов вольфрама WC, W_2C , входящих в состав сферорелита.

Дальнейшую модификацию покрытий из чугуна ПГ-УС25 проводили уже комплексом КВС-5+ W_4C , вводя его компоненты в готовую шихту для индукционной наплавки за счет уменьшения содержания чугуна ПГ-УС25 - сферорелит, и за счет флюса для индукционной наплавки П-0,66 - карбид бора. Общее количество компонентов модифицирующего комплекса в шихте составляло 4...12,5 мас. %, что при выбранной методике модификации позволяет сохранить толщину, равномерность, качество и оптимальный режим нанесения покрытий в промышленных условиях.

На рисунке 1 приведена структура покрытия, полученного при модификации чугуна ПГ-УС25 комплексом: 3...5 мас. % сферорелита КВС-5 и 1...1,5 мас. % карбида бора, с обозначенными на ней (цифры) основными фазами.

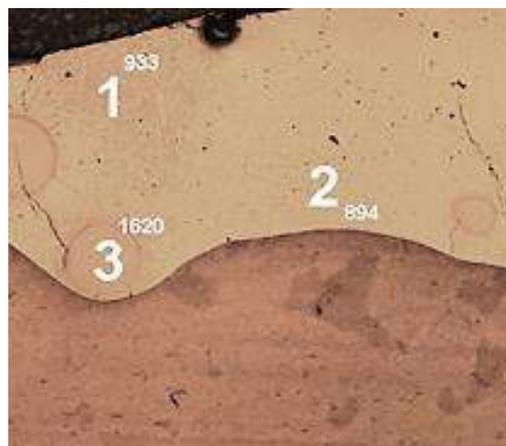


Рисунок 1 - Структура покрытия, модифицированного комплексом: 3...5 мас. % сферорелита КВС-5 + 1...1,5 мас. % W_4C

Как видно из приведенной на рисунке 1 микрофотографии, при модификации высокохромистого чугуна комплексом КВС-5+ W_4C , в количестве 4...6,5 мас. % удалось получить

монолитное покрытие, в котором гранулы сферорелита образовали металлические связи с матричным металлом, прочно удерживаются в наплавленном слое и не выкрашиваются при трении.

В таком покрытии при индукционной наплавке формируются следующие основные фазы: 1 - борированная мелкодисперсная эвтектика из карбидов Fe и Cr, с включениями измельченных игольчатых карбидов Cr₇C₃, с твердостью 930...950 HV₁₀₀; 2 - эвтектика из карбидов Fe и Cr, с включениями на границе сплавления с металлом-основой первичных и вторичных дендритов, с твердостью 850...900 HV₁₀₀; 3 - сферические гранулы карбида WC-W₂C, с очерченной границей, адгезионно-связанные с чугуновой матрицей, с твердостью 1600...1950 HV₁₀₀. Интересно отметить, что в полученном покрытии, несмотря на значительное подплавление металла-основы, полностью отсутствуют характерные для индукционной наплавки дендритные структуры на границе раздела металл-основа/покрытие [3, 7].

Однако в покрытии имеются и дефекты: поры, трещины, образование которых связано с наличием неметаллических включений (В₄С и продукты его усвоения материалом - графит).

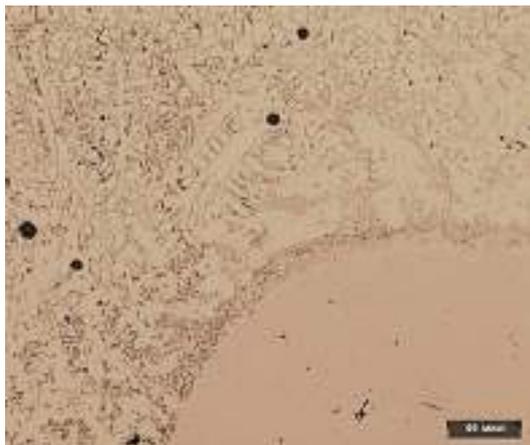


Рисунок 2 - Тонкая структура границы раздела сферорелит/высокохромистый чугун в покрытии, модифицированном комплексом: 5...10 мас. % сферорелита KBC-5 + 1,5...2,5 мас. % В₄С + 2...3 мас. % ПТ-19Н-01

Для улучшения качества покрытия в состав комплекса дополнительно вводили более мягкий материал - терморреагирующий никелевый порошок, плакированный алюминием ПТ-19Н-01 в количестве н.б. 2...3 мас. % для «залечивания» трещин. Кроме того, введение этого компонента, теоретически, позволит увеличить в материале содержание

сферорелита до 8...10 мас. % без ухудшения качества покрытия [4-6, 9, 13].

На рисунке 2 приведена тонкая структура покрытия, полученного при модификации чугуна ПГ-УС25 комплексом: 8...10 мас. % сферорелита KBC-5; 1,5...2,5 мас. % карбида бора и 2...3 мас. % никелевого порошка ПТ-19Н-01. Как видно из рисунка, в материале покрытия не только произошло «залечивание» трещин, но и наблюдается химическое взаимодействие карбида бора с поверхностью гранул сферорелита, приводящее к формированию на границе раздела новой фазы - вольфрам-боридной эвтектики, имеющей характерную скелетообразную морфологию, что и приводит к увеличению адгезионного взаимодействия модификатора WC, W₂C с матрицей покрытия.

В табл. 1, приведены результаты химического анализа состава фаз покрытия, модифицированного комплексом 3...5 мас. % сферорелита + 1...1,5 мас. % В₄С, в контрольных точках (см. рис. 3), полученные рентгенофлуоресцентным микроанализом.

Таблица 1 - Результаты химического анализа состава фаз покрытия, модифицированного комплексом: 3...5 мас. % сферорелита + 1...1,5 мас. % В₄С

| Точка спектра (фаза) | Элемент, линия | Содержание элемента, % | |
|----------------------|--------------------|------------------------|---------|
| | | весовой | атомный |
| 1 | C, K _α | 08,91 | 32,81 |
| | Si, K _α | 02,24 | 02,32 |
| | Cr, K _α | 35,73 | 26,56 |
| | Mn, K _α | 02,39 | 01,98 |
| | Fe, K _α | 49,53 | 34,29 |
| | Ni, K _α | 00,09 | 00,07 |
| 2 | B, K _α | 02,23 | 01,53 |
| | C, K _α | 11,13 | 35,81 |
| | Si, K _α | 01,24 | 01,71 |
| | Cr, K _α | 33,37 | 24,16 |
| | Mn, K _α | 01,39 | 00,98 |
| | Fe, K _α | 42,53 | 29,12 |
| 3 | Ni, K _α | 00,99 | 00,65 |
| | C, K _α | 03,71 | 16,26 |
| | Si, K _α | 02,52 | 05,07 |
| | Cr, K _α | 24,84 | 26,98 |
| | Mn, K _α | 02,83 | 02,91 |
| | Fe, K _α | 59,38 | 60,05 |
| | Co, K _α | 00,55 | 00,39 |
| W, L _α | 07,68 | 02,36 | |
| B, K _α | 01,17 | 00,93 | |

Как следует из приведенных в таблице 1 данных, состав основных фаз полученного покрытия - борированной (точка 1) и небориро-

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОГО ЧУГУНА, ПОЛУЧЕННЫХ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКОЙ И УПРОЧНЕННЫХ СФЕРОРЕЛИТОМ

ванной (точка 2) эвтектики из карбидов Fe, Cr, по основным и растворенным элементам (Cr, Mn, Fe, Si) существенно не различается. Видно, что борирование этой фазы материала произошло, в основном, за счет изоморфного замещения в эвтектике Fe-Cr-C части углерода бором, о чем свидетельствует уменьшенная на 2...3 % доля этого элемента в фазе 1. Но введение В₄С в материал покрытия привело к увеличению в эвтектике содержания кремния, и практически полному вытеснению никеля, что подтверждается и данными работы [14].

Преобразования, происходящие на границе раздела гранул сферорелита с высокохромистым чугуном (точка 3) также изменяют состав основного материала, причем степень усвоения бора здесь выше, чем в случае точки 1, так как практически все количество углерода, определенное в точке 3, соответствует стехиометрической доле этого элемента в карбидной эвтектике WC-W₂C [21].

Однако рентгенофазовый анализ этого покрытия не выявил в нем новых фаз индивидуальных либо смешанных боридов, что еще раз подтверждает основную форму существования бора в модифицированных материалах - в составе эвтектик Fe-C-B, Fe-Me-C-B, где: Me - легирующий металл(ы), где он замещает часть углерода. В то время как образование в покрытии новых фаз специальных карбидов W₂Fe₂₁C₆, W₂Co₄C (рис. 3), свидетельствует о протекании поверхностных химических реакций за счет участия в них легкоплавкой эвтектики Fe-B и перераспределения углерода из имеющихся в материале карбидов и 3, 4-х эвтектик Fe-Cr-C-(B) [15].

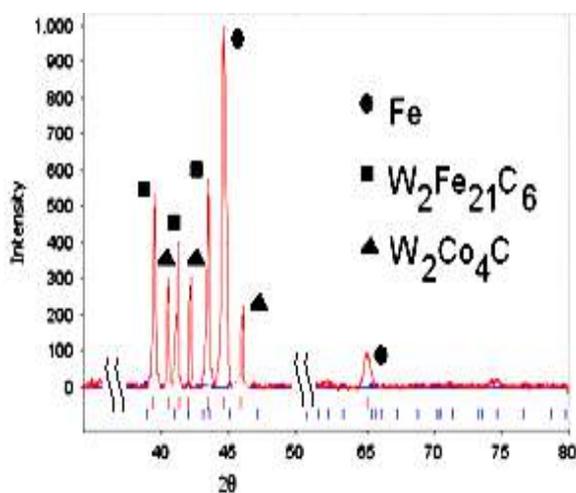


Рисунок 3 – Фрагмент рентгенограммы покрытия, модифицированного комплексом: 3...5 мас. % сферорелита + 1...1,5 мас. % В₄С

Отсутствие на рентгенограмме пиков FeB, Fe₂B, подобно, например, покрытиям, полученных нами ранее при ТВЧ-нагреве стали 65Г в шихте, содержащей 80...85 мас. % В₄С [22], как и отсутствие пиков боридов Cr, W, можно связать с малой общей долей бора как в вводимых комплексах (1...2,5), так и в шихте в целом (0,8...2 мас. %).

Проведенные исследования позволили разработать два оптимизированных состава шихты для промышленной индукционной наплавки высокохромистого чугуна ПГ-УС25, упрочненного сферорелитом, составы и некоторые свойства которых приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Составы шихты для индукционной наплавки покрытий из высокохромистого чугуна ПГ-УС25, упрочненных сферорелитом

| Шихта | Ингредиент | Содержание, масс. % | HRCэ |
|-------|------------------|---------------------|------|
| 1 | ПГ-С25 | 80...85 | 65 |
| | КВС-5 | 3...5 | |
| | В ₄ С | 1...1,5 | |
| | Флюс П-0,66 | остальное | |
| 2 | ПГ-С25 | 75...78 | 55 |
| | КВС-5 | 8...10 | |
| | В ₄ С | 1,5...2,5 | |
| | ПТ-19Н-01 | 2...3 | |
| | Флюс П-0,66 | остальное | |

По данным таблицы 2 можно выдать следующие рекомендации производству. Для получения тонких износостойких покрытий на режущих кромках деталей и упрочнения, например, термически обработанных ножей сельскохозяйственных машин, предпочтительнее воспользоваться составом № 1, так как твердость этого материала в 1,2...1,4 раза превышает твердость металла-основы (сталь 65Г), что обеспечивает лезвию эффект самозатачивания и увеличивает срок службы [2, 3]. Для получения же более толстых покрытий (стрельчатые лапы, молотки дробилок и пр.), а также в остальных случаях - можно рекомендовать состав № 2.

Для сравнительного теста на износостойкость были получены покрытия, толщиной 1,5...2 мм из базовой шихты [7], состава № 1, а также шихты модифицированной керметом Cr₃C₂/ПГ-УС25, полученным методом СВС, в количестве до 25...30 мас. %, как описано в работе [22]. Далее покрытия испытывались в одинаковых условиях, цикл: приработка 5 мин, испытание 30 мин.

На рисунке 4 приведена диаграмма, показывающая весовой износ (в %) образцов с исследованными покрытиями, где износ стали

65Г, термообработанной до твердости 55...57 HRCэ, был принят за эталон.

Из рисунка 4 видно, что износ покрытия из немодифицированного материала ПГ-УС25 в условиях испытаний составил 41 %, в то время как его упрочнение комплексом сферорелита с W_4C понижает эту величину до 32 %, что отвечает увеличению относительной износостойкости в 3,1 раза, но еще более высокую износостойкость в условиях теста - в 4,5 раза, показали полученные нами ранее покрытия, модифицированные керметом Cr_3C_2 /ПГ-УС25.

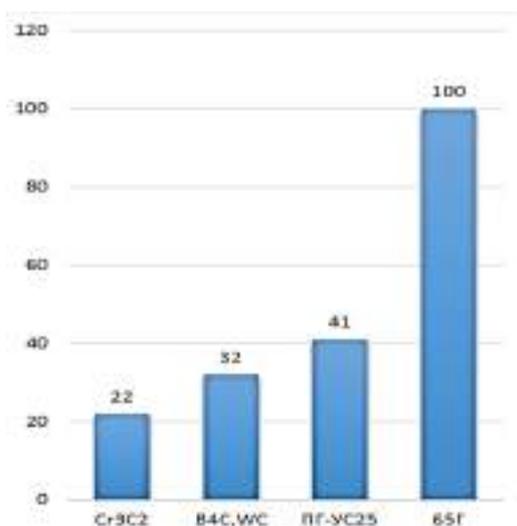


Рисунок 4 - Относительный весовой износ покрытий, модифицированных различными способами

ВЫВОДЫ

1. Предложено увеличивать износостойкость покрытий из высокохромистого чугуна ПГ-УС25, полученных индукционной наплавкой, их модификацией комплексом на основе сферорелита КВС-5 и W_4C .

2. Показано, что введение в базовую шихту для индукционной наплавки указанных компонентов позволяет повысить твердость покрытий (до 1000...1200 HV_{100}), а их износостойкость в 3,1 раза (по отношению к металлу-основе) и 1,3 раза (по отношению к базовому, не модифицированному материалу), в зависимости от массовой доли сферорелита в шихте.

3. Обнаруженные изменения структуры и свойств покрытий объясняются процессами: образования новых фаз (эвтектик Fe-B, 3, 4-х эвтектик Fe-Cr-C(B), специальных карбидов $W_2Fe_{21}C_6$, W_2Co_4C); -эффектом Шарпи; -измельчением и дисперсионным упрочнением эвтектик Fe-Cr-C при ТВЧ-борировании.

Благодарности

Авторы благодарят с.н.с., к.т.н. С.Г. Иванова и с.н.с., к.т.н. М.В. Логинову (ПНИЛ СВС ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», г. Барнаул) за проведение металлографических исследований и рентгенофазовый анализ образцов, а также проф., д.т.н. С.М. Шанчурова (ООО «Центр лазерных технологий», г. Екатеринбург) за любезно предоставленный образец сферорелита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трение, изнашивание и смазка: справочник, в 2-х кн./ Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Аликина. -Кн. 1. -М.: Машиностроение, 1978. -400 с.
2. Ткачев, В.Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. -М.: Машиностроение, 1971. -264 с.
3. Ишков, А.В. Композитные покрытия системы Fe-Cr-C-B для упрочнения деталей машин / А.В. Ишков, В.В. Иваныйский, Н.Т. Кривошуров. -Саарбрюккен: LAP LAMBERT, 2014. -286 с.
4. Наплавочные материалы стран-членов СЭВ: каталог. -Киев-М.: ВИНТИ, 1979, -619 с.
5. Laird G., Gundlach R., Röhrig K. Abrasion-resistant cast iron. Handbook / Ed. American Foundry Society. -Schaumburg, USA, 2000.
6. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление / Пер. с японск. В.Н. Попова. -М.: Машиностроение, 1985. -240 с.
7. Ткачев, В.Н. Индукционная наплавка твердых сплавов /В.Н. Ткачев, Б.М. Фиштейн, Н.В. Казинцев, Д.А. Алдырев. -М.: Машиностроение, 1970. -183 с.
8. Zum K., Eldis G.. Abrasive wear of white cast irons// Wear. 1980. -Vol. 64. -pp. 175-194.
9. Guilemany J.M., Miguel J.M., Vizcaino S., et al. Role of heat treatments in the improvement of the sliding wear properties of Cr_3C_2 -NiCr coatings // Surface Coating Technology. -2002. -Vol.157. -pp. 207-213.
10. Kazamer N., et al. A comparison between hardness, corrosion and wear performance of APS-Sprayed WC-CoMo and WC-Co coatings // Solid State Phenomena.-2016. -Vol. 254. -pp. 71-76. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.254.71>
11. Hou Y., Wang Y., Pan Z., Yu L. Influence of rare earth nanoparticles and inoculants on performance and microstructure of high chromium cast iron // Journal of Rare Earths. -2012. -Vol. 30. -pp. 283-288.
12. Рябцев И.А., Панфилов А.И., Бабинцев А.А., и др. Структура и износостойкость при абразивном изнашивании наплавленного металла, упрочненного карбидами различных типов // Автоматическая сварка. -2015. -№ 5-6(742). -С.84-88.
13. Sahraoui T., Fenineche N.-E., Montavon G., Coddet C. Structure and wear behaviour of HVOF-sprayed Cr_3C_2 -NiCr and WC-Co coatings // Materials & Design. -2003.-№ 24. -pp. 309-313. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00059-1](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00059-1)
14. Ivanov S.G., Garmeva I.A., Guriev M.A., et al. Features of Multicomponent Saturation Alloyed by

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОГО ЧУГУНА, ПОЛУЧЕННЫХ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКОЙ И УПРОЧНЕННЫХ СФЕРОРЕЛИТОМ

Steels / A. Evgrafov (ed.) // Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. -Springer International Publishing, Switzerland, 2015. - pp. 49-54. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-15684-2_7

15.Suetin D.V., Shein I.R, Ivanovskii A.L. Structural, electronic and magnetic properties of η -carbides (Fe₃W₃C, Fe₆W₆C, Co₃W₃C and Co₆W₆C) from first principles calculations, Physica B, -2009. -Vol.404. -pp 3544-3549.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2009.05.051>

16.Weidow A, Andrén H.-O. Grain and phase boundary segregation in WC-Co with TiC, ZrC, NbC or TaC additions // Int. J. Refractory Met. HardMater. - 2011. -Vol.29. -pp. 38-43.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2010.06.010>

17.Okovityi V.A. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant // Welding International. -2002. -Vol. 16, -issue. 11. -pp. 918-920.

18.Кривочуров Н.Т., Иванайский В.В., Ишков А.В., Щеголев А.В. Об эффективности различных вариантов упрочнения ножей измельчителя-разбрасывателя соломы зерноуборочного комбайна // Вестник АГАУ. -2018. -№ 9 (167). – в печати.

19.Shchegolev A.V., Aulov V.F., Ishkov A.V., et al. Modification of wear-resistant coatings of Fe-Cr-C system based on the Cr₃C₂ obtained with help of SHS method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. -2018. -Vol. 441, -№ 012047. DOI:<https://doi.org/10.1088/1757-899X/441/1/012047>

20.Журда А.П. Наплавочные материалы на основе карбидов вольфрама // Автоматическая сварка. -2014. -№ 6-7. -С. 69-74.

21.Massalski T.B., Okamoto H., Subramanian P.R., and Kasprzak L. Binary Alloy Phase Diagrams, ASM International, Materials Park, 1990.

22.Мишустин Н.М., Иванайский В.В., Ишков А.В. Состав, структура и свойства износостойких покрытий, полученных на сталях 65Г и 50ХГА при скоростном ТВЧ-борировании // Известия ТПУ. - 2012. -Т. 320. -№ 2. -С. 68-72.

23.Portnoi K.I., Levinskaya M.K., and Romashov V.M. Constitution Diagram of the System Iron-Boron // Sov. Powder Metall. Met. Geram., -1969, -Vol. 8, -pp. 657-659.

Ишков Алексей Владимирович – д.т.н., доцент, профессор кафедры ТКМиРМ, ФГБОУ ВО «Алтайский ГАУ», e-mail: alekseyyishk@rambler.ru.

Иванайский Виктор Васильевич – д.т.н., с.н.с., профессор кафедры ТКМиРМ, ФГБОУ ВО «Алтайский ГАУ», e-mail: viv174@bk.ru.

Кривочуров Николай Тихонович – к.т.н., доцент, зав. кафедрой ТКМиРМ, ФГБОУ ВО «Алтайский ГАУ», e-mail: krivochurov_nt@mail.ru.

Щеголев Александр Владимирович – аспирант кафедры ТКМиРМ, ФГБОУ ВО «Алтайский ГАУ», e-mail: qqq681@mail.ru.

Аулов Вячеслав Федорович – к.т.н., с.н.с., зав. лабораторией ФГБНУ ФНАЦ «ВИМ», e-mail: gosniti@mail.ru.

Лялякин Валентин Павлович – д.т.н., профессор, гл. научн. сотрудник ФГБНУ ФНАЦ «ВИМ», e-mail: valpal-1938@mail.ru.