

министерство образования украины
харьковский государственный автомобильно-
дорожный технический университет

На правах рукописи

Анисимова Элеонора Ромуальдовна

Разработка магнитно-мягких материалов с заданными свойствами для специальных электрических машин

Специальность
05.02.01 - материаловедение в машиностроении

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Харьков - 1996

021
20.22



00344220 (F)

Работа выполнена в Севастопольском институте

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор,
Академик АИИ Украины
А.М.Олейников.

Консультант - кандидат технических наук, доцент
В.А.Михайлиди.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники
Украины С.С.Дьяченко.
- доктор технических наук, профессор,
заслуженный рационализатор СССР
А.И.Яковлев

Ведущая организация - Севастопольский завод им. В.Д.Калмыкова

Защита состоится "11" апреля 1996 г. в 14⁰⁰ час.

на заседании Специализированного совета К 02.17.01 в
Харьковском государственном автомобильно-дорожном техническом
университете по адресу 310078 г.Харьков; ул.Петровского,25
Телефон: 49-91-05

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ХГАДТУ
Автореферат разослан 11 марта 1996 г.

Ученый секретарь
Специализированного
Совета К02.17.01.
К.Т.Н., доц.

Аксент Кос: мин А.В.
ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Наиболее широко применяемыми электрическими машинами среди судовых двигателей являются асинхронные двигатели (АД), которые составляют около 90% всего парка машин переменного тока. Доминирующее положение по количеству и установленной мощности занимают среди них АД с короткозамкнутыми роторами (АДКР). Однако эти двигатели имеют ряд недостатков, например: высокие пусковые токи, которые вызывают значительные провалы напряжений особенно при пусках от сети соизмеримой мощности; большие потери энергии в переходных режимах, что ограничивает допустимое число пусков и реверсов; значительный нагрев двигателя в динамических режимах.

В связи с этим в настоящее время большое внимание группы ученых под руководством В.С.Могильникова и А.М.Олейникова уделено созданию АД с массивными и двухслойными роторами, которые, по сравнению с АДКР, имеют более простую конструкцию, меньшую кратность пускового тока при высокой кратности пускового момента, малые пусковое и тормозные потери.

К их недостаткам следует отнести низкие энергетические показатели при работе с номинальной нагрузкой в длительных режимах. Эти недостатки могут быть уменьшены не только путем модификации конструкции двигателя, но и за счет использования при их изготовлении новых материалов и новых технологий.

Указанные материалы должны иметь вполне определенные электромагнитные характеристики. В.С.Могильниковым сформулированы основные требования, предъявляемые к электромагнитным характеристикам материалов для массивных и двухслойных роторов АД малой и средней мощности, рассчитанных на продолжительный режим работы:

$\rho = (1,0 \dots 2,0) \cdot 10^{-7}$ Ом*м и $\mu_r = (20 \dots 50)$
при напряженности магнитного поля $H = (5 \dots 20) \cdot 10^3$ А/м.

Для двигателей, работающих в повторно-кратковременных и динамических режимах работы, значение удельного электрического сопротивления должно быть увеличено до

$$\rho = (2,0 \dots 6,0) \cdot 10^{-7} \text{ Ом*м.}$$

Над созданием такого материала работала группа ученых и в результате В.А.Михайлиди и А.Н.Стрельниковым был создан литой железо-медный сплав типа СМ с нужными характеристиками.

Недостатком этих сплавов является трудность получения стабильных электромагнитных характеристик, так как они определяются не только основным химическим составом сплава, но и легирующими присадками и составом стального лома, используемых в технологическом процессе литья. Кроме того эти сплавы склонны к ликвации, а технологический процесс отливок втулок роторов сопровождается большими отходами и требует их последующей механической обработки.

В этом плане значительные преимущества имеют композиционные материалы.

Цель работы. Создание магнитно-мягких материалов с заданными электромагнитными свойствами для роторов специальных электрических машин, способных работать в электроприводах со сложными динамическими режимами и в автономных энергетических установках.

Для достижения поставленной цели в работе были исследованы следующие основные вопросы:

1) теоретическое обоснование возможности создания магнитно-мягких композиционных материалов со структурой, обеспечивающей заданные электромагнитные свойства,

2) разработка материалов определенных составов и способов

их получения.

3) исследование закономерностей влияния технологических факторов на структуру, механические свойства и электромагнитные характеристики предложенных материалов; выбор оптимальных параметров их получения и на этой основе разработка экономичной технологии изготовления из них деталей роторов асинхронных двигателей.

4) проведение стендовых испытаний асинхронного двигателя с ротором, изготовленным из предложенного материала.

Научная новизна. На основании теоретических и экспериментальных исследований показана принципиальная возможность создания магнитно-мягких композиционных материалов с заданными свойствами. Установлены закономерности влияния технологических параметров на формирование структуры и свойств материалов. Определены оптимальные диапазоны основных параметров технологии получения материалов. Предложены математические модели, позволяющие рассчитывать величину удельного электрического сопротивления при варьировании технологическими факторами и составом материала.

Практическая ценность работы. Получены магнитно-мягкие материалы с требуемым комплексом свойств для роторов асинхронных двигателей малой и средней мощности, работающих в стационарных и динамических режимах. Отработана и доведена до промышленного внедрения технология изготовления втулок роторов АД. Выполнены лабораторные и стендовые испытания двигателя 2ДМШ112S2, в результате которых установлено, что характеристики двигателя, изготовленного из железо-медного магнитно-мягкого композиционного материала, не уступают двигателю с ротором из литого материала, но отличаются стабильностью характеристик. Сформулированы практические рекомендации по использованию же-

лево-алюминиево-медных композиционных материалов для поверхностных покрытий роторов с целью увеличения номинальной мощности двигателя с сохранением благоприятных пусковых свойств и изготовления втулок роторов АД, работающих в динамических режимах.

Работа выполнялась в соответствии с планом научно-исследовательских работ Севастопольского Военно-Морского института.

Апробация. Основные положения диссертации обсуждены на научно-технических семинарах и конференциях: Республиканских научно-технических конференциях "Проблемы и опыт использования методов и средств при малоотходной и безотходной технологии" (г.Севастополь, 1985), "Создание и внедрение САПР технологических процессов и оснастки" (г.Севастополь, 1986), Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы прочности композиционных материалов" (г.Севастополь, 1988), Международной научно-технической конференции "Механика и новая технология" (г.Севастополь, 1995).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав и общих выводов, списка использованных источников из 105 наименований и приложения на 24 страницах, содержит 31 рисунок, 32 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Материалы и методика их исследований. Исследования выполнены на магнитно-мягких материалах, в основу которых положена железо-медная композиция. Это объясняется в первую очередь тем, что железо отличается довольно высоким удельным электрическим сопротивлением ρ и высокой относительной магнитной про-

ницаемостью μ_r , а медь - низким удельным электрическим сопротивлением и приемлемой относительной магнитной проницаемостью. Поэтому для получения заданного сочетания электромагнитных характеристик требуется определенный диапазон по содержанию меди в железо-медной шихте. Для получения материала с повышенным ρ при сохранении оптимального μ_r для двигателей, работающих в динамических режимах, предложена железо-алюминиево-медная композиция, т.к. получить необходимую магнитную проницаемость при повышенном ρ , которое получается изменением содержания меди в шихте, не представляется возможным.

Одним из требований к технологическому процессу при разработке материалов являлось возможность использования самого простого и доступного метода их получения. Установлено, что композиции на основе железа вполне допустимо получать методом холодного прессования и последующего спекания. Свойства, в том числе и электромагнитные зависят не только от химического состава материалов, но и от технологических параметров процессов их получения, формирующих структуру и пористость. Как известно, пористость порошковых материалов оказывает активное влияние на их электромагнитные свойства, в частности она увеличивает удельное электрическое сопротивление и снижает относительную магнитную проницаемость.

Основными технологическими факторами, определяющими электромагнитные характеристики являются давление прессования, температура, время выдержки и атмосфера спекания.

Относительная плотность прессовки находится в прямо пропорциональной зависимости от давления прессования. Для обеспечения прочностных и электромагнитных свойств плотность прессовок должна быть приближена к плотности компактного материала и для прессовок на основе железа и меди должна быть не выше

10...12%.

Кроме того относительная плотность прессовки прямо пропорционально зависит как от давления прессования так и от объемного веса частиц порошка и их формы, температуры и времени выдержки при спекании. Чем выше давление прессования тем выше плотность прессовки и материал по плотности ближе к компактному. Однако абсолютная величина давления прессования для получения максимальной плотности для каждого материала своя и зависит от формы, размера частиц порошка, его насыпной плотности и прессуемости. Анализ процесса уплотнения при прессовании порошковых материалов говорит о том, что лучшие результаты достигаются при средних давлениях прессования, не превышающих сопротивление сжатию (бсж) пластичного порошка; применении активных смазок, тщательной подготовке стенок прессформы и др.

Анализ влияния содержания меди на эксплуатационные свойства порошковых материалов показал, что процентное содержание меди в шихте следует рассматривать как фактор, влияющий на уровень электромагнитных характеристик железо-медных композиций. Показано также, что для улучшения электрических свойств следует стремиться к пористости материала менее 10%, для чего предлагается проводить двухкратное прессование.

Для прессования железо-медных материалов, установлено минимальное удельное давление прессования Руд. - 0,4 ГПа. Для получения пористости равной приблизительно 10% его следует увеличить до 0,8...0,9 ГПа. Полученный в результате прессования брикет не обладает заданными механическими и физико-химическими свойствами и подлежит спеканию. Спекание может быть твердофазным и жидкофазным.

Железо-медные композиции относятся к системам, обладающим ограниченной растворимостью. При содержании меди около 20%,

что гораздо выше её предельной растворимости в железе, верхний предел температуры спекания не должен приводить к расплавлению и как следствие к вытеканию меди, а её нижний предел ограничивается качеством спеченной прессовки. Исходя из этого, предварительный интервал температуры спекания Fe-Cu композиций должен составлять 1000...1050⁰С.

Поскольку структура и пористость являются важными факторами, определяющими уровень механических и электромагнитных характеристик материала, и в то же время зависят от процессов, протекающих во времени при высоких температурах, подлежит исследованию влияние времени выдержки при спекании на электромагнитные свойства железо-медных композиций.

Fe-Al-Cu магнитно-мягкие композиционные материалы спекались с использованием жидкой фазы, в качестве которой использовался доэвтектический сплав алюминия с медью, состоящий из α -твердого раствора Cu в Al и эвтектики при соотношении компонентов 1:2 и температуре плавления 548⁰С. Поскольку, образующиеся в результате диффузии при спекании интерметаллидные соединения типа Fe₃Al; CuAl₂ повышают электросопротивление, желательно ограничить количество алюминия и меди до уровня, обеспечивающего прочность заготовки после спекания, и время выдержки при спекании.

При спекании железо-алюминиево-медных композиционных материалов основные проблемы связаны с наличием на поверхности алюминиевого порошка оксидной плёнки (Al₂O₃), являющейся серьёзным препятствием контактообразованию частиц. Разрушение оксидной плёнки возможно, если использовать различные добавки, например, галогенидов типа CuCl₂, ZnCl₂ или флюсующих соединений типа NH₄ C, NaF. Однако необходимо рассмотреть их влияние на электромагнитные характеристики Fe-Al-Cu композиций.

К магнитно-мягким материалам, предназначенным для изготовления втулок массивных и двухслойных роторов АД не предъявляется специальных требований по прочности и твердости. Однако в процессе работы асинхронных двигателей втулки роторов испытывают определенные нагрузки, поэтому параллельно с электромагнитными свойствами проверялась и твердость материалов.

Все характеристики материалов проверялись на готовых образцах после их спекания.

Измерение твердости производилось на кольцевых образцах по методу Роквелла, использовалась шкала В, прочность определялась расчетным путем, исходя из показаний твердости, по эмпирической формуле $6-0,34 \cdot HB$.

На таких же образцах измерялось удельное электрическое сопротивление прессовок. Измерения ρ на кольцевых образцах проводились с использованием известной методики - двойным мостом.

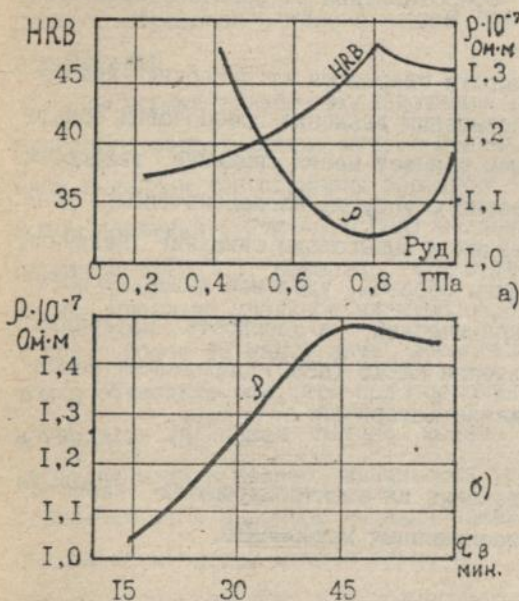
Относительная магнитная проницаемость определялась по статической кривой намагничивания. Для получения кривых намагничивания необходимо измерение магнитных потоков. Измерение магнитных потоков осуществлялось баллистическим методом. По полученным значениям индукции магнитного поля и соответствующим им значениям напряженности построены статические кривые намагничивания $B=f(H)$, а величина μ_r рассчитывалась как отношение величины индукции к напряженности магнитного поля $\mu_r = B / (H \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7})$.

Статистическая обработка результатов исследований проводилась по оригинальной программе, написанной на языке Basic, на ПЭМ ЕС-1845.

Разработка технологии получения магнитно-мягких железо-медных материалов.

Влияние параметров прессования на механические, магнитные и электрические свойства Fe-Cu композиций.

Исследования влияния удельного давления прессования, температуры и времени выдержки при спекании на твердость, удельное электросопротивление и магнитные свойства проводились на кольцевых образцах, изготовленных из железного порошка И2М2 (ГОСТ 9849-74) и медного порошок ПМ-2 (ГОСТ 4960-75) состава



75% Fe и 25% Cu. Для получения однородной шихты применено механическое перемешивание в течение 4 часов при вращении смесителя с частотой вращения 150...200 об/мин с добавлением 1% олеиновой кислоты. Кольцевые образцы прессовались при различных давлениях от $P=0.4$ ГПа до $P=0.9$ ГПа с выдержкой времени в течении 1 минуты.

Рис.1. Зависимость твердости HRB и удельного электрического сопротивления ρ от удельного давления прессования Руд. (а) и времени выдержки при спекании $\tau_{в}$ (б) Fe-Cu композиционных материалов.

Спрессованные образцы подвергались спеканию в защитной среде (порошок окиси алюминия) при температуре 1050°C с выдержкой времени при

спекании - 30 минут. Результаты испытаний на твердость полученных образцов показали, что с увеличением давления прессования при прочих одинаковых условиях, твердость, а следовательно и прочность, прессовок растёт ^{и в} среднем составила $6-267...297$ МПа, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к прочностным характеристикам втулок роторов АД, поэтому специальных исследований по прочности железо-медных материалов не проводилось. На этих же кольцевых образцах исследовалась зависимость удельного электрического сопротивления от давления прессования.

По результатам зависимости твердости от давления прессования выявлено, что при повышении давления прессования больше 0,8 ГПа наряду с увеличением ρ имеет место снижение твердости прессовок (Рис.1а) Это связано с упругим последствием, возникающим при высоких давлениях и вызывающим снижение величины остаточной поверхности. Таким образом, удельное давление прессования 0,8 ГПа является критическим, а твердость материала, полученная при этом давлении HRB46 (HB80) определяет максимальное критическое напряжение материала.

Влияние параметров спекания на электромагнитные характеристики железо-медных композиционных материалов.

При исследовании влияния температуры спекания на удельное электрическое сопротивление железо-медных композиций прессование производилось при удельном давлении Руд.=0.6 ГПа, а спекание - при различных температурах: 1040°C и 1100°C (вблизи температуры плавления меди).

Температура 1050°C соответствует пластическому состоянию меди ($t_{пл} - 1083^\circ\text{C}$), температура 1100°C - ее расплавленному

состоянию.

Установлено, что повышение температуры спекания приводит к снижению ρ , однако увеличение температуры выше 1100°C нецелесообразно, так как это приводит к расплавлению меди, вытеканию ее из прессформы и выгоранию (подтверждено экспериментально). Учитывая погрешность термопар, следует остановиться на температуре спекания не превышающей 1050°C .

Обращает внимание и то, что ρ меняется при изменении времени выдержки при спекании. Это может быть объяснено тем, что процесс образования железо-медных брикетов при спекании связан с диффузией.

Экспериментальное исследование изменения удельного электрического сопротивления железо-медных прессовок в функции времени выдержки при спекании образцов, спрессованных при одинаковом давлении ($\text{Руд.} - 0,6 \text{ ГПа}$) и спеченных при одинаковой температуре (1050°C), показало, что с увеличением времени выдержки при спекании удельное электросопротивление растёт, а затем (при τ более 45 мин.) даже несколько падает (Рис.16). Это можно объяснить тем, что при спекании прессовок из разнородных материалов (в нашем случае железа и меди) за счет активной диффузии меди в железо начинается рост пористости, который сопровождается разрывом металлических контактов, межчастичным скольжением частиц относительно друг друга и т.д., что приводит к росту удельного электрического сопротивления в начальный период спекания. Кроме того в процессе спекания за счет диффузии меди в железо образуется неупорядоченный твердый раствор замещения меди в железе при этом атомы меди, нарушая периодичность кристаллической решетки, сами действуют как новые центры рассеяния для электронов проводимости, что приводит к повышению электросопротивления. При увеличении времени выдержки при

спекании более 45 минут у Fe-Cu порошкового материала происходит естественное для уплотнения снижение удельного электросопротивления.

Результаты исследований по влиянию содержания меди на электромагнитные характеристики железо-медных композиционных материалов спрессованных при Руд.-0,6 ГПа, спеченных при $t_{\text{сп.}}=1050^{\circ}\text{C}$ и $\tau_{\text{в}}=30$ минут показали, что для обеспечения оптимальных значений удельного электрического сопротивления и относительной магнитной проницаемости материалов, предназначенных для изготовления втулок роторов АД, работающих в стационарных режимах, химический состав композиций должен быть Fe - 70...80%; Cu - 20...30%.

Для построения кривых намагничивания материалов, полученных при различных технологических параметрах прессования и спекания исследовалась зависимость $B-f(H)$ железо-медных композиций. По результатам зависимости ρ и μ_r от технологических параметров выявлено, что оптимальные электромагнитные характеристики $\rho=(1,23...1,6)\cdot 10^{-7}$ Ом*м и $\mu_r=36...40$ при $H=20000$ А/м имеют указанные композиции, спрессованные при Руд.-0,6...0,8 ГПа и спеченные в среде Al_2O_3 при температуре 1050°C в течение 45...60 минут и имеющие структуру α -твердого раствора Cu в γ -железе предельного насыщения и включения меди.

Некоторые сравнительные экспериментальные данные железо-медных магнитно-мягких материалов приведены в таблице 1.

Выведено эмпирическое уравнение, позволяющее рассчитывать удельное электрическое сопротивление предлагаемых магнитно-мягких железо-медных материалов, в зависимости от параметров технологического процесса их получения и химического состава, которое имеет следующий вид:

$$\rho = (1,661 + 0,404 \cdot P + 1,84 \cdot 10^{-2} \cdot \tau - 3,4 \cdot 10^{-2} \cdot Cu - 1,247 \cdot 10^{-2} \cdot P \cdot \tau - 0,477 \cdot P^2 + 6,392 \cdot 10^{-5} \cdot \tau^2) \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{мм}$$

Таблица 1

Электромагнитные и механические характеристики железо-медных композиционных материалов.

NN п/п	Состав		Марка желез. порошка	Руд ГПа	t, °C	τ_B , мин	Твер- дость HRB	$\rho \cdot 10^{-7}$ Ом·м	B, Тл	H·10 ³ А/м
	Fe%	Cu%								
1	75	25	ПЖЭ	0,6	1050	30	41	1,25	--	--
2	75	25	ПЖЭ	0,6	1050	45	--	1,40	0,940	20,3
3	75	25	ПЖЭ	0,6	1050	60	--	1,36	1,255	41,6
4	75	25	ПЖЭ	0,6	1100	30	--	1,04	1,060	45,0
5	75	25	ПЖЭ	0,6	1100	60	--	1,40	1,060	39,4
6	75	25	ПЖЭ	0,7	1050	30	--	1,165	--	--
7	75	25	ПЖЭ	0,8	1050	30	46	1,10	--	--
8	75	25	ПЖЭ	0,9	1050	30	43	1,38	--	--
9	70	30	ПЖЭ	0,6	1050	30	44	1,11	1,280	58,0
10	80	20	ПЖЭ	0,6	1050	30	44	1,11	1,260	61,0
11	75	25	ПЖМ	0,6	1050	60	--	1,46	1,056	31,5
12	75	25	ПЖ5ВМ3	0,6	1050	60	--	1,56	1,080	31,5
13	75	25	2013	0,6	1050	60	--	1,69	1,120	31,5

Разработка технологии получения железо-алюминиево-медных композиционных материалов для изготовления втулок роторов АД с улучшенными пусковыми характеристиками.

Влияние алюминия и меди на магнитные и электрические

Свойства железо-алюминиево-медных композиционных материалов.

Исследования влияния некоторых добавок (NH_4Cl , NaF , NaCl , CuCl_2), разрушающих оксидную пленку на поверхности алюминиевых частиц, на удельное электрическое сопротивление железо-алюминиево-медных прессовок проверялось на составе Fe - 97%; Al - 2%; Cu - 1%. Для изготовления образцов использовались: железный порошок марки ПЖМ ГОСТ 9849-74, изготовленный СКБ института органической химии АН СССР, алюминиевая пудра, порошок медный МП ГОСТ 4960-75.

Прессовки прессовались при Руд.-0,7 ГПа и спекались при температуре на 30...50°C выше температуры плавления эвтектики, то есть 600°C, время выдержки при спекании - 3 часа. Расчет веса составляющих шихты во всех случаях производился исходя из необходимости получения образцов с пористостью не более 10%, что должно обеспечить требуемую высокую плотность прессовок, например $\gamma = 6.3... 6.5 \text{ г/см}^3$.

Анализ результатов показал, что добавка NaCl создает наименьшее ρ , но повышает склонность спеченного брикета к коррозии.

Прессование и спекание следующей группы образцов выполнялось с целью определения содержания Cu и Al, образующих жидкую фазу в прессовке, в количестве необходимом для получения прочной прессовки и минимальной величины удельного электросопротивления. В результате исследования влияния алюминия и меди на электрические и магнитные свойства железо-алюминиево-медных композиционных материалов установлено, что в среднем $\rho = 2,725 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ имеют прессовки состава: 98,5%Fe; 1%Al; 0,5%Cu, и при этом обеспечиваются требования, предъявляемые к μ_r материала ротора АД. Установлено также, что с повышением в составе материала содержания алюминия до 4% и меди до 2% моно-

тонно растет его удельное электрическое сопротивление материала в среднем до $\rho = 9,84 \times 10^{-7}$ Ом*м (Рис.2).

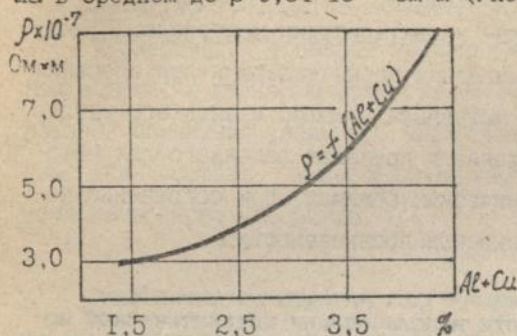


Рис.2. Зависимость удельного электрического сопротивления ρ от состава Fe-Al-Cu композиционных материалов.

На этих же кольцевых образцах определялась зависимость $B=f(H)$ и построены кривые намагничивания, которые показали, что магнитные характеристики железо-алюминиево-медных композиций соответствуют заданным.

Влияние диффузионных процессов, возникающих при спекании, на удельное электрическое сопротивление железо-алюминиево-медных композиций.

Благодаря активной диффузии компонентов, возникающих при спекании железо-алюминиево-медных композиций, на их структуру образуются прослойки интерметаллидов увеличивающие, согласно зависимостям Курнакова, твердость и удельное электрическое сопротивление всей прессовки. Толщина этих прослоек растет с увеличением времени выдержки при спекании от 15 минут до 2-х часов, что приводит к росту удельного электрического сопротивления материала в среднем от $3,9 \times 10^{-7}$ Ом*м до $9,8 \times 10^{-7}$ Ом*м у образцов состава Fe - 95,5%; Al - 3%; Cu - 1,5%, спрессованных при Руд.=0,7 ГПа и спеченных при температуре 580...600°C. В исследуемых материалах этот процесс можно связать только с об-

разованием Fe-Al и Cu-Al интерметаллидов, при этом чем больше время выдержки, тем активнее процесс их образования и соответственно выше электрические характеристики материала. Таким образом, установлено, что изменяя время выдержки при спекании от 30 до 90 минут и состав материала, можно менять его удельное электрическое сопротивление в пределах заданного для роторов АД, работающих в динамических режимах, при сохранении необходимой относительной магнитной проницаемости.

Рассмотрение возможности использования математической модели для расчета электрической проводимости многофазных композиционных материалов.

При рассмотрении возможности использования математической модели для расчета электрической проводимости многофазных композиционных материалов установлено, что использовать уравнение, применяемое в практике расчета проводимостей статистических систем не представляется возможным, так как определение объемного содержания фаз матрицы затруднительно, кроме того отношение проводимостей фаз, образующихся при спекании железо-алюминиево-медных прессовок, равно приблизительно 8 при допустимом для расчета отношении проводимостей 0,5...1,75. Это связано в первую очередь с тем, что образующиеся интерметаллиды имеют высокое электросопротивление, например, у Fe_3Al $\rho = 8 \cdot 10^{-7}$ Ом*м, а, рассчитанное с помощью зависимостей Курнакова, удельное электрическое сопротивление $CuAl_2$ приблизительно составляет $16 \cdot 10^{-7}$ Ом*м. Поэтому для расчета удельного электрического сопротивления предлагается использовать полученную в результате обработки экспериментальных данных математическую модель $\rho = f(Cu, Al)$ в виде неполной квадратичной зависимости ви-

да:

$$\rho = (5,146 - 3,433 * Al - 1,937 * Cu + 3,964 * Al * Cu) * 10^{-7} \text{ Ом*мм}$$

Исследования показали правильность выбранной математической модели, а также возможность ее использования для прогнозирования изменения удельного электрического сопротивления при изменении состава железо-алюминиево-медного магнитно-мягкого композиционного материала.

Разработка технологии изготовления элементов роторов АД из композиционного магнитно-мягкого материала.

Приведена методика, по которой производился расчет насыпного веса составляющих шихты, размеров деталей прессформы, их прочностные расчеты, разработаны рабочие чертежи деталей прессформы, приведена технология изготовления втулок роторов, включающая последовательно все операции технологического цикла, начиная от подготовки порошков к прессованию и заканчивая допрессовкой после спекания спрессованных заготовок для получения пористости материала менее 10%. Показано, что на основе предлагаемой технологии отработана экономичная технология изготовления втулок двухслойных роторов целиком с массивным цилиндром. Для корабельных двигателей типа 2ДМШ112S2 изготовлены опытные образцы двухслойных роторов с применением описанной технологии из спрессованного композиционного материала состава 22,5%Cu остальное Fe с толщиной массивного цилиндра 12 мм. В результате лабораторных исследований и опытной эксплуатации установлено, что характеристики двигателей с роторами, изготовленными из композиционного материала не уступают двигателям с роторами из литого материала, но имеют более стабильные характеристики, являются более экономичными с точки зрения ис-

пользования исходных материалов, технологии изготовления и отсутствия необходимости в последующей механической обработке. Показано, что использование газопламенного напыления на поверхность ротора материала с высоким ρ позволяет повысить энергетические показатели двигателей. Для напыления втулок роторов АД, работающих в продолжительных режимах предлагается использовать железо-алюминиево-медную композицию с удельным электрическим сопротивлением $\rho = (2,2 \dots 9,7) \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Отмечено, что магнитная проницаемость таких композиций имеет более низкое значение по сравнению с материалом втулки ротора, что в конечном результате обеспечивает улучшение номинальных данных двигателя с сохранением благоприятных пусковых свойств. Показано изменение во времени пускового тока двигателя 2Д112МА4 с различными роторами, изготовленными из железо-алюминиево-медного композиционного материала, литого сплава СМ25 и короткозамкнутого ротора, при этом величина пускового тока двигателя с ротором, изготовленным из железо-алюминиево-медной композиции почти в два раза меньше, чем у двигателя с короткозамкнутым ротором и приблизительно на 30% ниже, чем у двигателя с ротором, изготовленным из литого сплава СМ25.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Теоретически обоснованы возможность создания и способ получения магнитно-мягких композиционных материалов с заданными электромагнитными свойствами.

2. Установлены закономерности влияния основных технологических параметров и химического состава материалов на формирование их структуры и свойств. Определены оптимальные диапазоны технологических параметров, создающие необходимую пористость (менее 10%), и обеспечивающие требуемые свойства, в следующих

пределах:

состав	Fe-Cu	Fe-Al-Cu
- удельное давление прессования	Руд.-0,6...0,8 ГПа;	Руд.-0,6...0,8 ГПа;
- температура спекания $t_{\text{сп.}}$	$-1040...1050^{\circ}\text{C}$;	$-580...600^{\circ}\text{C}$;
- время выдержки при спекании	$\tau_{\text{в}}=45...60$ мин.	$\tau_{\text{в}}=30...90$ мин.

3. Экспериментально определено влияние марки используемых порошков железа и меди на электромагнитные свойства композиций, сформулированы предложения по использованию марок порошков.

4. Предложены математические модели, позволяющие рассчитывать величину удельного электрического сопротивления при варьировании технологическими факторами и составом железо-медного и железо-алюминиево-медного магнитно-мягких композиционных материалов.

5. Для роторов АД малой и средней мощности, работающих в стационарных режимах, созданы композиционные железо-медные материалы состава: Fe- 70...80% и меди 20...30% с оптимальными электромагнитными характеристиками $\rho=(1,1...1,64)\cdot 10^{-7}$ Ом*м и $\mu_r=20...50$.

6. Для изготовления втулок роторов АД малой и средней мощности, работающих в динамических режимах и их газопламенного напыления с целью увеличения номинальной мощности двигателей с сохранением благоприятных пусковых свойств, рекомендуется полученный Fe-Al-Cu композиционный материал состава Cu-0,25...1,5%, Al- 1,0...3,0%, остальное Fe с удельным электрическим сопротивлением $\rho=(2,23...5,6)\cdot 10^{-7}$ Ом*м и $\mu_r=20...50$.

7. Созданные материалы имеют, по сравнению с литыми сплавами СМ аналогичного химического состава следующие преимущест-

ва:

- стабильные электромагнитные свойства;
- отсутствие ликвации;
- отсутствие потерь и затрат при механической обработке.

8. Лабораторные и стендовые испытания двигателя 2ДМП112S2 показали, что двигатели с ротором, изготовленным из композиционного материала не уступают двигателю с ротором из литого материала, но отличаются стабильностью характеристик, а процесс их изготовления является более экономичным с точки зрения использования исходных материалов, технологии изготовления втулок роторов и отсутствия необходимости их механической обработки.

9. Отработана технология изготовления втулок роторов 2ДМП112S2 и внедрена на НПО "МУССОН", что дало экономический эффект около 72 млн.крб. в ценах 1995 года.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Олейников А.М., Анисимова Э.Р. Направления совершенствования конструкции и технологии изготовления асинхронных двигателей с массивным ротором. //Брошюра, Киев, Общество "Знание", 1990г., 2...6с.

2. Анисимова Э.Р., Олейников А.М., Сердюк Г.Г. Порошковые материалы с заданными электрическими и магнитными свойствами для массивных и двухслойных роторов асинхронных двигателей. //Ж. Порошковая металлургия", №9, 1990г., 87...91с.

3. Анисимова Э.Р. Алгоритм обработки результатов пассивного эксперимента по отработке технологии получения порошковых материалов для АД. \ \ В сборнике статей Оптимизация рабочих параметров производственных конструкций: Севастополь, 1993г.,

с.7.

4. Анисимова Э.Р. Железо-алюминиево-медные порошковые электротехнические материалы. //В сборнике статей Оптимизация рабочих параметров производственных конструкций: Севастополь, 1993г., с.6.

5. Анисимова Э.Р. Электротехнические порошковые материалы, легированные алюминием. //В научно-техническом сборнике Оптимизация производственных процессов., Севастополь-Alliance-Francaise, 1994г., с.52...53.

6. Анисимова Э.Р., Олейников А.М., Сердюк Г.Г. Порошковые материалы с заданными электрическими и магнитными свойствами для массивных и двухслойных роторов асинхронных двигателей. // Деп. в ЦСИФ, 1989, Сб. реф. деп. рукописей, вып.10, сер.Б, N В 1320, 1989г.

7. Олейников А.М., Анисимова Э.Р., Бондарчук О.Л., Максимович Б.И., Рассошинский А.Р. Направления совершенствования технологии производства двухслойных роторов асинхронных двигателей. \\ Деп. в ЦСИФ, 1989, Сб.реф.деп. рукописей, вып.11, сер.Б, N В 1465, 1989г.

8. Анисимова Э.Р., к.т.н. Олейников А.М. Опыт проектирования технологии изготовления двухслойных роторов асинхронных двигателей. //Создание и внедрение САПР технологических процессов и оснастки: Тезисы докл. Респуб. НТ конф. Севастополь, 1986г., с.25...26.

9. Анисимова Э.Р. Опыт использования новых технологий получения электротехнических материалов для корабельных асинхронных двигателей (АД). \\Механика и новые технологии: Сообщение на Междунар. НТ конф., Севастополь, 1995г.

Личный вклад. Проведены исследования влияния технологических факторов, состава, марок используемых порошков на электромагнитные свойства железо-медного и железо-алюминиево-медного композиционных материалов. В результате обработки экспериментальных данных получены математические зависимости, позволяющие рассчитывать величину удельного электрического сопротивления материалов при варьировании технологическими факторами и составом материалов. Отработана технология получения магнитно-мягких материалов с заданными электромагнитными свойствами.

АНОТАЦІЯ

Анисимова Э.Р. Розробка магніто-м'яких матеріалів із заданими властивостями для спеціальних електричних машин.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.02.01 – матеріалознавство в машинобудуванні. Харківський державний автомобільно-дорожній технічний університет. Харків, 1996 р.

В дисертаційній роботі досліджено: можливість отримання композиційних матеріалів з заданими електричними і магнітними властивостями, а також вміщує результати експериментальних досліджень. Установлено, що отриманий залізо-мідний магніто-м'який матеріал може використовуватися для виготовлення втулок масивних та двухшарових роторів асинхронних двигунів, працюючих в статичних умовах, а залізо-алюмінієвомідний – для наплення втулок роторів АД з ціллю збільшення номінальної потужності двигунів і виготовлення втулок двухшарових роторів АД, працюючих в динамічних режимах.

Ключові слова: композиційний матеріал, електротехнічні властивості, ротор.

ABSTRACT

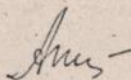
Anisimova E.R. Creation of magnet-soft materials with pre-set characteristics for special electric machines.

The thesis for "Master of Technical Sciences" academic degree on speciality 05.02.01 (Machine building materials). Kharkov State Motors and Highway Technical University, Kharkov, 1996.

The dissertation includes theoretical researches of manufacturing possibility of the composition materials with intended electrical and magnetic characteristics and results of experimental researches as well. It has been stated that iron-copper magnet-soft materials can be used for manufacturing massive and double-layer rotor liners for asynchronous motor rotors that work under static conditions. Iron - aluminum - copper materials can be used for covering AM rotor liners to increase motor rated power, and to manufacture double-layer AM rotor liners that work under dynamic conditions.

Key words: composition material, electrical characteristics, rotor.

Соискатель



Э.Р. Анисимова

Ответственный за выпуск Приходченко В.А.

Підписано до друку 26.02.96., формат 60x84 1/16,
папір для розмножувальних апаратів, друк офсетний,
ротаринт ВД ХОУС, зам. N1184, тираж 100 прим.
м.Харків-310002, вул. Маршала Бажанова, 28
дск-40/38

AB 34.372