

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШЕЕЛИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ, ВОССТАНОВЛЕННОЙ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКЕ

Использование при электрошлаковой наплавке готовых легирующих порошков повышает стоимость готовой детали, что обуславливает низкий экономический эффект восстановления деталей и стимулирует поиск более дешевых материалов для легирования наплавляемых деталей. Проведено исследование эффективности легирования наплавляемого металла через расплавленную вставку, а также путем прямого введения легирующих порошков в состав шихты. В качестве легирующих порошков использовались смеси на основе обогащенного минерального шеелитового концентрата и порошка графита. Выявлено, что при легировании наплавленного металла через вставку, наилучшей износостойкостью обладает образец, наплавленный с применением вставки, состоящей из шеелитового концентрата и графита в соотношении 1/3,5, с последующей закалкой в воде. При добавлении шеелитового концентрата во флюс до 25 % по массе удалось повысить износостойкость наплавленного металла за счет более благоприятных условий для восстановления вольфрама.

**Ключевые слова:** легирование, электрошлаковая наплавка, шеелитовый концентрат, углетермическое восстановление.

**Введение.** В современном машиностроении немаловажным направлением является получение новых материалов, обладающих повышенными физико-механическими свойствами, а также совершенствование способов их обработки. Для получения материалов с повышенными прочностными свойствами и износостойкостью требуется совершенствовать методы обработки [1, 2], а также составы сплавов, используя легирование такими элементами, как хром, вольфрам, титан, молибден, редкоземельными металлами и др. [3].

Для ремонта деталей, имеющих большие объемные износы, чаще всего используют различные способы наплавки. При этом стремятся получить наплавленную поверхность детали с заданными свойствами, в том числе — повышенными свойствами износостойкости.

**Теория.** К деталям, подверженным интенсивному абразивному изнашиванию, относятся била молотковых мельниц, зубья рыхлителей, пальцы черпаковых цепей и другие.

Процесс эксплуатации таких деталей может приводить к настолько стремительному абразивному износу, в результате которого срок службы до замены или ремонта сокращается до одной — пяти рабочих смен.

Так, анализ эксплуатации черпаковой цепи показал, что отдельные пальцы, работающие на глинистых и илистых грунтах, меняются с частотой от 3 до 7 дней, а при работе на песчаных грунтах максимальный износ на некоторых втулках может быть достигнут за одни сутки. Бывали случаи, когда при работе на крупнозернистых грунтах кольца, установленные в проушинах черпака, изнашивались катастрофически, и это приводило к длительным простоям и замене черпака полностью [4].

Если рассматривать рабочие органы землеройных машин или мельниц, то при воздействии абразивного материала при ударе под углом  $70^\circ - 90^\circ$  происходит так называемое ударно-абразивное изнашивание. В этом случае на поверхности детали образуется микрорельеф, состоящий из множества лунок от внедрения абразивных частиц. При ударе под углом от 5 до 70 градусов и, как правило, последующем царапании на поверхности образуются риски.

Для сопротивления процессу абразивного износа наплавленный материал должен, с одной стороны, иметь высокую твердость, а с другой — высокую ударную вязкость. Повышенная твердость препятствует внедрению абразивных частиц в поверхность с последующим царапанием со снятием

стружки. Повышение твердости материала приводит к его хрупкости. При ударном воздействии абразивных частиц происходит выкрашивание материала, что приводит к более интенсивному изнашиванию. Препятствует данному процессу повышенная ударная вязкость материала.

Для изготовления деталей, подверженных ударно-абразивному износу, применяют высокомарганцевую сталь 110Г13Л. Данная сталь обладает способностью к самоупрочнению в результате пластической деформации, приводящей к наклепу. Это обусловлено специфическими свойствами марганцевого аустенита. Но при отсутствии динамических и высоких статических нагрузок абразивная износостойкость данной стали не выше углеродистых сталей, таких как сталь 45. Это говорит о том, что при разном сочетании абразивного и ударно-абразивного износа необходимо подбирать конкретные составы легирования и характеристики наплавленного материала.

Для повышения износостойкости деталей путем легирования чаще всего вводят легирующие добавки в наплавляемый материал. Производят это путем добавления легирующих порошков в шихту и применения порошковых проволок [5, 6]. Также применяются способы приклеивания или пайки твердых сплавов или металлокерамики [7, 8], либо местной послойной наплавки рабочей поверхности [9]. При этом, как отмечается в большинстве исследований, присутствие в матрице сплава большого количества включений фазы с высокими показателями микротвердости не всегда обеспечивает значительное повышение износостойкости. Чаще всего это связано с тем, что такие включения не прочно закреплены в матрице сплава и выкрашиваются при воздействии абразивных частиц. Такие включения более эффективно сопротивляются абразивному износу при трении качения, но не при скольжении по абразивным частицам.

Поверхностная закалка рабочих поверхностей также имеет свои недостатки. Под действием ударов абразивных частиц высокотвердые поверхности не только изнашиваются, но и растрескиваются. Выкрашивание твердых поверхностных слоев при ударно-абразивном износе происходит интенсивнее их изнашивания.

При восстановлении изношенных деталей используют различные методы наплавки. Также наплавку применяют для упрочнения деталей путем нанесения на их рабочие поверхности армирующих покрытий, обладающих требуемыми свойствами, такими как термостойкость, износостойкость, коррозионностойкость и т.п.

Восстановление деталей, имеющих большой объемный износ, целесообразно проводить электрошлаковой наплавкой (ЭШН) [10] с последующей термообработкой. При этом при восстановлении необходимо повышать износостойкость наплавленного металла.

**Цель.** Целью работы является исследование эффективности легирования наплавляемого металла с помощью минеральных горнорудных концентратов, содержащих значительное количество соединений легирующих материалов, но при этом имеющих более низкую стоимость относительно готовых легирующих составов и порошковых материалов.

**Методики и материалы.** Для проведения ЭШН разработана лабораторная установка. Наплавка проводилась электродом 1 (рис. 1) в охлаждаемом кристаллизаторе 2. Для легирования рабочей поверхно-

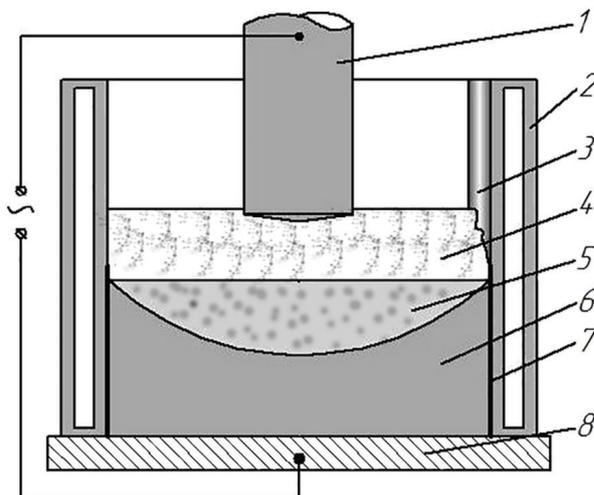


Рис. 1. Схема ЭШН образцов:  
1 — расплавляемый электрод;  
2 — кристаллизатор;  
3 — легирующая вставка;  
4 — шлаковая ванна;  
5 — металлическая ванна;  
6 — восстанавливаемая деталь;  
7 — гарнисаж; 8 — станина

сти в кристаллизатор устанавливалась легирующая вставка 3, которая расплавлялась в шлаковой ванне 4, участвуя в процессе образования металлической ванны 5 с целью легирования наплавляемого металла детали 6. В процессе наплавки на границе кристаллизатора 2 и наплавляемого металла образуется гарнисаж 7. Электрический ток подводится к расплавляемому электроду 1 и станине 8, на которой устанавливается наплавляемая деталь 6.

Для образования шлаковой ванны применялся кремнисто-марганцевый флюс сварочный АН-348А (ГОСТ 9087–81). В качестве расплавляемого электрода применялся пруток из конструкционной стали 25Г2С (ГОСТ 5781–82) диаметром 10 мм. В процессе наплавки сварочный ток изменялся в интервале от 313 до 395 А, напряжение — от 31 до 42 В.

При выполнении лабораторных наплавочных работ в небольшом объеме процесс наведения жидкой шлаковой ванны затруднен при небольших величинах тока, а при повышении тока процесс переходит в электродуговой с интенсивным разбрызгиванием шлака. Для организации стабильного электрошлакового процесса и создания жидкой шлаковой ванны флюс нагревался в графитовом тигле генератором ТВЧ и в расплавленном состоянии заливался в кристаллизатор в момент начала процесса наплавки.

Для легирования наплавляемого материала можно использовать три способа. В качестве первого способа легирование через вставку, устанавливаемую в кристаллизатор со стороны рабочей поверхности. При втором способе трубчатый электрод заполняется легирующим составом, либо электрод с обмазкой легирующими порошками с последующей сушкой в печи. При третьем способе легирования смесь подается в шлаковую ванну через дозатор либо происходит смешивание шихты с легирующими порошками до процесса наплавки.

При втором и третьем способе увеличивается расход легирующих смесей, что ограничивает применение данных способов, особенно при использовании дорогостоящих легирующих порошковых

Износостойкость и твердость наплавленных образцов при использовании систем легирования

№	Легированная система	Потеря массы при износе за минуту, мг/мин	Твердость, HRC
1	Без легирования	122	26
2	100 % графит	96	33
3	100 % графит + закалка	40	60
4	100 % графит (флюс + 25 % шеелит)	60	47
5	100 % шеелит	113	30
6	50 % графит + 50 % шеелит	92	39
7	50 % графит + 50 % шеелит + закалка	35	63
9	80 % шеелит + 20 % графит	105	30
10	22 % шеелит + 78 % графит	68	44
11	22 % шеелит + 78 % графит + закалка	31	64

материалов. В качестве основного выбран первый способ легирования через вставку. Вставка изготавливается из смеси легирующего порошка (графит + шеелитовый концентрат в различных пропорциях) с жидким стеклом с последующим прессованием под давлением 2,8 МПа и запеканием в печи при температуре 320 °С в течение 20 мин. В кристаллизаторе выполнен паз по форме «ласточкин хвост» для установки вставки.

Определение износостойкости образцов проводилось по методу испытания материалов о не жестко закрепленные абразивные частицы (ГОСТ 23.208–79). Абразивный материал — электрокорунд зернистостью № 16–П по ГОСТ 3647–71. Износ оценивался по потере массы образца. Масса образцов до и после испытания определялась на весах АДВ–200 с точностью  $\pm 2 \cdot 10^{-4}$  г.

Для легирования наплавляемых материалов чаще всего используют системы: Cr–Mn; Cr–B; Cr–Ni; Cr–W–V; Fe–C–Cr–Ni–Mn–Mo–Ti–Nb [11]; Fe–Cr–Mn–N [12] и другие. Повышенной абразивной износостойкостью обладают детали, легированные порошками с карбидами вольфрама, хрома, марганца и молибдена. Также не редко для легирования используют высокохромистые сплавы со значительным содержанием бора, титана и углерода.

Но, как уже отмечалось ранее, применение готовых легирующих порошков металлов при восстановительной наплавке рабочих органов машин с ограниченным сроком службы нерационально в связи с их высокой стоимостью. Экономически эффективнее применять для легирования различные полуфабрикаты или отходы производства, а также горнорудные минеральные концентраты. Так, применение углеродфторсодержащей добавки, представляющей собой отходы алюминиевого производства, при наплавке металла прокатных валков привело к снижению концентрации оксидных неметаллических включений, более равномерному распределению углерода в металле и образованию мелкодисперсных карбидов, что привело к улучшению качества поверхности и микроструктуры

наплавленного слоя, понижению содержания водорода и увеличению твердости [13]. Применение отходов различных производств при производстве и восстановлении деталей имеет повышенную актуальность в современном мире.

В связи с этим для легирования наплавки выбран вольфрамсодержащий шеелитовый минеральный горнорудный концентрат, производимый Лермонтовским горнообогатительным комбинатом (мас. %  $WO_3$ –59,5; CaO–26,8;  $Fe_2O_3$ –3,78;  $SiO_2$ –2,9;  $Fe_3O_4$ –1,84; MgO–1,65; FeO–0,61; P–0,31;  $Na_2O$ –0,24;  $TiO_2$ –0,20; S–0,20;  $K_2O$ –0,15; As–0,01; прочие — 1,85).

Данный минеральный концентрат содержит компоненты, которые позволяют создать легирующую систему при электрошлаковой наплавке. Легирование наплавленного металла может быть реализовано через содержащийся в концентрате оксид вольфрама.

**Обсуждение результатов.** При использовании для легирования вставки из спеченного шеелитового порошка, имеющиеся в расплавленной шлаковой ванне условия не способствуют переходу вольфрама из шеелитового концентрата в металл, что характеризуется незначительным повышением износостойкости наплавленного материала. Спектральным анализом наплавленных материалов и шлака выявлено, что большая часть вольфрама концентрата осталась в шлаке в оксидной форме.

Для интенсификации процесса восстановления вольфрама из шеелитового концентрата использован порошок графита, который, кроме того что приводит к углетермическому восстановлению вольфрама, является также карбидообразующим элементом. При увеличении карбидов в наплавленном металле повышаются его физико-механические свойства. Также совместное легирование наплавленного материала вольфрамом и углеродом приводит к образованию более мелкого аустенитного зерна, что приводит к повышению твердости материала, понижению внутренних напряжений и склонности к образованию холодных трещин.

Проведен ряд опытных наплавов с применением различных систем и способов легирования, характерные из которых представлены в табл. 1.

Эффективность применяемой системы и способа легирования сравнивалась с образцом № 1, наплавленным без легирования. Наплавка образцов № 2, № 3 и № 4 проводилась при установке легирующей вставки, изготовленной из порошка графита, спеченного с жидким стеклом. При наплавке образца № 4 во флюс добавлен шеелитовый концентрат в соотношении по массе: флюс 75 %, шеелит 25 %. При наплавке образца № 5 устанавливалась легирующая вставка, выполненная из шеелитового концентрата, спеченного с жидким стеклом. При наплавке образцов с № 6 по № 11 легирующую вставку изготавливали из смеси шеелитового концентрата и графита в разных пропорциях. Образцы № 3, № 7 и № 11 после наплавки дополнительно подвергались закалке в воде (при нагреве до 850 °С).

При выполнении серии экспериментов с помощью симплексного метода планирования выявлено, что наилучший результат по износостойкости имеет образец (в табл. 1 под номером № 11) с легированием через вставку, состоящую из шеелитового концентрата и графита в соотношении 1/3,5 с последующей закалкой в воде. Меньшее количество шеелита во вставке приводит к тому, что шеелит в составе вставки не достаточно восстанавливается до вольфрама и менее интенсивно участвует в легировании рабочей поверхности, чем графит.

Также проведены исследования характеристик наплавленных образцов, в которых шеелитовый концентрат добавлялся во флюс перед наплавкой в количестве до 25 % по массе (образец № 4 в табл. 1).

В результате при таком способе легирования удалось получить большую твердость и износостойкость среди образцов, не подверженных закалке. Это можно объяснить тем, что шеелит расплавляется вместе с флюсом, перемешивается и, взаимодействуя с графитом вставки, восстанавливается и более эффективно легирует рабочую поверхность детали.

При этом подмешивание графита во флюс приводит к всплыванию на поверхность шлаковой ванны графита и появлению пробоев электрической дуги между электродом и кристаллизатором.

**Выводы.** Проведены исследования по пригодности применения для легирования наплавленного металла горнорудных минеральных концентратов. Для испытаний выбран шеелитовый минеральный концентрат, производимый Лермонтовским горно-обогатительным комбинатом с массовым содержанием  $WO_3$  не менее 59,5 %.

Для реализации восстановительных процессов, а также дополнительного легирования рабочей поверхности в состав вставки добавлялся порошок графита. Выявлено, что наименьший относительный износ имеет образец с легированием через вставку, состоящую из шеелитового концентрата и графита в соотношении 1/3,5, с последующей закалкой в воде. При этом достигаемая твердость наплавленного металла 64 HRC, а износ составляет 31 мг за минуту.

#### Библиографический список

1. Гаркунов Д. Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин). 5-е изд., перераб. и доп. Москва: Изд-во МСХА, 2002. 632 с.

2. Тененбаум М. М. Сопrotивление абразивному изнашиванию. Москва: Машиностроение, 1976. 271 с.

3. Усольцев А. А., Кибко Н. В., Козырев Н. А., Бащенко Л. П., Гусев А. И. Исследование качества металла, наплавленного порошковыми проволоками системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2018. № 1. С. 5–10.

4. Петровский В. А., Рубан А. Р. Результаты исследования абразивного износа деталей черпаковой цепи земснаряда // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. 2014. № 1. С. 94–99.

5. Артемьев А. А., Соколов Г. Н., Дубцов Ю. Н., Лысак В. И. Формирование композиционной структуры износостойкого наплавленного металла с боридным упрочнением // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2011. № 2. С. 44–48.

6. Языки А., Чавдар Ю. Исследование пахотного инструмента из борированного спеченного железа // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 12. С. 56–60.

7. Сенчишин В. С., Пулька Ч. В. Современные методы наплавки рабочих органов почвообрабатывающих и уборочных сельскохозяйственных машин // Автоматическая сварка. 2012. № 9 (13). С. 48–54.

8. Ишков А. В., Кривочуров Н. Т., Мишустин Н. М. Износостойкие боридные покрытия для почвообрабатывающих органов сельхозтехники // Вестник АГАУ. 2010. № 9 (71). С. 71–75.

9. Ожегов Н. М., Капошко Д. А., Будко С. И. Методы снижения изнашивающей способности почвы при трении деталей почвообрабатывающих машин // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2009. № 13. С. 132–133.

10. Кусков Ю. М., Соловьев В. Г., Жданов В. А. Торцевая электрошлаковая наплавка электродом большого сечения в токоподводящем кристаллизаторе // Автоматическая сварка. 2017. № 12. С. 40–45. DOI: 10.15407/as2017.12.05.

11. Прияткин Д. В., Артемьева А. А., Лойко П. В., Соколов Г. Н., Лысак В. И. Исследование структуры и свойств износостойкого наплавленного сплава системы Fe-C-Cr-Ni-Mn-Mo-Ti-Nb // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. № 6. С. 71–75. DOI: 10.35211/1990-5297-2020-6-241-71-75.

12. Нефедьев С. П., Дёма Р. Р., Котенко Д. А. Абразивная и ударно-абразивная износостойкость твердых наплавленных покрытий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2015. № 1. С. 103–106.

13. Уманский А. А., Козырев Н. А., Титов Д. А. Экспериментальные исследования влияния состава порошковых проволок систем легирования C-Si-Mn-Cr-V-Mo и C-Si-Mn-Cr-W-V на структуру наплавленного слоя прокатных валков // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2016. № 4. С. 74–79.

**КОМКОВ Вячеслав Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», и. о. заведующего кафедрой.

SPIN-код: 1056-7631

AuthorID (РИНЦ): 492836

AuthorID (SCOPUS): 36106842900

ORCID: 0000-0002-3281-5795

Адрес для переписки: 005550@pnu.edu.ru

**ГУБАРЬ Сергей Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания».

SPIN-код: 8753-8089  
AuthorID (РИНЦ): 1014013  
ORCID: 0000-0002-8099-525X

**ВОСКРЕСЕНСКИЙ Геннадий Гаврилович**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Транспортно-технологические системы в строительстве и горном деле».

SPIN-код: 5560-3386  
AuthorID (РИНЦ): 852990  
ORCID: 0000-0003-1253-6833

#### Для цитирования

Комков В. Г., Губарь С. А., Воскресенский Г. Г. Использование шеелитового концентрата для повышения износостойкости рабочей поверхности, восстановленной при электрошлаковой наплавке // Омский научный вестник. 2021. № 1 (175). С. 17–21. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-17-21.

Статья поступила в редакцию 28.12.2020 г.  
© В. Г. Комков, С. А. Губарь, Г. Г. Воскресенский