

На правах рукописи

БОЙКО АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**Влияние ориентации включений графита на контактные свойства
порошковых материалов серебро–графит,
получаемых методом экструзии**

Специальность 05.16.06 – Порошковая металлургия и
композиционные материалы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2006

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Московский государственный институт стали и сплавов (технологический университет)» и ЗАО «НПО Благовест», Московская обл., г. Истра.

Научный руководитель

доктор технических наук,
профессор

Блинков
Игорь Викторович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
старш. науч. сотр.

Шиков
Александр Константинович

кандидат технических наук
доцент

Лопатин
Владимир Юрьевич

Ведущая организация

ФГОУПО «Чувашский государственный
университет им. И. М. Ульянова,
Чувашия, г. Чебоксары

Защита состоится «25» октября 2006 г. в часов в аудитории Б-436 на заседании диссертационного совета Д212.132.05 при ГОУ ВПО «Московский государственный институт стали и сплавов» (технологический университет) по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета).

Автореферат разослан « »

2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Лобова Т.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Порошковые контактные материалы серебро–графит, содержащие до 5 масс.% графита, широко применяются в низковольтной коммутационной аппаратуре (НВА) в качестве неподвижных контактов автоматических выключателей. Электрические контакты из этих материалов, изготавливаемые традиционным для порошковой металлургии методом прессования–спекания, имеют низкое и стабильное контактное сопротивление, высокую стойкость к свариванию, необходимую для отключения токов короткого замыкания и токов перегрузки в аварийных ситуациях при эксплуатации электрических сетей. Недостатком контактов является низкая эрозионная стойкость, что приводит к уменьшению надежности автоматических выключателей и перерасходу серебра. Основными причинами низкой эрозионной стойкости являются недостаточно высокие плотность и механическая прочность материалов серебро–графит, получаемых методом прессования–спекания.

Применение при изготовлении контактов метода экструзии позволяет повысить плотность и механическую прочность материалов серебро–графит. Плотность контактов, вырезанных из полуфабрикатов, полученных экструзией, близка к теоретической, твердость и электропроводность выше, чем у контактов, полученных методом прессования–спекания. Контакты имеют анизотропную структуру за счет того, что включения графита располагаются в материале по направлению оси экструзии. В зависимости от способа резки полуфабрикатов на контакты можно получить определенную ориентацию включений графита по отношению к рабочей поверхности контакта, которая, как известно из литературы, может влиять на контактные свойства материалов.

Тем не менее, метод экструзии не нашел пока широкого распространения при изготовлении контактов серебро–графит для НВА. До последнего времени контакты из этих материалов практически не применялись и лишь в небольших количествах производились в России. Причиной является отсутствие обоснованных, подтвержденных экспериментальными данными рекомендаций

по разработке материалов серебро–графит с прогнозируемым и регулируемым уровнем контактных свойств, что обусловлено недостаточной изученностью структурообразования этих материалов, взаимосвязи параметров процесса изготовления контактов, их структуры и свойств. Остаются невыясненными причины влияния ориентации включений графита на контактные свойства. В связи с этим изучение контактных материалов серебро–графит, получаемых методом экструзии, и создание из них электрических контактов с регулируемым уровнем контактных свойств, является **актуальной научно-технической проблемой**.

Цель работы заключалась в разработке новых технологических решений получения порошковых контактных материалов серебро–графит с повышенным уровнем контактных свойств, достигаемым методом экструзии. Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

- выявлены закономерности структурообразования порошковых контактных материалов серебро–графит в процессе экструзии;
- определены причины влияния анизотропии структуры на контактные свойства изученных материалов;
- изучено влияние ряда технологических параметров процесса экструзии на структуру и свойства контактных материалов серебро–графит, установлены закономерности и определены причины подобного влияния;
- найдены технологические решения, обеспечивающие получение порошковых контактных материалов серебро–графит, имеющих повышенный уровень эксплуатационных свойств.

Научная новизна работы:

1. Установлены закономерности изменения структуры материалов серебро–графит, получаемых экструзией, выражающиеся в формировании «строчечного» расположения включений графита, а также их дроблении при увеличении коэффициента вытяжки, способствующем формированию мелкодисперсной структуры;

2. Впервые проведена оценка теплопроводности материалов серебро–графит, полученных экструзией, результаты которой позволили дать объяснение влиянию преимущественной ориентации включений графита по отношению к рабочей поверхности контакта на эрозионную стойкость существенной разницей в значениях теплопроводности материалов с различной ориентацией включений;

3. Выявлена взаимосвязь изменений структуры и контактных свойств материалов серебро-графит, заключающаяся в том, что увеличение коэффициента вытяжки, так же как и снижение размера порошка серебра приводят к формированию мелкодисперсной структуры, обуславливающей повышение контактных свойств материала.

Практическая значимость работы.

1. Разработана оригинальная методика проведения стендовых испытаний электрических коммутирующих контактов, позволяющая оценивать эрозионную стойкость и стойкость к свариванию контактных материалов, которая успешно применяется для контроля качества продукции, выпускаемой ЗАО «Благовест-Истра»;

2. На предприятии порошковой металлургии ЗАО "Благовест-Истра" освоено серийное производство контактных материалов серебро-графит методом экструзии. Поставки контактов осуществляются предприятиям России, Чехии и Болгарии. Внедрение контактов, полученных экструзией, позволило российским производителям низковольтной аппаратуры существенно повысить надежность аппаратов и освоить отсутствовавшие ранее в производственной программе этих предприятий автоматические выключатели на высокие токи (ОАО «Электроаппарат» г. Курск; ОАО «Дивногорский завод низковольтных автоматов» г. Дивногорск). Контакты серебро-графит изготавливаются методом экструзии по техническим условиям ТУ 3498–006–73030523–06, разработанным на основе результатов, полученных в настоящей работе.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены на: международной конференции «Новые перспективные материалы

и технологии их получения (НПМ)–2004», г. Волгоград сентябрь 2004 г., 3-й международной конференции «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология», г. Москва, МГУ им. Ломоносова, 2004 г.; международной конференции «Электрические контакты и электроды. ЭК – 2005», Украина. Крым. Кацивели, октябрь 2005 г.

Публикации. Содержание диссертации отражено в 7 работах в виде статей и тезисов докладов конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, выводов, списка литературы из 108 наименований и 5 приложений. Общий объем работы составляет 155 страниц машинописного текста, включая 21 рисунок, 10 таблиц и 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложено состояние проблемы исследования порошковых контактных материалов серебро–графит на момент написания диссертации, показана актуальность выбранной темы, сформулирована цель работы.

В **первой главе** представлен аналитический обзор литературы посвященной исследованию контактных материалов, получаемых методом экструзии. Проанализированы результаты немногочисленных работ, посвященных исследованию материалов серебро–графит с анизотропной структурой. Отмечено, что сведения о структуре материалов, изготовленных методом экструзии, сводятся к констатации наличия анизотропии, отсутствуют исследования изменений количественных параметров структуры от величины коэффициента вытяжки – важного структурообразующего фактора.

Несмотря на установленный факт взаимосвязи анизотропии структуры и контактных свойств материалов серебро–графит, существует неопределенность в оценке подобного влияния. Это объясняется ограниченным количеством экспериментальных данных о контактных свойствах таких материалов, а также сложностями сопоставления этих данных ввиду того, что испытания

проводились в различных условиях. Остается невыясненной природа влияния анизотропии структуры материалов серебро–графит на контактные свойства.

Показано, что практически не исследована структура слоев наработки, образующихся на поверхности контактов под действием дугового разряда, и характер их влияния на контактные свойства.

Итогом литературного обзора явилось формулирование задач, требующих решения для достижения намеченной цели данной работы.

Во **второй главе** описаны объект и методики исследования; представлена схема процесса изготовления материалов серебро–графит методом экструзии.

Контактные материалы были изготовлены следующим образом. Полученную после смешивания порошков серебра и графита смесь, прессовали при давлении 180–200 МПа. Полученные заготовки спекали в нейтральной атмосфере при температуре $870 \pm 10^\circ\text{C}$. Перед экструзией заготовки нагревали до температуры 750–800 $^\circ\text{C}$ и проводили процесс при давлении 500–800 МПа при различных значениях коэффициента вытяжки. После экструзии осуществляли резку полученных прутков под определенным углом к оси прутка, добиваясь тем самым необходимой ориентации включений графита в структуре контакта.

Объектом исследования являлись материалы, полученные в диапазоне значений коэффициента вытяжки от 400 до 3700 %, с использованием исходного порошка серебра трех различных средних размеров (20 мкм, 10 мкм, 3 мкм), содержанием графита от 2 до 5 масс.%, имеющих ориентацию включений графита перпендикулярно, параллельно и под углом 45 $^\circ$ к рабочей поверхности контакта.

Исследование структуры полученных материалов серебро–графит, а также изучение слоев наработки проводили на металлографических шлифах с помощью оптического микроскопа фирмы Opton (Австрия), сканирующего микроскопа MINI-SEM (Япония). Количественная оценка параметров структуры материалов, полученных при различных коэффициентах вытяжки из порошка различной дисперсности, проведена в программе Image Expert 2.35.

Твердость материалов определяли по шкале Виккерса с помощью твердомера ХПО–250. Плотность измеряли методом гидростатического взвешивания.

Исследование полученных контактных материалов серебро-графит на предмет выявления текстуры проведено с помощью рентгеноструктурного анализа, выполненного на дифрактометре ДРОН–1 с приставкой ГП–2.

В лаборатории ЦНИИграфит изучена теплопроводность материалов серебро–графит с различной ориентацией включений.

Для получения представительных результатов изучение контактных свойств проводили как на стенде с неподвижно установленными контактами, так и на стенде с подвижными контактами, имитирующем работу реального автоматического выключателя при коммутации электрических цепей.

Методика испытаний на стенде с неподвижными контактами регламентирована ГОСТ 25188–82. Испытания позволяли оценить эрозионную стойкость в условиях воздействия на материал контактов искусственно возбужденной дуги с заданными параметрами.

Специально разработанная в рамках настоящей работы методика ускоренных испытаний на стенде с подвижными контактами приближает условия стендовых испытаний к натурным испытаниям, поскольку, кроме воздействия электрической дуги, материал контактов на этом стенде подвергается механическому воздействию в результате соударения контактов. Наряду с оценкой эрозионной стойкости, по разработанной методике оценивалась и стойкость материала к свариванию.

Применение обеих методик, дополняющих друг друга, дало возможность получить в работе большое количество экспериментальных данных, позволяющих в сопоставимых условиях изучить влияние различных параметров структуры на контактные свойства.

В главе 3 дан анализ факторов, оказывающих влияние на уровень эрозионной стойкости контактного материала в процессе эксплуатации, и сделан вывод о том, что наиболее значимым фактором является величина

теплопроводности материала. В связи с этим оценка теплопроводности материалов серебро–графит выбрана определяющим критерием при выявлении причин влияния преимущественной ориентации включений графита по отношению к поверхности контакта на уровень эрозионной стойкости контактного материала.

Выполнен теоретический расчет теплопроводности на основе теории обобщенной проводимости. Расчет проведен посредством анализа температурного поля элементарной ячейки структуры. Для этого проводилось сечение ячейки плоскостями, параллельными направлению потока тепла. Затем с помощью формул для плоских стенок определялись тепловые сопротивления полученных частей и теплопроводность ячейки. После преобразований выражение для расчета коэффициентов теплопроводности материалов с ориентацией включений графита параллельно поверхности (λ_{\parallel}) имело вид (1), расчет теплопроводности материалов с ориентацией включений графита перпендикулярно рабочей поверхности (λ_{\perp}) проводили по формуле (2).

$$\lambda = \frac{\lambda_2}{\left[\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot m_1 + (1 - m_1) \right]}, \quad (1)$$

$$\lambda = \lambda_2 \cdot (1 - m_1) + \lambda_1 \cdot m_1, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности контактного материала,
 λ_1 – коэффициент теплопроводности серебра,
 λ_2 – коэффициент теплопроводности графита,
 m_1 – объемная доля серебра.

В таблице 1 представлены результаты расчета коэффициентов теплопроводности при температурах 400–960°C.

Таблица 1 – Результаты расчета коэффициентов теплопроводности материалов серебро–графит

Содерж. граф. масс. %	Коэффициент теплопроводности материала λ , Вт/(м · К)							
	λ_{\perp}	λ_{\parallel}	λ_{\perp}	λ_{\parallel}	λ_{\perp}	λ_{\parallel}	λ_{\perp}	λ_{\parallel}
	T= 400°C		600°C		900°C		960°C	
2	375,2	251,3	359,9	228,5	334,6	199,3	329,0	188,1
3	361,4	214,5	346,4	192,6	324,8	165,6	317,0	155,1
4	348,4	188,6	333,7	167,8	309,8	143,0	305,1	133,1
5	336,2	169,4	321,8	152,0	298,7	128,7	293,9	117,5

В изученном интервале температур теплопроводность материалов с ориентацией включений графита перпендикулярно рабочей поверхности имеет более высокие значения, чем теплопроводность материалов того же состава, но с ориентацией включений параллельно рабочей поверхности.

Результаты прямых измерений теплопроводности изученных материалов подтвердили, что контакты с ориентацией включений перпендикулярно поверхности имеют более высокую теплопроводность.

Установленный факт более высокого значения теплопроводности контактов с перпендикулярной ориентацией включений графита дает основание предполагать, что такие материалы имеют преимущество по эрозионной стойкости в сравнении с материалами с другой ориентацией включений.

В главе 4 представлены результаты исследования структуры и слоев наработки материалов серебро–графит, полученных экструзией и прессованием–спеканием; данные рентгеноструктурного анализа, результаты измерения твердости и плотности.

Структура материалов серебро–графит, полученных методом экструзии, характеризуется преимущественным расположением включений графита, ориентированных в направлении оси экструзии. Включения, имеющие продолговатую форму, представляют собой как единичные частицы чешуйчатой формы, так и агломераты частиц. При невысоких значениях

коэффициента вытяжки (300–500%) (рисунок 1) некоторые включения имеют отклонение от общего направления ориентации. Наблюдаются включения, имеющие более крупные, чем основная часть включений, размеры.

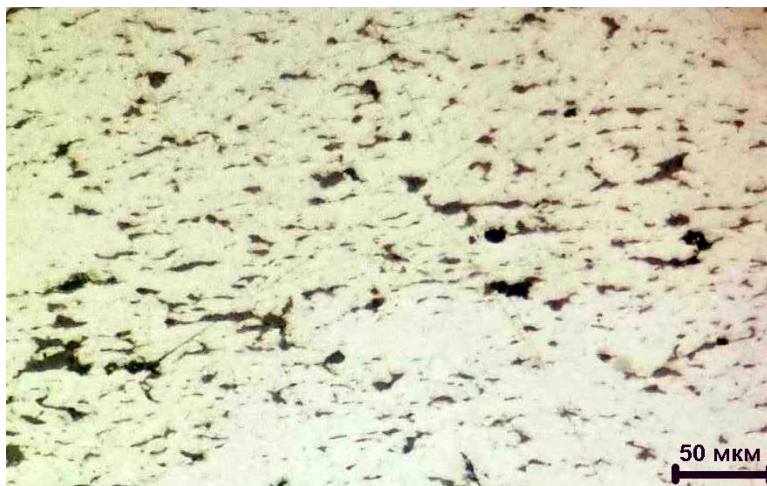


Рисунок 1. Структура материалов серебро–графит, полученных методом экструзии при коэффициенте вытяжки 400%.

С увеличением коэффициента вытяжки размеры включений графита уменьшаются (рисунок 2), число включений более крупного размера снижается. На отдельных участках частицы графита располагаются непосредственно друг за другом в подобие строчек, в связи с этим структура материалов серебро–графит, полученных методом экструзии, может быть охарактеризована как «строчечная».

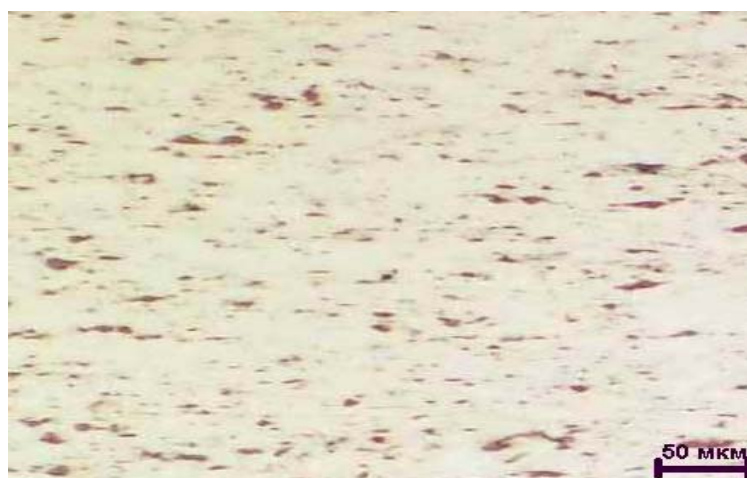


Рисунок 2. Структура материалов серебро–графит, полученных методом экструзии при коэффициенте вытяжки 3700%.

В таблице 2 представлены результаты анализа количественных параметров структуры материалов серебро–3 масс.% графита, полученных методом экструзии при различных коэффициентах вытяжки (размера порошка серебра 10 мкм), и материалов, полученных прессованием–спеканием.

Таблица 2 – Результаты анализа параметров структуры материалов серебро–графит

Метод получения материалов	Площадь включений графита, $S, 10^{-12} \text{ м}^2$	Периметр включений графита, $P, 10^{-6} \text{ м}$	Параметр формы включений, $\frac{P}{\sqrt{S}}$	Параметр вытянутости включений, $\frac{D_1}{D_2}$
Экструзия при $K=3700\%$	10,15	14,54	5,02	1,84
Экструзия при $K=2500\%$	12,77	16,13	5,17	1,90
Экструзия при $K=1400\%$	17,56	19,38	5,65	2,05
Экструзия при $K=400\%$	21,51	23,72	5,59	2,00
Прессование – спекание	26,55	25,04	5,34	1,82

Из таблицы 2 видно, что средние значения площади и периметра включений графита в материалах, полученных прессованием–спеканием, имеют большую величину, чем значения соответствующих параметров структуры материалов, полученных методом экструзии. С увеличением коэффициента вытяжки значения этих параметров уменьшаются, что свидетельствует об измельчении включений, т.е. материалы серебро–графит, полученные экструзией, имеют мелкодисперсную структуру, по сравнению с материалами, полученными прессованием–спеканием. Значения параметров формы и вытянутости включений графита для материалов, полученных экструзией, выше, чем для материалов, полученных прессованием–спеканием. Установлено, что с увеличением коэффициента вытяжки от 400 до 1400 % величины этих параметров повышаются. В месте с тем, показано, что в

интервале коэффициента вытяжки от 2500 до 3700 % наблюдается снижение значений этих параметров, что свидетельствует об уменьшении размеров включений, вызванным их дроблением в поперечном направлении. Подобное расположение частиц отчетливо видно на рисунке 2.

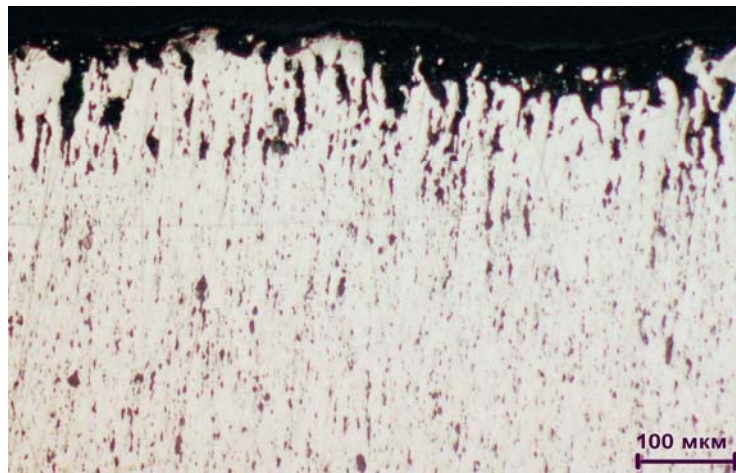
В таблице 3 приведены результаты анализа количественных параметров структуры материалов серебро–3 масс.% графита, изготовленных из порошка серебра различной дисперсности при коэффициенте вытяжки 2500%.

Таблица 3 – Результаты анализа параметров структуры контактных материалов серебро–графит

Контактные материалы серебро–графит	Площадь включений графита, S , 10^{-12} м^2	Периметр включений графита, P , 10^{-6} м	Параметр формы включений, $\frac{P}{\sqrt{S}}$	Параметр вытянутости включений, $\frac{D_1}{D_2}$
Материалы из порошка серебра среднего размера 20 мкм	14,25	18,34	5,20	1,92
Материалы из порошка серебра размера 10 мкм	12,77	16,13	5,17	1,90
Материалы из порошка серебра размера 3 мкм	9,67	14,35	4,89	1,85

Показано, что с уменьшением среднего размера используемого при изготовлении контактов порошка серебра с 20 до 3 мкм средние значения площади и периметра включений графита также снижаются, что свидетельствует о формировании мелкодисперсной структуры, которое происходит за счет уменьшения числа включений графита, представляющих собой агломераты частиц (в связи с перераспределением частиц) и, соответственно, увеличения доли единичных частиц графита в структуре.

Образующиеся в условиях коммутации контактов при их эксплуатации слои наработки оказывают влияние на контактные свойства материала. На рисунке 3 представлены типичные структуры слоев наработки, формирующихся на поверхности контактов серебро–графит.



а)



б)

Рисунок 3. Структура слоев наработки материалов серебро–графит, полученных методом экструзии. а) структура с ориентацией включений графита перпендикулярно рабочей поверхности; б) структура с ориентацией включений параллельно поверхности.

Особенности слоев наработки материалов серебро–графит заключаются в образовании протяженных пустот в местах сосредоточения включений графита. Это происходит благодаря «закреплению» электрической дуги на включениях графита – фазы контактного материала с меньшей теплопроводностью. Слои наработки изученных материалов серебро–графит имеют выраженные признаки наследственности структуры. Так, на поверхности контактов с ориентацией включений графита перпендикулярно рабочей поверхности формируются пустоты, имеющие вертикальное расположение (рисунок 3а). Слои наработки контактов с параллельной ориентацией включений графита слабо связаны с основным объемом материала, так как отделены от него пустотами,

образующимися в плоскости, параллельной рабочей поверхности (рисунок 3б). Такие слои наработки склонны к отслаиванию при коммутации.

Рентгеноструктурный анализ выявил в материалах серебро–графит, полученных экструзией, аксиальную текстуру серебра в направлении [100].

Наличие текстуры серебра, а также преимущественной ориентации включений графита позволяет предполагать анизотропию контактных свойств материалов серебро–графит, получаемых методом экструзии.

В главе 5 представлены результаты исследования эрозионной стойкости и стойкости к свариванию материалов серебро–графит, полученных методом экструзии. Проведено обсуждение полученных зависимостей.

Установленные зависимости эрозионной стойкости контактов с различной ориентацией включений графита относительно рабочей поверхности от коэффициента вытяжки представлены на рисунке 4. Подобный характер зависимости эрозионной стойкости сохраняется во всем исследованном диапазоне значений концентрации графита от 2 до 5 масс.%, для материалов изготовленных из порошков серебра различной дисперсности в исследованном диапазоне размера частиц серебра.

Характерными особенностями представленных зависимостей являются: монотонное повышение эрозионной стойкости материала с ростом величины коэффициента вытяжки; более высокий уровень эрозионной стойкости материалов с ориентацией включений графита перпендикулярно рабочей поверхности, чем материалов с ориентацией включений параллельно и под углом 45° к поверхности. Показано, что материалы серебро–графит, полученные экструзией, при любой ориентации включений графита имеют более высокий уровень эрозионной стойкости, чем материалы, полученные прессованием спеканием (для сравнения: значение удельной убыли массы материалов серебро–3 масс.% графита, полученных прессованием–спеканием, составило $90,4 \pm 2,4$ мкг/цикл).

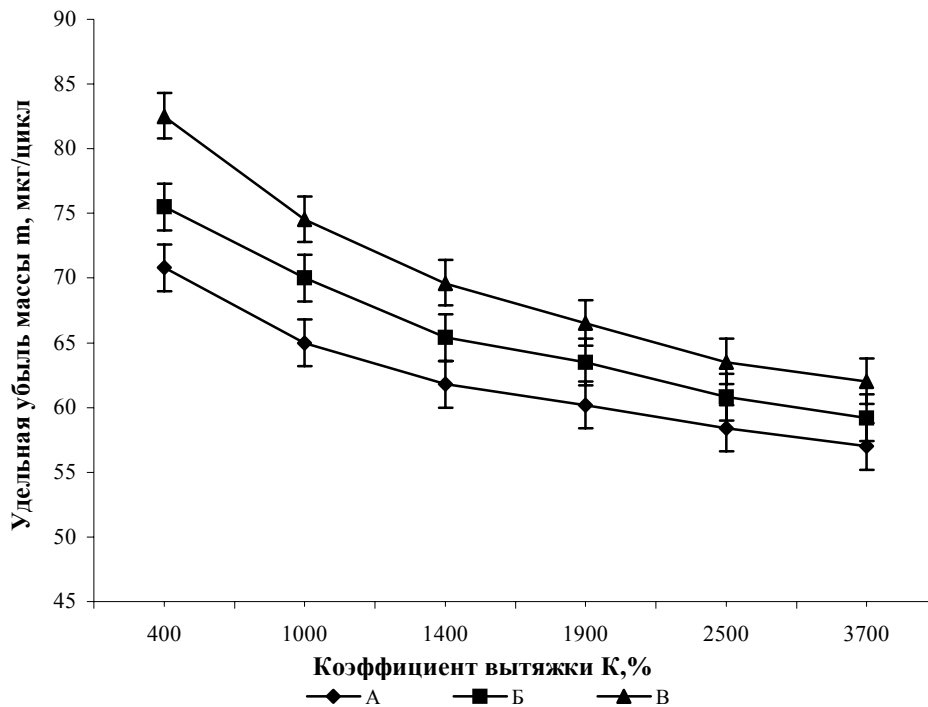
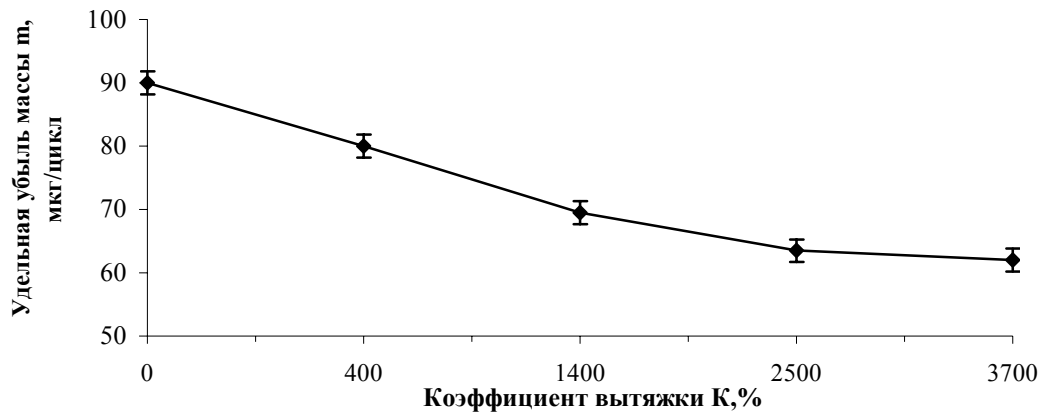


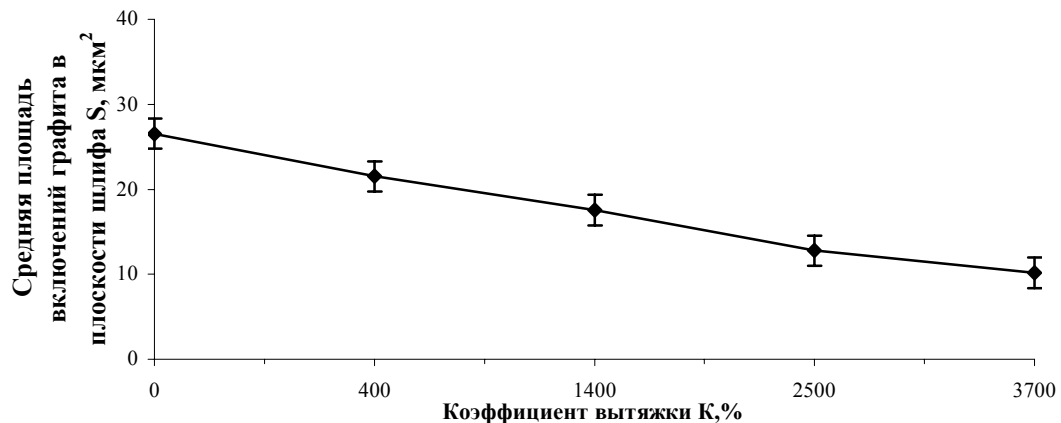
Рисунок 4. Влияние коэффициента вытяжки на эрозионную стойкость материалов серебро – 3 масс.% графита, изготовленных из порошка серебра среднего размера 10 мкм. А – ориентация включений графита перпендикулярно рабочей поверхности; Б – ориентация под углом 45°; В – ориентация включений параллельно рабочей поверхности.

Характер зависимостей представленных на рисунке 5 позволяет выявить причины установленного повышения эрозионной стойкости материалов серебро–графит с увеличением коэффициента вытяжки.

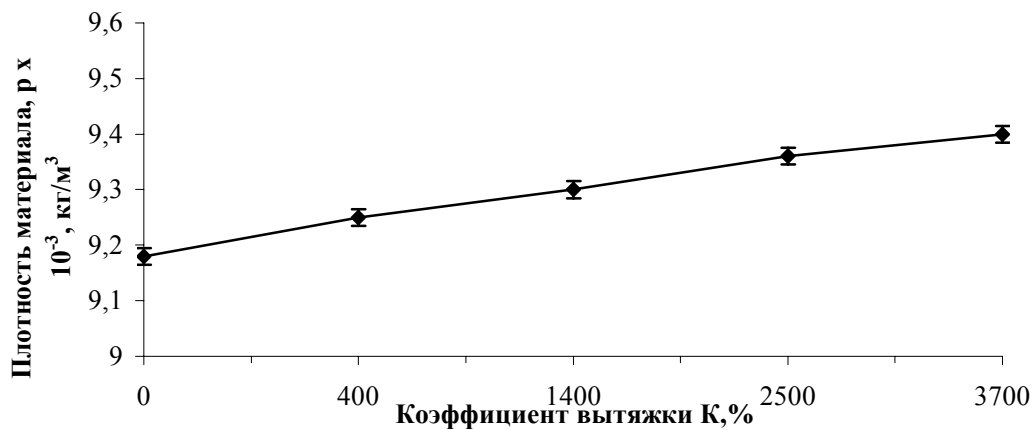
Показано, что возрастание эрозионной стойкости изученных материалов с увеличением коэффициента вытяжки (рисунок 5а) сопровождается уменьшением средней площади включений графита (рисунок 5б), а также повышением плотности (рисунок 5в). Как показано в главе 4, процесс эрозии контактных материалов серебро–графит связан, преимущественно, с выгоранием графита, поэтому формирование в структуре включений графита меньшего размера способствует снижению убыли массы материала при коммутации и, соответственно, возрастанию эрозионной стойкости. Другой причиной повышения эрозионной стойкости является возрастание плотности материала с увеличением коэффициента вытяжки за счет снижения остаточной пористости.



а)



б)



в)

Рисунок 5. Влияние коэффициента вытяжки на эрозионную стойкость m (а), среднюю площадь включений графита в плоскости шлифа S (б) и плотность ρ (в). Контактный материал серебро–3 масс.% графита, порошок серебра среднего размера 10 мкм.

Увеличение содержания графита от 2 до 5 масс.% сопровождается снижением эрозионной стойкости. Этот факт также объясняется тем, что процесс эрозии материала серебро–графит связан с выгоранием графита при

образовании дугового разряда между контактами, поэтому повышение содержания графита приводит к росту убыли массы и, соответственно, к снижению эрозионной стойкости. Подобная зависимость эрозионной стойкости от содержания графита характерна для всех материалов серебро–графит в изученном диапазоне коэффициента вытяжки, при любой ориентации графита.

Установлено, что снижение среднего размера исходного порошка серебра (с 20 до 3 мкм) приводит к повышению эрозионной стойкости материалов серебро–графит в изученном диапазоне значений коэффициента вытяжки. Данный факт связан с формированием мелкодисперсной структуры при использовании порошка серебра среднего размера 3 мкм, о чем свидетельствуют представленные в главе 4 результаты анализа параметров структуры.

В таблице 4 представлены зависимости стойкости к свариванию от величины коэффициента вытяжки. Приведены данные свариваний материалов серебро–3 масс.% графита (порошок серебра 10 мкм) с ориентацией включений параллельно (\parallel), перпендикулярно (\perp) и под углом 45° ($\angle 45^\circ$) к рабочей поверхности, а также материалов, полученных прессованием–спеканием.

Таблица 4 – Влияние коэффициента вытяжки на стойкость к свариванию материалов серебро–графит

Коэф-нт вытяжки K, %	Число свариваний N, с силой $F \geq 3Н$			Число свариваний N, с силой $F \geq 30Н$		
	\perp	$\angle 45^\circ$	\parallel	\perp	$\angle 45^\circ$	\parallel
3700	$13,5 \pm 1,8$	$10,0 \pm 1,5$	$8,8 \pm 1,5$	$3,0 \pm 0,5$	$2,0 \pm 0,5$	$1,5 \pm 0,5$
2500	$14,8 \pm 2,0$	$10,8 \pm 1,8$	$10,0 \pm 1,8$	$4,0 \pm 1,0$	$3,5 \pm 0,5$	$1,8 \pm 0,5$
1000	$17,5 \pm 2,2$	$12,8 \pm 2,2$	$11,5 \pm 2,0$	$5,5 \pm 1,0$	$4,0 \pm 1,0$	$3,0 \pm 0,6$
400	$19,5 \pm 2,2$	$16,0 \pm 2,5$	$14,5 \pm 2,2$	$6,5 \pm 1,0$	$5,0 \pm 0,8$	$3,2 \pm 0,8$
Прессов.- спекание	$28,5 \pm 4,0$			$10,2 \pm 2,8$		

Показано, что наиболее высокой стойкостью к свариванию (меньшим числом свариваний) обладают материалы с ориентацией включений графита параллельно рабочей поверхности. Материалы с ориентацией включений перпендикулярно поверхности имеют наиболее низкую стойкость к свариванию. Стойкость к свариванию материалов с ориентацией включений под углом 45° к рабочей поверхности занимает промежуточные значения. Материалы, полученные экструзией, при любом коэффициенте вытяжки, с различной ориентацией включений, имеют более высокую стойкость к свариванию, чем материалы, полученные прессованием–спеканием.

Наблюдаемая зависимость стойкости к свариванию от преимущественной ориентации включений графита объясняется различной структурой слоев наработки, образующихся на поверхности материалов серебро–графит, имеющих различное расположение включений. Слои наработки, формирующиеся на материалах с ориентацией включений графита параллельно рабочей поверхности, слабо сцеплены с основным материалом контакта, что способствует размыканию контактов с приложением меньшего усилия при образовании сварного соединения.

С увеличением коэффициента вытяжки происходит повышение стойкости к свариванию материалов серебро–графит, что связано с измельчением структуры при экструзии. Как уже отмечалось, для материалов серебро–графит характерна преимущественная эрозия включений графита. Интенсивный разогрев контактирующих с графитом областей приводит к расплавлению серебра и формированию жидкой фазы. Таким образом, создается возможность для образования сварного соединения. В мелкодисперсной структуре контактных материалов, которая формируется при высоких значениях коэффициента вытяжки, области серебра, контактирующие с графитом, будут иметь меньшие размеры в связи с меньшими размерами включений графита в такой структуре. Это снижает вероятность образования прочных сварных соединений, требующих приложения высоких усилий при размыкании.

В таблице 5 представлены зависимости стойкости к свариванию от содержания графита для материалов серебро–графит, изготовленных из порошка серебра среднего размера 10 мкм при коэффициенте вытяжки 1000%; ориентация включений параллельно (=), перпендикулярно (\perp) и под углом 45° ($\angle 45^\circ$) к рабочей поверхности.

Таблица 5 – Влияние содержания графита на стойкость к свариванию материалов серебро–графит

Содерж. графита, масс. %	Число свариваний N, с силой $F \geq 3Н$			Число свариваний N, с силой $F \geq 30Н$		
	\perp	$\angle 45^\circ$	=	\perp	$\angle 45^\circ$	=
2	$23,0 \pm 2,5$	$19,5 \pm 2,2$	$14,5 \pm 2,8$	$9,0 \pm 1,0$	$7,2 \pm 1,0$	$6,2 \pm 0,8$
3	$17,5 \pm 2,2$	$12,8 \pm 2,2$	$11,5 \pm 2,0$	$5,5 \pm 1,0$	$4,0 \pm 0,6$	$3,0 \pm 0,6$
4	$12,5 \pm 2,2$	$8,5 \pm 1,8$	$7,2 \pm 1,5$	$2,6 \pm 0,5$	$1,5 \pm 0,6$	$1,0 \pm 0,4$
5	$3,8 \pm 0,6$	$2,5 \pm 0,5$	$2,0 \pm 0,4$	0	0	0

Повышение содержания графита приводит к увеличению стойкости к свариванию, что объясняется формированием на поверхности контакта слоя сажистого углерода, переосаждаемого из газовой фазы, препятствующего образованию сварных соединений. С увеличением содержания графита происходит образование более плотных и протяженных слоев углерода на поверхности контакта.

Таким образом, установлено, что материалы серебро–графит с ориентацией включений графита перпендикулярно рабочей поверхности обладают более высокой эрозионной стойкостью, но более низкой стойкостью к свариванию, чем материалы серебро–графит с ориентацией включений параллельно рабочей поверхности.

По итогам проведенного исследования можно утверждать, что для материалов с перпендикулярной ориентацией включений определяющим фактором является высокий уровень теплопроводности, способствующий более

высокой эрозионной стойкости. Для контактов с параллельной ориентацией включений графита определяющим фактором является структура слоев наработки с расположением пустот параллельно рабочей поверхности, способствующая их отслаиванию в процессе коммутации.

В главе 6 приведены практические рекомендации по изготовлению материалов серебро–графит, методом экструзии, характеризующихся повышенным уровнем свойств, а также их применению в НВА.

Увеличение коэффициента вытяжки сопровождается ростом, как эрозионной стойкости, так и стойкости к свариванию. Поэтому, в первую очередь при создании получаемых методом экструзии контактных материалов серебро–графит следует стремиться к достижению максимально возможной величины коэффициента вытяжки. Уменьшение размера исходного порошка серебра, используемого при изготовлении материалов серебро–графит, сопровождается некоторым ростом эрозионной стойкости, при этом значимого изменения стойкости к свариванию не наблюдалось. В месте с тем, получение порошков высокой дисперсности (размер частиц около 1 мкм) требует более высоких затрат. Кроме того, применение таких порошков, характеризующихся большей газонасыщенностью в силу развитой поверхности, сопровождается повышенной отходностью. В связи с этим, с нашей точки зрения, целесообразно применять серебряный порошок среднего размера 10 мкм, контакты из которого не значительно уступают в эрозионной стойкости контактам, изготовленным из порошка среднего размера 3 мкм.

Увеличение содержания графита в материалах серебро–графит с анизотропной структурой повышает стойкость к свариванию, но снижает эрозионную стойкость. Поскольку одновременно при этом в материале снижается содержание серебра, рекомендация по увеличению содержания графита в материале целесообразна, в первую очередь, для сравнительно недорогих автоматических выключателей бытового и аналогичного назначения, реализуемых потребителю на наиболее чувствительном к цене сегменте рынка.

В автоматических выключателях бытового назначения, коммутирующих токи до 63А и допускающих отключение тока короткого замыкания до 4,5–10кА, основным свойством материала контактов является высокая стойкость к свариванию, а требования к эрозионной стойкости сравнительно невысоки. Поэтому рекомендуется применять в таких аппаратах контакты серебро–графит с анизотропной структурой, в которых включения графита расположены параллельно рабочей поверхности.

В автоматических выключателях на номинальные токи свыше 160А целесообразно применять контакты с анизотропной структурой, в которых включения графита расположены перпендикулярно рабочей поверхности, так как такие контакты обладают максимальной эрозионной стойкостью и способны противостоять высоким механическим нагрузкам при замыкании.

ВЫВОДЫ

1. Установлены особенности и выявлены закономерности структурных изменений материалов серебро–графит, выражающиеся в том, что с увеличением коэффициента вытяжки происходит измельчение структуры, связанное с расслоением и дроблением агломератов и отдельных частиц графита, образующих «строчечную» структуру.

2. Показано, что при расположении включений графита перпендикулярно рабочей поверхности контактные материалы имеют более высокую эрозионную стойкость, чем при параллельном расположении включений. Эрозионная стойкость возрастает с увеличением коэффициента вытяжки, достигая максимального значения при $K = 3700\%$, что вызвано повышением плотности, а также формированием мелкодисперсной структуры, связанным с дроблением включений графита.

3. Определена теплопроводность материалов серебро–графит с анизотропной структурой. Показано, что материалы с ориентацией включений графита перпендикулярно рабочей поверхности имеют максимальную теплопроводность. Характер наблюдаемых зависимостей эрозионной стойкости

от преимущественного расположения включений объяснен на основании отличий теплопроводности материалов, имеющих различную ориентацию включений графита.

4. Выявлено, что максимальной стойкостью к свариванию обладают материалы с расположением включений параллельно рабочей поверхности, что связано со структурой слоев наработки, которые при параллельной ориентации включений имеют низкую прочность сцепления с материалом контакта. Стойкость к свариванию материалов серебро–графит возрастает с увеличением коэффициента вытяжки, что вызвано измельчением структуры.

5. Показано, что снижение среднего размера серебряного порошка с 20 до 3 мкм приводит к повышению эрозионной стойкости, что вызвано формированием мелкодисперсной структуры за счет снижения числа агломератов включений графита. Установлено, что в изученном диапазоне концентрации графита, коэффициента вытяжки, размера порошка серебра, материалы, полученные экструзией, имеют более высокий уровень контактных свойств, чем материалы, изготовленные методом прессования–спекания.

6. Проведенное комплексное исследование позволило выявить новые технологические решения по разработке материалов серебро–графит с повышенным уровнем контактных свойств, которые реализованы на предприятии ЗАО "Благовест–Истра" при освоении серийного производства контактных материалов методом экструзии. Внедрение электрических контактов из таких материалов позволило российским производителям низковольтной аппаратуры существенно повысить надежность аппаратов и освоить отсутствовавшие ранее в производственной программе этих предприятий автоматические выключатели на высокие токи.

Основные результаты работы представлены в публикациях:

1. Афонин М.П., Бойко А.В., Блинков И.В. Новая группа материалов для электрических контактов, получаемых методом экструзии// Сборник научных трудов международной конференции «Новые перспективные материалы и технологии их получения (НПМ) –2004», г. Волгоград 20–23 сентября 2004 г. – т.1, С. 165–166.
2. Бойко А.В. Афонин М.П., Блинков И.В. Влияние коэффициента вытяжки при экструзии и содержания графита на эрозионную стойкость контактных материалов системы серебро–графит // Сборник научных трудов международной конференции «Новые перспективные материалы и технологии их получения (НПМ) – 2004», г. Волгоград 20–23 сентября 2004 г. – т.1, С. 172–173.
3. Бойко А.В. Процесс структурообразования при получении электроконтактных материалов серебро-графит методом экструзии // Сборник тезисов докладов 3-й международной конференции «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология», 13–15 октября 2004 г., г. Москва, МГУ им. Ломоносова. – С. 61.
4. Афонин М.П., Бойко А.В. Влияние анизотропии структуры композиции серебро-графит на контактные свойства // Порошковая металлургия. – 2005. №1/2.– С. 101–105.
5. Болдырев С.Н., Бойко А.В. Универсальный испытательный стенд проверки контакт-деталей в режимах включения и отключения тока// Тезисы докладов международной конференции «Электрические контакты и электроды. ЭК–2005», Украина. Крым. Кацивели. 1–8 октября 2005 г. – С. 44–45.
6. Афонин М.П., Бойко А.В. Влияние структуры и фазового состава композиционных материалов серебро-графит на эрозионную стойкость// Драгоценные металлы. Драгоценные камни. – 2005. №10.– С.119–123.
7. Бойко А.В. Эрозионная стойкость контактных материалов системы серебро-графит с анизотропной структурой// Известия вузов. Цветная металлургия. – 2006. №1/2 – С. 59–62.