

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов»

О.В. Хренов, Л.Н. Афанасьев, А.В. Лешок

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Учебно-методическое пособие
по дисциплине «Теория и технология получения порошковых материалов»
для студентов специальности 1-42 01 02
«Порошковая металлургия, композиционные материалы, покрытия»

Учебное электронное издание

М и н с к 2 0 1 0

УДК 621.762 (076.5)

Авторы:

*О.В. Хренов,
Л.Н. Афанасьев,
А.В. Лешок*

Рецензенты:

Ю.В. Соколов, профессор кафедры «Материаловедение в машиностроении» БНТУ, доктор технических наук, профессор;
В.М. Кацевич, заведующий кафедрой «Технология металлов» БГАТУ, доктор технических наук, профессор

Учебно-методическое пособие по теме «Материалы и технология порошковой металлургии» предназначены для студентов, специализирующихся в области порошковой металлургии.

В пособии содержатся сведения о составе и физико-механических характеристиках конструкционных, антифрикционных и фрикционных материалах, технологических режимах изготовления изделий из данных материалов.

Цель данного пособия – оказание помощи студентам в написании курсового проекта по дисциплине «Теория и технология получения порошковых материалов».

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.(017) 292-77-52 факс (017) 292-91-37
Регистрационный № БНТУ/МТФ34-3.2010

© БНТУ, 2010

© Хренов О. В., 2010

© Хренов О. В., компьютерный дизайн, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА	5
2. АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА	14
3. АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МЕДИ.....	20
4. ПОРИСТЫЕ ПРОНИЦАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	23
5. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ	24
6. ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ ПОЛУЧАЕМЫЕ МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ.....	26
7. ФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	27
8. МАТЕРИАЛЫ ФИРМЫ «HOGANAS»	30
9. ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ.....	32
ЛИТЕРАТУРА.....	37

ВВЕДЕНИЕ

Материалы, используемые в технологии порошковой металлургии условно можно разделить на 3 группы: конструкционные, антифрикционные и фрикционные. Каждая группа материалов способна выполнить свою функцию.

К группе *конструкционных материалов* относятся материалы, из которых изготавливаются детали конструкций (машин и сооружений), воспринимающих силовую нагрузку. Определяющими параметрами таких материалов являются повышенные механические свойства, твердость, жаропрочность, коррозионная стойкость.

Антифрикционные материалы (от лат. *frictio* – трение) – это материалы, используемые для деталей машин (подшипники, втулки и др.), работающих при трении скольжения и обладающих в определённых условиях низким коэффициентом трения. Отличительной особенностью их является низкая способность к адгезии, хорошая прирабатываемость, теплопроводность и стабильность свойств. Кроме антифрикционных свойств, они должны обладать необходимой прочностью, сопротивлением коррозии в среде смазки, технологичностью и экономичностью. В большинстве случаев, антифрикционные материалы применяются для подшипников скольжения.

Фрикционные материалы применяются для изготовления деталей, работающих в условиях трения скольжения, и имеющие большой коэффициент трения (для материалов, работающих в условиях смазки, 0,05–0,12; при сухом трении – от 0,17 до 0,25). Они обладают высокой стабильностью свойств при различных климатических условиях, высокой износостойкостью, хорошей теплопроводностью, что предопределяет длительный срок службы фрикционных дисков при эксплуатации.

1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

По [1] условное обозначение марок состоит из букв и цифр. Буквы указывают: П – на принадлежность материала к порошковому, К – на назначении материала (конструкционный), остальные буквы – на содержание легирующих элементов (Д – медь, Х – хром, Ф – фосфор, К – сера, М – молибден, Г – марганец, Т – титан, Н – никель).

Основу материала в обозначении марок не указывают. Цифры, стоящие после букв ПК, указывают на среднюю массовую долю углерода в сотых долях процента. Массовую долю углерода, равную 1 %, в обозначении марки материала не указывают.

Цифры, стоящие после букв, указывают на массовую долю в материале легирующих компонентов в процентах; отсутствие цифры означает, что массовая доля компонента меньше или равна единице.

Условное обозначение конструкционного порошкового материала состоит из обозначения его марки и через дефис – минимальной плотности (г/см^3).

Пример условного обозначения:

- сталь порошковая конструкционная малоуглеродистая со средней массовой долей углерода 0,1 % и минимальной плотностью 6,8 г/см^3 :

ПК10-68 ГОСТ 28378-89

- сталь порошковая конструкционная медьникелевая со средней массовой долей углерода 0,4 %, никеля 2 %, меди 2 % и минимальной плотностью 6,4 г/см^3 :

ПК40Н2Д2-64 ГОСТ 28378-89.

Применение в качестве исходного материала чистого железного порошка при изготовлении конструкционных деталей ограничено из-за низких прочностных свойств спеченного железа, определяющихся характером межчастичных границ. Повышение механических свойств конструкционного изделия возможно за счёт дополнительного использования легирующих элементов (фосфор, медь, хром, никель, молибден) и операции химико-термической обработки (азотированию, сульфидированию, хромированию).

В практике машиностроения и технологии порошковой металлургии наибольшее распространение получили конструкционные порошковые материалы на основе железа: сталь малоуглеродистая, углеродистая и медистая; хромистая, марганцовистая и медьникельмарганцовистая; нержавеющая (табл. 1).

Таблица 1
Химические составы (масс. %, основа — железо) конструкционных порошковых материалов по ГОСТ 28378–89

Марка	C	Cu	Ni	Mo	Cr	Другие элементы
1	2	3	4	5	6	7
<i>Стали малоуглеродистые, углеродистые, медистые</i>						
ПК10	$\leq 0,30$	–	–	–	–	–
ПК40	0,31–0,60	–	–	–	–	–
ПК70	0,61–0,90	–	–	–	–	–
ПК10Ф	$\leq 0,30$	–	–	–	–	P: 0,8–1,2
ПК10Д2Ф	$\leq 0,30$	1–3	–	–	–	P: 0,8–1,2

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
ПК10Д3	≤ 0,30	1–4	–	–	–	–
ПК10Д3К	≤ 0,30	1–4	–	–	–	S: 0,15–0,40
ПК10Д5	≤ 0,30	4–6	–	–	–	–
ПК40Д3	0,31–0,60	1–4	–	–	–	–
ПК40Д3К	0,31–0,60	1–4	–	–	–	S: 0,15–0,40
ПК40Д3КФ	0,31–0,60	1–4	–	–	–	S: 0,15–0,40
ПК70Д3	0,61–0,90	1–4	–	–	–	–
<i>Стали никельмолибденовые, медьникелевые, медьникельмолибденовые</i>						
ПК10Н2М	≤ 0,30	–	1–3	0,3–0,7	–	–
ПК10Н2Д2	≤ 0,30	1–3	1–3	–	–	–
ПК10Н4Д4	≤ 0,30	2–6	2–6	–	–	–
ПК10Н2Д6М	≤ 0,30	4–8	1–3	0,3–0,7	–	–
ПК40НМ	0,31–0,60	–	0,5–1,0	0,3–0,7	–	–
ПК40Н2М	0,31–0,60	–	1–3	0,3–0,7	–	–
ПК40Н2Д2	0,31–0,60	1–3	1–3	–	–	–
ПК40Н3Д2Х	0,31–0,60	1–3	2–4	–	0,5–0,15	–
ПК40Н3Д2М	0,31–0,60	1–3	1–3	0,3–0,7	–	–
ПК40Н4Д2М	0,31–0,60	1–3	3–5	0,3–0,7	–	–
ПК70Н2Д2	0,61–0,90	1–3	1–3	–	–	–
<i>Стали хромистые, марганцовистые, хромоникельмарганцовистые</i>						
ПК70Х3	0,61–0,90	–	–	–	2,0–4,0	–
ПКХ6	0,91–1,20	–	–	–	5,0–7,0	–
ПК40Х2	0,31–0,60	–	–	–	1,0–3,0	–
ПК40Г2	0,31–0,60	–	–	–	–	Mn: 1,0–3,0
ПК40ХН2Г	0,61–0,90	–	1,0–3,0	–	0,5–1,5	Mn: 0,5–1,5
ПКГ13	0,91–1,20	–	–	–	–	Mn: 12,0–14,0
<i>Стали нержавеющей</i>						
ПК10Х13М2	≤ 0,10	–	–	1,0–3,0	12,0–14,0	–
ПК10Х25	≤ 0,10	–	–	–	24,0–26,0	–
ПК20Х13	0,10–0,30	–	–	–	12,0–14,0	–
ПК40Х13М2	0,30–0,50	–	–	1,0–3,0	12,0–14,0	–
ПК10Х17Н2	≤ 0,15	–	1,0–3,0	–	16,8–18,0	–
ПК10Х18Н9Т	≤ 0,10	–	8,0–10,0	–	17,0–19,0	Ti: 0,5–0,8
ПК10Х18Н15	≤ 0,10	–	14,0–16,0	–	17,0–19,0	–

Введение **меди** в материал на основе железа увеличивает предел текучести и временное сопротивление материала, но несколько снижает его пластичность и вязкость, повышает сопротивляемость порошкового материала атмосферной коррозии. При спекании железомедных материалов выше температуры плавления меди (1083 °С) медь находится в жидком состоянии, взаимодействует с железом и образует твёрдый раствор замещения на основе γ -железа с максимальной концентрацией меди в растворе до 8 %. При медленном охлаждении медь вы-

деляется по границам зёрен железа в виде богатой медью ϵ -фазы, в α -железе содержание меди уменьшается до 0,2-0,35 %.

Введение **никеля** в порошковый материал на основе железа повышает прочность и пластичность стали, при этом легирование порошкового железа только никелем применяется редко вследствие необходимости высоких температур и длительных выдержек при спекании для получения однородной структуры.

Присадка к чистому железу 5 % никеля повышает прочность и твердость материала, оставляя его пластичность практически без изменений. В связи с тем, что никель при спекании вызывает большую усадку, для получения безусадочных изделий с высокими механическими свойствами порошковые стали легируются медью и никелем [2]. При одновременном легировании никелем и медью (Ni - 4 % и Cu - 2 %) прочность на разрыв образцов с пористостью 10 % достигает 400 – 420 МПа, удлинение – 7 - 8 %, твердость – 120 - 127 НВ. Такие же образцы, легированные только 2 % меди, показывают следующие свойства при 10 % пористости: прочность на разрыв – 280 - 300 МПа, удлинение – 3 - 4 %, твердость - 100 НВ. Наиболее благоприятное сочетание прочности и пластичности наблюдается в сплавах содержащих от 1 до 5 % каждого из этих элементов.

Легирование порошковой стали на основе железа карбидообразующим элементом – **молибденом** (0,5-5 %) ограничено из-за низкого коэффициента диффузии его в α - и γ -железо, что затрудняет получение однородного твёрдого раствора. Введение молибдена в железо приводит к интенсивной усадке и интенсивному росту зерна при спекании. Легирование порошковых сталей молибденом производится только при изготовлении ответственных тяжело нагруженных деталей. В практике порошковой металлургии более распространено комплексное легирование молибденом и никелем.

Распространённым и дешёвым карбидообразующим элементом является **хром**, способный образовывать двойные и сложные карбиды. Хром способствует увеличению прочности и износостойкости, хорошей закаливваемости порошковой стали. В спеченной хромистой стали присутствует широкая гамма структур, от ферритной до сорбитной со сложными карбидами. Это объясняется высокой устойчивостью оксидов, температура диссоциации которых почти достигает температуры плавления чистого хрома. Наличие оксидов затрудняет диффузионные процессы, а само спекание необходимо производить при высоких температурах в остроосушенных восстановительных средах (водороде, диссоциированном аммиаке).

Из неметаллических легирующих элементов практическое применение в порошковой металлургии нашёл **фосфор**. По соображениям вязкости содержание фосфора в порошковой стали ограничиваются 0,3 – 0,6 %. Вследствие образования твёрдых растворов с железом фосфор стабилизирует Fe_α . Стали, содержащие более 0,55 % фосфора можно спекать без фазовых превращений. Повышенная скорость самодиффузии в α -фазе способствует миграции материала при спекании и допускает спекание при пониженной температуре (1000 °С). При 0,3 % фосфора, сталь упрочняется аналогично введению 2 % меди, с усадкой более 1 %. Наличие фосфора в системах Fe – Cu – P и Fe – Ni – P способствует формированию жидкой фазы при температуре 920 °С, ускоряющей процесс спекания [3].

Марганец принадлежит к переходным металлам, расширяющим область существования γ -Fe, увеличивая твердость феррита, повышает устойчивость переохлаждённого аустенита и снижает температуру мартенситного превращения. Марганец относится к элементам, обладающим высоким упрочняющим действием в стали, одна не достаточно широко используется в порошковой стали из-за необходимости использования восстановительной атмосферы с высокой степенью осушки. Так, при температуре 800 °С необходимо использование атмосферы с точкой росы – 77 °С, при температуре 1100 °С – 54 °С [4].

Титан, как легирующий элемент железа не используется. Он применяется как элемент, который оказывает влияние на другой легирующий элемент. Так в композиции Fe – Ni – Co – Mo, титан образует с никелем твёрдые фазы упрочняющие металл [5].

В результате термообработки **сера** с железом образует эвтектику - сульфид железа, температура плавления которого 988 °С. Сульфид железа вызывает красноломкость, то есть хрупкость при высоких температурах, так при нагреве до 1000-1200 °С сульфид железа, располагающийся по границам зёрен, разрушает связи между зёрнами и при деформации вызывает появление трещин [6].

Механические свойства порошковых конструкционных материалов на основе железа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства порошковых конструкционных материалов

Марки	Плотность, 10 ³ кг/м ³	Твердость НВ, МПа	Временное сопротивление при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
			Не менее	
1	2	3	4	5
<i>Стали малоуглеродистые, углеродистые, медистые</i>				
ПК10	6,0	400	100	2
	6,4	500	140	3
	6,8	650	180	4
	7,2	800	220	6
	7,6	900	260	20
<i>Стали малоуглеродистые, углеродистые, медистые</i>				
ПК40	6,0	550	140	–
	6,4	750	190	1
	6,8	900	240	2
	7,2	1000	290	4
	7,6	1100	400	10
ПК70	6,0	800	200	–
	6,4	1000	250	1
	6,8	1200	300	1
	7,4	1450	600	4
ПК10Ф	6,8	650	200	3
ПК10Д2Ф	6,0	600	200	1
ПК10Д3	6,0	550	160	1
	6,4	650	200	2
	6,8	750	240	3
	7,4	900	500	15
ПК10Д3К	6,0	550	160	1
	6,4	650	200	2
ПК10Д5	6,0	750	200	–
	6,4	850	240	1
	6,8	950	280	2
	7,4	1100	600	10

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5
ПК40ДЗ	6,0	800	220	–
	6,4	1000	280	–
ПК40ДЗК	6,0	800	220	–
	6,4	1000	280	–
ПК40ДЗКФ	6,0	850	240	–
	6,4	1050	300	–
ПК70ДЗ	6,0	1000	270	–
	6,4	1200	340	–
	6,8	1400	420	–
	7,4	1600	700	3
<i>Стали никельмолибденовые, медьникелевые, медьникельмолибденовые</i>				
ПК10Н2М	6,8	700	240	8
	7,2	850	270	12
	7,6	1000	450	18
ПК10Н2Д2	6,4	700	240	3
	6,8	900	270	4
	7,2	1100	300	6
	7,6	1300	500	15
ПК10Н4Д4	6,4	900	300	2
	6,8	1200	500	3
ПК10Н2Д6М	7,4	1800	800	3
ПК40НМ*	6,8	900	300	4
	7,2	1100	340	6
	7,6	1300	600	10
<i>Стали никельмолибденовые, медьникелевые, медьникельмолибденовые</i>				
ПК40Н2М*	6,4	800	260	2
	6,8	1000	320	4
	7,2	1200	380	5
	7,6	1400	700	7
ПК40Н2Д2*	6,4	1000	300	1
	6,8	1200	360	2
	7,4	1500	700	5
ПК40Н3Д2Х*	6,4	1200	350	1
	6,8	1500	500	2
ПК40Н2Д2М*	6,8	1500	440	3
	7,4	1800	780	6
ПК40Н4Д2М*	6,8	1800	600	1
	7,4	2200	880	4
ПК70Н2Д2*	6,4	1200	330	–
	6,8	1500	440	–
	7,4	2000	800	3
<i>Стали хромистые, марганцовистые, хромоникельмарганцовистые</i>				
ПК70Х3*	6,4	1100	350	–
	6,8	1400	450	–

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
ПК40Х2*	6,4	900	300	1
	6,8	1100	400	2
	7,4	1400	700	4
ПКХ6*	7,4	1800	800	–
ПК40Г2*	7,4	1400	700	5
ПК40ХН2Г*	6,4	1000	320	1
	6,8	1200	450	2
	7,4	1500	850	6
ПКГ13*	7,4	2400	–	–
<i>Стали нержавеющей</i>				
ПК20Х13М2*	7,4	1000	400	12
ПК10Х25	7,4	1600	400	15
ПК20Х13*	6,4	1800	320	1
	6,8	2100	420	2
	7,4	2500	480	6
ПК40Х13М2*	7,4	2800	550	4
ПК10Х17Н2*	6,8	2300	400	2
	7,2	2700	500	8
ПК10Х18Н9Т	6,4	850	320	3
	6,8	950	380	4
	7,2	1050	400	5
	7,6	1300	550	15
ПК10Х18Н15	6,4	800	300	4
	6,8	900	380	5
	7,2	1000	400	6
	7,6	1250	550	20

Примечание. Нормы временного сопротивления, относительного удлинения и твердости являются справочными и приведены для выбора марок материала. Для марок с плотностью $7,4 \text{ г/см}^3$ и самозакаливающихся материалов свойства приведены для отожженного состояния. * Самозакаливающиеся стали.

Технологическими операциями процесса изготовления изделий конструкционного назначения из порошка железа являются:

- шихтоприготовление;
- прессование;
- спекание;
- калибрование;
- повторное спекание;
- пропитка;
- пароксидирование.

В табл. 3 приведены области применения, назначения и дополнительные способы обработки порошковых конструкционных материалов на основе железа.

Таблица 3

Области применения, свойства и виды дополнительных обработок
порошковых конструкционных материалов по ГОСТ 28378–89

Обозначения марок по ГОСТ	Обозначение материалов по ГОСТ	Основная область применения	Характеристика свойств и видов дополнительной обработки						
1	2	3	4						
ПК10	ПК10-6,0	Изделия пористые ненагруженные	1, 7.1						
	ПК10-6,4								
	ПК10-6,8								
ПК40	ПК40-6,0		Изделия пористые малонагруженные	1, 4					
	ПК40-6,4								
	ПК40-6,8								
ПК10Д3	ПК10Д3-6,0			Изделия пористые малонагруженные	1, 2, 7.1				
	ПК10Д3-6,4								
ПК10Д3К	ПК10Д3К-6,0				Изделия пористые малонагруженные	1, 2, 3, 7.1			
	ПК10Д3К-6,4								
ПК10Д5	ПК10Д5-6,0					Изделия пористые малонагруженные	1, 7.2		
	ПК10Д5-6,4								
ПК10Ф	ПК10Ф-6,8						Изделия пористые малонагруженные	1, 6	
ПК10Д2Ф	ПК10Д2Ф-6,0							1	
ПК10Н2М	ПК10Н2М-6,8							1, 5, 7.1	
ПК10Н2Д2	ПК10Н2Д2-6,4	Изделия пористые средненагруженные						1, 7.1	
	ПК10Н2Д2-6,8								
ПК40Д3	ПК40Д3-6,4							Изделия пористые средненагруженные	1, 2, 4
	ПК40Д3-6,8								
ПК40Д3К	ПК40Д3К-6,0		Изделия пористые средненагруженные						1, 2, 3, 4
	ПК40Д3К-6,4								
ПК40Д3КФ	ПК40Д3КФ-6,8			Изделия пористые нагруженные					1, 2, 3, 4
ПК40Д3КФ	ПК40Д3КФ-6,4								1, 3, 4,
ПК40Н2Д2	ПК40Н2Д2-6,4				4, 5				
ПК40Н3Д2Х	ПК40Н3Д2Х-6,4				1, 2, 7.1				
ПК10Д3	ПК10Д3-6,8								
ПК10Д5	ПК10Д5-6,8				1, 7.2				
ПК10Н4Д4	ПК10Н4Д4-6,4				Изделия пористые нагруженные	1, 2.4, 7.1			
	ПК10Н4Д4-6,8								
ПК40Н2Д2	ПК40Н2Д2-6,8					Изделия пористые нагруженные	4, 5, 7.3		
ПК40ХН2Г	ПК40ХН2Г-6,8								
ПК40Х2	ПК40Х2-6,8	4, 7.3							
ПК40НМ	ПК40НМ-6,8	1, 4, 7.3							
ПК40Н2М	ПК40Н2М-6,8	1, 4, 5, 7.3							
ПК40Н2Д2М	ПК40Н2Д2М-6,8	1, 4, 7.3							
ПК40Н4Д2М	ПК40Н4Д2М-6,8								
ПК40Н3Д2Х	ПК40Н3Д2Х-6,8								
ПК40НМ	ПК40НМ-7,2								
ПК40Н2М	ПК40Н2М-7,2								

ПК70	ПК70-6,0	Изделия пористые износостойкие	7.3	
	ПК70-6,4			
	ПК70-6,8			
ПК70Д3	ПК70Д3-6,0			
	ПК70Д3-6,4			
	ПК70Д3-6,8			
ПК70Н2Д2	ПК70Н2Д2-6,4			
	ПК70Н2Д2-6,8			
ПК70Х3	ПК70Х3-6,4	Изделия пористые высокоизносостойкие	7.3	
	ПК70Х3-6,8			
ПК10	ПК10-7,2	Изделия плотные малонагруженные	1, 7.1	
	ПК10-7,6			
ПК40	ПК40-7,2	Изделия плотные средненагруженные	1, 4, 7.3	
	ПК40-7,6			
ПК10Д3	ПК10Д3-7,4			1, 7.1, 7.2
ПК10Д2Н2	ПК10Д2Н2-7,2			1, 7.1
	ПК10Д2Н2-7,6			
ПК10Н2М	ПК10Н2М-7,2			1, 5, 7.1
	ПК10Н2М-7,6			
ПК40Н2Д2	ПК40Н2Д2	Изделия плотные тяжелонагруженные	4, 5, 7.1, 7.4	
ПК40Н2Д2М	ПК40Н2Д2М			
ПК40НМ	ПК40НМ-7,6			1, 4, 5, 7.3, 7.4
ПК40Н2М	ПК40Н2М-7,6			
ПК10Д5	ПК10Д5-7,2			
ПК10Н3Д6М	ПК10Н3Д6М-7,2			–
ПК70	ПК70-7,4	Изделия плотные износостойкие	7.3	
ПК70Д3	ПК70Д3-7,4			
ПК70Н2Д2	ПК70Н2Д2-7,4			7.3, 7.4
ПК40Х2	ПК40Х2-7,4	Изделия плотные износостойкие, подвергающиеся большим ударным нагрузкам	4, 5, 7.3, 7.4	
ПК40Г2	ПК40Г2-7,4			
ПК40ХН2Г	ПК40ХН2Г-7,4			
ПК40Н4Д2М	ПК40Н4Д2М-7,4			
ПКХ6	ПКХ6-7,4	Изделия плотные высокоизносостойкие	7.3, 7.4	
ПКГ13	ПКГ13-7,4			
ПК20Х13	ПК20Х13-6,4	Изделия износостойкие коррозионностойкие	8.1, 7.4	
ПК10Х17Н2	ПК10Х17Н2-6,8		8.2, 7.4	
ПК10Х18Н9Т	ПК10Х18Н9Т-6,4	Изделия пористые коррозионностойкие	1, 3, 7.1, 8.3	
	ПК10Х18Н9Т-6,8			
ПК10Х18Н15	ПК10Х18Н15-6,4			
	ПК10Х18Н15-6,8			
ПК10Х18Н15	ПК10Х18Н15-7,2		1, 3, 7.1, 8.3, 9, 10	
ПК10Х18Н9	ПК10Х18Н9-7,2			
ПК20Х13	ПК20Х13-7,4	Изделия плотные износостойкие и коррозионностойкие	8.1, 7.4	
ПК40Х13М2	ПК40Х13М2-7,4			
ПК10Х17Н2	ПК10Х17Н2-7,4			8.2, 7.4
ПК10Х18Н9Т	ПК10Х18Н9Т-7,6	Изделия плотные высококоррозионностойкие	1, 3, 7.1, 8.4, 8.5	
ПК10Х18Н15	ПК10Х18Н15-7,6			5.8, 9, 10

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения характеристики свойств и видов дополнительной обработки: 1 — изделия, подвергающиеся калиброванию с целью получения точных размеров; 2 — изделия с незначительным изменением размеров при спекании; 3 — изделия, хорошо обрабатываемые резанием; 4 — изделия с умеренной износостойкостью; 5 — изделия с повышенной ударной вязкостью; 6 — изделия магнитомягкие; 7 — изделия, подвергаемые термической обработке по действующим НТД: 7.1 — химико-термической; 7.2 — старению; 7.3 — закалке и отпуску; 7.4 — отжигу с целью улучшения обрабатываемости резанием; 8 — изделия коррозионностойкие: 8.1 — в атмосферных условиях; 8.2 — в слабоагрессивных средах; 8.3 — в агрессивных средах; 8.4 — в агрессивных средах, кроме кипящих растворов солей и кислот; 8.5 — стойкие к межкристаллитной коррозии; 9 — изделия жаростойкие; 10 — изделия со стабильным коэффициентом теплового расширения; 12 — все изделия при необходимости могут подвергаться защитным покрытиям по действующим НТД; 13 — все изделия, за исключением содержащих медь, могут подвергаться сварке.

2. АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

По ГОСТ [7] условное обозначение состоит из букв и цифр. Буквы указывают: П – принадлежность материала к порошковому, А – назначение материала – антифрикционный, после дефиса – основа материала и легирующие элементы: Ж – железо, Д – медь, О – олово, Гр – графит, Х – хром, Н – никель, Ф – фосфор, Б – бор, К – сера, Мс – дисульфид молибдена, Цс – сернистый цинк, Л – латунь, М – молибден.

Пример условного обозначения:

- порошковый антифрикционный материал на основе железа легированный углеродом по ГОСТ 26802:

ПА - ЖГр ГОСТ 26802-86.

Химический состав, пористость, твёрдость и микроструктура порошковых антифрикционных материалов на основе железа представлены в табл. 4.

Таблица 4

Химический состав, механические свойства и микроструктура порошковых антифрикционных материалов на основе железа

Марка	Cu	C	S	Прочее	Пористость, %	Твёрдость НВ, МПа	Микроструктура
	%						
1	2	3	4	5	6	7	8
ПА-Ж	-	0,3	-	-	17-34	200	Феррит, поры, допускается перлит до 20%
ПА-ЖД	2,5-3,5	0,3	-	-	12-28	450	-
ПА-ЖД5	4,8-10,0	0,5	-	-	16-27	500	То же, допускаются отдельные включения меди, цементита до 10%
ПА-ЖК	-	0,3	0,1-0,5	-	17-22	400	Феррит, включения сульфидов, поры, допуск. перлит до 20%, включения цементита до 5%
ПА-ЖДК	2,3-3,5	0,5	0,2-0,4	-	15-23	450	-
ПА-ЖГр	-	0,5-1,2	-	-	15-25	500	Перлит, графит, поры, доп. феррит до 40%, включения цементита до 10%
ПА-ЖГр2	-	1,4-2,0	-	-	15-25	500	То же
ПА-ЖГр3	-	2,2-3,2	-	-	15-25	450	То же
ПА-ЖГрД	2,3-3,5	0,5-1,2	-	-	15-25	600	То же
ПА-ЖГр2Д	2,5-3,0	1,5-2,8	-	-	13-23	600	То же
ПА-ЖГрД5	4,8-10,0	0,7-1,3	-	-	16-27	500	То же, допускаются включения меди

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8
ПА-ЖГрК	-	0,6-1,2	0,6-1,0	-	17-23	500	Перлит, графит, вкл. сульфидов, поры, допускается феррит до 40%, отдельные включения цементита до 15%
ПА-ЖГр ₂ К		2,0-2,8	0,6-1,0	-	17-25	600	То же
ПА-ЖГрДК	2,3-3,5	0,8-1,5	0,2-0,5	-	15-25	600	То же
ПА-ЖГрДК1	2,3-3,5	0,5-1,2	0,6-1,0		17-25	600	То же
ПА-ЖГрДК6	2,7-3,5	0,6-1,5	1,6-6,0	-	18-25	600	Зернистый перлит, твёрдый раствор меди в железе, сульфиды, поры, включения и разорванная серка цементита
ПА-ЖГрЛ	12,0-15,0	0,4-1,5	-	Zn 5,0-7,0	Не более 18	600	Перлит, латунь, допускается феррит до 40% и включения цементита до 15%
ПА-ЖГрЦс	-	0,6-1,4	0,4-1,1	Zn<2,7	15-20	500	Перлит, сульфиды, графит, поры, феррит до 30% и включения цементита до 15%
ПА-ЖГр ₃ Цс	-	2,2-3,2	0,6-1,3	Zn<2,7	10-20	600	То же
ПА-ЖГрЦсОК	-	0,7-1,4	1,5-1,9	Zn<2,7 Sn 0,8-1,2	14-20	500	Перлит, феррит 30-60%, сульфиды, графит, поры
ПА-ЖГрФК	-	0,6-1,2	0,8-1,2	P 0,3-0,7	До 20	1100	Перлит, сульфиды, фосфористая эвтектика, поры, допускается феррит до 40%
ПА-ЖГрФ1К	-	0,6-1,2	0,8-1,2	P 0,8-1,2	До 20	1200	То же
ПА-ЖГрДФК	-	0,2-0,6	0,1-0,4	Cu 2,5-3,5 P 0,1-0,5	17-25	600	То же
ПА-ЖГрДФМс	-	0,2-0,6	0,6-1,5	-	18-23	500	То же и до 10% цементита
ПА-ЖГрДМс	-	0,6-1,3	1,5-2,4	Ni<1,5 Cu 2,5-3,5 Mo 1,5-3,6	15-25	700	Перлит, сульфиды, свобод графит, поры, доп. до 40% феррита, до 10% цементита
ПА-ЖГр ₃ М	-	1,8-3,0	-	Mo 13,0-16,0	15-23	600	Перлит, свобод графит, включения карбидов до 15%, феррит до 30%, поры

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8
ПА-ЖНГр3М	-	1,8-3,0	-	Ni 39,0-43,0 Mo 13,0-16,0	12-23	700	Твёрдый раствор с участками перлита и мартенситоподобной структуры, отдельные включения карбидов, свободный графит, поры
ПА-ЖНГр10Цс	-	7,5-11,0	0,4-1,2	Ni 40,0-44,0 Zn<1,9 Mn<2,2	8-18	230	Твёрдый раствор с включениями участков перлита и карбидов, графит, сульфиды, поры
1	2	3	4	5	6	7	8
ПА-ЖФК	-	-	0,8-1,2	P 0,3-0,7	-		Феррит с включениями сульфидов, фосфорная эвтектика, поры
ПА-ЖФ1К	-	-	0,8-1,2	P 0,8-1,2	До 20	950	То же
ПА-ЖФКМ	-	-	0,8-1,2	P 1,0-1,2 Mo 2,4-2,6	До 20	600	То же
ПА-ЖХ20КБ	-	0,2-0,8	0,3-1,5	Mo 0,2-0,5 Cr 17,0-23,0 В 0,02-0,80	20-30	700	Легированный хромом и бором феррит, включения сульфидов, карбидов, боридов, поры
ПА-ЖХ18Н15КБ	-	0,2-1,5	0,3-1,5	Ni 12,0-16,0 Mo 0,2-0,5	18-26	600	Гетерогенная структура на основе легированного аустенита, включения перлитоподобного титана, карбидов, сульфидов, поры

Предел прочности на изгибе, временное сопротивление при растяжении и ударная вязкость антифрикционных порошковых материалов на основе железа приведены в табл. 5.

Таблица 5

Предел прочности на изгибе, временное сопротивление при растяжении и ударная вязкость антифрикционных порошковых материалов на основе железа

Марка материала	Предел прочности при изгибе, Мпа	Временное сопротивление при растяжении, Мпа не менее	Ударная вязкость, кДж/м ²
1	2	3	4
ПА-Ж	130	85	30
ПА-ЖД	250	120	39
ПА-ЖД5	300	150	40

Окончание табл. 5

1	2	3	4
ПА-ЖК	170	120	-
ПА-ЖДК	250	120	30
ПА-ЖГр	140	120	30
ПА-ЖГр2	110	100	20
ПА-ЖГр3	110	70	15
ПА-ЖГрД	250	150	30
ПА-ЖГр2Д	200	150	25
ПА-ЖГрД5	250	150	30
ПА-ЖГрК	140	100	30
ПА-ЖГр2К	150	100	20
ПА-ЖГрДК	200	150	25
ПА-ЖГрДК1	200	150	20
ПА-ЖГрДК6	220	-	-
ПА-ЖГрЛ	-	300	150
ПА-ЖГрЦс	180	140	-
ПА-ЖГр3Цс	160	100	20
ПА-ЖГрЦсОК	180	-	-
ПА-ЖГрФК	-	180	70
ПА-ЖГрФ1К	-	240	60
ПА-ЖГрДФК	-	200	20
ПА-ЖГрДФМс	200	200	20
ПА-ЖГрДМс	220	200	40
ПА-ЖГр3М	150	60	10
ПА-ЖНГр3М	250	180	20
ПА-ЖНГр10Цс	50	50	8
ПА-ЖФК	-	150	70
ПА-ЖФ1К	-	180	60
ПА-ЖФКМ	-	200	20
ПА-ЖХ20КБ	160	-	-
ПА-ЖХ18Н15КБ	300	-	-

Условия работы и области применения материалов приведены в табл. 6.

Таблица 6

Условия работы и области применения порошковых антифрикционных материалов
на основе железа

Марка	Условия работы	Область применения
1	2	3
ПА-Ж ПА-ЖК	Работают при обильной смазке, давлении до 2,5 Мпа и скоростях скольжения 1-2 м/с. В режиме самосмазывания нагрузки до 1,5 Мпа, коэффициент трения 0,03-0,06. Присутствие серы увеличивает срок службы и улучшает обрабатываемость материала	Прецизионные подшипники приборов, бытовой аппаратуры, счетнорешающих машин, текстильного оборудования

1	2	3
ПА-ЖД, ПА-ЖД5, ПА-ЖДК, ПА-ЖГр, ПА-ЖГр2, ПА-ЖГр3, ПА-ЖГрД, ПА-ЖГрД5, ПА-ЖГр2Д	Работают в условиях ограниченной и обильной смазки при давлениях до 4 и 10 Мпа соответственно и скорости скольжения до 3 м/с; в режиме самосмазывания до 2 Мпа. Коэффициент трения 0,035-0,125 в зависимости от количества смазки и состава материала. Материалы с увеличенным содержанием графита работают на верхнем пределе указанных нагрузок, при скоростях скольжения до 5 м/с имеют больший срок службы, меньший износ и коэффициент трения. Присутствие серы увеличивает износостойкость и улучшает обрабатываемость материала	Подшипники и детали узлов трения тракторов, сельхозмашин, станков, приборов, аппаратов бытовой техники, автомобилей, например, деталей телескопических амортизаторов, редукторов лебедки и др.
ПА-ЖГрК, ПА-ЖГр2К, ПА-ЖГрДК, ПА-ЖГр ДК1, ПА-ЖГрДК6, ПА-ЖГрЦс	Работают в режиме самосмазывания и ограниченной подачи смазки при давлении до 12 Мпа, при скоростях скольжения 3—8 м/с, при повышенных температурах до 250°С. Коэффициент трения 0,01-0,1	Подшипники скольжения и другие детали узлов трения автомобилей, станков, различных машин и механизмов. Например, втулки направляющей клапана компрессора бытового холодильника и др.
ПА-ЖГрЛ	Работает в условиях ограниченной смазки при давлении 8 Мпа, скорости скольжения 2—5 м/с и температуре от -60 до +100°С; имеет коэффициент трения не более 0,1 и улучшенную притираемость по сравнению с латунью	Пробки кранов воздушных, водяных, паромасляных и других систем, например, кранов тормозных систем паровозов, вагонов и др.
ПА-ЖГрЗЦс	Работает в режиме самосмазывания ограниченной смазкой при скоростях скольжения до 100 м/с; давлениях до 20 Мпа при скорости 5—10 м/с. Работает в паре с закаленными сталями, имеет высокую износостойкость (до 8 раз большую, чем бронзы, баббиты, подшипники качения, чугуны), низкий коэффициент трения (0,02—0,2), величина которого зависит от условий трения	Подшипники, втулки, вкладыши, торцовые уплотнения быстровращающихся валов различных машин, двигателей, электроверетен, приборов и т. д.
ПА-ЖГрЦсОК	Работает в режиме самосмазывания и ограниченной смазки в диапазоне скоростей скольжения 5—75 м/с при давлениях от 0,1 до 10 Мпа, уменьшающихся с повышением скорости. Работает в паре с закаленными и нормализованными сталями, обладает повышенной износостойкостью (в 2,5 раза превышает износостойкость пористого бронзографита), имеет коэффициент трения 0,03—0,1	Узлы трения вьюркового веретена, подшипники активатора стиральной машины и др. Бытовых приборов, текстильного оборудования и т. п.

1	2	3
ПА-ЖГрФК, ПА-ЖГрФ1К	Работает в условиях ограниченной смазки при давлении до 20 МПа; скорости скольжения от 0,5 до 12 м/с. Коэффициент трения 0,01—0,05. Малопористые материалы используются для работы без смазки при давлениях до 3 МПа. Рабочая температура до 200 °С, коэффициент трения 0,19—0,33	Подшипники и другие детали узлов трения станков, машин и механизмов
ПА-ЖГрДФК, ПА-ЖГрДФМс, ПА-ЖГрДМс	Работают в условиях ограниченной смазки и без смазки при давлениях до 2,5 МПа. Имеют низкий износ и коэффициент трения 0,08—0,12	Детали узлов трения автомобилей (шайбы, сухари, втулки), например, втулка маятникового рычага передней подвески автомобиля ГАЗ-14 и др.
ПА-ЖГрЗМ, ПА-ЖНГрЗМ	Работают в условиях ограниченной смазки и без смазки в широком диапазоне скоростей скольжения от 0,1 до 100 м/с; допустимые давления до 18 МПа, температура до 450 °С на воздухе. Имеют коэффициент трения 0,03—0,20, повышенную износостойкость по сравнению с другими материалами на основе железа. Введение никеля повышает коррозионную стойкость материала, позволяет использовать его при трении в присутствии влаги и ее паров	Подшипники верхних опор скольжения шпинделя барабанов хлопкоуборочных машин, электрометров, уплотнения бессмазочных компрессоров, приборов и др.
ПА-ЖНГрЮЦс	Предназначен для работы в воде, паре и других несмазывающих жидкостях; работает по закаленным и незакаленным поверхностям. Допустимые давления до 10 МПа, скорости скольжения до 50 м/с, температура до 250 °С; коэффициент трения 0,03—0,3 в зависимости от режима трения. Имеет в 2—6 раз более высокую износостойкость по сравнению с антегмитом, текстолитом, пласто-графитом и фторопластом	Торцовые уплотнения насосов установок по обработке молока, масла и молочных продуктов; подшипники опор скольжения моечных ванн, красильно-отделочных и сушильных агрегатов текстильной промышленности и т. п.
ПА-ЖФК, ПА-ЖФ1К, ПА-ЖФКМ	Работают в условиях ограниченной смазки при давлениях до 20 МПа, в диапазоне скоростей скольжения 0,5—6,0 м/с; рабочая температура до 200 °С; коэффициент трения 0,009—0,030. Малопористые материалы способны работать без смазки при давлениях до 3,5 МПа и скорости скольжения 0,8 м/с. Коэффициент трения 0,19—0,30.	Подшипники и другие детали узлов трения станков; машин и механизмов
ПА-ЖХ20КБ, ПА-ЖХ18Н15КБ	Предназначены для работы без смазки в воде и других агрессивных средах, при температурах до 600 °С, скоростях скольжения до 60 м/с. Имеют более высокую износостойкость в присутствии абразива, чем закаленная сталь 40Х13.	Армировочные втулки насосов водоподъема, подшипники химической аппаратуры, двигателей, приборов и т. д.

3. АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МЕДИ

В порошковой металлургии достаточно широкое распространение получили антифрикционные материалы на основе меди – бронзы. Бронзами называют медные сплавы, в которых основными легирующими элементами являются различные металлы, кроме цинка. Бронза по сравнению с латунью обладает более высокой прочностью, коррозионной стойкостью и антифрикционными свойствами. Бронза весьма стойка на воздухе, в морской воде, растворах большинства органических кислот, углекислых растворах. Большинство бронз (за исключением алюминиевых) хорошо поддаются сварке и пайке твердыми и мягкими припоями. По [8] химический состав и механические свойства антифрикционных порошковых материалов на основе меди представлены в табл. 7 и 8.

Таблица 7

Химический состав антифрикционных порошковых материалов на основе меди

Марка	Sn	C	Fe	Ni	Cr	Пористость, %	Твердость, НВ, МПа	Микроструктура
ПА-БрО	9,5-10,5	До 0,25	-	-	-	18-27	350	Однородный α -твердый раствор олова в меди, поры. Допускается присутствие эвтектоида, состоящего из твердого раствора и фазы $Cu_{31}Sn_8$
ПА-БрОГр	9,5-10,5	0,5-1,0	-	-	-	15-28	250	То же и графит
ПА-БрОГр2	9,0-11,0	1,5-2,5	-	-	-	15-25	250	-
ПА-БрОГр4	9,0-11,0	3,0-4,5	-	-	-	10-25	200	-
ПА-БрОГр	7,5-8,5	0,5-1,0	19-21	-	-	18-28	200	-
ПА-БрОХ	4,5-5,5	-	-	6,5-7,5	9,5-10,5	4-20	900	Однородный α -твердый раствор Sn и Cr в меди с включением хромсодержащей фазы, поры
ПА-БрОХН	4,5-5,5	-	-	6,5-7,5	9,5-10,5	4-20	9000	Однородный твердый раствор Cu, Ni и Cr в меди с включениями хромсодержащей фазы и соединения Ni_3Sn , поры
ПА-ДГр10	-	9,0-11,0	-	-	-	2-9	200	Медная матрица с равномерно распределенными включениями графита, поры

Таблица 8

Механические свойства антифрикционных порошковых материалов на основе меди

Марка материала	Предел прочности при изгибе, МПа	Временное сопротивление при растяжении, МПа	Ударная вязкость, кДж/м ²
	Не менее		
ПА-БрО	100	60,0	13,0
ПА-БрОГр	—	78,5	—
ПА-БрОГр2	—	70,0	—
ПА-БрОГр4	—	60,0	—
ПА-БрОЖГр	—	78,5	—
ПА-БрОХ	390	176,0	2,0
ПА-БрОХН	430	215,0	2,0
ПА-ДГр10	50		8,0

Условия работы и области применения порошковых антифрикционных материалов на основе меди представлены в табл. 9.

Таблица 9

Условия работы и области применения порошковых антифрикционных материалов на основе меди

Марка	Условия работы	Область применения
1	2	3
ПА-БрО	При смазке маслом допустимое давление до 5 МПа при скорости скольжения 2 м/с. При ограниченной смазке маслом и в режиме самосмазывания допустимое давление до 1,9 МПа при скорости скольжения до 1,5 м/с в диапазоне температур от минус 60 до + 120 °С. Не требуют дополнительной смазки в течение 3-5 тыс. часов, имеют низкий и табильный коэффициент трения (0,01-0,04), низкий уровень шума	Подшипники узлов трения приборов магнитной записи и воспроизведения, малогабаритных редукторов, электродвигателей, акустических приборов, машин по обработке пищевых продуктов, бытовых приборов, текстильных машин и др. Применяются с целью замены подшипников качения, литых сплавов на основе цветных металлов (бронз, баббитов и др.)
ПА-БрОГр, ПА-БрОГр2, ПА-БрОГр4, ПА-БрОЖГр	При смазке маслом допустимое давление до 6 МПа при скорости скольжения до 2 м/с. В режиме самосмазывания допустимое давление до 3 МПа при скорости скольжения 1-2 м/с, имеют коэффициент трения 0,03-0,06, низкий износ, бесшумны в работе	Подшипники узлов трения швейных машин, аппаратов и приборов бытовой техники, соковыжималок, фенов, магнитофонов, электрических двигателей малой мощности, конвейеров, счетно-вычислительных машин, плат малогабаритных редукторов, автомобилей, тракторов, комбайнов, мотоциклов и т. п. Заменяют оловянные литые бронзы, латуни, подшипники качения.

1	2	3
ПА-БрОХ, ПА-БрОХН	Предназначены для работы в условиях смазки при средних и тяжелых нагрузках (7-10 МПа), при незначительных скоростях скольжения (около 1 м/с). Могут подвергаться термообработке (закалке, старению), повышающей их физикомеханические свойства. Коэффициент трения при смазке до 0,1 без смазки до 0,7	Детали узлов трения для машиностроения, автостроения, приборостроения, гидронасосов, судостроения и др. Заменяют баббиты, литые бронзы типа марок Бр05Ц5С5; Бр0012; БрОЗО; БрАЖ9-4, БрАЖМц10-3-1,5 и др.
ПА-ДГр10	Предназначены для работы без смазки, при высоких скоростях скольжения (до 50 м/с), в присутствии активных жидких и газовых сред	Узлы трения насосов, приборов и др. механизмов, торцевые уплотнения быстровращающихся валов

4. ПОРИСТЫЕ ПРОНИЦАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Одним из важных направлений порошковой металлургии является создание пористых проницаемых материалов, отличительной особенностью которых является наличие взаимосвязанной системы пор. Такая система пор обеспечивает проницаемость газов и жидкостей, способность задерживать инородные включения, транспорт жидкости по капиллярам и удержание её в порах, способность поглощать энергию ударов и вибрации, рассеивать открытое пламя. Пористые проницаемые порошковые изделия характеризуются большой проницаемостью, устойчивостью к тепловым ударам, возможностью регенерации (частично или полностью восстанавливать свои фильтрующие способности), а так же имеют возможность управления их свойствами в широких пределах.

Производство пористых материалов методом порошковой металлургии включает в себя две основные технологические операции, которые определяют весь комплекс эксплуатационных свойств получаемых материалов: формование и спекание.

Бронзовые пористые проницаемые материалы

Основным сырьём таких изделий является порошок оловянистой или свинцовой бронзы. Способ изготовления включает спекание порошка свободной насыпкой в специальной технологической оснастке (нержавеющая сталь) в защитно-восстановительной атмосфере при температуре 800 ± 20 °С.

Пористые проницаемые материалы из коррозионностойкой стали

Исходным материалом является порошок коррозионностойкой стали X18N9 (ПРХ18Н9) ГОСТ 14086-79. Способ изготовления изделия включает в себя прессование при давлении 5 тс/см^2 и спекание при температуре 1300 °С. Отличительной особенностью изделий из коррозионностойкой стали является возможность применения в агрессивных средах.

Никелевые пористые проницаемые материалы

Исходным материалом является порошок никелевый карбонильный ПНК-0Т2 ГОСТ 9722-79. Способ изготовления – прессование при давлении $3 - 4 \text{ тс/см}^2$ и спекание в среде защитно-восстановительной атмосферы при температуре $1000 - 1050$ °С.

Титановые пористые проницаемые материалы

Исходным материалом являются титановые порошки восстановленные из TiO_2 гидридом кальция, а так же порошки сплавов Ti-Zr-Al. Фильтрующие элементы из порошка титана используются для фильтрации питьевой воды, соков с тонкостью фильтрации $3 - 10$ мкм, очистки воды от примесей железа, алюминия, других металлов, нитратов, бактериологических загрязнений.

Высокопористые ячеистые материалы

Исходный материал – порошки К-монеля, никелевых, медных сплавов, нихромов, керамические. Способ изготовления – осаждение металлического порошка из шликера на полимерную основу с последующим её термическим разложением, удалением и спеканием металлических частиц при температурах, зависящих от используемого материала. Размер ячеек фильтрующего элемента от $0,5$ до $5,0$ мм, пористость – 99 %.

5. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

Для изготовления слаботочных контактов используют благородные и тугоплавкие материалы (Ag, Pt, Pd, Au, W, Mo) и сплавы на их основе в виде твёрдых растворов, в том числе дисперсионноотверждающих и диффузионно-окиисленных.

Сильноточные разрывные контакты изготавливаются главным образом из металлокерамических композиций (псевдосплавов), получаемых методами порошковой металлургии. Композиции изготавливают из меди, серебра и их сплавов с небольшими примесями некоторых других элементов и веществ (W, Ni, C, CdO, CuO).

Скользящие контакты работают примерно в таких же условиях, что и разрывные, однако специфическими требованиями для них является повышенная стойкость к механическому износу и трению. Высокими свойствами обладают контактные пары, составленные из металлического и графитсодержащего материалов. Для изготовления скользящих контактов широко применяются бронзы и латуни, отличающиеся высокой механической прочностью, упругостью и износостойкостью, антифрикционными свойствами, стойкостью к атмосферной коррозии. Из неметаллических материалов для скользящих контактов наибольшее распространение получили различные углеродные и медно-графитовые материалы.

Свойства композиционных материалов-псевдосплавов приведены в табл. 10.

Таблица 10

Свойства композиционных материалов-псевдосплавов

Марка или состав материала	Плотность, кг/м ³	При растяжении		НВ	ρ, мкОм·м
		σ _в , МПа	δ, %		
КМК-Б20 (W-Cu)	12	510	-	140	0,07
КМК-Б23 (W-Cu)	15,5	680	-	240	0,1
КМК-А60 (W-Ni-Ag)	13,5	350	3	120	0,04
КМК-БМо50 (Mo-Cu)	9,5	-	-	130	0,028
КМК-А30 (Ni-Ag)	9,6	-	-	55-75	0,03

Применение композиционных материалов-псевдосплавов приведено в табл. 11.

Таблица 11

Применение композиционных материалов-псевдосплавов

Марка или состав материала	Применение
КМК-Б20 (W-Cu)	Электрические контакты и другие элементы электрических цепей, работающие при высоких температурах
КМК-Б23 (W-Cu)	
КМК-А60 (W-Ni-Ag)	Электрические контакты повышенной прочности
КМК-БМо50 (Mo-Cu)	Электрические контакты и другие элементы электрических цепей, работающие при высоких температурах
КМК-А30 (Ni-Ag)	Электрические контакты, устойчивые к электроэрозионному изнашиванию и обладающие низким и стабильным переходным электрическим сопротивлением

В табл. 12 приведены требования, предъявляемые к контактам электрокоммутационных аппаратов и материалы используемые для их производства.

Требования, предъявляемые к контактам электрокоммутационных аппаратов
и материалы используемые для их производства

Аппарат, прибор	Назначение	Режим работы	Материал, используемый для контакта
Высоковольтные выключатели (воздушные, газовые, масляные)	Коммутация постоянного и переменного тока в режиме короткого замыкания	$U > 1000 \text{ В}$ $I > 1000 \text{ А}$	Ag(Cu)-W, Ag(Cu)-Mo, Ag(Cu)-карбид вольфрама
Высоковольтные вакуумные выключатели	То же	$U > 20-35 \text{ кВ}$ $I > 2000 \text{ А}$	Cu-W Cu-Fe
Разъединители	Пропускание номинального тока в момент ремонта или ревизии выключателя в бездуговом режиме	$U < 1000 \text{ В}$ $I > 1000 \text{ А}$	Ag(Cu)-W Ag(Cu)-Mo
Короткозамыкатели	Коммутация электрического тока в условиях короткого замыкания	$I < 1000 \text{ А}$	Cu-W, Cu-карбид вольфрама, Cu-Mo
Автоматические и пакетные выключатели	Коммутация электрического постоянного и переменного тока	$U < 1000 \text{ В}$ $I < 1000 \text{ А}$	Ag(Cu)-W, Ag(Cu)-Mo, Ag-Ni, Ag-Ni-с (графит),
Переключатели, рубильники	То же	$U < 1000 \text{ В}$ $I < 1000 \text{ А}$	То же
Контроллеры, контакторы, пускатели	То же	$U < 1000 \text{ В}$ $I > 1000 \text{ А}$	Ag, Ag-Ni, Ag-Ni-C, Ag-Mo, Ag-W
Реле	То же	$10^{-6} \text{ В} - 300 \text{ В}$ $10^{-6} \text{ А} - 10 \text{ А}$	Ag-Ni, Ag-Ni-C (графит), Ag-Mo, Ag-W
Датчики	Выдача электрического сигнала	$10^{-6} \text{ В} - 360 \text{ В}$ $10^{-6} \text{ А} - 10 \text{ А}$	Ag-Ni-C (графит), Ag-Ni, Ag-Pd, Ag-Pd-Ni

6. ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ ПОЛУЧАЕМЫЕ МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Металлокерамические магниты благодаря мелкозернистой структуре характеризуется высокой однородностью магнитных свойств, хорошо шлифуются, их механическая прочность выше, чем у литых аналогичного состава, магнитные свойства обычно изотропны и несколько ниже, чем у литых.

Ферриты бариевые и стронциевые

Они твёрды и очень хрупки. Применяют в генераторах тракторов, мотороллеров; в спидометрах и тахометрах автомобилей; в бензопилах, телефонных аппаратах, в дизелях для очистки масла от продуктов износа; в микродвигателях для игрушек; в мебельных замках; для крепления сигнальных фонарей.

Редкоземельные интерметаллиды с железом или кобальтом

Они имеют наилучшие магнитные характеристики по сравнению с другими известными материалами. Значение максимального энергетического произведения, полученное в магнитах на основе интерметаллидов системы неодим-железо-бор, в несколько раз превышает аналогичное значение лучших анизотропных магнитов типа альнико. Область применения: магнитные системы микроволновых приборов, гироскопы, электродвигатели, бесконтактные магнитные подшипники и муфты, громкоговорители, томографы.

Магнитопласты и магнитоэласты

Композиционные магниты состоящие из наполнителя (порошки магнитных материалов) и связующего (различные полимеры, пластмассы, резины и т.п.). Магнитопласты отличаются более высокой однородностью магнитных свойств, большей прочностью и меньшей хрупкостью от интерметаллических магнитов. Магнитопласты являются магнитно-изотропными, поэтому их можно намагнитить в любом направлении и получить многополюсные магниты. По этой же причине их максимальная магнитная энергия ниже, чем у магнитно-анизотропных интерметаллидов.

По технологии изготовления магнитопласты делятся на прессованные и литые. Прессованные магнитопласты получают прессованием смеси магнитного порошка наполнителя со связующим. При использовании в качестве связующего эпоксидных смол объёмную долю связующего можно уменьшить до 15 – 20 % и достичь плотности магнитопласта $6,0 \text{ г/см}^2$ и более. Литые магнитопласты получают методом инъекционного литья, они содержат больше связующего (50 – 65 %) и обладают, как правило, меньшей плотностью и меньшими значениями остаточной магнитной индукции, чем прессованные магнитопласты.

В качестве магнитных наполнителей наиболее широко используют: порошки ферритов для получения эластичных магнитных лент, пластин, стержней и т.п. Применяются для уплотнителей дверей холодильников, в рекламной, канцелярской и сувенирной продукции. Порошки быстрозакалённых сплавов системы неодим-железо-бор для получения высокоэнергетических магнитопластов с максимальными магнитными свойствами. Применяют для магнитных систем широкого назначения.

7. ФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В настоящее время в машиностроении возможно применение фрикционных материалов: на основе терморезистивных смол (формованные из массы; прессованные из картона (картонно-бакелитовые) со специальной пропиткой; изготовленные из текстильной ленты с пропиткой (ткано-бакелитовые); спиральнонавитые, изготовленные из армированной нити с пропиткой; эллипсонавитые, из армированной нити, но уложенные более рациональным способом); углерод-углеродные (представляют собой композиты на основе углеродных тканей и высокомодульных волокон, используемых в тормозах самолётов, гоночных машин Формула-1, спортивных мотоциклов, высокоскоростного железнодорожного транспорта и подъёмно-транспортных устройств); асбофрикционные; кевларовые (использующиеся в электронно-управляемых автоматических трансмиссиях престижных моделей автомобилей, в частности в трансмиссии Chrysler A604); металлокерамические [9].

Все компоненты входящие в состав металлокерамических фрикционных материалов получаемых методом порошковой металлургии условно можно разделить на три категории:

- материалы основы;
- материалы смазки, предохраняющие фрикционный материал от чрезмерного износа;
- материалы, обеспечивающие высокое значение фрикционных свойств.

В общем случае использование металла в качестве материала основы обеспечивает материалу высокую теплопроводность и прирабатываемость, а так же большую величину отношения коэффициента трения материала к интенсивности его износа при торможении, что является очень важным для улучшения эффективности работы фрикционного узла.

Следует отметить, что среди большого разнообразия **материалов основы** (титан, оксид алюминия, окись меди, серый чугун, никель, алюминий и др.) наибольшее распространение получили медь для работы в условиях смазки и железо для работы без смазки. При высокой температуре на поверхности трения, медь имеющая относительно низкую температуру плавления, проявляет склонность к схватыванию с контртелом, приводящую к вырыванию частичек материала, намазыванию на стальную поверхность, нестабильности работы. Эти обстоятельства ограничивают её применение только для низкотемпературных узлов, температура на поверхностях трения которых не превышает 300 °С. При более высоких рабочих температурах на поверхностях трения (до 1000 – 1200 °С) в качестве материала основы используется железо.

Общеизвестный принцип дополнительного легирования различными элементами для улучшения комплекса свойств, применим и для фрикционных материалов. Наибольшее распространение в качестве легирующего элемента для фрикционных материалов на медной основе получило олово 8 – 12 %, дающее возможность получать α -твёрдый раствор (оловянистая бронза) с комплексом высоких прочностных, триботехнических и эксплуатационных свойств. Бронза является наиболее эффективным материалом в условиях трения, а процесс получения готового изделия характеризуется высокой технологичностью. В [2] указывается, что по результатам исследований в условиях трения со смазкой, большей износостойкостью характеризуются бронзы с однофазной гомогенной структурой. Согласно диаграмме состояния медь-олово при температуре спекания фрикционного материала на основе меди МК-5 и М-140 порядка 780 °С образуется α -твёрдый раствор в который переходит до 15 % олова.

Многими авторами отмечается, что концентрация олова в составе оловянистой бронзы существенно влияет на скорость приработки и величину износа в процессе приработки. Металлические вещества (свинец, висмут, сурьма) и не металлические (графит, дисульфид молибдена, сульфид меди, нитрид бора) являются по мнению многих авторов основными материалами, служащими **в качестве смазки** и предохраняющими фрикционный материал от чрезмерного износа и заедания узла, улучшают антизадирные свойства. Отмечается, что для материалов работающих в условиях смазки количество таких веществ значительно ниже (5 – 10 %), чем для узлов, работающих без смазки (до 20 %), из-за того, что масло в процессе работы полностью не выдавливается и образует тонкую плёнку на трущейся поверхности.

В качестве материала смазки наиболее часто используется свинец и графит. Действие графита объясняется тем, что в процессе трения чешуйки, отрываясь одна от другой, покрывают трущиеся поверхности, создавая устойчивый защитный слой.

Действие свинца как твёрдой смазки объясняется тем, что при значительном нагреве трущейся пары, содержащиеся в структуре металлокерамики обособленные частицы свинца, расплавляются и служат своего рода неметаллической смазкой. Увеличение температуры на рабочих поверхностях приводит к увеличению количества расплавленного свинца.

Увеличение содержания материалов смазки в составе фрикционного материала приводит к снижению механических свойств, коэффициента трения и повышению износостойкости. Анализ фрикционных материалов на медной основе показал, что оптимальное содержание свинца 7 - 12 %, графита до 8 %.

Свинец и графит не взаимодействуют в процессе спекания с медью. Присутствие свинца в составе фрикционного материала на медной основе представляется в виде равномерно распределённых обособленных частиц, занимающих небольшой объём.

Добавки, обеспечивающие достаточно высокий коэффициент трения, оптимальный уровень зацепления с рабочей поверхностью сопрягаемого материала и сохранения её оптимальных свойств относятся к **фрикционным**. Суммарное содержание фрикционных добавок (оксиды кремния, алюминия, железа; нитриды бора, магния, марганца, хрома, титана; карбиды бора; силициды железа; муллит; ситалл; чугун и др.) определяется энергонагруженностью узла и составляет 0,5 – 10 % в материалах для работы при сравнительно низких температурах на рабочих поверхностях, 10 – 15 % в материалах применяемых в средненагруженных узлах, 15 – 25 % и более в материалах работающих при высоких температурах на поверхностях трения (1000 °С и выше).

Влияние фрикционных добавок на свойства порошкового материала весьма сложное и не однообразное. С увеличением их количества, уменьшается плотность материала и растёт пористость, а фрикционные, прочностные характеристики и характеристики износа, в большинстве случаев, изменяются немонотонно, проходя через максимум или минимум, т.е. для каждой из добавок существует оптимум её содержания во фрикционном материале, на это указывается многими авторами. Наиболее распространённые марки металлокерамических фрикционных материалов представлены в табл. 13.

Таблица 13

Состав и физико-механические свойства фрикционных материалов

Марка материала	Состав, %	Физико-механические свойства			Коэффициент трения	Износостойкость, мкм
		пористость, %	твёрдость, НВ	плотность, г/см ³		
1	2	3	4	5	6	7
на основе железа						
ФМК-11	Fe-64; Cu-15; C-9; SiO ₂ -3; асбест-3; сернокислый барий-6	8-10	784-980	5,9	0,25-0,29 при V=20м/с, p=1,0 МПа	16
МКВ-50А	Fe-64; Cu-10; C-8; асбест-3; сернокислое железо-5; карбид кремния-5; карбид бора-5	10-12	784-980	5,8	0,21 при V=20м/с, p=1,0 МПа	30
ФМ-79	Fe-69; Cu-10; C-5; карбид кремния-6; нитрид бора-3; сернокислый барий-7	-	784-980	5,6-5,8	0,34 при V=20м/с, p=1,0 МПа	11

1	2	3	4	5	6	7
СМК-80	Fe-47; Cu-23; ферромарганец- 8,3; молибдено- вый концентрат- 2,4; карбид бора- 6,5; карбид кремния-3,2	12-18	684- 784	5,7-5,9	0,33-0,35 при V=20м/с, p=1,0 МПа	4-11,8
ФСЖ-М1	Fe-74; Cu-6; C-8; барий сернокис- лый-6; двуокись кремния-0,2; ди- сульфид молиб- дена-3; ситалл-3	-	800- 900	-	0,09-0,11 при V=20м/с, p=3,0 МПа	-
на основе меди						
МК-5	Cu 66-76; C 6-8; Fe 3-5; Sn 9-11; Pb 6-10	3-5	196- 588	6,6-7,1	8-15 мкм/1000 циклов	0,125-0,3
М-106	Cu 72; C 5; Fe 4; Sn 9; Pb 7; ас- бест 3	-	200- 600	-	0,06-0,08 при V=1м/с, p=6 МПа	-
М-140	Cu 73,5; C 4; Fe 4; Sn 9; Pb 8; муллит 1,5	-	400- 600	-	0,08-0,11 при V=8м/с, p=6 МПа	-
ФАОБ	Cu 73,5; C 8; Fe 5; Pb 7; алюми- ний-4	3-5	441- 539	6,7	0,23-0,5 при V=3,25м/с, p=1 МПа	0,001

8. МАТЕРИАЛЫ ФИРМЫ «HOGANAS»

Наиболее применяемы на западе порошковые стали, изготавливаемые из легированных порошков фирмы «Hoganas». В табл. 14 приведены механические свойства и режимы получения низколегированных порошковых сталей фирмы «Hoganas» [4].

Таблица 14

Механические свойства и режимы получения низколегированных порошковых сталей фирмы «Hoganas»

Марка	Содержание углерода, %	Плотность, г/см ³	Механические свойства					Режим спекания, дополнительное легирование
			σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	K, Дж	δ , %	HV10	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Distaloy SA	0,25/0,75	7,0	490/600	310/450	-	3,5/1,9	130/200	1120 °С, 30 мин., эндогаз
Distaloy AB	0,25/0,75	7,1	500/630	360/500	-	4,4/2,5	150/210	1120 °С, 30 мин, эндогаз
Distaloy SE	0,25/0,75	7,0	600/630	400/400	-	4,0/2,0	160/220	1120 °С, 30 мин., эндогаз
Distaloy AE	0,5/0,8	6,8	560/505	310/360	16,5/15,0	1,8/0,8	170/205	1120°С 30 мин., 90% N, +10%Н ₂
		7,1	6511/610	350.390	28,0/21,0	2,2/1,2	190/240	
		7,2	690/630	370/400	31,0/24,0	2,0/1,1	200/250	
Distaloy DC-1	0,5/0,8	6,7	520/550	405/410	10,0/10,0	1,2/1,1	150/170	1120°С, 30 мин., синт. аммиак + метан
		7,1	680/710	5(10/520	20,0/18,0	1,8/1,2	180/210	
		7,2	705/740	515/560	23,0/20,0	1,9/1,2	200/220	
Distaloy DH-I	0,25/0,6	6,6	400/520	310/400	9,0/9,0	1,3/0,8	110/150	1120°С. 30 мин.. синт. аммиак + метан
		7,0	510/700	400/510	15,0/15,0	1,5/1,4	150/190	
		7,2	600/770	450/560	21,0/21,0	2,0/1,4	180/210	
Distaloy HP-1	0,2/0,5	6,7	550/740	400/450	12,0/14,5	1,7/1,3	140/210	1120°С, 40 мин . синт. аммиак + метан
		7,1	680/980	460/520	22,5/25,0	2,6/1,8	170/280	
		7,2	730/1030	490/495	28,0/28,0	2,7/1,9	190/300	
-	0,2/0,5	6,9	720/1000	500/600	13,0/15,8	1,0/0,9	175/280	1250°С. 30 мин., синт. аммиак
		7,1	820/1180	570/700	18,5/21,5	1,2/1,1	210/320	
		7,3	1900/1320	620/800	33,5/33,5	1,9/1,2	230/380	
PNC60	-	6,9	420	310	30	7,5	140	1120°С, 30 мин.. эндогаз
	-	7,2	480	350	45	9,0	150	
	0,3	6,9	420	330	-	5,3	140	
	0,5	-	470	380	-	4,0	150	
	0,7	-	510	410	-	2,7	160	
	0,9	-	580	490	-	2,0	175	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
PASC60	-	7,0	450	310	26	7,5	150	1120°С. 30 мин.. эндогаз
	-	7,3	540	400	82	12,0	160	
	0,3	7,0	490	330	-	8,0	150	
	0,5	-	530	400	-	6,0	160	
	0,7	-	580	450	-	5,5	170	
	0,9	-	600	500	-	3,0	175	
	0,5	7,0	590	450	-	3,0	175	
	0,7	-	610	500	-	2,0	180	
0,9	-	630	530	-	1,5	195		
Aslloy CrMo	0,3/0,5	6,7	650/720	440/550	14/13	1,1/1,8	205/260	1120 °С, 30 мин., 90%N ₂ + 10%H ₂ + метан
		7,1	720/850	540/670	21/16	1,5/2,2	250/320	
		7,3	840/870	550/690		1,9/2,9	280/350	
Astaloy Mo	0,2/0,6	6,7	250/440	170/330	-	1,3/1,7	110/130	1120 °С, 30 мин., эндогаз
		7,1	320/580	200/440	-	1,5/2,4	130/175	
		7,3	380/660	220/500	-	1,7/3,3	140/210	

Механические свойства нержавеющей порошковых сталей фирмы «Hoganas» в зависимости от плотности и температуры спекания приведены в табл. 15.

Таблица 15

Механические свойства нержавеющей порошковых сталей фирмы «Hoganas»

Марка	Температура спекания, °С	Плотность, т/см ³	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел текучести, МПа	Удлинение, %	Твердость по Виккерсу (HV10)
316L	1150	6,4	300	270	2,2	122
		6,6	330	300	2,8	134
		6,8	380	330	3,9	147
		7,0	-	350	5,3	162
-	1250	6,4	330/230	270/120	6,2/11,4	120/58
		6,6	370/250	310/150	7,0/14,1	122/69
		6,8	430/290	350/170	8,7/15,5	130/78
		7,0	470/340	390/180	10,8/17,1	150/85
410L	1150	6,4	260	250	0,3	243
		6,6	280	280	0,5	276
		6,8	310	300	0,65	295
-	1250	6,6	483/230	420/150	0,55	250/66
		6,8	517/260	450/175	0,7	283/75
		7,0	570/280	475/180	1,5	320/85
430 L	1150	6,4	126	110	0,3	280
		6,6	135	128	0,4	310
-	1250	6,4	345/172	174/134	4,5/6,3	124/134
		6,6	367/203	200/136	5,3/7,1	128/155
		6,8	409/228	212/164	6,3/8,0	134/172
		7,0	434/248	233/172	7,0/8,8	140/176

9. ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Шихтоприготовление

Оперция шихтоприготовления состоит из классификации порошков по размерам частиц, смешивания. На данной технологической операции вводят технологические присадки различного назначения: пластификаторы (для снижения износа пресс-формы, увеличения плотности детализа счёт снижения коэффициента трения); легкоплавкие присадки, улучшающие процесс спекания, и различные летучие вещества, для получения деталей с заданной пористостью. Для повышения текучести порошок иногда предварительно гранулируют.

Как правило, количество пластификатора составляет 0,2 – 1,0 %, так как большее содержание приводит к росту прессовки, её разупрочнению. В табл. 16 приведены температуры плавления и кипения или диссоциации пластификаторов, применяемых в порошковой металлургии.

Таблица 16

Температура плавления и диссоциации пластификаторов

Смазка	Формула смазки	Температура плавления, °С	Температура кипения или диссоциации, °С
Стеарат цинка	$Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$	140	335
Стеарат кальция	$Ca(C_{18}H_{35}O_2)_2$	180	350
Стеарат алюминия	$Al(C_{18}H_{35}O_2)_3$	120	360
Стеарат магния	$Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$	132	360
Стеарат свинца	$Pb(C_{18}H_{35}O_2)_2$	116	360
Стеарат лития	$LiC_{18}H_{35}O_2$	221	320
Стеариновая кислота	$CH_3(CH_2)_{16}COOH$	69,4	360
Олеиновая кислота	$C_8H_{17}CH=CH-(CH_2)_7COOH$	13	286
Бензойная кислота	C_6H_5COOH	122	249
Капроновая кислота	$CH_3(CH_2)_4COONH_2$	-	205
Парафин	От $C_{22}H_{46}$ до $C_{27}H_{56}$	40-60	320-390
Дисульфид молибдена	MoS_2	1185	-
Дисульфид вольфрама	WS_2	1250	-
Сульфид марганца	MnS	1655	-
Графит	C(кристаллический)	3500	-
Трехокись молибдена	MoO_3	795	-

В практике порошковой металлургии наибольшее распространение в качестве пластификатора получили стеарат цинка и дисульфид молибдена.

Прессование

С целью получения требуемой формы изделия осуществляется операция прессования. В процессе прессования увеличивается контакт между частицами, уменьшается пористость, деформируются или разрушаются отдельные частицы. Прочность получаемой заготовки обеспечивается силами механического сцепления частиц порошка, электростатическими силами притяжения и трения. С увеличением давления прессования прочность возрастает. Давление распределяется неравномерно по высоте прессуемой заготовки из-за влияния сил трения порошка о стенки пресс-формы. Это является причиной получения заготовок с различной прочностью и пористостью по высоте. В зависимости от габаритных размеров и сложности прессуемых заготовок применяют одно- и двустороннее прессование.

Односторонним прессованием изготавливают заготовки простой формы с отношением высоты к диаметру меньше единицы и заготовки типа втулок с отношением диаметра к толщине стенки меньше трех, вследствие чего обеспечивается равномерная плотность получаемых заготовок. Двусторонним прессованием получают заготовки сложной формы, при этом требуемое давление для получения равномерной плотности уменьшается на 30 – 40 %.

При извлечении детали из пресс-формы ее размеры увеличиваются. Величина упругого последействия в направлении прессования составляет 0,3 - 0,5 % и 0,1 - 0,2 % в направлении, перпендикулярном прессованию. В табл. 17 приведены значения давлений прессования для получения требуемой плотности изделия.

Таблица 17

Режимы технологических операций для получения изделий с требуемой плотностью

Плотность, г/см ³	Режимы технологических операций
6,0 – 6,6	Давление прессования – 500 – 700 МПа, температура спекания – 1150 – 1200 °С, время – 2 часа
6,7 – 7,1	Давление прессования – 400 – 600 МПа; I спекание: температура – 800 – 850 °С, время – 1 час; допрессовка под давлением 600 – 1000 МПа; II спекание: температура – 1150 – 1200 °С, время – 2 часа
7,2 – 7,5	Давление прессования 400 – 600 МПа, спекание при температуре 1150 – 1200 °С, время – 2 часа; Нагрев до 1100 °С и штамповка под давлением 800 – 1000 МПа
7,6 – 7,8	Давление прессования 600 – 700 МПа, спекание при температуре 1100 – 1200 °С, время – 2 часа совместно с пропиткой медью или лату-нью

Спекание

Спекание проводят для повышения прочности предварительно спрессованных заготовок. В процессе спекания вследствие температурной подвижности атомов порошков одновременно протекают такие процессы, как диффузия, восстановление поверхностных окислов, рекристаллизация и др. Температура спекания обычно составляет 0,6–0,9 температуры плавления порошка однокомпонентной системы или ниже температуры плавления основного материала для порошков, в состав которых входит несколько компонентов. Процесс спекания рекомендуется проводить за три этапа: I – нагрев до температуры 150–200° С (удаление влаги); II – нагрев до 0,5 температуры спекания (снятие упругих напряжений и активное сцепление частиц); III – окончательный нагрев до температуры спекания. Время выдержки после достижения температуры спекания по всему сечению составляет 30–90 мин. Увеличение времени и температуры спекания до определенных значений приводит к увеличению прочности и плотности в результате активизации процесса образования контактных поверхностей. Превышение указанных технологических параметров может привести к снижению прочности за счет роста зерен кристаллизации. Режимы спекания для получения изделий требуемой плотности приведены в табл. 4. При содержании в смеси до 1,0 - 1,2 % графита оптимальная температура спекания составляет 1150 - 1200 °С, при содержании графита выше 1,2 - 1,5 % - 1050 - 1150 °С. Время спекания определяется масштабом садки и массой изделия, и не превышает как правило 2 часа.

Спекание изделий из порошка проводят в среде защитно-восстановительной атмосферы. Её использование необходимо для предохранения спекаемых материалов от окисления, а так же для восстановления оксидных плёнок на поверхности. Химический состав и сравнительная стоимость получения защитно-восстановительных атмосфер представлены в табл. 18 [9].

Таблица 18

Химический состав и сравнительная стоимость защитно-восстановительных атмосфер

Газ	Химический состав, %								Сравнительная стоимость, %
	H ₂	O ₂	N ₂	H ₂ O	NH ₃	CO	CO ₂	CH ₄	
Водород	99,8	0,2	-	0,5	-	-	-	-	100
Диссоциированный аммиак	75	-	25	0,01	0,02	-	-	-	30-50
Экзотермический газ	15-16	-	73,5	-	-	10	0,5	1,5	3-10
Эндотермический газ	38-40	-	38-42	-	-	18-20	1	1	5-20
Азот	-	-	95	-	-	-	-	-	20-30

С целью устранения цементитной сетки рекомендуется нормализация при 780 °С и выдержка при 680 °С в течение 1,5 часа. При закаливании пористых изделий наличие пор способствует образованию устойчивой паровой рубашки, ухудшающей теплоотвод от стенок изделий, и вызывает пятнистую твёрдость. Интенсивное перемешивание закалочной среды способствует повышению твёрдости изделий на 2 – 3 единицы. Повышение пористости уменьшает закалённую зону и способствует получению на поверхности изделий вместо структуры чистого мартенсита структуры мартенсит-бейнит или даже троостита: при переходе от поверхности в глубь изделия может наблюдаться переход от мартенситно-бейнитной структуры к троститной и даже к сорбитной (закалка в воду или водные растворы солей) или от троститной структуры к сорбитной (закалка в масло). Микротвёрдость спеченной стали после закалки составляет: при пористости 13 % 7400 – 8600 МПа, при 34 % - 6000 – 7000 МПа.

В качестве закалочной среды рекомендуется вода или водные растворы солей, для сталей склонных к охрупчиванию и коррозионному растрескиванию предпочтительнее применение масла.

Изделия, полученные методом порошковой металлургии, могут подвергаться химико-термической обработке: борированию, цементации, азотирование, нитроцементация, цианирование, алитирование (для повышения твёрдости и износостойкости); силицированию (для повышения коррозионной стойкости изделий работающих в агрессивных средах); хромированию (для повышения износостойкости, коррозионной стойкости и окалиностойкости); цинкованию (для повышения коррозионной стойкости). В табл. 19 приведены технологические режимы химико-термической обработки изделий полученных методом порошковой металлургии.

Таблица 19

Режимы химико-термической обработки порошковых изделий

Наименование процесса	Состав насыщающей среды	Режим процесса	Твёрдость
1	2	3	4
Цементация газовая	Смесь эндогаза и городского газа (16-20%CO, 12-16%, CH ₄ +C ₂ H ₆ , 303-40%H ₂)	950 °С, 6-12 ч, глубина слоя – 0,6-1,4 мм	58-64 HRC
Цементация в твёрдом карбюраторе	Древесный уголь 70-76%, CaCO ₃ <3,5%, BaCO ₃ 20-25%	920-930 °С, 6-16 ч, глубина слоя – 0,6-1,8 мм	58-64 HRC (после закалки и низкотемпературного отпуска)
Азотирование газовое	Продукт диссоциированного аммиака NH ₃ при степени диссоциации 15-50%	540-560 °С, 35-65 ч, глубина слоя – 0,5-0,7 мм	9500-10000 МПа

1	2	3	4
Нитроцементация	Эндогаз 80-90%, природный газ 5-8%, аммиак 2,5-5%	840-870 °С, 8-9 ч, глубина слоя – 0,8-1,0 мм	60 HRC (после закалки и низкотемпературного отпуска)
Цианирование высокотемпературное	При расплавлении 50% NaCN, 50% NaCl	840-950 °С, 1 ч, глубина слоя – 0,20-0,25 мм	9800 – 11500 МПа (изделия с плотностью более 7,2 г/см ³)
Алитирование в порошковых смесях	Алюминий (пудра или порошок) – 49%, Al ₂ O ₃ -49%; NH ₄ Cl-2%	900-950 °С, 2-12 ч, глубина слоя – 0,1-1,0 мм	3400 – 3900 МПа (процесс ведётся в среде азота или водорода)

Калибрование

В порошковой металлургии возможно применение двух методов калибрования: отдельное калибрование по внутреннему и наружному диаметрам и комбинированное (объёмное) - одновременно по наружному и внутреннему диаметрам. На практике наиболее часто применяют комбинированный метод.

К главным факторам, определяющим усилие калибрования, относятся размеры калибруемых изделий, толщина стенок, пористость, материал изделий, припуск на калибровку. При выборе калибрующего оборудования принимается расчётное усилие калибрования равное 40-120 % усилия прессования, при этом: при калибровании по внутреннему и внешнему диаметрам усилие калибрования должно составлять 40-50 %; при объёмном 100-120 %.

Точность размеров прессованных не термообработанных изделий соответствует: для высотных размеров 12 - 14 квалитетам, для диаметральных – 6 - 8 квалитетам.

При проектировании пресс-форм на калибровку следует учитывать явление упругого последействия. Так в табл. 20 приведены значения упругого последействия при различной пористости и значения калибруемого размера.

Таблица 20

Влияние упругого последействия (%) к припуску на калибрование

Пористость, %	Калибровочный припуск (%) от калибровочного размера		
	0,5	1,0	1,5
15,0	0,12	0,2	0,3
22,5	0,1	0,15	0,2
30,0	0,06	0,1	0,15

Точность размеров после операции калибрования определяется в основном точностью прессового оборудования и используемой технологической оснастки.

Наружный и внутренний диаметры изделий калибруются с разными припусками, так: наружный - по возможности с большим (обеспечивая надлежащую прочность посадки и закрытие пор); внутренний – по возможности меньшим (чтобы выровнять имеющую шероховатость, упрочнить и уплотнить материал). Применение очень больших припусков на калибровку наружного диаметра нецелесообразно, так как приводит к резкому возрастанию высоты калибровочных пресс-форм за счёт удлинения заходной части, а так же переуплотнению всего объёма изделия или даже появлению поясных трещин на втулке.

В табл. 21 приведены калибровочные припуски наружного диаметра при калибровании изделий из железного графита и железа при различной пористости.

Калибровочные припуски для калибрования наружного диаметра

Материал	Пористость, %	Калибровочный припуск (%) от калибруемого размера		
		минимальный	средний	максимальный
железографит	15,0	0,5	0,7	0,8
	22,5	0,8	1,0	1,2
	30,0	1,0	1,2	1,5
железо	15,0	0,6	0,8	0,9
	22,5	0,9	1,2	1,3
	30,0	1,2	1,4	1,6

Минимальные припуски следует применять тогда, когда условия работы изделий характеризуются небольшими и спокойными нагрузками, а так же в том случае, если толщина стенок втулки не превосходит 3 мм и отношение длины втулки к диаметру не менее двух.

Максимальный припуск рекомендуется применять для изделий, работающих в тяжёлых условиях, а так же когда соотношение длины и диаметра втулки близко к единице.

Среднее значение припуска может применяться всюду, где условия работы не относятся к категории тяжёлых.

Особенность выбора припуска на калибрование внутренней поверхности втулки состоит в том, что его величина не связана с размерами изделия. Эту величину необходимо согласовать с характеристиками условий эксплуатации, исходной шероховатостью спеченной поверхности и спецификой деформируемости материала.

Для повышения качества калиброванной поверхности минимальное значение калибровочного припуска для поверхности трения должна превосходить высоту микронеровностей спеченной поверхности в 2 – 2,5 раза, то есть минимальный припуск для калибрования поверхностей трения должен быть не менее 2,5 или 0,2 – 0,3 мм.

Увеличение минимального припуска при объёмном калибровании не вызывает существенного изменения наклёпа, а уплотнение пористого каркаса растёт значительно. С учётом этого не рекомендуется принимать калибровочные припуски для калибрования поверхностей трения более 0,5 мм не зависимо от размера втулки.

Парооксидирование

Одним из методов позволяющих повысить антифрикционные и коррозионные характеристики изделий является оксидирование. В технологии порошковой металлургии получило распространение паротермическое оксидирование, суть которого состоит в создании оксидной плёнки перегретым паром. Процесс состоит в нагреве до температуры 350 – 370 °С, выдержка 20-30 минут, подача нагретого пара до температуры 250 – 280 °С, подъём температуры до 550 °С и выдержки в течение 1,5 часа. При этом на поверхности формируется оксидная плёнка толщиной 10-18 мкм состоящая из магнетита (Fe₃O₄) и незначительного (0,2 – 2,3 %) количества α-Fe₂O₃.

ЛИТЕРАТУРА

1. Материалы конструкционные порошковые на основе железа. ГОСТ 28378-89. Введ. 19.12.1989. – М.: Стандартиформ, 2006. – 18 с.
2. Витязь, П. А. Порошковые материалы на основе железа и меди. Атлас структур / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Белорус. наука, 2008. – 155 с.
3. Шатт, В. Порошковая металлургия. Спеченные композиционные материалы / В. Шатт. – М.: Металлургия, 1983.-520 с.
4. Дьячкова, Л. Н. Порошковые материалы на основе железа / Л.Н. Дьячкова, Л.Ф. Керженцева, Л.В. Маркова. – Минск: Тонпик, 2004. – 228 с.
5. Гуляев, А. П. Металловедение/ А. П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. 544 с.
6. Материалы антифрикционные порошковые на основе железа. ГОСТ 26802-86. Введ. 20.01.1986. – М.: Госстандарт СССР, 1986. – 16 с.
7. Материалы антифрикционные порошковые на основе меди. Марки. ГОСТ 26719-85. Введ. 19.12.1985. – М.: Госстандарт СССР, 1985. – 12 с.
8. Зельцерман, И.М. Фрикционные муфты и тормоза гусеничных машин / И.М. Зельцерман, Д.М. Кашинский. – М.: Машиностроение, 1965. – 239 с.
9. Белов, С.В. Пористые проницаемые материалы / С.В. Белов. – М.: Металлургия, 1987. – 335 с.