



Л.Н. ТЯЛИНА, А.М. МИНАЕВ, В.А. ПРУЧКИН

**НОВЫЕ
КОМПОЗИЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ**

◆ Издательство ГОУ ВПО ТГТУ ◆

Учебное издание

ТЯЛИНА Людмила Николаевна,
МИНАЕВ Александр Михайлович,
ПРУЧКИН Владимир Аркадьевич

НОВЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Учебное пособие

Редактор З.Г. Чернова
Инженер по компьютерному макетированию И.В. Евсеева

Подписано в печать 28.03.2011
Формат 60×84/16. 4,65 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 183

Издательско-полиграфический центр ГОУ ВПО ТГТУ
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Тамбовский государственный технический университет"

Л.Н. Тялина, А.М. Минаев, В.А. Пручкин

НОВЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Утверждено Учёным советом университета
в качестве учебного пособия
для студентов 2 и 3 курсов
специальностей 190600, 110800.01, 110800.02
дневной и заочной форм обучения



Тамбов
◆Издательство ГОУ ВПО ТГТУ◆
2011

УДК 669.1(075.8)
ББК К2я73
Т548

Рецензенты:

Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры физики ГОУ ВПО ТГТУ
А.М. Подкаура

Доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой общей физики
ГОУ ВПО ТГУ им. Г.Р. Державина
В.А. Федоров

Тялина, Л.Н.

Т548 Новые композиционные материалы : учебное пособие /
Л.Н. Тялина, А.М. Минаев, В.А. Пручкин. – Тамбов : Изд-во
ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 80 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-0988-3.

Изложены теоретические основы проектирования и изготовления композиционных материалов. Даны лабораторные работы, задание для студентов заочной формы обучения и ИДО. В приложении представлены справочные данные и алгоритм проектирования пресс-формы.

Предназначено для студентов специальностей 190600, 110800.01, 110800.02.

УДК 669.1(075.8)
ББК К2я73

ISBN 978-5-8265-0988-3

© Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тамбовский государственный технический университет" (ГОУ ВПО ТГТУ), 2011

ВВЕДЕНИЕ

Повышение прочностных свойств конструкционных материалов является важнейшей проблемой в машиностроении. Однако по мере увеличения прочности материалов происходит резкое снижение их пластичности, увеличивается склонность к хрупкому разрушению. Это сильно ограничивает использование высокопрочных материалов в качестве конструкционного материала.

Создание материалов, представляющих собой композиции из мягкой матрицы и распределённых в ней высокопрочных волокон второй фазы (обычно более прочной, чем матрица), значительно расширяет их эксплуатационные возможности.

За последние годы был создан ряд искусственных композитов на металлической и неметаллической основе, армированных неорганическими волокнами высокой прочности и жёсткости, нитевидными кристаллами, неорганическими частицами. В качестве волокон используют "нитевидные усы" различных кристаллов, тонкие кварцевые волокна из SiO_2 , SiC , Al_2O_3 , полученные путём направленной кристаллизации или осаждения из паров на тонкую проволоку и др. Общим для этих искусственных композиционных материалов является то, что они представляют объёмное сочетание разнородных компонентов, один из которых пластичный (связующее), а другой обладает высокой прочностью и жёсткостью (наполнитель). Кроме того композиции обладают такими свойствами, которые не имеют отдельные составляющие.

Чтобы композиционный материал воспринял нагрузку наиболее полно всеми составляющими, его структура должна отвечать определённым требованиям.

Во-первых, в композите должна быть достаточная объёмная доля армированных волокон критической длины.

Во-вторых, необходима прочная связь высокопрочных волокон с пластичной матрицей.

В-третьих, дискретные армирующие матрицу волокна будут в значительной степени нагружены и возможно определять прочность композиции лишь в том случае, когда отношение длины частиц к их толщине становится большим некоторой величины, равной $\sigma_f / 2\tau$, где σ_f – прочность волокон на разрыв и τ – напряжение сдвига на поверхности раздела матрица-волокно.

В-четвёртых, волокна композиции должны быть строго ориентированы вдоль оси деформации, поскольку от этого в сильной степени зависит прочность композиции [1]. Разориентировка волокон более $10...15^\circ$ значительно уменьшает прочность, оказывает влияние

на механизм передачи нагрузки от матрицы к волокну и на вид разрушения композиции.

Очень важную роль в композициях играют внутренние поверхности раздела, так как именно через поверхности раздела передаются напряжения от матрицы к волокнам. Передача усилий от матрицы к волокну может происходить только при наличии между ними прочной связи. Получение такой связи между двумя различными материалами ограничивает число пар материалов, которые могут быть использованы для создания композиций. В искусственных композициях на поверхностях раздела часто происходят нежелательные реакции при эксплуатации материала. Некоторые из этих реакций сильно понижают прочность связи волокон с матрицей и, как следствие, прочность композиции в целом.

Главная задача при создании композиционного материала – это нагрузить высокопрочные частицы при течении матрицы. Для этого необходимо изготовить частицы второй фазы в виде длинных волокон и расположить их параллельно друг другу. Течение матрицы параллельно оси волокон заставляет их упруго растягиваться, если волокна прочно связаны с матрицей. Волокна препятствуют течению, и в результате деформации композиции происходит упрочнение (наклёп), как только будет превзойдён предел текучести материала матрицы.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

1. ИСКУССТВЕННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Композиционными называют сложные материалы, в состав которых входят сильно отличающиеся по свойствам нерастворимые или мало растворимые друг в друге компоненты, разделённые в материале ярко выраженной границей.

Свойства композиционных материалов в основном зависят от физико-механических свойств компонентов и прочности связи между ними. Отличительной особенностью композиционных материалов является то, что в них проявляются достоинства компонентов, а не их недостатки. Вместе с тем композиционным материалам присущи свойства, которыми не обладают отдельные компоненты, входящие в их состав. Для оптимизации свойств выбирают компоненты с резко отличающимися, но дополнительными друг от друга свойствами.

1.1. СТРОЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Основой композиционных материалов (матриц) служат металлы или сплавы (композиционные материалы на металлической основе), керамики, а также полимеры, углеродные и керамические материалы (композиционные материалы на неметаллической основе). Матрица связывает композицию и придаёт ей форму. От свойств матрицы в значительной степени зависят технологические режимы получения композиционных материалов и такие важные эксплуатационные характеристики, как рабочая температура, сопротивление усталостному разрушению, воздействию окружающей среды, плотность и удельная прочность.

Созданы композиционные материалы с комбинированными матрицами, состоящие из двух и более различных по химическому составу слоёв. Композиционные материалы с комбинированными матрицами называются полиматричными. Для них характерен более обширный перечень полезных свойств.

В матрице равномерно распределены наполнители, которые называют ещё упрочнителями, так как они играют главную роль в повышении прочности материала. Наполнители называют ещё армирующими компонентами.

Свойства композиционного материала зависят от формы или геометрии, размера, количества и характера распределения наполнителя. По форме наполнители разделяют на три основные группы (рис. 1.1): нульмерные, одномерные, двумерные.

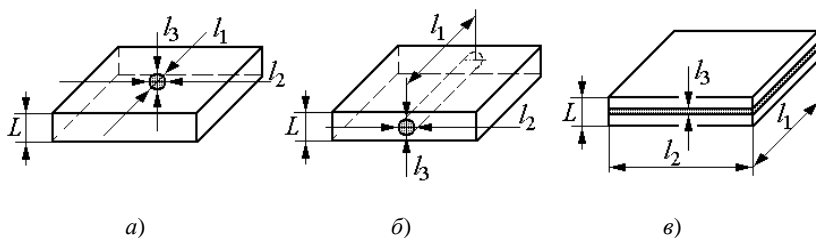


Рис. 1.1. Формы наполнителей:
 а – нульмерные; б – одномерные; в – двумерные;
 l_1, l_2, l_3 – размеры наполнителя; L – толщина матрицы

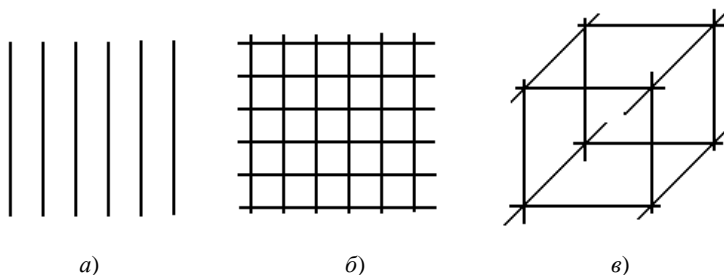


Рис. 1.2. Схемы армирования:
 а – одноосное; б – двухосное; в – трехосное

По форме наполнителя композиционные материалы разделяют на дисперсно-упрочненные, волокнистые и слоистые. *Дисперсно-упрочненными* называют композиционные материалы, упрочненные нульмерными наполнителями, а волокнистыми – упрочненные одномерными, слоистыми – двумерными наполнителями.

По схеме армирования (рис. 1.2) *волокнистые композиционные материалы* подразделяют на три группы: с одноосным, двухосным и трехосным (пространственным) армированием.

При одноосном армировании содержание наполнителя составляет 1...5%, при двухосном – 15...16%, при трехосном – более 15%.

В *слоистых композитах* в качестве наполнителя применяют плоские листы бумаги, ткани или асбеста.

Для расширения комплекса свойств или усиления какого-либо свойства могут быть использованы одновременно наполнители разной формы (одномерные и нульмерные) или наполнители одной формы, но разного состава. Композиционные материалы, которые содержат два и более различных наполнителя, называют полиармированными.

1.2. ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЁННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В отличие от волокнистых в дисперсно-упрочнённых материалах матрица является основным элементом, несущим нагрузку. Дисперсные частицы тормозят в металле движение дислокаций, увеличивая его прочность при нормальной и повышенных температурах. Преимуществом таких материалов в отличие от волокнистых является изотропность свойств.

Высокая прочность достигается при размере частиц упрочнителя 0,01...0,1 мкм. Объёмное содержание частиц зависит от схемы армирования, но обычно не превышает 5...10 объёмных процентов.

В качестве упрочняющих фаз используются частицы тугоплавких фаз – оксидов, нитридов, боридов, карбидов (Al_2O_3 , SiO_2 , BN, SiC и др.). Дисперсно-упрочнённые композиционные материалы в основном получают порошковой металлургией или введением наполнителей в жидкий металл перед разливкой.

Наиболее широко применяются дисперсно-упрочнённые композиционные материалы на основе алюминия и никеля.

Материалы на основе алюминия называются спечённым алюминиевым порошком (САП) и состоят из алюминия и чешуек Al_2O_3 (в количестве до 18%). Материал САП (табл. 1.1) характеризуется высокой прочностью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью и термической стабильностью свойств. С увеличением содержания окиси алюминия повышается прочность, твёрдость, жаропрочность и уменьшается пластичность.

САП хорошо деформируется в горячем состоянии, хуже в холодном, легко обрабатывается резанием, удовлетворительно сваривается контактной, аргонодуговой сваркой. Выпускают из САП листы, профили, штамповые заготовки, фольгу.

Из САП изготавливают поршневые штоки, лопатки компрессоров, лопасти вентиляторов и турбин, обмотки трансформаторов и т.п.

1.1. Механические свойства САП

Материал	Содержание Al_2O_3 , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
САП-1	6...8	300	220	7
САП-2	9...12	350	280	5
САП-3	13...17	400	320	3
САП-4	18...22	450	370	1,5

В материалах на основе никеля в качестве матрицы используют никель и его сплавы с хромом (до 20%) со структурой твёрдых растворов. Упрочнителями служат частицы оксидов тория и гафния. Наибольшее упрочнение достигается при содержании 3,5...4% окиси гафния: $\sigma_B = 750 \dots 850$ МПа, $\delta = 8 \dots 12\%$.

Материалы на основе никеля обладают высокой жаростойкостью, стойкостью к разупрочнению с повышением температуры. Области применения этих материалов не ограничены. Их использование позволяет резко увеличить мощность двигателей, энергетических и транспортных установок, уменьшить массу машин и приборов.

1.3. СТРОЕНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В волокнистых композитах упрочнителями служат волокна или нитевидные кристаллы чистых элементов и тугоплавких соединений (В, С, Al_2O_3 , SiC и др.), а также проволока из металлов и сплавов (Mo, W, Be, высокопрочная сталь и др.) Для армирования используются непрерывные и дискретные волокна диаметром от долей до сотен микрон.

Теоретические расчёты (рис. 1.3), подтверждённые практикой показали, что чем меньше диаметр волокна-упрочнителя d , т.е. чем больше отношение его длины l к диаметру l/d , тем выше степень упрочнения $\sigma_B^{KM} / \sigma_B^B$, где σ_B^{KM} – прочность композиционного материала, σ_B^B .

Прочность композиционных волокнистых материалов определяется свойствами волокон; матрица в основном должна перераспределить напряжения между армирующими элементами.

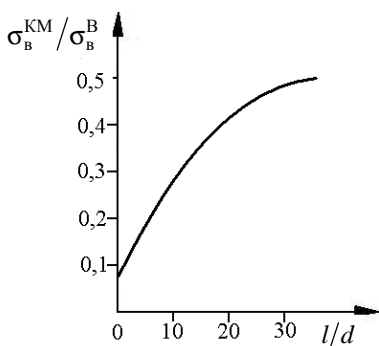


Рис. 1.3. Теоретическая кривая упрочнения волокнистого композита:

l – длина упрочнителя;
 d – диаметр упрочнителя

Жёсткие армирующие волокна воспринимают напряжения, возникающие в композиции при нагружении, придают ей прочность и жёсткость в направлении ориентации волокон.

Матрица может передавать напряжения волокнам только в том случае, когда существует прочная связь на поверхности раздела армирующее волокно-матрица, она должна полностью окружать

все волокна, что достигается при содержании её не менее 15...20%. Матрица и волокно не должны между собой взаимодействовать (не должно быть взаимной диффузии) при изготовлении и эксплуатации, так как это приводит к снижению прочности. Связь между матрицей и волокном обеспечивается благодаря адгезии фаз за счёт действия межатомных сил. Если поверхностное натяжение на границе матрицы и наполнителя велико, на волокно наносят специальное покрытие, формирующее переходный слой.

Волокна в композиционном материале уменьшают скорость распространения трещин, зарождающихся в матрице, и практически полностью исключают внезапное хрупкое разрушение.

В одноосных композиционных материалах существует анизотропия механических свойств (вдоль и поперёк волокон).

1.4. ВИДЫ И СВОЙСТВА ВОЛОКНИСТЫХ УПРОЧНИТЕЛЕЙ

Металлические упрочнители:

стальная проволока (коррозионно-стойкая сталь) для армирования алюминия;

проволока из Mo, W, Ta – для армирования жаропрочных матриц;

проволока из бериллия обладает большой удельной прочностью и малой плотностью, применяется для армирования алюминия, магния, титана.

Волокна:

борные волокна обладают высокой прочностью, твёрдостью, малой склонностью к разрушению при повышении температуры; волокна бора имеют диаметр 70...200 мкм; используют их для армирования металлических и полимерных матриц; получают волокна осаждением из соединений бора на вольфрамовую проволоку;

углеродистые волокна обладают высокой удельной прочностью и термической стабильностью механических свойств; их получают путём высокотемпературной обработки в инертной среде из синтетических органических волокон (вискоза, полиакрилонитрил); в зависимости от вида исходного продукта углеродистые волокна имеют разновидности: нити, жгуты, ткани, ленты, войлок; применяют для армирования алюминия и магния;

керамические волокна оксидов, нитридов, карбидов (карбид кремния, оксид алюминия) характеризуются высокими твёрдостью, прочностью, высокой термической стабильностью, применяют для армирования алюминия и магния;

нитевидные кристаллы – сапфир Al_2O_3 , карбид кремния используют для армирования титана;

стекловолокно характеризуется прочностью, теплостойкостью, диэлектрическими свойствами, низкой теплопроводностью; получают волокна продавливанием стекломассы через специальные фильтры; применяют для получения теплоизоляционных материалов, конструкционных материалов.

Группы композиционных материалов, армированных однотипными волокнами, имеют специальные названия, данные им по названию волокна.

Карбоволокниты – содержат углеродные волокна (упрочнитель). Сохраняют прочность при температурах до 2200 °С, а также при низких температурах. Они водо- и химически стойкие. Прочность до 1000 МПа.

Используют карбоволокниты в судо- и автомобилестроении (кузова гоночных машин, шасси, гребные винты); для изготовления подшипников, панелей отопления, частей ЭВМ.

Стекловолокониты содержат стеклянные волокна; при содержании волокон до 80% временное сопротивление разрыву достигает 700 МПа. Обладают хладостойкостью (до –196 °С) и хорошей теплоустойкостью (до 400 °С); хорошо работают при виброн нагрузках; они не дефицитны и дешевы. Недостатком стекловолоконитов является низкий модуль упругости.

Применяют стекловолокониты для изготовления деталей высокой точности с арматурой и резьбой.

Бороволокниты – упрочнитель – борные волокна; матрица – эпоксидная и полиамидная смолы. Отличаются высокой прочностью при сжатии, сдвиге, срезе; низкой ползучестью, высокими твёрдостью и модулем упругости, тепло- и электропроводимостью. Бороволокниты стойки к воздействию радиации, воды, органических растворителей и горючесмазочных материалов.

Из бороволокнитов изготавливают профили, панели, роторы и лопатки компрессоров, лопасти винтов и трансмиссионные валы вертолётов и т.д.

Оргаволокниты имеют полимерные связующие и наполнители – синтетические волокна. Обладают малой массой, стабильны при действии знакопеременных нагрузок и резкой смене температуры. Недостатками являются: низкая прочность при сжатии; высокая ползучесть (особенно эластичных волокон). Оргаволокниты устойчивы в агрессивных средах и во влажном тропическом климате; имеют высокие диэлектрические свойства и низкую теплопроводность.

Применяют оргаволокниты как изоляционный и конструкционный материал в электро- и радиопромышленности, автостроении, авиастроении. Из оргаволокнитов изготавливают трубы, ёмкости для реактивов, покрытия корпусов судов и т.д.

1.5. СЛОИСТЫЕ ПЛАСТИКИ

В слоистых пластиках наполнитель находится в виде листов, тканей, матов, ровницы.

Древесно-слоистые пластики (ДСП) состоят из древесного шпона, пропитанного фенолоформальдегидной и крезолоформальдегидной смолами.

ДСП обладают высокими физико-механическими свойствами; низким коэффициентом трения. Недостатком является чувствительность к влаге.

Из ДСП изготавливают: шестерни, которые хорошо работают в паре с металлическими (при этом снижается шум); подшипники, которые не образуют задиры на валу; шкивы, втулки, корпуса насосов, детали автомобилей и железнодорожных вагонов; детали лодок и т.д.

Гетинакс относится к слоистым композитам и состоит из бумаги, пропитанной смолами (фенолоформальдегидной и др.)

Гетинакс имеет хорошие электроизоляционные свойства, высокую механическую прочность, но уступает текстолитам.

Текстолиты имеют ткань в качестве наполнителя, а пропитка осуществляется фенолоформальдегидной, кремнийорганической или эпоксидной смолой в зависимости от требуемого уровня свойств материала.

Конструкционные текстолиты (наполнитель – хлопчатобумажная или синтетическая ткань, пропитка фенолоформальдегидной смолой); они имеют низкий коэффициент трения, высокую износостойкость, работают в трансформаторном масле при температурах от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Из текстолита изготавливают бесшумные зубчатые и червячные колёса, подшипники скольжения, печатные платы для электротехники и т.д.

Асботекстолит содержит до 43% связующего, остальное – асбестовая ткань. Обладает теплостойкостью до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и механической прочностью.

Применяют асботекстолит как конструкционный, фрикционный и термоизоляционный материал, который выдерживает в течение 1...4 часов температуру $250\text{...}500\text{ }^{\circ}\text{C}$, а кратковременно $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше. Делают из асботекстолита лопатки ротационных бензонасосов, фрикционные диски, тормозные колодки.

Стеклотекстолит имеет в качестве наполнителя стеклянные ткани, а связующим являются фенолоформальдегидные, кремнийорганические, эпоксидные смолы.

Стеклотекстолит обладает высокой теплостойкостью, морозостойкостью, стойкостью к окислителям и другим химическим реагентам.

Из стеклотекстолита изготавливают печатные платы в радиоэлектронике, цистерны корпуса лодок и катеров, кузова автомобилей, реакционные аппараты, насосы, трубы и т.д.

1.6. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ

Все композиционные материалы на неметаллической основе делят на пресс-порошки и пресс-материалы. Пресс-порошками называют композиционные пластмассы с порошкообразным органическим (древесная мука, целлюлоза) или минеральным наполнителем.

Пресс-материалы – это пластмассы с волокнистым наполнителем (хлопковые очёсы; асбестовые, стеклянные, хлопчатобумажные волокна и др.)

В качестве связующего применяют различные полимеры – синтетические смолы: фенолоформальдегидные, карбамидные, эпоксидные, полиэфирные, кремнийорганические и другие.

Пресс-порошки и пресс-материалы относятся к термореактивным пластмассам и предназначены для переработки в изделия методом прессования.

Полуфабрикаты этих пластмасс выполняют в виде порошков, крошкообразных и волокнистых материалов, лент, рубленых и пропитанных смолою волокон, предварительно отформованных таблеток. Возможна поставка полуфабрикатов в виде вязких композиций.

Применение: корпуса приборов, различные панели, рукоятки, электро- и радиотехнические изделия (разъёмы, изоляторы), подшипники скольжения, тормозные колодки и диски, опорные и распределительные устройства химических аппаратов, детали насосов, краны, трубы и трубная арматура, изделия бытового назначения и т.д.

1.7. МЕТОДЫ ФОРМОВКИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ И СТЕКЛОВОЛОКНИТОВ

Все методы обработки композиционных материалов на неметаллической основе можно разделить на две группы:

1 группа – для неё характерно совместное движение связующего и наполнителя в каналах и рабочих органах машины и полостях формирующего инструмента. Это все виды прессования, литьё под давлением, экструзия, пултрузия и др. Как правило, при таких методах получается изотропный материал.

2 группа – это специфические методы формования крупногабаритных изделий, характеризующихся анизотропной структурой (оболочки химических аппаратов, трубы, обечайки, цистерны, строитель-

ные панели и кровли, кузова автомобилей, корпуса лодок, судов, самолетов и т.д.).

Особенностью этих методов является ограниченная подвижность наполнителя на стадии его совмещения со связующим материалом. Определяющей операцией здесь является пропитка связующим волокнистого наполнителя.

Процесс ведут на специальном оборудовании; он включает в себя следующие операции: подготовку связующего и наполнителя, совмещение связующего и наполнителя, формование изделий.

Методы формования: контактное формование, формование с помощью эластичной диафрагмы; напыление; пропитка под давлением в замкнутой форме; намотка; центробежное формование; протяжка.

Литье под давлением – это высокопроизводительный и автоматизированный метод. Основные операции: подогрев материала (пластификация); впрыск (заполнение формы); выдержка под давлением или выдержка на охлаждение (отверждение); удаление отливки. Все операции проводят в литьевых машинах.

Прессование – осуществляется с помощью приложения внешнего давления к нагретому материалу, загружаемому требуемыми дозами в пресс-форму. Оформление и отверждение изделия происходит в горячей пресс-форме.

Экструзия – это процесс получения изделия путём непрерывного продавливания через формирующий инструмент. В процессе переработки исходный материал из загрузочного устройства поступает на червяк и перемещается в осевом направлении в винтовом канале, образованном внутренней поверхностью цилиндра и нарезкой червяка. При перемещении материал уплотняется, расплавляется, происходит удаление воздуха, развивается давление, под действием которого расплав продавливается через охлаждаемый формирующий инструмент.

Контактное формование (ручная выкладка) – применяется для изготовления различных строительных конструкций, корпусов лодок, кузовов автомобилей, оболочек химических аппаратов и т.д.

Наполнитель в виде холста, ткани, матов послойно укладывается на поверхность формы, пропитывается связующим с помощью кисти или распылительного устройства. Далее формируемое изделие прокатывается рельефным валиком для удаления воздуха и уплотнения материала. Затем закрывается плёнкой и ещё раз прокатывается валиком для удаления воздуха и удаления избытка связующего. Разновидностью этого метода является формование с помощью эластичного мешка. Здесь дополнительное уплотнение материала проводится ре-

зиновой диафрагмой, прижимаемой к открытой поверхности изделия с помощью вакуума или давления. Также формируют на надувной эластичной форме с последующим уплотнением при повышении давления в форме.

Отверждение отформованного изделия происходит на форме при комнатной температуре или повышенных температурах в зависимости от связующего и отвердителя.

Достоинством этого метода является его универсальность, т.е. возможность формования изделий практически любой формы и размеров.

Формование напылением – на форму с помощью специальной машины одновременно наносится рубленое волокно и связующее. После нанесения определённого количества материала следует операция прокатки валиком для удаления воздуха.

Этот метод более производительен, чем метод контактного формования, однако трудно изготавливать изделия сложной формы. Кроме этого применение коротких по длине волокон снижает уровень механических свойств.

Пропитка под давлением в замкнутой форме – непропитанный сухой наполнитель укладывается на пуансоне, после чего матрица с пуансоном смыкаются, полость формы герметизируется и связующее под давлением нагнетается в форму, пропитывая наполнитель. Эффект пропитки может быть усилен с использованием дополнительного давления и вакуума.

Метод намотки. Принципиальная схема этого процесса состоит в том, что на вращающуюся форму (оправку) непрерывно укладывают наполнитель в виде нитей, жгутов и лент. Применяют два способа: мокрый и сухой. При мокром способе смола наносится на нить или жгут наполнителя в промежуточной ванне в процессе самой намотки.

При сухом способе на оправку наматывается наполнитель в виде жгута из 50 – 200 непрерывных нитей или лент, который пропитывается в ванне со смолой и вытягивается через нагретую фильеру, в которой происходит промежуточная полимеризация (такой процесс называется *пултрузия*). В качестве связующего используются фенолоформальдегидная и полиэфирные смолы.

Этим способом изготавливают изделия типа тел вращения: химические аппараты, ёмкости, трубы, элементы конструкций самолётов и ракет.

Достоинствами метода являются: возможность механизации и автоматизации процесса, высокая производительность, возможность получения изделия с высокими прочностными и другими свойствами, что часто достигается выбором типа наполнителя, схемы его укладки на форму, изменением натяжения нити во время намотки и т.д.

Центробежное формование – используется в основном для изготовления труб. Процесс основан на пропитке предварительно уплотнённого наполнителя связующим под действием центробежных сил.

Протяжка – пропитанные связующим жгуты наполнителя проходят через формирующее устройство и протягиваются валками через термокамеру для отверждения отформованного изделия. Метод применим для изготовления труб и профильных изделий высокой прочности вдоль ориентации наполнителя. Процесс высокопроизводителен и поддается механизации.

2. ЕСТЕСТВЕННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ. НАПРАВЛЕННАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

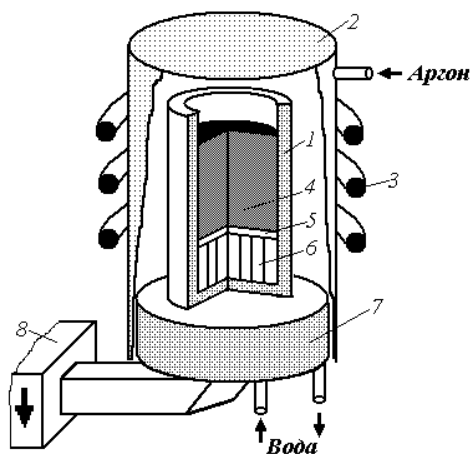
Для получения естественных композиционных материалов (ЕКМ) известны в настоящее время три способа: направленная кристаллизация эвтектик, термомеханическая обработка (ТМО) с деформацией при температурах между A_1 и A_3 и направленный эвтектоидный распад деформированного аустенита [2].

Направленная кристаллизация эвтектического сплава осуществляется за счёт создания температурного градиента. Этот процесс близок к выращиванию однофазных кристаллов из расплавленного металла. Однако присутствие двух и более фаз вносит изменения в направленную кристаллизацию.

Процесс направленной кристаллизации можно вести либо по методу П.В. Бриджмена, либо зонной плавкой. В первом случае кристаллизацию расплава ведут с одного конца. Причём печь относительно расплава может перемещаться, а расплав остаётся неподвижным или, наоборот, печь неподвижна, а перемещается расплав.

При этом важным условием в обоих случаях является соблюдение плоского фронта кристаллизации, ведущего к образованию регулярной ориентированно структуры. Качество образующейся структуры определяется скоростью кристаллизации, температурным градиентом и чистотой компонентов расплава.

Схема установки для направленной кристаллизации эвтектического сплава приведена на рис. 2.1. Тигель 1 с расплавленным индукционным способом эвтектическим сплавом опускают из зоны нагрева с постоянной скоростью. Первые объёмы затвердевшего металла образуются на дне охлаждаемого тигля. Затем фронт кристаллизации 5 перемещается вверх со скоростью, определяемой условиями теплообмена и скоростью движения тигля.



**Рис. 2.1. Установка для направленной кристаллизации
эвтектических сплавов:**

- 1 – тигель; 2 – стеклянный корпус; 3 – индуктор; 4 – расплав;
5 – фронт кристаллизации; 6 – слиток; 7 – охлаждаемый водой блок;
8 – подвижная опора

Вертикальная схема предпочтительней горизонтальной, так как в этом случае удаётся уменьшить конвекционные потоки в сплаве и создать более симметричные условия теплообмена.

Перед кристаллизацией в объёме жидкой фазы происходит диффузия атомов, так как места присоединения их к твёрдой фазе лимитированы. При малой скорости кристаллизации атомы перемещаются на большие расстояния и образуется грубая упорядоченная структура. С увеличением скорости кристаллизации дисперсность образующейся смеси растёт. Температурный градиент мало влияет на дисперсность структуры, но от него зависит степень упорядочения образующейся структуры, а для поддержания теплового потока в одном направлении при большой скорости кристаллизации необходим большой градиент температуры. Таким образом, большое значение приобретает отношение температурного градиента к скорости кристаллизации.

Значительные изменения в процессе направленной кристаллизации могут внести примеси третьего элемента. Несовершенство структуры определяется наличием дефектов и механических напряжений. Поэтому для получения композиционных материалов методом направленной кристаллизации следует использовать высококачественные материалы.

Нарушения направленного расположения фаз могут вызвать также нестабильность температуры и неравномерная скорость передвижения тигля. Поэтому для получения качественной структуры требу-

ется строгий контроль за температурой расплава и охлаждаемого тигля, а также за скоростью передвижения тигля.

Процесс кристаллизации эвтектического сплава происходит при затвердевании фаз перпендикулярно поверхности раздела между жидкой и твёрдой фазами только в том случае, если обе фазы характеризуются незначительными приращениями энтропии при плавлении.

Метод направленной кристаллизации трудно осуществить при производстве изделий сложной формы. Материалы, изготовленные таким методом, по своим свойствам лучше композиционных материалов, полученных другими способами.

Одним из преимуществ методов получения ЕКМ по сравнению с различными способами изготовления искусственных композиций является возможность производства композиционного материала за одну операцию, полностью исключаются стадии приготовления волокон и введения их в матрицу.

Недостаток процессов направленной кристаллизации и эвтектидного превращения заключается в том, что материал и объёмное содержание матрицы и упрочняющей фазы нельзя выбирать произвольно, а надо использовать то, что заложено в самом сплаве.

Методом направленной кристаллизации получены сплавы: Cu – Cr, содержащий до 1,6% волокон Cr; композиция Al – Al₃Ni, Al – CuAl₂ с пластинчатой структурой; жаропрочные сплавы Ni₃Al – Ni₃Nb, Ta – Ta₂C, Ni – NiMo, Al – Si – Al₃Ni. Жаропрочность композиционных сплавов характеризуется малой скоростью разупрочнения на второй стадии ползучести.

Большой интерес представляют ЕКМ с особыми физическими свойствами. Так, например, композиционный сплав InSb – Sb со структурой столбчатых кристаллов сурьмы в матрице InSb обладает сильно выраженной тепло- и электропроводности. Игольчатые кристаллы Sb ($1/\rho = 200 \text{ Ом/см}$) в полупроводниковой матрице InSb ($1/\rho = 7 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/см}$) создают сплав, который можно использовать как варистор, управляемый магнитным полем. В качестве поляризационных фильтров для инфракрасных лучей можно применять композиционные сплавы: GaSb – CrSb, CaSb – FeGa, GaSb – CoGa, JnAs – CrAs, JnSb – FeSb и др.

2.2. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ СИНТЕЗА ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Для получения композитов с направленной ферритно-мартенситной структурой образцы из доэвтектидной стали с 0,2% C прокатывают при температуре немного выше точки A₁ и затем закаляют. Прокатка в межкритическом интервале температур позволяет получить слоистую структуру, состоящую из аустенита и непревращённого

феррита. Закалка такого материала способствует превращению направленных участков аустенита в мартенсит и образует композицию из слоёв мартенсита, расположенных в мягкой ферритной матрице. Объёмная доля мартенсита в стали 20 после такой обработки составляла 25%. Расстояние между слоями мартенсита равнялась 0,15 мкм. Прочность стали при этом увеличилась с 43 до 105 кг/мм².

Одним из вариантов для получения ферритно-мартенситной структуры может служить высокотемпературная механическая обработка (ВТМО) сталей эвтектоидного состава со структурой грубо пластинчатого перлита.

Низкий отпуск при 200 °С ферритно-мартенситных композиций, как правило, снижает прочность, но вдвое увеличивает относительное удлинение. Повышение содержания углерода в стали (более 0,2...0,3%) увеличивает объёмную долю мартенсита. В связи с этим возрастает прочность композиции, но резко падает пластичность даже после отпуска при 200 °С.

Легирование стали существенно влияет на объёмную долю мартенсита и прочность ферритной матрицы. Так, например, введение в сталь с 0,2% углерода до 2% Mn увеличивает предел прочности ферритно-мартенситной композиции на 60 кг/мм² [2].

2.3. ФЕРРИТНО-ЦЕМЕНТИТНЫЕ КОМПОЗИЦИИ В УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ

Двухфазная ферритно-цементитная структура по своей природе является композиционным материалом. Углеродистые доэвтектоидные стали, содержащие более 0,2% С, отвечают ряду требований, предъявляемых к композиционным материалам: прочность цементита (817 кг/мм² [3]) намного превосходит предел прочности ферритной матрицы, объёмная доля цементита $V_{\text{Fe}_3\text{C}} > V_{\text{кр}}$ больше критической величины и существует прочная связь на границе феррит-цементит.

Обработка с целью получения композиционной стали должна предусматривать только ориентированное расположение цементитных частиц соответствующих размеров в ферритной матрице. Схема такой обработки предложена в работе [4] и предусматривает нагрев стали до температуры растворения частиц второй фазы (карбида) со скоростью, исключающей гомогенизацию твёрдого раствора, затем осуществляют деформацию аустенита со степенями, обеспечивающими направленное выделение второй фазы при охлаждении (рис. 2.2).

В аустените, полученном после быстрого нагрева, сохраняются зоны концентрационной неоднородности по углероду на месте бывших цементитных пластин. В процессе пластической деформации аустенита эти зоны вытягиваются вдоль оси деформации и обеспечивают

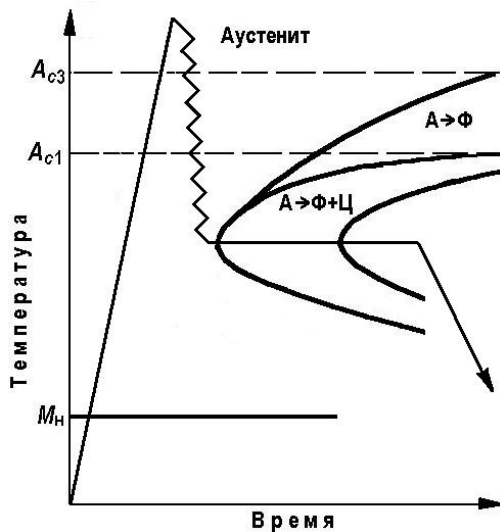


Рис. 2.2. Схема получения феррито-цементитной композиции

направленное выделение частиц цементита в процессе эвтектоидного распада при охлаждении. Данный способ может быть применён для получения естественных композиционных материалов при обработке жаропрочных сплавов с интерметаллидным упрочнением, двухфазных титановых сплавов и сплавов с низким удельным электросопротивлением, а также слоистых материалов с повышенными механическими свойствами. Для этого несколько изменяют условия нагрева и деформации, обеспечивающие направленное выделение высокопрочной фазы, армирующей матрицу.

3. ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Порошковой металлургией называется область техники, охватывающая процессы получения порошковых материалов и металлоподобных соединений и изготовления изделий из них без расплавления.

Типовая технологическая схема получения изделий методами порошковой металлургии включает:

- 1) производство порошков металлов и других материалов;
- 2) смешивание порошков для получения химической однородности многокомпонентной шихты и введения твёрдой смазки или пластификатора;

3) формование заготовки из порошка со связкой или без неё путём прессования или прокатки;

4) спекание заготовки при температуре ниже температуры плавления основного компонента;

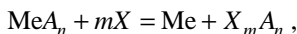
5) дополнительную обработку спечённого изделия – механическую обработку, пропитку и др.

Экономический эффект от внедрения порошковой технологии достигается за счёт: 1) сокращения отходов на механическую обработку (для порошковых изделий они составляют 5...7%, при обработке литья и проката – до 70%); 2) снижение трудоёмкости производства, связанную с уменьшением числа технологических операций с 30 – 40 до 4 – 6; 3) высвобождения значительного количества станков; 4) увеличения производительности труда в 2 – 2,5 раза.

3.1. ПРОИЗВОДСТВО ПОРОШКОВ

Способы получения металлических порошков: восстановление металлов из их оксидов и солей, электролитическое осаждение, распыление струи расплавленного металла, термическая диссоциация, механическое дробление.

Восстановление металлов из оксидов и солей. Этот способ получения порошков наиболее распространён, особенно при получении высоколегированных материалов. Процесс восстановления можно представить уравнением



где Me – металл; A – неметаллическая составляющая (O, Cl, F); X – восстановитель; m и n – стехиометрические коэффициенты.

В качестве восстановителей используются газы (H₂, природный газ) и твёрдые вещества (сажа, кокс, гидрид кальция, щелочные металлы).

Получают восстановленные порошки железа, вольфрама, тантала, молибдена, ниобия, кобальта, меди, никеля, титана, нержавеющей и жаропрочных сталей и др. Они обладают высокой пластичностью, низким содержанием примесей, но дороги.

Распыление расплавленного металла производится потоком воды или газа под давлением 10...50 атмосфер (рис. 3.1). При этом получается порошок круглой формы, но с повышенной твёрдостью из-за большой скорости охлаждения. Для снятия термических напряжений и удаления оксидов такие порошки отжигают в восстановительной атмосфере с последующим размолом и рассевом. По этой технологии получают как порошки легкоплавких металлов (олово, свинец и др.),

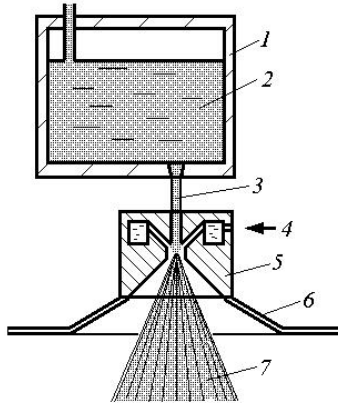


Рис. 3.1. Производство порошка распылением расплава:

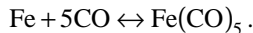
1 – разливочный миксер; 2 – жидкий металл; 3 – поток расплава;
4 – вода; 5 – форсунка; 6 – бункер; 7 – порошок

так и с высокой температурой плавления (железо, углеродистые и высоколегированные стали и сплавы).

Электролитическое осаждение. Способом электролитического осаждения можно получить порошки почти всех металлов. При электролизе из раствора на катоде получается осадок в виде плотного или рыхлого слоя. Плотный слой счищают и измельчают механическим путём; рыхлый слой – не требует измельчения. Получаемые порошки характеризуются высокой чистотой и сравнительно небольшой стоимостью. В процессе электролиза порошок адсорбирует водород, придающий хрупкость металлу. Для её устранения производят отжиг порошка в нейтральной среде или вакууме.

Термическая диссоциация. При термической диссоциации используют летучие химические соединения – карбинолы, йодиды, галлоиды и др.

Например, для получения порошка железа применяют карбонилы, которые получают при давлении 18...20 МПа и температуре 200 °С при воздействии на железо окиси углерода:



Газообразный карбонил выводят из реакции и нагревают до 350...500 °С при атмосферном давлении. В результате соединение разлагается с образованием мелкозернистого порошка. Недостаток технологии – высокое содержание углерода (в карбонильном железном порошке Р-10 0,5...0,7% С).

Для удаления углерода порошок отжигают в водороде. Этим способом получают порошки высокой чистоты, но они имеют большую стоимость из-за сложности и трудоёмкости техпроцесса.

Механическое дробление. Применяется для измельчения твёрдых и хрупких материалов. Для охрупчивания пластичных металлов используют предварительную обработку жидким азотом (криомеханическая технология). При механическом дроблении материалов в порошок используют шаровые, вибрационные и вихревые мельницы.

Шаровая мельница представляет собой барабан, внутри которого находятся шары из закаленной стали или твёрдых сплавов. Барабан вращается со скоростью 30...120 об/мин.

В вибрационной мельнице барабанам и шарам сообщают колебание с амплитудой 2...3 мм при частоте, равно частоте вращения барабана (1500...3000 об/мин). Колебания осуществляются с помощью вибратора в виде эксцентрикового вала, соединённого с электродвигателем через упругую муфту.

Вихревая мельница состоит из закрытого корпуса, внутри которого с большей скоростью вращаются в противоположных направлениях два пропеллера. Кусочки проволоки, подаваемые в рабочую камеру, увлекаются вихревыми потоками, и при ударе друг о друга измельчаются. Так как частички при этом нагреваются, в камере должна быть инертная или восстановительная атмосфера. Вихревые мельницы можно использовать для измельчения любых металлов и сплавов.

При механическом дроблении высокодисперсные порошки получаются дорогими из-за низкой производительности процесса.

3.2. СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

К основным свойствам порошков относятся: химический и гранулометрический составы, насыпная плотность, текучесть, удельная поверхность, прессуемость (формуемость и уплотняемость), прочность прессовки.

Гранулометрический состав – это процентное содержание различных размерных фракций данной партии порошка. Наиболее распространённый метод определения гранулометрического состава – ситовый анализ, который заключается в том, что проба порошка просеивается через набор сит, имеющих разный размер ячеек (от 0,04 до 2,5 мм). Собранные с каждого сита фракции взвешивают и определяют их процентное содержание от общей массы пробы.

Удельная поверхность S_w порошка является суммарной площадью поверхности всех частиц, составляющих его единицу массы (или объёма). Удельная поверхность одна из важнейших характеристик порош-

ка, которая определяет активность порошка во всех физико-химических процессах, особенно при спекании порошковых заготовок. В зависимости от размера частиц в разных порошках величина удельной поверхности колеблется в пределах 0,01...20 м²/г. Для измерения удельной поверхности чаще всего используют методы адсорбции и газопроницаемости.

Насыпная плотность $\gamma_{\text{нас}}$ характеризует массу единицы объема свободно насыпанного порошка. Насыпная плотность используется при расчёте объема загрузочной камеры пресс-формы.

Плотность порошка, засыпанного в пресс-форму, при вибрациях, ударах и других механических воздействиях заметно меняется, чувствительность к этим воздействиям характеризует *плотность утряски* $\gamma_{\text{утр}}$:

$$\gamma_{\text{утр}} = \frac{m}{V},$$

где m – масса порошка; V – объем, занимаемый после его утряски.

Под действием вибрации плотность порошка может возрасти на 20...50% в зависимости от его свойств.

Время заполнения порошком полости пресс-формы зависит от его *текучести* – времени истечения (τ , с) навески порошка массой 50 г через калиброванное отверстие ($d = 2,5$ мм) специальной воронки. Текучесть становится хуже при увлажнении порошка металла, с увеличением удельной поверхности и доли мелкой фракции.

Уплотняемость порошка (рис. 3.2) определяется путём сравнения плотности прессовок, полученных при различных давлениях P от 100 до 1000 МПа (100 мегапаскалей = 1 т/см²).

Для характеристики поведения порошков при прессовании используют *коэффициент уплотнения* k , равный отношению плотности прессовки при данном давлении P к насыпной плотности:

$$k = \gamma_{\text{пр}} / \gamma_{\text{нас}}$$



Рис. 3.2. Уплотняемость железного восстановленного порошка ПЖВ-1

Формуемость порошка указывает границы максимального и минимального значений плотности прессовки, при которой извлечённая из пресс-формы порошковая заготовка не имеет расслоений и не осыпается.

Уплотняемость и формуемость главным образом зависят от формы частиц, из размеров и состояния поверхности (распылённый порошок округлой формы имеет более высокую текучесть, но хуже прессуется, чем полученный электролизом или гидридно-кальциевым восстановлением).

Спекаемость – способность порошка самопроизвольно уплотняться при нагревании.

Порошок в свободно насыпанном или спрессованном виде представляет собой дисперсную систему, характеризующуюся высокой площадью свободной поверхности, большим количеством пор между частицами. С этим связано наличие в нём огромной избыточной поверхностной энергии. Порошок – термодинамически неустойчивая система. В то же время скорость диффузии атомов по этой поверхности очень высока. При небольшом нагревании порошкового материала атомы начинают легко двигаться по поверхности части так, чтобы залечить, сократить её площадь, уменьшить поры. При этом плотность материала растёт, улучшается его химическая однородность, линейные размеры заготовки уменьшаются.

Для характеристики спекаемости порошков (формовок) и прессовок используют *коэффициенты линейной α_l и объёмной α_v усадки*:

$$\alpha_l = \frac{l_{\text{пр}} - l_{\text{сп}}}{l_{\text{пр}}} \cdot 100\% ; \quad \alpha_v = \frac{V_{\text{пр}} - V_{\text{сп}}}{V_{\text{пр}}} \cdot 100\% ,$$

где $l_{\text{пр}}$ и $l_{\text{сп}}$ – линейные размеры; $V_{\text{пр}}$ и $V_{\text{сп}}$ – объём заготовок до и после спекания, соответственно.

3.3. СМЕШИВАНИЕ ПОРОШКОВОЙ ШИХТЫ

Эта операция выполняется для обеспечения необходимого химического состава пресс-порошка и его однородности. Введение 0,1...0,15 вес. % твёрдой смазки (графит, стеариновую кислоту и её соли, парафин, дисульфид молибдена) снижает трение частиц между собой и по поверхности формообразующего инструмента при прессовании.

Некоторые порошки (из твёрдых материалов или очень мелкие) не прессуются. В этом случае в состав шихты (обычно после предварительного сухого смешивания компонентов) вводят пластификатор (клеящее вещество – раствор поливинилового спирта или резины), который после протирания смеси через сито и её сушки обеспечивает хорошую формуемость шихты.

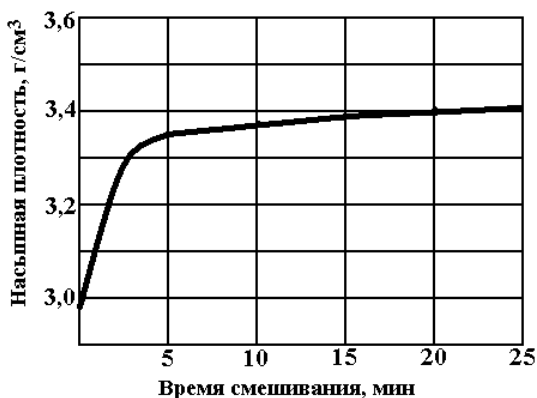


Рис. 3.3. Влияние смешивания на насыпную плотность шихты из железного порошка с добавкой 0,8% стеарата цинка

Так как в процессе смешивания может происходить обкатка и агрегирование частиц, то при этом меняется и насыпная плотность (рис. 3.3) пресс-порошка. Эффективность смешивания зависит от конструкции смесителя, времени смешивания, количественного соотношения компонентов и их удельного веса. В барабанном смесителе время смешивания от 1 до 6 часов, в системах с двухосным вращением 0,3...0,8 ч.

Иногда порошки перед смешиванием отжигают и рассеивают.

Отжиг применяется с целью увеличения пластичности порошков. Это увеличивает их уплотняемость и формуемость. Отжиг проводится в восстановительной атмосфере. При этом удаляются оксидные плёнки, снимается наклёп (эту операцию обычно выполняют при изготовлении порошка).

Рассев порошка на фракции осуществляют для того, чтобы потом использовать частицы нужного размера. Порошки крупнее 40 мкм рассеивают на фракции с помощью набора сит, а более мелкие зёрна – в воздушном сепараторе.

3.4. ФОРМОВАНИЕ ПОРОШКОВ

Формование – это придание порошковому материалу формы, размеров, плотности и прочности, необходимых для выполнения последующих операций получения изделий.

Формование заготовок или изделий из металлических порошков осуществляется путём виброукладки пресс-порошка в огнеупорных

формах, холодного прессования в металлических формах, мундштучного или гидростатического прессования, холодной прокатки и шликерным литьём.

Прессование в металлической форме. Прессование может быть односторонним, когда только один пуансон перемещается относительно матрицы и двухсторонним, когда подвижны оба пуансона (рис. 3.4). Давление прессования составляет 30...1000 МПа.

Главным условием качества прессовки является её одинаковая плотность по всему объёму. Поэтому при прессовании заготовок сложной формы применяют составные нижние и верхние пуансоны. Перед засыпкой порошка нижние пуансоны устанавливают высоту *камеры засыпки порошка* (расстояние до верхнего края матрицы) $h_{засып} = k h_{пр}$, где $h_{пр}$ – высота части прессовки. В процессе приложения давления они проходят различные пути в матрице, чтобы обеспечить одинаковый коэффициент уплотнения материала k .

Перемещение частиц приводит к давлению порошка на стенки и трению частиц о стенки. Боковое давление составляет 25...40% от давления прессования, а потери на трение составляют 60...90% и приводят к неравномерности уплотнения по высоте. Максимальной будет плотность под подвижным пуансоном, минимальная – у дна матрицы. Чтобы уменьшить трение и неравномерность уплотнения применяют твёрдую смазку в составе шихты.

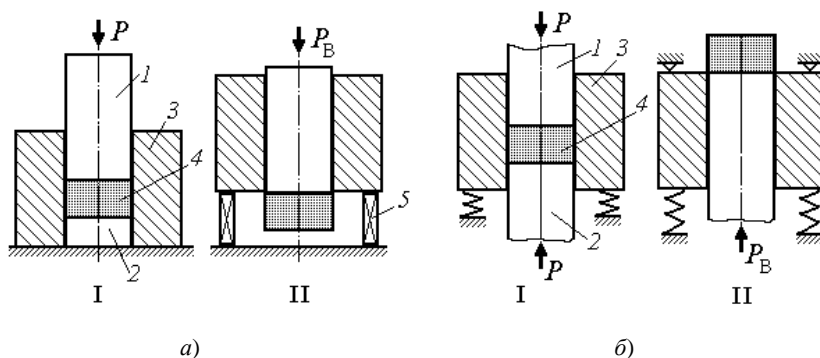


Рис. 3.4. Схема прессования в металлической форме:

а – одностороннее; *б* – двухстороннее;

I – прессование; II – выпрессовка готовой заготовки;

1 – нижний пуансон; 2 – верхний пуансон; 3 – матрица;

4 – порошок; 5 – подставка

После прессования к прессовке необходимо приложить усилие, чтобы извлечь её из формы. Это усилие называют усилием выталкивания. Оно составляет 25...40% от давления прессования.

После освобождения из прессформы прессовка расширяется, она "распухает" и может даже разрушиться. Это явление называется *упругим последствием*. Прессовка может активно поглощать влагу и другие газы из окружающей среды. Поэтому время хранения (обычно в герметично закрытых ёмкостях) между прессованием и спеканием не должно превышать нескольких часов.

Прессованием получают небольшие изделия массой не более 1,5 кг.

При формовке деталей с большой площадью прессования необходимо уменьшить давление прессования, чтобы ограничить усилие, прикладываемое доступным прессовым оборудованием (100...500 т). В этом случае применяют *вибропрессование*, в процессе которого меньшая чем при обычном прессовании нагрузка циклически меняется по величине. Это особенно актуально при большой площади боковой поверхности прессовок.

Мундштучное прессование. Для получения изделий с большим отношением длины к диаметру применяют мундштучное прессование или прессование выдавливанием (рис. 3.5). При этом виде прессования в смесь добавляют пластификатор в количестве 10%, получая пластичную массу. Эта масса выдавливается через матрицу, которая может быть любой сложности. С применением иглы можно получить полые профили. Изделия имеют равномерную плотность, их длина может достигать 300 мм.

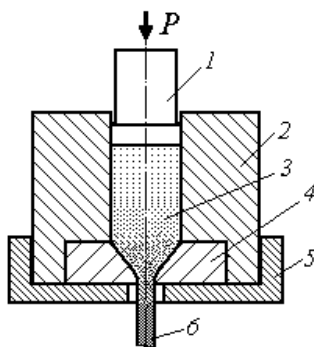


Рис. 3.5. Схема мундштучного прессования:
1 – пуансон; 2 – контейнер; 3 – порошок; 4 – мундштук;
5 – плита; 6 – прессованный профиль

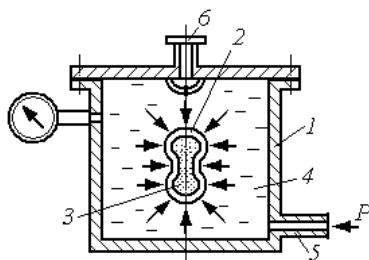


Рис. 3.6. Схема гидростатического прессования:

1 – цилиндр высокого давления; 2 – эластичная оболочка; 3 – порошок;
4 – жидкость; 5 – трубопровод от насоса высокого давления,
6 – предохранительный клапан

Гидростатическое прессование используют для изготовления заготовок большой массы (рис. 3.6). Металлический порошок засыпают в герметичную эластичную (обычно из резины) оболочку, которую помещают в цилиндр высокого давления, где подвергают всестороннему сжатию жидкостью. Давление жидкости составляет 80...3000 МПа. Этим способом получают цилиндры, трубы, шары, тигли и изделия сложной формы массой до 500 кг.

Холодной прокаткой из порошков получают ленту, листы, различные профильные и многослойные материалы. Схема прокатки ленты приведена на рис. 3.7. При горизонтальной прокатке порошковая шихта подаётся в валки ровным слоем на конвейерной ленте. Обычно толщина прокатанной ленты составляет 1% диаметра валка. Скорость

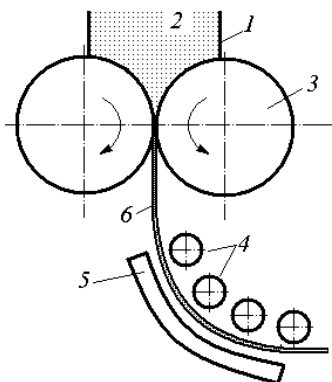


Рис. 3.7. Схема прокатки порошка:

1 – бункер; 2 – порошок; 3 – валки; 4 – ролики;
5 – направляющая; 6 – катаная лента

вращения валков 0,5...50 об/мин. Эта технология имеет высокую производительность и легко поддается автоматизации.

Шликерное литье используют для изготовления изделий небольших размеров сложной формы. Шликер представляет собой смесь металлического порошка с жидкостью (вода, расплавленный парафин). Основная часть жидкости легко удаляется после литья в форму под давлением. Для полного удаления жидкости проводят нагрев изделия в вакууме. Этим методом производят электротехнические изоляторы, твердосплавные инструменты сложной формы, лопатки реактивных турбин и др.

Изготовление многослойных изделий осуществляется как с вертикальным, так и с горизонтальным расположением слоев (рис. 3.8 и 3.9).

При этом возникает проблема прессования порошков с разной насыпной плотностью и прессуемостью. В этом случае применяют составной нижний пуансон.

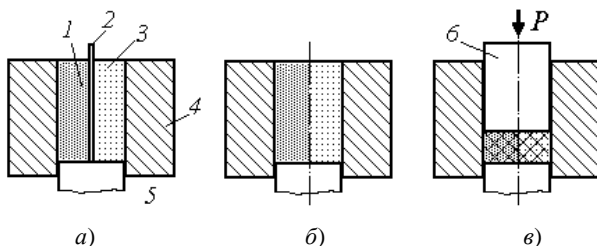


Рис. 3.8. Схема прессования двухслойной прессовки с вертикальным расположением слоёв:

- a* – засыпка порошка; *б* – удаление перегородки; *в* – прессование;
 1 – порошок А; 2 – перегородка; 3 – порошок В; 4 – матрица;
 5 – нижний пуансон; 6 – верхний пуансон

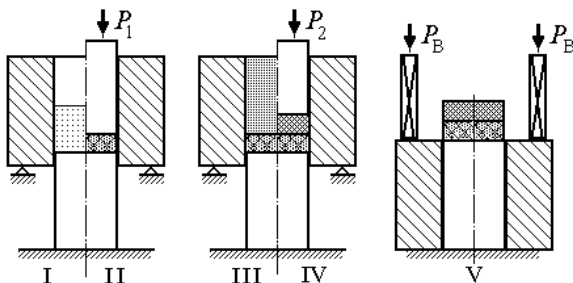


Рис. 3.9. Двухслойное прессование с горизонтальным расположением слоёв:

- I – засыпка первого слоя; II – предварительное прессование;
 III – засыпка второго слоя; IV – окончательное прессование;
 V – выталкивание двухслойной прессовки

3.5. СПЕКАНИЕ СПЕЧЁННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Спекание – нагрев формованных или прессованных заготовок в изолирующей или восстановительной атмосфере (засыпке). В результате спекания отформованные заготовки приобретают окончательный размер, форму, качество поверхности и требуемые физико-механические свойства, уменьшается физическая и химическая неоднородность порошковой детали. При спекании происходят сложные физико-химические процессы – диффузия, рекристаллизация, восстановление поверхностных оксидов и др.

Движущей силой процесса спекания является сокращение свободной поверхности высокодисперсной системы, которой является порошковая заготовка.

В зависимости от характера взаимодействия компонентов, входящих в шихту, спекание можно подразделить на спекание в твёрдой фазе и с жидкой фазой.

В работах Я.С. Гегузина выделяются три основные стадии твёрдофазного спекания.

В первый период, называемый *припеканием*, частицы порошковой заготовки сохраняют свою индивидуальность, размер контактного пятна между ними изменяется практически от нуля до ~30% радиуса частицы.

Во время второго периода образуются две непрерывные фазы: так называемые "фаза вещества" и "фаза пустоты". Начинается формирование закрытой пористости (замкнутых пор), понятие контакта между частицами теряет смысл. Образующиеся границы между элементами структуры спекающегося твёрдого тела уже не связаны с первоначальными границами частиц. Происходит рост зёрен.

На заключительной стадии спекания образуются замкнутые поры, число и объём которых обычно уменьшаются, спечённая заготовка уплотняется.

При спекании порошков в твёрдой фазе принято различать спекание однокомпонентных и многокомпонентных систем.

Скорость усадки на различных стадиях процесса спекания не одинакова. Характерные особенности усадки – высокая скорость в начальный момент спекания и постепенное замедление при изотермической выдержке. Температура твёрдофазного спекания зависит от требуемого уровня плотности деталей и для большинства металлов находится в пределах $t_{\text{сп}} = (0,7 \dots 0,8) t_{\text{пл}}$.

Процесс спекания порошков в присутствии жидкой фазы происходит, если один из компонентов имеет $t_{пл}$ плавления ниже $t_{сп}$ спекания. Иногда в местах контакта частиц разных компонентов образуется эвтектический сплав, температура плавления которого меньше температуры спекания – он будет жидкой фазой.

Обычно подбирают состав шихты так, чтобы жидкость смачивала поверхность твёрдой фазы. Атомы твёрдых частиц переходят в жидкий раствор и движутся к тем участкам структуры, где высока свободная энергия сплава, а затем выделяются из раствора, снижая эту энергию (например, за счёт уменьшения кривизны поверхности и роста зерен).

Ошибочным является представление, что жидкая фаза просто заполняет все поры в заготовке при своём появлении – при этом забывают, что объём жидкости не намного больше кристалла (на 3...5%). Диффузия в жидкой фазе идёт с намного большей скоростью, чем в кристалле. Поэтому процесс спекания заметно ускоряется и его можно вести при меньших температурах. Характерная особенность спекания в жидкой фазе – большая степень уплотнения, чем при твёрдофазном обжиге.

Различают спекание с жидкой фазой, присутствующей до конца изотермической выдержки и спекание с исчезновением жидкой фазы в процессе нагрева. В первом случае жидкость кристаллизуется при охлаждении после выдержки. Если при растворении в жидкой фазе атомов компонента её температура кристаллизации растёт – она затвердеет еще в процессе спекания.

При этом механическая связь между частицами, образовавшаяся в процессе формования, заменяется межатомной, за счёт чего изделие приобретает необходимую прочность. В процессе спекания происходит усадка, уменьшается пористость и возрастает плотность металла. Спекание многокомпонентных смесей может осуществляться как в твёрдом состоянии, так и в присутствии жидкой фазы.

Твёрдофазное спекание проводят при температурах 0,7...0,9 абсолютной температуры плавления наиболее легкоплавкого компонента смеси.

За счёт диффузии расширяется контакт частиц, уменьшается объём пор и прессовки в целом (идёт усадка прессовки). Выдержка при постоянной температуре сопровождается быстрой усадкой, затем усадка уменьшается, и размеры изделия стабилизируются. Если после этого увеличить температуру изотермической выдержки, то опять пойдёт быстрое уплотнение изделия. И так при каждом новом подъёме

температуры. Плотность и прочность изделий зависит от атмосферы спекания. Применяют восстановительную атмосферу и вакуум.

Длительность выдержки при спекании – от получаса до нескольких часов. Получить беспористый материал при твёрдофазном спекании практически не удаётся.

Жидкофазное спекание позволяет получать более плотные изделия (пористость 1...2%). Жидкая фаза облегчает спекание только тогда, когда она хорошо смачивает твёрдую фазу. Различают спекание с жидкой фазой, остающейся до конца, и спекание с исчезающей жидкой фазой. Например, в сплаве Cu-Sn олово плавится сначала, потом постепенно растворяется медь и жидкая фаза исчезает.

Применяют пропитку спечённого каркаса из тугоплавкого металла легкоплавким сплавом. Так, пропитывают медь свинцом, карбид титана – сталью, вольфрамовое волокно – медью и медноникелевыми сплавами. Основное условие пропитки – хорошая смачиваемость. Пропитку выполняют погружением каркаса в расплав, или кладут на каркас кусочек легкоплавкого сплава и нагревают в защитной атмосфере.

Спечённые изделия в ряде случаев подвергают дополнительной обработке. Основные её виды это регулирование структуры и размерная обработка изделия. Регулирование структуры осуществляется термообработкой, доводка изделий по размеру – калибровкой или механической обработкой. Калибровку осуществляют в специальных калибровочных пресс-формах. Усилие калибровки составляет 10...25% от усилия прессования. Калибровка – почти всегда отделочная операция. Она позволяет достичь 1–2 класса точности и 7 – 9 класса чистоты поверхности. Механическая обработка спечённых изделий трудоемка и сопряжена с затруднениями из-за пористости: образуются вырывы, поэтому трудно получить требуемую чистоту поверхности.

3.6. ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ ВАЖНЕЙШИХ МАТЕРИАЛОВ

Антифрикционные материалы для подшипников скольжения – один из самых распространённых видов порошковых композитов. Их изготавливают на железной, медной (бронзовой) или алюминиевой основе с добавлением небольшого количества графита или других твёрдых смазок. Графит снижает коэффициент трения, уменьшает износ, предохраняет детали от заедания.

Сплавы характеризуются наличием пористости в пределах 10...30%. Поры заполняют смазочным материалом (минеральное масло, сульфид молибдена и др.), что позволяет получить самосмазывающиеся подшипники. Такие подшипники могут работать при большой частоте вращения вала (до 3000 об/мин) в течение длительного времени без смазки. Вкладыши подшипников часто делают трёхслойными: на стальную ленту напекают пористый слой смеси медь – никель – графит и пропитывают его сверху баббитом, формуя сверху его слой толщиной 20...70 мкм.

Широко применяются металлопластиковые антифрикционные материалы: спечённые бронзографит, титан. Нержавеющую сталь пропитывают фторопластом Ф-Д или Ф-ДП. Получаются коррозионно-стойкие и износостойкие изделия. Срок их службы примерно в два раза больше, чем у антифрикционных материалов другого типа.

Фрикционные порошковые материалы обладают высоким коэффициентом трения и одновременно износостойкие. Их используют для дисков, лент, колодок в различных тормозных устройствах. Сплавы имеют сложный состав. Например, сплав на основе железа содержит помимо основного компонента медь, свинец, графит, кремнезём, асбест, серноокислый барий. Асбест и кремнезём обеспечивают высокий коэффициент трения, графит предохраняет от истирания и износа, медь придаёт хорошую теплопроводность, свинец предохраняет от перегрева и способствует плавному торможению, серноокислый барий устраняет прилипаемость трущихся поверхностей.

Прочность этих материалов мала, так как в них много неметаллических компонентов, поэтому их прикрепляют (припекают, приклёпывают, приклеивают и т.д.) к стальной основе.

Фильтры – это высокопористые сплавы. Металлические фильтры изготавливают из порошков и сплавов, стойких против окисления (бронза, латунь, коррозионно-стойкая сталь, нихром, никель, титан).

Пористость спечённых фильтров может достигать 70%. Прессование в этом случае, как правило, не применяют; спеканию подвергают порошок, свободно засыпанный в форму. Для сохранения пор при спекании и для их увеличения в порошок вводят добавки, которые улетучиваются под действием высоких температур.

Металлические фильтры применяют для очистки от твёрдых частиц горючего, смазочных материалов, газов и воздуха. Фильтры удобны в эксплуатации, имеют небольшие размеры. Для очистки их достаточно промыть, прокалить и продуть воздухом в направлении обратном фильтрации.

Порошковые сплавы с большой пористостью используют для деталей, требующих интенсивного охлаждения. При пропускании жидкости через поры происходит её испарение и осуществляется охлаждение детали. Этот метод во много раз эффективнее принятых способов охлаждения. Пористые детали применяют в газовых турбинах, реактивных двигателях.

Конструкционные материалы. Типовыми порошковыми деталями общего назначения являются: кулачки, храповики, корпуса подшипников, ролики, звёздочки распределительных валов, детали вычислительных машин, втулки, крышки и т.д. Слабонагруженные детали однократно прессуют и спекают. Они не требуют дополнительной механической обработки. Средненагруженные детали прессуют двукратно и спекают.

Материалы электрических контактов. Электроконтактные материалы делятся на материалы для разрывных контактов и материалы для скользящих контактов.

Материал разрывных контактов должен быть тепло- и электропроводным, эрозиянностойким при воздействии электрической дуги, не свариваться в процессе работы. Спечённые контактные материалы превосходят литье по стойкости и более надёжны в эксплуатации. Изготавливают контактные материалы либо по обычной технологии (прессование, спекание), либо пропиткой спечённого пористого тугоплавкого каркаса более легкоплавким металлом (например, вольфрам пропитывают медью и серебром).

Скользящие контакты используются в приборах, коллекторных электрических машинах и электрическом транспорте (токосъёмники). Они представляют собой своеобразные пары трения, поэтому должны обладать и антифрикционными свойствами. В состав смесей для скользящих контактов вводят твёрдые смазки – графит, дисульфид молибдена, гексагональный нитрид бора. Контакты электрических машин делают из меди с графитом (8...75% графита). Контакты приборов делают из серебра и графита, серебра и палладия, никеля и т.д.

Магнитные порошковые материалы. Порошковую металлургию используют для изготовления мелких магнитов (до 100 г), так как при литье мелких магнитов велики потери и выход годного 10...20% массы жидкого металла.

Магнитомягкие материалы должны иметь высокую магнитную проницаемость и малую коэрцитивную силу, т.е. быстро намагничиваться и быстро терять магнитные свойства при снятии магнитного

поля. Основой магнитно-мягких материалов является железо. Для улучшения магнитных свойств в порошок железа добавляют легирующие элементы: кремний, фосфор, алюминий, кобальт, никель и др.

Магнитодиэлектрики – это микрокусочки магнитомягкого материала, разделённые тонким слоем диэлектрика – жидкого стекла или синтетической смолы. Таким материалам присущи высокое электросопротивление, минимальные потери на вихревые токи и на перемагничивание.

Магнитотвердые материалы или постоянные магниты – это материалы с малой магнитной проницаемостью и большой коэрцитивной силой. Это сплавы ални (железо – алюминий – никель), алнико (ални + 3...15% Со), магнико (ални + 20...40% Со) и т.д.

Ферриты – это магнитные материалы, состав которых выражается формулой $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me – символ двухвалентного металла.

За счёт введения оксидов металл получает большое электрическое сопротивление, малые потери энергии при высоких частотах электрического тока, хорошие магнитные свойства.

Используют ферриты для сердечников различных трансформаторов, запоминающих устройств в счётно-вычислительной технике и др.

Изделия из ферритов технологичны, характеризуются небольшими размерами и массой, малой стоимостью. Недостатком является низкая механическая прочность.

Методом порошковой металлургии можно получить композиционные материалы с самыми разнообразными свойствами и назначением. Кроме перечисленных ранее можно назвать магнитоэласты, различные виды диэлектрической керамики, терморезистивные полупроводниковые материалы, жаропрочные и жаростойкие композиции, сверхтвёрдые материалы и т.д.

Однако описание технологии их производства выходит за рамки настоящего пособия.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Студент может быть допущен к выполнению лабораторных работ только после ознакомления с правилами по технике безопасности, изложенными ниже. Для обеспечения безопасной работы в лаборатории студент обязан:

- находиться только на том участке, на котором выполняет работу;
 - соблюдать строжайшую дисциплину во время показа работы оборудования.
 - работать с порошковыми материалами в вытяжном шкафу.
- При выполнении лабораторных работ запрещается:
- приступать к выполнению лабораторной работы без предварительного ознакомления с правилами техники безопасности;
 - включать и выключать без разрешения и наблюдения лаборанта гидравлический пресс;
 - знакомиться с конструкцией установок во время их работы.

Лабораторная работа 1

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Цель работы: изучение физических свойств металлических порошков и определение гранулометрического состава методом ситового анализа.

Оборудование и материалы: микроскоп МВ-30, предметное стекло, шпатель, аналитические весы, набор сит, порошки металлов.

Краткие теоретические положения

Металлические порошки характеризуются рядом свойств: химическими, физическими и технологическими.

К физическим свойствам порошков относятся форма частиц, средняя величина и распределение их по крупности, величина удельной поверхности, пикнометрическая плотность, микротвёрдость частиц.

Физические свойства зависят главным образом от природы материала и метода получения порошка. Все способы получения порошков можно условно разделить на две большие группы: механические и физико-химические. При использовании механических методов (распыление, размол) исходный материал измельчается под действием внешних сил без существенного изменения химического состава. Физико-химические методы предполагают физические и химические превра-

щения исходного продукта при получении из него порошка. Наиболее распространены такие методы как восстановление металла из оксидов или солей, электролиз и карбонильная металлургия.

Влияние метода получения порошка на физические свойства можно выявить на примере формы частиц (рис. 1.1). Порошок сферической формы получают распылением расплава и карбонильным способом. Губчатая форма получается при восстановлении, осколочная – при измельчении в шаровых и вибрационных мельницах, тарельчатая – при вихревом измельчении, дендритная – при электролизе, игольчатая или чешуйчатая – при высокоскоростном затвердевании расплава.

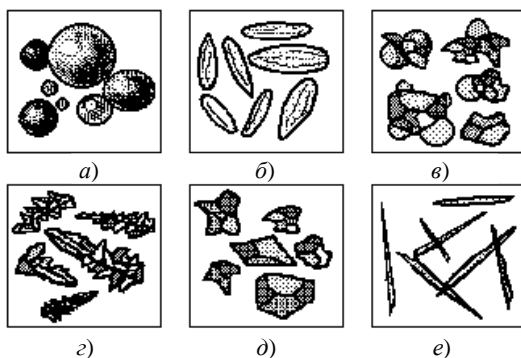


Рис. 1.1. Основные формы частиц металлических порошков:

а – сферическая; *б* – чешуйчатая; *в* – губчатая; *г* – дендритная;
д – осколочная; *е* – игольчатая

Одной из важнейших характеристик порошка является его *гранулометрический состав*. Он показывает распределение частиц по размерам или частоту их встречи. В каждом порошке частицы неодинаковы по размеру, некоторые размеры встречаются чаще, некоторые очень редко. Для удобства его определения диапазон встречающихся в порошке размеров разбивают на 5–6 интервалов, называемых *фракциями*. Гранулометрический состав зависит от метода получения и режимов изготовления порошка и оказывает существенное влияние на все его технологические свойства.

По дисперсности порошки классифицируют:

- ультратонкие – с размером частиц до 0,5 мкм;
- весьма тонкие – с размерами частиц 0,5...10 мкм;
- тонкие – с размером частиц 10...40 мкм;
- средние – с размером частиц 40...150 мкм;
- крупные (грубые) – с размером частиц 150...500 мкм.

В связи с широким диапазоном размеров частиц имеется несколько методов исследования гранулометрического состава порошка:

- 1) ситовой анализ (рассев) порошков на стандартных ситах;
- 2) микроскопический – подсчёт количества и размеров частиц в оптическом или электронном микроскопе;
- 3) седиментационный – основан на определении скорости оседания частиц в жидкости с определенной вязкостью;
- 4) электростатический и др.

Наиболее распространены три первых метода. Микроскопический метод очень трудоемок, но позволяет получить очень точные результаты. Анализ ультратонких и тонких порошков удобнее вести седиментационным и электростатическим методами. Ситовой метод наиболее применим для классификации и контроля порошков средней и крупной дисперсности.

Порядок выполнения работы

1. Отбор пробы порошка.

Физико-механические свойства порошков определяются по средней пробе. Метод отбора и подготовки пробы производится согласно ГОСТ 23148–78. Для составления средней пробы из партии порошка отбирают выборку, в которую входит определённое число проб из каждой ёмкости с порошком. Представительную пробу получают тщательным перемешиванием и делят на две части. Из одной методом квартования берут порции для проведения испытаний, а вторая служит резервом на случай расхождений в оценке качества.

2. Изучение формы частиц и определение метода получения порошков.

Для определения формы частиц порошка используют микроскопический метод. Он заключается в приготовлении образца из исследуемого материала и исследовании его в оптическом микроскопе.

Оптический микроскоп позволяет определить форму частиц от 1,0 до 100 мкм. Небольшое количество исследуемого порошка (5...10 г) тщательно перемешивается шпателем на стекле, затем после многократного квартования выделяется 0,1...0,5 г порошка. Из полученной пробы берётся малое количество порошка и переносится на предметное стекло. Если порошок очень мелкий, на стекло наносится капля глицерина или скипидара. Проба равномерно распределяется по поверхности предметного стекла. Правильно приготовленный образец не должен содержать конгломератов или скопления частиц.

Образец изучают с помощью оптического микроскопа, определяют форму частиц, и на основании наблюдений делают вывод о методе получения данного порошка.

Следует зарисовать в тетрадь форму не менее 3 – 5 частиц каждого порошка.

3. Определение гранулометрического состава порошка.

Ситовой анализ порошка производят в соответствии с ГОСТ 18318–73 путём просеивания порошка через набор сит, установленных в порядке убывания размера ячейки сверху вниз. Сита ГОСТ 3584–73 должны быть круглыми с размерами: диаметр – не менее 100 мм, глубина – не менее 25 мм. Высота обечайки – 40 мм. Размеры сеток, которые изготавливаются из бронзы (№ сеток 004-016) или полутомпака (№ 0071-2,5), представлены в табл. 1.1.

1.1. Размеры сит (ГОСТ 3584–73)

Номер сетки	2,5	1,6	0315	025	02	016	0063	004
Размер стороны ячейки в свету, мкм	2500	1600	315	250	200	160	63	40
Максимальное отклонение, %	10	10	10	12	15	15	40	40

Выбор последовательности и номеров сит зависит от предусмотренного стандартом гранулометрического состава порошка. Пробу порошка массой 200 г помещают в верхнее сито. Рассев производится на механическом встряхивателе, работающем по принципу вращательного движения со скоростью 300 об/мин при одновременном встряхивании с равномерной частотой 180 об/мин в течение 30 мин. При этом проба разделяется на части-фракции. Фракция порошка содержит частицы с размером, большим величины ячейки сита, в котором она находится, но меньшим или равным, чем в вышерасположенной сетке. Самый мелкий порошок оказывается в поддоне. Полученные рассевом фракции взвесить на аналитических весах с точностью 0,1 г. Рассчитать весовую долю частиц разного размера в порошке

$$X_i = (m_i / m_o) \cdot 100\%,$$

где m_i и m_o – масса данной фракции и всей пробы порошка, соответственно.

Все полученные результаты занести в табл. 1.2 и представить в виде столбчатой гистограммы (рис. 1.2). Для этого на графике по оси X откладывают в масштабе размер частиц и указывают границы фракций. По оси Y откладывают весовую долю порошка. Каждой фракции на гистограмме соответствует столбец шириной в интервал размеров порошка и высотой, равной её весовой доле.

1.2. Результаты гранулометрического анализа порошка

Номер сита	2,5	1,6	0315	025	02	016	0063	004	Поддон
Фракция, мкм	>2500	>1600	>315	>250	>200	>160	>63	>40	<40
Масса, г									
m_i/m_o , %									

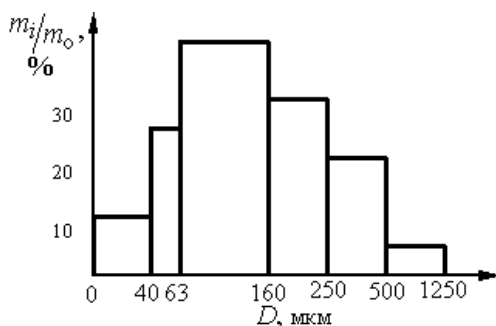


Рис. 1.2. Гистограмма гранулометрического состава порошкового материала

Содержание отчёта

1. Формулировка цели работы.
2. Рисунки порошков с указанием формы и метода изготовления.
3. Краткое изложение методики ситового анализа порошков.
4. Таблицы с результатами ситового анализа размеров частиц.
5. График гранулометрического состава порошков.

Контрольные вопросы

1. Что называется порошковой металлургией?
2. Укажите основные методы получения металлических порошков.
3. Как зависит форма частиц порошка от метода получения?
4. Укажите основные методы определения гранулометрического состава порошка.

Литература: [1, с. 154 – 173; 2, с. 69 – 75].

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Цель работы: изучение технологических свойств металлических порошков на примере насыпной плотности, текучести и плотности утряски.

Материалы и оборудование: порошок по указанию преподавателя, технические весы, воронка с калиброванным отверстием, секундомер, мерный цилиндр.

Краткие теоретические положения

Металлические порошки принято характеризовать химическими, физическими и технологическими свойствами.

К технологическим свойствам порошковых материалов следует отнести насыпную плотность, текучесть, плотность утряски, уплотняемость, прессуемость, которые могут изменяться в широких пределах для порошков данного состава в зависимости от формы и размеров частиц, влажности, удельной поверхности и т.д. Знание технологических характеристик позволяет оценить поведение исследуемых порошков при их компактировании, скорость заполнения порошком пресс-форм, величину необходимого при прессовании давления и т.д.

Насыпная плотность – масса единицы объема свободно насыпанного порошка. Насыпную плотность определяют по ГОСТ 19440–74:

- ёмкость с известным объемом заполняют порошком через воронку с отверстием 5 мм;
- избыток порошка в мерке снимают стеклянной пластикой;
- взвешиванием определяют массу порошка;
- рассчитывают насыпную плотность

$$\gamma_{\text{нас}} = (G_1 - G_2) / V_m, \text{ г/см}^3, \quad (2.1)$$

где G_1 – масса мерной ёмкости, г; G_2 – масса мерной ёмкости с порошком, г; V_m – объём мерной ёмкости.

Испытание проводят три раза и определяют среднее значение. Величина, обратная насыпной плотности, называется *насыпным объёмом* $V_{\text{нас}}$:

$$V_{\text{нас}} = 1 / \gamma_{\text{нас}}, \text{ см}^3/\text{г}. \quad (2.2)$$

Эта величина помогает оценить способность порошка к наполнению полости матрицы пресс-формы.

Насыпная плотность является объёмной характеристикой, т.е. характеризуется фактическим заполнением объёма. Она зависит от фор-

мы и размеров частиц порошка. Чем крупнее частицы порошка и правильнее их форма, тем больше значение насыпной плотности. Наличие выступов и неровностей на поверхности частиц затрудняет их взаимное перемещение и поэтому порошки с негладкой поверхностью обладают меньшей насыпной плотностью. Влияет на насыпную плотность наличие тонких фракций в порошке. Чем их больше, тем меньше значение насыпной плотности.

Утряска – способность порошков при встряхивании занимать объём меньше первоначального. При приложении механических виброколебаний к сосуду, заполненному порошком, частицы порошка, перераспределяясь друг относительно друга, расположатся существенно более компактно. Сокращение объёма, занимаемого порошком, происходит без деформации его частиц. Определение *плотности утряски* регламентируется ГОСТ 25279–82:

- навеску порошка 50 г помещают в стеклянный мерный цилиндр ёмкостью 25...50 см³;
- утряску ведут вручную легким постукиванием цилиндра о стол или с помощью вибратора до установления постоянного объёма;
- расчёт плотности утряски ведут по формуле

$$\gamma_{\text{утр}} = G/V_{\text{утр}}, \text{ г/см}^3, \quad (2.3)$$

где $V_{\text{утр}}$ – объём порошка после утряски, см³; G – масса порошка, г.

Плотность утряски зависит от тех же свойств порошка, что и насыпная плотность, но при этом $\gamma_{\text{утр}}$ на 20...50% больше $\gamma_{\text{нас}}$.

Текучесть – способность порошка перемещаться под действием силы тяжести. Она зависит от трения и сцепления частиц между собой и других факторов. Текучесть по ГОСТ 20899–75 выражается числом секунд, за которое 50 г порошка (G_t) вытекает через калиброванное отверстие конусной воронки диаметром $r = 2,5$ мм.

Пробу засыпают в воронку, у которой выходное отверстие закрыто. Затем открывают отверстие и одновременно включают секундомер до окончания истечения порошка. Испытание следует проводить 3 – 5 раз. Расчёт ведут по формуле

$$k = r^{2,58}/G_t, \quad (2.4)$$

где τ – время истечения порошка, с.

Для металлических порошков $k = 1,2...6,4$. Чем больше k , тем меньше подвижность порошков. В заводской практике для контроля текучести обычно используют время истечения порошка из воронки τ , так как эта характеристика тесно связана с поведением порошковой шихты при её засыпке в пресс-форму или другое формообразующее устройство.

Порядок выполнения работы

1. Определить насыпную плотность нескольких металлических порошков, полученных различными методами или отличающихся своим гранулометрическим составом.

2. Определить плотность утряски этих порошков.

3. Определить текучесть порошков.

Сравнить технологические свойства различных порошков и сделать выводы об их зависимости от формы и размеров частиц.

Содержание отчёта

1. Формулировка цели работы.

2. Краткое описание методики определения технологических свойств порошков.

3. Результаты испытаний технологических свойств порошков (табл. 2.1).

4. Выводы.

2.1. Результаты измерений

Порошок	$\gamma_{\text{нас}}$, Г/СМ ³	$\gamma_{\text{утр}}$, Г/СМ ³	τ , с	k

Контрольные вопросы

1. Назовите основные технологические свойства порошковых материалов.

3. Что такое насыпная плотность?

5. Как влияет размер и форма частиц на насыпную плотность?

6. Как влияет вибрация на плотность порошка?

7. Что такое текучесть порошка, как она зависит от формы и размеров частиц?

Литература: [1, с. 174 – 176; 3, с. 75 – 76].

ПРЕССУЕМОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Цель работы: изучить влияние давления на плотность и пористость прессовок из металлических порошков.

Оборудование и материалы: гидравлический пресс П-50, пресс-форма, технические весы с разновесами, штангенциркуль, металлические порошки.

Краткие теоретические положения

Формование деталей из порошковой шихты представляет собой процесс получения заготовки необходимой формы, размеров и плотности.

Различают формование с приложением давления (прессование в закрытые и открытые формы, прокатка порошков) и без него (виброуплотнение, шликерное литье).

При использовании давления объём порошкового тела изменяется в результате относительного перемещения частиц (заполнения пор) и за счёт пластической деформации отдельных частиц. При прессовании хрупких материалов деформация проявляется в разрушении и дроблении выступов на поверхности частиц. В различных методах меняется характер и скорость приложения давления, температурные условия уплотнения порошковой шихты. Главное назначение прессования – формование изделия определенных размеров и формы, придание прессовкам прочности, необходимой для сохранения формы во время последующих операций.

Наиболее распространённый вариант – холодное прессование в закрытых стальных пресс-формах.

Уплотнение порошков при прессовании зависит от твёрдости, пластичности, способности к деформированию, формы и размеров частиц. Зависимость относительной плотности от давления прессования можно выразить идеализированной кривой с тремя характерными участками (рис. 3.1).

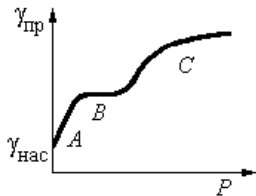


Рис. 3.1. Кривая уплотнения порошка при прессовании

Из графика видно, что наиболее интенсивное уплотнение должно происходить на первой стадии процесса (участок *A*), связанной с проскальзыванием частиц и их более плотной упаковкой под действием прикладываемых внешних сил. Перемещение частиц в объёме прессовки происходит неравномерно. Одни перемещаются в ближайшие пустоты свободно, без особого

трения о поверхности соседних частиц, с которыми они слабо соприкасаются. Движение других может тормозиться значительным трением по поверхности соседних частиц, с которыми они находятся в плотном контакте, и по пресс-форме. По окончании первой стадии процесса получается упаковка, близкая к максимально плотной.

Вторая стадия (участок *B*) характеризуется тем, что давление возрастает, а плотность при этом не увеличивается. Под действием внешнего давления частицы воздействуют друг на друга, создавая *контактные напряжения*, под действием которых они деформируются упруго. При этом после снятия давления порошок сохраняет свою текучесть.

Наконец, когда за счёт увеличения давления контактные напряжения превышают предел текучести, процесс уплотнения вступает в третью стадию (участок *C*). С этого момента пластическая деформация охватывает весь объём частицы, меняя её форму. За счёт сдвига происходит заполнение пор, уменьшение их объёма.

Величина напряжений между частицами зависит от суммарной площади контактирования в единице объёма порошка. Если порошок мелкий, они малы (меньше предела текучести компактного материала), – частицы порошка деформируются упруго, и надёжного механического схватывания частиц не происходит. В более крупном порошке уже при малых давлениях прессования частицы схватываются между собою, что ведёт к получению плотной заготовки с гладкой поверхностью и острыми неосыпающимися кромками.

На практике из-за разного размера частиц в порошке происходит взаимное наложение указанных стадий уплотнения.

Энергия прессования расходуется на преодоление трения между частицами и на деформирование частиц. Зона максимальной плотности находится на некотором удалении от прессующего пуансона, так как сказывается трение частиц о его торцовую поверхность. В сечении брикета плотность также изменяется: при одностороннем приложении давления в сечении со стороны прессующего пуансона плотность увеличивается от центра к периферии, а в противоположном сечении – наоборот. Применение смазки позволяет уменьшить внешнее трение и увеличить процесс уплотнения. В качестве *твёрдых смазок* используют стеариновую кислоту и её соли (стеараты), дисульфид молибдена, фторид кальция и т.д.

Аналитическими зависимостями, связывающими плотность прессовок с давлением прессования p и свойствами прессуемого порошка, могут служить уравнения М.Ю. Бальшина

$$\lg p = -m \lg \beta + \lg p_{\max} \quad (3.1)$$

или

$$\lg p = m \lg \theta + \lg p_{\max} \quad (3.2)$$

где p_{\max} – расчётное максимальное давление, при котором пористость исчезает; β – относительный объём прессовки; θ – относительная плотность брикета (прессовки); m – показатель прессования, зависящий от свойств порошка, для металлических порошков $m \geq 3$. Графически это уравнение изображается прямой в координатах $\lg \beta - \lg p$.

Для оценки поведения порошков при прессовании используют следующие характеристики: прессуемость и прочность прессовок.

Прессуемость – способность порошка образовывать заготовку заданной формы и минимально допустимой плотности под воздействием данного давления. Прессуемость характеризуется (ГОСТ 25820–82) уплотняемостью и формуемостью.

Уплотняемость – зависимость плотности прессовки от давления прессования (рис. 3.1)

Формуемость – способность порошка сохранять заданную форму при определённых значениях плотности. Она задаётся интервалом от минимальной до максимальной плотности ($\gamma_{\min} - \gamma_{\max}$), при которых прессовка не имеет разрушений после извлечения из пресс-формы.

Важнейшей характеристикой прессуемости является *коэффициент уплотнения порошка*

$$k = \gamma_{\text{пр}} / \gamma_{\text{нас}} = h_{\text{нас}} / h_{\text{пр}}, \quad (3.3)$$

где $\gamma_{\text{нас}}$ и $\gamma_{\text{пр}}$ – плотность насыпная и прессовки, соответственно; $h_{\text{нас}}$ – высота свободно засыпанного порошка в пресс-форме; $h_{\text{пр}}$ – высота заготовки после прессования.

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя металлические порошки с известной насыпной плотностью ($\gamma_{\text{нас}}$).
2. Ознакомиться с конструкцией пресс-формы, зарисовать эскиз, измерить размеры камеры засыпки в матрице.
3. Взвесить навески на лабораторных технических весах (20 г).
4. Произвести прессование заготовок из порошка:
 - засыпать порошок в матрицу пресс-формы;
 - на гидравлическом прессе П-50 произвести прессование заготовки при давлениях 50...800 МПа (0,5...8 тс/см²) по указанию преподавателя;
 - выпрессовать заготовку из пресс-формы с помощью подставки на прессе.
5. Взвесить прессовку на технических весах, $G_{\text{пр}}$.
6. Измерить размеры (высоту h , наружный $d_{\text{нар}}$ и внутренний диаметр $d_{\text{внутр}}$) прессовки штангенциркулем.
7. Определить упругое последствие по диаметру прессовки

$$u_{\text{пр}} = (d_{\text{нар}} - d_{\text{матр}}) / d_{\text{матр}}, \quad (3.4)$$

где $d_{\text{матр}}$ – диаметр отверстия матрицы.

8. Определить плотность прессовки $\gamma_{\text{пр}} = G_{\text{пр}} / V_{\text{пр}}$, г/см³, где $V_{\text{пр}}$ – объём прессовки.

9. Определить относительную плотность прессовки

$$\Theta_{\text{пр}} = (\gamma_{\text{пр}} / \gamma_{\text{комп}}) \cdot 100\%, \quad (3.5)$$

где $\gamma_{\text{комп}}$ – плотность компактного металла порошка.

10. Определить пористость прессовки

$$\Pi = 100 - \Theta_{\text{пр}}, \%. \quad (3.6)$$

11. Определить коэффициент уплотнения порошка.

12. Полученные результаты записать в табл. 3.1.

3.1. Характеристики прессуемости порошков

Давление прессования P , МПа	Масса заготовки, г	Размеры прессовки, мм			$\gamma_{\text{пр}}$, г/см ³	$\Theta_{\text{пр}}$, %	Π , %	k	$u_{\text{пр}}$, %
		$d_{\text{нар}}$	$d_{\text{внутр}}$	h					

13. Построить график зависимости $\gamma_{\text{пр}} = f(P)$.

14. Оценить по внешнему виду прессовок формуемость выданных порошков.

Содержание отчёта

1. Формулировка цели работы.
2. Краткое описание методики исследования прессуемости.
3. Таблица с результатами изучения прессуемости и формуемости порошков.
4. Графики.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные факторы, влияющие на прессуемость порошков.
2. Перечислите основные детали пресс-формы, в которой проводят прессование порошков.
3. Дайте определение прессуемости и формуемости порошков.
4. Объясните различие в прессуемости различных порошков.
5. Как влияет характер смазки на процесс прессования?
6. Объясните характер изменения относительной плотности прессовки с ростом давления прессования.

Литература: [1, с. 177 – 200].

ВЫБОР СХЕМЫ ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВОЙ ЗАГОТОВКИ

Цель работы: ознакомиться с принципами проектирования пресс-оснастки для производства деталей из порошков.

Краткие теоретические положения

Главной целью прессования является обеспечение равномерности материала заготовки. Для этого необходимо, чтобы во всем её объёме был одинаковый коэффициент уплотнения порошка.

Схема прессования определяется сложностью конфигурации прессуемой заготовки. В зависимости от области применения порошковых изделий предусмотрена классификация их на классы (изделия конструкционные и антифрикционные, фрикционные, электротехнические, магнитные, фильтрующие, специальные). Внутри классов – на семь групп по сложности формы (рис. 4.1).

I группа – детали без отверстия с неизменным сечением по высоте, ограниченные двумя плоскостями, перпендикулярными направлению прессования;

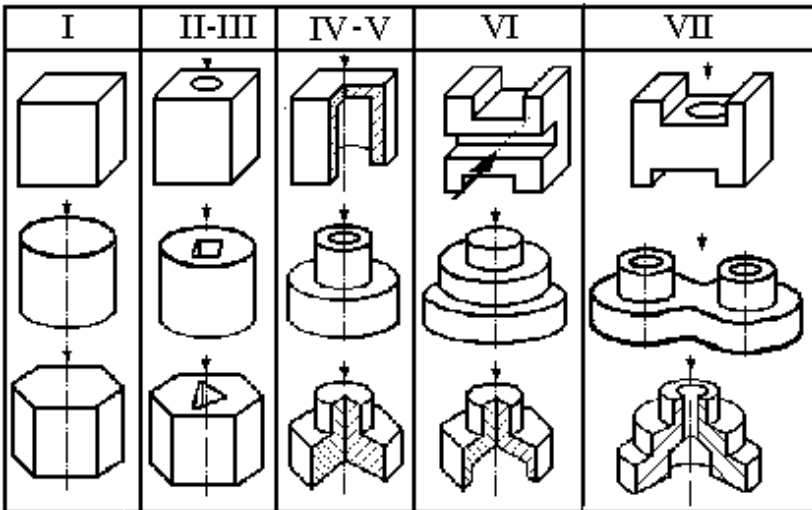


Рис. 4.1. Классификация прессуемых изделий по группам сложности

II группа – детали с неизменным сечением по высоте, ограниченные двумя параллельными плоскостями, с одним или несколькими отверстиями в направлении прессования, с $h/\delta_{\min} \leq 8$ (h – высота, δ_{\min} – минимальная толщина стенки);

III группа – детали II группы, но $h/\delta_{\min} \geq 8$;

IV группа – детали с наружным или внутренним буртом, $h/\delta_{\min} < 6$;

V группа – детали, относящиеся к IV группе, но $h/\delta_{\min} \geq 6$;

VI группа – детали без отверстия, имеющие несколько переходов в направлении прессования;

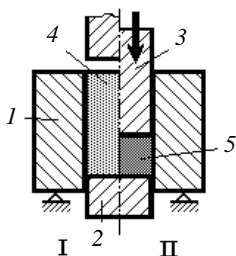
VII группа – детали с отверстиями, ограниченные непараллельными плоскостями или криволинейными поверхностями, имеющие несколько внешних и внутренних переходов в направлении прессования.

В соответствии с конфигурацией будущей детали выбирается схема прессования и соответствующая ей конструкция пресс-формы. Для того чтобы обеспечить одинаковый коэффициент уплотнения, прессовку разбивают на объёмы, имеющие одинаковую высоту. Применение составных пуансонов, проходящих в процессе прессования различный путь, приводит к равномерному распределению плотности в заготовке.

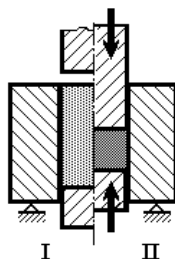
При проектировании пресс-формы необходимо определить схему прессования (рис. 4.2 – рис. 4.5), выбрать размеры и материал основных деталей. Расчёт пресс-формы начинают с выбора направления прессования. При этом следует учитывать, что: а) для деталей, имеющих ось вращения, усилие прессования должно быть направлено вдоль этой оси; б) для деталей, не имеющих оси вращения, усилие прессования должно быть направлено так, чтобы в этом направлении деталь имела наибольшее число переходов.

Затем составляется эскизная схема прессования, которая должна включать операции заполнения полости пресс-формы порошком, прессования и выталкивания детали. На эскизе должен быть показан момент окончания данной операции.

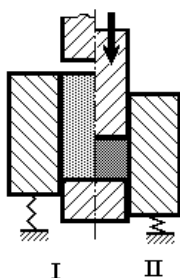
Для деталей I и II групп сложности наиболее распространенной схемой прессования является двухстороннее прессование. Для деталей III группы используют схемы прессования с относительным перемещением матрицы и стержня. Если $d_{\text{нар}}/d_{\text{вн}} > 3$, то целесообразно применять двустороннее прессование. Для деталей IV – VII групп применяют схемы прессования с несколькими верхними и нижними пуансонами.



a – одностороннее прессование



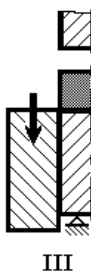
б – двухстороннее прессование
(матрица неподвижна)



в – двухстороннее прессование
(нижний пуансон неподвижен,
матрица на пружине за счёт трения
перемещается вниз)

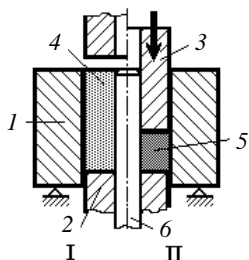


г – выталкивание
(нижний пуансон движется вверх
при неподвижной матрице)

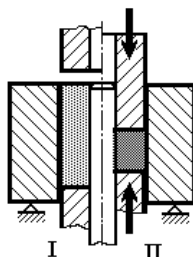


д – выталкивание
(матрица стягивается с прессовки вниз при неподвижном нижнем пуансоне)

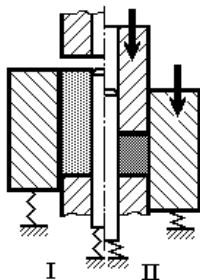
Рис. 4.2. Схема прессования деталей I группы сложности:
переходы: I – загрузка порошка; II – прессование; III – выпрессовка



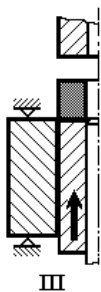
a – одностороннее прессование



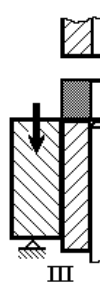
б – двухстороннее прессование
(матрица неподвижна)



в – двухстороннее прессование (нижний пуансон неподвижен, матрица и стержень на пружине за счёт трения перемещаются вниз)



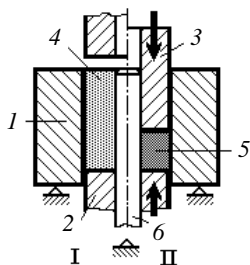
г – выталкивание
(нижний пуансон движется вверх при неподвижных матрице и стержне)



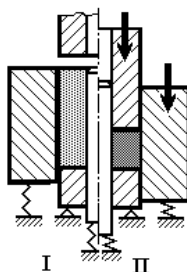
д – выталкивание
(матрица и стержень стягиваются с прессовки вниз при неподвижном пуансоне)

Рис. 4.3. Схема прессования деталей II группы сложности:
переходы: I – загрузка порошка; II – прессование; III – выпрессовка:

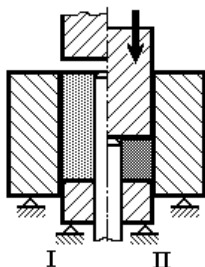
1 – матрица; 2 – нижний пуансон; 3 – верхний пуансон;
4 – порошок в камере засыпки; 5 – прессовка; 6 – стержень



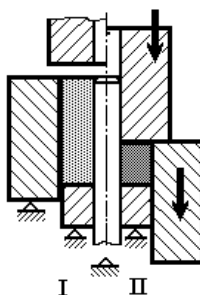
a – двухстороннее прессование
(матрица неподвижна)



б – двухстороннее прессование
(нижний пуансон неподвижен,
подпружиненные матрица и стержень
движутся вниз за счёт трения)



в – прессование с относительным
перемещением матрицы и стержня
(матрица неподвижна, стержень
вместе с верхним пуансоном
движутся вниз)



з – прессование с относительным
перемещением матрицы и стержня
(стержень неподвижен, матрица
и верхний пуансон движутся вниз)

Рис. 4.4. Схема прессования деталей III группы сложности:

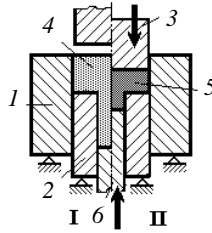
переходы: I – загрузка порошка; II – прессование;

выпрессовка производится так же,

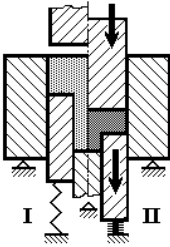
как для деталей II группы сложности:

I – матрица; 2 – нижний пуансон; 3 – верхний пуансон;

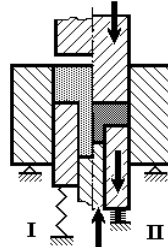
4 – порошок в камере засыпки; 5 – прессовка; 6 – стержень



a – прессование с неподвижным нижним пуансоном для бурта детали

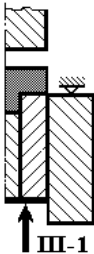


б – прессование с неподвижным нижним пуансоном для высокой части втулки

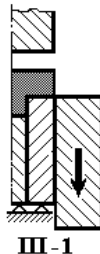


в – прессование IV встречным перемещением нижних пуансонов

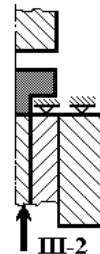
Подпружинивание (*б*, *в*) нижнего пуансона для бурта служит для соблюдения пропорциональности высот разных частей прессовки высотам их камер засыпки



з – 1-й ход выталкивания (матрица неподвижна, нижние пуансоны поднимаются вместе)



д – 1-й ход выталкивания (матрица стягивается вниз, нижние пуансоны неподвижны)



е – 2-й ход выталкивания (нижний пуансон выпрессовывает деталь из пуансона бурта)

Рис. 4.5. Схема прессования деталей IV группы сложности:

переходы: I – загрузка порошка; II – прессование;

III-1, III-2 – рабочие ходы выпрессовки

1 – матрица; 2, 6 – нижние пуансоны; 3 – верхний пуансон;

4 – порошок в камере засыпки; 5 – прессовка

4.1. Задание на проектирование пресс-формы (рис. 4.6)

Вариант	Размеры, мм								
	A	B	C	D	E	F	G	H	J
1	40	20	12	20	30	12	8	—	—
2	40	35	12	35	20	5	10	—	—
3	30	15	6	30	40	0	30	—	—
4	20	10	4	15	30	10	8	—	—
5	60	20	30	40	20	—	—	—	—
6	40	10	30	20	6	—	—	—	—
7	40	20	30	40	30	—	—	—	—
8	20	6	12	40	15	—	—	—	—
9	60	50	20	40	40	20	6	—	—
10	40	20	10	40	40	40	30	—	—
11	30	20	6	15	60	40	3	—	—
12	30	15	15	20	20	10	20	—	—
13	40	5	60	20	30	50	—	—	—
14	20	10	40	10	16	26	—	—	—
15	60	40	40	10	20	30	—	—	—
16	30	25	50	6	30	40	—	—	—
17	30	30	40	10	20	40	—	—	—
18	10	10	15	20	50	60	—	—	—
19	50	55	60	8	20	40	—	—	—
20	10	25	30	30	40	50	—	—	—
21	10	10	15	30	15	5	20	6	15
22	10	10	15	40	15	15	30	10	20
23	5	10	10	20	10	3	10	5	10
24	20	10	10	40	20	10	10	6	15

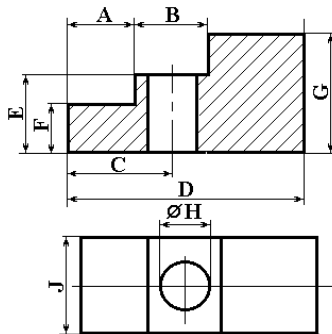


Рис. 4.6. Чертеж прессовки

Порядок работы

1. Получить от преподавателя эскиз прессованной детали.
2. В соответствии с конфигурацией детали выбрать схему прессования и соответствующую ей конструкцию пресс-формы (прил. 2).
3. Выбрать метод дозирования пресс-шихты.

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать операционные эскизы пресс-формы и описание последовательности операций формообразования детали.

Литература: [1, с. 177 – 200].

Лабораторная работа 5

ВЛИЯНИЕ СПЕКАНИЯ НА ПЛОТНОСТЬ И СТРУКТУРУ ПОРОШКОВОЙ ЗАГОТОВКИ

Цель работы: изучить влияние процесса спекания на плотность, пористость и усадку заготовок, полученных при различных давлениях прессования.

Материалы и оборудование: прессовки различных металлических порошков, полученные при различных давлениях (50, 200, 400 и 800 МПа), муфельная печь, аналитические весы, микрометр, тигель с графитовой засыпкой.

Задание

1. Изучить структуру заготовок из поликомпонентной шихты сплава ЮНДКБА, спечённых при разных температурах.
2. Определить температуру, при которой расплавилась ферро-алюминиевая лигатура и образовалась жидкая фаза.

Примечание: В структуре спечённого сплава можно различить частицы медного порошка красного цвета и светлые угловатые осколки ферроалюминиевой лигатуры при температурах спекания ниже их расплавления.

3. Определить температуру, при которой завершается формирование структуры спечённого твёрдого раствора сплава МАГНИКО.

4. С помощью микроскопа определить пористость полученного сплава. Для этого в окуляре с сетчатой вставкой посчитать число узлов сетки, которые попадают на поры.

Пористость Π рассчитать по формуле

$$\Pi = N_{\text{п}} / N_0,$$

где $N_{\text{п}}$ – число узлов сетки, попавших на поры в структуре; N_0 – общее число узлов сетки в окуляре.

Краткие теоретические положения

Спекание – одна из основных технологических операций в порошковой металлургии. Прессовка представляет из себя непрочное тело, которое, как и исходный порошок, обладает огромной удельной поверхностью, содержит высокую концентрацию других дефектов. Всё это обуславливает высокую термодинамическую неравновесность такой системы.

Движущей силой процесса спекания является сокращение свободной поверхности, уменьшение химической и физической неоднородности порошковой детали. В зависимости от характера взаимодействия компонентов, входящих в шихту, спекание можно подразделить на: а) спекание в твёрдой фазе; б) спекание с жидкой фазой.

При спекании порошков в твёрдой фазе принято различать спекание однокомпонентных и многокомпонентных систем.

При нагревании однокомпонентных прессовок сначала удаляются адсорбированные газы и смазочные вещества, восстанавливаются оксидные плёнки (если есть восстановительная атмосфера). Это приводит к образованию металлических микроконтактов между соприкасающимися частицами.

При повышении температуры увеличивается скорость диффузионной подвижности атомов, обеспечивая протекание процессов, уменьшающих свободную энергию системы.

Сначала стартует **поверхностная диффузия**, которая приводит к образованию шеек между частицами, их взаимному проскальзыванию и образованию изолированных пор неправильной формы. При этом в месте контакта частиц формируются и растут новые более равновесные зёрна. Дальнейший рост температуры делает заметной и **объёмную диффузию**, которая способствует залечиванию пор (рис. 5.1) и формированию равновесной зёрненной структуры.

Скорость усадки на различных стадиях процесса спекания не одинакова. Характерные особенности усадки – высокая скорость в начальный момент спекания и постепенное замедление при изотермической выдержке. Температура твёрдофазного спекания зависит от требуемого уровня плотности деталей и для большинства металлов находится в пределах $t_{сп} = (0,7 \dots 0,8) t_{пл}$.

Процессы при спекании прессовок из многокомпонентной порошковой шихты зависят от типа равновесной диаграммы состояния между входящими в состав веществами.

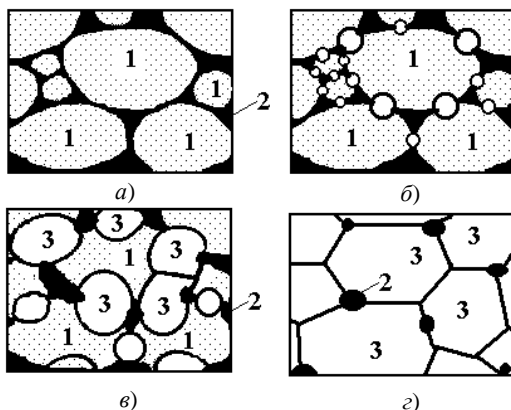


Рис. 5.1. Формирование структуры при спекании однокомпонентного материала:

a – прессовка; *б* – образование шеек между частицами порошка и зёрен спечённого материала; *в* – формирование изолированных пор и рост зёрен; *г* – сфероидизация пор и формирование равновесной структуры:
 1 – частицы порошка; 2 – поры; 3 – зёрна

Спекание сплавов в твёрдой фазе идет аналогично однокомпонентной заготовке, но дополнительной движущей силой является градиент концентрации химических элементов. Встречная диффузия атомов различных компонентов активизирует процесс диффузии и уплотнения заготовки. Однако в некоторых случаях различие в подвижности разноимённых атомов может приводить к появлению так называемой диффузионной пористости. Ещё одним фактором, влияющим на усадку, является увеличение параметра решётки образующегося твёрдого раствора, приводящее к росту размеров спечённой заготовки. Замедляет процесс спекания возможное образование промежуточных химических соединений, тормозящее диффузию.

Процесс спекания порошков **в присутствии жидкой фазы** (рис. 5.2) происходит, если один из компонентов имеют $t_{пл}$ плавления ниже $t_{сп}$ спекания. Иногда в местах контакта частиц разных компонентов образуется эвтектический сплав, температура плавления которого меньше температуры спекания – он будет жидкой фазой.

Обычно подбирают состав шихты так, чтобы жидкость смачивала поверхность твёрдой фазы. Атомы твёрдых частиц переходят в жидкий раствор и движутся к тем участкам структуры, где высока свободная энергия сплава, а затем выделяются из раствора, снижая эту энергию (например, за счёт уменьшения кривизны поверхности и роста зёрен).

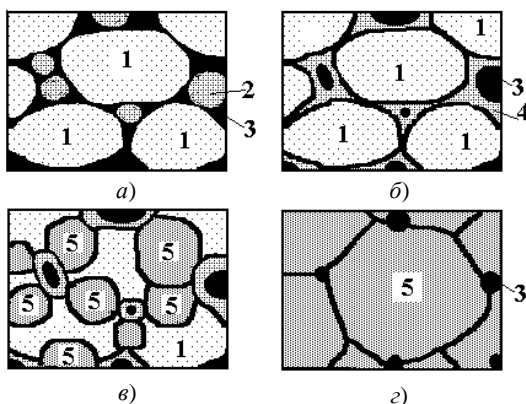


Рис. 5.2. Формирование структуры при жидкофазном спекании:
а – структура прессовки; *б* – образование жидкой фазы;
в – образование шеек между частицами тугоплавкой фазы и зёрен твёрдого раствора; *г* – образование равновесной структуры твёрдого раствора:
 1 – частицы тугоплавкого; 2 – легкоплавкого компонента;
 3 – поры; 4 – жидкая фаза; 5 – зёрна твёрдого раствора

Ошибочным является представление, что жидкая фаза просто заполняет все поры в заготовке при своём появлении – при этом забывают, что объём жидкости не намного больше кристалла (на 3...5%). **Диффузия в жидкой фазе идёт с намного большей скоростью**, чем в кристалле. Поэтому процесс спекания заметно ускоряется и его можно вести при меньших температурах. Характерная особенность спекания в жидкой фазе – большая степень уплотнения, чем при твёрдофазном обжиге.

Различают спекание с жидкой фазой, присутствующей до конца изотермической выдержки и спекание с исчезновением жидкой фазы в процессе нагрева.

В первом случае жидкость кристаллизуется при охлаждении после выдержки. Атомы второго компонента ограниченно растворяются в жидкой фазе, переносятся ею в участки с высокой энергией, где происходит их выпадение из расплава и кристаллизация.

Во втором случае при сильном растворении в жидкой фазе атомов второго компонента её температура кристаллизации растёт (в соответствии с диаграммой состояния) – она затвердеет ещё в процессе спекания.

Как правило, при спекании происходит положительная усадка, т.е. уменьшение размеров и объёма спекаемого изделия за счёт уменьшения пористости. Однако это не является обязательным. При образовании твёрдого раствора в системах с неограниченной растворимостью

компонентов увеличение параметра решётки может приводить к росту линейных размеров заготовки. Это же наблюдается и при спекании в присутствии больших количеств (10...15%) жидкой фазы.

По техническим особенностям процесс спекания можно подразделить на следующие виды:

- спекание свободно насыпанного порошка;
- спекание предварительно спрессованных брикетов;
- спекание и прессование совместное (горячее прессование).

В данной работе изучается процесс твёрдофазного спекания предварительно спрессованных брикетов из медного и железного порошка и структура сплава.

Режим спекания определяется не только температурой, но и временем выдержки, и подбирается в зависимости от требуемых свойств готового изделия – его физической и химической однородности.

Спекание ведут в защитной атмосфере или вакууме. Применяют также местные методы защиты изделий от окисления: спекание в контейнерах с карбюризатором (древесным углем) и другими засыпками.

В окислительной атмосфере производят отжиг оксидных материалов, таких как радиокерамика, сверхпроводники, терморезисторы, позисторы, магнитотвёрдые и магнитомягкие ферриты.

Порядок выполнения работы

I. Изучение изменения геометрии и плотности заготовок при спекании.

1. Предварительно спрессованные заготовки взвесить на аналитических весах, измерить линейные размеры.

2. Уложить прессовки в контейнер и засыпать карбюризатором.

3. Спекать прессовки в муфельной печи по заданному режиму (температура спекания и время сообщается преподавателем). Для сравнения вторая партия заготовок спекается в вакууме по тому же режиму.

4. Определить вес спечённых изделий $G_{\text{сп}}$ взвешиванием на аналитических весах, измерить микрометром размеры d и h и определить объём $V_{\text{сп}}$.

5. Рассчитать плотность спечённого образца

$$\gamma_{\text{сп}} = G_{\text{сп}} / V_{\text{сп}}, 10^3, \text{ кг/м}^3, \quad (5.1)$$

где $G_{\text{сп}}$ – масса заготовки после спекания, г; $V_{\text{сп}}$ – объём заготовки после спекания, см³.

6. Определить относительную плотность заготовки θ :

$$\theta = (\gamma_{\text{сп}} / \gamma_{\text{комп}}) \cdot 100, \% \quad (5.2)$$

где $\gamma_{\text{сп}}$ – плотность спечённого материала, 10^3 кг/м^3 ; $\gamma_{\text{комп}}$ – плотность компактного материала, 10^3 кг/м^3 .

7. Определить пористость

$$\Pi = 100 - \theta_{\text{сп}}, \% \quad (5.3)$$

8. Определить линейную усадку в направлении прессования и по диаметру заготовки Δh :

$$\Delta h = (h_1 - h_2 / h_1) \cdot 100, \% \quad (5.4)$$

где h_1, h_2 – размеры заготовки до и после спекания.

9. Определить объёмную усадку ΔV :

$$\Delta V = (V_{\text{пр}} - V_{\text{сп}} / V_{\text{пр}}) \cdot 100, \% \quad (5.5)$$

где $V_{\text{пр}}, V_{\text{сп}}$ – объём заготовки до и после спекания.

10. Полученные результаты занести в табл. 5.1.

5.1. Влияние условий прессования на спекание порошков

P , МПа	Размеры прессовки, мм			Размеры спечённой детали, мм			Усадка, %			Плотность	
	$D_{\text{пр}}$	$h_{\text{пр}}$	$d_{\text{пр}}$	$G_{\text{сп}}$	$h_{\text{сп}}$	$d_{\text{сп}}$	Δh	ΔD	ΔV	$\gamma_{\text{сп}}, 10^3 \text{ кг/м}^3$	$\theta, \%$

11. Построить графики зависимости плотности спечённой заготовки, объёмной и линейной усадки от давления прессования.

II. Изучение формирования структуры сплава ЮНДКБА при спекании.

Магнитотвёрдый сплав ЮНДКБА имеет сложный химический состав: 8% Al, 14% Ni, 3% Cu, 25% Co, 1% Nb, остальное – железо. Температура плавления компактного сплава $1370 \text{ }^\circ\text{C}$. Условием достижения его свойств является получение химически и физически однородного твёрдого раствора α , который при последующем дисперсионном старении в магнитном поле даст магнитотвёрдую структуру $\alpha + \alpha'$.

При получении этого сплава методом порошковой металлургии возможны два варианта технологии.

Один из них – выплавка сплава окончательного состава, измельчение и горячее прессование с последующим гомогенизирующим отжигом. Сплав очень хрупкий и твёрдый и не обладает уровнем формоустойчивости и прессуемости, необходимой для холодного прессования.

В случае традиционной технологии изготавливают поликомпонентную шихту, состоящую из нескольких порошков металлов с высокой пластичностью. Так как содержание углерода в этом прецизионном сплаве не должно быть выше 0,01%, необходимо выбирать чистые шихтовые материалы (так, применение карбонильных порошков железа и никеля не допускается – они содержат 0,5...0,9% С). Еще одна проблема, связанная уже с процессом спекания, в том как вводить алюминий. Его температура плавления не выше 660 °С, поэтому при спекании он образует свыше 15% (по объёму) жидкой фазы и разрушит прессовку. Поэтому его вводят в виде специально выплавленной и измельчённой лигатуры железо-алюминий, которая плавится при более высокой температуре и обеспечивает спекание с исчезающей жидкой фазой.

В состав пресс-шихты входят 16% лигатуры FeAl 50/50, 14% ПНЭ-1, 3% ПМС-1, 25% ПК-1, 1% ПНб-1 и 41% порошка железа ОСЧ 6-2. Холодное прессование проводили при давлении 1000 МПа (10 т/см²). Спекание проводили в вакууме при температурах 500, 700, 900, 1100, 1200 и 1300 °С в течение 1 часа, затем охлаждали с печью.

Содержание отчёта

1. Формулировка цели работы.
2. Краткое описание методики исследования спечённых изделий.
3. Таблица с результатами исследований спечённых заготовок.
4. Графики, выводы.

Контрольные вопросы

1. Перечислите процессы, протекающие при твёрдофазном и жидкофазном спекании.
2. Как производится выбор температуры спекания?
3. Как влияет атмосфера на ход процесса спекания?
4. Как влияет давление прессования на усадку при спекании?
5. Что является движущей силой процесса спекания? Каков механизм процесса спекания?

Литература: [1, с. 200 – 288].

**РАЗРАБОТКА ТЕХПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ
ЗАДАНЫХ РАЗМЕРОВ И ПЛОТНОСТИ МЕТОДОМ
ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

Цель работы: знакомство с особенностями разработки пресс-форм, с основными этапами проектирования технологического процесса изготовления изделий методом порошковой металлургии.

Краткие теоретические положения

Основные этапы проектирования технологического процесса изготовления изделий методом порошковой металлургии включают:

1. Определение технологических свойств исходной шихты.
2. Определение прессуемости шихты, т.е. давления прессования, массы навески порошка, плотности прессовки.
3. Определение оптимальных режимов спекания.
4. Проектирование пресс-формы для получения заданной детали.

К технологическим свойствам исходной шихты относятся:

- а) плотность,
- б) насыпная плотность,
- в) текучесть.

Для двух- и трёхкомпонентной шихты плотность рассчитывается по правилу аддитивности:

$$\gamma_k = 100(d_1 / \gamma_1 + d_2 / \gamma_2 + \dots + d_n / \gamma_n), \text{ г/см}^3. \quad (6.1)$$

где $\gamma_1 \dots \gamma_n$ – плотность отдельных компонентов, г/см³; $d_1 \dots d_n$ – содержание компонента в шихте, % вес.

Насыпную плотность и текучесть шихты определяют экспериментально по ГОСТ 19440–74 или по справочнику [2].

Определение прессуемости ведут по методике, изученной в лабораторной работе 3. При этом студент должен определить такие характеристики, как давление прессования, массу навески порошка.

Массу навески порошка определяют исходя из геометрических размеров изделия, плотности компактного материала и пористости спечённого изделия:

$$M = \gamma_k V(1 - n/100)k_1 k_2, \text{ г}, \quad (6.2)$$

где γ_k – плотность беспористого (компактного) материала, г/см³; V – объём изделия после спекания, см³; n – фактическая пористость спечённого изделия, %; $k_1 = 1,005 \dots 1,010$ – коэффициент, учитываю-

щий потери порошка при прессовании; $k_2 = 1,010 \dots 1,030$ – коэффициент, учитывающий потерю массы прессовки при спекании.

Определение оптимального режима спекания включает выбор температуры спекания и времени выдержки прессовки в печи. Режим спекания подбирается в зависимости от требуемых свойств готового изделия. При этом $T_{сп} = (0,7 \dots 0,8)T_{пл}$. Спекание целесообразно проводить в защитной атмосфере или в вакууме.

При проектировании пресс-формы необходимо определить схему прессования, выбрать размеры и материал основных деталей. В качестве материала основных деталей пресс-формы целесообразно применять сталь марок У10, 9ХС, ХВГ, Х12М, Р6М5, твёрдый сплав типа ВК20.

Затем составляется эскизная схема прессования, которая должна включать операции заполнения полости пресс-формы порошком, прессования и выталкивания детали. На эскизе должен быть показан момент окончания данной операции.

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя чертёж детали с указанием размеров, материала, пористости или усадки.
2. Выбрать состав порошковой шихты с указанием марок порошков и добавок, их весового количества (вес. %).
3. Из приложения 1, литературных или экспериментальных данных выбрать насыпную плотность шихты. В случае использования многокомпонентного материала плотность рассчитать по правилу аддитивности.
4. Выбрать схему прессования исходя из сложности детали. Произвести расчёт основных размеров пресс-формы.
5. Выбрать давление прессования.
6. Рассчитать массу навески порошка и усилие прессования.
7. Выбрать температуру и время спекания прессовки.
8. Определить основные размеры деталей пресс-форм и нарисовать операционные эскизы: засыпка порошка, прессование, выпрессовка.

Содержание отчёта

1. Эскизы детали и прессовки.
2. Состав порошковой шихты.
3. Давление и усилие прессования.
4. Операционные эскизы пресс-формы, засыпка порошка, прессование, выпрессовка с указанием размеров и материала.
5. Режим спекания.

Литература: [1, с. 170 – 450], [2], [3].

ЗАДАНИЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ЗАОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ И ИДО

Исходными данными для расчёта пресс-формы являются следующие величины:

- а) размеры готового изделия (высота, поперечный размер, размер отверстия) и допуски на них;
- б) плотность готового изделия γ ;
- в) упругое последствие по линейным размерам после прессования в процентах α или в абсолютных единицах l_n ;
- г) объёмная усадка при спекании в процентах δ ;
- д) усадка по линейным размерам при спекании в процентах β или в абсолютных величинах ε ;
- е) припуск (положительный или отрицательный) на калибровку Π_k (если операция калибровки предусматривается);
- ж) технологические свойства порошков: насыпная плотность γ_n и плотность утряски $\gamma_{ут}$.

Вышеперечисленные величины определяются опытным путем или выбираются из справочных таблиц.

Пример расчёта пресс-формы

Задание. Рассчитать пресс-форму для детали (рис.), выполненной из материала: 95% железа и 5% меди. Удельная плотность компактного сплава $\gamma_k = 7,8 \text{ г/см}^3$. Насыпная плотность $\gamma_{нас} = 1,5 \text{ г/см}^3$. Пористость прессовки $\Pi_{прес} = 30\%$. Пористость после спекания $\Pi_{спеч} = 10\%$. Давление прессования 500 МПа.

Определить: массу навески шихты, высоту засыпки порошка в форму, усилие прессования, высоту прессовки после выгалкивания. Выбрать температуру, время и атмосферу спекания прессовки.

1. Определение массы навески шихты Q :

$$Q = \gamma_k V_d (1 - \Pi_{спеч}/100) K_1,$$

где $\Pi_{спеч} = 10\%$; V_d – объём детали; $K_1 = 1,01$ – коэффициент, учитывающий потерю массы прессовки при спекании в результате восстановления оксидов и удаления примесей.

Находим объём детали

$$V_d = 60 \cdot 30 \cdot 100 = 180\,000 \text{ мм}^3 = 180 \text{ см}^3,$$

тогда $Q = 7,8 \cdot 180 \cdot \left(1 - \frac{10}{100}\right) \cdot 1,01 \cdot 1,02 = 1301,76 \approx 1302 \text{ г}$.

2. Определение высоты засыпки порошка в пресс-форму $H_{зас}$.

Определяем объём порошка навески

$$V_{\text{пор}} = \frac{Q}{\gamma_{\text{нас}}} = \frac{1302}{1,5} = 868 \text{ см}^3.$$

Находим поперечное сечение прессовки

$$F_{\text{в плане}} = 60 \cdot 30 = 1800 \text{ мм}^2 = 18 \text{ см}^2.$$

Находим высоту засыпки

$$H_{\text{зас}} = \frac{V_{\text{пор}}}{F_{\text{в плане}}} = \frac{868}{18} = 48,2 \text{ см}.$$

3. Определяем усилие прессования

$$P = (p + p_{\text{тр}}) F_{\text{в плане}},$$

где p – давление прессования; $p_{\text{тр}}$ – потери на внешнее трение; $F_{\text{в плане}}$ – площадь поперечного сечения изделия:

$$p_{\text{тр}} = f p_{\text{б}} \frac{F_{\text{тр}}}{F_{\text{в плане}}},$$

где $f = 0,2$ – коэффициент трения порошка о стенки формы; $F_{\text{тр}}$ – площадь поверхности трения; $p_{\text{б}}$ – боковое давление; $P_{\text{б}} = p \cdot \xi$, где $\xi = 0,4$ – коэффициент бокового давления;

$$P_{\text{б}} = 500 \cdot 0,4 = 200 \text{ МПа};$$

$$F_{\text{тр}} = 2 \cdot 100 \cdot 60 + 2 \cdot 100 \cdot 30 = 18\,000 \text{ мм}^2 = 180 \text{ см}^2;$$

$$P_{\text{тр}} = 0,2 \cdot 200 \cdot (180/18) = 400 \text{ МПа},$$

тогда усилие прессования $P = (500 + 400) \cdot 18 = 16\,200 \text{ кг}$.

4. Определяем высоту прессовки после выталкивания из пресс-формы.

Зная пористость прессовки, определяем её объём:

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{д}} + V_{\text{д}} \cdot 0,3 = 180 + 180 \cdot 0,3 = 234 \text{ см}^3.$$

Определяем высоту прессовки в форме

$$h_{\text{в форме}} = \frac{V_{\text{пр}}}{F_{\text{в плане}}} = \frac{284}{18} = 13 \text{ см},$$

тогда ход пуансона составит

$$h_n = H_{\text{зас}} - h_{\text{в форме}} = 48,2 - 13 = 35,2 \text{ см}.$$

Высота прессовки после выталкивания составит

$$h = h_{\text{в форме}} + \Delta h,$$

где Δh – величина упругого последействия, составляет 5%

$$h = 13 + 13 \cdot 0,05 = 13,65 \text{ см}.$$

5. Спекание проводим при температуре 1100...1200 °С в вакууме, в течение двух часов.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1

Контрольная работа заключается в расчёте пресс-формы для заданной детали из различных материалов. При расчёте необходимо: а) определить вес навески шихты; б) определить высоту засыпки порошка в форму; в) определить усилие прессования; г) определить высоту прессовки после выталкивания; д) выбрать температуру, время и атмосферу спекания.

Задания к контрольной работе № 1

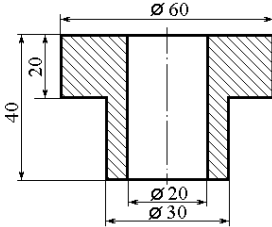


Рис. 1. Эскиз детали

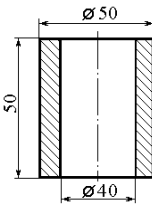


Рис. 2. Эскиз детали

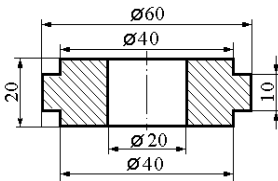


Рис. 3. Эскиз детали

Вариант 1 (рис. 1).

Материал детали: железо и 5% меди.

Удельная плотность компактного сплава $\gamma_k = 7,8 \text{ г/см}^3$.

Насыпная плотность шихты $\gamma_{\text{нас}} = 2,3 \text{ г/см}^3$.

Пористость прессовки $\Pi_{\text{прес}} = 30\%$.

Пористость после спекания $\Pi_{\text{спек}} = 10\%$.

Давление прессования 500 МПа.

Рассчитать пресс-форму. Объяснить процессы, проходящие при спекании.

Вариант 2 (рис. 2).

Материал детали: 80% меди и 20% цинка.

Удельная плотность компактного сплава $\gamma_k = 8,9 \text{ г/см}^3$.

Насыпная плотность шихты $\gamma_{\text{нас}} = 1,8 \text{ г/см}^3$.

Пористость прессовки $\Pi_{\text{прес}} = 30\%$.

Пористость после спекания $\Pi_{\text{спек}} = 10\%$.

Давление прессования 600 МПа.

Рассчитать пресс-форму. Объяснить процессы, проходящие при спекании.

Вариант 3 (рис. 3).

Материал детали: медно-графитный порошок (1,5% графита).

Удельная плотность компактного сплава $\gamma_k = 8,8 \text{ г/см}^3$.

Насыпная плотность шихты $\gamma_{\text{нас}} = 1,7 \text{ г/см}^3$.

Пористость прессовки $\Pi_{\text{прес}} = 50\%$.

Пористость после спекания $\Pi_{\text{спек}} = 30\%$.

Давление прессования 600 МПа.

Рассчитать пресс-форму. Объяснить процессы, проходящие при твёрдофазном спекании.

Вариант 4 (рис. 4).

Материал детали: ВК8; порошок карбида вольфрама WC и кобальта.

Удельная плотность компактного сплава $\gamma_k = 14 \text{ г/см}^3$.

Насыпная плотность шихты $\gamma_{\text{нас}} \sim 2,3 \text{ г/см}^3$.

Пористость прессовки $P_{\text{прес}} = 20\%$.

Пористость после спекания $P_{\text{спек}} = 3\%$.

Давление прессования 1000 МПа.

Рассчитать пресс-форму. Объяснить процессы, проходящие при жидкофазном спекании.

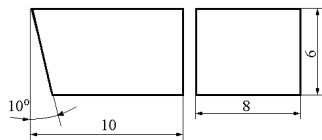


Рис. 4. Эскиз детали

Вариант 5 (рис. 5).

Материал детали: медь – 89%; олово – 10%; фосфор – 1%.

Удельная плотность компактного сплава $\gamma_k = 8,9 \text{ г/см}^3$.

Насыпная плотность шихты $\gamma_{\text{нас}} = 1,5 \text{ г/см}^3$.

Пористость прессовки $P_{\text{прес}} = 30\%$.

Пористость после спекания $P_{\text{спек}} = 10\%$.

Давление прессования 800 МПа.

Рассчитать пресс-форму. Пояснить способ получения порошков из оксидов и солей.

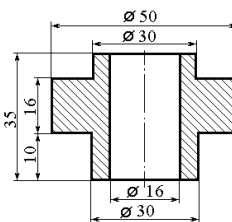


Рис. 5. Эскиз детали

Вариант 6 (рис. 6).

Материал детали: железо – 95%; медь – 5%.

Удельная плотность компактного сплава $\gamma_k = 7,8 \text{ г/см}^3$.

Насыпная плотность шихты $\gamma_{\text{нас}} = 2,3 \text{ г/см}^3$.

Пористость прессовки $P_{\text{прес}} = 20\%$.

Пористость после спекания $P_{\text{спек}} = 5\%$.

Давление прессования 500 МПа.

Рассчитать пресс-форму. Пояснить способ получения порошков электролитическим осаждением.

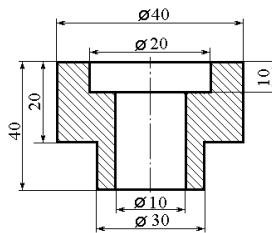


Рис. 6. Эскиз детали

Вариант 7 (рис. 7).

Материал детали: медь – 70%, цинк – 30%.

Удельная плотность компактного сплава $\gamma_k = 8,9 \text{ г/см}^3$.

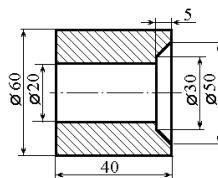


Рис. 7. Эскиз детали

Насыпная плотность шихты $\gamma_{\text{нас}} = 1,5 \text{ г/см}^3$.

Пористость прессовки $P_{\text{прес}} = 30\%$.

Пористость после спекания $P_{\text{спеч}} = 10\%$.

Давление прессования 700 МПа.

Рассчитать пресс-форму. Описать способ получения порошков методом термической диссоциации.

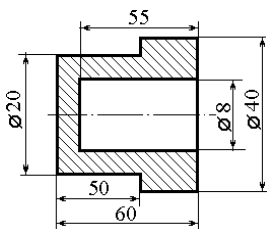


Рис. 8. Эскиз детали

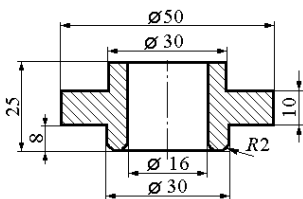


Рис. 9. Эскиз детали

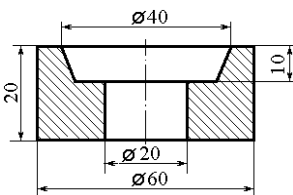


Рис. 10. Эскиз детали

Вариант 8 (рис. 8).

Материал детали: медно-графитный порошок (1,5% графита).

Удельная плотность компактного сплава $\gamma_k = 8,8 \text{ г/см}^3$.

Насыпная плотность шихты $\gamma_{\text{нас}} = 1,7 \text{ г/см}^3$.

Пористость прессовки $P_{\text{прес}} = 40\%$.

Пористость после спекания $P_{\text{спек}} = 20\%$.

Давление прессования 500 МПа.

Рассчитать пресс-форму. Описать способы получения порошков механическим дроблением.

Вариант 9 (рис. 9).

Материал детали: железо – графит (3%).

Удельная плотность компактного сплава $\gamma_k = 7,7 \text{ г/см}^3$.

Насыпная плотность шихты $\gamma_{\text{нас}} = 2,2 \text{ г/см}^3$.

Пористость прессовки $P_{\text{прес}} = 30\%$.

Пористость после спекания $P_{\text{спек}} = 15\%$.

Давление прессования 600 МПа.

Рассчитать пресс-форму. Описать технологические свойства порошков и их зависимость от формы и размеров их частиц.

Вариант 10 (рис. 10).

Материал детали: железо – 50%; 50% – Ni.

Удельная плотность компактного сплава $\gamma_k = 8,9 \text{ г/см}^3$.

Насыпная плотность шихты $\gamma_{\text{нас}} = 1,5 \text{ г/см}^3$.

Пористость прессовки $P_{\text{прес}} = 30\%$.

Пористость после спекания $P_{\text{спек}} = 5\%$.

Давление прессования 500 МПа.

Рассчитать пресс-форму. Описать способы получения порошков механическим дроблением.

Вариант 11 (рис. 11).

Материал детали: Si – 1%, остальное Fe.

Удельная плотность компактного сплава $\gamma_k = 7,8 \text{ г/см}^3$.

Насыпная плотность шихты $\gamma_{\text{нас}} = 2 \text{ г/см}^3$.

Пористость прессовки $P_{\text{прес}} = 35\%$.

Пористость после спекания $P_{\text{спек}} = 10\%$.

Давление прессования 600 МПа.

Рассчитать пресс-форму. Описать способы получения порошков методом термической диссоциации.

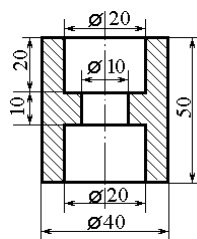


Рис. 11. Эскиз детали

Вариант 12 (рис. 12).

Материал детали: графит – 2%; остальное Fe.

Удельная плотность компактного сплава $\gamma_k = 7,8 \text{ г/см}^3$.

Насыпная плотность шихты $\gamma_{\text{нас}} = 2,2 \text{ г/см}^3$.

Пористость прессовки $P_{\text{прес}} = 30\%$.

Пористость после спекания $P_{\text{спек}} = 15\%$.

Давление прессования 500 МПа.

Рассчитать пресс-форму. Объяснить процессы, происходящие при жидкофазном спекании.

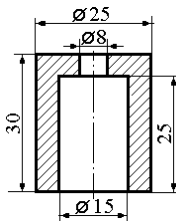


Рис. 12. Эскиз детали

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одной из главных тенденций в развитии машиностроения является снижение веса конструкций за счёт использования современных композитных материалов. Новые материалы внедряются во всех видах транспорта, так как это помогает обеспечить лучшую энергоэффективность.

Главное преимущество композиционных материалов в том, что материал и конструкция создаётся одновременно. Стоит сразу оговорить, что КМ создаются под выполнение данных задач, соответственно не могут вмещать в себя все возможные преимущества, но, проектируя новый композит, инженер волен задать ему характеристики, значительно превосходящие характеристики традиционных материалов при выполнении данной цели в данном механизме, но уступающие им в каких-либо других аспектах. Это значит, что КМ не может быть лучше традиционного материала во всём, т.е. для каждого изделия инженер проводит все необходимые расчёты и только потом выбирает оптимум между материалами для производства.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Композиционные материалы : справочник / под ред. Д.М. Карпиноса. – Киев : Наукова думка, 1985. – 592 с.
2. Петросян, А.С. Порошковая металлургия и технология композиционных материалов / А.С. Петросян. – М. : Изд. А.С. Петросян, 2007. – 240 с.
3. Батаев, А.А. Композиционные материалы. Сер. Новая университетская библиотека / А.А. Батаев, В.А. Батаев. – М. : Логос, 2006. – 400 с.
4. Шевченко, А.А. Физикохимия и механика композиционных материалов / А.А. Шевченко. – М. : Профессия, 2010. – 224 с.
5. Формирование структуры композиционных материалов и их свойства / Б.В. Гусев, В.И. Кондращенко, Б.П. Маслов, А.С. Файвусович. – М. : Научный мир, 2006. – 560 с.
6. Сидоренко, Ю.Н. Конструкционные и функциональные волокнистые композиционные материалы : учеб. пособие / Ю.Н. Сидоренко. – Томск : Изд-во ТГУ, 2006. – 107 с.
7. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / под ред. Б.О. Митина. – М. : Металлургия, 1987. – 350 с.
8. Минаев, А.М. Основы технологии порошковой металлургии / А.М. Минаев. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1998. – 79 с.
9. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения : справочник / И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, И.Д. Радомысельский и др. ; отв. ред. И.М. Федорченко. – Киев : Наукова думка, 1985. – 624 с.
10. Ничипоренко, О.С. Распыленные металлические порошки / О.С. Ничипоренко, Ю.И. Найда, А.Б. Медведовский. – Киев : Наукова Думка, 1980. – 240 с.
11. Гегузин, Я.Е. Физика спекания / Я.Е. Гегузин. – М. : Наука, 1984. – 311 с.
12. Либенсон, Г.А. Оборудование цехов порошковой металлургии / Г.А. Либенсон, В.С. Пайов. – М. : Металлургия, 1983. – 264 с.
13. Клячко, Л.И. Оборудование и оснастка для формования порошковых материалов / Л.И. Клячко, А.М. Уманский, В.Н. Бобров. – М. : Металлургия, 1986. – 336 с.
14. Погильский, Р.Я. Прессование порошков керамических масс / Р.Я. Погильский, Ю.Е. Пивинский. – М. : Металлургия, 1983. – 176 с.
15. Виноградов, Г.А. Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул / Г.А. Виноградов, В.П. Каташинский. – М. : Металлургия. – 1979. – 224 с.
16. Ивенсен, В.А. Феноменология спекания / В.А. Ивенсен. – М. : Металлургия, 1985. – 247 с.
17. Степанчук, А.Н. Технология порошковой металлургии / А.Н. Степанчук, П.И. Билык, П.А. Бойко. – Киев : Высшая школа, 1989. – 406 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ТЕХНОЛОГИИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

1. МЕДНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ ПОРОШКИ

Порошок медный электролитический производят методом электролиза растворов солей и применяют для изготовления деталей методом порошковой металлургии и других целей, преимущественно в электро-технической, машиностроительной и химической промышленности.

1.1. Медный электролитический порошок по ГОСТ 4960–75

Медный электролитический порошок изготавливают по ГОСТ 4960–75 следующих марок: ПМ – порошок нестабилизированный; ПМС-1, ПМС-А – порошок стабилизированный; ПМС-К – порошок стабилизированный конопаточный; ПМС-В – порошок стабилизированный, ПМС-Н – порошок стабилизированный низкодисперсный.

1.1.1. Технические характеристики

Наименование параметра	Марка				
	ПМС-1	ПМС-А	ПМС-В	ПМС-Н	ПМС-К
Насыпная плотность, г/см ³	1,25...1,90	1,30...1,50	2,40...2,70	2,50...3,50	2,50...3,50
Текущность, с, не более	–	–	36	–	–

1.1.2. Химический состав

Марка порошка	Меди не менее, %	Содержание примесей, не более, %							
		Fe	Pb	As	Sb	O ₂	SO ₄ ²⁻	Остаток	Влаги, %
ПМС-В	99,5	0,018	0,05	0,003	0,005	0,10	0,01	0,04	0,05
ПМС-1						0,20			
ПМС-А						0,30			
ПМ						0,50			
ПМС-К		0,06					0,05		
ПМС-Н									

* Прокалённый остаток после обработки азотной кислотой.

1.1.3. Гранулометрический состав

Марка	Номинал величины частиц порошка, мм	Прохождение через сито с сетками по ГОСТ 6613–86, %, не менее					
		045К	0224К	018К	01К	0071К	0045К
ПМ	0,1	–	–	–	99,5	90	65...80
ПМС-А	0,1	–	–	–	99,5	90	73...80
ПМС-1	0,1	–	–	–	99,5	90	65...80
ПМС-К	0,45	90	–	не более 10	–	–	–
ПМС-Н	0,2	–	95	–	–	–	–

Гарантийный срок хранения с момента изготовления медного порошка марок ПМС-В, ПМС-1, ПМС-А, ПМС-Н – 6 месяцев; ПМ – 2 месяца.

1.2. Стабилизированный медный порошок по ТУ 48-0318-057–89

1.2.1. Технические характеристики

Наименование параметров	Марка
	ПМО
Содержание меди, %, не менее	99,5
Гранулометрический состав, %	
< 100 мкм	>30
Насыпная плотность, г/см ³	2,0...4,0

1.3. Стабилизированный медный электролитический порошок по ТУ 1793-368-109–99 и ТУ 1793-368-115–99

1.3.1. Химический состав

Марка порошка и ТУ		Основа Cu, %	Содержание примесей, не более, %							
			Fe	Pb	As	Sb	O ₂	SO ₄ ²⁻	*оста-ток	вла-ги
ПМС-11	ТУ 1793-368-109–99	99,5	0,018	0,05	0,003	0,005	0,2	0,01	0,04	0,05
ПМС-12	ТУ 1793-368-									
ПМС-14	115–99									

* Прокаленный остаток после обработки азотной кислотой.

Гарантийный срок хранения 6 месяцев с момента изготовления.

1.3.2. Гранулометрический состав

Марка	Номинал величины частиц порошка, мм	Гранулометрический состав, %					Насыпная плотность, г/см ³
		> 100 мкм	> 71 мкм	> 63 мкм	< 63 мкм	> 45 мкм	
ПМС-11	ТУ 1793-368-109-99	0,1 max		>5,0 max	95,0 min		1,25...1,90
ПМС-12	ТУ 1793-368-115-99	> 0,5 max	>10 max	20...35			1,20...1,60
ПМС-14		> 0,5 max	>10 max			20...35	1,5...2,0*

* Примечание. Насыпная плотность для медного порошка, предназначенного для электротехнической промышленности, должна соответствовать 1,7...2,0 г/см³.

2. ПОРОШОК НИКЕЛЕВЫЙ КАРБОНИЛЬНЫЙ

2.1. Химический состав порошков

Марка	УТ-1	УТ-2	УТ-3ПМ	УТ-3	УТ-4
Ni min %	99,9	99,9	99,9	99,8	99,9
C max	0,09	0,09	0,09	0,1	0,09
Fe max	0,0015	0,0015	0,0015	0,003	0,0015
Co max	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001
Si max	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001
Cu max	0,0003	0,0003	0,0003	0,003	0,0003

Продолжение табл. 2.1

Марка	Л15	Л16	Л17	Л18
Ni min %	99,7	99,7	99,7	99,7
C max	0,28	0,28	0,28	0,28
Fe max	0,002	0,002	0,002	0,002
Co max	0,001	0,001	0,001	0,001
Si max	0,001	0,001	0,001	0,001
Cu max	0,001	0,001	0,001	0,001

Продолжение табл. 2.1

Марка	C-20	C-27	C-30
Ni, min (%)	99,7	99,7	99,7
Mg, max	0,0001	0,0001	0,0001
Fe, max	0,002	0,002	0,002
Si, max	0,001	0,001	0,001
Cd, max	0,0003	0,0003	0,0003
Mn, max	0,001	0,001	0,001
Cu, max	0,001	0,001	0,001

2.2. Физические и технологические свойства порошков

Марка	УТ-1	УТ-2	УТ-3ПМ	УТ-3	УТ-4
Насыпная плотность, г/см ³	3,0...3,5	2,51...2,99	1,91...2,60	1,91...2,60	1,41...1,90
Размер, мкм	7...8,5	5...7	3...6	20 мкм, 50% от количества	1,70...3,00

Продолжение табл. 2.2

Марка	Л15	Л16	Л17	Л18
Насыпная плотность, г/см ³	1,01...1,40	0,81...1,0	0,61...0,8	0,45...0,60
Размер, мкм	2,10...2,40	1,90...2,10	1,60...1,90	0,45...0,60

Продолжение табл. 2.2

Марка	С-20	С-27	С-30
Общая плотность, г/см ³	0,51...0,64	0,51...0,64	0,60...0,80
Размер, мкм	1,85...2,20	2,21...2,90	2,91...3,50

3. ЖЕЛЕЗНЫЕ ПОРОШКИ

3.1. Железные порошки по ТУ 14-1-5365-98

3.1.1. Химический состав

Марка	Основа	Химический состав, %						
		С	Si	Mn	S	P, не более	Кислорода, всего, не более	*Остаток
МПЖРВ 1	Железо	0,01	0,018	0,060	0,0035	0,015	0,15	0,07
ПЖРВ 2	Железо	0,02	0,018	0,060	0,0035	0,020	0,25	0,12
ПЖРВ 3	Железо	0,02	0,018	0,060	0,0035	0,020	0,5	0,18
ПЖРВ 4	Железо	0,1	0,018	0,060	0,0035	0,030	1	0,22

*Остаток, нерастворимый в соляной кислоте.

3.1.2. Гранулометрический состав

Класс крупности	Выход фракции, %, при размере частиц, мм								
	+ 0,63 -0,45	+ 0,45 -0,315	+ 0,315 -0,25	+ 0,25 - 0,2	+ 0,2 -0,16	+ 0,16 - 0,1	+ 0,1 -0,071	+ 0,071 -0,045	менее 0,045
450	0...5	остальное				0...30			0...10
200	–	–	–	0...1,5	0–1,5	остальное			10...25

В ООО "ССМ-Тяжмаш" ПО "Северстальмаша" разработана и освоена технология получения железного порошка с насыпной плотностью 2,6...3,1 г/см³, заключающаяся в распылении жидкого железоуглеродистого расплава, полученного рафинированием кислородом жидкого перedefельного чугуна с целью удаления (Si, Mn, P) и нагрева расплава для распыления.

3.1.3. Технологические свойства ПЖРВ

Марка порошка	Плотность, г/см ³ , при давлении не менее 700 МПа
ПЖРВ 1.200	7,15
ПЖРВ 2.200	7,12
ПЖРВ 3.200	7,05

Продолжение табл. 3.1.3

Обозначение насыпной плотности	Прочность прессовок, МПа, при плотности 6,5 г/см ³ , не менее		Текучесть с/50 г не более
	ПЖРВ 1	ПЖРВ 2, ПЖРВ 3	
Для порошков крупностью 200			
26	18	20	36
28	15	17	33
30	11	13	31

В ООО "ССМ-Тяжмаш" также освоено производство легких порошков с насыпной плотностью 2,0...2,5 г/см³.

3.1.4. Химический состав и технологические свойства лёгких железных порошков

Размер частиц, мм	Химический состав, %					
	C	Si	Mn	P	S	O ₂
0,200	0,01...0,03	<0,03	<0,08	<0,015	<0,010	0,20
0,560	0,01...0,03	<0,03	<0,08	<0,015	<0,010	<0,20

Размер частиц, мм	Насыпная плотность, г/см ³	Прочность сырой прессовки при плотности 6,3 г/см ³ , МПа	Уплотняемость при давлении 700 МПа, г/см ³	Текущность, с/50 г
0,200	2,05...2,15	25,6...36,0	7,10...7,25	28...45
0,560	1,75...1,85	36,0...50,0	7,20...7,30	45...55

3.2. Порошки низколегированных сталей распылённые (производство СМЗ, г. Красный Сулин)

3.2.1. Химический состав

Марка	Массовая доля элементов, %							
	Ni	Mo	Cr	Mn	не более			
					C	Si	S	O
ПРВ Н2	1,6...2,0	–	–	менее 0,2	0,05	0,1	0,02	0,2
ПРВ Н2М	1,6...2,0	0,3...0,5	–	менее 0,2	0,05	0,1	0,02	0,2
ПРВ ХНМ	0,3...0,5	0,3...0,5	0,3...0,5	менее 0,2	0,05	0,1	0,02	0,2
ПРВ ХНМГ	0,3...0,5	0,3...0,5	0,3...0,5	1,5...2,0	0,05	0,1	0,02	0,2
ПРВ НМ	1,0...1,3	0,3...0,5	–	менее 0,2	0,05	0,1	0,02	0,2

3.2.2. Технологические свойства

Марка	Насыпная плотность, г/см ³	Текущность, Ø2,5 отверстия, с	Прочность сырой прессовки, МПа	Уплотняемость при 700 МПа, г/см ³	Гранулометрический состав, массовая доля фракций, %			
					Размер фракций, в мкм			
					–200 +160	–160 +100	–100 +50	–50
ПРВ Н2	2,45	35,7	27,4	6,95	9,0	26,1	45,0	19,0
ПРВ Н2М	2,48	36,5	25,6	6,89	5,9	25,8	43,8	24,5
ПРВ ХНМ	2,51	32,0	26,3	6,90	6,7	21,6	47,4	24,3
ПРВ ХНМГ	2,47	37,0	23,7	6,85	2,3	19,3	44,9	33,5
ПРВ НМ	2,49	35,4	26,7	6,93	4,5	20,8	45,5	29,2

АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРЕСС-ФОРМЫ

Основы расчёта пресс-форм

Расчёт пресс-форм включает определение технологических размеров матрицы и стержня, а также проверку на прочность деталей, работающих под нагрузкой. Сначала определяются размеры металло-керамической заготовки после каждой технологической операции, припуски на механическую обработку, величины упругого последействия и усадки при спекании. Исходя из этих данных рисуют эскиз прессованной заготовки, выбирают схему прессования и проектируют пресс-форму.

Исходными данными для расчёта пресс-форм являются следующие величины:

1. Размеры готового изделия (высота h , поперечный диаметр D , размер отверстия d) и допуски на них.
2. Плотность готового изделия γ и её допустимые пределы (нижний γ_1 , верхний γ_2).
3. Упругое последействие по линейным размерам после прессования в процентах α_n или в абсолютных единицах l_n .
4. Объёмная усадка (или рост) при спекании в процентах, δ .
5. Усадка (или рост) по линейным размерам при спекании в процентах β или в абсолютных величинах ϵ .
6. Припуск (положительный или отрицательный) на калибровку (если операция калибровки предусматривается).
7. Уменьшение веса изделия при спекании за счёт выгорания смазок, восстановления окислов и прочих в процентах.
8. Технологические свойства порошков: насыпная плотность γ_n и плотность утряски $\gamma_{\text{утр}}$.

Вышеперечисленные величины определяются опытным путём (технологический эксперимент) или выбираются из справочных таблиц.

При расчёте размеров прессовки, а значит и пресс-формы требуется знать величины упругих последействий и усадки в абсолютном значении, которые могут быть определены из величин заданных в процентах:

$$l_n = \frac{\alpha_n A}{100}; \quad l = \frac{\alpha_k A}{100}; \quad \epsilon = \frac{\beta A}{100}, \quad (1)$$

где A – размер изделия в мм, для которого заданы α_n , α_k , β (упругое последействие после прессования в %, упругое последействие после калибровки в % и усадка в %).

Необходимо учитывать тот факт, что упругое последействие в направлении прессования примерно в 2–3 раза больше, чем в поперечном; оно зависит от свойств порошка и плотности прессовки.

Упругим последствием прессовка обычно увеличивается на 0,15...0,3% по диаметру и до 0,5% по высоте.

Для снижения опасности возникновения трещин при выталкивании прессовки необходимо предусматривать расширение рабочей полости матрицы с той стороны, куда выталкиваются изделие, с уклоном 10...30 и высотой конуса 5...30 мм.

Высота прессовки определяется по формуле

$$h_{\text{пр}} = h_{\text{мин}} - l_h \pm \varepsilon_h + n_k, \quad (2)$$

где $h_{\text{мин}}$ – минимальная высота готового изделия, мм; l_h – величина упругого последствия, мм; ε_h – усадка по высоте при спекании, мм; n_k – припуск на калибровку, мм.

Если колебания усадки укладывается в пределах допуска изделия, то высота прессовки определяется как средняя величина между наибольшим и наименьшим размерами:

$$h_{\text{пр}} = \frac{h_{\text{пр мин}} + h_{\text{пр макс}}}{2}. \quad (3)$$

В случае, когда колебания усадки превышают пределы допуска изделия ($\varepsilon_h > h_{\text{пр макс}} - h_{\text{пр мин}}$), то высота прессовки принимается максимальной.

Высота загрузочной камеры, т.е. части матрицы, заполняемой порошком, рассчитывается как

$$H = h_{\text{пр}} k, \quad (4)$$

где $h_{\text{пр}}$ – высота прессовки, мм; K – коэффициент обжатия (уплотнения).

Величину k можно определить из уравнения

$$k = \gamma_{\text{пр}} / \gamma_{\text{нас}}, \quad (5)$$

где $\gamma_{\text{пр}}$ – средняя плотность прессовки; $\gamma_{\text{нас}}$ – насыпной вес шихты.

Если задана пористость прессовки θ , %, то расчёт ведётся по формуле

$$\gamma_{\text{пр}} = \gamma_{\text{комп}} (1 - \theta/100), \quad (6)$$

где $\gamma_{\text{комп}}$ – плотность компактного металла.

Если матрица служит дозирующим устройством, то общая высота матрицы $H_{\text{м}}$ складывается из высоты засыпки H и величины захода нижнего пуансона в матрицу $h_{\text{п}}$:

$$H_{\text{м}} = H + h_{\text{п}}. \quad (7)$$

Размеры рабочей полости матрицы определяются наружными размерами изделия, упругим последствием и усадкой:

$$D_{\text{м}} = D_{\text{пр}} \pm l_n, \quad (8)$$

где $D_{\text{пр}}$ – размер прессовки; l_n – абсолютная величина упругого последствия.

Диаметр стержня $d_{ст}$ зависит от размеров отверстия ($d_{пр}$) прессовки и величины упругого последействия:

а) $d_{ст} = d_{пр} - l_n$ (в случае увеличения отверстия при упругом последействии);

б) $d_{ст} = d_{пр} + l_n$, если при упругом последействии отверстие уменьшается.

Давление прессования можно определить разными способами. Можно использовать экспериментальные данные, полученные из справочников или в эксперименте по исследованию влияния давления прессования на плотность прессовки из конкретных марок порошков. Если в состав пресс-шихты входит более 80% одного порошка, по нему можно выбирать давление прессования для всей шихты. В лабораторной работе 3 приведена формула М.Ю. Бальшина. Можно также использовать формулу Б.Д. Юрченко для пластического прессования:

$$\gamma = \gamma_{пр} - \frac{k_0}{\alpha} e^{-\alpha p}, \quad (9)$$

где γ – заданная плотность прессовки; $\gamma_{пр}$ – условная предельная плотность при бесконечно большом давлении; k_0 – начальный коэффициент прессования (при $p = 0$); α – коэффициент потери сжимаемости; p – давление прессования, кг/см. Значения $\gamma_{пр}$, k_0 , α для разных металлов приведены в [3, с. 45 – 60].

Усилие прессования определяется по формуле

$$P = (p + p_{пр}) F, \quad (10)$$

где p – давление прессования; $p_{пр}$ – потери давления на внешнее трение; F – площадь поперечного сечения изделия.

$$p_{пр} = f p_6 \frac{F_{тр}}{F}, \quad (11)$$

где f – коэффициент трения порошка о стенки матрицы; p_6 – боковое давление; $F_{тр}$ – площадь поверхности трения.

Коэффициент сухого трения можно принять для пары медь (и её сплавы) – закаленная сталь равным $f = 0,09...0,08$; для пары порошок железа – закалённая сталь $f = 0,1...0,2$.

Все нагруженные детали рассчитываются на прочность. В качестве материалов для матриц применяются стали 9ХС, ХВГ, Х12М, термообработанные на твёрдость (60...65) НРС. Для стержней применяются те же стали, что и для матриц. Пуансоны изготавливаются в основном из сталей 9ХС ХВГ, термообработанных на твёрдость 60 НРС.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	5
1. Искусственные композиционные материалы	5
1.1. Строение композиционных материалов	5
1.2. Дисперсно-упрочнённые композиционные материалы	7
1.3. Строение волокнистых композиционных материалов.....	8
1.4. Виды и свойства волокнистых упрочнителей	9
1.5. Слоистые пластики	11
1.6. Композиционные материалы на неметаллической основе	12
1.7. Методы формовки стеклопластиков и стекловолоконитов	12
2. Естественные композиционные материалы	15
2.1. Способы получения. Направленная кристаллизация	15
2.2. Применение термомеханической обработки для синтеза ферритно-мартенситных композиций	17
2.3. Ферритно-цементитные композиции в углеродистых сталях	18
3. Получение композиционных материалов методом порошковой металлургии	19
3.1. Производство порошков	20
3.2. Свойства металлических порошков	22
3.3. Смешивание порошковой шихты	24
3.4. Формование порошков	25
3.5. Спекание спечённых изделий	30
3.6. Порошковая металлургия важнейших материалов	32
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	36
Техника безопасности при выполнении лабораторных работ	36
Лабораторная работа 1. Физические свойства металлических порошков	36
Лабораторная работа 2. Технологические свойства металлических порошков	41
Лабораторная работа 3. Прессуемость металлических порошков	44
Лабораторная работа 4. Выбор схемы прессования порошковой заготовки	48
Лабораторная работа 5. Влияние спекания на плотность и структуру порошковой заготовки	55
Лабораторная работа 6. Разработка техпроцесса получения изделий заданных размеров и плотности методом порошковой металлургии	62
ЗАДАНИЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ЗАОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ И ИДО	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	69
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	70
ПРИЛОЖЕНИЯ	71