

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

---

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

---

*П. А. Кузнецов   А. О. Просторова   Р. В. Кузнецов*

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ  
ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЖЕСТКИХ  
ПРЕСС-ФОРМАХ

Учебно-методическое пособие

Санкт-Петербург

2022

УДК 621.762

К89

*Кузнецов П. А. Технология обработки давлением порошковых материалов в жестких пресс-формах: учеб. - метод. пособие /П. А. Кузнецов, А. О. Просторова, Р. В. Кузнецов. – СПб., 2022. – 50 с.*

В учебно-методическом пособии представлено описание основных технологических процессов, применяемых на производстве для изготовления деталей и их заготовок из порошковых материалов различного назначения. Приведены методики выбора и проектирования инструмента для прессования типовых изделий из порошков. Пособие содержит справочные материалы, необходимые для разработки технологических процессов.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 15.03.01 «Машиностроение», а также по другим специальностям, связанным с обработкой порошковых материалов.

Табл. 15. Ил. 9. Библиогр.: 15 назв.

© Кузнецов П. А., Просторова А. О.,  
Кузнецов Р. В., 2022

© Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого, 2022

## Оглавление

Введение .....	4
1. Получение порошковых материалов.....	4
2. Общие технологические принципы изготовления изделий из порошковых материалов.....	7
2.1. Подготовка металлических порошков.....	7
2.2. Способы формования металлических порошков.....	9
2.3. Спекание спрессованных изделий .....	11
2.4. Калибрование.....	15
2.5. Термическая и химико-термическая обработка спеченных сталей .....	19
3. Инструмент для прессования.....	21
3.1. Матрицы для прессования порошковых материалов .....	24
3.2. Пуансоны для прессования порошковых материалов .....	29
3.3. Стержни для прессования порошковых материалов .....	31
4. Оборудование для прессования изделий в жестких пресс-формах.....	36
4.1. Гидравлические прессы.....	37
4.2. Механические прессы .....	42
4.3. Механогидравлические прессы .....	45
5. Последовательность проектирования процесса изготовления изделия из порошкового материала .....	45
6. Задания для технологического проектирования.....	47
Список использованной литературы.....	49

## **Введение**

Прессование является важнейшей технологической операцией изготовления деталей из порошковых материалов, определяющей не только форму и точность размеров деталей, но и существенно влияющей на их физико-механические и эксплуатационные характеристики.

Настоящее пособие посвящено технологическим процессам обработки давлением порошковых и спеченных материалов с целью получения как готовых конструкционных деталей, так и заготовок, которые подвергаются далее механической и термической обработке. Особое внимание уделено разработке технологических процессов и выбору прессовой оснастки для изготовления изделий из металлических порошков. В пособии дается характеристика порошковых материалов и способов их получения, отражены физико-химические и технологические свойства порошков. Рассмотрены основные операции изготовления порошковых деталей – подготовка порошков, прессование различными способами, спекание, штамповка спеченных заготовок, их механическая и термическая обработка, описаны особенности применения технологических операций для прессования порошковых материалов в зависимости от их химического состава и способа получения, рассмотрены особенности обработки спеченных порошковых изделий, приведены сведения о современном оборудовании для прессования порошков.

Пособие предназначено для обучающихся по направлению 15.03.01 «Машиностроение», а также по другим специальностям, связанным с обработкой порошковых материалов.

### **1. Получение порошковых материалов**

Способы получения порошковых материалов подразделяют на две группы: физико-механические и химико-металлургические. Физико-механические способы основаны на механическом измельчении металлов как в твердом, так и в жидком состоянии. Химико-металлургические способы

связаны с существенным изменением химического сырья в процессе переработки.

Благодаря высокой производительности и относительно малым затратам наибольшее распространение получили следующие способы.

*Размол* – старейший способ перевода твердых веществ в порошкообразное состояние наряду с дроблением и истиранием. Этот способ обычно применяют для измельчения различных материалов, используемых в других видах производства или являющихся побочными продуктами. Осуществляют размол в шаровых, вихревых и вибрационных мельницах. Данный способ эффективнее применять для измельчения хрупких металлов и металлов, приведенных в охрупченное состояние химической или термической обработкой.

*Распыление жидкого металла* – наиболее дешевый и распространенный способ изготовления порошков, поскольку обладает высокой производительностью, возможностью получать порошки высокой чистоты, однородного состава, а также позволяет регулировать размеры и форму частиц. Способ основан на разрушении струи расплавленного металла вращающимися лопатками, газовым либо воздушным потоком, потоком жидкости или электромагнитным полем.

*Восстановление металлов из окислов и солей* – способ, позволяющий получить порошки практически любых металлов из обогащенных рудных концентратов, а также отходов производства, в частности, прокатной окалины или продуктов химической переработки. Процесс химического восстановления осуществляют из окислов металлов с помощью восстановителя, в качестве которого используют водород, смесь углерода, диссоциированный аммиак, конвертированный природный газ, эндо- и экзогаз.

*Электролиз* – способ, позволяющий получить чистые порошки меди, никеля, кобальта, цинка, серебра, кадмия, однако обладает высокой энергоемкостью и низкой производительностью. Способ основан на

разложении водного раствора или расплава соли металла при прохождении через него электрического тока.

Существуют и другие способы получения металлических порошков (карбонильный, автоклавный, метод цементации, метод конденсации паров металлов), но они не получили широкого промышленного применения.

Форма частиц исходного порошкового материала существенно влияет на характер взаимодействия частиц между собой при уплотнении, поэтому при проектировании технологического процесса изготовления изделия из металлического порошкового материала необходимо учитывать свойства исходного порошка в зависимости от способа его получения. В таблице 1 представлены основные характеристики частиц, которые образуются при получении порошков наиболее распространенными способами.

Таблица 1 – Основные характеристики частиц порошковых материалов в зависимости от способа их получения

Метод получения	Исходное сырье	Порошковые материалы	Размер частиц, мкм	Форма частиц
Распыление расплавов (диспергирование)	Жидкий металл	Железо, стали тугоплавкие, металлы и сплавы, титан, алюминий, свинец, цинк и др.	50-250	Сферическая, каплеобразная
Восстановление оксидов	Обогащенные рудные концентраты, прокатная окалина, оксиды, галогениды	Железо, вольфрам, молибден, легированные порошки	0,1-300	Губчатая
Электролиз водных растворов и расплавов солей	Растворы и расплавы соединений металлов	Практически любой металл или сплав	0,01-200	Дендритная
Измельчение (в шаровой мельнице)	Стружка и другие отходы		100-2000	Осколочная, тарельчатая

## 2. Общие технологические принципы изготовления изделий из порошковых материалов

Базовый технологический процесс изготовления изделий из порошковых материалов состоит из следующих операций: подготовка порошков, формование, спекание, калибрование, термообработка (при необходимости), финишная обработка. Рассмотрим подробнее каждую из перечисленных операций.

### 2.1. Подготовка металлических порошков

Порошок, полученный любым из ранее перечисленных методов, как правило, используется в промышленности только после специальной предварительной обработки. Основными операциями при подготовке порошков к прессованию являются отжиг, рассев и смешивание.

*Отжиг* применяют для снятия наклепа частиц и восстановления окислов, образовавшихся при изготовлении, длительном или неправильном хранении порошка. Наиболее часто отжигу подвергают порошки, полученные механическим измельчением твердых материалов, электролизом водных растворов или разложением карбинолов. Порошки отжигают преимущественно в проходных печах, подобных печам для восстановления и спекания. Нагрев осуществляют в защитной среде (восстановительная или вакуум) при температуре восстановления, равной  $(0,4-0,6)T_{пл}$ , где  $T_{пл}$  – температура плавления металла порошка (таблица 2).

Таблица 2 - Температура плавления порошков в среде водорода

Порошки металлов	Температура плавления металла порошка, °С
Co	600-700
Cu	250
Fe	700
Ni	600-700
W	750-800
Mo	900-1000

Температуры восстановления необходимо выбирать как можно более низкими во избежание чрезмерного припекания частиц.

*Рассев* (или *классификация*) является операцией разделения порошков по величине частиц на фракции, которые используются затем либо непосредственно для формования, либо для составления смеси, содержащей требуемый процент частиц нужного размера. Чаще всего применяют ситовой рассев с использованием различных типов сит. Рассев порошков с размером частиц менее 40-50 мкм производят с помощью воздушных сепараторов, в которых твердые частицы выпадают из несущего их потока при изменении его скорости. На практике большинство порошков перед последующими операциями подвергают просеиванию через сито с целью отделения крупных конгломератов частиц, образующихся, в частности, при длительном хранении.

*Приготовление смесей* или смешивание порошков заключается в получении макрооднородной механической смеси из порошков различного химического и(или) гранулометрического состава. Скорость смешивания определяется формой и размером частиц, гранулометрическим составом порошка, числом смешиваемых компонентов и различием в величинах их плотностей. Продолжительность смешивания составляет от одного до нескольких часов. Качество смешивания оценивается однородностью смеси, которая определяется на основании анализа проб, взятых из различных частей общего объема смеси (партии). Количественным критерием однородности смеси является среднеквадратичное отклонение состава пробы от среднего значения. Однородной считается смесь, для которой этот критерий не превышает 5%. При приготовлении многокомпонентных смесей из порошков материалов, существенно различающихся по плотности, механическое смешивание осуществляют с добавлением жидкостей, нейтральных к компонентам смеси, например, спирта, бензина, глицерина, воды. Количество добавленной жидкости по массе не превышает 0,5-1,5%. Операцию смешивания рекомендуется проводить непосредственно перед операцией формования, поскольку при длительном хранении смеси возможно появление



сегрегации (расслоения) компонентов с разными плотностями.

*Гранулированием* в порошковой металлургии называют операцию изменения гранулометрического состава порошковой шихты путем образования конгломератов из исходных частиц мелкодисперсных порошков. Целью гранулирования является улучшение технологических свойств шихты: увеличение насыпной плотности, улучшение текучести и формуемости материала. Гранулирование осуществляется следующими способами: протираем через крупное сито шихты, пластифицированной специальными добавками (например, парафином, раствором каучука в бензине и др.); распылением с сушкой в потоке горячего газа или воздуха суспензии исходного порошка и органической жидкости; дроблением предварительно спрессованной шихты; измельчением предварительно спеченного порошкового материала.

## **2.2. Способы формования металлических порошков**

Формование порошков – это технологическая операция, в результате которой металлический порошок образует порошковую формовку (ГОСТ 17359-82). Формование металлического порошка в пресс-форме под воздействием давления называют прессованием. Приложение давления при формовании обеспечивает достижения более высокого уровня физико-механических свойств, поэтому методы прессования являются основными при производстве изделий из порошков. Основные известные методы формования порошковых изделий, условно разделены на две группы – формование без приложения внешних сил и формование с приложением внешних сил. Существующие методы прессования порошковых материалов можно классифицировать по виду формирующей среды, осуществляющей уплотнение порошка, и характеру приложения нагрузки. В качестве формирующих или энергопередающих сред могут быть использованы: твердые тела при прессовании порошков в жестких пресс-формах; эластомеры-резины, каучуки, полиуретаны и т.п. при эластостатическом прессовании; жидкости (в том

числе расплавы солей и металлов) в процессах гидростатического, гидродинамического и электрогидроимпульсного прессования; газы при газостатическом прессовании; электромагнитное поле при магнитно-импульсном прессовании.

По характеру приложения нагрузки методы прессования разделяют на статические и высокоскоростные. Для статических процессов характерны постепенное возрастание давления, малые скорости деформирования, измеряемые сантиметрами в секунду. Высокоскоростные процессы прессования характеризуются быстрым нарастанием давления, скоростями нагружения, составляющими десятки или сотни метров в секунду, ускорениями рабочих элементов оборудования более  $10g$ , скоростями деформации, достигающими  $10^2 \text{ с}^{-1}$ . Классификация процессов прессования порошковых материалов на основе рассмотренных принципов представлена в таблице 3.

Таблица 3 - Классификация процессов прессования порошковых материалов.

Формующая (энерго-передающая) среда	Характер приложения нагрузки			
	Статическое прессование		Высокоскоростное прессование	
	Периодическое	Непрерывное	Периодическое	
Твердое тело	Статическое в жестких пресс-формах	Прокатка Экструзия	Динамическое	Импульсное
Эластомер	Эластостатическое	Прокатка и прессование в эластичных оболочках	Эластодинамическое	Эластоимпульсное
Жидкость	Гидростатическое	Гидроэкструзия	Гидродинамическое	Гидроимпульсное
Поле	-	-	-	Магнитноимпульсное
Газ	Газостатическое	Газоэкструзия	Газодинамическое	Газоимпульсное

Высокоскоростные процессы подразделяют на динамические и

импульсные. К динамическим процессам относятся такие, давление у которых изменяется плавно, время протекания измеряется миллисекундами, к импульсным же относятся те процессы, давление в которых изменяется скачкообразно, а длительность протекания измеряется микросекундами.

Процессы прессования порошков подразделяются, кроме того, на периодические и непрерывные, горячие и холодные.

Наиболее распространенным способом прессования порошков является статическое прессование в жесткой пресс-форме (жесткостатическое прессование, рисунок 1), которое заключается в формовании деталей или заготовок из порошкового материала 3 в стальной матрице 2 стальными пуансонами 1 и 4. Это самый распространенный способ, который обеспечивает получение изделий с относительной плотностью до 0,80-0,85, высокой размерной точностью и хорошим качеством поверхности. Давление прессования ограничено прочностью инструмента и не превышает 800-1000 МПа. Способ эффективен как в мелкосерийном, так и в массовом производстве.

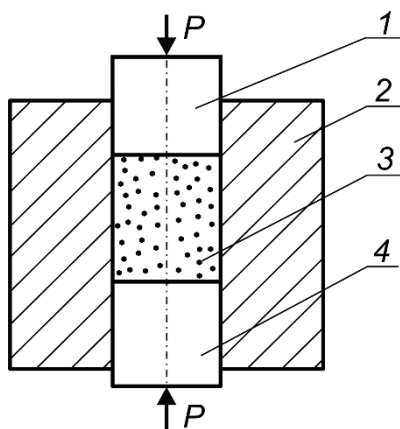


Рисунок 1 – Схема прессования порошка в жесткой пресс-форме: 1 – верхний стальной пуансон, 2 – стальная матрица, 3 – порошок, 4 – нижний стальной пуансон

### 2.3. Спекание спрессованных изделий

Основным способом повышения уровня свойств спрессованной заготовки является спекание, которое дает возможность образовать прочные связи между частицами порошка из-за повышения подвижности атомов при

возрастании температуры. По ГОСТ 17359-82 спекание определяется как нагрев и выдержка порошковой формовки при температуре ниже точки плавления основного компонента, с целью обеспечения заданных механических и физико-химических свойств.

Спекание может происходить в условиях, когда частицы не изменяют свое агрегатное состояние (твердофазное спекание), а также сопровождаться образованием жидкой фазы из-за расплавления наиболее легкоплавких компонентов (жидкофазное спекание). Нагрев спрессованного изделия активизирует процесс массопереноса (поверхностная и объемная диффузия, вязкое течение, перенос материала через газовую фазу и др.), что в результате приводит, одновременно с повышением прочности контактов, к увеличению их площади. При этом происходит сближение частиц, уменьшение линейных размеров и объема спекаемого тела, которое называется усадкой. Количественно ее характеризуют относительным изменением линейных размеров или объема:  $\delta_l = \Delta l/l_0$ ;  $\delta_V = \Delta V/V_0$ .

Усадку необходимо учитывать при проектировании оснастки для прессования. Ее величина зависит от материала и плотности прессовки, температуры, скорости нагрева, продолжительности изотермической выдержки. Поскольку интенсивность диффузионных процессов повышается при возрастании температуры, спекание проводят при температурах в интервале  $(0,7-0,9)T_{пл}$ . Рекомендуемые интервалы температур спекания порошков чистых металлов приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Температуры спекания изделий из металлических порошков

Металл	$T_{сп}, ^\circ C$	Металл	$T_{сп}, ^\circ C$	Металл	$T_{сп}, ^\circ C$
Алюминий	480-520	Магний	480-520	Тантал	2200-2400
Бериллий	1050-1200	Медь	750-950	Титан	1200-1300
Ванадий	1400-1500	Никель	1050-1150	Хром	1350-1500
Железо	1100-1200	Палладий	1100-1200	Цирконий	1300-1450
Иридий	1800-1950	Платина	1250-1400		
Кобальт	1050-1150	Серебро	650-750		

Спекание проводится в условиях, обеспечивающих безокислительный нагрев – в защитных или восстановительных средах. При нагреве изделий до 100-150°C происходит удаление пара и газов, испарение или выгорание технологических добавок. По достижении температуры  $(0,4-0,5)T_{пл}$  начинаются процессы восстановления окислов, в результате чего происходит замена неметаллических контактов между частицами на металлические. При температуре  $(0,7-0,9)T_{пл}$  восстановление окислов заканчивается, контакты между частицами становятся чисто металлическими и протекают процессы, приводящие к усадке изделия, повышению его плотности.

Продолжительность изотермической выдержки составляет несколько часов и определяется свойствами материала, массой и средней плотностью изделия. С увеличением дисперсности порошка процесс спекания ускоряется, повышаются механические свойства изделия, увеличивается усадка. Уменьшению усадки способствует предварительный отжиг порошка в восстановительной среде. Меньшая усадка наблюдается у изделий, имеющих большую плотность. Усадка искажает форму неравноплотного изделия после спекания.

Большое влияние на процесс спекания оказывают свойства защитной среды, в качестве которой используются инертные газы (аргон, азот, гелий), водород, конвертированный природный газ, диссоциированный аммиак. Последний, представляющий собой смесь молекулярных водорода и азота, получил наиболее широкое применение. Безокислительные условия спекания обеспечивает также нагрев изделия в вакууме.

Спекание порошковых изделий осуществляется в специализированных проходных или камерных электрических печах. Для спекания небольших партий деталей обычно используются печи камерного типа, в этом случае изделия загружаются в контейнер из нержавеющей стали, в которой подается защитный газ.

Области применения защитных сред приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Виды защитных сред для спекания

Защитная газовая среда	Область применения
Водород	Спекание изделий из порошков металлов, образующих трудновосстановимые оксиды – бериллия, ванадия, кремния, марганца, хрома, циркония, а также из порошков твердых сплавов.
Диссоциированный аммиак	Заменитель водорода. Не рекомендуется при спекании хромистых и коррозионностойких сталей, а также сплавов с титаном и молибденом в связи с возможным образованием хрупких нитридов.
Генераторный газ	Науглероживание или цементация спеченных изделий
Конвертированный газ	Получение порошков восстановлением оксидов, а также при спекании порошков углеродистых сталей
Эндотермический газ	Спекание порошков из углеродистых сталей
Экзотермический газ	Спекание порошков из цветных металлов

На предприятиях с массовым производством спекание производится в проходных печах. Эти печи имеют три зоны: входную, высокотемпературную и охлаждения. Во входной зоне нагрев осуществляется с невысокой скоростью, чтобы избежать резкого повышения напряжений в прессовке. В высокотемпературной зоне, где деталь нагревают до температуры спекания, проводят изотермическую выдержку, а в зоне охлаждения детали охлаждаются до температуры, исключаяющей их окисление на воздухе.

Спекание в вакууме осуществляется в специальных вакуумных печах, где создается разрежение  $10^{-3}$ –  $10^{-4}$  мм рт. ст., а температура может превышать  $2500^{\circ}\text{C}$ . Спекание в восстановительных газах и вакууме позволяет достичь более высокого уровня свойств изделий, чем при спекании в нейтральной газовой среде. Применяются также защитные порошкообразные засыпки из материалов, имеющих высокую температуру плавления и не взаимодействующих со спекаемым материалом (кварцевый песок, глинозем, шлиф зерно, асбест и т.п.). Как правило, защитные засыпки применяются параллельно с защитными газовыми средами.

При твердофазном спекании многокомпонентных материалов

понижение уровня свободной энергии происходит также за счет выравнивания концентраций элементов в системе в результате процессов гетеродиффузии. Многокомпонентные материалы могут образовывать в процессе спекания жидкую фазу, если спекание проводится при температуре выше температуры плавления легкоплавкого компонента. Жидкофазное спекание протекает более интенсивно, нежели твердофазное, что позволяет получать практически беспористые изделия, однако такое интенсивное уплотнение сопровождается значительными изменениями размеров.

#### **2.4. Калибрование**

Калибрование применяется в основном для получения требуемых размеров изделия. Для него характерны небольшие поверхностные деформации и незначительное повышение плотности. Изделие может калиброваться как по всем размерам, так и отдельно по высотным размерам или по отверстиям. Выбор схемы калибрования зависит от калибруемого параметра, требований к изделию, его формы, и вида имеющегося оборудования. В свою очередь схема калибрования определяет конструкцию калибрующего инструмента.

Для изделий сложной формы, имеющих переходы по высоте, обязательной является схема всестороннего обжатия. Калибрование деталей по высоте, имеющих параллельные торцевые поверхности, может осуществляться по схеме осадки в открытых штампах или между плоскими плитами. При калибровании ступенчатых изделий, имеющих значительные перепады по высоте, каждый переход должен калиброваться независимо перемещающимися элементами составного пуансона. Если толщины ступеней детали соизмеримы, калибрование может осуществляться на цельном ступенчатом пуансоне.

Наиболее широким классом деталей, подвергающихся калиброванию, являются детали типа колец и втулок. Обычно для деталей такого типа наиболее важным является точность диаметральных размеров. Эти детали

могут калиброваться как в закрытых пресс-формах, так и «на проход» (рисунок 2). Последний вариант применяется обычно для калибрования втулок по наружному диаметру и заключается в проталкивании их через калибровочную матрицу (редуцирование, рисунок 2, б). Калибрование внутренней поверхности втулки может осуществляться проталкиванием дорна (дорнование в обойме, рисунок 2, а) либо осадкой в жесткой пресс-форме на стержне (рисунок 2, в).

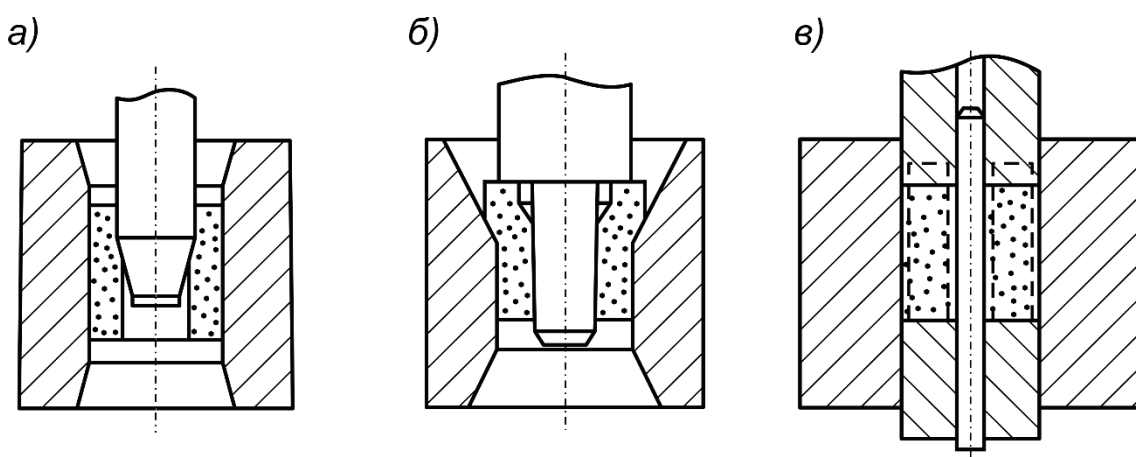


Рисунок 2 - Основные схемы калибрования в жесткой пресс-форме: а) – дорнование в обойме, б) – редуцирование на оправке, в) – осадка на стержне.

Если калиброванию должны подвергаться внутренняя и наружная поверхности втулки, могут применяться схемы с одновременным калиброванием в неподвижной матрице и на неподвижном стержне; с раздельным калиброванием наружного, а затем внутреннего диаметра; одновременным калиброванием обжатием на подвижный стержень.

Основным управляемым параметром процесса является степень деформации изделия, которая с технологической точки зрения задается величиной припуска на калибровку. Величина припуска и его знак, связанные с выбранной схемой калибрования, определяют структурное состояние материала, прилегающего к калибруемой поверхности.

Припуск считается положительным, если в результате калибрования по данному размеру происходит уменьшение площади сечения изделия в этом



направлении. При положительном припуске в течение всего процесса калибрования поверхность изделия находится в контакте с рабочей поверхностью инструмента.

Калибрование детали с положительным припуском на поперечный размер сопровождается взаимным перемещением калибруемой поверхности относительно рабочей поверхности инструмента. В этом случае уплотнение материала, прилегающего к поверхности изделия, сопровождается "замазыванием" пор. Если после калибрования необходимо сохранить открытую пористость, то этот процесс следует проводить по схеме с отрицательным припуском на калибруемый размер.

Припуск на калибрование выбирается в зависимости от требований, предъявляемых к изделию, при этом повышение плотности материала обычно не превышает 1-3%. Для случая калибрования втулок с положительными припусками на наружные и внутренние диаметры (рисунок 2, а), для обеспечения равномерного обжата рекомендуется задавать одинаковые величины припусков на оба размера. При калибровании втулки с отрицательным припуском на внутренний диаметр и положительным на наружный (рисунок 2, б) используют редуцирование на оправке. Втулки с отрицательными припусками на наружные и внутренние диаметры (рисунок 2, в) калибруются за счет обжата по высоте.

Схема калибрования с положительными припусками на внутренний диаметр и отрицательными на наружный, как правило, не применяется из-за возникновения во втулках растягивающих напряжений, которые могут привести к их разрушению. Обычно величина положительных припусков на калибрование лежит в пределах 0,5-1,5% от калибруемого размера, а припуски, равные 2% и более, считаются высокими. Применение больших положительных припусков может привести к общему уплотнению материала и даже появлению поперечных трещин. Минимальная величина припуска должна в 2-2,5 раза превосходить высоту микронеровностей поверхности спеченного изделия. Меньшие величины припуска могут привести к

неравномерному уплотнению материала поверхности. Калибрование с положительными припусками сопровождается уплотнением и наклепом поверхностного слоя материала. Толщина этого слоя зависит от величины припуска, пористости спеченной заготовки и возрастает с увеличением этих параметров. Усилие калибрования втулки возрастает с увеличением ее плотности, припусков, площади поверхности и толщины стенок. Приблизительно усилие калибрования втулки с положительным припуском по наружной поверхности и отрицательным по внутреннему может быть рассчитано по формуле

$$P = q(\Delta f + \mu Q) + 0,58\sigma\alpha f_2, \quad (1)$$

где  $q = \sigma/[1 + \Delta f/(2f_2)(1 - \mu/\alpha)]$  – среднее давление в зоне калибрования;  $\mu$  – коэффициент внешнего трения, который может быть принят равным 0,1;  $\alpha$  – угол заходной части матрицы;  $\sigma$  – сопротивление калибруемого материала пластической деформации в условиях трехосного сжатия;  $f_2$  – площадь поперечного сечения калиброванной втулки;  $\Delta f$  – изменение площади поперечного сечения втулки в процессе калибрования;  $Q$  – площадь конического участка рабочей поверхности матрицы.

Если калиброванию подвергается втулка с положительным припуском как по наружному, так и по внутреннему диаметрам, и калибрование производится отдельно, то

$$P = q(\Delta f + \mu Q) + 0,58\sigma_1\alpha f_2, \quad (2)$$

где  $\sigma_1$  – сопротивление материала пластической деформации при одноосном сжатии.

Среднее давление в этом случае рассчитывается по формуле

$$q = \sigma_1/(1 + (\Delta f + \mu Q)/2f_2) \quad (3)$$

Для снижения усилия, уменьшения износа инструмента и предотвращения схватывания необходимо применять смазки. Поверхность заходной части инструмента рекомендуется выполнять либо округленной, с кривизной, радиус которой не менее чем в 40 раз превосходит величину

припуска на калибровку, либо конической с углом захода менее  $3^\circ$ . Увеличение угла конуса приводит к увеличению сдвигающих напряжений, что может вызвать разрыхление поверхностных слоев материала. Обычно применяется инструмент, заходная часть которого имеет угол  $1-2^\circ$ . Длина конуса определяется припуском на калибровку и допуском на отклонение размера. В частности, для матрицы она может быть рассчитана по формуле

$$H = (D_{max} - D)/2tg\alpha, \quad (4)$$

где  $D_{max}$  – наибольший диаметр спеченного изделия;  $D$  – диаметр матрицы. Высота калибрующего пояса матрицы или дорна принимается 5-10 мм. Угол выходного конуса калибрующего инструмента рекомендуется задавать в пределах до  $5^\circ$  для уменьшения интенсивности разгрузки.

## **2.5. Термическая и химико-термическая обработка спеченных сталей**

Термическая обработка применяется для повышения физико-механических свойств порошковых сталей. Основные закономерности термической обработки спеченных сталей аналогичны компактным материалам. Термическую обработку обычно проводят при наличии полиморфных превращений в сплаве, возможности изменения растворимости одного компонента в другом при изменении температуры. В ряде случаев создание заданной структуры и субструктуры в сплаве достигается совместным воздействием температуры и деформации (термомеханической обработкой). Спеченные порошковые стали подвергают закалке, отпуску, отжигу, нормализации.

Существенное влияние на процессы превращений в спеченных сталях оказывает пористость. Поры препятствуют росту зерен аустенита, размер которых в порошковых сталях намного меньше, чем в компактных. Кроме того, пористость снижает теплопроводность, степень переохлаждения аустенита и прокаливаемость, что вызывает необходимость повышения температуры операций или использование более активных охлаждающих сред. Наличие пор способствует также образованию устойчивой паровой

рубашки, ухудшающей теплоотвод и вызывающей пятнистую твердость. Повышение пористости уменьшает закаленную зону и способствует получению на поверхности изделий вместо структуры чистого мартенсита структуру мартенсит-бейнит или даже троостит. При переходе от поверхности в глубь изделия может наблюдаться переход от мартенситно-бейнитной структуры к трооститной и, в некоторых случаях, к сорбитной. Легирование сталей никелем, хромом, молибденом, вольфрамом и кобальтом понижает температуры мартенситного превращения, значительно повышает устойчивость аустенита и способствует повышению прокаливаемости.

Нагрев под закалку рекомендуется проводить в защитной среде: азоте с небольшими добавками водорода и оксида углерода; 85% эндогаза с добавками 10% природного газа и 5% аммиака; в углеродосодержащих засыпках – отработанном карбюризаторе, древесном угле, графитовой крупке и т.п. Температура нагрева под закалку для углеродистых и низколегированных порошков сталей превышает температуру точки начала превращения феррита в аустенит  $A_{C3}$  на 50-80 °С. В качестве закалочной среды рекомендуется вода или водные растворы солей.

Химико-термическая обработка включает операции нагрева, выдержки при заданной температуре в активных насыщающих средах (газовых, твердых или жидких) и охлаждение с последующей термической обработкой или без нее. При взаимодействии с активными насыщающими средами изменяется химический состав и микроструктура поверхностных слоев изделий, в них образуются твердые растворы и тугоплавкие соединения (карбиды, нитриды, бориды, силициды и т.п.). Процессы насыщения поверхности изделий углеродом, азотом, бором и кремнием называются соответственно цементацией, азотированием, борированием или силицированием. Цементацию производят при температурах выше точки  $A_{C3}$  – содержание углерода в цементированном слое обычно составляет 0,8-1,0%, Повышение пористости до 10-15% увеличивает глубину цементированного слоя в 2-3 раза по сравнению с беспористой сталью. Азотирование проводят в среде

диссоциированного аммиака при 480-650<sup>0</sup>С с целью повышения твердости, износостойкости и коррозионной стойкости сталей, содержащих алюминий, ванадий, молибден, хром, никель и вольфрам. Наличие пористости также увеличивает глубину азотированного слоя в 1,5-2 раза.

При производстве конструкционных деталей методом порошковой металлургии из железных и стальных порошков применяют следующие варианты технологии:

- однократное прессование с твердофазным спеканием;
- двукратное прессование (с промежуточным отжигом) с твердофазным спеканием;
- прессование с жидкофазным спеканием;
- горячее прессование (статистическое и динамическое);
- пропитка жидкими сплавами пористой заготовки.

Выбор варианта технологии определяется необходимыми эксплуатационными свойствами изделия, наличием оборудования и экономической эффективностью производства.

### **3. Инструмент для прессования**

Основным требованием, предъявляемым к деталям из порошковых материалов, является их равноплотность, обеспечивающая одинаковость свойств материала в любой части детали. Допустимая величина разноплотности зависит от средней плотности. Так, для деталей из порошков на основе железа с относительной плотностью более 0,9 величина разноплотности не должна превышать 1%, более 0,85 - 2%, более 0,7 - 3%, менее 0,7 - 5%.

Основным условием получения равномерной плотности прессовки является одинаковое отношение толщины засыпки порошка к высоте прессовки в любом сечении:

$$H_1/h_1 = H_2/h_2 = \rho_H/\rho, \quad (5)$$

где  $H_1$ ,  $h_1$ , и  $H_2$ ,  $h_2$  – толщина слоя порошка и высота прессовки в

соответствующих сечениях;  $\rho_H$  и  $\rho$  – насыпная плотность порошка и плотность прессовки.

В пресс-формах для прессования изделий высокой сложности приходится применять составные верхние и нижние пуансоны, причем зачастую такие пуансоны должны иметь по три и более независимо перемещающихся элемента. Основными элементами прессующего инструмента являются матрица, пуансоны и стержни, инструмент для прессования должен обладать высокой прочностью и поверхностной твердостью. Как правило, матрицы изготавливают по 6-7-му квалитетам, стержни – по 5-6-му квалитетам. При прессовании особо точных деталей допуски назначаются по 4-5-му квалитетам для матриц, 3-4-му квалитетам для стержней и 5-6-му квалитетам для пуансонов. В табл. 6. приведены рекомендуемые предельные отклонения размеров деталей и зазоры, где  $D_M$ ,  $D_{\Pi}$ ,  $D_c$  – диаметры матрицы, пуансона и стержня соответственно.

Таблица 6 – Предельные отклонения размеров прессующего инструмента

Диаметр изделия, мм	Посадки и предельные отклонения		Зазоры, мм
	$\frac{D_M H6}{D_{\Pi} h5}$	$\frac{D_M H6}{D_c H5}$	
3-6	$\frac{D_M^{+0,008}}{(D_M - 0,02)_{-0,008}}$	$\frac{(D_c + 0,02)^{+0,008}}{D_c_{-0,008}}$	0,036 – 0,020
7-10	$\frac{D_M^{+0,009}}{(D_M - 0,03)_{-0,009}}$	$\frac{(D_c + 0,03)^{+0,009}}{D_c_{-0,009}}$	0,048 – 0,030
11-18	$\frac{D_M^{+0,011}}{(D_M - 0,03)_{-0,011}}$	$\frac{(D_c + 0,03)^{+0,011}}{D_c_{-0,011}}$	0,052 – 0,030
19-30	$\frac{D_M^{+0,013}}{(D_M - 0,04)_{-0,013}}$	$\frac{(D_c + 0,04)^{+0,013}}{D_c_{-0,013}}$	0,066 – 0,040
31-50	$\frac{D_M^{+0,016}}{(D_M - 0,04)_{-0,016}}$	$\frac{(D_c + 0,04)^{+0,016}}{D_c_{-0,016}}$	0,072 – 0,040
51-80	$\frac{D_M^{+0,019}}{(D_M - 0,05)_{-0,019}}$	$\frac{(D_c + 0,05)^{+0,019}}{D_c_{-0,019}}$	0,088 – 0,050
81-100	$\frac{D_M^{+0,022}}{(D_M - 0,06)_{-0,022}}$	$\frac{(D_c + 0,06)^{+0,022}}{D_c_{-0,022}}$	0,104 – 0,060

Рабочие поверхности матриц, пуансонов и стержней должны иметь шероховатость не ниже  $Ra = 0,1$  мкм по ГОСТ 2789-73 с полировкой до зеркального блеска, что способствует повышению износостойкости и обеспечивает высокое качество поверхности прессовки. Рекомендуемые величины шероховатости поверхностей деталей пресс-форм показаны на рисунке 3.

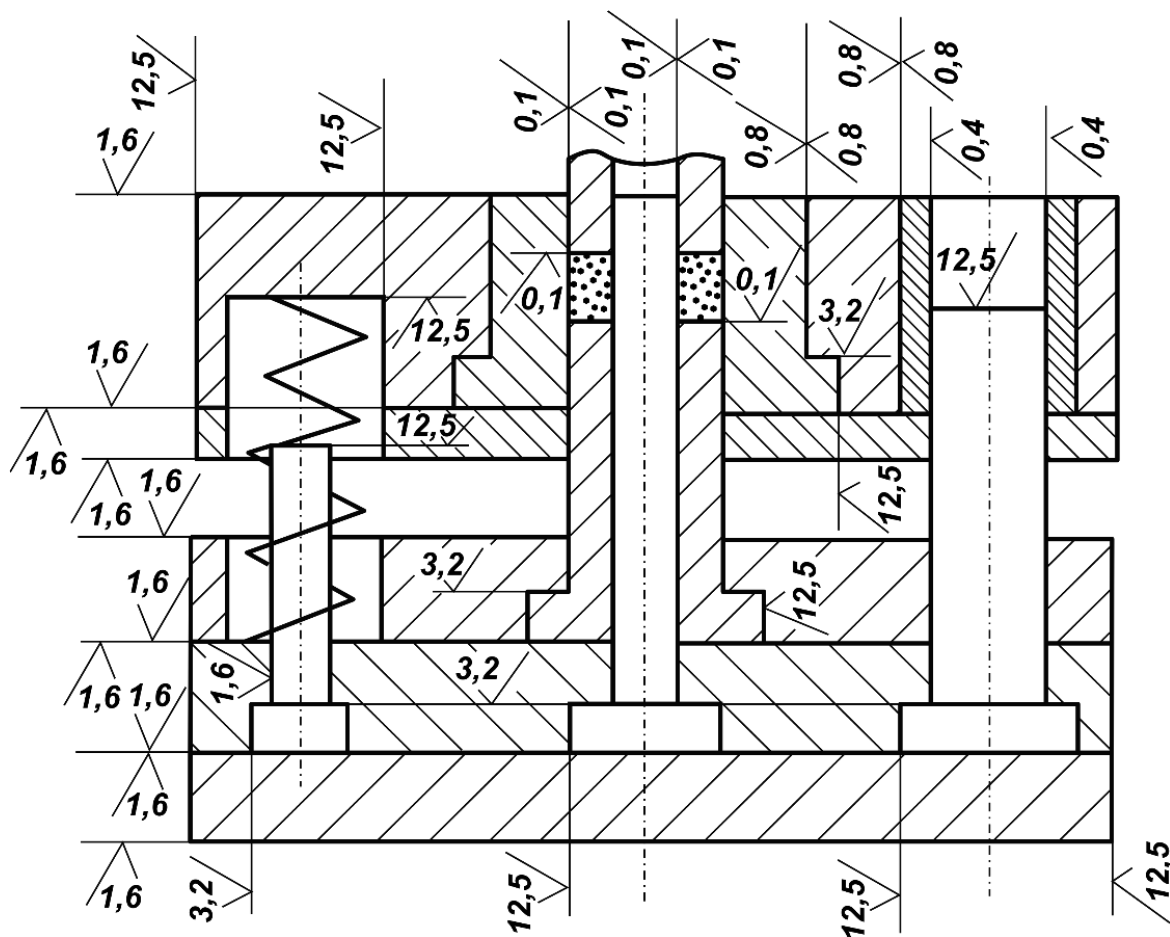


Рисунок 3 – Шероховатость поверхностей деталей пресс-форм

Высокая точность изготовления пресс-форм является необходимым условием не только для получения прессовок с требуемыми размерами, но и для предотвращения брака, который может возникать в результате перекосов. Практика прессования показала, что допустимая непараллельность плоскостей деталей пресс-форм не должна превышать 0,01 мм на длине 200 мм; перпендикулярность рабочих поверхностей не должна быть более 0,01 мм на длине 100 мм. После окончательной обработки прессующий инструмент

должен быть тщательно размагничен.

### 3.1. Матрицы для прессования порошковых материалов

*Матрица* является наиболее ответственной и дорогостоящей частью прессующего инструмента. При холодном статическом прессовании применяют три типа матриц: сплошные, составные и сборные. Сплошные матрицы используют при прессовании с небольшими нагрузками, составные - при прессовании с большими нагрузками и при необходимости обеспечения высокой жесткости, сборные – при изготовлении деталей сложной формы.

Отличительной особенностью составных матриц является соединение ее отдельных частей за счет неподвижных посадок. У сборных матриц отдельные части собираются по подвижным посадкам и скрепляются крепежными деталями. Составные и сборные матрицы могут быть разъемными и неразъемными. Матрица должна иметь скошенную заходную кромку длиной 1-2 мм под углом  $45^\circ$  или скругленную, с радиусом округления 1-2 мм. Кроме того, рабочая поверхность матриц, за исключением разъемных, должна иметь конусность, расширяющуюся в сторону выпрессовывания детали. В противном случае в результате упругого последействия при выпрессовывании из матрицы у изделий появляются поперечные трещины из-за резкой разгрузки. Наличие конусности снижает усилия выталкивания. Большой угол конусности приводит к попаданию порошка в зазор между пуансоном и матрицей, поэтому максимальный диаметр конусной части не должен превышать диаметра прессовки с учетом величины упругого последействия, которая для прессовок из порошков на основе железа может быть принята равной 0,5%, то есть  $D_1 = 1,005D_M$ , где  $D_1$  – максимальный диаметр прессовки,  $D_M$  – диаметр матрицы. Рекомендуемый угол конуса  $\alpha$  можно определить по формуле:

$$\alpha = \arctg[(D_1 - D_M)/2L], \quad (6)$$

где  $L$  - длина конусной части.

Пример сплошной матрицы для прессования показан на рисунке 4.



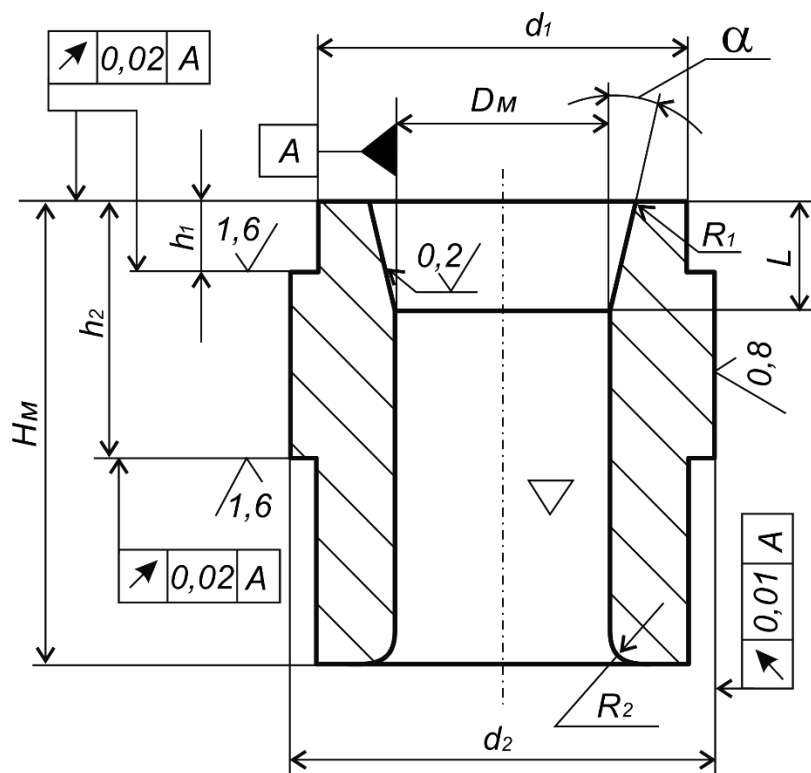


Рисунок 4 – Вид матрицы для прессования порошковых материалов

Расчет матрицы состоит из определения технологических размеров рабочей полости и проверочного расчета на прочность и жесткость.

Высота матрицы  $H_M$  складывается из глубины камеры засыпки  $H$  и высоты заходных участков верхнего  $h_B$  и нижнего  $h_H$  пуансонов:

$$H_M = h_B + H + h_H \quad (7)$$

Высота заходной части пуансонов обычно лежит в пределах 10-15 мм. Если матрица выполняет роль дозирующего устройства и количество засыпаемого порошкового материала определяется объемом загрузочной камеры, учитывается только величина захода нижнего пуансона. Объемное дозирование порошкового материала применяется при прессовании практически на всех типах прессов-автоматов.

Глубина загрузочной камеры зависит от высоты спрессованной заготовки  $h_{пр}$  и коэффициента обжатия порошкового материала  $k$ :

$$H = kh_{пр} \quad (8)$$

Коэффициент обжатия показывает, во сколько раз необходимо

уменьшить объем, занимаемый порошком в исходном состоянии, для получения прессовки требуемой плотности. Он равен отношению средней плотности изделия  $\rho_{пр}$  к насыпной плотности порошка  $\rho_n$

$$k = \rho_{пр} / \rho_n . \quad (9)$$

Размер спрессованной заготовки  $D_{ПП}$  отличается от размера изделия после спекания на величину усадки или роста  $\delta_D$ , то есть  $D_{ПП} = D_{сн} \pm \delta_D$ , а от соответствующего размера матрицы - на величину упругого последействия в радиальном направлении  $l_n$ :  $D_M = D_{ПП} - l_n$ .

При прочностном расчете матрица рассматривается как толстостенный цилиндр, нагруженный равномерным внутренним боковым давлением. Для материала, находящегося в двухосном напряженном состоянии, в соответствии с теорией наибольших касательных напряжений

$$\sigma_{ЭКВ} = \sigma_1 - \sigma_2, \quad (10)$$

где  $\sigma_1 = \sigma_t$ ,  $\sigma_2 = \sigma_r$  касательные и нормальные напряжения соответственно.

Согласно формулам Ляме, эти напряжения достигают наибольших значений вблизи внутренней поверхности матрицы, при этом

$$\sigma_t = p_\delta \frac{1+k_1^2}{1-k_1^2};$$

$$\sigma_r = -p_\delta ,$$

где  $p_\delta$  - боковое давление на стенке матрицы;  $k_1 = D_B/D_H$  - соотношение диаметров внутренней и наружной поверхностей матрицы. Тогда

$$\sigma_{ЭКВ} = p_\delta \left( \frac{1+k_1^2}{1-k_1^2} + 1 \right). \quad (11)$$

Условие прочности определяется выражением  $\sigma_{ЭКВ} \leq [\sigma_p]$ , где  $[\sigma_p]$  - допустимое напряжение при испытании на разрыв материала матрицы.

Подставляя допустимые значения напряжений в предыдущее выражение и решая его относительно  $k_1$ , можно рассчитать требуемую толщину стенок матрицы. В толстостенных цельных матрицах нормальные и

тангенциальные напряжения быстро затухают по мере удаления от внутренней поверхности и наружные слои материала работают не эффективно. Поэтому повышение прочности матрицы только за счет увеличения толщины ее стенок ограничено.

При прессовании большое значение имеет жесткость матрицы, влияющая на возникновение трещин прессовки после снятия давления. Жесткость матрицы  $\mathcal{J}$  определяется как величина, обратная относительному изменению размера ( $\varepsilon_r$ ) рабочей полости при нагружении внутренним давлением. Для сплошной матрицы

$$\mathcal{J} = \frac{1}{\varepsilon_r} = \frac{D_B}{\Delta D_M}; \quad (12)$$

$$\Delta D_M = \frac{p_\delta D_B}{E} \left( \frac{1+k_1^2}{1-k_1^2} + \mu \right) \quad (13)$$

где  $E$  и  $\mu$  - модуль нормальной упругости и коэффициент Пуассона материала матрицы соответственно.

Повышения прочности и жесткости матрицы можно достичь ее запрессовкой в бандаж с некоторым натягом  $\delta$ . В этом случае в стенках матрицы появляются сжимающие напряжения, которые при прессовании частично компенсируют растягивающие.

Контактные напряжения  $p_k$ , возникающие на поверхности сопряжения бандажа и матрицы с радиусом  $r_1$ , равны

$$p_k = \frac{\delta E}{r_1 \left( \frac{1+k_1^2}{1-k_1^2} + \frac{1+k_2^2}{1-k_2^2} \right)}, \quad (14)$$

где  $k_1=r_0/r_1$ ;  $k_2=r_1/r_2$  - коэффициенты толстостенности матрицы бандажа.

При этом появляются напряжения:

в стенках матрицы ( $r_0 \leq r \leq r_1$ )

$$\sigma_r = - \frac{r^2 - r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 p_k; \quad (15)$$

$$\sigma_\tau = - \frac{r^2 + r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 p_k, \quad (16)$$

в бандаже ( $r_1 < r < r_2$ )

$$\sigma_r^\delta = \frac{r_2^2 - r^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\frac{r_1}{r}\right)^2 P_k ; \quad (17)$$

$$\sigma_\tau^\delta = \frac{r_2^2 + r^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\frac{r_1}{r}\right)^2 P_k . \quad (18)$$

Под действием бокового давления  $P_\delta$  в матрице и бандаже возникают дополнительные напряжения, определяемые формулами:

$$\sigma_r^{\text{доп}} = \frac{r_2^2 - r^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 P_\delta ; \quad (19)$$

$$\sigma_\tau^{\text{доп}} = \frac{r_2^2 + r^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 P_\delta . \quad (20)$$

Суммарные и эквивалентные напряжения в матрице:

$$\sigma_r^\Sigma = \frac{P_\delta \cdot r_0^2}{r_2^2 - r_0^2} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2}\right) + \frac{P_k \cdot r_1^2}{r_1^2 - r_0^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) ; \quad (21)$$

$$\sigma_\tau^\Sigma = \frac{P_\delta \cdot r_0^2}{r_2^2 - r_0^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2}\right) - \frac{P_k \cdot r_1^2}{r_1^2 - r_0^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) ; \quad (22)$$

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^\Sigma = \sigma_\tau^\Sigma - \sigma_r^\Sigma = 2 \left( \frac{P_\delta \cdot r_0^2}{r_2^2 - r_0^2} \cdot \frac{r_2^2}{r^2} - \frac{P_k \cdot r_1^2}{r_1^2 - r_0^2} \cdot \frac{r_0^2}{r^2} \right) . \quad (23)$$

На практике обычно ограничиваются однократным бандажированием матрицы, хотя при особенно высоких нагрузках могут использоваться несколько бандажей.

При определении толщины стенки матрицы  $t$ , бандажированной одним кольцом, можно использовать эмпирическую формулу, полученную при прессовании с боковым давлением до 500 МПа:

$$t = r_0(A_{P_\delta} - B), \quad (24)$$

где  $A = 6,67 \cdot 10^{-5}$ , а  $B = 0,33$ .

Формула получена для условий

$$r_1 = \sqrt{r_0 * r_2} ; P_k = P_\delta \frac{1 - k}{2(1 + k)} ; \delta = \frac{P_\delta}{E} 2r_1 .$$

При этом обеспечивается необходимая прочность матрицы. Материал для изготовления матриц выбирается в зависимости от давления прессования

и годовой программы. Обычно используются стали марок: У10А, Х12М, Х12Ф1, ХВГ, 9ХС, 5ХМВ, 3Х2В8 и т.п. с твердостью рабочей поверхности HRC 55-60. Применяются также быстрорежущие стали Р9, Р6М5К3 и твердые сплавы ВК8, ВК11, ВК15, КХН15 с твердостью HRA 37-90.

### **3.2. Пуансоны для прессования порошковых материалов**

*Пуансоны* предназначаются для оформления торцевых поверхностей прессуемого изделия и передачи прессующего усилия. Для повышения жесткости и устойчивости пуансоны должны быть возможно меньшей длины и иметь развитую опорную поверхность, площадь которой должна превосходить площадь рабочего торца пуансона минимум в 1,5-2 раза. Центрирование пуансонов в матрице или на стержне осуществляется по боковой поверхности поясков, выполненных в рабочей части. Ширина направляющих поясков зависит от размеров детали, конструкции прессовой оснастки и на практике равна 15-20 мм. Поверхность поясков тщательно шлифуется. Поперечные размеры остальной профильной части пуансона уменьшаются на 0,5-1,0 мм, что делает изготовление пуансонов более технологичным и обеспечивает удаление частиц порошка, попадающих в зазор между пуансоном и матрицей или стержнем. У нижних пуансонов длина профильной части должна на 5-10 мм превышать высоту матрицы для обеспечения удаления изделия. Пример пуансона для прессования порошковых материалов приведен на рисунке 5.

Закрепление пуансонов в узлах крепления оснастки осуществляется с помощью болтов, фланцев, резьбовых втулок и т.п. Некоторые способы крепления пуансонов показаны на рисунке 6.

Для крепления пуансонов небольшого диаметра рекомендуют использовать схемы канавочного крепления винтами или шариками (рисунок 6, в). Крепление пуансонов средних размеров чаще осуществляют по схемам фланцевого крепления пуансонодержателями (рисунок 6, а, б). Схема сквозного крепления болтами (рисунок 6, г) и схема крепления заливкой

пластмассы (рисунок 6, д) используются при креплении пуансонов больших диаметров. В целом, выбор варианта осуществляется конструктором исходя из конкретных условий производства.

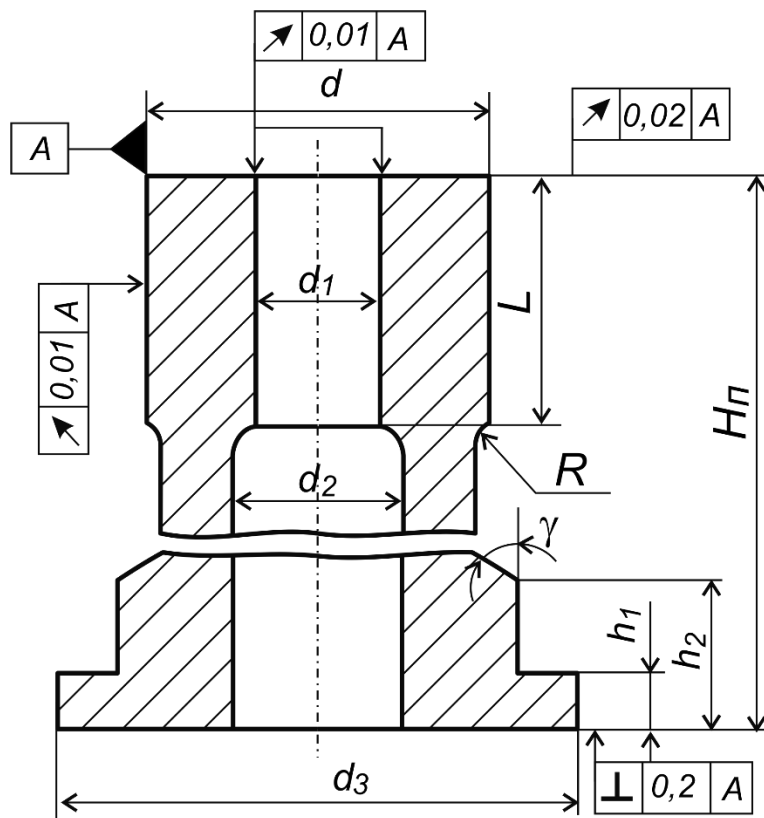


Рисунок 5 – Пуансон для прессования порошковых материалов

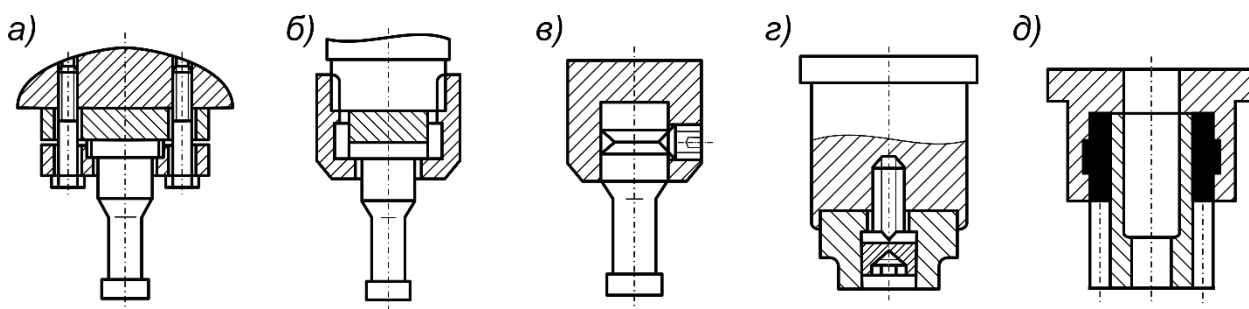


Рисунок 6 – Схемы крепления пуансонов: а, б – фланцевое крепление пуансонодержателями; в – канавочное крепление винтами или шариками; г – сквозное крепление болтами; д – крепление заливкой пластмассы

Проверочный расчет пуансонов заключается в определении их

способности работать на сжатие и продольный изгиб. Сжимающее напряжение, возникающее в пуансоне, рассчитывается по формуле

$$\sigma_{\text{сж}} = P/F_n \leq [\sigma_{\text{сж}}], \quad (25)$$

где  $F_n$  – площадь наименьшего поперечного сечения пуансона;  $P$  – наибольшее усилие;  $\sigma_{\text{сж}}$  – допустимое напряжение на сжатие материала. Расчет максимально допустимой длины свободной части пуансона производят по формуле

$$l_n = \pi \left( \frac{2EI_n}{n_{\text{п}}P} \right)^{1/2}, \quad (26)$$

где  $l_n$  – длина свободной части пуансона;  $I_n$  – момент инерции наименьшего поперечного сечения пуансона;  $E$  – модуль упругости;  $n_{\text{п}} = 2-3$  коэффициент безопасности. Пуансоны рекомендуется изготавливать из сталей марок ХВГ, 9ХС, 7ХЗ, 5ХНМ, 5ХНТ, 4Х4МВФС, 5ХЗМФС, 5ХЗВЗМФС, Х12М, Х12Ф1. Рабочие поверхности пуансонов для прессования мало- и умеренно-нагруженных изделий закаляются на твердость HRC 50-55; для прессования средне- и тяжело нагруженных изделий HRC 55-60. Нерабочая часть пуансонов должна отпускаться до твердости HRC 40-45.

### 3.3. Стержни для прессования порошковых материалов

*Стержни* служат для оформления в деталях сквозных и глухих отверстий в направлении прессования.

У стержней, как и у матриц, заходная кромка оформляется фаской под углом  $15^{\circ}$  на длине 1-2 мм или радиусом 1 мм. Диаметр поперечного сечения стержня за рабочей частью выполняется на 0,5-1,0 мм меньше диаметра рабочей части. Длина рабочей части стержня задается на 10-20 мм больше высоты камеры засыпки. Пример стержня для прессования порошковых материалов показан на рисунке 7. Для стержней большое значение имеет правильный выбор схем крепления.

Размеры стержня зависят от размера прессуемого изделия и должны учитывать его изменения в процессе изготовления (упругое последствие,

усадку). Отправной величиной для расчета требуемого диаметра стержня является диаметр отверстия в готовом изделии.

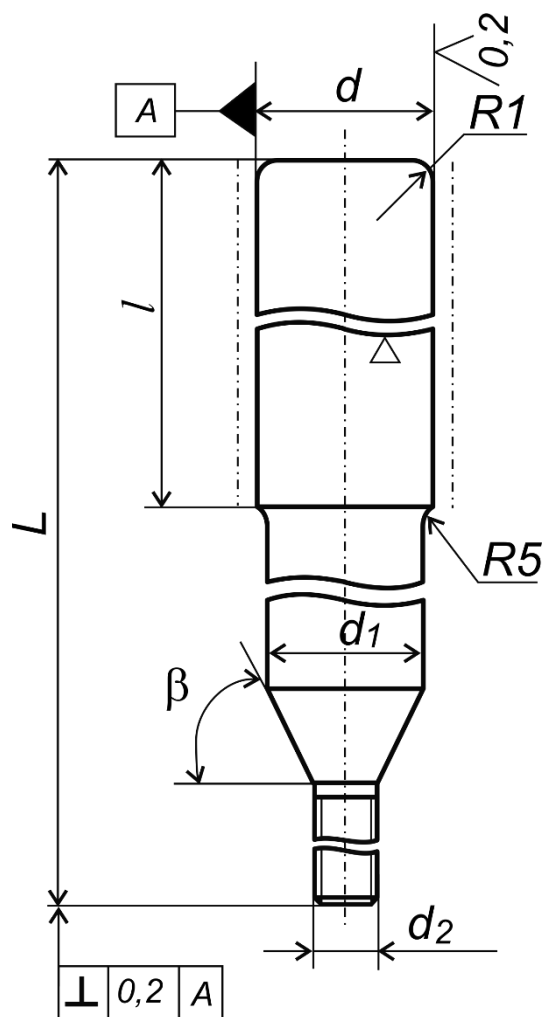


Рисунок 7 – Стержень для прессования порошковых материалов

Максимальный размер отверстия после калибрования

$$d_{max} = d + \Delta_0 , \quad (27)$$

где  $d$  – диаметр отверстия в прессовке;  $\Delta_0$  – допуск на радиальный размер по чертежу.

Тогда диаметр рабочей части калибрующего стержня с учетом величины упругого последействия  $\omega_r$  калибруемой детали может быть найден из выражения

$$d_k = d_{max} \left( 1 - \frac{\omega_r}{100} \right) . \quad (28)$$



Диаметр отверстия в спеченном изделии  $d_{\text{сп}}$  при калибровании с положительным или отрицательным припуском  $\Delta d_k$  связан с диаметром калибрующего стержня соотношением

$$d_{\text{сп}} = d_K \pm \Delta d_k . \quad (29)$$

Поскольку при спекании прессованного изделия происходит изменение его размера (увеличение или уменьшение в зависимости от свойств порошкового материала), то величина этого изменения  $\delta_r$  (припуска на спекание) должна учитываться при задании размеров отверстия в прессовке:

$$d_{\text{пр}} = d_{\text{сп}} \left( 1 \pm \frac{\delta_r}{100} \right) . \quad (30)$$

Диаметр стержня в прессовочной оснастке отличается от диаметра отверстия в «сырой» прессовке на величину упругого последействия  $\varepsilon_r$ :

$$d_{\text{ст}} = d_{\text{пр}} \left( 1 - \frac{\varepsilon_r}{100} \right) . \quad (31)$$

Допустимый износ стержня в процессе эксплуатации может учитываться в расчете диаметра стержня величиной припуска на износ:

$$\Delta d = d_{\text{ст}} - (d'_{\text{ст}} + \Delta_{\text{ст}}) , \quad (32)$$

где  $\Delta_{\text{ст}}$  - допуск на диаметр стержня при изготовлении;  $d'_{\text{ст}}$  – минимально допустимый диаметр стержня соответствующий изготовлению изделия с минимально допустимым диаметром отверстия после калибрования.

Стержни рекомендуется изготавливать из сталей марок ХВГ, 9ХС, 7ХЗ, 5ХНМ, 5ХНВ, 3Х2В8, 38ХМЮА, 4Х4МВФС, Х12М, Х12Ф1, 4Х8В2ФС, Р9, 5ХЗВЗМФС, Р6М5К3. Стержни подвергаются закалке и отпуску на твердость рабочей части HRC 50-55 у стержней для прессования мало- и умеренно-нагруженных деталей, HRC 57-62 - у стержней для прессования средне- и тяжело нагруженных изделий. При крупносерийном производстве для уменьшения износа рабочую поверхность стержней рекомендуется азотировать. Нерабочая часть стержней должна отпускаться до твердости HRC 40-45.

Стойкость пресс-форм зависит от твердости поверхности рабочих

частей инструмента, которая зависит от материала инструмента и вида его термообработки. Рекомендации по термообработке материалов, используемых при изготовлении пресс-форм, представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Рекомендации по термообработке прессующего инструмента

Материал рабочих частей пресс-форм	Вид термообработки	Твердость, HRC	Микротвердость поверхностного слоя, МПа	Стойкость пресс-форм, тысяч прессований
У10А	1	62	-	8,5
	2	56-60	10500	13,5
	3	38-42	8000	13,5
	4	60	11500	12
3Х2В8Ф	1	40-50	-	-
	2	40-42	15000	16,5
	3	38-45	9500	10
	4	41-42	12200	21
ХВГ	1	62	-	14,5
	2	61-62	12200	24
	3	48-54	10500	21,5
	4	57-60	15000	22,5
Х12М	1	62-63	-	30
	2	58-60	18000-20000	50
	3	55	10500	70,5
	4	60-61	13000-15000	48
Р6М5	1	63	-	50
	2	65-68	19000-21000	63
	3	60	11000	70
	4	52-54	18000	57
ВК20	-	69	-	150
Т50НС	-	69	-	44
Обозначения: 1 – закалка с отпуском; 2 – диффузионное хромирование и закалка; 3 – борирование и закалка; 4 – закалка и азотирование				

Несоблюдение вышеописанных рекомендаций по проектированию оснастки и техпроцесса прессования в жестких пресс-формах может привести к браку. Основными видами брака деталей, получаемых прессованием из порошков в жестких пресс-формах, являются сколы, продольные или поперечные трещины. В большинстве случаев поперечные трещины

возникают в деталях на стадии выпрессовывания и связаны с наложением двух взаимопротивоположных процессов: увеличения поперечных размеров части изделия, выпрессованной из матрицы, и уменьшения поперечных размеров рабочей полости матрицы, вызванного снижением давления. Поперечные трещины могут возникать и в изделии, находящемся внутри матрицы после снятия усилия. В этом случае их появление связано с чрезмерно высоким давлением прессования, недостаточной жесткостью матрицы. Перепрессовочные трещины обычно наблюдаются в прессовках из мелкодисперсных порошков труднодеформируемых материалов.

Возникновения перепрессовочных и распрессовочных трещин удастся избежать, если для прессования использовать бандажированные матрицы повышенной жесткости, матрицы, имеющие конусность, расширяющуюся в направлении выпрессовывания и закругление выходной кромки, разъемные матрицы, обеспечивающие разгрузку изделия по всей наружной поверхности.

Сколы и трещины в изделии могут возникать в результате перекосов в оснастке вследствие некачественного изготовления или повышенного износа. У деталей сложной формы, для изготовления которых применяются составные пуансоны, возникновение трещин и сколов может происходить, если усилие выпрессовывания неравномерно распределяется по торцовой поверхности детали. В этом случае выпрессовывание изделия целесообразно проводить не по схеме выталкивания (рисунок 8, а), а по схеме стягивания матрицы (рисунок 8, б).

Распространенным видом брака также является неравноплотность различных частей спрессованного изделия и анизотропия свойств. Она может проявиться на стадии выпрессовывания, при спекании, (неравномерная усадка, искажение формы), при последующей механической обработке.

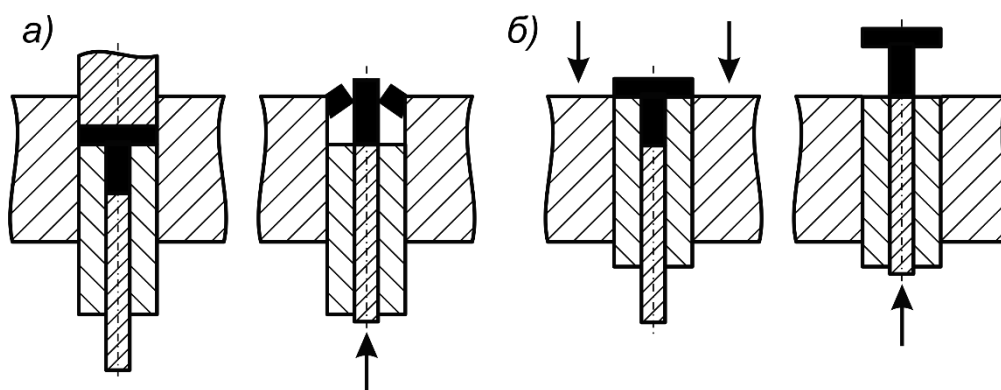


Рисунок 8 – Схемы выпрессовывания изделий, а – выталкивание, б – стягивание матрицы

Как правило, возникновение этого вида брака связано с неправильно выбранной схемой прессования или с неправильно спроектированной оснасткой.

#### 4. Оборудование для прессования изделий в жестких пресс-формах

Прессование может осуществляться на специализированном и универсальном прессовом оборудовании. Специализированные прессы, наряду с созданием усилия, обеспечивают синхронизированное перемещение элементов оснастки, а при прессовании на универсальных прессах эти перемещения должны обеспечиваться конструкцией самой оснастки. Кроме того, на специализированных прессах предусматривается автоматическое заполнение пресс-формы порошком, удаление спрессованной детали, регулирование ходов, быстрая и удобная переналадка и замена прессующего инструмента. Однако главное их преимущество заключается в том, что они обеспечивают заданное перемещение элементов прессующего инструмента в требуемой последовательности. Это обстоятельство позволяет получать на специализированном оборудовании детали более сложной формы с равномерным распределением плотности.

По типу привода прессы для прессования порошков могут быть разделены на три основных группы: гидравлические, механические и

механогидравлические. Выбор прессового оборудования осуществляется исходя из требуемого усилия прессования, высоты засыпки, группы сложности изделия, свойств порошкового материала, годовой программы выпуска изделия.

#### **4.1. Гидравлические прессы**

В порошковой металлургии в основном применяются вертикальные гидравлические прессы. Усилие прессы создается маслом низкого (0,8 МПа) или высокого (20 или 32 МПа) давления. Основными достоинствами гидравлических прессов являются возможность развивать большие усилия и прессовать крупногабаритные изделия, постоянство скорости прессования, что важно при прессовании мелкодисперсных порошков, большое штамповое пространство. Часто для прессования порошков используются гидравлические прессы, предназначенные для формования пластических масс. Основные характеристики подобных отечественных прессов приведены в таблицах 8 и 9. При прессовании изделий из порошков на универсальных гидравлических прессах пресс-формы обычно проектируются на одну деталь или группу однотипных деталей. В производственных условиях целесообразно изготовление пресс-блоков, подобных применяемым на специализированных прессах. Общий вид пресс-формы изображен на рисунке 9. Матрицу пресс-формы крепят к плите 8, а все остальные детали пресс-формы – в подвижных плитах, перемещающихся в вертикальной плоскости относительно колонок, которые связаны с траверсами прессы. Верхний пуансон 2 крепят к верхней плите прессы, а выталкиватель – к плите 13. Центральный стержень монтируют на плите 14. Плавание матрицы обеспечивается пружинами 9. При выталкивании вилка 18 убирается, плита матрицы упирается в плиту 19. Пресс комплектуют несколькими пресс-блоками, каждый из которых предназначен для получения прессовок различной сложности.

При проектировании пресс-блоков для неспециализированных прессов следует учитывать, что усилие выталкивателя у них составляет 10-12% от

усилия пресса, в то время как усилие выпрессовки изделия достигает 30% и более от усилия прессования.

Таблица 8 – Технические характеристики гидравлических прессов для прессования порошков

Марка пресса	Номинальное усилие, кН	Ход ползуна, мм	Штамповое расстояние, мм	Размер стола, мм
ДА2420	100	250	500	250×250
П6320	100	400	600	500×380
Д2424	250	250	500	400×400
П480А	400	320	560	500×500
П427Б	630	320	630	500×500
Д2430	1000	400	710	630×630
ПД476	1600	500	800	800×800
ДБ2434	2500	710	1250	1120×1000
ДБ2436	4000	800	1400	1250×1120
П479	5000	630	1250	1250×1250
Д2238	6300	630	1250	1400×1400
ДА2240	10000	900	2000	1400×1400
Д2243А	20000	1400	3000	1650×1650

Таблица 9 – Характеристики выталкивателя и скорость ползуна гидравлических прессов для прессования порошков

Марка пресса	Усилие выталкивателя, кН	Ход выталкивателя, мм	Скорость ползуна, мм/с		
			Холостой ход	Рабочий ход	Обратный ход
ДА2420	25	100	210	5,24	230
П6320	-	-	125	20,0	300
Д2424	52	125	150	5,0	167
П480А	60	160	118	4,0	127
П427Б	89	160	110	2,7	100
Д2430	125	200	70	2,0	70
ПД476	200	250	71	2,7	76,5
ДБ2434	500	360	200	5,0	60
ДБ2436	635	400	100	4,0	50
П479	500	320	58	2,4	56
Д2238	1000	400	50	2,5	44
ДА2240	1000	400	50	1,67	34
Д2243А	3000	250	50	1,6	27

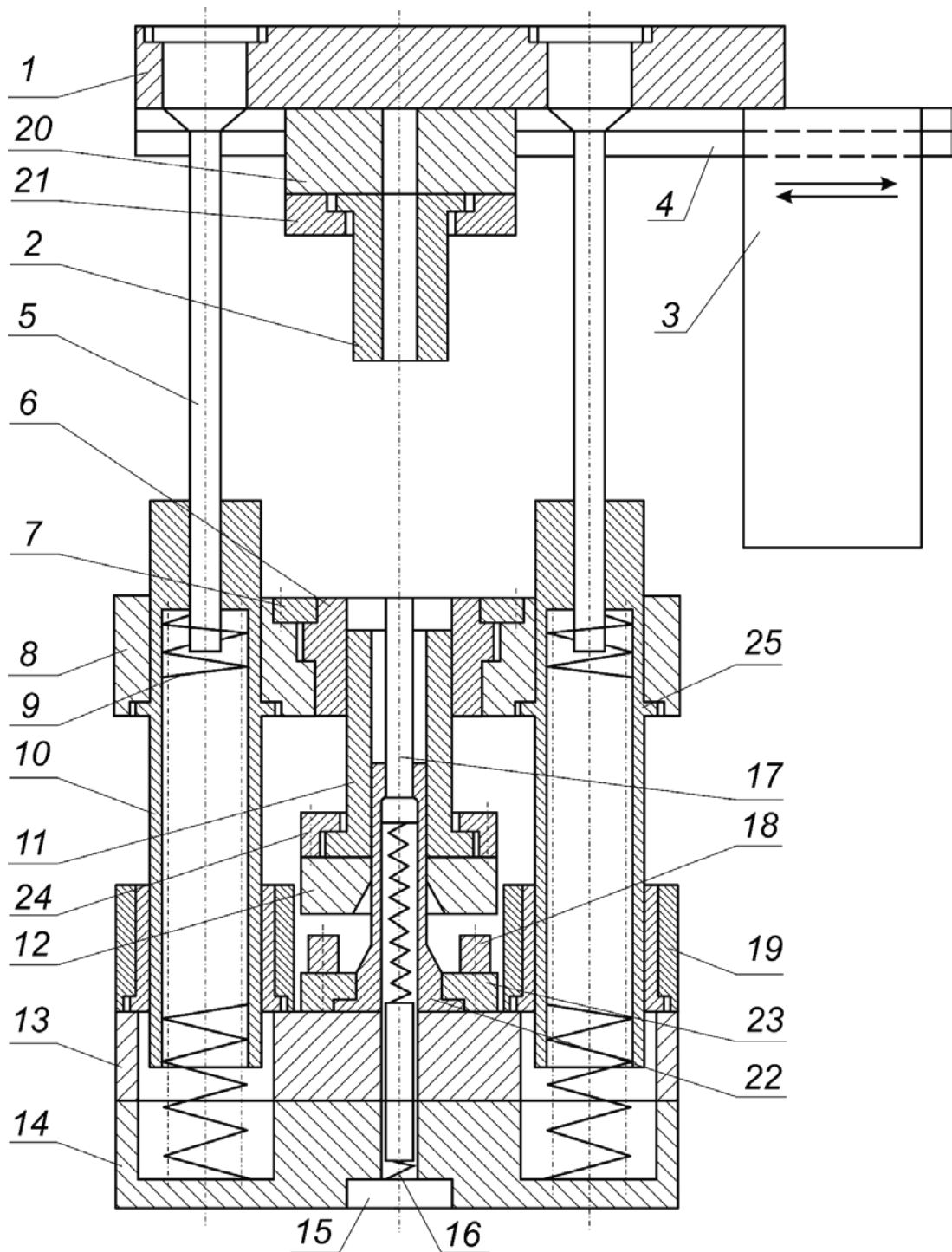


Рисунок 9 – Общий вид пресс-формы: 1 – верхняя плита; 2 – пуансон верхний; 3 – толкатель; 4 – направляющие; 5 – колонки; 6 – матрица; 7 – крышка матрицы; 8 – плита подвижная; 9 – пружина; 10 – комбинированные колонки втулки; 11 – пуансон; 12 – подпружиненная плита; 13 – промежуточная плита; 14 – нижняя плита; 15 – пробка; 16 – пружина; 17 – центральный стержень; 18 – вилка; 19 – прижимная плита; 20 – пуансонодержатель; 21 – крышка верхняя; 22 – направляющая пуансона; 23 – прижим направляющей; 24 – прижим пуансона; 25 – направляющая втулка

Если усилие выталкивания больше усилия выталкивателя, выпрессование может осуществляться повторным рабочим ходом плунжера или усилием обратного хода плунжера.

Основным недостатком неспециализированных гидравлических прессов является их низкая производительность, обусловленная тихоходностью и необходимостью выполнения вручную вспомогательных операций (дозировка и засыпка порошка, удаление деталей, установка и снятие упоров). Частично эта задача может быть решена двумя путями

1) использованием нескольких комплектов прессующего инструмента, что позволяет осуществлять подготовительные операции вне рабочей зоны пресса, параллельно с его работой;

2) созданием сложных автоматизированных пресс-блоков и пресс-форм. В последнем случае конструкция пресс-формы должна содержать все механизмы и устройства, необходимые для обеспечения процесса прессования. Однако оба эти пути являются полумерами, поскольку в первом случае большое количество, а во втором сложность автоматизированной оснастки существенно повышают стоимость изделия. Поэтому в промышленном производстве целесообразно использовать специализированные прессы со сравнительно простым инструментом.

В стране выпускаются несколько моделей специализированных пресс-автоматов, как универсального действия, так и для изготовления определенных групп изделий, например, твердосплавных пластин для режущего инструмента. Основные характеристики некоторых моделей гидравлических прессов-автоматов, применяемых для прессования деталей конструкционного назначения, представлены в таблице 10. У специализированных прессов засыпка порошка и сталкивание прессовки осуществляется автоматическим питателем. Выпрессовывание готового изделия производится по схеме стягивания матрицы, приводящейся в движение специальным гидроцилиндром. Отдельным гидроцилиндром



осуществляется увод центрального стержня. Прессы могут работать в наладочном, полуавтоматическом (одиночные ходы) и автоматическом режимах.

Таблица 10 – Технические характеристики гидравлических пресс-автоматов

Характеристика	Марка пресса				
	ДА1532Б	ДА1534Б	ДА1536Б	ДА1538Б	ДА1540Б
Номинальное усилие, кН	1600	2500	4000	63000	10000
Ход ползуна, мм	400	400	400	630	500
Высота засыпки порошка, мм	200	250	300	350	350
Скорость ползуна при рабочем ходе, мм/с	50	31	24	24	18
Производительность при максимальной высоте засыпки, шт/мин	7	4	4,6	6	3
Наибольший диаметр изделия, мм	125	160	250	250	250
Мощность привода, кВт	57	57	81	133,8	135,1
Габариты, мм	4450× 3580× 3690	3600× 4125× 4130	5000× 6170× 5500	6000× 7000× 8000	6240× 6300× 9400
Масса, т	19.7	23.2	46.3	46	62

Конструкция прессов обеспечивает возможность независимого перемещения элементов инструмента, что позволяет получать прессовки высокой группы сложности.

Прессование деталей может осуществляться как по задаваемому давлению, так и при ходе рабочего плунжера до упора.

Для прессования крупногабаритных деталей выпускаются специализированные гидравлические пресс-автоматы большой мощности. Их основные характеристики представлены в таблице 11.

Прессы имеют независимые перемещения верхнего и нижнего

пуансонов, выталкивателя, матрицы и стержня, а также механизм автоматизированной засыпки порошка в матрицу. Выпрессовывание деталей осуществляется по схеме выталкивания из матрицы.

Таблица 11 – Технические характеристики специализированных пресс-автоматов

Характеристика	Марка пресса				
	П810	П812	1238	1240	1243
Номинальное усилие, МН	16,0	25,0	63,0	100,0	200,0
Высота засыпки порошка, мм	200	250	500	750	1000
Число независимых движений	-	-	5	3	3
Мощность привода, кВт	55	81	180	210	447,4
Масса, т	14,0	28,0	119	150	260

#### 4.2. Механические прессы

Механические прессы наиболее широко используются в порошковой металлургии. Их основными достоинствами являются высокая производительность, компактность, меньшая мощность привода за счет использования инерции движущихся масс, легкость механизации и автоматизации.

Из неспециализированного прессового оборудования нуждам порошковой металлургии наиболее полно удовлетворяют прессы для холодной штамповки. Могут применяться все типы механических прессов: кривошипные, винтовые, фрикционные, кулачковые и т.д. Отличие прессования порошков на прессах различных типов связано с особенностями их конструкции и в основном выражается в скорости нагружения и времени выдержки прессовки под давлением.

Однако на большинстве современных производств для получения конструкционных деталей из металлических порошков используются специализированные механические пресс-автоматы. В нашей стране наиболее

широко распространены отечественные пресс-автоматы, разработанные Воронежским специальным конструкторским бюро кузнечнопрессовых машин и автоматических линий. Это прессы серий К, КА, АПФ. Прессование деталей на этих прессах осуществляется верхним пуансоном, установленным на прессующей головке, в плавающей матрице. Технические характеристики прессов серии КА, являющейся в настоящее время основной серией механических пресс-автоматов для предприятий порошковой металлургии, представлены в таблице 12 и таблице 13.

Таблица 12 – Технические характеристики прессов КА8120 - КА8128

Характеристика	Марка пресса				
	КА8120	КА8122	КА8124	КА8126	КА8128
Усилие прессования, кН	100	160	250	400	630
Производительность, ход/мин	16-45	14-45	12-40	11-36	10-32
Максимальная высота засыпки (ход выталкивателя), мм	56	70	90	110	140
Наибольший размер изделия в плане, мм	40	50	65	80	100
Ход прессующей головки, мм	100	120	150	180	220
Ход центрального стержня, мм	60	75	95	115	145
Усилие на упоры матрицы, кН	60	100	150	250	400
Усилие на упоры центрального стержня, кН	60	100	150	250	400
Усилие выталкивателя, кН	30	50	80	125	200
Мощность привода, кВт	3	4	7,5	11	18,5
Габариты, мм	2757× 1100× 1250	2950× 1100× 1300	2400× 1800× 1300	3300× 1300× 1800	3600× 2450× 1600
Масса, т	2,8	3,5	5,5	7,5	10,0

Прессы этой серии также имеют нижнее расположение привода, бесступенчатое регулирование числа ходов, механизмы регулирования

штампового пространства, повышенную жесткость и прочность привода, а извлечение деталей из матрицы осуществляется по схеме выталкивания нижним пуансоном. Механизмы прессов серии КА обеспечивают независимое движение верхнего и нижнего пуансона, плавание матрицы и перемещение центрального стержня, а также имеют независимые узлы регулирования положения верхнего и нижнего упоров центрального стержня, положения верхнего пуансона, плавания матрицы, положения матрицы.

Таблица 13 – Технические характеристики прессов КА8130 - КА8136

Характеристика	Марка пресса			
	КА8130	КА8132	КА8134	КА8136
Усилие прессования, кН	1000	1600	2500	4000
Производительность, ход/мин	5-25	6-24	6-24	5-20
Максимальная высота засыпки (ход выталкивателя), мм	180	180	180	180
Наибольший размер изделия в плане, мм	125	125	125	150
Ход прессующей головки, мм	265	220	260	220
Ход центрального стержня, мм	185	185	185	185
Усилие на упоры матрицы, кН	600	1000	1500	2500
Усилие на упоры центрального стержня, кН	600	1000	1500	2500
Усилие выталкивателя, кН	300	500	800	1250
Мощность привода, кВт	27	56	65,3	75
Габариты, мм	3075×	4832×	4500×	5020×
	2800×	3550×	3300×	3550×
	1800	3280	3420	3700
Масса, т	16,0	22,0	38,0	48,0

Все это дает возможность изготавливать детали со сквозными и глухими отверстиями, с наружным и внутренним буртами. Усилие прессования контролируется с помощью электроконтактного манометра.

Для прессования более сложных изделий с двумя и тремя переходами по

высоте выпускаются пресс-автоматы АПФ-100 и АПФ-160 с усилием прессования соответственно 1000 и 1600 кН. Конструкция этих прессов существенно отличается от прессов других серий и обеспечивает выпрессовывание изделия по схеме стягивания матрицы. Особенностью пресс-автоматов АПФ является наличие специального механизма дожима, обеспечивающего при прессовании последовательное уплотнение нижних и верхних слоев порошка, что приводит к более равномерному распределению плотности.

### **4.3. Механогидравлические прессы**

Этот тип прессов менее распространен. Механогидравлические прессы имеют механический и гидравлический приводы, обеспечивающие независимое перемещение различных элементов прессового инструмента. Сочетание двух типов привода упрощает конструкцию пресса и в то же время обеспечивает прессование деталей сложной формы. За рубежом выпускаются механогидравлические прессы усилием до 5000 кН, обеспечивающие получение деталей самой высокой группы сложности с пятью переходами по высоте. Конструкция этих прессов позволяет осуществлять предварительную настройку инструмента вне оборудования в универсальном пресс-блоке, который затем устанавливается на пресс. Это сокращает в 5-6 раз время переналадки при переходе на новое изделие.

Выбор прессового оборудования осуществляется исходя из требуемого усилия прессования, высоты засыпки, группы сложности изделия, свойств порошкового материала, годовой программы выпуска изделия.

## **5. Последовательность проектирования процесса изготовления изделия из порошкового материала**

1. *Анализ конструкции детали и выбор способа ее прессования.* На этом этапе анализируются размеры и форма детали, химический состав материала, из которого требуется ее изготовить, приводится уравнение кривой

уплотняемости материала. На основании полученных данных выбирается способ прессования детали.

2. *Расчет основных параметров и режимов прессования.* Этот этап предполагает расчет давления прессования, и соответственно, необходимого усилия прессования, геометрических параметров засыпки через расчет объема камеры засыпки, определение коэффициента уплотнения, соответствующего относительной плотности детали. На основании полученных данных производится расчет исполнительных размеров прессующего инструмента (формообразующих деталей пресс-формы).

3. *Проектирование пресс-формы и выбор оборудования для прессования.* На данном этапе на основании произведенных расчетов прессующего инструмента проектируется пресс-форма, производится силовой расчет матрицы и пуансона. Пресс, необходимый для прессования, выбирается исходя из требуемого усилия прессования с учетом возможности установки на него спроектированной пресс-формы и достаточности хода выталкивателя для возможности съема готовой детали.

Этапы 2 и 3 выполняются по формулам 1 – 32 данного пособия.

4. *Разработка процессов обработки спрессованной детали.* Этот этап включает в себя разработку режима спекания спрессованной порошковой детали для повышения уровня ее механических свойств, проектирование процесса калибрования спеченной детали для получения требуемых размеров, назначение режимов термической обработки откалиброванной детали, финишную обработку для получения заданной шероховатости и размеров готового изделия, а также составление технологической карты разработанного процесса изготовления детали.

5. *Проектирование цехового участка для изготовления детали.* Цеховой участок проектируется на основании технологической карты процесса изготовления детали.

## 6. Задания для технологического проектирования

В таблице 14 представлены эскизы и варианты размеров изделия, в таблице 15 приведены варианты порошкового материала с характеристиками, необходимыми для проектирования технологического процесса прессования изделия.

Таблица 14 – Задания с эскизами изделий и вариантами их размеров

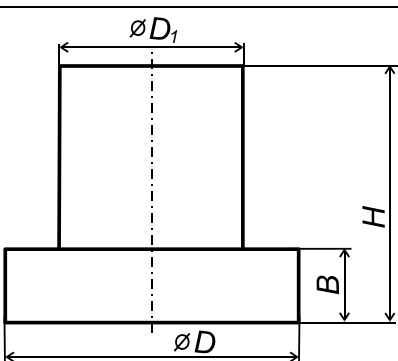
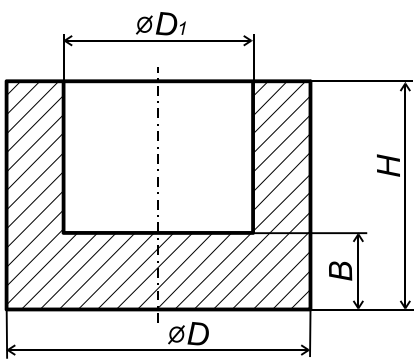
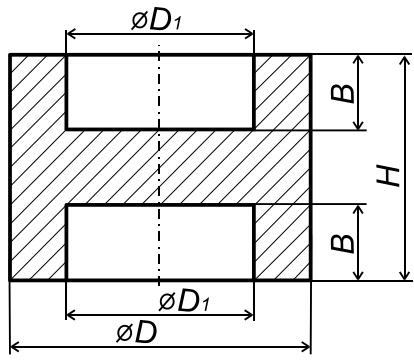
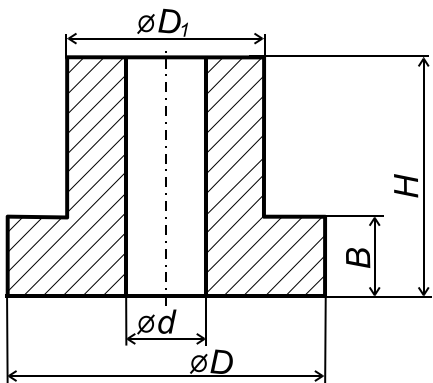
Задание 1. Деталь «Фланец»					
	Вариант	Размеры детали, мм			
		$D$	$D_1$	$B$	$H$
	1-А	50	40	20	40
	1-Б	45	30	15	40
1-В	40	30	10	30	
Задание 2. Деталь «Стакан»					
	Вариант	Размеры детали, мм			
		$D$	$D_1$	$B$	$H$
	2-А	50	40	20	40
	2-Б	45	30	15	40
2-В	40	30	10	30	
Задание 3. Деталь «Втулка фигурная»					
	Вариант	Размеры детали, мм			
		$D_1$	$B$	$H$	$D$
	3-А	25	5	25	35
	3-Б	30	10	30	40
	3-В	35	15	35	45
3-Г	25	10	30	35	

Таблица 14 – Задания с эскизами изделий и вариантами их размеров (окончание)

Задание 4. Деталь «Втулка с фланцем»						
	Вариант	Размеры детали, мм				
		$D$	$D_1$	$B$	$H$	$d$
	4-А	50	40	20	40	15
	4-Б	45	30	15	40	10
4-В	40	30	10	30	10	

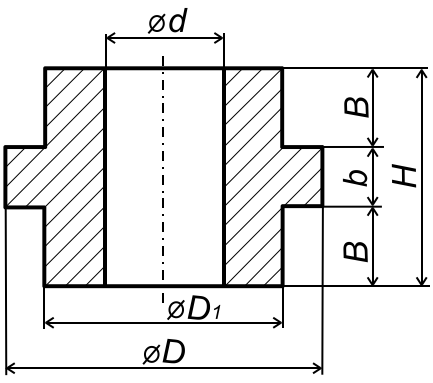
Задание 5. Деталь «Втулка с буртом»						
	Вариант	Размеры детали, мм				
		$D$	$D_1$	$b$	$H$	$d$
	5-А	65	35	10	70	20
	5-Б	70	40	15	70	25
5-В	75	45	20	70	30	

Таблица 15 – Варианты материала изделия с характеристиками

Вариант	Марка материала	Уравнение зависимости относительной плотности $\theta$ от давления прессования $p$ , МПа	Компактная плотность $\rho_{\text{комп}}$ , г/см <sup>3</sup>
М-1	Бронзовый порошок ПА-БрОГр2 (ГОСТ 26719-85)	$\theta(p) = 0,244 + 0,164 \cdot p^{0,204}$	8,900
М-2	Порошок железный легированный РМ 225Н	$\theta(p) = 0,34 + 0,08 \cdot p^{0,3}$	7,850
М-3	Порошок железный АМС 100,29	$\theta(p) = 0,4 + 0,05 \cdot p^{0,36}$	7,820
М-4	Порошок никелевый ПНЭ-1	$\theta(p) = 0,36 + 0,09 \cdot p^{0,44}$	8,902



## Список использованной литературы

1. Машиностроение. Энциклопедия. Технологии заготовительных производств. Т. III-2 / Под общ. ред. В. Ф. Мануйлова. – М.: Машиностроение. – 1996. – 736 с. Дорофеев Ю. Г. Динамическое горячее прессование пористых порошковых заготовок. – М.: Metallurgia. – 1977. – 216 с.
2. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: Учебник для вузов / под ред. Митина Б. С. – М.: Metallurgia. – 1987. – 791 с.
3. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник. / Отв. ред. И. М. Федорченко. – Киев: Наукова думка – 1985. – 624 с.
4. Кипарисов С. С., Падалько О. В. Оборудование предприятий порошковой металлургии. Учебник для вузов. – М.: «Metallurgia». – 1988. – 448 с.
5. Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. Т. 3. Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков. – 2-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Е. И. Семенова. – М.: Машиностроение. – 2010. – 348 с.
6. Гоциридзе А. В., Кузнецов П. А., Юргенсон Э. Е. Технология производства изделий из порошков: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во ПИМаш. – 2012. – 152 с.
7. Кипарисов С. С., Либенсон Г. А. Порошковая металлургия: 3-е изд., перераб. – М.: Metallurgia. – 1991. – 432 с.
8. Гиршов В. Л., Котов С. А., Цеменко В. Н. Современные технологии в порошковой металлургии: учеб. пособие. – СПб: Изд-во Политехн. Ун-та. – 2010. – 384 с.
9. Клячко Л. П., Уманский А. М., Бобров В. Н. Оборудование и оснастка для формования порошковых материалов. – М.: Metallurgia – 1986. – 337 с.
10. Либенсон Г. А., Попов В. С. Оборудование цехов порошковой металлургии. – М.: Metallurgia. – 1983. – 264 с.

11. Либенсон Г. А., Лопатин В. Ю., Комарницкий Г. В. Процессы порошковой металлургии : учеб. для вузов : в 2 т. Т.2. Формование и спекание. – М: МИСИС. – 2002. – 318 с.
12. Рудской А. И., Рыбин Ю. И., Цеменко В. Н. Теория и моделирование процессов деформирования порошковых и пористых материалов. – СПб.: «Наука». – 2012. – 415 с.
13. Герман Р. Порошковая металлургия от А до Я. Учебно-справ. руководство. – Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект». – 2009. – 336 с.
14. ГОСТ 17359-82. Порошковая металлургия. Термины и определения. – М.: Изд. стандартов. – 1982. – 20 с.
15. ГОСТ 25280-90. Порошки металлические. Метод определения уплотняемости. – М.: Изд. стандартов. – 1991. – 15 с.