

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Чепалова Ирина Андреевна

**Разработка фрикционных композиционных материалов методом
порошковой металлургии**

Направление подготовки 22.04.01 - «Материаловедение и технологии
материалов»

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

2019г.



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре
государственный университет»

Научный руководитель

Профессор,

Доктор технических наук,

Ким Владимир Алексеевич

Рецензент

Кандидат технических наук,

Штанов Олег Викторович

Защита состоится «___» июня 2019 года в ___ часов ___ мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд.

Автореферат разослан ___ июня 2019 г.

Секретарь ГЭК

Белова Инна Валерьевна

Общая характеристика работы

Порошковая металлургия – отрасль промышленности, включающая в себя определенный набор способов производства металлических порошков, а также изготовление деталей из этих материалов. Это направление металлургии как способ получения готовых изделий начало активно развиваться около ста лет назад.

Такой способ производства деталей имеет ряд преимуществ, которые позволяют ему вытеснять более дорогие методы обработки металлов: литье, ковку и штамповку.

Технология порошковой металлургии включает в себя производство порошков, формования и спекание заготовок и изделий из порошков, штамповку спечённых заготовок, а также операции обработки резанием пористых порошковых заготовок на заключительном этапе изготовления деталей. Основные параметры: давление прессования и способы его приложения, температурный режим спекания, среда и скорость проведения процесса.

Существующий ряд преимуществ:

- Экономичность. Исходным материалом для изготовления порошков являются разного типа отходы, например, окалина. Этот отход металлургического производства больше нигде не используется, а методы порошковой металлургии позволяют компенсировать такие технологические потери;

- Точность геометрических форм деталей. Изделия, изготовленные методом порошковой металлургии, не нуждаются в последующей обработке резанием. Следовательно, производство осуществляется с низким процентом отходов;

- Высокая износостойкость изделий;

- Простота технологического процесса.

Технология производства методом порошковой металлургии имеет много общего с изготовлением керамических изделий.

Типовая технология производства заготовки изделий методом порошковой металлургии включает 4 основные операции:

- Получение порошка исходного материала;
- Формование заготовок;
- Спекание;
- Окончательная обработка.

Каждая из указанных операций оказывает значительное влияние на формирование свойств готового изделия.

Эти процессы объединяет то, что сырьевой материал (в одном случае это песок и глина, в другом – металл) погружается в раскаленную печь.

В итоге получается пористая структура материала. Такая схожесть технологических процессов привела к тому, что детали, изготовленные методом порошковой металлургии, называют металлокерамическими.

Получение металлокерамической детали начинается с изготовления порошков. Порошки бывают разных фракций и различных размеров. Отсюда – различие в способах их производства.

Существуют две группы принципиально разных методов получения порошков:

Физико-механические методы – измельчение посредством механического воздействия на металлические частицы в твердой или жидкой фазе. Эти методы основаны на комбинировании статических и ударных нагрузок.

Химико-металлургические методы – изменение фазового состояния исходного сырья. Это восстановление окислов и солей, электролиз, термическая диссоциация карбонильных соединений.

Имеются ключевые моменты применяющихся способов производства металлических порошков:

Шаровой способ – мелкие металлические обрезки со стружкой дробятся и перетираются в шаровой мельнице.

Вихревой способ – нагнетание в специальных мельницах (при помощи вентиляторов) сильного воздушного потока, приводящего к взаимному столкновению частиц металла. На выходе получается качественно измельченный порошок, с блюдцеобразной формой зерен.

Применение специальных дробилок. Принцип действия таких устройств основан на измельчении металлических частиц с помощью ударного воздействия падающего груза.

Распыление – легкоплавкий металл, находящийся в жидкой фазе, распыляется потоком сжатого воздуха. После этого его отправляют для размельчения к быстровращающемуся диску.

Электролиз – металл восстанавливается из расплава под воздействием электрического тока, что делает его хрупким. Это свойство дает ему возможность легко перемалываться в мельнице до состояния порошка. Форма зерен порошка при этом дендритная.

Порошок требуемых фракций получают в центробежных мельницах разного типа.

Порошки, как и любой другой материал, имеет ряд стандартных свойств, которые влияют на его технологическую пригодность. Специалисты к ним относят следующие свойства:

Плотность порошков, именуемая пикнометрической, определяется химической чистотой порошка и степенью его пористости;

Насыпной плотностью порошков называется его масса, полученная при свободном наполнении емкости определенного объема;

Текучестью порошков считается быстрота наполнения емкости определенного объема. Это очень важный технологический параметр, от него зависит производительность последующего прессования;

Пластичность – свойство порошков принимать заданную форму и сохранять ее после прекращения нагрузки.

В независимости от метода получения металлических порошков, его дальнейший путь лежит через обработку давлением с помощью специальных пресс-форм.

Для формообразования изделий из порошков применяют прессование с применением пресс-форм, прокатку и шликерную формовку.

Порошковая индустрия как способ изготовления и обработки металлов очень разнообразен по своим технологическим методам. Это дает возможность получать детали требуемого состава и необходимых свойств.

Перспективность порошковой металлургии предопределяется тремя основными преимуществами:

Уменьшением затрат на обработку изделия. Порошковые изделия получают окончательных размеров, без дополнительной механообработки, или с минимальной чистовой обработкой для достижения высокой точности. Особенно это эффективно при изготовлении порошковых изделий сложной геометрической формы;

Возможностью получения изделий с регулируемой пористостью, в том числе: фильтры, катализаторы, глушители шума;

Созданием градиентных и композиционных материалов, которые невозможно получить традиционными методами.

Применяя методы порошковой металлургии производства, специалисты могут производить новейшие композитные материалы, получения которых традиционными методами невозможно. Производство деталей машин и механизмов из металлических порошков дает существенную экономию на материале, за счет получения низкого расходного коэффициента.

Порошковая металлургия рассматривается в настоящее время не только как ресурсосберегающая технология, но и как эффективный, а зачастую и единственный способ получения новых материалов, в том числе с уникальными свойствами.

Таким образом, получение фрикционных композиционных материалов именно методом порошковой металлургии является актуальностью **данной работы**.

Цель работы: Разработка фрикционных композиционных материалов методом порошковой металлургии.

В соответствии с поставленной целью в данной работе решались следующие основные **задачи**:

- 1) изучение требований, предъявляемых к фрикционным композиционным материалам;
- 2) влияние матрицы, наполнителя, добавок на конечные свойства спекаемых изделий;
- 3) подбор компонентного и процентного состава для получаемых образцов фрикционных композитов;
- 4) разработка технологии получения фрикционных композиционных материалов методом порошковой металлургии.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования данной работы являются 7 полученных фрикционных опытных образцов, полученных методом порошковой металлургии.

Предметом исследования является технология получения образцов.

Новизна полученных результатов. В работе представлены составы полученных фрикционных композиционных изделий, получены их микроструктуры, а также показатели плотности, твёрдости и микротвёрдости для указанных образцов.

Достоверность и обоснованность результатов исследования. Достоверность исследования подтверждается использованием современных аналитических приборов.

Практическая значимость и ценность работы. Практическая значимость работы заключается в получении результата – разработке технологии получения и изготовлении фрикционных композиционных материалов методом порошковой металлургии.

Личный вклад автора. Представленные в работе результаты получены лично автором или при его непосредственном участии.

Анализ литературных источников, обработка и анализ результатов исследования выполнены лично автором.

Основные положения, выносимые на защиту. Разработка композиционных материалов методом порошковой металлургии.

Структура и объём магистерской диссертации

Пояснительная записка состоит из введения, трёх разделов, заключения и списка используемых источников. Общий объём работы: содержит 54 страницы, 20 рисунков, 5 таблиц, список используемой литературы составляет 20 источников.

Основное содержание диссертации

Во введении представлено обоснования актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований.

В первом разделе представлен обзор литературных данных касаясь общих сведений о фрикционных материалах, требованиях к ним, роли матрицы и наполнителей в формировании состава и свойств получаемых изделий.

Во втором разделе приведены методики получения образцов, основные параметры и оборудование, использованное для их изготовления; ход работы.

Прессование и спекание образцов

Исследуемые образцы фрикционного порошкового материала изготавливались методом порошковой металлургии.

Прессование исследуемых образцов осуществлялось в твердосплавной прессформе с усилием 7 т/см^2 на гидравлическом пресс-автомате «Dorst».

Спекание образцов проводили в высокотемпературной вакуумной печи VHT 8/18 – GR в атмосфере аргона при температуре спекания $1135 \text{ }^\circ\text{C}$

с последующим отжигом. После чего проводился контроль геометрических размеров, с целью оценки степени усадки исследуемых материалов.

Измерение твёрдости, плотности и пористости образцов

Следующим этапом производилось измерение твёрдости образцов, плотности и пористости. Измерение твёрдости производилось по методу Бринелля (ГОСТ 9012), на приборе ТР 5006-02 шариком \varnothing 2,5 мм с усилием 613 Н (62,5 кгс) при выдержке 10 с (НВ 2,5/62,5). Также проводилось измерение микротвёрдости по методу Виккерса (ГОСТ 2999-75) с усилием 294,2 Н (30 кгс) при выдержке 10 с. Измерение плотности и открытой пористости спечённых образцов осуществлялось стандартным методом, описанным ГОСТ 18898. Сущность метода заключается в измерении массы изделий на воздухе, а также (после закрытия поверхностных пор, например, парафином) на воздухе и в воде с последующим определением их объема и плотности. Также определялась общая пористость образцов.



Рисунок 3 – Твердомер модели 5006-02

Методика определения твёрдости по Бринеллю

Согласно ГОСТ 9012-59 «Металлы. Метод измерения твёрдости по Бринеллю» сущность метода определения твёрдости по Бринеллю заключается во вдавливании шарика (стального или из твердого сплава) в образец (изделие) под действием усилия, приложенной перпендикулярно поверхности образца, в течение определенного времени, и измерении диаметра отпечатка после снятия усилия.

Отбор образцов производится в соответствии с требованиями ГОСТ 9012-59. Толщина образца S должна быть не менее чем в 8 раз превышать глубину отпечатка h и определяется по формуле:

$$S \geq 8 \cdot \frac{0,102 \cdot F}{\pi D_{HB}(HBW)},$$

где F выражена в Н;

$$S \geq 8 \cdot \frac{F}{\pi D_{HB}(HBW)},$$

где F выражена в кгс.

Минимальную толщину образца определяют в соответствии с приложением 2 ГОСТ 9012-59.

Поверхность образца должна быть плоской и гладкой.

Шероховатость поверхности образца (или площадки на изделии) R_a должна быть не более 2,5 мкм по ГОСТ 2789-73, если нет других указаний в нормативно-технической документации на металлопродукцию.

Образец должен быть подготовлен таким образом, чтобы не изменялись свойства металла в результате механической или другой обработки, например, от нагрева или наклёпа.

Для проведения испытания используется прибор для измерения твёрдости по ГОСТ 23677-79. Шарик стальной диаметром 10,0; 5,0; 2,5; 2,0; 1,0 мм должен иметь твердость не менее 850 HV 10; шарик из твердого сплава диаметром 10,0; 5,0; 2,5; 2,0; 1,0 мм должен иметь твердость не менее 1500 HV 10.

Требования к размерности по диаметру, непостоянству единичного диаметра, отклонению от сферичности и шероховатости поверхности должны соответствовать шарикам степени точности 20 по ГОСТ 3722-81

Испытания проводят при температуре (20_{-10}^{+15}) °С.

При измерении твёрдости прибор должен быть защищён от ударов и вибраций.

Опорные поверхности столика и подставки, а также опорные и рабочие поверхности образца должны быть очищены от посторонних веществ (окалины, смазки и др.). Образец устанавливают на столике или подставке устойчиво во избежание его смещения и прогиба во время измерения твердости.

При твердости металлов менее 450 единиц для измерения твердости применяют стальные шарики или шарики из твердого сплава: при твердости металлов более 450 единиц - шарики из твердого сплава.

Диаметр шарика D и соответствующее усилие F выбирают таким образом, чтобы диаметр отпечатка находился в пределах от 0,24 до 0,6 D . При измерении твердости наконечник плавно приводят в соприкосновение с поверхностью образца и плавно прикладывают заданное усилие F до тех пор, пока оно не достигнет необходимой величины.

Продолжительность выдержки наконечника под действием заданного усилия выбирается по ГОСТ 9012-59, если не имеется других указаний в нормативно-технической документации на металлопродукцию.

Время от начала приложения усилия до достижения им заданной величины должно составлять 2-8 с.

Расстояние между центром отпечатка и краем образца должно быть не менее 2,5 диаметров отпечатка d ; расстояние между центрами двух смежных отпечатков должно быть не менее четырех диаметров отпечатка; для металлов с твердостью до 35 НВ эти расстояния должны быть соответственно 3 d и 6 d .

После измерения твёрдости на обратной стороне образца не должно наблюдаться пластической деформации от отпечатка. Диаметр отпечатка

измеряют с помощью микроскопа или других средств измерения с предельной погрешностью:

$\pm 0,5$ (при применении шариков диаметром 1,0; 2,0 или 2,5 мм);

$\pm 0,25$ % (при применении шариков диаметром 5,0 и 10,0 мм) от диаметра шарика.

Диаметры отпечатков d_1 и d_2 измеряются в двух взаимно перпендикулярных направлениях. За диаметр отпечатка d принимается среднее арифметическое значение результатов измерений. При этом разность измерений диаметров одного отпечатка не должна превышать 2 % меньшего из них.

Для анизотропных металлов разность измерений диаметров отпечатка должна быть указана в нормативно-технической документации на металлопродукцию.

Количество отпечатков при измерении твердости и способ обработки результатов измерений указывают в нормативно-технической документации на металлопродукцию.

Твёрдость по Бринеллю определяют по формулам из приложения ГОСТ 9012-59.

Метод определения микротвёрдости по Виккерсу

Метод определения твердости по Виккерсу основан на исследовании зависимости глубины проникновения алмазного конуса (индентора) в исследуемый материал от величины усилия. После снятия усилия на поверхности образца остается отпечаток, соответствующий глубине погружения индентора. Ввиду того, что геометрические размеры индентора известны и строго регламентированы, вместо глубины погружения определяют площадь отпечатка в поверхностном слое испытуемого материала.

Определение твердости по Виккерсу возможно для веществ с самыми высокими значениями, поскольку в качестве испытательного конуса используется пирамидка из алмаза, который имеет максимальную известную твёрдость.

Индентор выполнен в виде четырехугольной пирамиды с углами между гранями 136° . Такой угол выбран для того, чтобы сблизить значения метода Виккерса с методом Бриннеля. Таким образом, значения твердости в пределах 400-450 единиц практически совпадают, особенно, в области меньших значений.

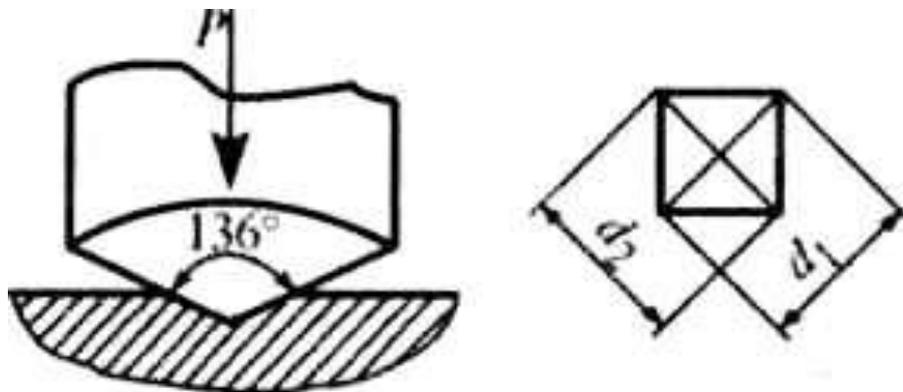


Рисунок 4 – Твёрдость по Виккерсу

Твердость по Виккерсу определяют путем вдавливания пирамиды в испытуемый образец под действием силы определенной величины. Зная приложенную силу и площадь отпечатка можно определить твердость поверхности испытуемого материала.

Вместо расчета площади отпечатка используются значения измеренных диагоналей ромба, между которыми находится прямая зависимость.

Итоговый результат твердости определяют по формуле:

$$HV = 1.854 \cdot F/d^2,$$

где F – это значение силы, Н;

d – диагональ ромба, мм.

Как правило, при измерениях по Виккерсу никаких вычислений по приведенной формуле не применяют, а используют табличные значения, исходя из приложенного усилия, времени воздействия и результирующей площади следа.

Значение приложенной силы регламентировано и составляет 30 кг. Время воздействия на поверхность обычно составляет 10-15 с. Это самые распро-

страненные значения, однако во многих ситуациях необходимо воздействовать на материал образца при помощи иных значений силы.

Большинство измерительных приборов отрегулировано для некоторых дискретных и строго нормированных значений усилия.

Величина нагрузки зависит от измеряемого материала (его предполагаемой твердости). Чем тверже поверхность испытуемого образца материала, тем больше нагрузка. Это вызвано стремлением к уменьшению погрешности при определении площади и уменьшения влияния вязкости материала.

Для снижения погрешности также предъявляются ограничения по размерам испытуемого образца. Минимальная толщина образца должна быть в 1,2-1,5 раз больше предполагаемой диагонали отпечатка в зависимости от вида металла (меньшая величина соответствует стали, большая предназначена для цветных металлов). Расстояние между краем образца или краем предыдущего отпечатка и центром отпечатка должно быть не менее 2,5 величины диагонали.

Особые требования предъявляются также к чистоте поверхности. Ее шероховатость не должна превышать 0,16 мкм, что означает необходимость в полировке поверхности.

Методика металлографических исследований

Основой металлографического исследования являлось приготовление шлифа. На подготовленном образце получали пригодную для проведения микроскопического исследования совершенно плоскую поверхность шлифа. После грубой механической обработки образцов на станке, производили шлифовку и полировку образца на полировальном станке.

Шлифовка производилась на кругах, подготовленных из наждачной бумаги, в несколько этапов с переходом от бумаги с более крупным зерном к бумаге с более мелким абразивным зерном. Наждачную бумагу с мелким абразивным зерном применяли только в том случае, когда были удалены

все следы предшествующей обработки. При шлифовке образец поворачивали на 90° .

Во избежание структурных изменений в процессе шлифования тщательно следили за тем, чтобы шлиф не нагревался. Если шлиф прижимать слишком сильно это может привести к деформации поверхности шлифа, и как следствие к ошибочным выводам при оценке результатов исследования.

Предполагается, что подобные поверхностные изменения можно значительно уменьшить, применяя способ мокрого шлифования, благодаря смазочному действию воды и более высокой стойкости шлифующего материала. Однако, в исследованиях глубины деформации при изготовлении металлографических шлифов установлено, что при прочих равных условиях толщина деформированного слоя после мокрой шлифовки больше, чем после сухой.

Вслед за шлифовкой производилась полировка, предназначенная для удаления мелких и мельчайших неровностей на поверхности шлифа. Полировку осуществляли механическим способом с помощью абразивных алмазных паст, регулируя скорость вращения шлифовального круга и силу прижима шлифа к абразиву.

После каждой операции шлифовки и перед травлением образец тщательно очищали и промывали.

Составные части структуры при микроскопическом исследовании выявляли с помощью металлографического травления.

Травление для выявления структуры образцов на железной основе производилось в 4 % растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Продолжительность травления составляла приблизительно 2-3 секунды.

Основным результатом травления, обусловленным структурой металла, являлось вытравливание границ и поверхности зерна.

Металлографические исследования проводились на оптическом инвертированном микроскопе Nikon Eclipse MA200, снабженном цифровой

видеокамерой и специализированным программным обеспечением, позволяющим делать качественные фотографии микроструктур.



Рисунок 5 – Инвертированный металлографический микроскоп Nikon Eclipse MA200

Исследования структуры спеченных образцов проводилось в диапазоне увеличений от 100 до 1500 крат. Оцифрованное изображение в дальнейшем обрабатывали при помощи программного пакета для анализа изображений ImageExpert Pro Plus 5.1, позволяющего проводить сложные измерения структур, а так же производить измерения диаметров зерен, межпластинчатого расстояния перлита, глубины формирования вторичных структур, возникших в результате фрикционных испытаний. На этих же шлифе исследовались вторичные структуры, образовавшиеся в поверхностном слое образцов материалов в процессе фрикционных испытаний.

Растровая электронная микроскопия позволяет: - проводить морфологический анализ изломов и шлифов различных групп материалов, определять количественные характеристики уровня дефектности сплавов путем сопоставления изображения поверхности шлифа объекта при 100 кратном увеличении с эталонными фотографиями; - используя контраст электронного изображения, можно оценить фазовый состав, структурную неоднородность.

родность сплава у поверхности трения; - выявить микроструктуру слоев материалов; - определить микромеханизмы разрушения материала.

В данной работе использовался сканирующий электронный микроскоп SEM S-3400N от Hitachi, оснащенный приставкой энергодисперсионного анализа EDX Thermo, позволяющей определять химический состав материалов с построением карт распределения элементов от Be₄ до U₉₂. Сканирующий микроскоп в совокупности с приставкой EDX Thermo применялся для определения вида и состава отдельных структурных элементов разрабатываемых материалов, а также для исследования поверхностей трения образцов.



Рисунок 6 – Электронный сканирующий микроскоп Hitachi S-3400N

В третьем разделе представлены экспериментальные данные спечённых фрикционных изделий и их компонентный состав.

Химический состав образцов Всего в работе было получено 7 опытных образцов. Все они были изготовлены при спекании одних и тех же компонентов, однако отличаются по процентному содержанию заданных компонентов (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Массовая доля компонентов в полученных образцах
В процентах

<i>№ образца</i>	<i>Массовая доля</i>
------------------	----------------------

	<i>Cu</i>	<i>SiO₂</i>	<i>BaSO₄</i>	<i>C</i>	<i>Zn</i>	<i>Fe</i>
1	30	5	3	3	1	58
2	15	5	3	3	1	74
3	30	3	3	3	1	60
4	15	3	3	3	1	75
5	30	5	1,5	3	1	59,5
6	15	5	1,5	3	1	74,5
7	30	3	1,5	3	1	61,5

3.2 Результаты измерения твёрдости

3.2.1 Твёрдость по Бринеллю

В результате измерений согласно ГОСТ 9012-59 «Металлы. Метод измерения твёрдости по Бринеллю» были получены следующие данные (таблица 3.2):

Таблица 3.2 – Результаты измерений твёрдости по Бринеллю

№ образца	НВ, МПа
1	710
2	760
3	660
4	760
5	660
6	740
7	590

3.2.2 Результаты измерений микротвёрдости по Виккерсу

Микротвёрдость по Виккерсу определялась не только для каждого образца, но и для структур: железа и меди (см. таблицы 3.3 и 3.4).

Таблица 3.3 – Результаты измерений микротвёрдости по Виккерсу для железной основы образцов

№ образца	HV (Fe), МПа
1	2836,8
2	3070
3	3133,2
4	2865,2

5	2881,2
6	3420,4
7	3494,8

Таблица 3.4 – Результаты измерений микротвёрдости по Виккерсу для медной основы образцов

<i>№ образца</i>	<i>HV (Cu), МПа</i>
1	1207,24
2	1322,6
3	1143,44
4	1330,72
5	1235,88
6	1270,96
7	1285,16

3.3 Опытные данные измерения плотности изделий

Измерение плотности и открытой пористости спечённых образцов осуществлялось стандартным методом, описанным ГОСТ 18898 (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Значения плотности для полученных образцов

<i>№ образца</i>	<i>ρ, г/см³</i>
1	5,82
2	5,65
3	5,96
4	5,76
5	5,77
6	5,63
7	5,82

3.4 Металлографические исследования и полученные микроструктуры изделий

В ходе работы на оптическом инвертированном микроскопе Nikon Eclipse MA200, снабжённом цифровой видеокамерой и специализированным программным обеспечением, были сделаны фотографии микроструктур после полировки и после травления для опытных образцов в режимах увеличения: x100, x200 и x400 (см. рисунки 3.1–3.14).

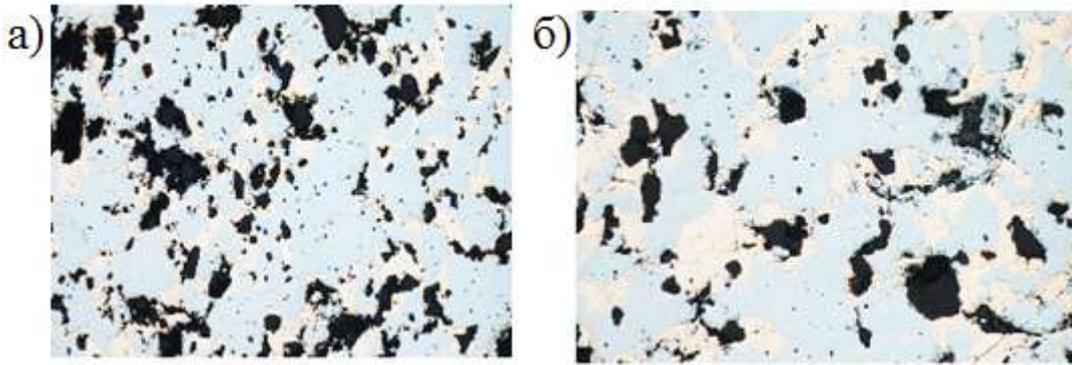


Рисунок 3.1 – Фотографии микроструктуры 1-го нетравлёного опытного образца при увеличении: а – $\times 100$; б – $\times 200$

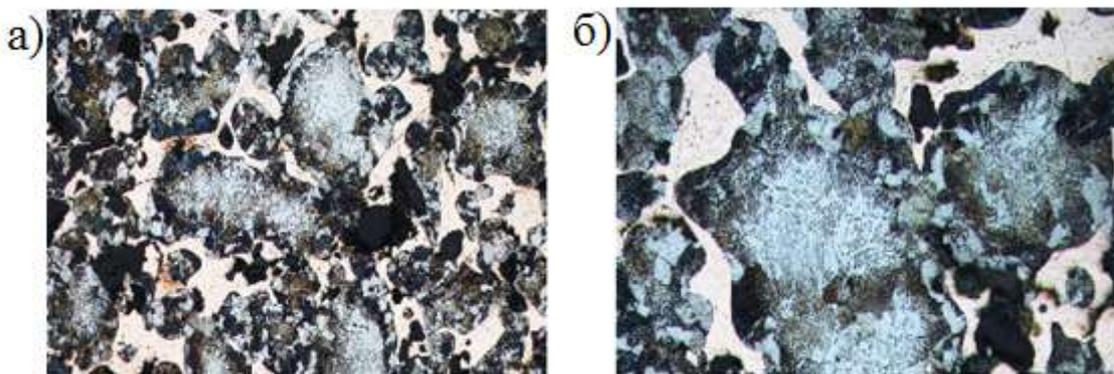


Рисунок 3.2 – Фотографии микроструктуры 1-го травлёного опытного образца при увеличении: а – $\times 200$; б – $\times 400$

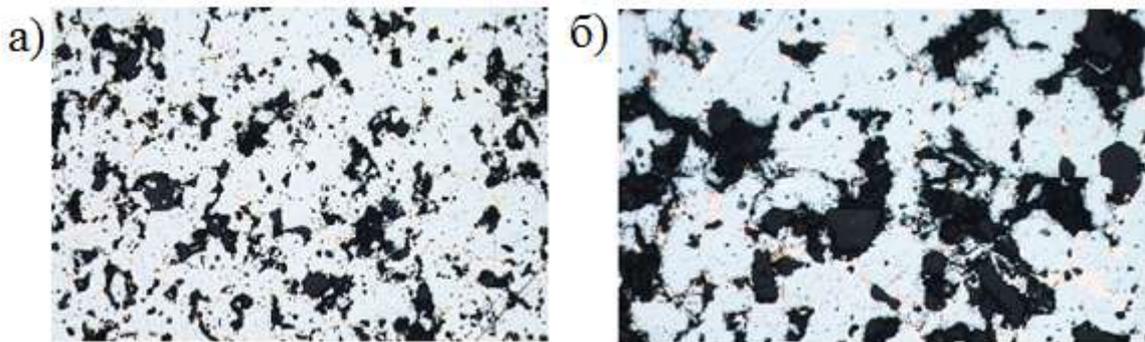


Рисунок 3.3 – Фотографии микроструктуры 2-го нетравлёного опытного образца при увеличении: а – $\times 100$; б – $\times 200$

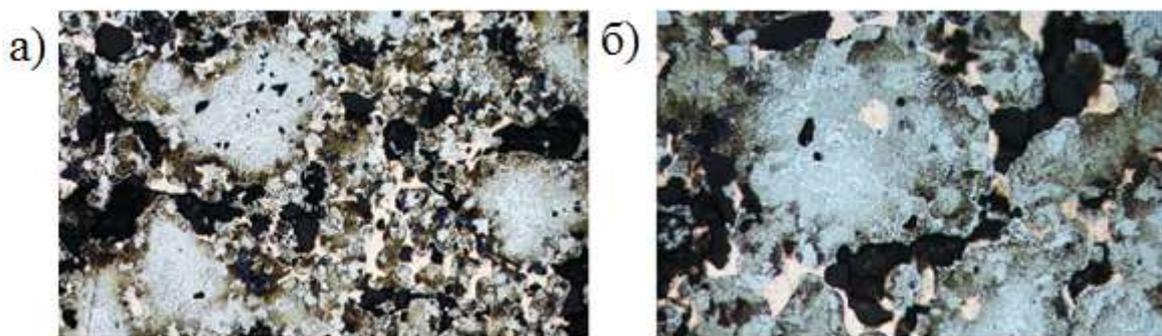


Рисунок 3.4 – Фотографии микроструктуры 2-го травлёного опытного образца при увеличении: а – $\times 200$; б – $\times 400$

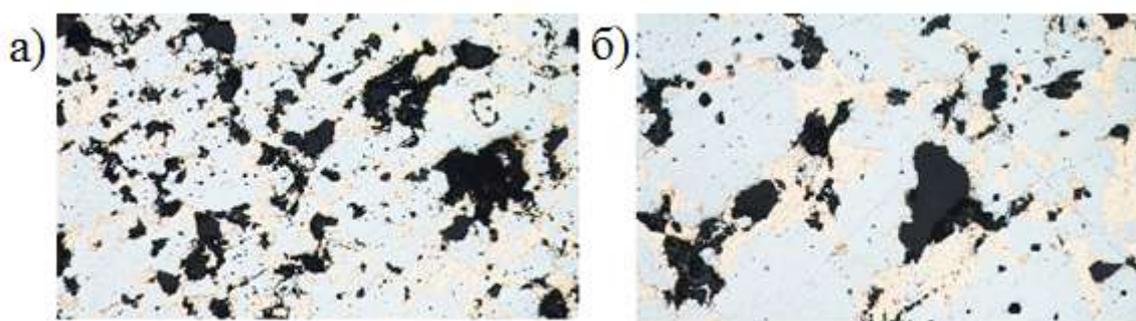


Рисунок 3.5 – Фотографии микроструктуры 3-го нетравлёного опытного образца при увеличении: а – $\times 100$; б – $\times 200$

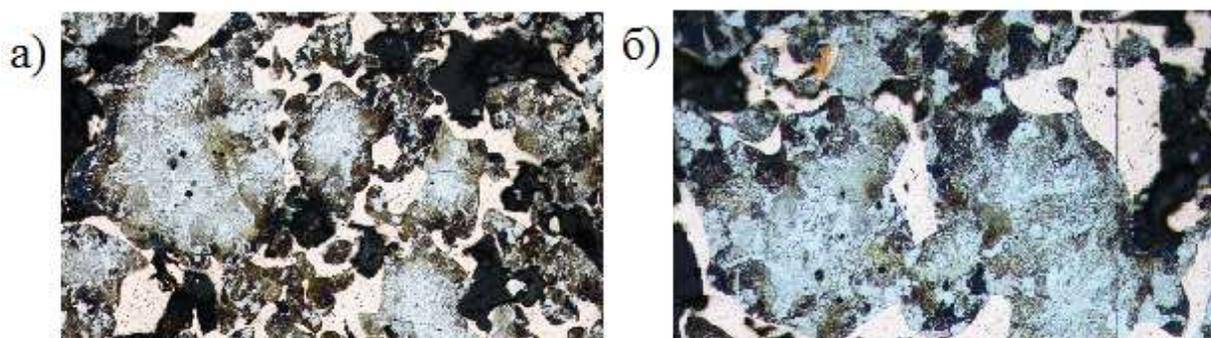


Рисунок 3.6 – Фотографии микроструктуры 3-го травлёного опытного образца при увеличении: а – $\times 200$; б – $\times 400$

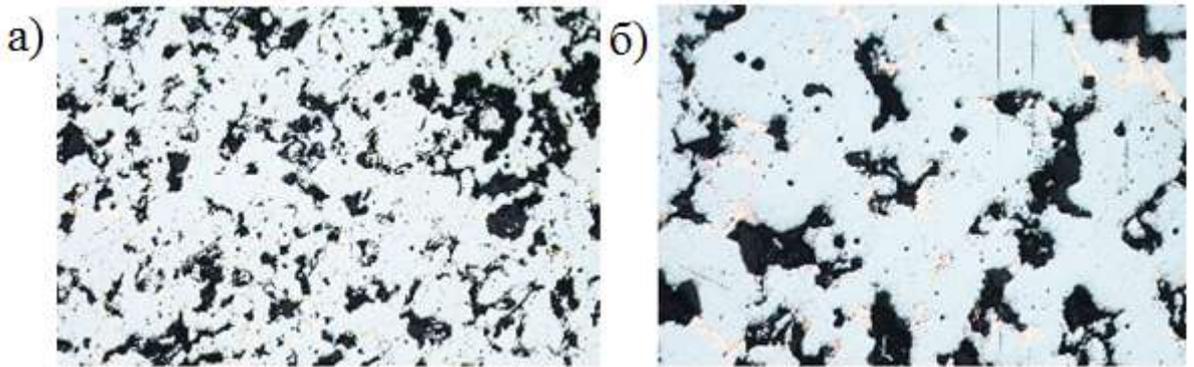


Рисунок 3.7 – Фотографии микроструктуры 4-го нетравлёного опытного образца при увеличении: а – $\times 100$; б – $\times 200$

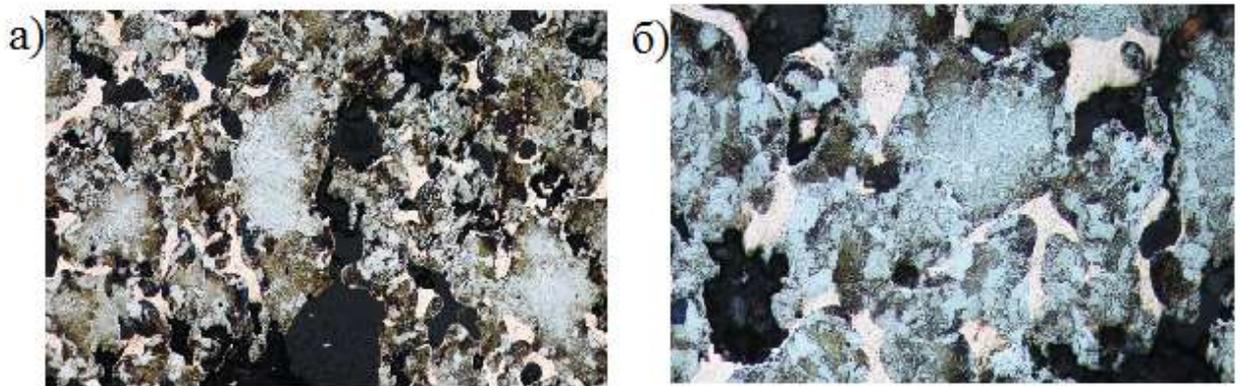


Рисунок 3.8 – Фотографии микроструктуры 4-го травлёного опытного образца при увеличении: а – $\times 200$; б – $\times 400$

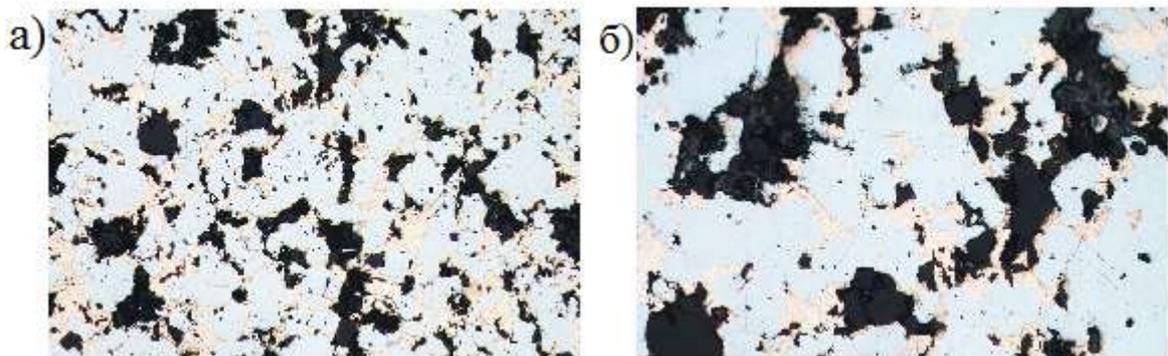


Рисунок 3.9 – Фотографии микроструктуры 5-го нетравлёного опытного образца при увеличении: а – $\times 100$; б – $\times 200$

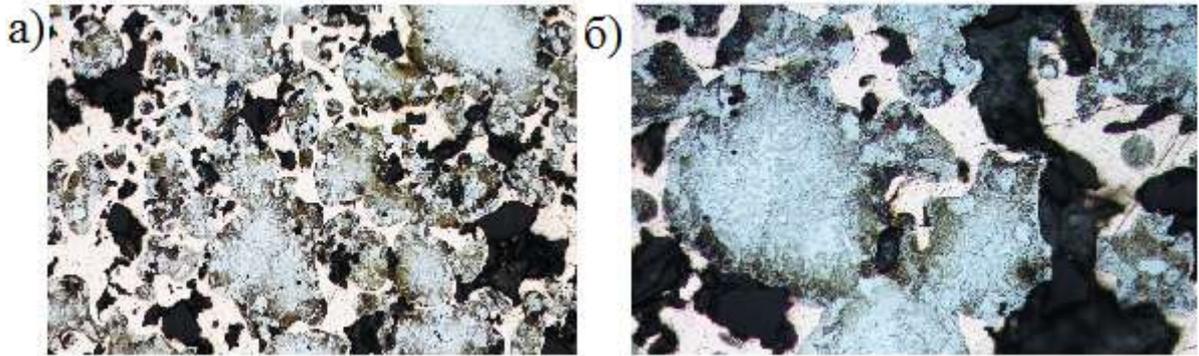


Рисунок 3.10 – Фотографии микроструктуры 5-го травлёного опытного образца при увеличении: а – $\times 200$; б – $\times 400$

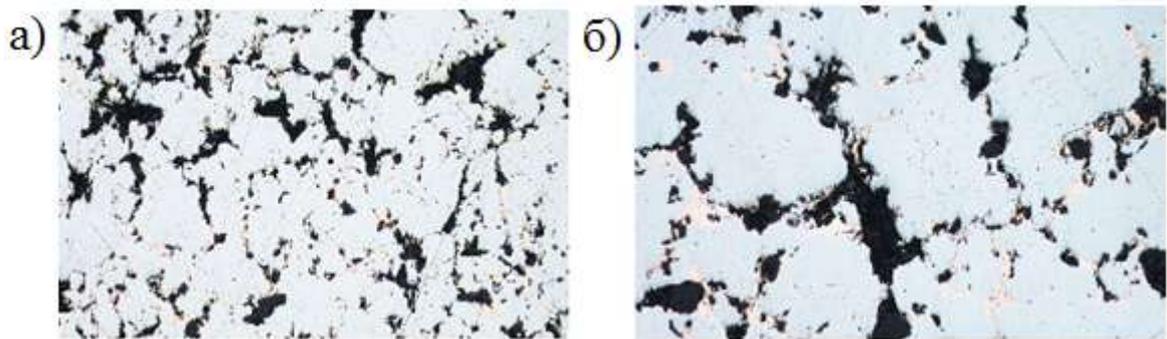


Рисунок 3.11 – Фотографии микроструктуры 6-го нетравлёного опытного образца при увеличении: а – $\times 100$; б – $\times 200$

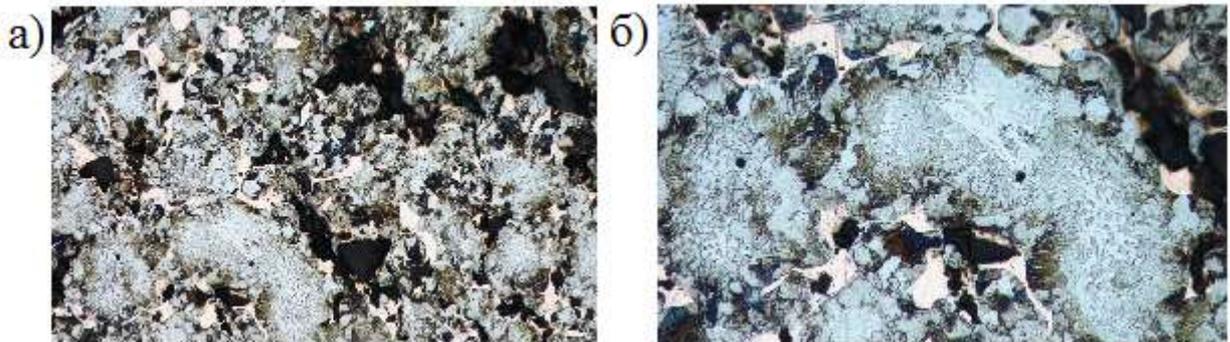


Рисунок 3.12 – Фотографии микроструктуры 6-го травлёного опытного образца при увеличении: а – $\times 200$; б – $\times 400$

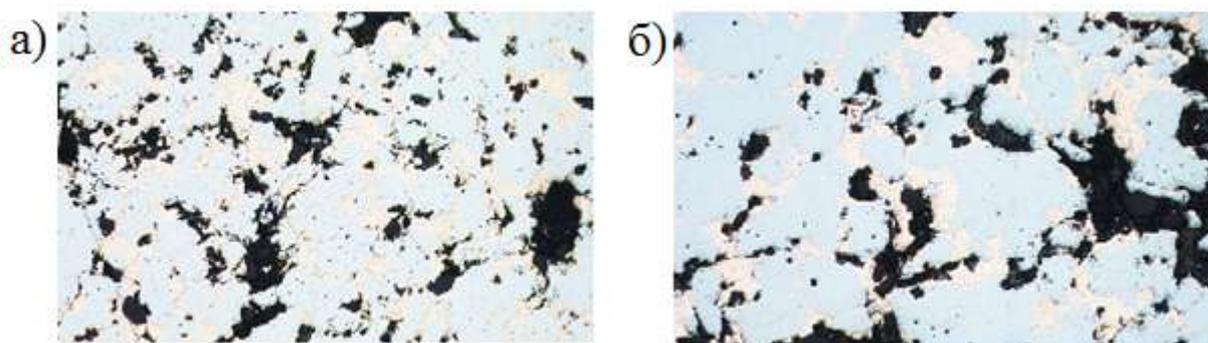


Рисунок 3.13 – Фотографии микроструктуры 7-го нетравлёного опытного образца при увеличении: а – $\times 100$; б – $\times 200$

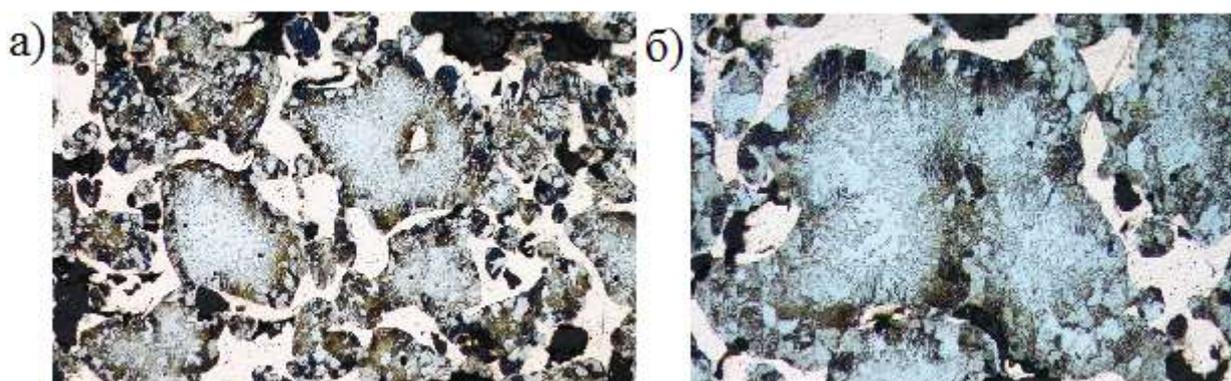


Рисунок 3.14 – Фотографии микроструктуры 7-го травлёного опытного образца при увеличении: а – $\times 200$; б – $\times 400$