

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта

Работа допущена к защите

Руководитель ОП

_____ С.В. Ганин

« ____ » _____ 2020г

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

вид ВКР (работа бакалавра, дипломный проект, дипломная работа, магистерская диссертация)

ОТРАБОТКА РЕЖИМА СПЕКАНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРОШКОВ МОЛИБДЕН-ПЕРМАЛЛОЙ В КОЛПАКОВОЙ ПЕЧИ

по направлению подготовки (специальности)

22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

Направленность (профиль)

22.03.01_01 Материаловедение и технологии новых материалов

Выполнил
студент гр. 3332201/60101

А.А. Порцевский

Руководитель
должность,
ученая степень, ученое звание

С.А. Котов

Консультант
по нормоконтролю

Р.А. Паршиков

Санкт-Петербург

2020

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО
Институт машиностроения, материалов и транспорта

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ОП

С.В. Ганин

« _____ » _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы

студенту Порцевскому Анатолию Алексеевичу, гр.3332201/60101
(фамилия, имя, отчество (при наличии), номер группы)

1. Тема работы: Отработка режима спекания заготовок изделий из порошков молибден-пермаллой в колпаковой печи.

2. Срок сдачи студентом законченной работы: июнь 2020 г.

3. Исходные данные по работе: 1. Литература и интернет-ресурсы. 2. Данные отчетов по НИР и диссертациям. 3. Результаты производственных экспериментов.

4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): 1. Литературный обзор по получению и свойствам магнитных материалов. Порошковые магнитные материалы. 2. Технология изготовления порошковых магнитов. 3. Магнитные материалы молибден-пермаллой. 4. Исследовательская часть. Анализ результатов исследований по выявлению возможности применения колпаковой печи для спекания заготовок изделий. 5. Выводы. 6. Список использованной литературы. 7. Приложения

5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): Количество слайдов 8-10.

6. Консультанты по работе:

7. Дата выдачи задания февраль 2020 г.

Руководитель ВКР _____
(подпись)

С.А. Котов
инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению февраль 2020 г.
(дата)

Студент _____
(подпись)

А.А. Порцевский
инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

На 39 с., 9 рисунков, 5 таблиц.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ПЕРМАЛЛОЙ, СПЕКАНИЕ, КОЛПАКОВАЯ ПЕЧЬ, ЕДИНЫЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ, СЕРДЕЧНИКИ.

Тема выпускной квалификационной работы: «Отработка режима спекания заготовок изделий из порошков молибден-пермаллой в колпаковой печи».

Данная работа посвящена исследованию возможности усовершенствования технологического процесса изготовления сердечников на этапе спекания. Задачи, которые решались в ходе исследования:

1. Анализ технологического процесса изготовления сердечников из порошка пермаллой на жидком стекле.
2. Определение возможности использования колпаковой печи на этапе спекания для выпуска изделий с требуемыми магнитными параметрами.

Работа проведена на базе ОАО «Завод Магнетон», где контролировалась процедура изготовления сердечников с использованием колпаковой печи, и анализировались результаты измерений магнитных параметров у готовых изделий. Кроме того, выяснялась возможность использования единого температурного режима при спекании заготовок различных марок и типоразмеров.

На основании исследований, проведенных на ОАО «Завод Магнетон», подтвердилось предположение о целесообразности использования колпаковой печи в технологическом процессе производства сердечников.

ABSTRACT

39 p., 9 figures, 5 tables.

KEYWORDS: PERMALLOY, SINTERING, BELL FURNACE, SINGLE TEMPERATURE MODE, CORES.

The theme of the final qualification work: "Testing the sintering regime of billets of products from molybdenum-permalloy powders in a bell furnace."

This work is dedicated to the study of the possibility of improving the technological process of manufacturing cores at the sintering stage. During the study the following tasks were solved:

1. Analysis of the technological process of manufacturing cores of permalloy powder on liquid glass.
2. Determining the possibility of using a bell furnace at the sintering stage to produce products with the required magnetic parameters.

The work was carried out on the basis of Magneton Plant OJSC, where the procedure of manufacturing of cores using a bell furnace was monitored and the results of measurements of magnetic parameters of finished products were analyzed. In addition, the possibility of using a single temperature regime for sintering billets of various grades and sizes was discovered.

Based on research conducted at Magneton Plant OJSC, the assumption of feasibility of using a bell furnace in the core manufacturing process was confirmed.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	8
1.1 Магнитные материалы.....	8
1.2 Спекание порошковых изделий	10
1.2.1 Общие принципы спекания	10
1.2.2 Применение колпаковых печей для термообработки	18
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ	23
2.1 Сравнение порошков пермаллоя.....	23
2.2 Технологический процесс изготовления сердечников	29
2.2.1 Технология изготовления сердечников	29
2.2.2 Анализ технологического процесса	32
Заключение	39
Список использованных источников	40

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в современной технике заметно выросла потребность в материалах с высокой индукцией насыщения и в дальнейшей миниатюризации приборов, а также в новых устройствах, работающих при больших величинах токов и мощностей. С этой целью применяются специальные композиционные магнитные материалы, которые состоят из распределенных в диэлектрической или магнитной матрице ферромагнитных частиц.

Изделия из феррокомпозитных материалов можно встретить в различных областях таких, как: авиация, военная промышленность, судостроение, а также бытовая техника. Их используют в качестве трансформаторов, фильтров и индуктивных элементов. Требование к обязательной высокой стабильности основных параметров (времени, температуры и намагниченности) привело к развитию электролитических порошкообразных железных сердечников. Чаще всего используются феррокомпозиты на основе высоконикелевого молибден-пермаллоя (Мо-пермаллоя). Они обладают высокой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой. Порошковый пермаллой позволил уменьшить размеры сердечников, а также улучшить их качество. Дальнейшие исследования показали, что добавление небольшого процента молибдена к пермаллою увеличивает его магнитную проницаемость и электросопротивление, а также уменьшает потери на вихревые токи и гистерезис. Мо-пермаллой, который применяется в настоящее время, содержит приблизительно 81% никеля, 17% железа и 2% молибдена. Использование порошка молибдена-пермаллоя при изготовлении магнитных сердечников позволило еще более уменьшить их размеры без ущерба для работы катушки.

В технологическом процессе изготовления сердечников из Мо-пермаллоя важным этапом является операция спекания спрессованных заготовок в печи. Спекание прессовок проводят в печах самой различной конструкции: конвейерных, колпаковых, вакуумных, печах-ваннах с

расплавом солей или металлов. Обязательным условием при этом является предохранение прессовок от окисления, а также восстановление оксидных пленок имеющихся на поверхности частиц. Для достижения этого применяют специальные защитные атмосферы: водород, диссоциированный аммиак, инертные газы (аргон, азот).

Целью данной работы является исследование и отработка процесса спекания магнитных изделий – сердечников на основе порошка пермаллоя, в колпаковой печи.

Основными задачами работы являются:

- анализ технологического процесса изготовления сердечников из порошка пермаллоя на жидком стекле;
- определение возможности использования колпаковой печи на этапе спекания для выпуска изделий с требуемыми магнитными параметрами.

Реализация бакалаврской работы в промышленности заключается в следующем: технология изготовления сердечников на основе порошка пермаллоя на жидком стекле активно используется в производстве ОАО «Завод Магнетон». В данной работе процесс спекания предлагается осуществлять в колпаковой печи.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Магнитные материалы

Специальные материалы с различным сочетанием магнитных, электрических, механических и тепловых свойств используются во всех областях современной техники. Особое место среди них занимают порошковые ферромагнетики, получившие в современной литературе название «феррокомпозиционные материалы» или «феррокомпозиты» (ФК). В настоящее время они вместе с металлами и неметаллическими ферромагнетиками (ферритами) представляют собой современный арсенал магнитных материалов, используемых в технике.

Феррокомпозиты, которые состоят из ферромагнитных частиц, находящихся в диэлектрической матрице, по величине электропроводности ($\rho_v = 10^{-3} \div 10^6$), занимают место между металлическими ферромагнетиками ($10^{-4} \div 10^5$ Ом.м) и ферритами ($10^4 \div 10^{12}$ Ом.м). Феррокомпозит несмотря на его микроскопическую неоднородность можно рассматривать в качестве макроскопической однородной среды, так как размеры частиц, из которых он состоит, очень малы. [1]

Известно, что магнитные свойства феррокомпозитов качественно подчиняются тем же законам и закономерностям, что и свойства гомогенных ферромагнетиков. При этом их физические и технические параметры зависят от особенной структуры той или иной группы композитов. Структурные параметры моделей подбираются так, чтобы с их помощью можно было получить математическое описание магнитных характеристик феррокомпозитов, близких к экспериментальным данным.

Объяснением свойств композиционных материалов занимались многие известные физики (Е.И. Кондорский, К.М. Поливанов, К. Лихтенекер, Л. Лоренц, Н. Лорентц, Дж. Максвелл, Дж. Рэлей и др.). Создавая физические и математические модели ученые использовали различные подходы: от представлений электродинамических непрерывных

сред до дискретных представлений локальных полей и суммирования магнитных моментов ферромагнитных частиц.

Магнитные материалы в современной технике, делятся на три группы – металлы, ферриты и феррокомпозиты, представляют собой два класса магнитных материалов. Они используются в виде объемных, плоских (или ленточных) и протяженных (проволочных) магнитопроводов. Феррокомпозиты включают различные, в том числе и эластичные, компоненты. Это позволяет наделить их свойствами, которых нет у других магнитных материалов, в частности, эластичностью.

По величине магнитных параметров таких как начальная магнитная проницаемость, магнитная энергия единицы объема и т.п; феррокомпозиты уступают ферромагнетикам и ферритам. Отличие ферритов от металлических магнетиков, особенно ощущается в электрических свойствах: удельное электрическое сопротивление ρ_v ферритов в миллионы раз выше.

Указанные группы магнитных материалов, дополняя друг друга, позволяют создавать множество магнитных устройств для таких важных отраслей техники, как вычислительная техника, телевидение, электроэнергетика и т.д.

По магнитным свойствам все феррокомпозиты делятся на два подкласса: магнитомягкие – с коэрцитивностью H_c не выше 1,6 кА/м ($\sim 20\text{Э}$), и магнитотвердые – с коэрцитивностью не ниже 16 кА/м ($\sim 200\text{Э}$)[1]. Многообразие электромагнитных свойств феррокомпозитов определяется физическими особенностями их компонентов: диспергированного ферромагнитного и матричного компонентов.

Магнитные материалы можно классифицировать по химическому составу, свойствам и областям их применения. Они подразделяются на группы: технически чистое железо, электротехнические стали, пермаллой, магнитомягкие ферриты, магнитодиэлектрики, аморфные материалы и прочие магнитомягкие материалы[2].

Пермаллои – это сплавы на основе железа с никелем, которые могут легироваться кобальтом, молибденом, хромом и др. Пермаллои обладают высокой магнитной проницаемостью в слабых полях и малой коэрцитивной силой. Для пермаллоев важной операцией является термобработка готовых изделий в защитной атмосфере.

Недостатками пермаллоев являются: высокая стоимость; дефицитность отдельных компонентов, (никеля, молибдена, кобальта); необходимость термообработки [2].

1.2 Спекание порошковых изделий

1.2.1 Общие принципы спекания

Процесс спекания прессовок заключается в нагреве их до определенной температуры и последующей выдержке. Если прессовку не подвергнуть спеканию, она может вскоре осыпаться или разрушиться при самом незначительном усилии. Следовательно, спекание – это операция, позволяющая избавить прессовку от внутренних напряжений, а также наделить ее не только механическими, но и физическими свойствами готовой детали. Это важно, так как в процессе спекания в порошковом теле происходят существенные изменения. Оксидный контакт между частицами превращается в металлический, порошковые частицы объединяются, уменьшается общая пористость прессовки и происходит ее усадка.

В зависимости от агрегатного состояния металла порошка различают два вида спекания: спекание в твердом состоянии, когда его температура соответствует $2/3$ температуры плавления основного компонента, и спекание с участием жидкой фазы, когда частично плавится один из компонентов шихты.

Спекание в твердом состоянии. В процессе нагревания прессовок до температуры спекания вначале происходит выгорание смазки или склеивающих добавок. При этом частицы порошкового тела получают возможность занимать те места, которые образовались после выгорания

смазки. Порошковые частицы стремятся занять положение, которое было бы необходимо для создания минимальной свободной энергии, так как именно свободная энергия, пропорциональная суммарной поверхности порошковых частиц, уменьшая поверхность прессовки, сжимает ее. Таким образом объясняется самопроизвольная усадка в начале процесса спекания. Все это готовит почву для образования плотных контактов и помогает снять внутренние напряжения. Далее возникают контакты между порошковыми частицами, способствующие образованию относительно жесткого порошкового скелета.

Существует три основных типа образования контактов между частицами:

- 1) между однородными частицами;
- 2) между взаимно нерастворимыми веществами;
- 3) между неограниченно растворимыми веществами.

Образование контакта между однородными частицами. Первые контакты во время прессования образуются, в основном, через оксиды. Соприкосновение металлов происходит лишь в немногих местах. В процессе спекания пленки оксидов постепенно восстанавливаются. В их структуре появляется множество вакансий, которые ранее были заполнены атомами кислорода. При этом атомы металла занимают освободившееся пространство и образуют новые металлические соединения вблизи тех, которые были изначально. Таким образом расширяется область с металлическими контактами, и одновременно с этим происходит разрушение оксидных контактов. Если же поверхность порошка не окислена совсем или окислена очень мало, площадь области металлических контактов может быть значительной. В их зоне нет точного соответствия между решетками кристаллов, так как частицы ориентированы произвольно. В процессе спекания частицы стремятся срастись, но для этого необходимо, чтобы между ближайшими атомами, принадлежащими двум различным частицам, в месте контакта появились связи. Происходит смещение атомов

на расстояниях, не превышающих межатомные. Однако даже такое незначительное перемещение может вызвать напряжения в кристаллической решетке, которые способствуют возникновению в ней дислокаций. Известно, что в дефектных структурах процессы диффузии протекают проще и быстрее, чем в бездефектных. Атомы спекаемых частиц заполняют дефектные области и тем самым способствует увеличению количества контактов, что в итоге приводит к слиянию частиц.

Образование контакта между взаимно нерастворимыми веществами. В месте контакта так же, как и в предыдущем случае, происходят процессы, которые приводят к наибольшему понижению свободной энергии системы. Так как вещества взаимно не растворимы друг в друге, то при контакте порошковых частиц направленного движения атомов не происходит. Следовательно, свободная энергия понижается только за счет уменьшения поверхностной энергии системы. Если частицы одного вещества сливаются воедино, то в различных взаимно нерастворимых веществах это произойти не может.

Припекание двух тел, состоящих из разнородных частиц, может быть обусловлено лишь происходящим при этом уменьшением свободной поверхностной энергии. Рост плоскости контакта между двумя сферическими частицами веществ A и B , имеющих соответственно удельные поверхностные энергии α_A и α_B , целесообразен при условии, если возникающая новая граница $A-B$ имеет поверхностную энергию меньшую, чем сумма поверхностных энергий двух поверхностей веществ A и B , равных по площади возникшей границе $A-B$ и исчезнувших при ее образовании:

$$\alpha_{AB} < \alpha_A + \alpha_B,$$

где α_{AB} – удельная поверхностная энергия на границе веществ A и B .

Невыполнимость указанного условия означает принципиальную невозможность припекания взаимно нерастворимых тел.

Образование контакта между неограниченно растворимыми веществами. В данном случае в месте контакта возникают диффузионные потоки атомов спекаемых веществ А и В с разной скоростью диффузии. Поэтому из решетки одной частицы уходит атомов больше, чем в нее приходит. В итоге появляются вакансии, которые, объединившись, образуют поры в частице. Кроме непосредственной диффузии атомов благодаря контакту происходит их перенос через газовую фазу, где они оседают на контактируемой частице, постепенно проникая в ее объем.

Уплотнение за счет диффузионной ползучести. Первые $2/3$ процесса спекания обеспечивают определенную степень уплотнения. Возникают и развиваются прочные контакты, которые способствуют созданию жесткого скелета прессовки. Однако процесс спекания при этом не завершается: из-за продолжающейся поверхностной миграции атомов и сфероидизации пор происходит усадка прессовок.

В пористом теле, состоящем из множества спрессованных частиц, существует два типа поверхностей:

- 1) свободные поверхности пор;
- 2) несвободные, или контактные, поверхности пор, вдоль которых между собой соприкасаются частицы.

Поверхности первого типа в процессе спекания из-за избыточного капиллярного давления, которое возникает на вогнутых и выпуклых поверхностях и вызывает диффузионную ползучесть, стремятся к сокращению (рис. 1.1).

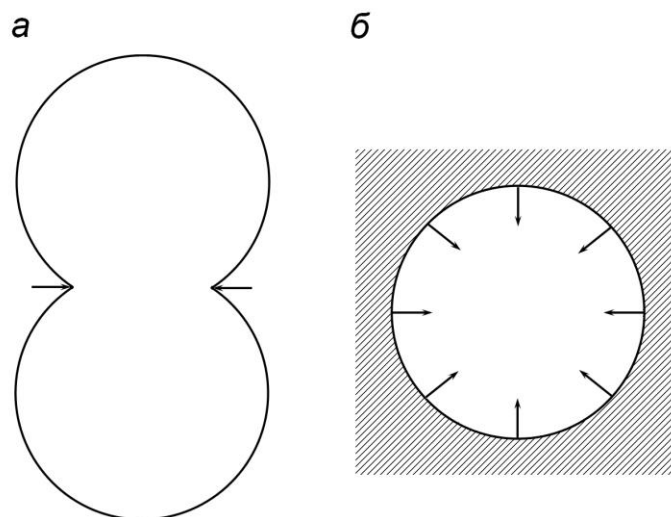


Рис. 1.1 – Действие капиллярных сил при спекании:

а – стык частиц; б – изолированная пора

Диффузионная ползучесть заключается в направленном перемещении вакансий от поверхности, где прикладывается давление, к внешним границам прессовки, а также к границам блоков и зерен, т.е. к свободной поверхности. Это способствует как заполнению пор, так и усадке прессовки.

Поверхности второго типа оказывают определенное влияние на диффузионную ползучесть, которая не может развиваться с постоянной скоростью. Вследствие снижения числа дефектов кристаллической решетки скорость ползучести уменьшается, а вместе с этим снижается и скорость процесса усадки.

На рисунке 1.2 в виде графика изображен ход уплотнения прессовки при спекании.

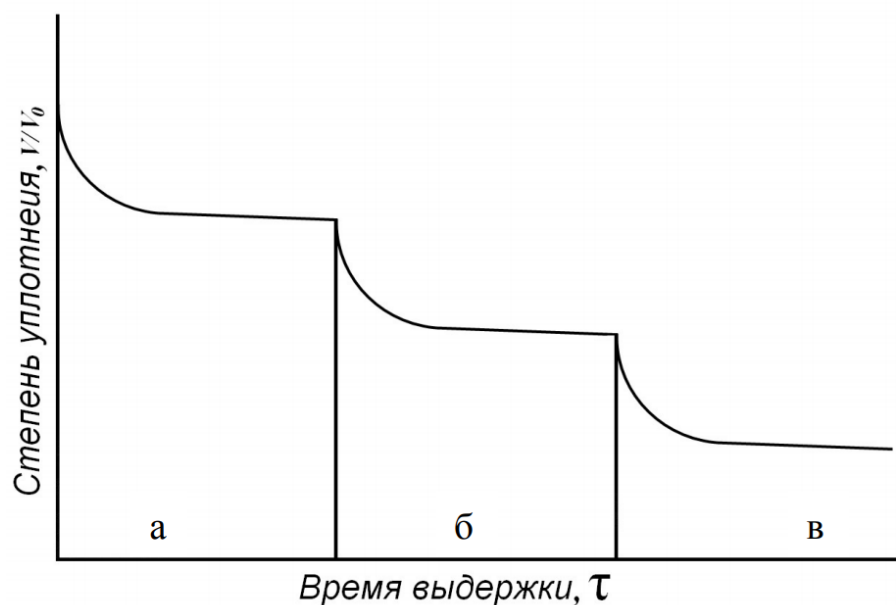


Рис. 1.2. – Усадка при спекании со ступенчатым подъемом температуры

Степень уплотнения, представляющая собой отношение объема прессовки в любое время (τ) к первоначальному объему (V_0), изменяется по ступенчатому закону. Сначала уплотнение идет при повышении температуры за счет выгорания смазки (см. рис. 1.2 а), затем – за счет сглаживания выступов (см. рис. 1.2 б) и, наконец, – за счет диффузионной ползучести (см. рис. 1.2 в).

Влияние рекристаллизации на спекание. Рекристаллизация влияет на диффузионные процессы и тем самым оказывает существенное воздействие на механизм спекания. Внутри каждой металлической частицы порошка с повышением температуры спекания начинается собирательная рекристаллизация, которая заключается в передвижении границ зерен из одной частицы в другую с одновременным ростом контакта между ними. Таким образом происходит укрупнение зерен.

В порошковых материалах температуру начала и конца роста зерен определить очень трудно, так как при прессовании независимо от давления не происходит значительного измельчения частиц порошка, особенно у порошков пластичных металлов. Кроме того, различные частицы порошка,

неодинаково деформируясь, получают разную степень наклепа и, следовательно, разную температуру рекристаллизации.

Спекание с участием жидкой фазы. Данный процесс в практике порошковой металлургии встречается довольно часто. При этом происходит частичное (не более 50 %) расплавление одного из компонентов. Полного расплавления легкоплавкого компонента допускать нельзя, так как прессовка может потерять свою форму.

Известны две причины образования жидкой фазы:

1) появление жидкости в зоне контакта двух металлов, образующих эвтектику;

2) расплавление металла при достижении температуры его плавления.

В обоих случаях жидкость растекается по поверхности частиц порошка, образуя жидкую пленку. При наличии такой пленки частицы порошка в прессовке, скользя относительно друг друга, стремятся максимально уплотниться. Это происходит быстрее, чем при спекании в твердом состоянии, так как жидкая фаза, обладая малой вязкостью, играет роль невыгорающей смазки, которая облегчает скольжение. Процесс может происходить при любой температуре, достаточной для того, чтобы прослойка не закристаллизовалась.

Перегруппировка порошковых частиц ведет к уменьшению пористости прессовки. Заметная усадка происходит до тех пор, пока частицы могут скользить сравнительно свободно. При затруднении уплотнения различные участки жидкой прослойки, окутывающей частицы порошка, испытывают действие различных сжимающих усилий. Наибольшее сдавливание пленка испытывает вблизи контакта частиц, где происходит торможение скольжений, а вдали от контакта сдавливающие усилия менее существенны. В веществе жидкой прослойки вещество порошковых частиц лучше растворяется там, где пленка сдавлена, чем там, где ее ничего не сжимает. Следовательно, в сжатых местах вещество порошковых частиц растворяется и диффузионно перемещается вдоль

жидкой пленки туда, где нет сжимающих усилий. Это приводит к изменению формы частиц и облегчает процесс скольжения, а в итоге – усадку. Диффузия в жидкости происходит быстрее, чем в кристаллическом веществе, поэтому изменение формы, необходимое для продолжения усадки, будет происходить интенсивно.

Таким образом, жидкая прослойка в процессе спекания играет две роли: во-первых, является средой, которая облегчает необходимость преобразования формы порошковых частиц; во-вторых, служит смазкой, упрощающей взаимное скольжение частиц.

При температуре спекания обеспечивается полное растворение жидкой фазы в твердой, в результате чего происходит образование более тугоплавкого, чем жидкая фаза, твердого раствора. При этом жидкая фаза сравнительно быстро исчезает, и дальнейшее спекание протекает в твердой фазе.

Спекание прессовок проводят в печах различной конструкции: конвейерных, колпаковых, вакуумных и т.д. Обязательным условием при этом является предохранение их от окисления, а также восстановление оксидных пленок, имеющих на поверхности частиц. Для достижения этого применяют специальные защитные атмосферы: водород, диссоциированный аммиак, инертные газы (аргон, гелий, азот) или защитные засыпки (например, кварцевый песок, окись алюминия). Чаще всего применяют комбинированные засыпки, например, окись алюминия (с добавкой графитовой крупки), окиси алюминия или магния (с добавкой хрома, кремния). Защитные пленки способствуют также более равномерному прогреву спекаемых изделий и предотвращению припекания их друг к другу. Спекание в расплавленных средах может быть рекомендовано только для беспористых изделий. В этом случае происходят быстрый прогрев и, как следствие, – ускорение процесса спекания. При спекании высокопористых изделий их помещают в графитовые или керамические оболочки. Хорошие результаты дает спекание в вакууме, но

оно менее производительно, чем в печах с защитной атмосферой, и требует более сложного оборудования.

При спекании основными видами брака являются: пережог, окисление, корочка, коробление, недопекание.

Пережог – следствие значительного превышения температуры при спекании, выражающееся в растрескивании или оплавлении поверхности изделий. Этот брак является неисправимым.

Окисление – вид брака, связанный с поглощением прессовками воздуха из внешней среды при спекании. Если компоненты шихты не образуют трудно восстанавливаемых оксидов, окисление может быть устранено повторным нагревом в восстановительной атмосфере.

Корочка – отслоение поверхности, которое образуется разложением органических связей, вводимых в шихту для улучшения прессуемости порошков. Этот брак также неисправимый.

Коробление – искажение формы, чаще всего наблюдающееся у тонких изделий, шихтой для которых служили тонкие порошки, дающие значительную усадку. Возникновению коробления способствуют: плохое смешивание компонентов шихты, неравномерная плотность прессовок и быстрый подъем температуры при спекании. Этот вид брака может быть исправлен холодной или горячей обработкой давлением.

Недопекание – дефект прессовок из порошков, возникающий в результате заниженной температуры или недостаточной выдержки спекания. Этот брак можно исправить повторным спеканием.

1.2.2 Применение колпаковых печей для термообработки

Колпаковые печи появились в 20-е годы прошлого века. Они предназначались для нужд металлургической промышленности. Металл в них обрабатывался горячим газом. Несколько позже появились колпаковые печи для термообработки изделий в вакууме, а также в защитных средах.

Конструкция колпаковой печи

Конструкция колпаковой печи предусматривает нагрев изделий в газовой или вакуумной среде под переносным колпаком. Она позволяет производить полный цикл термообработки: нагрев, охлаждение и выдержку. Изделия при этом располагаются на неподвижном стенде. [4]

Колпаковая печь – печь периодического действия для термообработки рулонов ленты, листов и бунтов проволоки, а также различных заготовок изделий из порошковых металлов. Отличительная особенность колпаковой печи – наличие двух колпаков: внутреннего, предохраняющего металл от окисления (муфеля), и наружного, футерованного огнеупорным кирпичом, на котором монтируются горелки или электрические нагреватели. Муфель делается из жароупорной стали. Герметизация колпаковой печи достигается применением песочных затворов. Обычно для ускорения нагрева металла с помощью внутреннего циркуляционного вентилятора создают интенсивную циркуляцию защитного газа под муфелем. [4]

Колпаковые печи бывают: одностопные, трёхстопные, для отжига листов, уложенных в стопу, а также для отжига распушенных рулонов. При этом наиболее распространенной является одностопная печь, которая лучше других вписывается в поточное производство, достаточно равномерно и быстро нагревает металл, а также обладает довольно низким расходом топлива.

Современная колпаковая печь включает, как правило, следующее оборудование: стационарный стенд, колпак для нагрева и выдержки, колпак для охлаждения, муфель, газовакуумную систему, систему водоохлаждения, электроконтактную систему, системы газоаналитического, автоматизированного и экологического контроля, а также контрольно-измерительных приборов. Управление печью, как правило, возможно в ручном и автоматическом режимах.

Благодаря модульной системе колпаковые печи могут укомплектовываться дополнительными стендами, генераторами для

выработки азота и кислорода, внутренним теплообменником, моечной машиной, различной специализированной оснасткой и прочими необходимыми функциональными модулями и системами управления. [4-6] Схема колпаковой печи приведена на рисунке 1.3.

Принцип работы колпаковой печи

Принцип работы колпаковой печи определяется технологическим процессом, который делится на 3 примерно одинаковые стадии: 1-я – нагрев до 650–800 °С; 2-я – охлаждение под муфелем (до 150 °С) и без него; 3-я – разгрузка и загрузка стенда. Одинаковая продолжительность каждой стадии по времени позволяет использовать три стенда с одним нагревательным колпаком и двумя муфелями. Загрузка металла заканчивается опусканием муфеля и нагревательного колпака на стенд. После чего подаётся защитный газ (обычно – это смесь из 95 % N₂ и 5 % H₂), и с помощью циркуляционного вентилятора осуществляется его циркуляция. Затем включаются горелки. Продукты горения проходят между нагревательным колпаком и муфелем, затем с помощью инжектора (инжектирующая среда – компрессорный воздух) они удаляются в дымоотводы, после чего – в дымовой боров. Температура дыма перед инжектором – около 630–660 °С. В колпаковых печах физическая теплота дыма обычно не утилизируется, что является одним из недостатков колпаковых печей. [5]

В зазор между муфелем и заготовками циркуляционным вентилятором подается защитный газ, который равномерно распределяется по конвекторным кольцам и через них попадает между заготовками, омывая их. Опускаясь вниз, газ возвращается в циркуляционный вентилятор. От защитного газа конвекцией кольца получают теплоту и нагревают изделия. Муфель излучает теплоту на боковую поверхность металла, но тепловой поток не существенен для нагрева заготовок из-за отмеченного ранее низкого коэффициента теплопроводности в радиальном направлении.

Исключение делается для верхней укладки заготовок, поскольку верхние изделия всегда греются быстрее других. В наихудших условиях

нагрева и охлаждения находятся нижние укладки. Из-за низкого коэффициента теплоотдачи от муфеля к защитному газу вынужденно поддерживаются высокая температура как муфеля, так и дыма под нагревательным колпаком. Все это приводит к повышенной температуре уходящих газов и высокому расходу топлива.

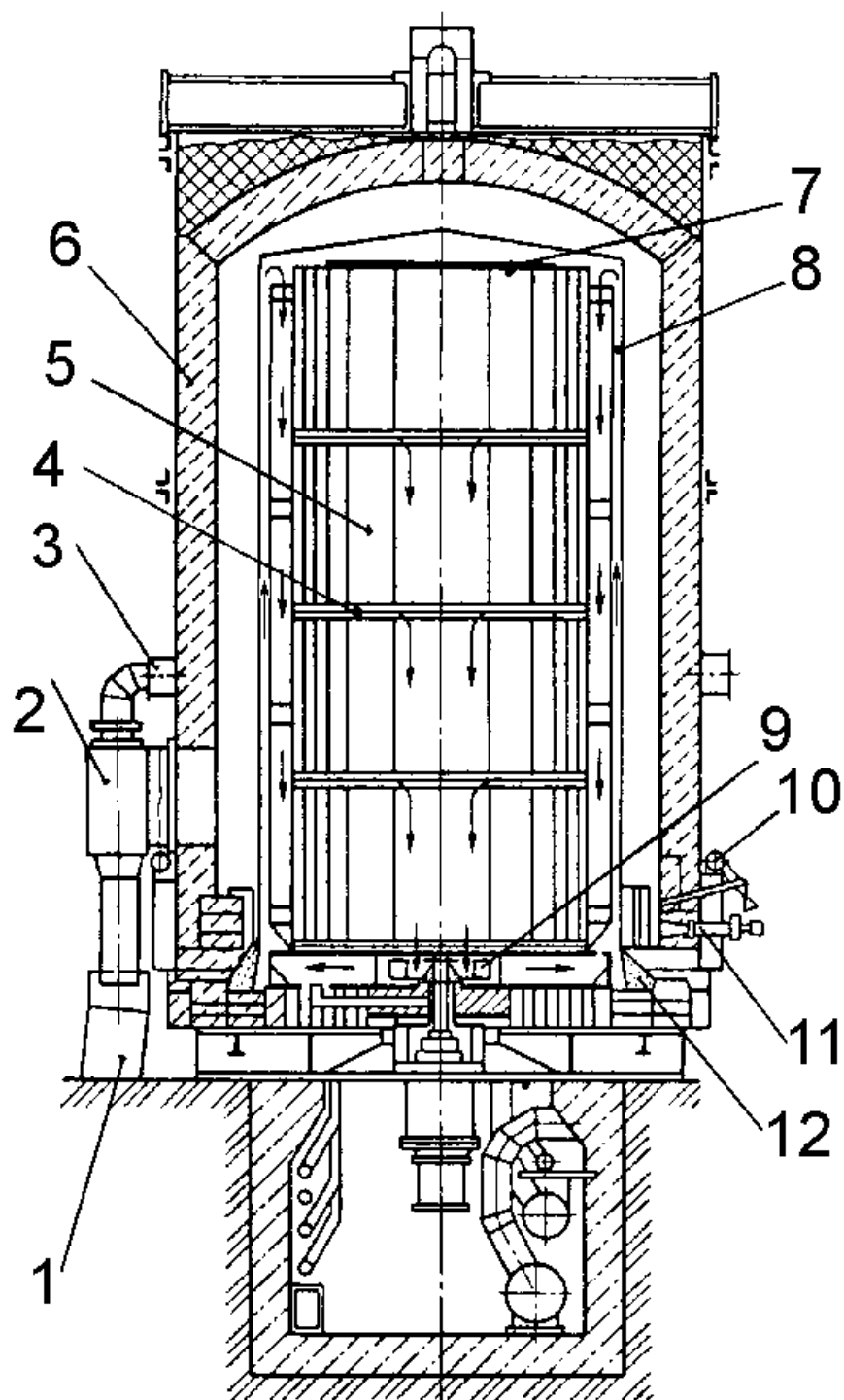


Рис. 1.3 – Схема колпаковой печи

1 – вход в дымовой бор; 2 –инжектор; 3 – кольцевой канал сжатого воздуха; 4 – конверторное кольцо; 5 – рулон; 6 – нагревательный колпак; 7 – крышка; 8 – двойной муфель; 9 – рабочее колесо вентилятора; 10 – газопровод; 11– горелка; 12 – песочный затвор.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

В рамках проведенной практической работы внимание было акцентировано на том, будут ли готовые изделия, спеченные при едином температурном режиме, удовлетворять требованиям ТУ, и если это произойдет, то как будут отличаться величины магнитных параметров (тангенса угла магнитных потерь и температурного коэффициента магнитной проницаемости) в зависимости от марки используемого порошка и размеров сердечников.

2.1 Сравнение порошков пермаллоя

В настоящее время многие металлургические предприятия активно занимаются исследованием свойств магнитных материалов, а также уделяют значительное внимание вопросам производства различных композитных изделий. В рамках данной работы нас, прежде всего, интересуют кольцевые сердечники марок МП–140 и МП–250, для изготовления которых зачастую используются порошки пермаллоя.

В данном исследовании сравнивались порошки производства фирм «Höganäs» (Швеция) и «Полема» (г. Тула). Вначале у каждого из закупленных порошков брались небольшие пробы и отправлялись в лабораторию, где на специальном оборудовании определялся их гранулометрический состав, который представлен на рисунках 2.1, 2.2. Данные, приведённые на указанных рисунках, показывают, что средний размер частицы обоих порошков примерно одинаков и составляет около 60–62 мкм. В дальнейшем порошки отправлялись для исследования фазового состава на рентгеновском дифрактометре. Полученные результаты свидетельствуют о том, что фазовый состав обоих исследуемых порошков пермаллоя одинаковый и представлен одной фазой FeNi_3 . После этого проводилось сравнение внешнего вида порошков путем рассмотрения под микроскопом отдельных их частиц. Из полученных данных видно, что частицы порошков имеют сферическую форму как у отдельно взятых

гранул, так и у слипшихся из мелких частиц конгломератов (рис.2.3). На рисунке приведены частицы порошка фирмы «Полема» г. Тула, порошки фирмы «Höganäs» будут иметь такую же форму частиц. Затем проводилось исследование «поведения» порошка в окислительной атмосфере. Результаты, представленные на диаграмме окисляемости (рис.2.4), свидетельствуют о том, что порошки двух разных фирм по окисляемости не отличаются друг от друга, так как кривые зависимости «потерь при прокаливании» (п.п.п) практически одинаковые. На рисунке 2.5 показаны пробы порошков после прокаливания в окислительной атмосфере при различных температурах. Следует подчеркнуть, что начало спекания наблюдается только при температуре не ниже 500°C и сопровождается изменением цвета. В дальнейшем интенсивное спекание свободно насыпанных порошков наблюдалось при температуре 600°C, и порошки приобретали форму таблетки, которая при температуре 1000°C, немного подплавляясь, прилипала ко дну тигля, чтобы ее удалить, необходимо было разрезать тигель.

Исходя из полученных в эксперименте данных, можно сделать следующий вывод: в процессе нагрева на воздухе частицы пермаллоя окисляются, и на их поверхности образуется оксидный слой. Однако несмотря на это они спекаются даже в свободно насыпанном состоянии и отличаются повышенной активностью к спеканию, что очень важно при производстве магнитных сердечников. На основании проведенных исследований следует, что порошки двух фирм имеют схожий размер частиц, форму, и схожие свойства, поэтому целесообразнее и выгоднее использовать порошки фирмы «Полема» г. Тула.

Оператор:		Комментарий:	
Имя файла:			
Дата:		Расчет по:	Фраунгоферу
Время:	10:08:15	Ультразвук:	Мощность 200 Вт Время 60с.
		Диапазон:	(0.20-300) мкм
		Кэфф. пропускания:	82.0 %

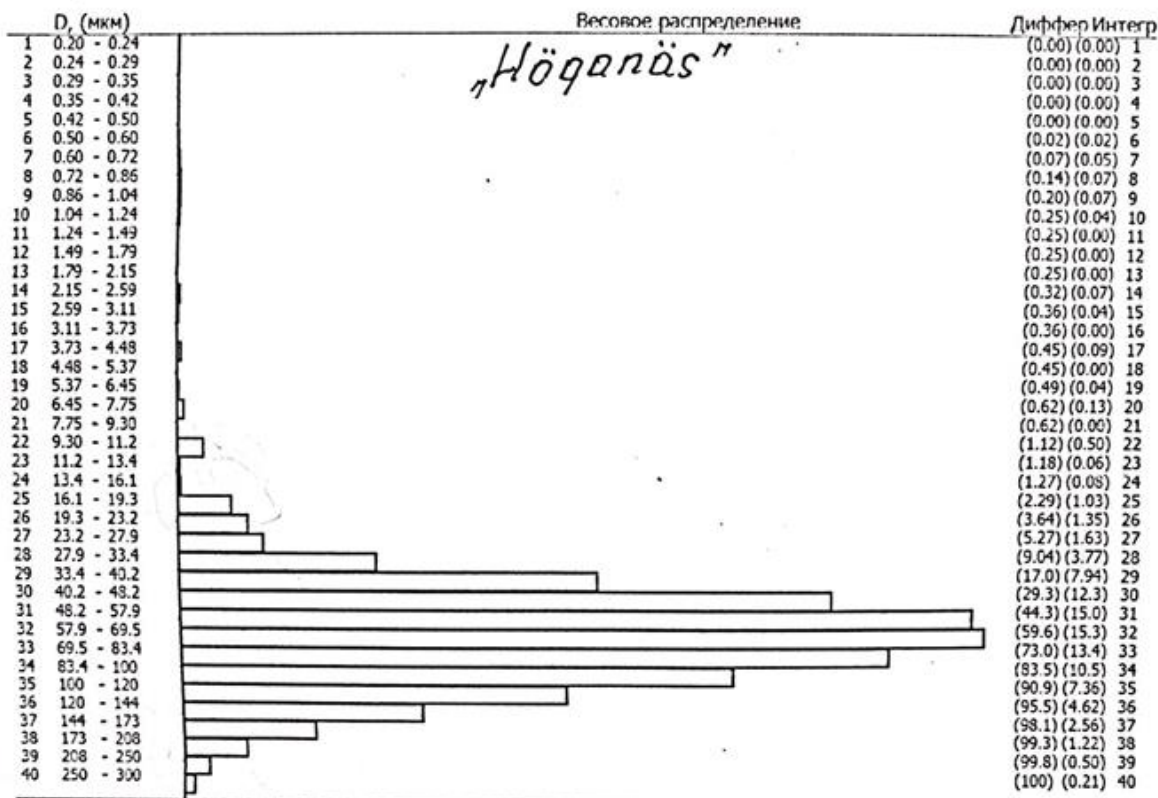


Таблица соответствия размеров частиц (D, мкм) заданным значениям весовых долей

D, мкм	34.2	42.1	48.6	55.1	62.2	69.9	80.3	94.5	118	300
P, %	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100

Таблица весовых долей частиц (P, %), соответствующих заданным значениям размеров частиц

P, %	0.20	0.40	0.50	0.80	1.20	6.40	32.2	83.4	96.2	100
D, мкм	2.00	3.00	5.00	10.0	15.0	30.0	50.0	100	150	300

Рисунок 2.1 – Гранулометрический состав порошков пермаллоя 80Н2М производства фирмы «Höganäs» (Швеция)

Оператор:		Комментарий:	
Имя файла:			
Дата:		Расчет по:	Фраунгоферу
Время:	9:37:39	Ультразвук:	Мощность 200 Вт Время 60с.
		Диапазон:	(0.20-300) мкм
		Козфф. пропускания:	77.0 %

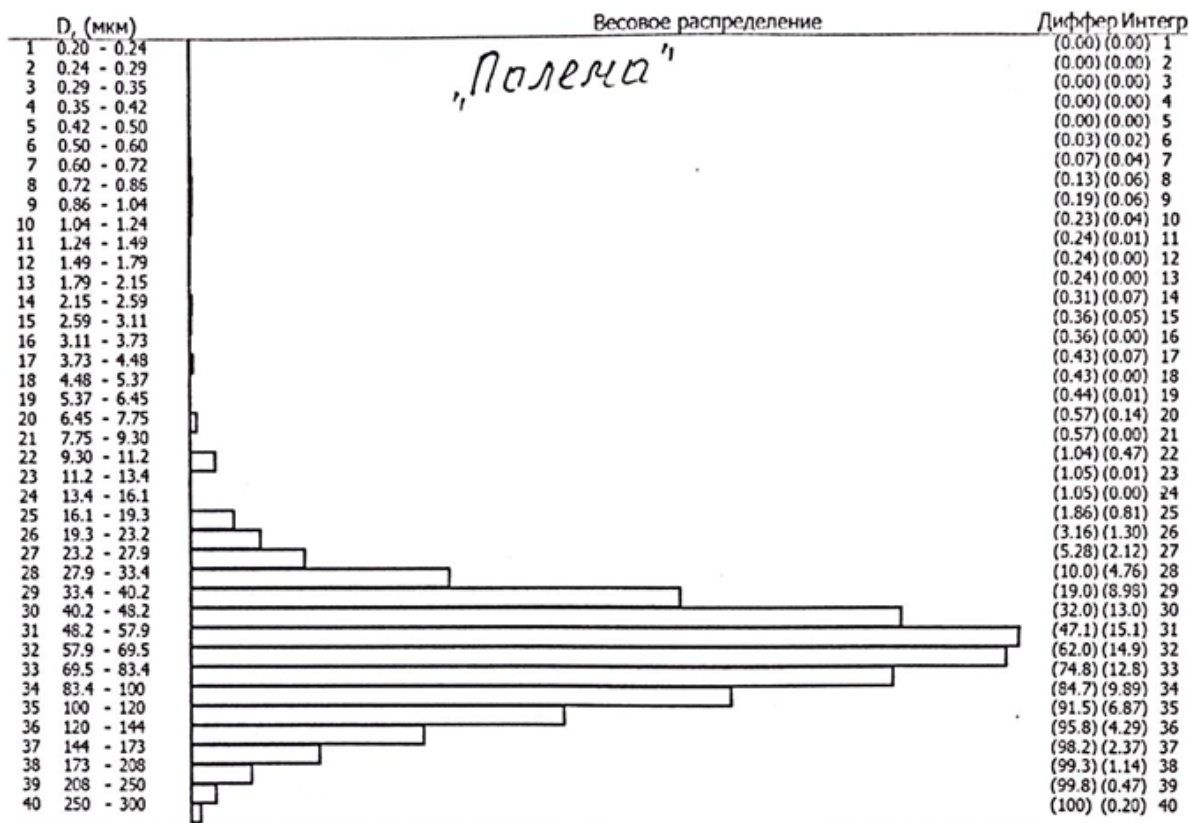


Таблица соответствия размеров частиц (D, мкм) заданным значениям весовых долей

D, мкм	33.4	40.8	47.0	53.3	60.2	68.0	78.2	92.3	116	300
P, %	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100

Таблица весовых долей частиц (P, %), соответствующих заданным значениям размеров частиц

P, %	0.20	0.40	0.40	0.70	1.00	6.80	34.9	84.6	96.5	100
D, мкм	2.00	3.00	5.00	10.0	15.0	30.0	50.0	100	150	300

Рисунок 2.2 — Гранулометрический состав порошков пермаллоя 80Н2М производства фирмы «Полема» (г. Тула)

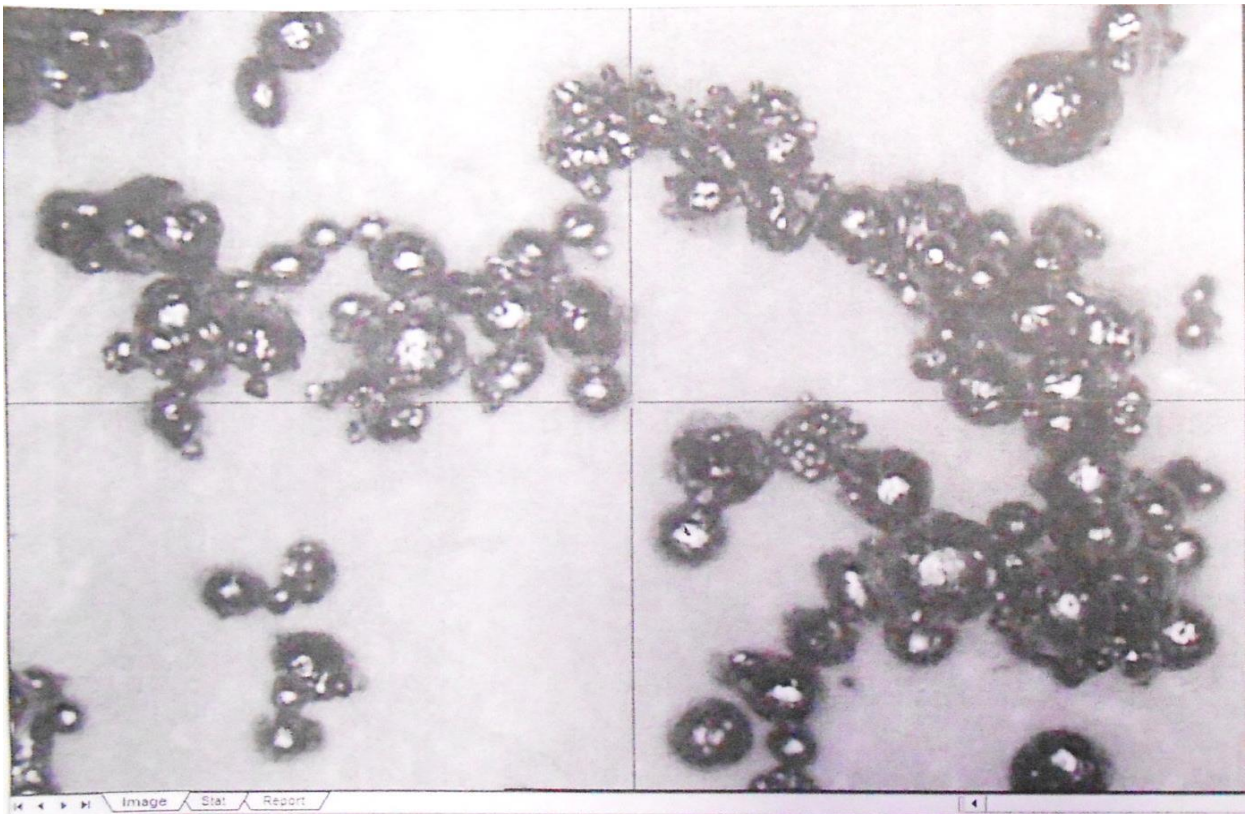


Рисунок 2.3 – Исходные порошки пермаллоя («Полема») под микроскопом (x50).

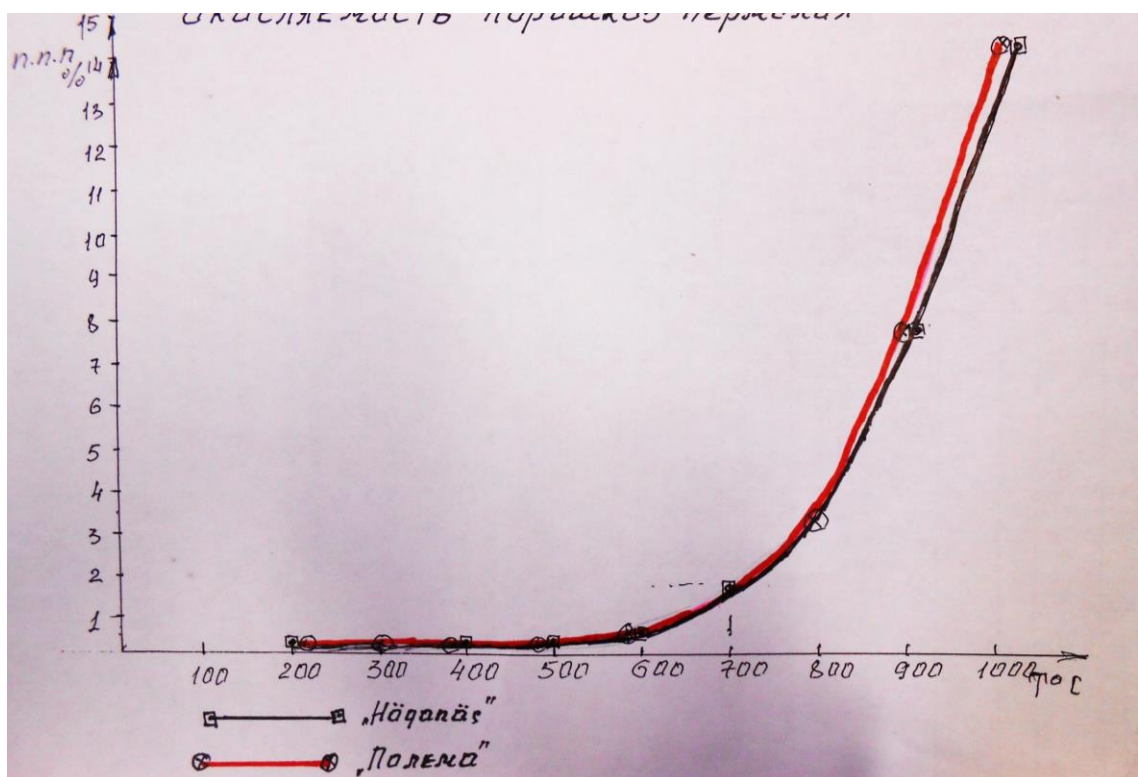


Рисунок 2.4 – Диаграмма окисляемости порошков пермаллоя

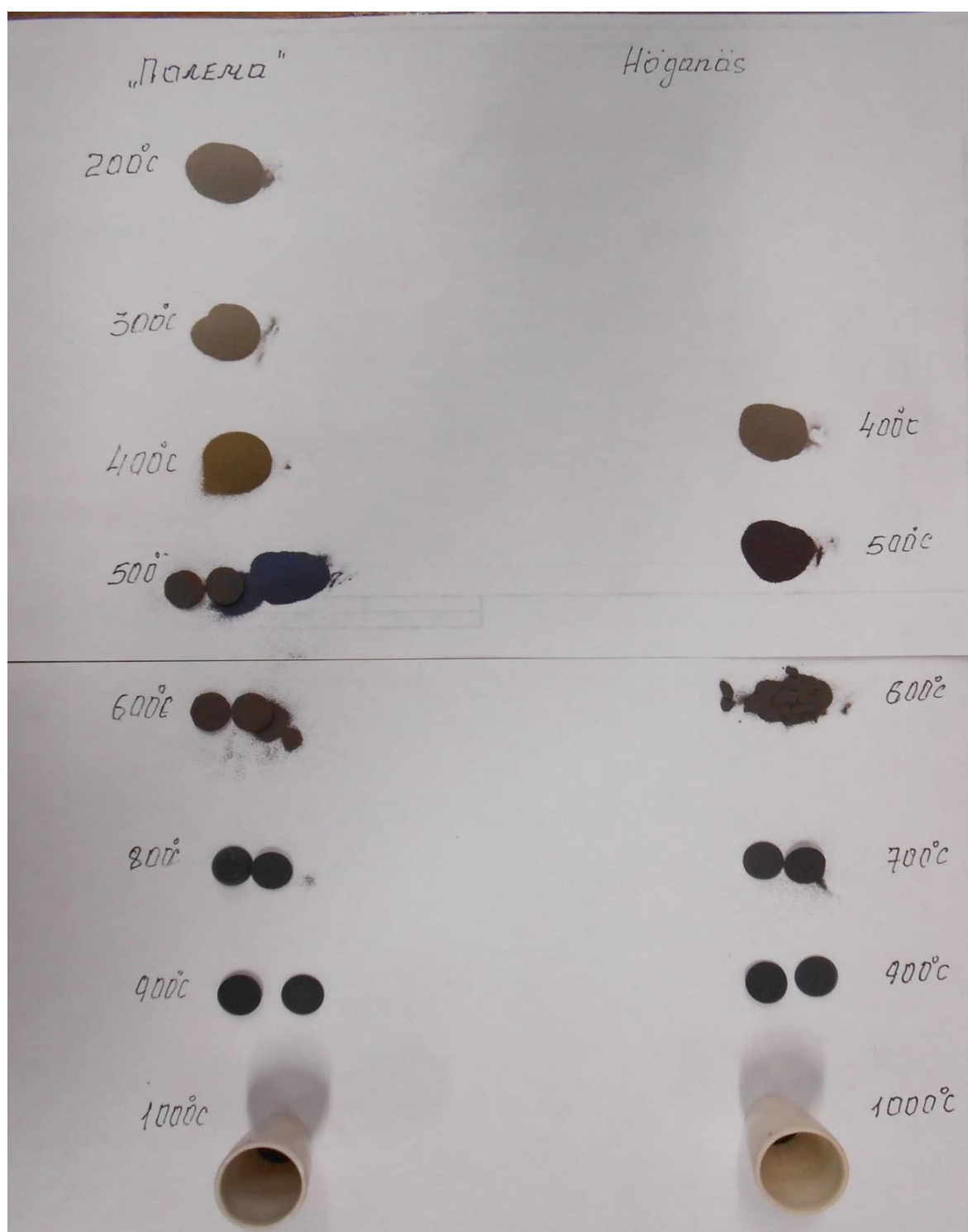


Рисунок 2.5 – Пробы порошков пермаллоя после определения п.п.п. в окислительной атмосфере

2.2 Технологический процесс изготовления сердечников

2.2.1 Технология изготовления сердечников

Прежде всего порошок предварительно подвергается отжигу в вакууме при температуре 670°C и при остаточном давлении $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., затем после дробления спеков в щековой дробилке, протирки порошка в протирочной машине, рассева на фракции и введения термокомпенсирующей добавки, можно считать, что полученная масса готова для приготовления пресспорошка. В первую очередь порошок заливается водным раствором хромового ангидрида (CrO_3), что является первым слоем изоляции. Данная смесь в течение двух часов перемешивается при температуре нагрева ковша до 90°C , т.е. до полного высыхания шихты, после чего вводится второй слой изоляции – водный раствор жидкого стекла (Na_2SiO_3) с добавкой талька ($3\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$). В полученную смесь после длительного перемешивания и полного ее высыхания вводится третий слой изоляции – дисульфид молибдена (MoS_2). Затем она высушивается, просеивается через сито и поступают на стадию прессования. При удельном давлении ($18\text{--}20$ т/см²) прессом формируются кольцевые сердечники, а прессформа смазывается стеаратом цинка ($\text{Zn}[\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2]_2$). Для прессования используются ручные прессы ($10\text{--}250$ т.). Отпрессованные сердечники спекаются в колпаковой печи в среде азота. После этого они передаются на измерение и контроль электромагнитных параметров опытных образцов изделий. У сердечников с помощью специального оборудования измеряется коэффициент начальной индуктивности A_L . Если измеренное значение попадает в соответствующие промежутки, (см. табл. 2.1), то изделие считается допущенным, т.е. прошедшим контроль, и скорее всего будет обладать значениями магнитных параметров, соответствующими требованиям.

Таблица 2.1 – значение коэффициента начальной индуктивности A_L в зависимости от типоразмера сердечника.

Типоразмер сердечника	Коэффициент начальной индуктивности $A_{Lн}$, нГн/п ²				
	МП-60	МП-100	МП-140	МП-160	МП-250
К7х4х3	13,7-23,9	22,8-39,8	35,1-43,0	36,5-63,6	57,0-99,4
К10х6х3	12,7-17,3	21,4-32,3	32,0-49,0	36,6-44,7	50,8-63,5
К10х6х4,5	20,4-27,9	33,9-46,4	50,5-71,0	59,1-72,2	77,3-118,0
К12х5х5,5	43,2-59,1	70,1-109,4	99,0-153,0	125,3-153,3	175,3-217,5
К13х7х5	29,0-40,0	48,0-67,0	73,0-95,5	84,5-102,0	112,2-162,0
К17х10х6,5	32,9-45,1	52,1-79,0	83,5-105,0	96,0-119,0	132,5-165,8
К20х12х6,5	31,8-43,6	43,3-57,8	80,5-102,5	93,5-109,0	124,1-172,3
КП15х7х4,8	32,0-44,0	53,0-74,0	76,5-102,0	79,1-125,3	123,7-178,0
КП15х7х6,7	46,0-62,0	77,0-104,0	112,0-143,0	116,5-176,3	182,0-275,4
КП19х11х4,8	22,0-31,0	37,0-52,0	56,0-74,5	55,5-89,9	86,8-140,4
КП19х11х6,7	33,0-44,0	55,0-74,0	82,5-105,0	81,8-126,4	127,8-180,0
КП24х13х5,2	27,0-38,0	45,0-63,0	66,5-87,0	68,4-106,0	107,0-150,4
КП24х13х7	38,0-51,0	63,0-86,0	96,0-119,5	97,4-144,8	152,2-190,5
КП27х15х5,2	27,0-35,0	43,3-57,8	60,7-80,9	69,3-92,5	104,8-137,5
КП27х15х6	30,0-41,1	49,7-73,1	69,6-102,3	79,5-119,2	124,3-158,6
КП36х25х7,5	24,0-33,0	41,0-54,0	61,5-78,0	61,5-92,5	96,2-124,9
КП36х25х9,7	33,0-43,0	54,0-71,0	82,0-102,0	82,2-120,8	128,5-188,7
КП44х28х7,2	28,0-38,0	47,0-63,0	69,0-88,0	72,2-105,7	112,8-165,1
КП44х28х10,3	43,0-56,0	71,0-93,0	106,0-129,5	109,6-155,0	171,3-242,2
КП52х36х10	32,4-45,8	53,9-76,4	79,6-106,2	86,3-122,2	134,8-191,0
КП52х36х14	47,1-65,2	78,5-108,7	113,2-152,2	125,6-174,0	196,3-244,1

Сердечники, прошедшие контроль и имеющие нужные параметры, передаются на лакирование. Те же, которые не дотянули до нужных значений, отправляются на повторный обжиг, а превысившие допустимые значения – в изолятор брака. Для защиты от коррозии и для повышения прочности отожженные изделия покрываются тонким слоем бакелитового лака, после чего помещаются в сушильный шкаф при температуре 135°C. Остывшие сердечники обматываются тонкой медной проволокой. У полученных катушек для определения их годности измеряются магнитные параметры, а именно: коэффициент начальной индуктивности, тангенс магнитных потерь и температурный коэффициент магнитной проницаемости « μ » (ТК μ). После ряда упаковочных и маркировочных операций годные изделия отгружают заказчику. На рисунке 2.6 схематично представлен технологический процесс изготовления сердечников из Мо-пермаллоя.

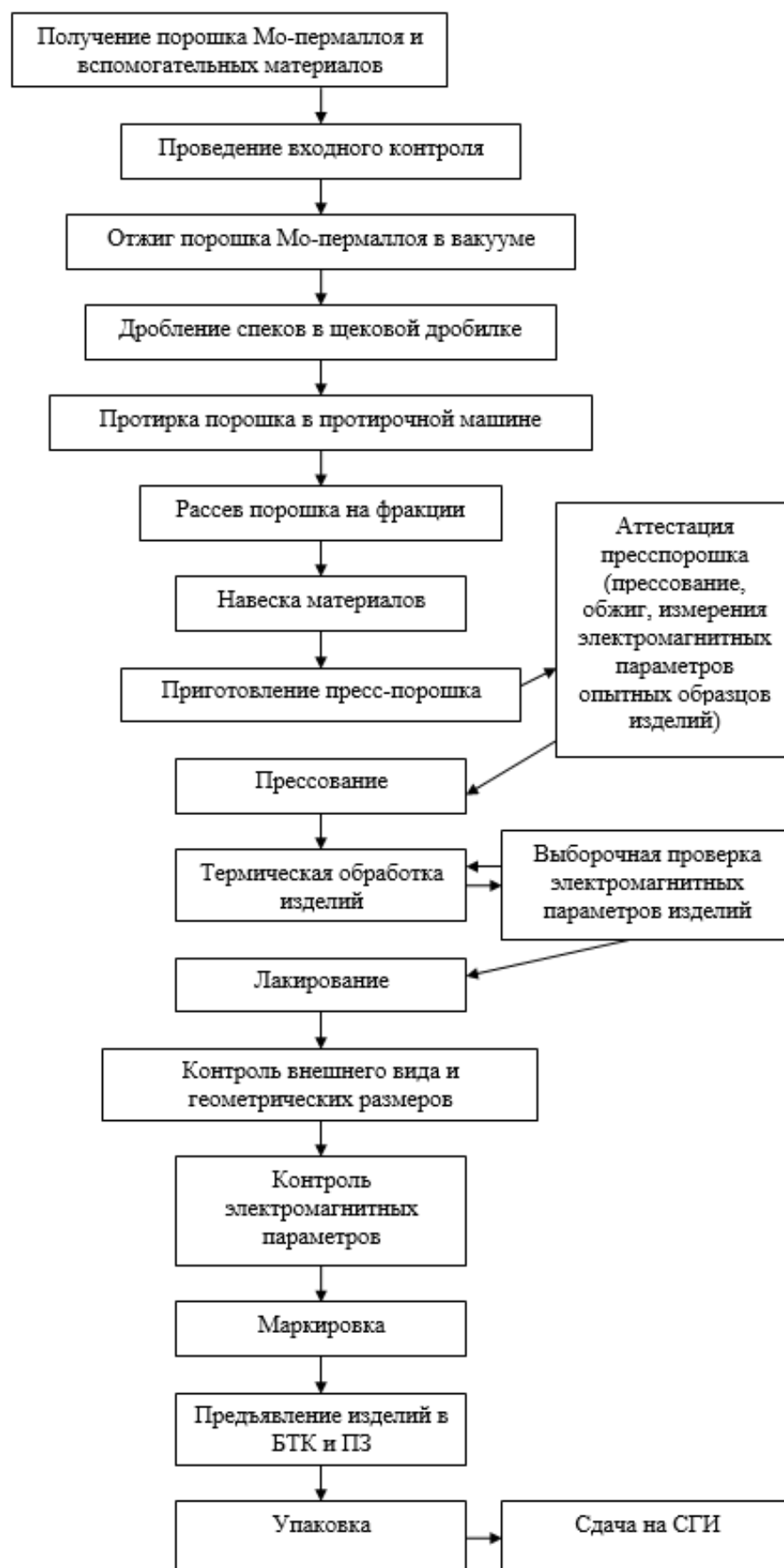


Рисунок 2.6 – Технологический процесс изготовления кольцевых сердечников на жидком стекле.

2.2.2 Анализ технологического процесса

В таблице 2.2 показано, что происходит с материалом на каждой стадии и какие химические реакции могут возникнуть при введении хромового ангидрида (CrO_3), жидкого стекла (MgSiO_3), талька ($3\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), дисульфида молибдена (MoS_2), а также выяснить, что каждый из них из себя представляет и каковы их физические и химические свойства.

Таблица 2.2 – Анализ технологического процесса

Технологическая операция	Назначение	Химические реакции
Отжиг порошка пермаллоя в вакууме при $T=670^\circ\text{C}$	Снятие напряжений, повышение пластичности	-
Дробление	Разбивание спёкшихся кусков на фрагменты	-
Нанесение первого слоя изоляции – хромового ангидрида	Изоляция поверхности частиц	Возможные реакции: $\text{CrO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CrO}_4$ (кислота) $\text{H}_2\text{CrO}_4 + \text{FeNi}_3 \rightarrow \text{соль хромовой кислоты.}$ Происходит окисление частиц пермаллоя
Нанесение второго и третьего слоя изоляции	Формирование на поверхности частиц пленки из жидкого стекла с тальком, который после спекания расплавится, закроет пористость сердечников MoS_2 и снизит коэффициент трения	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + \text{SiO}_2$ – гидролиз $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ – затвердевание жидкого стекла за счет углекислого газа из воздуха. $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{CrO}_4 \rightarrow \text{Na}_2\text{CrO}_4 + \text{H}_3\text{SiO}_3 \rightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$ – нейтрализация избытка хромовой кислоты
Просеивание пресспорошка	Протирка массы через сито	-
Прессование кольцевых сердечников при $P_{\text{уд}}=18-20 \text{ т/см}^2$	Придание формы	-

1	2	3
Спекание сердечников в азотной среде	Закрытие пористости, обеспечение прочности, снятие напряжений после прессования	$3\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{380^\circ\text{C}} \text{MgSiO}_3 + \text{H}_2\text{O} \uparrow$ - тальк теряет воду и разрыхляет структуру сердечника $\text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$ – углекислый газ разрыхляет структуру $2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \uparrow$ – вода, выделяющаяся из NaOH разрыхляет структуру
Нанесение лака и бакелизация сердечников	Создание изоляционного слоя между проводником и сердечником, нанесение слоя бакелитового лака методом погружения	-
Намотка проводника	Формирование катушки индуктивности	-

Магнитная проницаемость кольцевых сердечников определяется их структурой, характеризующейся коэффициентом упаковки кристаллической решетки, размерами зерен, расстоянием между зернами и величиной изоляционного слоя.

Чаще всего прессовки будущих сердечников спекаются с использованием конвейерной печи. Применение в такой печи дифференцированного подхода к каждой партии заготовок в зависимости от марки порошка и типоразмера сердечника, является существенным недостатком данного способа. Однако появление на производстве другого типа печи – колпаковой, подтолкнуло к предположению о вероятности устранения этого недостатка. Я акцентировал свое внимание на этапе операции спекания сердечников в азотной среде в колпаковой печи. Меня интересовало, будут ли готовые изделия, спеченные при едином

температурном режиме, удовлетворять требованиям ТУ, и если это произойдет, то как будут отличаться величины магнитных параметров (тангенса угла магнитных потерь и температурного коэффициента магнитной проницаемости) в зависимости от марки используемого порошка и размеров сердечников.

В эксперименте использовались две марки порошка пермаллоя: МП-140 и МП-250 из каждой из которых изготавливались сердечники разных типоразмеров: КП24х13х7 и К13х7х5 для МП-140, КП24х13х7 и К12х5х5,5 для МП-250. Спекание опытных образцов производилось при 650°С в азотной среде. Результаты измерения основных магнитных параметров: тангенса угла магнитных потерь и температурного коэффициента магнитной проницаемости (ТКμ) представлены в таблицах 4–6. Для тангенса угла магнитных потерь величины не должны превышать значения, указанные рядом с таблицей, то есть для марки МП-140 при частоте 100кГц и коэрцитивной силе 24 А/М – 48.5 (при 30 кГц не измеряется), при частоте 30кГц и коэрцитивной силе 72 А/М – 20, при частоте 100кГц и коэрцитивной силе 72 А/М – 51.5. Для марки МП-250 при частоте 100кГц и коэрцитивной силе 24 А/М – 45.0 (при 30 кГц не измеряется), при частоте 30кГц и коэрцитивной силе 72 А/М – 20.0, при частоте 100кГц и коэрцитивной силе 72 А/М – 50.0. Для Температурного коэффициента магнитной проницаемости значения не должны превышать для марки МП-140 – 120 единиц, для марки МП-250 – 200.

Для температурного коэффициента магнитной проницаемости значения не должны превышать: для марки МП-140 – 120 единиц, для марки МП-250 – 200.

Таблица 2.3 – Значения тангенса угла магнитных потерь для марки МП 140

К 13х7х5			КП 24х13х7					
Частота, кГц	Коэрцитивная сила, А/М		Частота	Коэрцитивная сила, А/М		МП 140		
	24 А/М	72 А/М		24 А/М	72 А/М			
30	-	18,59	30	-	11,3	30кГц	-	24А/М
100	35,53	39,94	100	25	28,1	100кГц	48,5	
30	-	17,41	30	-	10,5	30кГц	20	72А/М
100	32,92	37,17	100	21,7	24,6	100кГц	51,5	
30	-	19,34	30	-	10,0			
100	41,12	45,16	100	20,6	23,4			
30	-	17,37	30	-	11,0			
100	33,26	37,31	100	23,5	26,4			
30	-	17,32	30	-	10,1			
100	32,95	37,09	100	18,9	22,2			
30	-	16,58	30	-	9,8			
100	32,15	35,91	100	18,4	21,5			
30	-	18,68	30	-	10,8			
100	37,43	41,56	100	22,2	25,4			
30	-	18,82	30	-	10,4			
100	38,3	42,44	100	20,7	23,5			
30	-	16,41	30	-	11,0			
100	30,77	34,76	100	24,3	27,1			
30	-	18,45	30	-	10,9			
100	36,56	40,78	100	24,0	27,1			
30	-	17,06	30	-	10,7			
100	32,11	36,29	100	23,5	26,4			
30	-	19,37	30	-	10,9			
100	38,7	43,01	100	23,4	26,5			
30	-	15,77	30	-	10,9			
100	31,04	34,61	100	22,8	25,8			
30	-	15,65	30	-	11,8			
100	30,12	33,76	100	23,9	25,7			
30	-	15,36	30	-	11,3			
100	29,6	33,02	100	25,9	29,4			
30	-	17,8	30	-	11,1			
100	34,36	38,5	100	26,0	28,6			
30	-	16,1	30	-	11,2			
100	30,63	34,41	100	25,5	28,6			
30	-	17,48	30	-	11,5			
100	33,68	37,76	100	26,5	29,6			
30	-	17,5	30	-	10,9			
100	33,4	37,62	100	23,5	26,5			
30	-	14,6	30	-	10,9			
100	28,55	31,88	100	22,2	24,9			

Таблица 2.4 – Значения тангенса угла магнитных потерь для марки МП 250

К 12х5х5.5			КП 24х13х7					
Частота, кГц	Коэрцитивная сила, А/М		Частота, кГц	Коэрцитивная сила, А/М		МП 250		
	24 А/М	72 А/М		24 А/М	72 А/М			
10	-	12,5	10	-	14,6	10кГц	-	24А/М
30	35,5	38,1	30	31,5	35,6	30кГц	45,0	
10	-	13,4	10	-	12,9	10кГц	20,0	72А/М
30	33,9	36,1	30	26,6	29,9	30кГц	50,0	
10	-	11,5	10	-	12,3			
30	34,7	36,9	30	27,0	29,9			
10	-	13,6	10	-	11,8			
30	39,0	41,2	30	25,4	28,6			
10	-	12,5	10	-	12,2			
30	30,9	38,8	30	26,2	29,6			
10	-	11,4	10	-	12,3			
30	30,7	32,9	30	27,0	30,5			
10	-	6,8	10	-	11,9			
30	29,4	31,8	30	26,3	29,7			
10	-	14,3	10	-	14,1			
30	41,8	44,0	30	28,9	32,4			
10	-	13,7	10	-	13,9			
30	35,5	37,5	30	29,3	33,2			
10	-	13,7	10	-	12,6			
30	37,4	39,5	30	25,6	28,7			
10	-	10,4	10	-	12,3			
30	30,1	32,2	30	26,1	29,6			
10	-	14,3	10	-	13,1			
30	35,4	37,6	30	27,4	30,4			
10	-	14,9	10	-	12,4			
30	42,4	44,4	30	26,5	29,3			
10	-	15,3	10	-	12,1			
30	44,3	46,6	30	26,4	30,0			
10	-	16,4	10	-	11,6			
30	43,6	45,9	30	24,8	28,1			
10	-	13,2	10	-	12,3			
30	37,9	40,2	30	27,2	30,7			
10	-	12,3	10	-	12,4			
30	31,5	33,5	30	26,4	29,9			
10	-	10,3	10	-	10,2			
30	29,6	31,8	30	24,5	29,1			
10	-	14,5	10	-	12,2			
30	38,2	40,4	30	26,8	29,8			
10	-	13,0	10	-	13,5			
30	36,9	39,2	30	28,4	29,0			

Таблица 2.5 – Значения температурного коэффициента магнитной проницаемости для обеих марок.

МП 140, КП 24х13х7		МП 140, К 13х7х5	
№	ТК μ	№	ТК μ
1	107,5	1	26,1
2	95,2	2	42,6
3	92,9	3	39,6
4	103.0	4	30,2
5	96.6	5	30.2
6	95.6	6	22.4
7	96.4	7	29.8
8	102.3	8	32.4
9	100.0	9	31.0
10	93.5	10	45.0
11	97.7	11	28.7
12	88.6	12	46.9
13	89.5	13	42.9
14	88.9	14	46.0
15	91.3	15	35.4
МП 250, К 12х5х5х5		МП 250, КП 24х13х7	
№	ТК μ	№	ТК μ
1	138.0	1	134.1
2	146.8	2	166.0
3	137.8	3	166.8
4	134.6	4	157.5
5	142.7	5	161.7
6	143.3	6	156.3
7	182.2	7	138.1
8	145.6	8	145.4
9	140.6	9	139.9
10	133.7	10	163.7
11	132.8	11	150.6
12	130.6	12	131.7
13	185.5	13	169.7
14	168.3	14	167.6
15	134.5	15	166.3
16	128.1	16	159.3
17	168.7	17	152.0
18	133.0	18	151.6
19	175.7	19	155.3
20	130.3	20	128.7

Данные представленных таблиц позволяют сделать однозначный вывод: целесообразно использовать колпаковую печь при едином температурном режиме для спекания изделий независимо от марки порошка и типоразмеров сердечников. Поскольку служебные характеристики, полученные по двум технологиям близки.

Заключение

Подводя итоги практической работы по усовершенствованию технологического процесса изготовления сердечников из Мо-пермаллоя и оценки его целесообразности, можно сделать ряд выводов:

1. Технология изготовления кольцевых сердечников на основе пермаллоя с использованием жидкого стекла отличается сложностью, связанной с чувствительностью исходных порошков к напряжениям, создаваемым как на стадии их синтеза, так и на стадии прессования заготовок при больших давлениях.

2. Формирование изоляционных слоев на поверхности частиц пермаллоя путем введения хромового ангидрида, жидкого стекла, талька и дисульфида молибдена представляет собой ряд сложных, трудноуправляемых химических процессов, требующих проведения жесткого пооперационного контроля.

3. При оценке на выходе магнитных параметров спеченных изделий в условиях единого температурного режима прослеживается определенная зависимость: чем больше габариты изделия из 140-ой марки порошка, тем ниже значение тангенса угла магнитных потерь, а значения $TК_{\mu}$ наоборот выше, чем у менее габаритных изделий. В свою очередь у 250-й марки отличие значений тангенса и $TК_{\mu}$ незначительны.

4. Возможность замены шведского порошка фирм «Höganäs» на порошок фирмы «Полема» г. Тула, так как их свойства близки.

5. Учитывая сложность существующего технологического процесса и, в первую очередь, воспроизводства свойств материала сердечников, рекомендуется продолжить работы по дальнейшему усовершенствованию отдельных операций технологического процесса.

Список использованных источников

1. Хек К. Магнитные материалы и их техническое применение. – М.: «Энергия», 1973.
2. Преображенский А.А., Бишард Е.Г. Магнитные материалы и элементы: Учебник для студ. Вузов по Спец. «Полупроводники и диэлектрики». – 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 352 с.
3. Гропянов А.В., Ситов Н.Н., Жукова М.Н. Порошковые материалы: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2017. -74 с. Гропянов А.В., Ситов Н.Н., Жукова М.Н. Порошковые материалы: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2017. -74 с.
4. Metallurgical furnaces. - V.A. Krivandin, B.L. Markov. - M.: Metallurgy, 1977.
5. Metallurgical heat engineering. Volume 2. Construction and operation of furnaces. - Under the editorship of V.A. Krivandina. - M.: Metallurgy, 1986.
6. Theory, construction and calculations of metallurgical furnaces. Volume 1. - Under the editorship of V.A. Krivandina. - M.: Metallurgy, 1986.
7. Рейнбот Г. Магнитные материалы и их применение. – Л.: «Энергия», 1971. Магнитные материалы микро- и наноэлектроники: учеб. пособие / А. Л. Семенов, А. А. Гаврилюк, Н. К. Душутин, Ю. В. Ясюкевич. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. – 147 с