

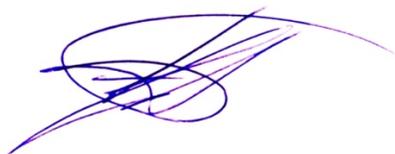
На правах рукописи

Андрянов Юрий Владиславович

**РАЗРАБОТКА ПРИСАДОЧНОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ
НАПЛАВКИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ, АРМИРОВАННЫХ
КАРБИДАМИ ТИТАНА**

2.5.8. – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
КОБЕРНИК Николай Владимирович
МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий кафедрой

Официальные оппоненты: доктор технических наук
ШОЛОХОВ Михаил Александрович
ООО «Шторм», директор

кандидат технических наук, доцент
ПЛОМОДЬЯЛО Роман Леонидович
ФГБОУ ВО «КубГТУ», заведующий кафедрой

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»**

Защита состоится «25» декабря 2025 года в 14:30 на заседании диссертационного совета 24.2.331.20 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: 8 (499) 267-66-33, доб 4057

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <https://bmstu.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 года

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н



А.С. Панкратов

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Срок эксплуатации различных деталей и узлов оборудования, работающих в условиях интенсивного абразивного износа, зависит от износостойкости их контактных поверхностей. Так, например, внутренние поверхности бетоносмесителей принудительного действия испытывают значительное абразивное воздействие в результате трения как мелких частиц песка, так и ударов крупных частиц щебня в жидкой среде.

Эффективным способом продления срока службы таких изделий является применение специальных износостойких материалов. Как правило, в промышленности преобладают два подхода к обеспечению необходимого уровня износостойкости. Первый – применение гомогенных материалов, однако в связи с низкой износостойкостью и отсутствием отечественных материалов такой подход малоэффективен. Второй подход заключается в применении биметаллических материалов, получаемых методом дуговой наплавки порошковыми проволоками. Такие материалы представляют собой подложку из низкоуглеродистой стали, на поверхность которой нанесено износостойкое покрытие. Перспективность применения порошковых проволок для наплавки таких покрытий обусловлена в первую очередь более широким диапазоном легирования наплавленного металла в сравнении с применением других наплавочных материалов.

Большой вклад в теорию и практику разработки порошковых проволок для наплавки покрытий, стойких к абразивному износу, внесли Соколов Г.Н., Зорин И.В., Орлик А.Г., Данильченко Б.В., Лившиц Л.С., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Еремин Е.Н., Лосев А.С., Коберник Н.В., Пломодьяло Р.Л., Berns H., Correa E.O., Li H.Y, He D. и другие.

Наплавка износостойких покрытий с использованием порошковых проволок позволяет применить комплексное легирование (*ex-situ*) наплавленного металла. Суть комплексного легирования заключается во введении твердых частиц в сварочную ванну в готовом виде. Одним из таких компонентов является карбид титана (TiC). Высокая температура плавления и твердость карбида титана в сочетании с его хорошей смачиваемостью делают перспективным его использование в износостойких покрытиях. Однако, сохранение TiC в наплавленном металле происходит лишь частично, что связано с высокотемпературным воздействием дуги. Перспективным является введение данного компонента в наплавленный металл через дополнительную присадочную порошковую проволоку, что за счет снижения температурного воздействия дуги должно способствовать большему сохранению вводимых в сварочную ванну карбидов.

Следует отметить, что повышение износостойкости наплавляемых покрытий зависит не только от наличия твердых фаз, но и от свойств матрицы, которые обеспечиваются легированием наплавленного металла С, Cr, В, Nb, Ti и другими элементами. В случае применения схемы наплавки с использованием присадочного материала легирование наплавленного металла может осуществляться как через электродную, так и присадочную проволоку.

На сегодняшний день, рынок порошковых проволок преимущественно представлен зарубежными материалами, что подтверждает актуальность разработки новых отечественных порошковых проволок для наплавки покрытий, стойких к абразивному износу. Кроме того, актуальность выбранной темы диссертационной

работы также подтверждается ее выполнением в рамках реализации государственного задания по теме «Физико-технологические основы применения высокоэнергетической обработки при изготовлении порошковых проволок для наплавки композиционных покрытий» (код научной темы FZFS-2023-0004).

Цель работы: повышение износостойкости деталей, работающих в условиях абразивного износа, путем дуговой наплавки покрытий системы Fe-C-Cr-Nb-B+(TiC) с применением дополнительной присадочной порошковой проволоки.

Задачи работы:

1. Изучить принципы формирования наплавленного металла при наплавке с дополнительной присадкой.
2. Разработать состав присадочной и выбрать состав электродной порошковых проволок для наплавки износостойкого покрытия системы Fe-C-Cr-Nb-B+(TiC).
3. Исследовать влияние применения присадочной порошковой проволоки, в состав которой введен TiC, на структуру наплавленного металла.
4. Исследовать износостойкость наплавленных покрытий, полученных с применением разработанной присадочной порошковой проволоки против абразивного износа.

Методы исследований: результаты работы получены путем теоретических и экспериментальных исследований. Изготовление порошковых проволок осуществляли на специальном лабораторном стане. Эксперименты по плакированию частиц карбида титана никелем проводили с помощью лабораторной планетарной мельницы PBM-V-0.4L-220V с последующим анализом фракционного состава порошка с помощью ситового анализа и анализа насыпной плотности по ГОСТ 19440-94. Наплавку экспериментальных порошковых проволок проводили с применением специального роботизированного комплекса, а также полностью механизированного оборудования Kemppi для сварки плавящимся электродом в среде защитных газов, в том числе и с применением дополнительной присадочной проволоки. Химический состав наплавленных покрытий определяли оптико-эмиссионным методом с помощью спектрометра Q8 MAGELLA. Исследование микроструктуры наплавленных покрытий проводили с помощью оптической и растровой электронной микроскопии с применением оптического микроскопа Zeiss Axiovert 200 MAT и растровых электронных микроскопов Tescan VEGA II LMU с системой рентгеноспектрального микроанализа (PCMA) Oxford INCA Energy 350 и Versa 3D. Анализ полученных снимков микроструктуры проводили с применением специального ПО ImageJ. Твердость наплавленных покрытий оценивали по шкале HRC с использованием твердомера ТК-2М при нагрузке в 1500 Н. Износостойкость наплавленных покрытий оценивали по авторской методике проведения испытаний на гидроабразивный износ, а также при проведении испытаний на трение о нежестко закрепленный абразив (ASTM G 65 методика В). Обработку полученных данных проводили с использованием программы Microsoft Excel.

Научная новизна работы:

1. Показано, что применение дополнительной присадочной порошковой проволоки, состоящей на 30% из TiC, при наплавке электродной проволокой, обеспечивающей систему легирования C-Cr-Nb-B, способствует увеличению относительной износостойкости наплавленного металла к гидроабразивному износу в 2,3 раза за счет увеличения размера и количества мелкодисперсной карбидной фазы

(с 3,8 мкм до 5,8 мкм и с 4,6% до 7,9% соответственно), и появления в наплавленном металле крупного карбида титана в количестве 2,2%.

2. Установлено, что при введении присадочной порошковой проволоки с TiC со стороны хвостовой части сварочной ванны наблюдается большее сохранение вводимого карбида в наплавленном металле, чем при вводе с передней стороны, что обеспечивается снижением температурного воздействия на компоненты шихты присадочной проволоки.

3. Установлено, что при совместной обработке порошков карбида титана и никеля в планетарной мельнице, на поверхности карбида формируется композиционное покрытие с никелевой матрицей и карбидом титана.

4. Установлено, что максимальная доля плакирования поверхности частиц карбида титана, при его совместной обработке в планетарной мельнице с порошком никеля, составляет 65%. При этом, дальнейшее увеличение частоты вращения водила планетарной мельницы не приводит к увеличению доли плакирования карбида титана, что связано измельчением частиц карбида титана и налипанию обрабатываемой смеси порошков на стенки стаканов.

Практическая значимость работы:

Разработана присадочная порошковая проволока диаметром 2 мм с карбидом титана для наплавки износостойких покрытий системы Fe-C-Cr-Nb-B+(TiC). Предложена схема наплавки износостойких покрытий с использованием разработанной присадочной порошковой проволоки совместно с электродной проволокой при подаче присадочной проволоки со стороны хвостовой части сварочной ванны для обеспечения большего сохранения карбида титана в наплавленном металле. Результаты работы внедрены на АО «БетЭлТранс».

Достоверность результатов и выводов подтверждается использованием современных методов исследования, научно-обоснованных и апробированных методик инженерного анализа и обработки данных, а также, результатами опытной верификации полученных теоретических результатов.

На защиту выносятся:

1. Влияние частиц карбида титана, введенных в состав шихты дополнительной присадочной порошковой проволоки, на структуру и свойства наплавленного металла системы Fe-C-Cr-Nb-B+(TiC).

2. Влияние схемы ввода дополнительной присадочной порошковой проволоки на формирование структуры наплавленного металла.

3. Механизм плакирования частиц карбида титана никелем при их совместной обработке в планетарной мельнице.

Апробация работы: основные положения диссертационной работы доложены на IV Международном форуме «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии» (г. Москва, 2021), XXIX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (г. Москва, 2022), Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии, оборудование и материалы заготовительных производств в машиностроении» (г. Москва, 2022), V Международном форуме «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии» (г. Москва, 2022), 60-ой Внутривузовской научной конференции (г. Волгоград, ВолгГТУ, 2023), Международной научно-технической конференции, посвященной 135-летию изобретения Н.Г. Славяновым электродуговой сварки плавящимся

электродом (г. Пермь, 2023), Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, 2023), Международной научно-технической конференции «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (г. Могилев, 2023), I Всероссийской научно-технической конференции имени академика РАН Н.П. Алешина (МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024), 62-ой Внутривузовской научной конференции (г. Волгоград, ВолгГТУ, 2025) и научном семинаре кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2025).

Личный вклад соискателя заключается в непосредственном выполнении всех этапов исследования по теме диссертации. Автором самостоятельно проведен анализ литературных источников, выполнены теоретические и экспериментальные исследования, включая изготовление присадочных порошковых проволок и их наплавку. Автором лично проведены обработка и анализ полученных результатов, а также подготовлены и представлены доклады на конференциях и семинаре.

Публикации по теме диссертации: по материалам диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 7 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 9 статей в Scopus.

Структура и объем диссертации: диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы из 82 наименований. Диссертация изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 74 рисунка и 9 таблиц.

Содержание работы

Во введении показана актуальность выбранного направления исследования и сформулирована цель и задачи работы.

В первой главе приведены общие сведения о материалах, применяемых для изготовления футеровки донной части бетоносмесителей принудительного действия, работающих в условиях абразивного износа. Показано, что элементы футеровки изготавливают как из гомогенных материалов (Hardox 450, 65Г) так и из биметаллических плит, полученных при наплавке порошковыми проволоками. Также установлено, что биметаллические материалы обладают более высокими значениями износостойкости, что подтверждает перспективность применения материалов, представляющих собой комбинацию: низкоуглеродистая сталь – износостойкое покрытие. Высокие показатели стойкости к абразивному износу таких покрытий обеспечиваются за счет легирования наплавленного металла углеродом (С), хромом (Cr), ниобием (Nb), бором (В), титаном (Ti) и др., посредством введения необходимых компонентов в состав шихты наплавочных порошковых проволок.

Одним из перспективных направлений повышения износостойкости наплавляемых покрытий является осуществление комплексного (ex-situ) легирования наплавленного металла на железной основе твердыми частицами карбидов. Суть комплексного легирования заключается во введении твердых частиц в сварочную ванну в готовом виде и обеспечение их сохранения в наплавленном металле. Полученные таким образом композиционные материалы, имеют более высокие показатели износостойкости.

Одним из перспективных карбидов с точки зрения обеспечения комплексного легирования наплавляемого металла является карбид титана. Его высокие значения микротвердости (32000 МПа), температуры плавления (выше 3100 °С),

термодинамической стабильности и хорошей смачиваемости позволяют обеспечить высокие показатели износостойкости.

Однако, при использовании карбидов наблюдается их частичное растворение в сварочной ванне, что способствует снижению износостойкости наплавленного металла. В связи с этим, перспективным является применение присадочных порошковых проволок. Yiming Huang предложил комплексное легирование наплавленного металла путем введения тугоплавких карбидов в состав присадочной порошковой проволоки. Такой подход позволил обеспечить сохранение армирующей фазы в наплавленном металле более 8%. При этом рассматривали процесс наплавки неплавящимся вольфрамовым электродом, что является низкопроизводительным и неперспективным при изготовлении биметаллических плит.

Перспективным с точки зрения производительности наплавки износостойких покрытий является применение дополнительной присадочной проволоки совместно с электродной при наплавке в среде защитных газов. Наплавка в данном случае происходит с участием двух проволок: электродной, на которой горит сварочная дуга, и присадочной, которая дополнительно вводится в сварочную ванну. Данный способ позволяет не только повысить производительность наплавки за счет введения большего количества наплавленного металла, но и снизить долю участия основного металла.

Не менее важным при наплавке композиционных покрытий является матрица наплавленного металла, которая должна обеспечивать высокие показатели износостойкости и, кроме того, обеспечивать надежную фиксацию карбидов, следовательно, хорошо смачивать применяемые карбиды титана. При наплавке композиционных покрытий, стойких к абразивному износу, в наплавленном металле предпочтительно обеспечивать систему Fe-C-Cr-Nb-V.

Во второй главе проведен термодинамический расчет фазовых и химических равновесий, направленный на оценку стабильности частиц карбида титана (TiC) в сложной многокомпонентной системе расплава сварочной ванны на железной основе, легированной углеродом, хромом, ниобием и бором.

Оценку влияния легирующих элементов на стабильность карбида титана в расплаве проводили путем варьирования их содержания: C = 0...4% мас., Cr = 12...16% мас., Nb = 0...3% мас., V = 0...1,5% мас., Ti = 0...2% мас., Fe – остальное. Дополнительно в систему вводили кремний и марганец (по 1% мас.). Также в ходе термодинамического расчета была оценена степень влияния кислорода (в интервале 0...3% мас.) на фазовые превращения и стабильность карбида титана (TiC). Кроме того, анализировали эффект от количества вводимого карбида титана в систему (0...65% мас.).

Термодинамический расчет проводили при помощи разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана программного комплекса «Терра» в изобарно-изотермических условиях при общем давлении 0,1 МПа в интервале температур 1700 – 2600 К, что согласно литературным данным, соответствует интервалу температур существования сварочной ванны.

Анализ результатов термодинамического расчета показал, что карбид титана может оставаться стабильным в ванне расплавленного металла системы Fe-C-Cr-Nb-V, однако, ключевое влияние на его стабильность будет оказывать кислород, который окисляет TiC в интервале температур 1700-1950 К, способствуя образованию оксидов

Ti₂O₃. Ограничение этой реакции преимущественно зависит от количества углерода в системе, который будет выступать в роли раскислителя в интервале температур 1950-2200 К. Кроме того, установлено, что карбид титана может оставаться стабильным в системе при условии его введения в количестве более 7% мас. при наличии кислорода в системе не более 2% мас., в противном случае карбид титана будет полностью подвергнут окислению в интервале температур 1700-1950 К.

Наличие в системе титана и бора будет оказывать влияние на стабильность карбида титана. Титан способствует образованию дополнительного количества карбида титана, повышая концентрацию данной фазы на всем интервале температур, что связано с взаимодействием титана и углерода. При введении в систему бора наблюдается снижение концентрации карбида титана, что объясняется образованием боридов титана в результате взаимодействия TiC и В.

По результатам термодинамического расчета также было установлено, что хром и ниобий не оказывают влияния на стабильность карбида титана. Роль хрома сводится к перераспределению концентраций между карбидами Fe₃C и Cr₇C₃ в зависимости от соотношения Cr/C, в то время как ниобий участвует исключительно в образовании карбида NbC.

Полученные данные позволяют ожидать сохранения частиц карбида титана при введении их в расплав сварочной ванны системы Fe-C-Cr-Nb-B. Однако, при наличии в системе кислорода возможно окисление TiC, что будет способствовать снижению его концентрации.

Третья глава содержит данные о разработке наплавочных порошковых проволок, предварительной подготовке их шихты, а также методиках проведения испытаний на износостойкость наплавленных износостойких покрытий, армированных карбидами титана с применением разработанных проволок.

В главе также показано, что одним из способов снижения влияния высокой температуры на тугоплавкие карбиды, с целью их большего сохранения в наплавленном металле, является плакирование. По мнению Плоmodityа Р.Л. и Назарько А.С. нанесение на поверхности тугоплавких частиц экранирующего слоя способствует росту их коэффициента перехода в наплавленный металл. Одним из перспективных способов плакирования частиц карбида титана является их совместная высокоэнергетическая обработка в планетарной мельнице с никелем, выступающим в качестве плакирующего компонента.

Для осуществления плакирования применяли порошки карбида титана марки «Ч» по ТУ 6-09-492-75 среднего размера 1000 мкм и никеля марки «ПНК-УТЗ» по ГОСТ 9722-97 среднего размера менее 20 мкм.

Высокоэнергетической обработке подвергали порошки одинакового объема, что соответствует следующему соотношению масс: $M_{TiC}/M_{Ni} = 0,58$. В ходе проведения исследований варьировали частоту вращения водила планетарной мельницы в диапазоне от 175 об/мин до 275 об/мин. Обработку порошков проводили в инертной среде аргона (аргон особой чистоты марки 6.0, чистотой 99,9999% по ТУ 2114-005-53373468-2006) в течение 90 и 150 минут при обработке шарами диаметром 3 мм из стали ШХ15. Отношение массы порошка к массе шаров составляло 1/10. Оценку результатов плакирования осуществляли исходя из анализа изменения насыпной плотности, фракционного состава порошков, приведенного размера частиц порошка, а также, результатов РСМА.

Изменение насыпной плотности и фракционного состава порошков показали следующие результаты:

Насыпная плотность порошков после совместной обработки в планетарной мельнице зависит от времени и частоты вращения водила. За 90 минут обработки при 175 об/мин насыпная плотность увеличивается на 7,5%, дальнейшее повышение частоты незначительно влияет на этот показатель. При обработке в течение 150 минут при 175 об/мин увеличение насыпной плотности составляет 18,6%, но дальнейшее увеличение частоты приводит к её снижению. Во всех случаях высокоэнергетическая обработка способствует повышению насыпной плотности в сравнении с исходным состоянием.

Анализ фракционного состава (Рисунок 1) показывает, что увеличение частоты вращения приводит к уменьшению доли частиц карбида титана размером более 600 мкм, свидетельствуя о процессах их измельчения. При обработке в течение 90 минут происходит измельчение крупных частиц карбидов до фракции менее 75 мкм. Наибольший эффект измельчения наблюдается при частотах вращения водила 250 об/мин и 275 об/мин. При обработке в течение 150 минут картина меняется: повышение частоты до 225 об/мин аналогично 90-минутной обработке. Однако при 250 об/мин, помимо измельчения, наблюдается увеличение доли фракций 200-600 мкм, что косвенно указывает на процесс плакирования частиц. При дальнейшем повышении частоты (до 275 об/мин) доля фракции менее 75 мкм снижается, а фракции 100-600 мкм увеличиваются. При обработке с частотой вращения водила 275 об/мин установлено значительное налипание смеси порошков на стенки стакана, что указывает на нецелесообразность применения данного режима обработки.

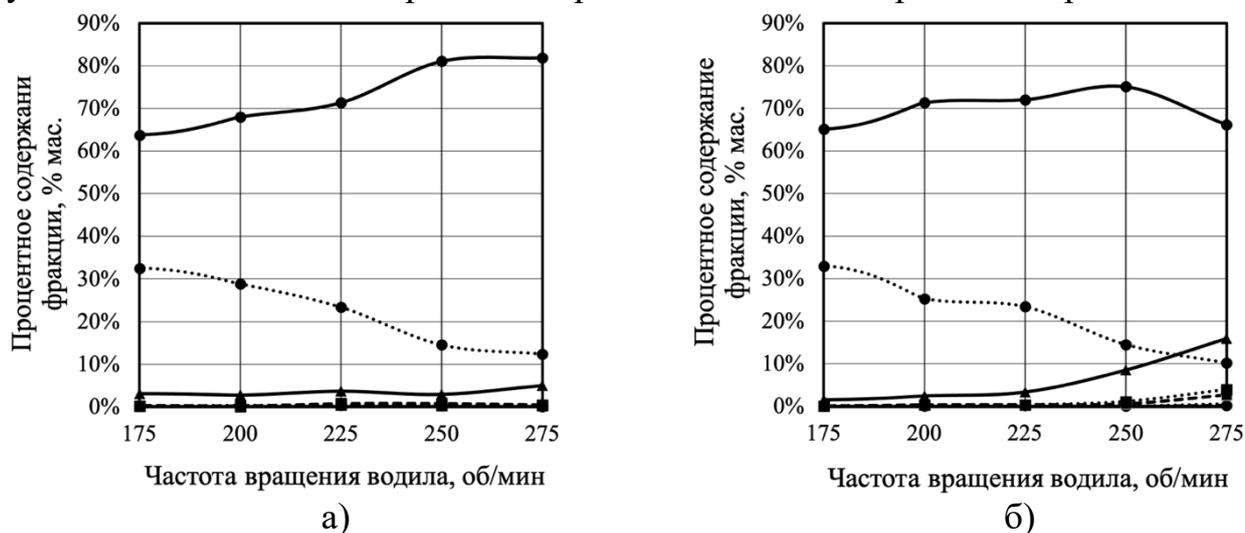


Рисунок 1.

Изменение фракционного состава порошков при различных частотах вращения водила планетарной мельницы в течение 90 минут – а) и 150 минут – б). Размеры фракций: ● - менее 75 мкм, ●-● - 75...88 мкм, ●-●-● - 88...100 мкм, ■-■ - 100...200 мкм, ■-■-■ - 200...300 мкм, ■-■-■-■ - 300...600 мкм, ●-●-●-●-● - более 600 мкм

Анализ порошков после обработки с помощью растровой электронной микроскопии показал, что на поверхности карбида титана формируется плакирующий слой, причем размер покрытой области зависит от режимов обработки (Рисунок 2). Наибольший эффект плакирования наблюдается при обработке в течение 150 мин с частотой вращения водила 250 об/мин и составляет 65%.

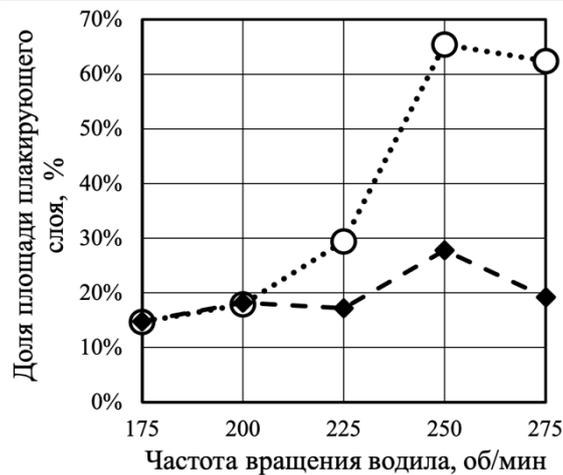


Рисунок 2.

Доля плакирования поверхности карбида титана никелем при их совместной обработке в течение 90 минут - ◆ и 150 минут - ○ при разных частотах вращения водила планетарной мельницы

Плакирующий слой имеет толщину в несколько десятков мкм (в зависимости от места) и представляет собой смесь порошков никеля с различной степенью деформирования и мелкодисперсных частиц карбида титана (Рисунок 3). Рентгеноспектральный микроанализ показал неоднородность слоя, состоящего из композитных гранул двух типов: 1) деформированный никель с металлокерамическим покрытием (карбид титана-никель); 2) гранулы никеля со слоистой структурой, чередующейся с мелкодисперсным карбидом титана. Наблюдаются также мелкие частицы TiC, связанные тонким слоем никеля.

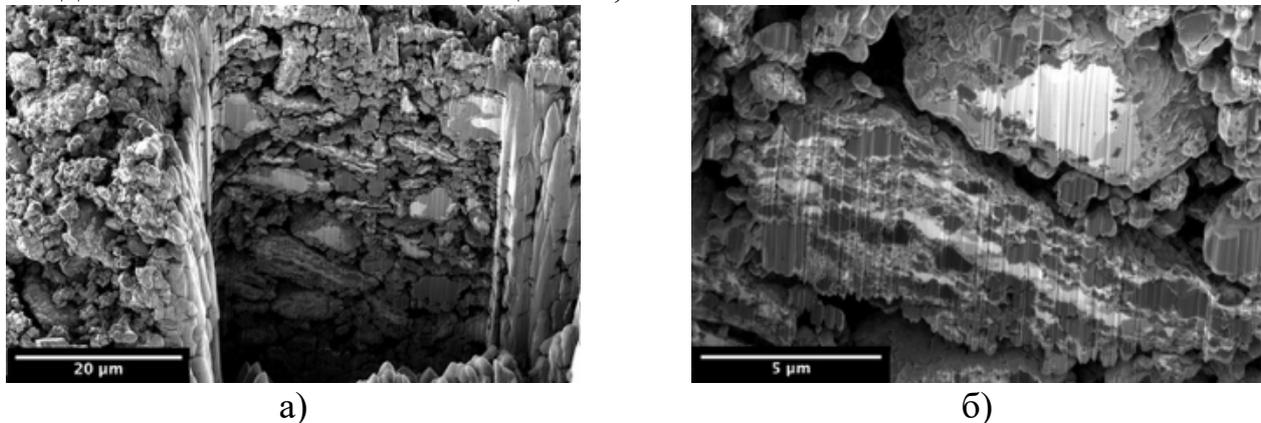


Рисунок 3.

Частица карбида титана, плакированная никелем: а – разрез плакирующего слоя; б – композиционные гранулы, составляющие композиционный слой

Механизм формирования плакирующего слоя заключается в следующем. Частицы порошка никеля под действием мелящих шаров деформируются и соударяются с поверхностью карбида титана. Мелкодисперсные (равные и менее размера частиц порошка никеля) частицы карбида титана откалываются от поверхности крупных частиц и соединяются с порошком никеля. Такой процесс происходит многократно, в результате формируются композиционные гранулы из мелкодисперсного карбида титана и никеля, которые закрепляются на поверхности крупных частиц карбида титана.

Для наплавки износостойких покрытий, армированных карбидами титана, были разработаны 4 экспериментальные присадочные порошковые проволоки с различным

содержанием карбида титана в составе их шихты (Таблица 1). Шихта проволоки ППП-01 состояла из 30% мас. порошка никеля и 70% мас. карбида титана. В отличие от проволоки ППП-01, в шихту проволоки ППП-02 порошок никеля не вводили, а часть карбида титана заменили плакированным карбидом титана. Таким образом, в ППП-01 и ППП-02 было введено идентичное количество титана и никеля. Проволоки ППП-03 и ППП-04 были изготовлены без применения Ni, что позволило увеличить количество TiC. Кроме того, проволока ППП-04 была изготовлена диаметром 2,0 мм, что позволило повысить ее коэффициент заполнения, тем самым увеличив количество TiC в составе проволоки по сравнению с проволокой ППП-03.

Таблица 1

Характеристики разработанных присадочных порошковых проволок

Маркировка порошковой проволоки	Компонентный состав шихты, % мас.			Технические характеристики		Кол-во TiC в составе порошковой проволоки
	Ni	TiC	(Ni+TiC)*	d, мм	К.З.	
ППП-01	30	70	0	1,6	15	10,5
ППП-02	0	53,8	46,2	1,6	15	10,5
ППП-03	0	100	0	1,6	15	15
ППП-04	0	100	0	2,0	30	30

Примечание: (Ni+TiC)* - смесь порошков Ni и TiC, подвергнутая предварительной высокоэнергетической обработке в планетарной мельнице.

В качестве компонентов для изготовления порошковых проволок использовали те же порошки карбида титана и никеля, что и для проведения плакирования. В качестве оболочки для изготовления порошковой проволоки использовали ленту марки «08пс» по ГОСТ 503-81.

Для исследования влияния TiC на формирование и распределение ex-situ фазы в наплавленном металле, при использовании разработанных проволок в качестве присадочных, была осуществлена их наплавка неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона (группа II по ГОСТ Р ИСО 14175-2010). Наплавку осуществляли в 3 слоя на пластину из СтЗсп (ГОСТ 380) толщиной 12 мм на следующих режимах: ток дуги – 180...190 А (при d=1,6 мм) и 190...200 А (при d=2,0 мм), напряжение на дуге – 16...18 В, скорость наплавки – 5,0...5,5 м/ч, скорость подачи присадочной проволоки 0,55 м/мин (при d=1,6 мм) и 0,25 м/мин (при d=2,0 мм), расход защитного газа – 7 л/мин. Для исследования влияния схемы ввода присадочной порошковой проволоки ее введение в ванну расплавленного металла осуществляли как с головной части сварочной ванны (схема I), так и со стороны хвостовой ее части (схема II).

Выбор электродной порошковой проволоки для ее дальнейшего использования совместно с присадочной проводили рассматривая порошковые проволоки диаметром 2,0 мм двух составов: ПП-Нп-210Х12БРТ и ПП-Нп-260Х16Б2РТ. Электродные проволоки наплавливали в 3 слоя на пластины из СтЗсп (ГОСТ 380) толщиной 12 мм в смеси защитных газов (82% Ar + 18% CO₂ группы М21 по ГОСТ Р ИСО 14175-2010) на следующих режимах: ток дуги – 250...275 А, напряжение на дуге – 25...26 В, скорость наплавки – 16 м/ч, скорость подачи проволоки – 2,8 м/мин, размах колебаний – 18 мм, частота колебаний 1 Гц, задержка на кромках – 0,5 с.

Наплавку электродной и присадочной порошковыми проволоками осуществляли в 3 слоя на пластину из стали СтЗсп (ГОСТ 380) толщиной 12 мм в

смеси защитных газов (82% Ar + 18% CO₂ группы M21 по ГОСТ Р ИСО 14175-2010) на режиме идентичном при наплавке только электродной проволоки с подачей присадочной проволоки со скоростью 1,7 м/мин.

Для оценки структуры наплавленного покрытия проводили металлографические исследования с помощью оптической и электронной микроскопии с проведением химического зализа.

Твердость покрытий определяли путем измерения твердости на твердомере ТК-2М по шкале HRC вдавливанием конуса при приложении нагрузки 1500 Н.

Для оценки износостойкости наплавленных покрытий проводили испытания на гидроабразивный износ и на износ при трении о нежестко закрепленный абразив (по ASTM G65 процедура В) с дальнейшим сравнением полученных результатов с результатами испытаний промышленных материалов.

Оценивали износостойкость по показателю относительной износостойкости ($\epsilon = V_{И}^Э / V_{И}^И$, где $V_{И}^Э$ – скорость изнашивания эталонного образца, г/ч; $V_{И}^И$ – скорость изнашивания испытуемого образца, г/ч). В качестве эталона применяли сталь 65Г. Скорость изнашивания определяли как отношение значений потери массы (Δm , г) к интервалу времени (Δt , ч) за который он был наработан. Потерю массы определяли взвешиванием образцов до и после испытаний с точностью $\pm 0,5 \times 10^{-3}$ г.

В четвертой главе приведены результаты исследования формирования структуры наплавленного металла при наплавке присадочных порошковых проволок (ППП-01, ППП-02, ППП-03 и ППП-04) с различным содержанием карбида титана (Таблица 1) неплавящимся вольфрамовым электродом.

Из анализа микроструктуры наплавленных покрытий установлено, что в металле присутствуют как крупные частицы карбида титан (Рисунок 4 а), полученные в результате комплексного легирования (ex-situ), так и мелкодисперсные (восстановленные) частицы карбидов TiC (in-situ) размером до нескольких десятков мкм, в зависимости от применяемой проволоки и схемы ее наплавки (Рисунок 4 б).

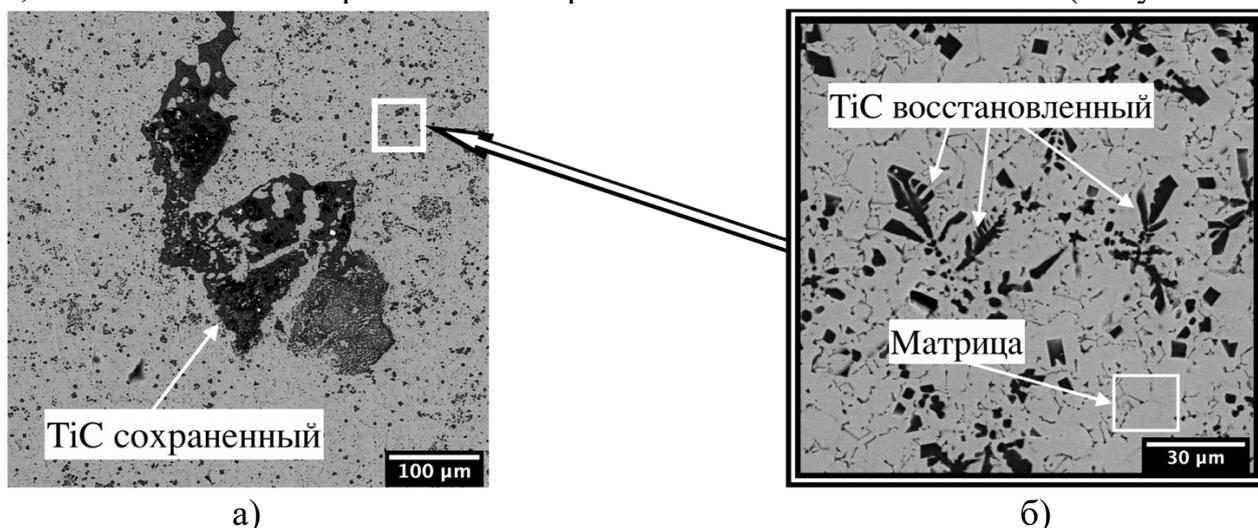


Рисунок 4.

Сохраненные (а) и восстановленные (б) частицы карбида титана в наплавленном металле

Сохраненные крупные частицы карбида титана хорошо смачиваются расплавом сварочной ванны. Расплавленный металл проникает во все трещины и полости карбида, обеспечивая его надежную фиксацию в закристаллизовавшемся расплаве. Кроме того, установлено, что схема наплавки влияет на сохранение карбида титана в

структуре наплавленного металла. При введении порошковой проволоки со стороны хвостовой части сварочной ванны наблюдается большее количество сохранных частиц TiC в сравнении со схемой ввода порошковой проволоки по переднему фронту сварочной ванны (Рисунок 5). Установленный эффект, по всей видимости, связан с повышенным тепловым воздействием на шихту порошковой проволоки при ее подаче по переднему фронту сварочной ванны. Применение в составе шихты частиц карбида титана, плакированных никелем, не позволило повысить количество крупных частиц TiC, что может быть связано с частичным измельчением карбида в процессе плакирования. Также, установлено, что при увеличении количества TiC, вводимого в наплавленный металл через шихту порошковой проволоки, наблюдается рост количества сохранных частиц в покрытии, что является закономерным эффектом.

Мелкодисперсные карбиды титана формируются в наплавленном металле во время его кристаллизации. Формирование упомянутых карбидов связано с частичным растворением крупных частиц TiC при их попадании в сварочную ванну. Количество и размер мелкодисперсных карбидов титана зависит как от схемы наплавки, так и от количества TiC, введенного через присадочную проволоку. При подаче присадочной проволоки по схеме I наблюдаются большие значения размера и количества восстановленной фазы, в сравнении с введением проволоки по схеме II. Данные результаты свидетельствуют о меньшем нагреве частиц TiC при их введении в сварочную ванну со стороны хвостовой части. При увеличении количества TiC наблюдается рост как количества, так и размера мелкодисперсных частиц карбида титана. Кроме того, следует отметить тенденцию к изменению формы мелкодисперсных карбидов титана в структуре наплавленного металла в зависимости от состава присадочной проволоки. Увеличение количества растворенного карбида титана в расплаве сварочной ванны приводит к формированию вытянутых фаз и фаз в виде «звездочек» (Рисунок 6).

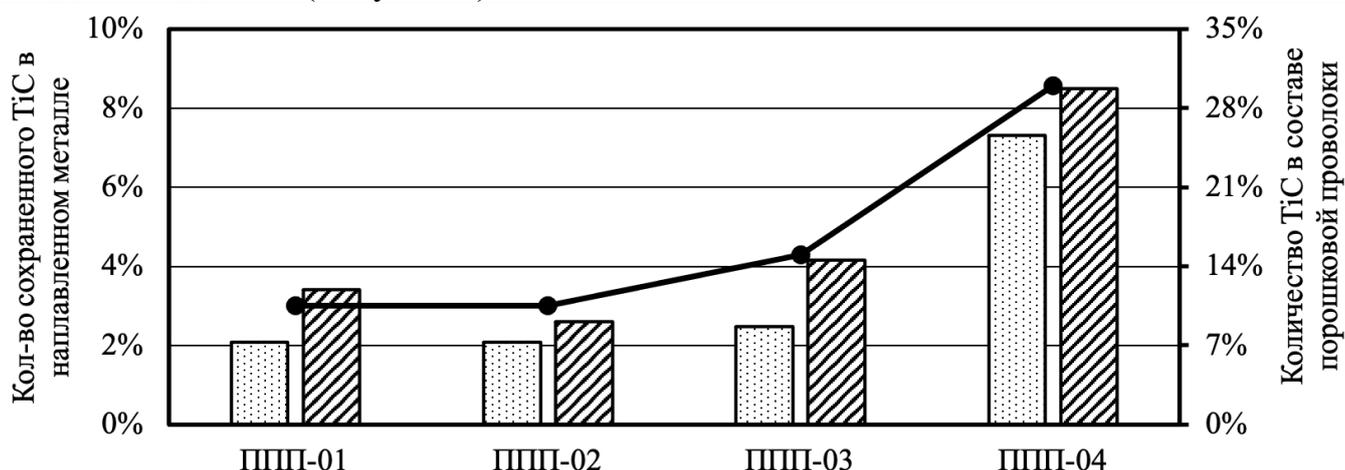


Рисунок 5.

Результаты анализа количества сохранных частиц TiC в наплавленном металле в зависимости от применяемой проволоки и схемы ее ввода: □ — при наплавке по схеме I; ▨ — при наплавке по схеме II; ● — количество TiC в составе присадочной порошковой проволоки

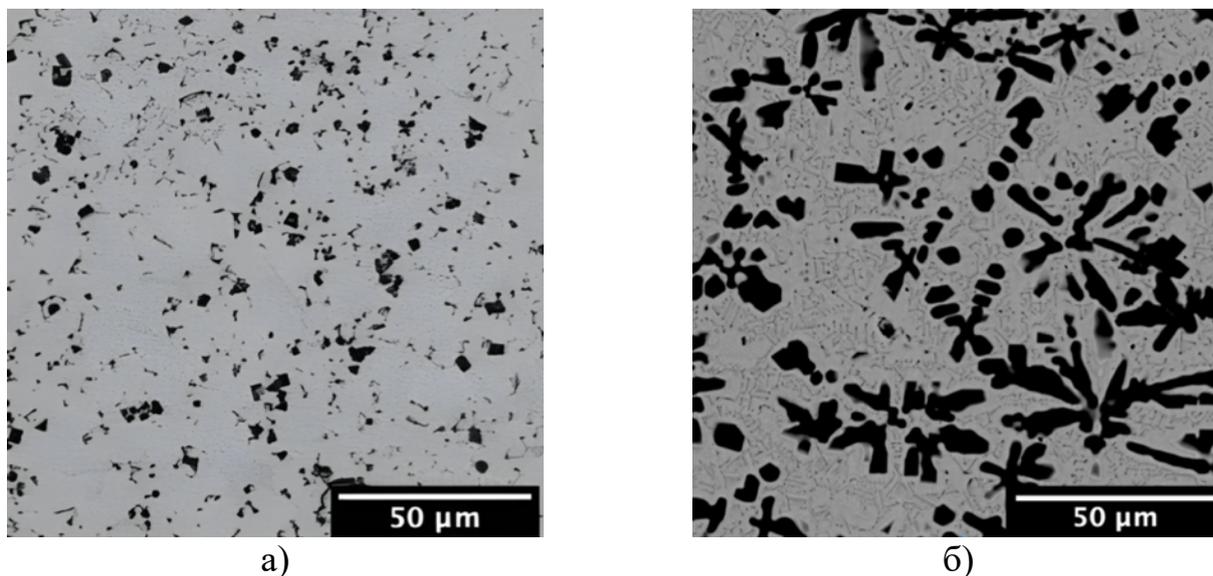


Рисунок 6.

Микроструктура наплавленного металла при подаче присадочных проволок ППП-01 (а) и ППП-04 (б) по схеме II

Таким образом, установлено, что для обеспечения большего количества крупных частиц карбида титана в наплавленном металле необходимо обеспечить его большее содержание в составе присадочной проволоки. Причем, рекомендуется использовать порошковые проволоки, шихта которых на 100% состоит из карбида титана, диаметром не менее 2,0 мм, что позволит обеспечить необходимый коэффициент заполнения порошковой проволоки. Применение проволок меньшего диаметра приводит к снижению вводимого количества карбида титана, что снижает количество армирующей фазы (как крупной, так и мелкодисперсной). Кроме того, при наплавке рекомендуется осуществлять подачу присадочной проволоки в сварочную ванну со стороны хвостовой стороны, что также будет способствовать большему сохранению частиц TiC в наплавленном металле.

Для наплавки износостойкого покрытия в качестве электродной порошковой проволоки была выбрана проволока ПП-Нп-260Х16Б2РТ, позволяющая обеспечить износостойкость наплавленного металла на 16,6% выше к гидроабразивному износу и на 17% выше к износу при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы в сравнении с износостойкостью наплавленного металла порошковой проволокой ПП- Нп-210Х12БРТ.

Таким образом, наплавку износостойкого покрытия электродной проволокой совместно с присадочной осуществляли с использованием проволок ПП-Нп-260Х16Б2РТ (в качестве электродной) и ППП-04 (в качестве присадочной), при введении второй в сварочную ванну по схеме II.

Наплавленный металл, выполненный с применением проволоки ПП-Нп-260Х16Б2РТ без присадочной проволоки, имеет структуру мартенсита с эвтектикой в первом слое, доэвтектическую во втором слое и заэвтектическую (с образованием тонких игл первичного карбида хрома цементитного типа в ледебурите) в третьем слое (Рисунок 7 а). Следует отметить, что по всему объему наплавленного металла присутствуют карбиды типа (Ti,Nb)C, размер которых составляет 3,8 мкм, а количество 4,6%. С изменением структуры от слоя к слою наблюдается изменение и твердости наплавленного металла. Твердость первого слоя составила 58 HRC, второго – 62 HRC и третьего – 64 HRC.

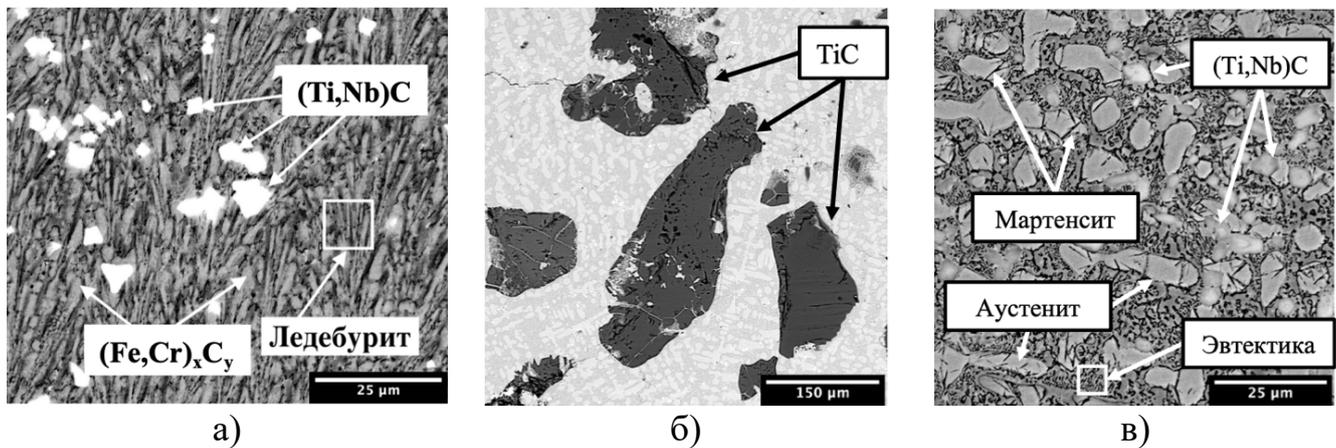


Рисунок 7.

Микроструктура наплавленного металла проволокой ПП-Нп-260Х16Б2РТ (а) и комбинацией проволок ПП-Нп-260Х16Б2РТ+ППП-04 (б, в) в третьем слое

Добавление присадочной проволоки способствует появлению в наплавленном металле крупного карбида титана (Рисунок 7 б). Карбид титана хорошо смачивается расплавом сварочной ванны и присутствует во всех слоях наплавленного металла.

В остальном структура наплавленного металла, выполненного с применением присадочной проволоки, схожа со структурой наплавленного металла, полученного с применением только электродной проволоки. Однако, в третьем слое не формируется заэвтектическая структура (Рисунок 7 в). Кроме того, по всему объему наплавленного металла, при использовании присадочной проволоки, присутствуют карбиды типа $(Ti,Nb)C$, состав которых, согласно РСМА, отличается от карбидов, образованных при наплавке только электродной проволокой (при наплавке только электродной проволокой химический состав карбидов: $C=24,5\%$ мас., $Ti=5,3\%$ мас., $Nb=70,2\%$ мас.; при наплавке с применением присадочной проволоки: $C=25,5\%$ мас., $Ti=28,9\%$ мас., $Nb=45,6\%$ мас.). Увеличение содержания титана в восстановленных карбидах связано с частичным растворением TiC , введенного в наплавленный металл через дополнительную присадочную проволоку, что также способствует увеличению как размера (до 5,8 мкм.), так и количества (до 7,9%) восстановленных карбидов.

Твердость наплавленного металла с применением присадочной проволоки в первом слое составила 59 HRC, второго слоя – 63 HRC и третьего слоя – 65 HRC.

Таким образом, несмотря на снижение количества легирующих элементов при использовании присадочных материалов, твердость наплавленного металла находится на достаточно высоком уровне. Указанное явление, прежде всего, связано с формированием карбидов $(Ti,Nb)C$ и увеличением их размера и количества в наплавленном металле.

Испытания наплавленных покрытий на гидроабразивный износ показали рост относительной износостойкости наплавленного металла в случае применения дополнительной присадочной проволоки в 2,3 раза в сравнении с наплавкой только электродной проволокой (Рисунок 8). Данный эффект может быть обусловлен ростом размера и количества восстановленных карбидов типа $(Ti,Nb)C$, и их большее легирование титаном, а также появлением в наплавленном металле крупных частиц карбида титана в количестве 2,2%. Кроме того, сравнивая полученные результаты с относительной износостойкостью промышленных материалов, видно, что полученное покрытие позволяет обеспечить износостойкость в 2,6-3,2 раза выше, что

свидетельствует об эффективности применения разработанных наплавочных материалов и применения данной схемы наплавки.

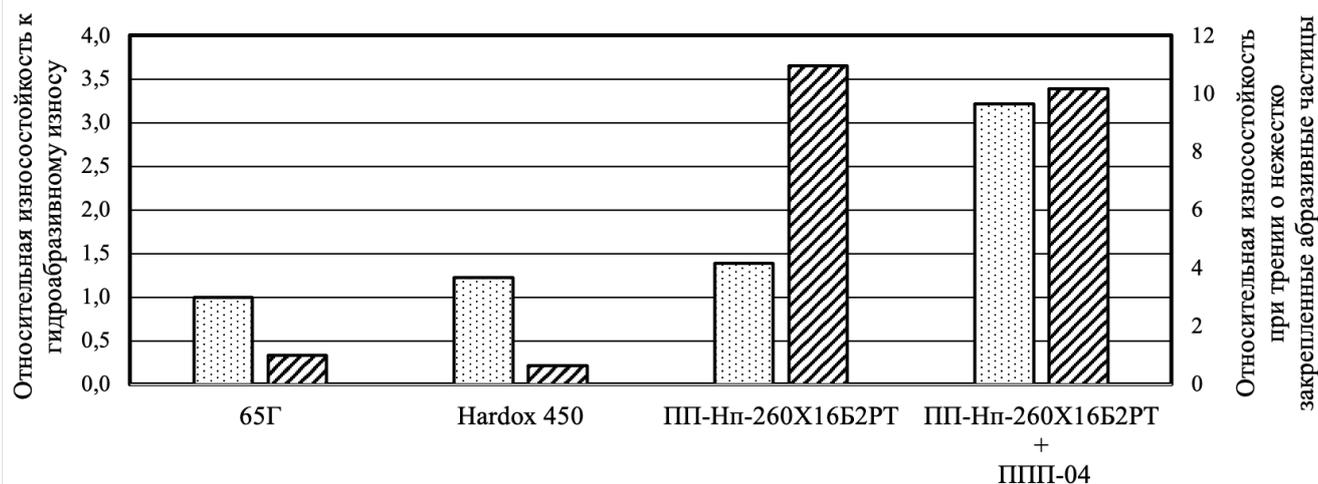


Рисунок 8.

Результаты испытаний на гидроабразивный износ (□) и износ при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы (▨)

Результаты испытаний на трение о нежестко закрепленные абразивные частицы показали следующие результаты. При использовании дополнительной присадочной проволоки износостойкость наплавленного покрытия снижается не более чем на 7% относительно износостойкости покрытия, наплавленного только электродной порошковой проволокой (Рисунок 8). Такой эффект объясняется изменением структуры матрицы наплавленного металла. В случае введения дополнительной присадочной проволоки совместно с ростом карбидных фаз наблюдается разбавление матрицы наплавленного металла. Структура переходит из области заэвтектической (первичные карбидами хрома цементитного типа в ледебурите) в область доэвтектической структуры (дендриты твердого раствора и эвтектика), что и приводит к незначительному снижению износостойкости. Тем не менее, износостойкость покрытия, наплавленного с применением присадочной порошковой проволоки, позволяет обеспечить значения относительной износостойкости в 10,2-15,7 раз выше, чем у промышленных материалов.

Основные выводы и результаты

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана присадочная и выбрана электродная порошковые проволоки для наплавки износостойких покрытий системы Fe-C-Cr-Nb-V+TiC. Причем присадочная проволока, дополнительно подаваемая в сварочную ванну, служит для транспортировки крупных армирующих частиц карбида титана в ванну расплавленного металла, а электродная для осуществления легирования наплаваемого металла.

2. По результатам термодинамического расчета было установлено, что карбид титана может оставаться стабильным в ванне расплавленного металла системы Fe-C-Cr-Nb-V при условии его введения в количестве более 7% мас. (при наличии кислорода в системе не более 2% мас.), в противном случае карбид титана будет полностью подвергнут окислению.

3. Раскрыт механизм плакирования частиц карбида титана никелем, который заключается в деформировании частиц порошка никеля и откола мелких частиц

карбида титана от более крупных. Образующиеся мелкодисперсные частицы карбида титана соединяются с частицами никеля, формируя композиционные гранул, которые закрепляются на поверхности крупных частиц карбида титана образуя плакирующий композиционный слой.

4. Установлено, что наибольшая доля плакирования карбида титана составляет 65% при обработке в течение 150 минут с частотой вращения водила 250 об/мин. Дальнейшее увеличение частоты вращения водила приводит к значительному налипанию смеси порошков на стенки стакана, что указывает на нецелесообразность применения данного режима обработки.

5. Введение в состав шихты присадочной порошковой проволоки плакированных частиц карбида титана никелем не приводит к повышению количества сохраненного карбида титана в наплавленном металле, что связано с частичным измельчением карбида в процессе плакирования.

6. Установлено, что при наплавке с применением присадочных порошковых проволок, в состав шихты которых введен карбид титана, в наплавленном металле формируется композиционная структура, представляющая собой матрицу с крупными сохраненными частицами карбида титана и мелкодисперсными карбидами титана, образованными в результате частичного растворения крупного карбида и дальнейшего их восстановления из расплава сварочной ванны.

7. Установлено, что на количество крупных частиц карбида титана в наплавленном металле оказывает влияние как количество частиц, введенное в состав присадочной порошковой проволоки, так и способ введения присадочной проволоки в ванну расплавленного металла. При подаче проволоки со стороны хвостовой части сварочной ванны в наплавленном металле обеспечивается максимальное сохранение крупных частиц карбида титана (*ex-situ* фаза) за счет снижения теплового воздействия.

8. При наплавке с применением разработанной присадочной порошковой проволоки совместно с выбранной электродной проволокой, при подаче присадочной проволоки со стороны хвостовой части сварочной ванны, в наплавленном металле формируется композиционная структура, представляющая собой высоколегированную износостойкую матрицу на железной основе, армированную как крупными частицами карбида титана, так и мелкодисперсными восстановленными карбидами типа $(Ti,Nb)C$.

9. Выявлено, что при испытании на трение о нежестко закрепленные абразивные частицы относительная износостойкость металла, наплавленного электродной порошковой проволокой с применением дополнительной присадочной порошковой проволоки, на 7% ниже, чем у металла, наплавленного только электродной порошковой проволокой. Это снижение связано с разбавлением наплавленного металла присадочной порошковой проволокой и изменением его структуры с заэвтектической (с первичными иглообразными карбидами хрома) на доэвтектическую.

10. Введение дополнительной присадочной проволоки при наплавке с электродной способствует повышению относительной износостойкости наплавленного металла к гидроабразивному износу в 2,3 раза по сравнению с покрытием, наплавленным только электродной проволокой, что объясняется комплексным влиянием как роста размера и количества восстановленных карбидов

(Ti,Nb)C (с 3,8 мкм до 5,8 мкм и с 4,6% до 7,9% соответственно), так и появлением в наплавленном металле крупных частиц карбида титана в количестве 2,2%.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Формирование композиционной структуры системы Fe-Cr-C + TiC при дуговой наплавке с применением присадочной порошковой проволоки / Ю.В. Андриянов [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2022. Т. 20, № 12. С. 536-544. (0,56 п.л./0,08 п.л.).

2. Коберник Н.В., Панкратов А.С., Андриянов Ю.В. Исследование влияния TiC и NbC, вводимых в шихту порошковых проволок, на формирование композиционной структуры наплавленного износостойкого покрытия // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2023. Т. 25, № 2. С. 5-15. (0,69 п.л./0,23 п.л.).

3. Влияние введения карбидов в состав шихты порошковой проволоки на стабильность процесса наплавки. Часть 1 / Ю.В. Андриянов [и др.] // Сварка и диагностика. 2023. № 2. С. 13-17. (0,31 п.л./0,08 п.л.).

4. Влияние введения карбидов в состав шихты порошковой проволоки на стабильность процесса наплавки. Часть 2 / Ю.В. Андриянов [и др.] // Сварка и диагностика. 2023. № 3. С. 15-19. (0,31 п.л./0,08 п.л.).

5. Formation of a Composite Structure in a Deposited Fe-Cr-C + TiC (NbC) Metal / Yu.V. Andriyanov [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). 2023. Vol. 2023, №. 6. P. 657-664. (0,5 п.л./0,08 п.л.).

6. Stability of Titanium Carbide Introduced into a Weldpool / Yu.V. Andriyanov [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). 2023. Vol. 2023, №. 13. P. 2045-2053. (0,56 п.л./0,09 п.л.).

7. Exploring the Impact of Pre-Mechanical Activation of Nickel Powder on the Structure of Deposited Metal: A Deep Neural Network Perspective / Yu.V. Andriyanov [et al.] // Metals. 2024. Vol. 14, № 8. P. 929. (1,12 п.л./0,1 п.л.).

8. Influence of the Titanium Carbide Content in a Filler Powder Wire Charge on the Structure of the Weld Metal / Yu.V. Andriyanov [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). 2024. Vol. 2024, № 6. P. 1268-1273. (0,37 п.л./0,07 п.л.).

9. Structure and Properties of the Metal Deposited Using a Filler Flux-Cored Powder Wire with Titanium Carbide / Yu.V. Andriyanov [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). 2024. Vol. 2024, № 6. P. 1262-1267. (0,37 п.л./0,06 п.л.).

10. Influence of TiCN on the Structure and Wear Resistance of the Metal Deposited by Spraying a Fe-Cr-Nb-B-C Flux-Cored Electrode / Yu.V. Andriyanov [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). 2024. Vol. 2024, № 2. P. 438-444. (0,44 п.л./0,1 п.л.).

11. Влияния карбида титана в составе шихты присадочной порошковой проволоки на структуру наплавленного металла / Ю.В. Андриянов [и др.] // Электротехнология. 2025. № 13. С. 9-17. – DOI 10.31044/1684-5781-2025-0-13-9-17. (0,56 п.л./0,11 п.л.).

12. Resistance of a Weld Metal to Various Types of Wear / Yu.V. Andriyanov [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). 2025. Vol. 2025, № 1. P. 160-164. (0,31 п.л./0,05 п.л.).

13. Cladding of Titanium Carbide Powders with Nickel for Use in Flux-Cored Wires / Yu.V. Andriyanov [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). 2025. Vol. 2025, № 1. P. 165-170. (0,37 п.л./0,09 п.л.).