

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



УСОЛЬЦЕВ Евгений Алексеевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ
ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛИТЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА**

05.16.04 – Литейное производство

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена на кафедре «Литейное производство и упрочняющие технологии» Института новых материалов и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Фурман Евгений Львович

Официальные оппоненты:

Никитин Константин Владимирович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», декан Факультета машиностроения, металлургии и транспорта;

Швейкин Владимир Павлович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, заместитель директора по научной работе;

Ердаков Иван Николаевич, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, доцент кафедры «Литейное производство».

Защита состоится «18» декабря 2020 г. в 17:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.08.19 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1674>

Автореферат разослан «_____» ноября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сулицин Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одной из основных причин выхода из строя нефтяных штанговых глубинных насосов (ШГН) является неисправность клапанной пары, вызванная абразивным и коррозионным износом. Возникновение негерметичности клапанной пары приводит к снижению производительности или полному прекращению работы насоса.

Для добычи лёгкой и средней нефти, к которым относятся марки Siberian Light, Urals и Brent, наиболее востребованы клапанные пары из стеллитов, представляющих собой группу сплавов на основе хрома и кобальта. В настоящее время клапанные пары из стеллитов производятся методом порошковой металлургии, который, несмотря на достаточно высокие эксплуатационные характеристики получаемых изделий, не избавлен от определенных недостатков, а именно:

- Повышенный износ поверхности из-за наличия остаточной пористости, т.к. поры служат концентраторами напряжений и местами зарождения трещин. В процессе работы в порах может застревать абразивный материал, что приводит к увеличению степени износа поверхности контртела. Кроме того, наличие пор снижает коррозионную стойкость за счет увеличения площади взаимодействия поверхности с агрессивной средой.
- Сложность техпроцесса получения металлических порошков мелких фракций, приводящая к удорожанию стоимости изготовления продукции.

В связи с этим **актуальной задачей** является создание способа получения клапанных пар с высокими ударно-абразивными свойствами методом литья, лишенных озвученных выше недостатков.

Степень разработанности темы исследования

Большая часть работ отечественных ученых в области исследования клапанных пар посвящена сравнительной оценке стойкости стеллитовых клапанных пар различных производителей, полученных методом порошковой металлургии. Работы зарубежных исследователей главным образом затрагивают вопросы изучения свойств стеллитов с различным содержанием легирующих элементов безотносительно области их применения.

В данной диссертационной работе решена задача создания литейных сплавов на основе кобальтовых стеллитов для отливок шаров и седел клапанных пар, превосходящих по абразивной и коррозионной стойкости изделия, полученные методом порошковой металлургии.

Цель работы

На основании результатов теоретического и экспериментального исследования условий работы клапанных пар ШГН создать литейные сплавы для получения шара и седла клапанной пары, отличающиеся повышенной износостойкостью и коррозионной стойкостью.

В ходе исследования основное внимание было уделено решению **следующих задач:**

1. Разработать литейные сплавы для клапанных пар ШГН, превосходящие по эксплуатационным свойствам используемые в промышленности порошковые стеллиты.
2. Изучить влияние содержания легирующих элементов и технологических параметров литья на структуру и эксплуатационные свойства деталей клапанных пар.
3. Разработать технологию изготовления заготовок клапанных пар методом литья.

Научная новизна

1. Определены значения вязкости разработанных литейных сплавов Mk1s и Mk1b в диапазоне температур от 1280°C до 1700°C, установлена температура гомогенизации, позволяющая снизить размер карбидов и интерметаллидов в литых кобальтовых стеллитах на 20%.

2. Установлена качественная зависимость износостойкости сплавов на основе кобальтовых стеллитов от размера и формы карбидов, а не от общей твердости сплава. Обнаружено, что наибольший износ при ударно-абразивном изнашивании наблюдается за счет разрушения и выкрашивания интерметаллидных фаз, несмотря на их высокую твердость.

3. Определены основные теплофизические свойства сплавов Mk1s и Mk1b, необходимые для осуществления компьютерного моделирования процессов заливки и затвердевания. Получены значения плотности в диапазоне температур 20-1400°C, теплопроводности в диапазоне температур 20-1450°C, а также уравнения линейной температурной зависимости теплоемкости при температуре до 1150°C и в диапазоне 1150-1400°C.

Теоретическая и практическая значимость работы

Показана невозможность использования для получения литых заготовок клапанных пар ШГН сплава Stellite 20, применяемого в порошковой металлургии. Определены составы литейных сплавов для отливок шаров и седел клапанных пар ШГН с преобладающим карбидным упрочнением и низким содержанием интерметаллидов, обеспечивающие максимальную износостойкость при работе в условиях высокого абразивного и коррозионного износа.

Разработана технология получения заготовок клапанных пар различных типоразмеров из кобальтовых стеллитов методом литья по выплавляемым моделям, обеспечивающая получение продукции соответствующей требованиям нормативной документации.

Методы исследования:

Для решения поставленных задач использовались современные методы исследования, в частности метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с помощью микроскопа JSM-6490 LV, рентгеноструктурный анализ на дифрактометре Bruker D8 Advance, метод расчета фазовых диаграмм CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams), определение химического состава на искровом спектрометре SPECTROMAXx. Обработка цифровых изображений производилась с помощью программного обеспечения JMicroVision. Лазерная термообработка поверхности производилась на установке IPG ИРЭ-Полюс ЛС-5. Для изучения износостойкости применялись установка типа Бриннеля-Хауорта и испытательная машина СМЦ-2. Для изучения теплофизических свойств применялись стандартизированная методика гидростатического взвешивания, метод дроп-калориметрии, метод стационарного теплового потока, измерение жидкотекучести методом вакуумного всасывания. Моделирование процесса заливки и затвердевания проводилось в программном пакете LVMFlow.

Положения, выносимые на защиту

1. Химический состав и теплофизические свойства разработанных литейных сплавов на основе кобальта Mk1s и Mk1b.
2. Влияние термовременной обработки на структуру кобальтовых стеллитов.
3. Особенности технологии получения заготовок клапанных пар.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях и съездах: на XIV Международном съезде литейщиков (Казань, 2019), на XVI Международной научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (Москва, 2019).

Отработка технологии изготовления литых заготовок производилась в литейном цехе предприятия ООО «Литейное производство УБМ». Клапанные пары прошли промышленные испытания в ООО «РУСЭЛКОМ» и ООО ПКФ «АНТЕЙ».

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ, 3 из них опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, 1 статья вошла в международную базу Scopus.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературных источников, включающего 91 наименование. Общий объем диссертационной работы составляет 115 страниц и включает в себя 62 рисунка и 21 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность и степень разработанности темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, представлена научная и практическая значимость, степень достоверности и апробация полученных результатов.

В первой главе приведён обзор литературных источников по теме исследования. Показано, что штанговые глубинные насосы широко применяются на скважинах РФ, а также приведены данные статистики по причинам отказов скважинных насосов. Проведен анализ факторов, влияющих на выбор материала клапанной пары, по результатам которого установлено, что для большинства месторождений РФ наиболее подходящим материалом является кобальтовый стеллит. Рассмотрены кобальтовые стеллиты трёх типов, применяемые за рубежом в оборудовании для нефтегазовой промышленности. Отмечено, что стандарты в РФ содержат всего несколько марок сплавов типа стеллит и работа по их регламентации в зависимости от условий применения не

проводится. Показано, что изготовленные методом порошковой металлургии детали «Шар» и «Седло» клапанной пары обладают остаточной микропористостью, которая приводит к снижению герметичности узла и, как следствие, снижению эффективности работы насосной установки. На основании проведенного анализа сформулирована цель и выделены основные задачи работы.

Вторая глава посвящена подбору химического состава сплава для отливок клапанных пар. В первую очередь была осуществлена попытка использования в качестве литейного сплава наиболее часто применяемого в порошковой металлургии для получения клапанных пар сплава Stellite 20, химический состав которого представлен в табл. 1. В соответствии с API 11AX основным критерием отбора сплавов для получения клапанных пар является твердость. Для шаров значение твердости составляет HRC 56-63, для седел HRC 51-57, при этом необходимо, чтобы твердость седла была ниже твердости шара.

Таблица 1. Химический состав сплава Stellite 20

Сплав	Химический состав									Твердость HRC
	C	Cr	W	Si	Ni	Mn	Mo	Fe	Co	
Stellite 20	1,9-2,95	31-35	16,5-19,5	< 1,5	< 2,0	< 1,0	< 1,0	< 3,0	осн.	52-62

Опытные плавки производились в индукционной тигельной печи емкостью 30 кг с нейтральной футеровкой из чистых шихтовых материалов. Температура расплава перед заливкой составляла $1400 \pm 20^\circ$, в качестве материала литейной формы использовался кварц плавный аморфный, в качестве связующего применялся гидролизированный этилсиликат ЭТС-40, температура формы перед заливкой составляла $300 \pm 20^\circ\text{C}$.

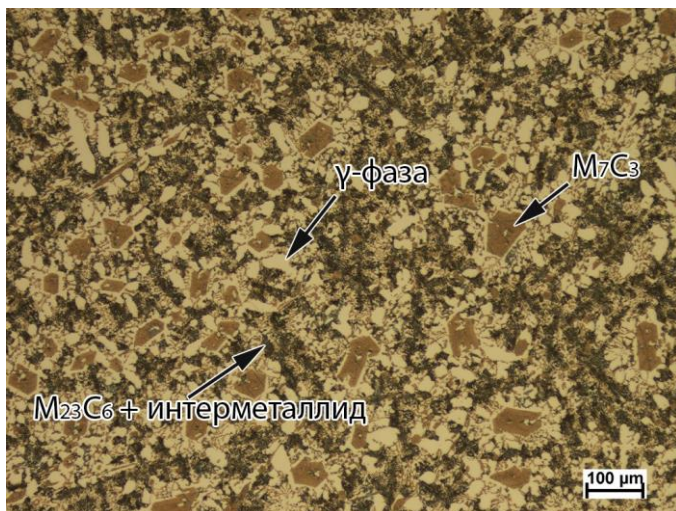


Рисунок 1. Микроструктура литого сплава Stellite 20

Анализ микроструктуры образцов показал, что в структуре литого сплава Stellite 20 (рис. 1) наблюдается множество крупных включений различного рода карбидов. Например, имеющие характерную призмобразную форму карбиды M_7C_3 в среднем имеют размер 60 мкм, а наиболее протяженные достигают 75-90 мкм.

Средняя площадь сечения зерна составила 1450 мкм², что также соответствует 6 баллу зерна по ГОСТ 5639-82. Объемная доля карбидов составила 51%.

Воздействие ударных нагрузок приводит к растрескиванию и выкрашиванию крупных карбидных включения, что вызывает образование микропористости и негерметичность узла клапанной пары. В связи с этим было принято решение о необходимости исследования возможных путей повышения однородности распределения фаз в объеме отливки и измельчения микроструктуры.

Первоначально было опробовано поверхностное модифицирование, в качестве модификатора был выбран алюминат кобальта ($CoAl_2O_4$), содержащий от 32 до 44% кобальта с размером частиц 4-10 мкм. Проведенный после заливки микроструктурный анализ показал незначительное изменение структуры сплава на опытных образцах. Вероятнее всего это связано с тем, что в высокоуглеродистых сплавах с содержанием углерода $>0,6\%$ карбидообразование начинается еще в жидком состоянии, в то время как алюминат кобальта главным образом применяют для низкоуглеродистых сплавов.

Помимо модифицирования сильным измельчающим структуру сплава (особенно в поверхностном слое) способом является повышение скорости кристаллизации. Для проверки этого были опробованы следующие методы:

1. Замена материала формы с плавленного кварца на корунд, обладающего более высокой теплопроводностью ($1,38 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и $34,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ соответственно);
2. Замена опорного наполнителя с кварцевого песка на металлический;
3. Использование принудительного воздушного охлаждения потоками сжатого воздуха;
4. Нанесение на поверхность литейной формы дополнительного слоя мела, увеличивающего скорость охлаждения за счет эндотермической реакции разложения карбоната кальция.

Анализ микроструктуры образцов показал отсутствие какого-либо заметного измельчения структуры литого сплава Stellite 20 во всех случаях.

Еще одним эффективным способом воздействия на структуру металла является термовременная обработка (ТВО), смысл которой заключается в выдержке расплава при высокой температуре в течение определенного промежутка времени. ТВО характеризуется структурно чувствительной характеристикой – вязкостью, для измерения которой при высокой температуре применяется метод, основанный на фиксации периода и декремента затухания крутильных колебаний цилиндрического тигля с жидким металлом. При изучении сплава Stellite 20 было отмечено, что при повышении температуры от $T_{\text{лик}}$ до 1700°C (критическая температура) на политерме вязкости наблюдается возникновение нескольких пиков (рис. 2).

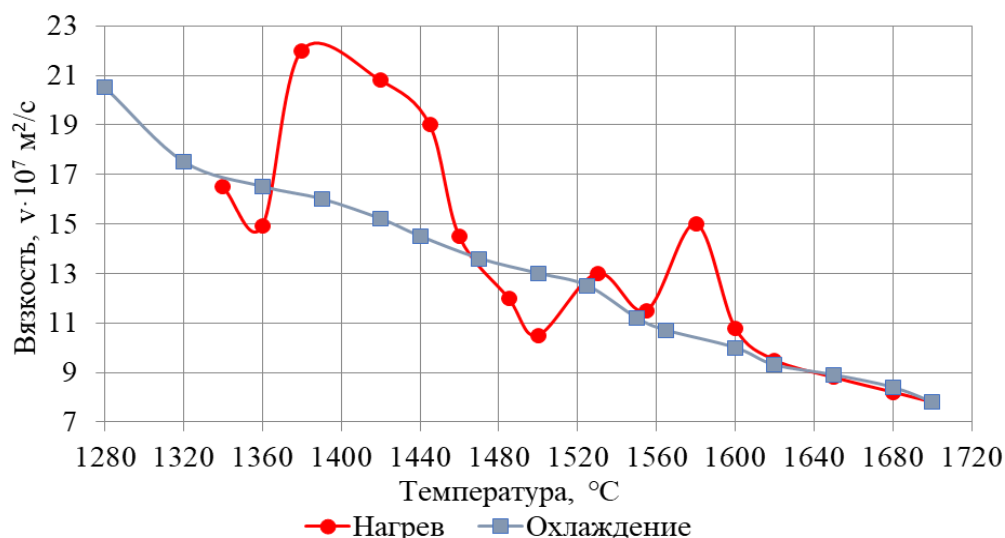


Рисунок 2. Влияние температуры на вязкость сплава Stellite 20 (Л)

Вероятно, это связано с расплавлением и разложением крупных карбидов M_7C_3 на более мелкие M_{23}C_6 по реакции $23\text{Cr}_7\text{C}_3 = 7\text{Cr}_{23}\text{C}_6 + 27\text{C}$. При последующем охлаждении расплава наблюдалось расхождение кривых нагрева и охлаждения (гистерезис). Наличие гистерезиса свидетельствует о необратимости происходящих при нагреве процессов и об исчезновении неравновесных формирований, унаследованных от твердого состояния.

Параметры проведения плавки и подбора шихтовых материалов не изменились, однако перед разливкой сплав выдерживался при температуре $1660 \pm 20^\circ\text{C}$ в течение 30 минут. На рис. 3 представлена микроструктура сплава Stellite 20(Л) до и после проведения ТВО.

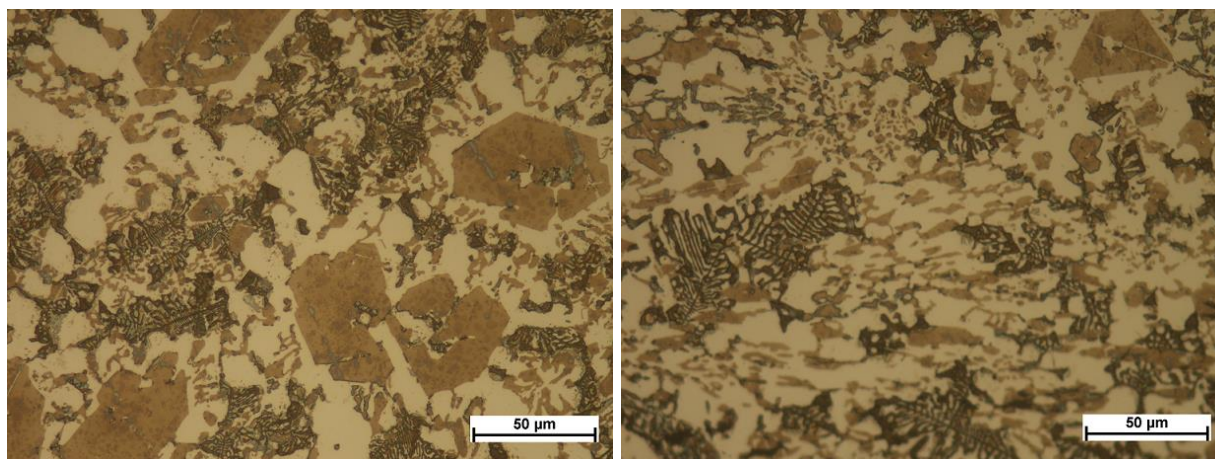


Рисунок 3. Структура сплава Stellite 20 до и после проведения ТВО

ТВО значительно повлияла на распределение карбидных составляющих, в структуре сплава наблюдается появление чередующихся с γ -твердым раствором кобальта пластинчатых слоев карбидов $M_{23}C_6$. Средняя площадь сечения зерна после ТВО составила 1120 мкм², что соответствует 6 баллу зерна по ГОСТ 5639-82. Однако, в сплаве по-прежнему присутствовали крупные карбиды M_7C_3 размером не менее 60-70 мкм.

Для оценки дальнейшей возможности применения литого сплава Stellite 20 в качестве базового для определения оптимального химического состава литейного сплава, был проведен его фазовый количественный анализ с помощью расчетного метода CALPHAD (табл. 2).

Таблица 2. Фазовый состав литого сплава Stellite 20

Gamma (γ)	$M_{23}C_6$	MU (μ)	M_7C_3	M_6C	G_Phase
37,44	27,56	18,4	9,34	6,09	1,17

Основными упрочняющими элементами в Co-Cr-W-Mo сплавах являются комплексные карбиды M_7C_3 , $M_{23}C_6$ (оба карбиды хрома), M_6C и MC. Карбид M_7C_3 обладает тригональной структурой и имеет самую высокую износостойкость по сравнению с другими карбидами из-за повышенной микротвердости и разветвленности в матричной фазе. Сильное упрочнение сплава вторичными карбидными выделениями наступает в результате реакции распада M_7C_3 , приводящей к образованию $M_{23}C_6$. Фазы μ и σ являются топологически плотноупакованными (ТПУ) и относятся к хрупким интерметаллическим соединениям переходных элементов. ТПУ фазы служат источником преждевременного зарождения и распространения трещин, ведущих к хрупкому разрушению или снижению пластичности.

Результаты РЭМ (рис. 4) и рентгеноструктурного анализа показали наличие в сплаве Stellite 20(Л) неоднородной структуры с присутствием трех отдельных фаз: γ -твердого раствора кобальта (серый цвет), карбидов типа $M_{23}C_6$ и M_6C (черный цвет) и μ фазы в виде интерметаллида $Co_2(W,Cr)_3$ (белый

цвет). Локализованные скопления негативно интерметаллидов влияют на стойкость сплава к растрескиванию при ударно-абразивном износе.

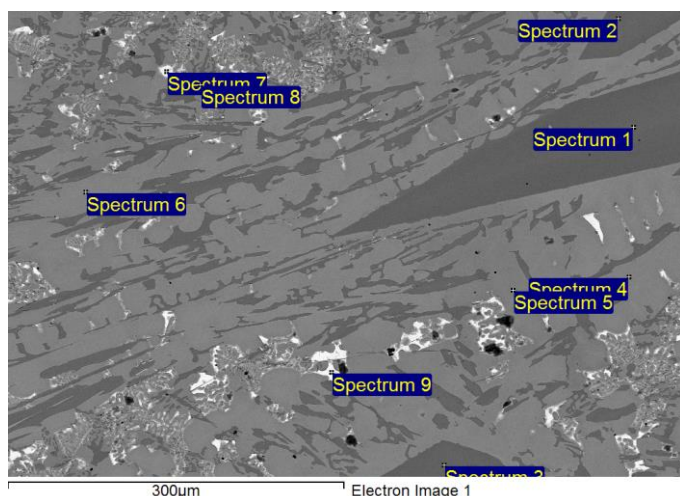


Рисунок 4. Результаты РЭМ сплава
Stellite 20(Л)

состав оказывают С, Cr и W. В результате расчетов был определен химический состав сплава (таблица 3), при котором наблюдалось минимальное содержание хрупких интерметаллидных фаз (рис. 5).

С целью подбора оптимального химического состава сплава, обеспечивающего минимизацию образования хрупких интерметаллидных фаз, было проведено исследование методом CALPHAD влияния процентного содержания элементов на фазовый состав сплава. Обнаружено, что наибольшее влияние на фазовый

Таблица 3. Расчетный химический состав литого сплава Mk1

Сплав	Химический состав								
	C	Cr	W	Si	Ni	Mn	Mo	Fe	Co
Mk1	2,3-2,6	26,0-30,0	12,0-15,0	0,7-1,0	<1,5	0,8-1,4	< 1,5	< 3,0	осн.

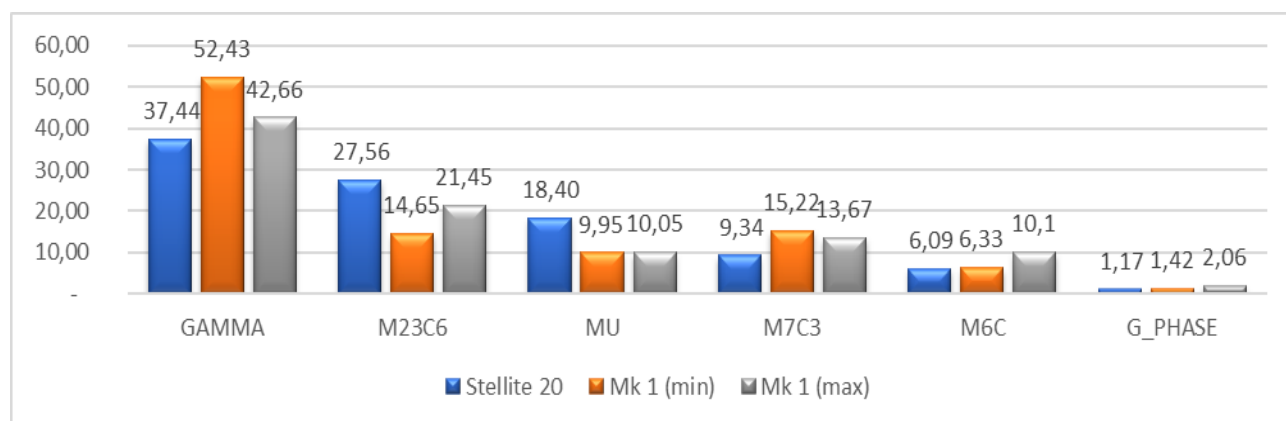


Рисунок 5. Фазовый состав при минимальном и максимальном пределе легирующих элементов по сравнению с исходным сплавом Stellite 20

По результатам исследования структуры установлено, что по сравнению с базовым сплавом Stellite 20(Л) сплав Mk1 с минимальным содержанием легирующих элементов обладает более мелкой структурой, состоящей из карбидов $M_{23}C_6$, образующих скелетообразные включения, окруженных μ фазой. При подобном расположении хрупкая интерметаллидная μ фаза не образует крупных включений и находится главным образом в виде сложного соединения с карбидом M_6C (рис. 6). Средняя площадь сечения зерна составила 472 мкм^2 , что соответствует 8 баллу зерна и позволило отнести данный сплав к мелкозернистым (балл зерна 7-14). Объемная доля карбидов составила 40%.

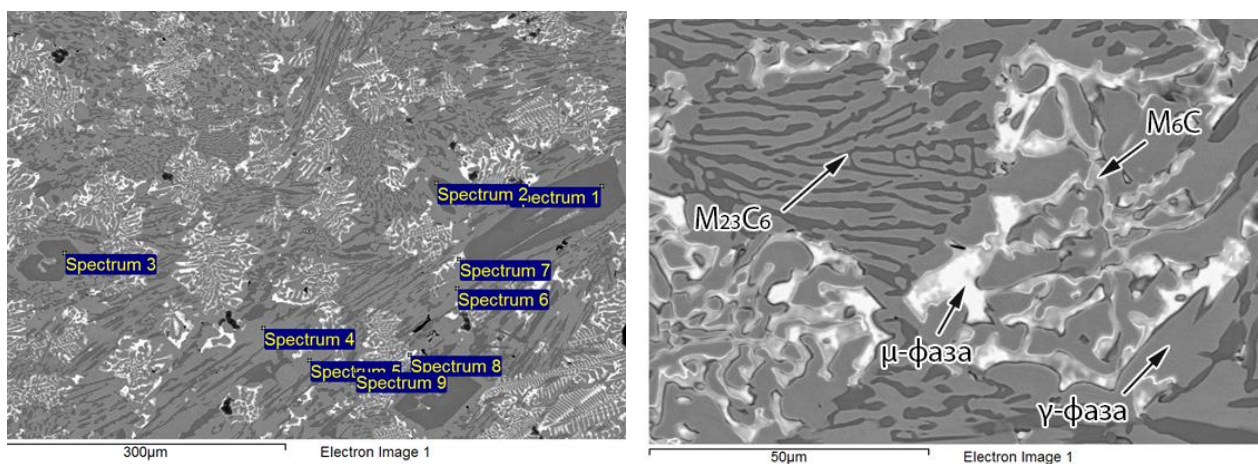


Рисунок 6. Результаты РЭМ сплава Mk1 с минимальным легированием

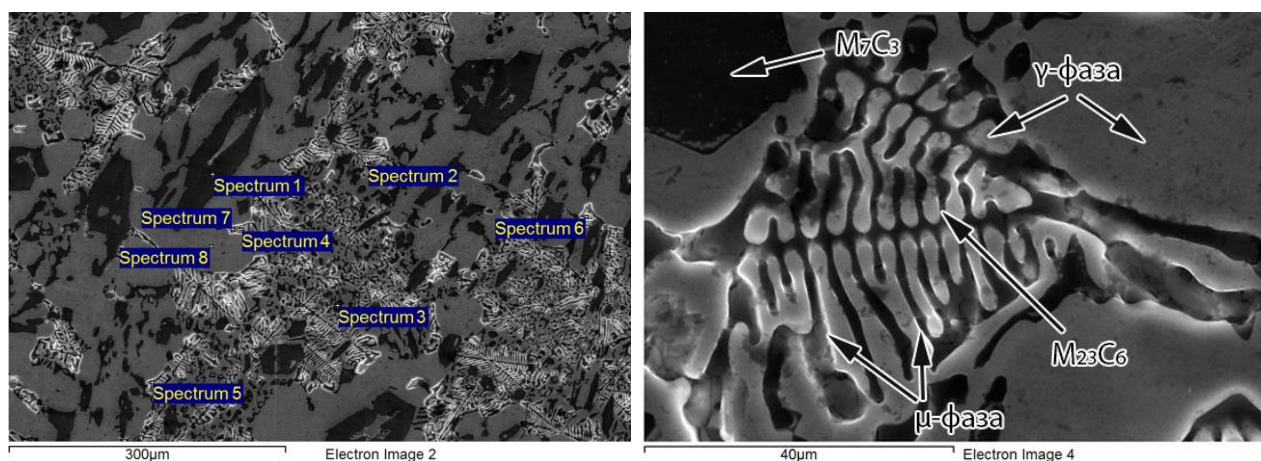


Рисунок 7. Результаты РЭМ сплава Mk1 с максимальным легированием

Несмотря на небольшую разницу в процентном содержании легирующих элементов, наблюдаемая в сплаве Mk1 с максимальным легированием структура имеет заметные отличия, основными из которых являются большее число призмобразных карбидов M_7C_3 и меньшая толщина слоя μ фазы на границах карбидов $M_{23}C_6$, что хорошо видно на рис.7. Средняя площадь сечения зерна составила 211 мкм^2 , что соответствует 9 баллу зерна, объемная доля карбидов составила 47%.

Замеры твердости образцов сплавов с минимальным и максимальным легированием показали 50-53 и 55-59,5 ед. HRC соответственно, что удовлетворяет требованиям стандарта API 11AX.

В результате, с помощью корректировки химического состава удалось добиться значительного измельчения структуры сплава Stellite 20(Л). Таким образом, для проведения дальнейших испытаний было решено выделить из диапазона химического состава опытного сплава Mk1 два новых сплава Mk1s и Mk1b, характеристики которых должны наилучшим образом подойти для отливок седла и шара (табл. 4).

Таблица 4. Химический состав опытных сплавов на основе Mk1

Сплав	Химический состав								
	C	Cr	W	Si	Ni	Mn	Mo	Fe	Co
Mk1s	2,3-2,45	26,0-28,0	12,0-14,0	0,7-1,0	<1,5	0,8-1,4	< 1,5	< 3,0	осн.
Mk1b	2,45-2,6	27,5-30,0	13,5-15,5	0,7-1,0	<1,5	0,8-1,4	< 1,5	< 3,0	осн.

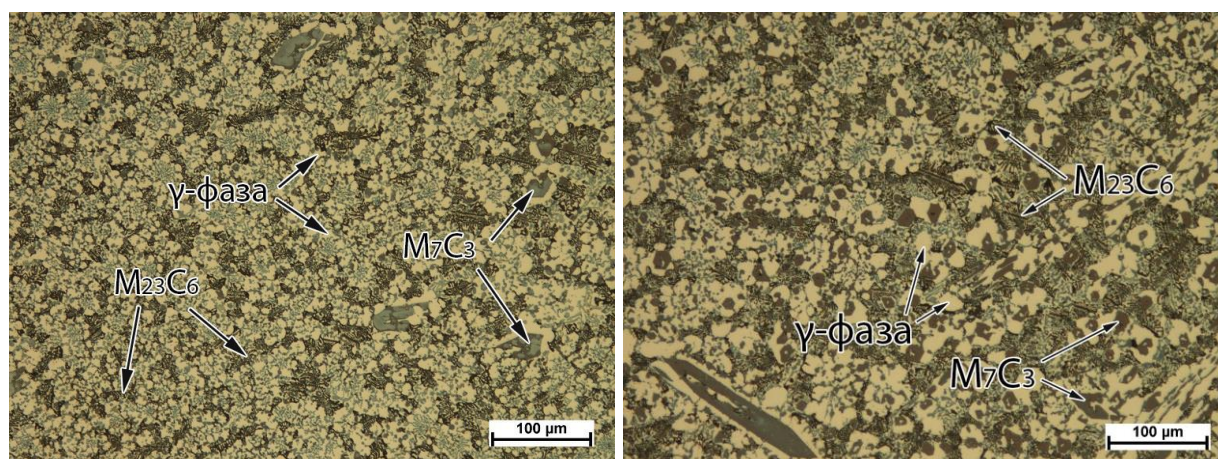


Рисунок 8. Микроструктура сплавов Mk1s (слева) и Mk1b (справа)

Учитывая обнаруженное ранее положительное влияние ТВО на сплав Stellite 20(Л) было принято решение оценить его влияние на сплав Mk1 (рис. 8). Полученная политерма вязкости сплава Mk1 показала схожие со Stellite 20(Л) параметры кривых нагрева и охлаждения. Обработка привела к уменьшению средней площади сечения зерна с 472 мкм^2 до 244 мкм^2 . Объемная доля карбидов составила 40%. Замеры твердости после ТВО не показали каких-либо изменений относительно сплава Mk1 без ТВО.

Дополнительно была проведена оценка влияния лазерной термообработки на структуру сплава Mk1s. После обработки образца при мощности лазерного луча 600 и 1000 Ватт со скоростью 0,05 мм/с удалось добиться измельчения структуры на глубину 0,05 и 0,2 мм соответственно, однако наблюдалось растрескивание обработанной поверхности. Несмотря на значительное измельчение структуры, глубина измельченного слоя является недостаточной и не превышает припуск на механическую обработку.

Третья глава посвящена сравнительному исследованию износостойкости наиболее распространенных в промышленности стеллитов марки ВЗК (43 HRC), 3В14КБ (60 HRC), Stellite 20(ПМ) (59 HRC) с опытными сплава Mk1s (53 HRC) и Mk1b (56 HRC) при различных видах износа. Результаты исследования показали, что при износе по закрепленному абразиву износостойкость кобальтовых стеллитов главным образом зависит от твердости структурных составляющих сплава и занимаемой ими суммарной площади, но не зависит от их размера и формы. Получивший наибольший износ образец из сплава ВЗК имеет в своём составе преимущественно кобальтовую матрицу, в то время как показавший наибольшую износостойкость сплав 3В14КБ обладает крупными карбидными включениями и разветвленной сетью карбидов и интерметаллидов.

При износе по незакрепленному абразиву напротив размер и форма карбидов имеют большое влияние, поскольку от их распределения главным образом зависит степень неравномерности износа мягкой кобальтовой

матрицы. Обладающие плотной структурой с округлыми карбидами сплавы Mk1s и Mk1b продемонстрировали лучшие показатели износостойкости, даже по сравнению с порошковым Stellite 20. Это связано с наличием в последнем микропор, служащих концентраторами напряжений и центрами зарождения микротрещин.

Установлено, что при газоабразивном изнашивании при малых углах атаки ($\alpha < 30^\circ$) механизм износа схож с износом по незакрепленному абразиву, а исследуемые сплавы не обладают заметной разницей в износостойкости. По мере увеличения угла атаки абразива износ наиболее твердых сплавов, возрастал по причине изменения механизма изнашивания с микрорезания на удар, что приводит к выкрашиванию хрупких твердых фаз – крупных карбидов и интерметаллидов. Опытные сплавы Mk1b и Mk1s показали сопоставимый друг с другом уровень износостойкости при различных углах атаки абразива. В то же время оба сплава показали меньшую степень износа при углах атаки 75-90° по сравнению с порошковым Stellite 20.

Также был изучен износ исследуемых стеллитов при трении металлических пар с контртелом из сплава Stellite 3. Наибольшую износостойкостью показал сплав 3B14KB с максимальным, по сравнению с остальными сплавами, содержанием легирующих элементов, которые приводят к образованию крупных карбидов и скоплений интерметаллидов. При этом сплав Mk1b, обладающий меньшим содержанием углерода, хрома и вольфрама показал наименьший суммарный износ пары трения среди исследуемых литейных сплавов, что связано с преобладанием в его структуре округлых карбидов меньшего размера, не оказывающих царапающего воздействия на материал контртела.

Одним из основных преимуществ стеллитовых клапанных пар перед клапанами из карбида вольфрама является устойчивость к сероводородной коррозии. При проведении испытаний в растворе H_2SO_4 с добавлением 1,5 г/л стимулятора наводороживания – тиомочевина было установлено, что

коррозионная стойкость литого сплава Mk1 в среде сероводорода превосходит порошковый сплав Stellite 20 на 10%, а сплав ВК8 в 4 раза. Лучшие показатели стойкости сплава Mk1 связаны с отсутствием микропористости на поверхности литой заготовки, что обеспечивает меньшую площадь взаимодействия с агрессивной средой, по сравнению заготовками, полученными методом ПМ.

Четвертая глава посвящена определению основных теплофизических свойств сплава Mk1 и разработке технологии получения отливок клапанных пар. На основании технологических параметров отливок произведен и обоснован выбор литья по выплавляемым моделям в качестве технологии получения отливок. По результатам испытаний в качестве огнеупорного материала литейной формы был выбран плавленый кварц аморфный, в качестве связующего ЭТС-40.

Плотность сплава Mk1 при комнатной температуре была определена методом гидростатического взвешивания и составила $8,56 \text{ г/см}^3$. С помощью метода CALPHAD была получена зависимость плотности сплава от температуры в диапазоне 20-1400°C. Определение значений теплопроводности производилось методом стационарного теплового потока, в результате были получены значения теплопроводности сплава Mk1 в диапазоне 20-1450°C. Значение теплоемкости были определены расчетным методом CALPHAD и проверены экспериментальным путём с помощью метода дроп-калориметрии. В результате были получены уравнения линейной температурной зависимости удельной теплоемкости для температур до 1150°C и диапазона температур 1150-1400°C. Полученные значения основных теплофизических свойств сплава позволили провести моделирование процесса заливки с достаточно высокой степенью точности.

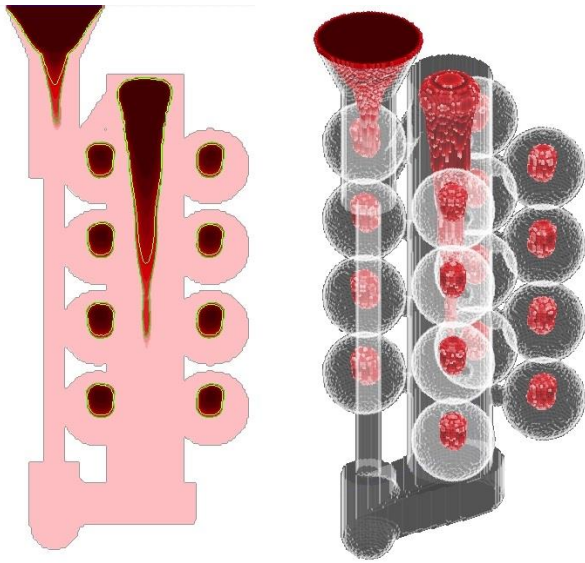


Рисунок 9. Результаты моделирования отливки «Шар»

Результаты моделирования первоначального варианта литниково-питающей системы для отливки «Шар» представлены на рис. 9. Наличие подобной усадочной раковины в теле отливки не допускается, поскольку это приводит к изменению центра тяжести шара и его неравномерному износу в процессе работы. Образование усадочной раковины объясняется тем, что при таком расположении отливок на

стояке круглого сечения наблюдался их сильный перегрев по причине близкого расположения между собой, т.к. каждый отдельный шар представляет собой массивный тепловой узел. Дальнейшее моделирование показало, что значительное уменьшение влияния тепловых полей отливок друг на друга наблюдается при увеличении расстояния между отливками не менее чем на $\frac{1}{4}$ диаметра шара. Для увеличения расстояния по горизонтальной оси стояк круглого сечения был заменен на стояк треугольного сечения, а для борьбы с оксидными плёнами в нижней части стояка-коллектора был установлен пенокерамический фильтр. Еще одним важным средством для борьбы с заворачиванием оксидной плёны является выполнение на поверхности отливок специальной сетки насечек высотой 0,5-1,0 мм (рис. 10а).

С использованием полученных данных была разработана технология получения отливок сёдел клапанных пар (рис. 10б). Для эффективного удаления газов из формы в процессе заливки на коллекторе выполнен вентиляционный канал-выпор, обламываемый перед заливкой, а отливки располагаются под углом.

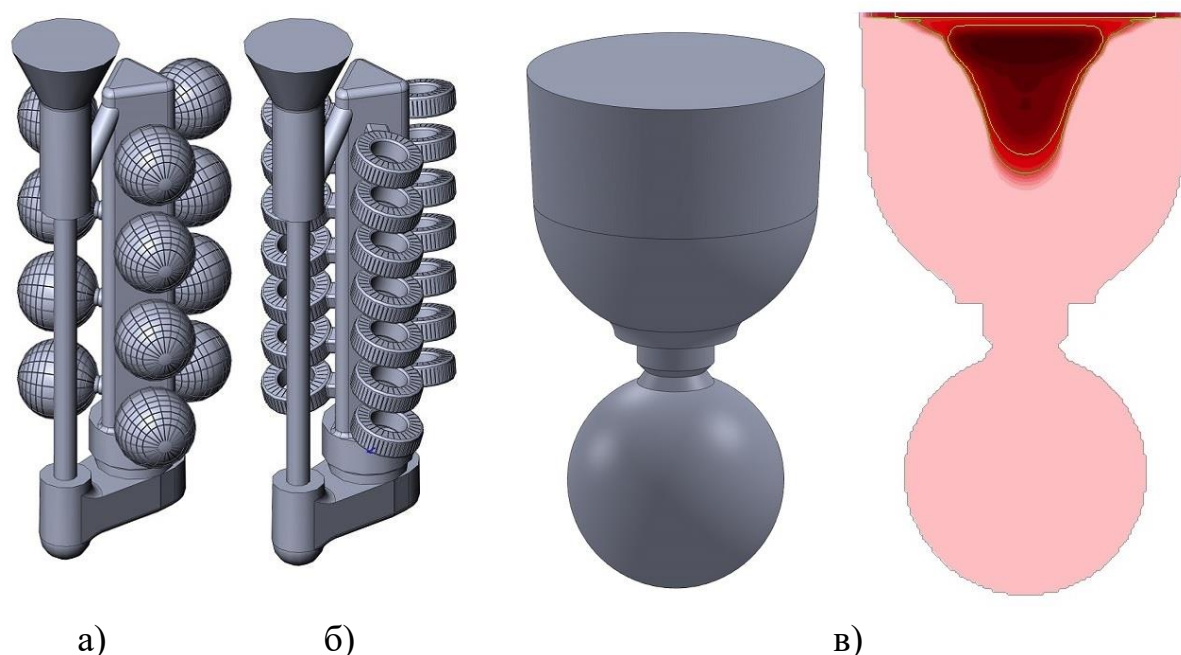


Рисунок 10. ЛПС отливки «Шар» (а), «Седло» (б) и «Шар V11-400» (в)

В связи с тем, что боковой коллектор-прибыль не обеспечивает достаточного питания отливок шаров диаметром более 80 мм в процессе усадки, для их получения была использована литниковая система VI типа, в которой питающим элементом является верхняя прибыль (рис. 10в). Сосредоточение наиболее горячего расплава в верхней части прибыли приводит к созданию в форме благоприятного для питания отливки градиента температур. Для исключения попадания плены в полость формы был опробован способ заливки, работающий по принципу стопорного ковша. Данный способ позволяет исключить замешивание плены в расплав и предотвратить избыточное окисление металла в процессе заливки, а также обеспечивает получение качественных плотных заготовок.

Проведенные промышленные испытания доказали пригодность технологии для массового производства отливок клапанных пар (рис. 11). Результаты испытаний на герметичность литых клапанных пар показали их способность обеспечивать герметичность узла при вакуумном давлении $0,65 \text{ кгс/см}^2$ ($\sim 0,063 \text{ МПа}$) в течение 10 секунд в соответствии со стандартом

API 11AX. При этом, по сравнению с порошковыми клапанными парами, они показали лучшие показатели герметичности.



Рисунок 11. Готовые изделия «Шар» и «Седло» различных типоразмеров

В **заключении** работы сформулированы выводы и общие научные и практические результаты исследования.

1. Исследована возможность применения для получения литых заготовок сплава Stellite 20, используемого в порошковой металлургии. Проведенный микроструктурный и фазовый анализ литого Stellite 20 показал наличие крупнозернистой структуры и высокого содержания хрупкой интерметаллидной μ фазы, склонной к выкрашиванию (около 20%).

2. Исследовано влияние технологических параметров, в частности скорости охлаждения, на микроструктуру кобальтовых стеллитов. Установлено, что различные способы увеличения скорости охлаждения поверхностного слоя металла через поверхность литейной формы не оказывают заметного влияния на микроструктуру литого сплава Stellite 20 по причине высокого теплового сопротивления формы. Глубина измельченного слоя составила не более 0,1-0,15 мм, что значительно меньше припуска на механическую обработку.

3. Установлено, что изменение концентрации различных легирующих элементов (главным образом C, Cr и W) в пределах марки сплава Stellite 20 не позволяет получить необходимый фазовый состав с содержанием μ фазы в пределах 10-12%. После расширения диапазона легирования за рамки химического состава сплава Stellite 20 был определен состав опытного литейного сплава Mk1. В рамках сплава Mk1 были отдельно выделены сплавы Mk1s и Mk1b для отливок «Седло» и «Шар» соответственно. Анализ этих

сплавов показал наличие значительно более мелкой структуры, по сравнению со сплавом Stellite 20(Л), а также твердость 50-55 и 55-58 ед. HRC соответственно для Mk1s и Mk1b, что удовлетворяет требованиям API 11AX.

4. Изучено влияние термовременной обработки на сплавы Stellite 20(Л) и сплав Mk1. При нагреве до температуры 1700°C и последующем охлаждении в обоих случаях наблюдался гистерезис вязкости. После выдержки в течение 30 минут при температуре 1700°C в обоих сплавах наблюдалось измельчение крупных карбидов M_7C_3 и более равномерное распределение мелких карбидов $M_{23}C_6$ в объеме металла. Показатели твердости сплавов Stellite 20(Л) и Mk1 до и после термовременной обработки не изменились и составили 51-53 и 55-58 ед. HRC соответственно.

5. Показано, что при испытании на износ по закрепленному абразиву износостойкость кобальтовых стеллитов главным образом зависит от твердости структурных составляющих сплава и занимаемой ими суммарной площади, но не зависит от их размера и формы. При износе по незакрепленному абразиву напротив размер и форма карбидов имеют большое влияние, поскольку от их распределения главным образом зависит степень неравномерности износа мягкой кобальтовой матрицы.

6. Установлено, что при газоабразивном изнашивании при малых углах атаки ($\alpha < 30^\circ$) исследуемые сплавы не обладают заметной разницей в степени износостойкости, т.к. механизм износа схож с износом по незакрепленному абразиву. По мере увеличения угла атаки абразива износ наиболее твердых сплавов, возрастает по причине изменения механизма изнашивания с микрорезания на удар, что приводит к выкрашиванию хрупких твердых фаз – крупных карбидов и интерметаллидов. Износ относительно пластичного сплава ВЗК с увеличением угла атаки значительно уменьшился, т.к. энергия ударного воздействия абразива расходуется главным образом на деформацию пластичной кобальтовой матрицы. Сплавы Mk1b и Mk1s показали сопоставимый друг с другом уровень износостойкости при различных углах

атаки абразива. По сравнению с порошковым Stellite 20 оба опытных сплава показали меньшую степень износа при углах атаки 75-90°.

7. Определены значения основных теплофизических характеристик сплава Mk1, необходимые для осуществления компьютерного моделирования процессов заливки и затвердевания. Получены значения плотности в диапазоне температур 20-1400°C, теплопроводности в диапазоне температур 840-1450°C, а также уравнения линейной температурной зависимости теплоемкости при температуре до 1150°C и в диапазоне 1150-1400°C.

8. Разработана технология получения литых шаров и седел клапанных пар штанговых глубинных насосов методом литья по выплавляемым моделям, обеспечивающая получение качественных заготовок, удовлетворяющих всем предъявляемым к ним требованиям. Определены методы борьбы с усадочной пористостью и оксидными плёнами. Проведено моделирование процессов заливки и затвердевания отливок «Шар» и «Седло» по разработанной технологии, достоверность результатов моделирования подтверждена заливкой опытных партий отливок.

9. Проведенные испытания герметичности литых клапанных пар показали их соответствие стандарту API 11 AX, все образцы обеспечили заданное значение вакуумного давления 0,65 кгс/см² в течение 10 секунд до и после проведения испытаний на износ на модельной жидкости.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:

1. Усольцев Е.А. Литые клапанные пары штанговых насосов / Е.А. Усольцев, Е.Л. Фурман, И.Е. Фурман // Литейщик России. – 2017. – №9. – С. 31-32; 0,25 п.л./ 0,1 п.л.
2. Усольцев Е.А. Разработка технологии изготовления клапанных пар ШГН методом литья по выплавляемым моделям / Е.А. Усольцев, Е.Л. Фурман,

- И.Е. Фурман, С.Н. Злыгостев // Литейщик России. – 2019. – №4. – С. 31-35; 0,57 п.л. / 0,2 п.л.
3. Usoltsev E. A. Effect of laser heat treatment on structure and wear resistance of cobalt stellite / E.L. Furman, E.A. Usoltsev, I.S. Bakhteev, I.E. Furman & A.V. Shak // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1396; 0,31 п.л. / 0,15 п.л. (Scopus).
 4. Усольцев Е.А. Влияние термовременной обработки на микроструктуру кобальтовых стеллитов / Е.А. Усольцев, Е.Л. Фурман, И.Е. Фурман // Литейное производство. – 2020. – №10. – С. 5-7; 0,35 п.л. / 0,15 п.л.

Публикации в других изданиях:

5. Усольцев Е.А. Исследование способов измельчения микроструктуры кобальтовых стеллитов / Е.А. Усольцев, Е.Л. Фурман, И.Е. Фурман, И.С. Бахтеев // Труды XIV Международного съезда литейщиков. – Казань: Российская ассоциация литейщиков, 2019. – С. 116-120; 0,57 п.л. / 0,28 п.л.
6. Усольцев Е.А. Влияние лазерной термической обработки на структуру и износостойкость кобальтовых стеллитов / Е.А. Усольцев, Е.Л. Фурман, И.С. Бахтеев, И.Е. Фурман, А.В. Шак // Быстрозакаленные материалы и покрытия. Материалы XVI-й Международной научно-технической конференции. МАИ : Матер. конф. – Москва : Пробел-2000, 2019. – С. 266-270; 0,31 п.л. / 0,15 п.л.

Подписано в печать 10.11.2020 Формат 60x84 1/16
 Бумага офсетная Печать офсетная Авт. Л. 1,0
 Заказ № Тираж 100 экз.
 Отпечатано в типографии
 ООО «Издательство УМЦ УПИ»
 г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2
 Тел.: (343) 362-91-16, 362-91-17