

На правах рукописи
УДК 621.791

Гуркин Сергей Вадимович

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННО – ПОРОШКОВОЙ
НАПЛАВКИ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА БАЗЕ СПЛАВОВ
БАББИТА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И ВОССТАНОВЛЕНИИ
ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Специальность 05.02.10 - Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре технологий сварки и диагностики
МГТУ имени. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: кандидат технических наук
КОБЕРНИК Николай Владимирович
МГТУ имени. Н.Э. Баумана, доцент

Официальные оппоненты: доктор технических наук, с.н.с.
ДОРОНИН Юрий Викторович
ООО «АЦГХ», начальник лаборатории сварки

кандидат технических наук
ЧАВДАРОВ Анатолий Валентинович
ФГБНУ «Федеральный научный
агроинженерный центр ВИМ»,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: **РГУ нефти и газа (НИУ)
имени И.М.Губкина**

Защита состоится «25» апреля 2019 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7 (499) 267-09-63.

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 имени. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета
к.т.н.



Прилуцкий М.А.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. В настоящее время во многих отраслях промышленности широко применяют подшипники скольжения, которые обладают рядом преимуществ, а именно: небольшие габариты, устойчивость к вибрациям, бесшумность работы, возможность работы в условиях недостатка смазки, работа в широком диапазоне температур, стойкость в химически активных средах и т.д. Подшипники скольжения состоят из опоры и вкладыша, который, как правило, выполнен в биметаллическом исполнении. Рабочий слой в подшипниках скольжения выполнен из антифрикционных материалов. Ведущую роль среди антифрикционных материалов играют сплавы баббита на оловянистой основе. Качество выполнения антифрикционного слоя имеет огромное значение, т.к. его повреждение или износ всего на 1,0 мм может привести к выходу из строя всего дорогостоящего агрегата, в котором работает подшипник.

Нанесение антифрикционных покрытий на основе баббита происходят с применением технологий литья, в редких случаях с применением аргонодуговой наплавки и напыления. Причём ремонт подшипников скольжения с использованием указанных технологий возможен только при полной выплавке антифрикционного материала. Традиционными технологиями нанесения баббитовых покрытий занимались такие ученые как: Барыкин Н.П., Потехин Б.А., Глущенко А.Н., Валеева А.Х., Христюбов А.С, Илюшин В.В., Фазлыяхметов Р.Ф., Тарельник В.Б.

Основной причиной выхода из строя подшипников является некачественное их изготовление. При этом наблюдается недостаточная адгезионная прочность покрытия, появление дефектов (как правило, в виде пор и несплавления с основой), а также формирование неблагоприятной структуры антифрикционного слоя. Структура баббита на оловянистой основе представляет собой матрицу (твёрдый раствор меди и сурьмы в олове – α -фаза) и расположенные в ней интерметаллидные включения SnSb (β -фаза) и Cu_3Sn (γ -фаза). В случае формирования неблагоприятной структуры интерметаллидная фаза неравномерно распределена по объёму покрытия или имеет увеличенные размеры. Неравномерное распределение интерметаллидной фазы приводит к повышению коэффициента трения и износа. Рост размеров интерметаллидной фазы приводит к снижению износостойкости покрытия. Кроме того, качество антифрикционных покрытий, выполненных с применением традиционных технологий, существенно зависит от субъективного фактора. Поэтому разработка новых технологий и подходов к нанесению антифрикционных покрытий, в особенности на баббитовой основе, является актуальной.

Цель работы: повышение износостойкости подшипниковых узлов за счёт разработки технологии плазменно-порошковой наплавки сплавов баббита.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих способов нанесения антифрикционных покрытий и предложить способ наплавки покрытий из баббитовых сплавов, который можно применить как при изготовлении, так и ремонте подшипниковых узлов.

2. Определить технологические возможности плазменно – порошковой наплавки антифрикционных материалов на базе баббитовых сплавов.

3. Исследовать влияние режимов и условий наплавки на состав, макро- и микро - структуру антифрикционных покрытий на основе баббита.

4. Определить трибологические свойства наплавленных покрытий и выявить их взаимосвязь с режимами и условиями наплавки.

5. Разработать технологические рекомендации по нанесению антифрикционных покрытий на основе баббита при изготовлении и ремонте подшипниковых узлов.

Методы исследований: результаты работы были получены после проведения экспериментальных и теоретических исследований. Наплавленные покрытия были получены с помощью оборудования для плазменно-порошковой наплавки фирмы Castolin Eutectic. Макро – и микроструктура исследовалась с использованием оптического микроскопа Olympus GX51 и растрового электронного микроскопа FEI Quanta 3D FEG. Испытания на адгезионную прочность проводили на установках EU-100 и EU-20. Трибологические испытания проводили на универсальной машине трения CTR-UMT в условиях сухого трения скольжения. Обработку полученных данных проводили с использованием программы Microsoft Excel.

Ценность выполненных исследований: показана возможность нанесения антифрикционных сплавов на базе баббита с использованием плазменно-порошковой наплавки на стальную основу подшипников скольжения. Эксплуатационные свойства наплавленных покрытий превосходят свойства, покрытий, выполненных с использованием традиционных технологий. Определена взаимосвязь между структурой и износостойкостью наплавленных покрытий.

Научная новизна работы связана с установлением влияния режимов плазменно-порошковой наплавки, состава защитного газа на структуру и износостойкость получаемых покрытий.

1. Установлено, что применение импульсной дуги при плазменно-порошковой наплавке позволяет увеличить перемешивание расплава сварочной ванны, что приводит к её интенсивной дегазации. При использовании смеси защитного газа 98%Ar+2%CO₂ импульсная дуга позволяет снизить пористость в 20-30 раз.

2. Предложен критерий $\xi = K/(L \cdot h \cdot 100)$ [мм⁻²] (где K,% - концентрация γ -фазы, L, мм – длина γ -фазы, h, мм – ширина γ -фазы), характеризующий структуру наплавленного покрытия с точки зрения износостойкости. При ξ больше $12 \cdot 10^{-4}$ мм⁻² обеспечивается интенсивность износа покрытий не более

$1,4 \cdot 10^{-3}$ мм³/м (при использовании Ar в качестве защитного газа), а при ξ больше $7 \cdot 10^{-4}$ мм⁻² обеспечивается интенсивность износа покрытий не более $3,7 \cdot 10^{-3}$ мм³/м (при использовании в качестве защитного газа смеси 98%Ar+2%CO₂).

3. Показано, что уменьшение погонной энергии с 948 до 316 Дж/см приводит к диспергированию (ширина и длина γ - фазы уменьшается на 50%), что приводит к увеличению износостойкости наплавленных покрытий на базе баббита почти в 2 раза.

4. Установлено, что применение смеси защитного газа 98%Ar+2%CO₂ позволяет расширить нагрузочную способность покрытия не менее чем на 40%, за счёт науглероживания наплавленного металла.

Практическая значимость работы: Предложена плазменно-порошковая наплавка для получения антифрикционных покрытий на базе баббита. Определены диапазоны параметров режима наплавки. Разработаны технологические рекомендации по плазменно-порошковой наплавке баббитового сплава марки SnSb8Cu4 на стальную основу, которые были опробованы на НПП “ВЕЛД”

Достоверность результатов и выводов подтверждается использованием современных методов исследований, большим объёмом экспериментальных данных, сравнением полученных результатов с данными других исследователей. При получении результатов испытаний использовались апробированные методики.

На защиту выносятся:

1. Влияние параметров режима плазменно-порошковой наплавки баббитовых сплавов на структуру и эксплуатационные свойства антифрикционных покрытий.

2. Влияние состава защитного газа на структуру и эксплуатационные свойства антифрикционных покрытий.

3. Влияния различных видов подслоя на адгезионную прочность и эксплуатационные свойства наплавленных покрытий.

Апробация работы: основные результаты работы изложены на конференциях: «Будущее машиностроения» (Москва 2015, 2016, 2017), «Физико-химия и технология неорганических материалов» (Москва 2017), «ПОЛИТЕХНИКА» (Москва 2017), «Перспективные подходы и технологии проектирования и производства деталей и изделий аэрокосмической техники» (Москва 2017) и на научном семинаре кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2018).

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в исследовательской работе по теме диссертации на всех этапах. Автором был выполнен литературный обзор по теме исследования, выполнены теоретические и экспериментальные исследования, произведена обработка результатов, подготовлены и сделаны доклады на конференциях.

Публикации по теме диссертации: материалы диссертации отражены в 3 печатных работах из них 3 в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объём диссертации: диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов и результатов работы, списка использованной литературы. Она изложена на 118 листах машинного текста, содержит 77 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 72 наименования.

Содержание работы

Во введении показана актуальность и сформулирована цель диссертационных исследований.

В первой главе описаны требования к антифрикционным материалам, применяемым в подшипниках скольжения, а также описаны основные технологии нанесения антифрикционных покрытий.

Подшипники скольжения в ряде случаев имеют преимущества по сравнению с широко распространёнными подшипниками качения. Например, по наружному диаметру подшипники скольжения в два раза меньше шариковых подшипников средней серии, а по массе в 10 и более раз. Кроме того, применение современных антифрикционных материалов позволяет подшипникам скольжения работать при высоких скоростях вращения и нагрузках, а также в условиях ограниченной смазки и без неё. Применение подшипников скольжения обеспечивает точность установки валов, поэтому подшипники скольжения используют в железнодорожном транспорте, энергетических установках, станкостроении, судостроении и т.д.

Подшипники скольжения представляют собой корпус и вкладыш, на который опирается вал. Рабочие поверхности вкладышей изготавливают из антифрикционных материалов, которые обеспечивают низкий коэффициент трения скольжения и малую скорость изнашивания сопрягаемых деталей.

В качестве антифрикционных материалов применяют: металлические, неметаллические материалы, комбинированные материалы и минералы. Выбор материала зависит от режима смазки и условий работы опор скольжения. Напряжённость работы - pv (где p - удельная нагрузка, МПа, v - окружная скорость, м/с) является основной характеристикой работы антифрикционных сплавов.

Среди перечисленных материалов наибольшее распространение имеют металлические антифрикционные материалы. Такие материалы, как правило, работают в режиме жидкостного трения в сочетании с режимом граничной смазки. Однако, разрушение граничной масляной плёнки может происходить в момент старта (остановки), а также при перегреве трибопары. При разрушении масляной плёнки на первое место выдвигаются такие свойства антифрикционного материала, как сопротивляемость схватыванию. Наиболее высокий этот показатель у сплавов с мягкой составляющей в структуре. В качестве металлических антифрикционных материалов в подшипниках скольжения используют такие материалы как: алюминиевые сплавы (ГОСТ 14113), медные (ГОСТ 26719) и баббиты (ГОСТ 1320 и ГОСТ 1209).

Наибольшее распространение в подшипниковых узлах получили баббиты, так как они обладают низким коэффициентом трения и хорошей прирабатываемостью. Баббиты представляют собой сплавы на основе свинца или олова (нашедшие наибольшее распространение), которые относятся к металлическим антифрикционным материалам с мягкой матрицей и твёрдыми интерметаллидными включениями. Мягкая матрица обеспечивает защитную реакцию подшипникового материала на усиление трения, хорошую прирабатываемость. Твёрдые включения, на которые опирается вал, обеспечивают высокую износостойкость. В Таблице 1 представлен химический состав марок баббита в соответствии с ГОСТ 1320 и ГОСТ 1209.

Таблица 1.

Химический состав баббита различных марок

Марка	Sn,%	Sb,%	Cu,%	Pb,%	Ca,%	Na,%	Zn,%	ГОСТ
Б88	88,7-91,2	7,3-7,8	2,5-3,5	-	-	-	-	ГОСТ 1320
Б83	83	11	6	-	-	-	-	
Б16	16	16	2	-	-	-	-	
SnSb8Cu4	88-90	7-8	3-4	-	-	-	-	ИСО 4381
БКА	-	0,25	-	Ост-ное	0,95-1,15	0,7-0,9	0,4-0,6	ГОСТ 1209
БК2	-	0,2	-	Ост-ное	0,3-0,55	0,2-0,4	-	

Среди основных требований, предъявляемых к антифрикционным покрытиям подшипников скольжения, выделяют: требования к геометрии покрытия, требования к условиям работы, требования к адгезионной прочности, требования к эксплуатационным свойствам и требования к дефектности покрытия.

Основным параметром, характеризующим геометрию антифрикционных покрытий, является толщина покрытия, которая находится в диапазоне от 1,25 мм до 6 мм в зависимости от конкретного подшипника. Условия работы задаются через скорость скольжения и величину нагрузки, как правило, через напряженность работы, которая, например, для судовых подшипников скольжения составляет свыше 75 МПа*(м/с). Адгезионная прочность антифрикционных покрытий должна составлять не менее 60 МПа. Кроме того, к требованиям к покрытиям можно отнести обеспечение минимального коэффициента трения (не более 0,03 при трении со смазкой против стали), а также минимальный износ. Согласно литературным данным, литые покрытия из баббита показывают значение интенсивности износа 2,003 – 2,679 мг/мм³ (при трении в условиях граничной смазки, со скоростью скольжения 0,79 м/с и при давлении 7-20 МПа).

Основными дефектами в антифрикционных покрытиях являются пористость и несплавления с основой (ГОСТ Р ИСО 4386-1). Согласно

работам Христолюбова А.С., Потехина Б.А., Михайлова С.Б. и Скворцова А.А. пористость антифрикционного слоя должна быть не более 15%. Пористость антифрикционного слоя до 10% обеспечивает удержание масляной плёнки в контакте между трущимися поверхностями, а увеличение пористости выше 15% приводит к интенсивному износу антифрикционного слоя.

Структура оловянистых баббитов Б88 представляет собой матрицу (твёрдый раствор сурьмы и меди в олове) – α -фаза, с равномерным распределением игольчатых кристаллов соединения меди с оловом – γ -фаза (Рис. 1а). Структура баббитов марки Б83 похожа со структурой баббитов Б88, за исключением наличия интерметаллидной фазы соединения олова и сурьмы – β -фаза (Рис. 1б).

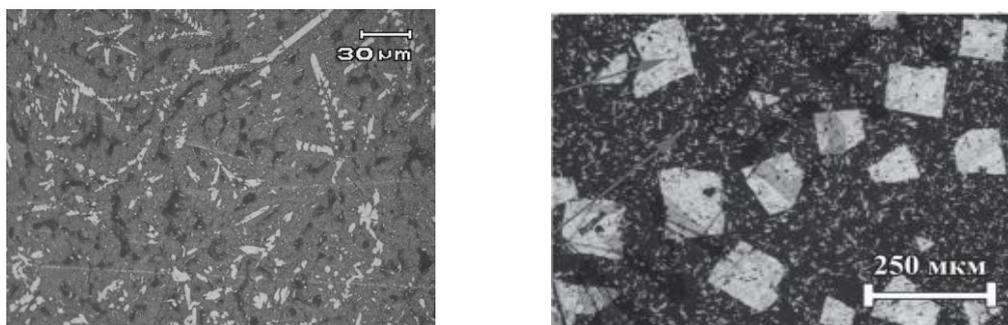
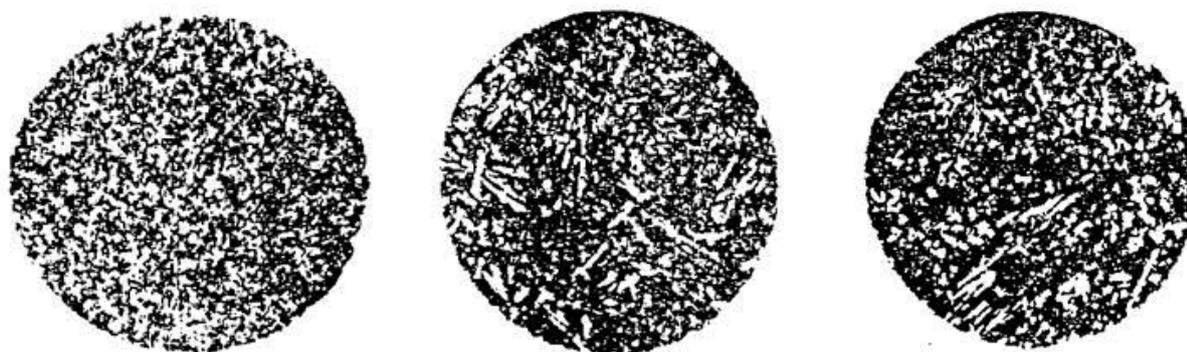


Рис.1. Микроструктура сплавов баббита; а- Б88, б - Б83

Такую структуру подразделяют на: хорошую, представленную на Рисунке 2а, удовлетворительную - Рис.2б и допустимую - Рис.2в. Интерметаллиды Cu_3Sn меньших размеров по общим механическим, технологическим и служебным свойствам более благоприятны, чем структура с крупными включениями. А увеличение размеров β - и γ - фазы приводит к снижению эксплуатационных характеристик.



а)

б)

в)

Рис.2. Структура баббита Б88 согласно РД 31.28.09-93, X100:

а) Хорошая микроструктура, б) Удовлетворительная микроструктура. в) Допустимая микроструктура

Большой вклад в развитие технологий нанесения антифрикционных покрытий на базе баббита внесли: Барыкин Н.П., Потехин Б.А., Глущенко

А.Н., Валеева А.Х., Христолюбов А.С, Илюшин В.В., Фазлыяхметов Р.Ф., Тарельник В.Б. К традиционным способам нанесения баббита относят способы литья, напыления, газовую и дуговую наплавку. Каждая из перечисленных технологий обладает своими особенностями.

Нанесение баббита методами литья связано с рядом сложностей, среди которых можно выделить следующие: рост размеров интерметаллидной фазы в связи с перегревом, неравномерное распределение интерметаллидной фазы в объёме покрытия, что приводит к снижению эксплуатационных свойств антифрикционных покрытий. Кроме того, покрытия, выполненные методами литья, обладают низким значением адгезионной прочности.

С помощью напыления наносят покрытия толщиной от 0,1 до 3,0 мм, причём эта технология чувствительна к качеству подготовки поверхности. Кроме того, напыленные покрытия характеризуются низкой адгезионной и когезионной прочностью. Также следует отметить низкий коэффициент использования присадочного порошка, который составляет 50-60%.

Применение газовой наплавки позволяет получить покрытия толщиной 0,1-0,3 мм, которые характеризуются неплохими эксплуатационными свойствами. Однако, при газовой наплавке может наблюдаться чрезмерный перегрев как антифрикционных материалов, так и основы, на которую производится наплавка. Перегрев приводит как к росту интерметаллидной фазы, так и к деформации вкладышей или накоплению остаточных напряжений.

Дуговая наплавка - наиболее универсальный метод нанесения баббита на поверхность вкладышей подшипников скольжения. Однако, дуговая наплавка реализуется только в варианте ручной аргонодуговой наплавки неплавящимся электродом с использованием присадочных прутков диаметром 3 мм.

Баббит изготавливают различные организации, из которых можно выделить: Ekotec, ООО «Скат», ЗАО «Русское олово», ОАО «Новосибирский оловянный комбинат», ООО НПП «Металлы и сплавы» и др., но, как правило, данные предприятия поставляют баббит в виде чушек, прутков или проволоки. В качестве присадочного материала для наплавки используют проволоку, но из-за структурных особенностей она ломкая, что затрудняет её применение. Поэтому проволоку разделяют на прутки, что снижает производительность наплавки. Наиболее технологичным присадочным материалом представляется порошок, который используют при напылении.

В связи с вышеизложенным было предложено использовать плазменно-порошковую наплавку с использованием в качестве присадочного материала порошка.

Во второй главе описана методика проведения исследований влияния различных условий плазменно-порошковой наплавки на структуру и эксплуатационные свойства баббитового покрытия.

В связи с отсутствием в открытых источниках информации о применении технологии плазменно-порошковой наплавки антифрикционных покрытий на базе баббитовых сплавов, был проведен ряд исследований,

позволяющих определить принципиальную возможность проведения такой наплавки, а также выявить влияние параметров и условий наплавки на структуру и эксплуатационные свойства таких покрытий.

В качестве присадочного материала использовали порошок SnSb8Cu4 по ИСО 4381, предназначенный для напыления покрытий баббитовых покрытий. Химический состав этого порошка близок к составу сплава Б88 (Таблица 1). Такой выбор был сделан в связи с отсутствием присадочного порошка, предназначенного для плазменной наплавки.

Наплавку проводили на подложку из стали СтЗсп (ГОСТ 380) толщиной 10 мм с предварительной подготовкой поверхности. Поверхность пластины обрабатывали механическим способом с целью удаления окалины и прочих загрязнений и обеспечения шероховатости не более $R_z 20$ для повышения адгезионной прочности. После обработки поверхность обезжиривали. Для исследования влияния наличия подслоя на адгезионную прочность были рассмотрены три варианта: наплавка без подслоя, наплавка с подслоем, выполненным с помощью флюс – пасты CastoTin1(Sn-Pb), которую применяют при напылении баббитовых покрытий с использованием выбранного порошка, а также выполнен подслоем из олова, который используют при технологии литья и наплавки. Подслой из олова наносили в соответствии с РД 31.28.09 с использованием флюса ХЦНА и олова О2 (по ГОСТ 860).

Диапазон параметров режимов плазменно-порошковой наплавки сплава баббита, позволяющий сформировать наплавленный слой, был определён экспериментально. В ходе предварительных исследований установлено, что значение тока плазменной дуги должно находиться в диапазоне 30...50А. При токе ниже 30А не удаётся сформировать непрерывный валик, а при увеличении тока выше 50А наблюдали подплавление стальной подложки. Кроме того, в связи с началом подплавления основы необходимо ограничивать расход плазмообразующего газа до 2 л/мин (при диаметре плазмообразующего сопла 3,0 мм). Таким образом, диапазон параметров режима, обеспечивающих формирование наплавленного металла, составил: $I_{св.} = 50А$, $V_{напл.} = 6...18$ м/ч, $Q_{плазм.} = 0,5-2$ л/мин, $Q_{защ.} = 15$ л/мин, $Q_{тр.} = 2-3$ л/мин, $Q_{порошка} = 15$ г/мин.

В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа использовали Ar высшего сорта по ГОСТ 10157. В связи с положительными результатами газовой наплавки баббитовых сплавов, где расплав баббита взаимодействует с активными газами (O_2 , CO_2 , CO), в качестве защитного газа использовали не только 100% аргон высшего сорта по ГОСТ 10157, но и смесь на базе аргона с добавлением углекислого газа ($Ar+2\%CO_2$). Газовую смесь получали в смесителе с использованием углекислого газа высшего сорта по ГОСТ 8050.

Как отмечалось выше, одним из требований к антифрикционным покрытиям является ограничение пористости, поэтому особый интерес имеет возможность оказывать влияние на порообразование. В работах Хаванова

В.А., Хорева В.Н., Келина М.С., Козлова В.Е. показана перспективность использования импульсных технологий при дуговой сварке неплавящимся электродом для дегазации металла шва. Однако, возможность такого подхода не была доказана применительно к плазменным технологиям. Поэтому в ходе исследований было рассмотрено влияние применения импульсного тока на порообразование в наплавленном металле, при этом варьировали соотношение тока импульса и тока паузы так, чтобы действующее значение тока составило 50А, а коэффициент асимметрии тока был равен 2,6 и 7.

Наплавленные покрытия подвергали испытаниям на адгезионную прочность по двум схемам: на срез (Рис.3а) и на изгиб (Рис.3б). Микроструктура наплавленного металла исследовали на оптическом микроскопе (Olympus GX51), и электронном микроскопе (FEI Quanta 3D FEG). Также проводили анализ химического состава наплавленных образцов спектральным методом. Кроме того, измеряли распределение микротвёрдости на шлифах, и твердость по Бринеллю на наплавленных образцах.

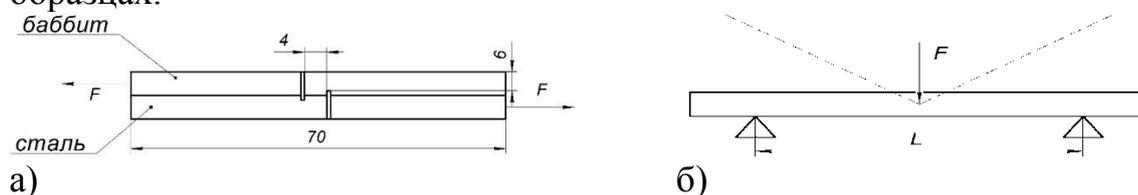


Рис.3. Схема испытаний наплавленных покрытий на адгезионную прочность а) испытания на срез б) испытания на изгиб

Испытания на трение и износ наплавленных покрытий проводили в условиях сухого трения скольжения на установке CENTR-UMT по схеме “втулка – диск” (контртело - втулка из стали 40X13 (HRC>45), диск – образец с покрытием из баббита). При испытаниях варьировали удельную нагрузку в диапазоне от 0,5 до 2,28 МПа, при скорости скольжения 0,39 м/с, при этом напряжённость работы трибоузла при испытаниях составила от 195 до 874 МПа*(м/с) (Таблица 3).

Таблица 4.

Режимы трибонагружения

F, Н	40	60	80	100	125	150	175
p, МПа	0,5	0,8	1,0	1,3	1,6	1,95	2,28
pV, МПа* (м/с)	195	300	390	507	624	761	874

В третьей главе приведены результаты исследования структуры и адгезионной прочности покрытий, наплавленных плазменно-порошковой наплавкой.

Анализ макроструктуры наплавленного металла показал, что при использовании в качестве защитного газа Ar высшего сорта по ГОСТ 10157 пористость наплавленного металла не превышает 3,5 %. При этом на пористость оказывает влияние наличие подслоя. Покрытия, наплавленные на

образцы с подслоем имеют пористость 1,7%. Переход от постоянного тока к импульсному приводит к снижению пористости не более, чем на 30%, при этом чем ниже пористость наплавленного металла, полученного на постоянном токе, тем ниже эффект её снижения при переходе на импульсный режим (Рис.4).

Добавление в защитный газ 2% углекислого газа высшего сорта по ГОСТ 8050 приводит к интенсивному росту пористости наплавленного металла. Пористость наплавленного металла, выполненного с применением в качестве защитного газа смеси 98%Ar+2%CO₂, составила не менее 12%. Применение импульсного тока позволит снизить пористость наплавленного металла. Режим импульсной дуги влияет на эффект снижения пористости. При коэффициенте асимметрии тока 2,6 пористость наплавленного металла снижается более чем в 20 раз (с 14,4% до 0,7%), а при асимметрии тока 7 пористость снижается более чем в 70 раз (с 14,4% до 0,19%). Таким образом, применение импульсных технологий позволяет снизить пористость наплавленного металла, при этом чем выше коэффициент асимметрии, тем этот эффект выше, что связано с более интенсивным перемешиванием сварочной ванны (Рис.4).

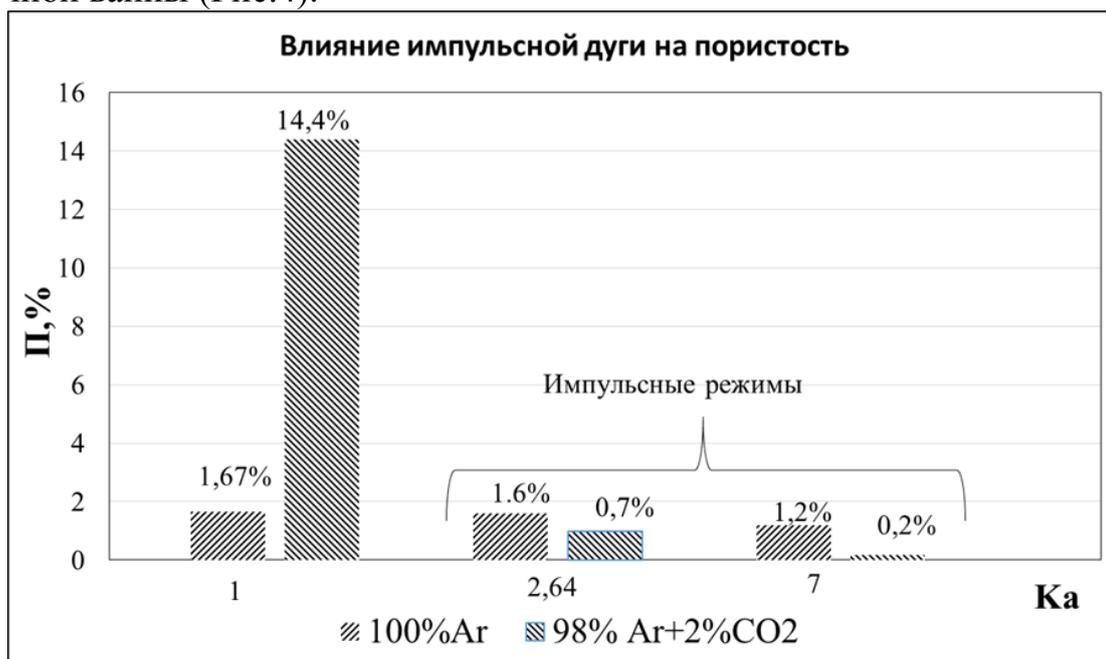


Рис.4. Влияние импульсной дуги на пористость
 П, %- пористость наплавленного слоя
 Ka-коэффициент асимметрии тока

Анализ микроструктуры наплавленного металла позволяет установить наличие двух фаз, химический анализ которых позволяет интерпретировать их как α-фазу и γ-фазу. β-фаза обнаружена не была, из-за того, что количество сурьмы не превышает предел её растворимости в олове. Структура наплавленного металла соответствует структуре баббита Б88 (Рис.5 а,б).

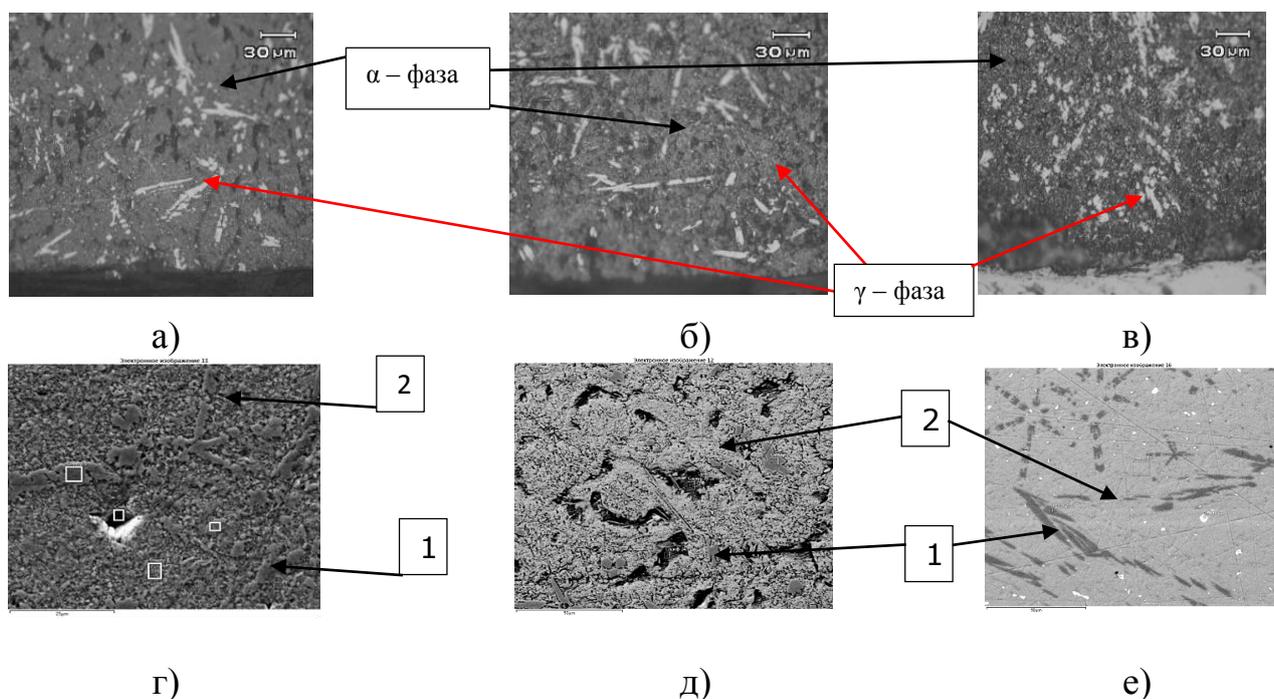


Рис.5. Микроструктура наплавленного металла на оптическом микроскопе (а, б, в) и на растровом электронном микроскопе (г, д, е)
 1- Интерметаллидная γ -фаза, 2-матрица - α -фаза

Таблица 2.

Химический состав наплавленного металла, полученный плазменно-порошковой наплавкой

№ режима	Исследуемая область*	Содержание химических элементов, масс. %			
		Cu	Sn	Sb	Fe
П/о, Ar+CO ₂	1	26.68	68.12	4.64	0.53
	2	1.14	90.05	8.02	0.79
Б/п, Ar	1	27.89	62.91	8.50	0,7
	2	2.28	82.25	15.47	-
П/о, Ar	1	35.26	60.95	3.40	-
	2	0.84	93.77	5.08	-

* Обозначение соответствует рисунку 5.
 П/о, Ar+CO₂ - наплавка образца выполнена с подслоем – олово, в смеси защитных газов: 98%Ar+2%CO₂;
 Б/п, Ar - наплавка образца выполнена без подслоя, в защитном газе -Ar;
 П/о, Ar - наплавка образца выполнена с подслоем - олово, в защитном газе -Ar;

Анализ микроструктуры наплавленного металла позволил установить наличие железа в покрытии, причём его количество зависит от условий наплавки. Так при наплавке без подслоя в наплавленном металле обнаруживаются фрагменты Fe в нижней части наплавленного покрытия (Рис.6). При наплавке плазменная дуга контактирует со стальной

поверхностью, что приводит к оплавлению неровностей поверхности. Образовавшиеся капли металла подложки попадают в сварочную ванну, приводя к формированию включений железа. Применение подслоя позволяет экранировать стальную подложку и, тем самым, снизить количество железа в наплавленном металле. В случае присутствия подложки железо только диффузионным путем попадает в наплавленный металл. Следует отметить увеличение содержания Fe в наплавленном металле при использовании в качестве защитного газа смеси 98% Ar+ 2% CO₂, что связано с увеличением концентрации и температуры дуги.

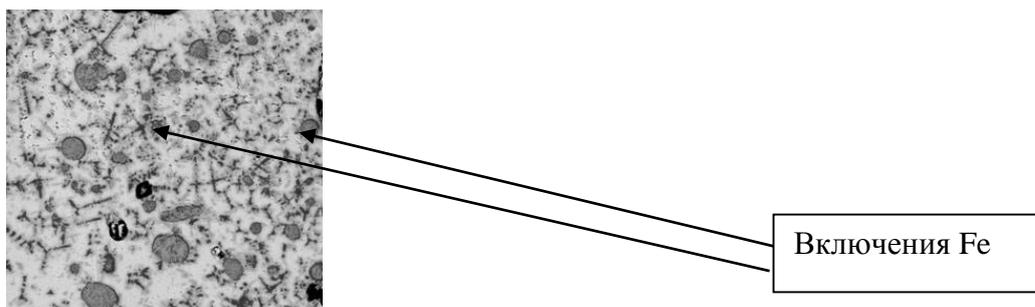


Рис.6. Структура с металлическими включениями на РЭМ

Количественный анализ структуры показал, что наибольшее воздействие на размер интерметаллидной фазы оказывает скорость наплавки. Так, увеличение скорости наплавки в 3 раза, приводит к снижению длины и ширины интерметаллидной фазы на 50%, что связано с уменьшением времени существования жидкой сварочной ванны. Использование импульсных режимов наплавки, при увеличении коэффициента асимметрии тока, приводит к увеличению длины на 46% и снижению ширины γ -фазы на 12%. Такой процесс объясняется увеличением интенсивности перемешивания жидкой сварочной ванны. Применение подслоя олова увеличивает длину γ -фазы на 36% и снижает ширину на 28%, благодаря разбавлению оловом присадочного материала.

Адгезионная прочность наплавленного слоя зависит от подготовки поверхности под наплавку. Нанесение подслоя олова увеличивает адгезионную прочность, и она составила свыше 19 МПа, при испытаниях срез, что подтвердилось и испытаниями на изгиб, где образцы с подслоем олова показали максимальный угол загиба образцов.

В четвёртой главе приведены результаты испытаний наплавленных покрытий на трение и износ в условиях сухого трения скольжения, а также даны технологические рекомендации по плазменно-порошковой наплавке покрытий из баббита.

Покрытия, выполненные без применения подслоя отслаиваются уже при напряженности работы 195 МПа*(м/с) (Рис. 6), тогда как при испытании покрытия, выполненного с применением подслоя, отслоение не наблюдалось во всем диапазоне трибонагружения (максимальная напряжённость работы составила 874 МПа*(м/с)).



Рис.7. Образец без подслоя после испытания на трение, при $p\nu=300$ МПа*(м/с)

Образцы, выполнение без подслоя, удалось испытать лишь при снижении напряженности работы до $p\nu=190$ МПа*(м/с) (нагрузка 0,5 МПа). При этом были зафиксированы следующие показатели: $f=0,91$; $I_v=4,2*10^{-3}$, мм³/м. Полученные данные свидетельствуют, что покрытие, наплавленное без применения подслоя, обладает в 2 раза меньшей нагрузочной способностью.

Результатами испытаний на трение и износ наплавленных покрытий, выполненных с применением подслоя и Ar в качестве защитного газа, показали, что существенное значение на износостойкость оказывает скорость наплавки. Минимальной износостойкостью обладают покрытия, выполненные на скорости 6 м/ч, причём интенсивность износа таких покрытий при испытании на трение и износ почти на два порядка выше, чем у других покрытий. Исключение составит лишь испытание при минимальной нагрузке ($p\nu=390$ МПа*(м/с)), где минимальная износостойкость покрытий отличает покрытия, выполненные при скоростях 12 и 18 м/ч. Максимальной износостойкостью обладают покрытия, выполненные при максимальной скорости – 18 м/ч.

Анализ полученных данных и сопоставление с результатами количественного анализа структуры показали, что влияние скорости наплавки на износостойкость связано с изменением структуры. Причем, установлено, что на износостойкость оказывают влияние не абсолютные значения геометрических размеров интерметаллидной фазы (длина, ширина) и не концентрация, а количество единиц интерметаллидной фазы, которые попадают в плоскость испытаний. Для количественного описания этого параметра ввели коэффициент ξ , определяемый соотношением:

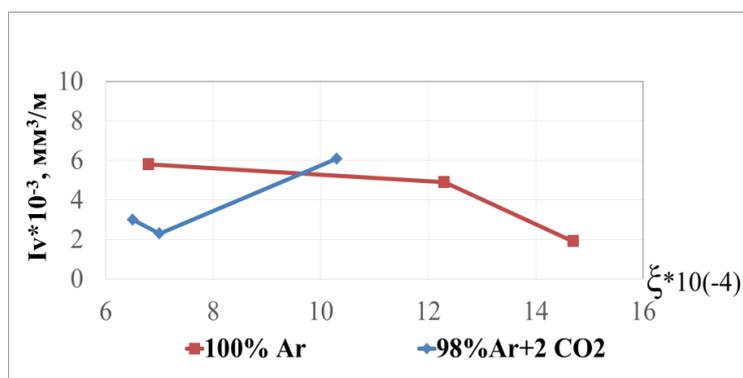
$$\xi = K/(L*h*100), [1/мм^2], \quad (1)$$

где $K, \%$ - концентрация γ - фазы, L , мм – длина γ - фазы, h , мм – ширина γ - фазы.

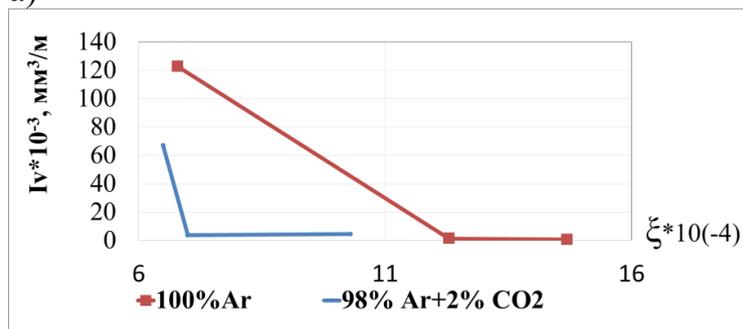
Действительно, меньшей износостойкостью обладают покрытия, в которых между соседними интерметаллидными фазами больше расстояние, вне зависимости от ширины и длины γ -фазы. В этом случае износу подвергается прежде всего матричный сплав (α -фаза), имеющий минимальную твердость, а затем выкрашивается освободившаяся интерметаллидная фаза (γ -фаза), при этом $\xi=5*10^{-4}$ мм⁻². Максимальная износостойкость наблюдается у наплавленных покрытий, в структуре

которых формируется γ -фаза с минимальным расстоянием между ними, при этом иглы интерметаллидной фазы могут быть короткими. Максимальная износостойкость наблюдается при ξ более $10 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^{-2}$. Таким образом, коэффициент ξ можно использовать в качестве критерия оценки структуры на износостойкость.

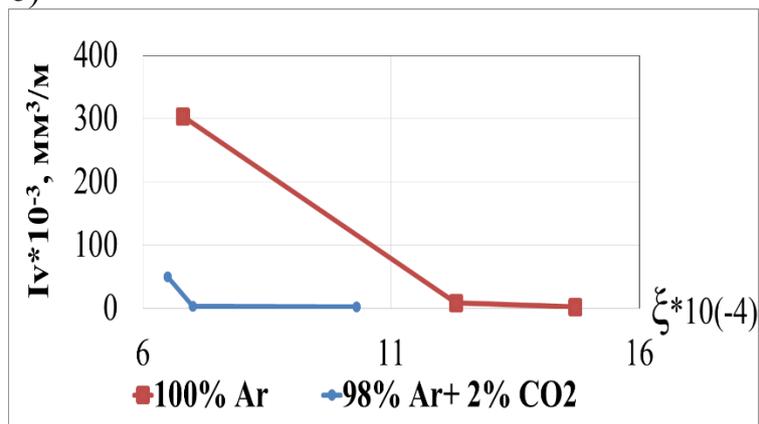
Применение в качестве защитного газа смеси 98% Ar+2% CO₂, несмотря на пористость покрытий, позволяет повысить износостойкость. Кроме того, расширяется диапазон трибонагружения. (Рис.7 и 8)



а)



б)



в)

Рис.8. Зависимость объёмного износа от коэффициента ξ .

а-испытание образцов при $p_v = 390 \text{ МПа} \cdot (\text{м/с})$, б - испытание образцов при $p_v = 507 \text{ МПа} \cdot (\text{м/с})$, в - испытание образцов при $p_v = 390 \text{ МПа} \cdot (\text{м/с})$

Наложение импульсов приводит к удалению пор у наплавленного металла. При использовании импульсов большую роль играет коэффициент асимметрии ток. Так, минимальную износостойкость наблюдали у образцов,

наплавленных при $K_a=7$, при этом на высоких значениях трибонагружения наблюдается рост интенсивности износа более, чем на порядок. А при $K_a=2,6$ наблюдали максимальную износостойкость практически во всём диапазоне трибонагружения. Для анализа структуры в этом случае применялся коэффициент ξ , полученные результаты согласовывались с результатами, полученными ранее, а именно, чем выше значение ξ , тем выше износостойкость покрытия. Таким образом, установлен критерий, позволяющий оценить износостойкость наплавленного металла, в зависимости от структуры.

Более подробный анализ работы покрытий, выполненных с применением различных защитных газов, представлен на Рис. 8. Видно, что покрытие, выполненное с применением аргона в качестве защитного газа, интенсивно изнашивается уже при напряженности работы выше 500 МПа^* (м/с). При этом покрытия, выполненные с применением смеси защитных газов $98\% \text{Ar} + 2\% \text{CO}_2$ и обладающие пористостью, работают при больших нагрузках. Следует отметить, что покрытия, наплавленные с применением смеси защитного газа, но дегазированные импульсным током (наплавка импульсной дугой, при $K_a=2,6$) показывают те же результаты, что и пористые покрытия, за исключением минимальных нагрузок, где пористое покрытие имеет меньшую износостойкость (интенсивность износа выше в 2,7 раза).

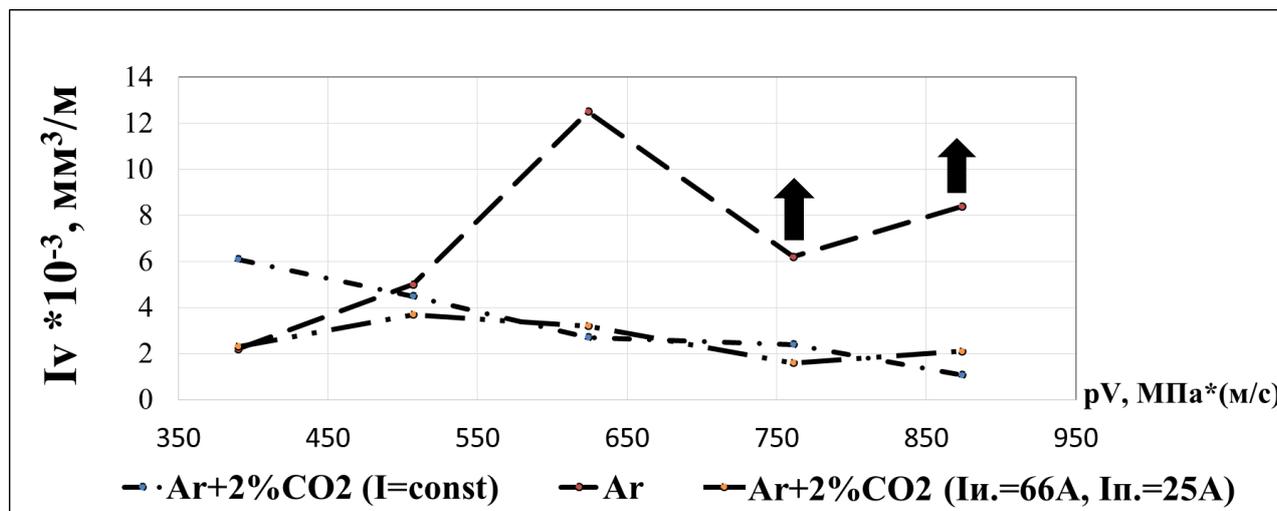


Рис.9. Зависимость объемного износа от напряженности работы для образцов, выполненных в чистом Ar и в смеси $98\% \text{Ar} + 2\% \text{CO}_2$

Основные выводы и результаты.

1. Антифрикционные покрытия на базе сплава баббита, выполненные плазменно – порошковой наплавкой в среде Ar, обладают низкими значениями пористости, не превышающие 2%.

2. Структура наплавленного металла, выполненного плазменно – порошковой наплавкой порошком марки SnSb8Cu4 по ИСО 4381, представляет собой матрицу α -фазы с произвольно расположенной в ней иглообразной интерметаллидной γ -фазой (Cu_nSn_m).

3. Для обеспечения адгезионной прочности наплавленных покрытий на уровне 60 МПа необходимо наносить подслои из олова (лужение наплавляемой поверхности).

4. Применение CO_2 в составе защитного газа приводит к увеличению пористости наплавленного металла (при введении 2% CO_2 в аргон пористость составляет 14,4%), однако, при этом повышается износостойкость и увеличивается нагрузочная способность покрытия.

5. Применение импульсной дуги, в сочетании со смесью газов, позволяет за счёт импульсов заметно снизить пористость наплавленных покрытий, благодаря интенсивному воздействию колебаний на дегазацию жидкой сварочной ванны.

6. Показано, что уменьшение погонной энергии с 948 до 316 Дж/см приводит к диспергированию (ширина и длина γ - фазы уменьшается на 50%), что приводит к увеличению износостойкости наплавленных покрытий на базе баббита почти в 2 раза.

7. Установлено, что применение смеси защитного газа 98%Ar+2% CO_2 позволяет расширить нагрузочную способность покрытия не менее чем на 40% за счёт науглероживания наплавленного металла.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Особенности формирования антифрикционных покрытий на базе сплавов баббита при плазменной наплавке / Гуркин С.В. [и др.] // Сварочное производство. №3.2018. С. 34-38. (0,85/0,5 п.л.)
2. Структура и эксплуатационные свойства антифрикционных покрытий из баббита / Гуркин С.В. [и др.] // Физика и химия обработки материалов. №3.2018. С. 58-65. (1,3/0,6 п.л.)
3. Разработка композиционных гранул для плазменно – порошковой наплавки антифрикционных покрытий, модифицированных углеродными наноструктурами / С.В. Гуркин [и др.] // Сварка и диагностика. №1. 2017. С. 58-62. (0,85/0,5 п.л.)