

Кафедра ФВТМ ИФВТ ТПУ

# **Автоматизация и управление вакуумным оборудованием**

Модуль 1

Разработчик:

Гончаренко И.М., к.т.н., доцент кафедры ФВТМ

## **ФОРМОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ**

**Формование** является технологической операцией, в результате которой металлический порошок образует порошковую формовку.

**Порошковая формовка** – тело, полученное из металлического порошка и имеющее заданные форму, размеры и плотность.

В процессе формования исходный объем металлического порошка уменьшается и происходит **консолидация**, в результате которой формируется требуемая заготовка (формовка). Именно изменение первоначального объема порошкового тела существенно отличает его деформирование от деформирования компактного тела, объем которого остается постоянным, хотя геометрические размеры изменяются и во многих случаях значительно.

Формование более чем любая другая операция лимитирует технологические возможности порошковой металлургии. Сложность происходящих при этом явлений делает необходимым проведение специальных операций по подготовке порошка к последующему уплотнению.

### **4.1. ПОДГОТОВКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ К ФОРМОВАНИЮ.**

Для придания порошку определенных химических и физических характеристик, обеспечивающих выпуск из него продукции с нужными конечными свойствами возникает необходимость в специальных операциях подготовки.

Основные операции при подготовке порошков к формованию: **отжиг, рассев (классификация) и смешивание.**

**Отжиг** порошков применяют с целью повышения их пластичности и, следовательно, улучшения уплотняемости, прессуемости и формуемости за счет восстановления остаточных оксидов и снятия наклепа. Нагрев осуществляют в защитной среде (восстановительной, инертной или вакууме) при температуре порядка  $0,4-0,6 T_{пл}$  металла порошка или наименее тугоплавкого основного компонента смеси порошков.

Наиболее часто отжигу подвергают порошки, полученные механическим измельчением, электролизом, диспергированием расплавов и разложением карбониллов.

Для отжига применяются проходные или другие печи, подобные печам для восстановления оксидов и спекания заготовок. С целью более тщательной очистки порошков от различных примесей часто отжиг проводят в атмосфере с галогеносодержащими добавками.

**Классификация** – это разделение порошков по величине частиц на фракции, используемые либо непосредственно для формования, либо для составления смеси, содержащей требуемый процент частиц каждого размера.

Наиболее распространена ситовая классификация порошков с использованием сит различных типов. Основным типом просеивающего устройства являются **механические сита** с электромагнитным или рычажным вибратором. Сетку с требуемым размером ячеек натягивают на обечайку, укрепляемую на подпружиненной вибрирующей раме. Производительность таких сит достаточно высока (до нескольких сот килограммов порошка в час) и зависит от диаметра обечайки и свойств порошка.

При затрудненности свободного прохода порошка через ячейки сетки применяют **протилочные сита**, в которых специальное устройство с небольшим усилием давит на порошок, способствуя его проходу через сетку. Производительность протилочных сит значительно меньше обычных вибрационных.

Классификацию порошков по фракциям частиц с размером **менее 40–50 мкм** производят с помощью **воздушных сепараторов**, обеспечивающих высаживание твердых частиц из несущего газового потока под действием силы тяжести.

Задача **приготовление смесей** – превратить совокупность частиц твердых компонентов при их начальном произвольном распределении между собой в макрооднородную смесь. Скорость и результат смешивания во многом определяются формой и размером частиц, гранулометрическим составом (общим и каждого компонента в отдельности), числом смешиваемых компонентов и соотношением их количеств, плотностями компонентов и их различием, коэффициентом трения между частицами, способностью частиц к слипанию и агрегации, степенью изменения гранулометрического состава при смешивании.

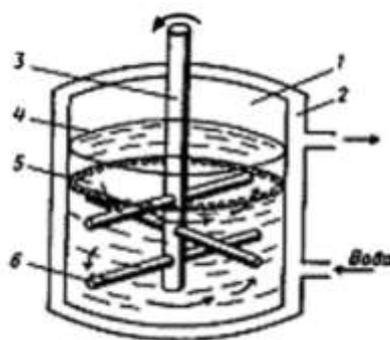
**Гранулометрический состав порошка** - количественное содержание массы частиц в определенных фракциях по отношению к общему количеству порошка.

Наиболее важной задачей при смешивании является обеспечение однородности смеси, так как от этого во многом зависят конечные свойства изделий. Шихта считается однородной в том случае, если **не менее 95%** произвольно взятых проб имеют химический и гранулометрический составы, отвечающие заданному.

Наиболее распространенным является механическое смешивание компонентов в **шаровых мельницах**, идентичных применяемым при размоле, и смесителях. **Шаровая вращающаяся мельница** - аппарат для измельчения дробленых твердых материалов, состоящая из цилиндрического металлического барабана и размольных тел полиэдрической или округлой формы. Оптимальная скорость вращения при смешивании в шаровой вращающейся мельнице составляет 20–40% критической. **Критическая скорость вращения шаровой мельницы** – скорость вращения барабана шаровой мельницы, при которой исчезает измельчающее действие размольных тел.

Лучшие результаты достигаются при соотношении шихты и размольных тел (твердосплавных шаров) по массе 1:1 и диаметре размольных тел 10-15 мм. Смешивание может сопровождаться одновременным измельчением компонентов. Наибольшая интенсивность смешивания наблюдается в начальный момент и, наоборот, однородность смеси почти не изменяется в конце процесса.

В последнее время для изготовления твердосплавных смесей рекомендуется использовать **аттриторы (Рис. 1)**, представляющие неподвижный сосуд (барабан) с лопастной мешалкой. При движении мешалки масса размольных тел приобретает форму воронки, в пределах которой шары и материал движутся как бы по спирали. Это способствует интенсивной циркуляции пульпы (**ПУЛЬПА - приготовленная смесь**) и равномерному перемешиванию. Скорости во всей массе шаров распределены крайне неравномерно во всех направлениях, что является необходимым условием механического воздействия на частицы порошка.



**Рис.1.** Схематическое изображение АТТРИТОРА.

**Равномерное распределение частиц** порошков в объеме смеси достигается тем легче и быстрее, чем ближе плотности смешиваемых компонентов. При большой разнице в плотностях наступает явление **сегрегации**, т.е. расслоение компонентов, и смешивание затрудняется (расслоение компонентов по плотностям может наступить и при длительном хранении приготовленной смеси). В этом случае полезно применить отдельную загрузку компонентов отдельными порциями: сначала более легкие с частью какого-либо более тяжелого, а затем всю оставшуюся массу компонентов. Смешивание лучше проводить в жидкой среде (спирт, бензин, глицерин).

Результат смешивания контролируют либо технологическим опробыванием шихты (по гранулометрическому составу, насыпной плотности, текучести, прессуемости и формуемости смеси, физическим и механическим свойствам заготовок из нее), либо химическим анализом проб. Первый способ достаточно полно характеризует качество

смеси, но слишком громоздок и длителен, а второй способ дает только приблизительную оценку.

*Приготовлением порошковой смеси завершается цикл подготовки компонентов к формованию.*

#### 4.2. ПРЕССОВАНИЕ ПОРОШКА.

Формование тел из металлических порошков является одной из главных операций при производстве порошковых изделий. При формовании в основном определяются форма и размеры изделий. Для формования компактного тела из порошка требуются значительные затраты энергии. Эта энергия расходуется на уплотнение заготовки путем перемещения и деформации частиц, на преодоление сил трения между частицами и стенками формующей полости. Чтобы облегчить формование, вводят **пластификатор** — пластичное вещество, способствующее уплотнению и упрочнению формовок.

Чем больше контактная поверхность частиц порошка, тем сильнее между ними зацепление и сцепление. А площадь контакта, естественно, увеличивается при повышении давления на поверхность (примерно пропорционально). За счет увеличения контакта между частицами при формовании повышается прочность формируемого тела, уменьшается **пористость**, измельчаются скопления частиц, а иногда и сами частицы, и происходит некоторое упрочение (наклеп) частиц.

**Пористость** - отношение объема пустот в материале к его полному объему.

В процессе формования заготовкам из порошка придают форму, размеры, плотность и механическую прочность, необходимые для последующего изготовления изделий.

Порошковые металлы могут деформироваться как вследствие деформации отдельных частиц, так и вследствие их смещения и заполнения ими пор. Таким образом, деформация сыпучего тела, в отличие от компактного, изменяет не только его форму, но и объем. Обычно при формовании высота заготовки по отношению к высоте насыпанного порошка уменьшается в 3–4 раза и более (**Рис. 2**).

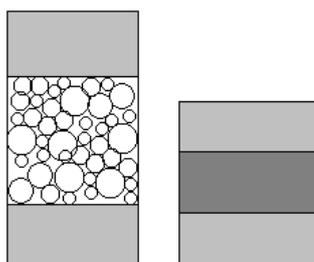


Рисунок 2 – Схема изменения объема при формовании порошков.

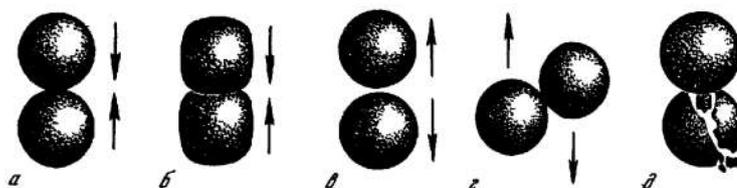


Рисунок 3– Схемы перемещения частиц порошков при формовании.

При формовании может происходить одновременно упругая, хрупкая и пластическая деформация частиц. Рисунок 3 показывает возможные схемы перемещения частиц порошкового металла. При сближении частиц может происходить увеличение площади контактных участков как без деформации частиц (а), так и с их деформацией (б); удаление частиц (в) вызывает уменьшение контактных участков и даже может привести к разрыву контакта; скольжение частиц (г) сопровождается смещением контактных участков; одновременно с перемещением частицы могут разрушаться вследствие хрупкой деформации (д). В результате хрупкой деформации могут разрушаться как скопления частиц, так и сами частицы. Это наблюдается при формовании порошков с хрупкими и твердыми составляющими, например тонкой чугуновой стружки, а также твердых, но хрупких соединений металлов. Степень деформации частиц повышается с увеличением пластичности формуемого материала и прилагаемого давления.

На результаты формования оказывают влияние различные факторы: насыпная масса порошка, предварительная обработка порошков, величина и направление давления при формовании и др.

Сыпучие тела занимают объем, при котором механическая прочность тела, обусловленная взаимным зацеплением частиц, достаточна для сопротивления давлению, вызываемому массой порошка. Если механическая прочность велика, то достаточная степень зацепления получается уже при рыхлой укладке и порошок имеет малую насыпную массу. Если же прочность сыпучего тела мала, то для получения необходимого зацепления нужна более плотная укладка, что повышает насыпную массу порошка.

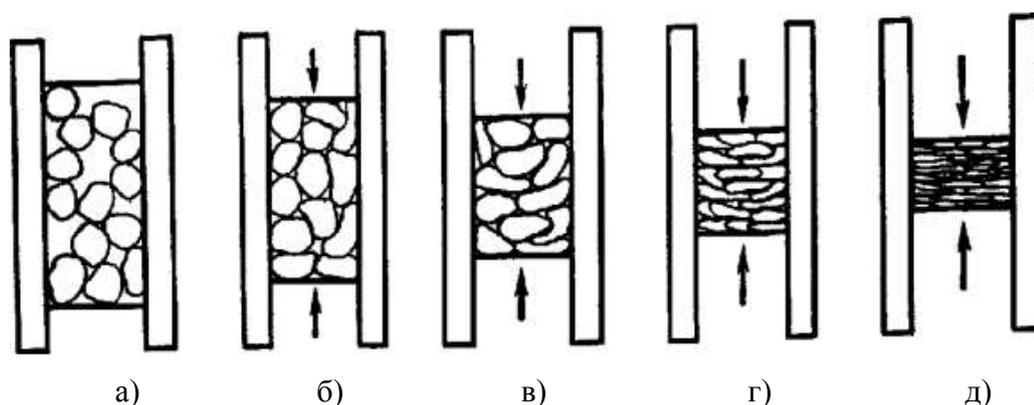


Рис. 4 – Стадии формования порошков.

При засыпке порошка в **пресс-форму** его частицы располагаются хаотически, образуя при этом так называемые *мостики* или *арки*. Плотность засыпанного порошка в этом случае равна его насыпной массе (Рис. 4, а). Приложение внешнего давления к такому свободно насыпанному порошку приводит к резкому повышению его плотности за счет заполнения пустот и пор. По мере увеличения прилагаемого давления мостики и арки разрушаются

(Рис. 4, б, в) и частицы проникают в мелкие поры. На дальнейших этапах формования происходит качественное и количественное изменение границ между частицами: от трения частиц при перемещении друг относительно друга сдираются окисные пленки, контакты между частицами в этих местах из неметаллических переходят в металлические, в результате чего повышается прочность заготовки (Рисунок 4, г); затем происходит хрупкое разрушение частиц порошков из твердых металлов и пластическая деформация частиц из мягких металлов (Рисунок 4, д).

Порошкообразные смеси для различных марок твердых сплавов подвергают формованию различными методами, известными в порошковой металлургии. Методы формования порошковых заготовок весьма разнообразны. По времени действия их можно подразделить на **прерывистые** и **непрерывные**, по принципам приложения давления – на **постепенно возрастающие**, **мгновенно возрастающие** и **вибрационные**, по направлению или схеме формования – на **односторонние**, **двусторонние**, **всесторонние** и **центробежные**, по применяемой температуре – на **холодное формование** при комнатной температуре и **горячее** при повышенной, по атмосфере – на **формование на воздухе**, **в вакууме** и **в инертной среде**.

Уплотнение порошка обеспечивают **прессованием в пресс-формах**, **изостатическим**, **шликерным**, **мундштучным**, **инжекционным**, **вибрационным формованием**, **прокаткой**.

К **прерывистым** методам относится большинство случаев формования, когда имеет место поштучное изготовление изделий: формование на разного рода прессах (гидравлических, механических, вибрационных), а также различные виды изостатического (всестороннего) формования – гидростатическое, горячее изостатическое, взрывное.

К **непрерывным** методам, при помощи которых можно получать изделия значительной длины, относятся клиновое формование, мундштучное (экструзия) и прокатка металлических порошков. Кроме того, к методам формования относится так называемое шликерное литье, которое практически осуществляется без приложения давления.

#### ***4.2.1. Процессы, происходящие при прессовании в прессформах.***

Холодное формование на прессах.

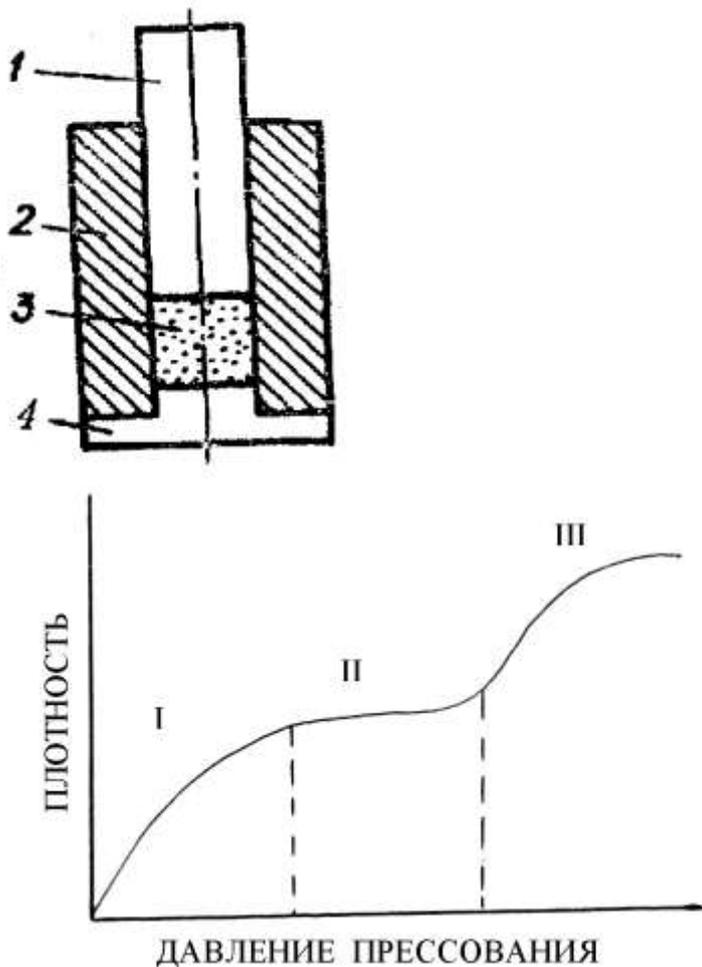


Рисунок 5 – Пресс-форма для холодного формования порошков (а) и идеализированная кривая уплотнения порошка (б) при прессовании пластичных металлов.

Наиболее распространенным способом формования порошковых материалов является холодное формование в закрытых формах, называемых пресс-формами (Рисунок 5, а). При этом площадь формируемого материала остается постоянной в течение всего времени формования, а давление возрастает до определенной заданной величины.

Идеализированная кривая процесса уплотнения порошка (Рисунок 5, б) имеет три характерных участка. Наиболее быстро плотность упаковки частиц нарастает на первой стадии (участок а), когда частицы перемещаются относительно свободно, занимая близлежащие, пустоты; одновременно происходит разрушение арок. К концу этой стадии частицы оказываются уложенными максимально плотно, и появляется горизонтальный участок б.

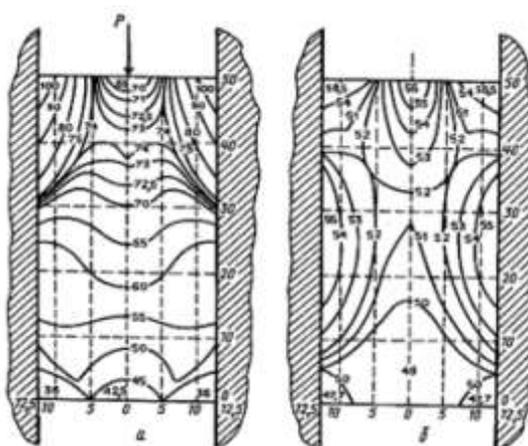
Здесь сопротивление частиц сжатию велико, и несмотря на возрастание давления порошок некоторое время не уменьшает своего объема, так как частицы не перемешиваются относительно друг друга и испытывают лишь упругую деформацию. Когда давление прессования превысит сопротивление сжатию порошкового тела, начинается пластическая деформация частиц (третья стадия процесса уплотнения, выражаемая

участком *в*). Чем пластичнее металл, тем при более низких давлениях прессования начинается уплотнение порошка за счет деформации его частиц. Для хрупких материалов, у которых пластическая деформация отсутствует, наступление третьей стадии невозможно, и при соответствующем возрастании давления частицы разрушаются.

Для прессования применяют большей частью быстроходные легко автоматизируемые эксцентриковые (кривошипные) прессы, а иногда и тихоходные гидравлические прессы. Прессование производится в прессформах при давлении от 10 до 100  $\text{кГ/мм}^2$  (от 98 до 981  $\text{Мн/м}^2$ ) в зависимости от твердости порошка и формы изделия: чем тверже порошок, тем больше давление прессования, при этом усадка получается от 2:1 до 6:1.

При формировании порошков возникает трение между порошками и внутренними стенками пресс-форм. Вследствие трения порошка о стенки прессформы процесс прессования получается прерывистым, ступенчатым, нагрузка и сжатие порошка меняются скачками. Важнейшую роль при сильных давлениях прессования играет пластическая деформация частиц порошка, которая вызывает увеличение поверхности соприкосновения (контактной поверхности) их между собой. Прочность прессования объясняется двумя причинами: **атомарным схватыванием на контактной поверхности** — «зацеплениями», **переплетением неровностей** на поверхности частиц порошка.

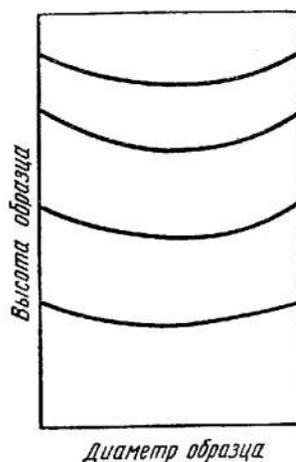
В различных частях сечения порошок уплотняется неодинаково. В нижних слоях смеси (**Рис. 6а**) фактическое давление прессования составляет всего 60-70% от приложенного давления. Отмеченные недостатки можно уменьшить при применении двустороннего прессования.



**Рис. 6** – Изменение вертикального давления прессования (а) и плотности цилиндрического брикета из смеси WC+15%Co (б).

С наличием сил трения связано неравномерное распределение плотности в объеме прессовки (**Рис.6б** и 7). При последующем спекании усадка может оказаться неоднородной, и недопрессованная часть будет плохо спекаться. Поэтому прессование

проходит лучше при наличии деталей небольшой высоты. Вместе с тем порошок не может, подобно жидкости, заполнить очень сложную фасонную форму; следовательно, из порошковых сплавов можно изготавливать детали сравнительно не очень сложной формы.



**Рис. 7** – Схема распределения плотности по вертикальному сечению прессовки (давление приложено сверху).

От поведения заготовок после снятия давления и при извлечении их из пресс-формы в значительной степени зависит как успех операции прессования, так и количество брака. Известно, что после снятия давления проявляется так называемое упругое последствие, приводящее к увеличению размеров заготовки, что в свою очередь может приводить к разрушению или появлению в ней «расслойных» трещин. Чрезмерное давление при прессовании вызывает явление «расслоя», так как упругое последствие растет пропорционально прилагаемому при прессовании давлению, в то время как прочность заготовки возрастает при высоких давлениях медленнее. Ослаблению разрушения брикета при извлечении из пресс-формы способствует выдержка под давлением при прессовании, приводящая к релаксации напряжений.

В результате холодного формования в закрытых **пресс-формах** получается заготовка, по форме и размерам соответствующая готовому изделию с припусками, необходимыми для прохождения последующих операций. Процесс такого формования состоит из сборки пресс-формы, дозировки и засыпки шихты в пресс-форму, самого формования и удаления изделий из пресс-формы.

Дозировку шихты производят весовым или объемным способом. При массовом производстве и использовании автоматических прессов обычно применяется объемная дозировка.

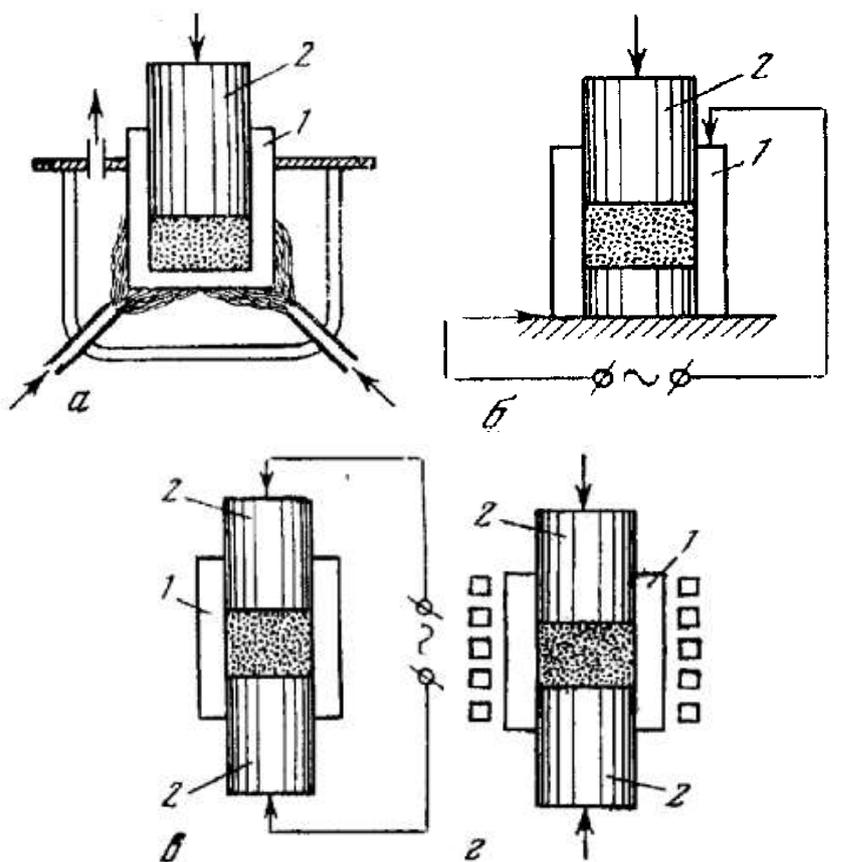
### **Горячее формование.**

Горячее формование осуществляется в закрытых **пресс-формах** при повышенных и высоких температурах и возрастающем до заданной величины давлении. С повышением температуры уменьшается величина давления, необходимого для уплотнения порошка.

Метод горячего формования позволяет получать изделия из порошков, не поддающихся формованию или **спеканию** обычными способами. При горячем формовании увеличение контакта между частицами достигается: 1) за счет их деформации внешними силами, 2) собственной температурной подвижностью атомов. При горячем формовании можно получить материал **плотностью, приближающейся к теоретической**, и со свойствами компактных металлов.

Механические свойства материала повышаются с ростом прилагаемого давления до достижения 100%-ной плотности. При дальнейшем повышении давления свойства практически не изменяются. Чем выше температура, тем ниже давление, при котором достигается постоянство свойств изделий. Давление, необходимое для получения изделий определенной плотности, при высоких температурах составляет 0,1–0,2 давления холодного формования.

Горячее формование осуществляется преимущественно на гидравлических прессах. Оно производится в **пресс-формах**, изготовляемых из жаропрочных сплавов (для низких температур прессования – до 1000°C), либо из графита для высокотемпературного прессования.



**Рис. 8** – Способы нагрева при горячем формовании.

а – внешний нагрев, б – электронагрев пресс-формы, в – электронагрев порошка, г – высокочастотный нагрев (1 – матрица, 2 – пуансон).

Нагрев **пресс-форм** и материала осуществляется одним из следующих способов (**Рис. 8**): применением внешних нагревателей (а); непосредственным пропусканием тока через пресс-форму (б) или порошок (в), индукционным высокочастотным нагревом (г).

Горячее формование применяется только в ряде специальных случаев: при производстве твердых и жаропрочных материалов, алмазно-металлических сплавов и крупных изделий весом до 500 кг (например, **твердосплавных** прокатных валков). Кроме того, оно применяется при производстве тонких пластин, дисков и других деталей, которые коробятся при **спекании** и поэтому изготовление их холодным формованием затруднительно.

Выдержка при горячем формовании (длительность спекания при максимальном давлении) во много раз ниже, чем при обычном спекании заготовок. Так, **спекание твердых сплавов** производится при выдержках 0,75 – 1,5 часа, а при горячем формовании на это затрачивается всего 1 –10 минут.

Горячее формование менее производительно по сравнению с холодным, связано со значительным износом **пресс-форм** и трудностью подбора для них материала, способного выдерживать высокие температуры. Однако, несмотря на ряд трудностей, связанных с предотвращением окисления порошка, выбором материала пресс-формы, а также некоторым ограничением областей применения горячего формования, принципиальная ценность и перспективность метода очевидны, особенно для получения изделий большой плотности и с высокими механическими свойствами.

#### **4.2.2. Изостатическое формование.**

Формование металлических порошков в эластичной или деформируемой оболочке ( толщиной 0,1-2 мм) в условиях всестороннего сжатия. Трение частиц о стенки оболочки **невелико**. Т. е. отсутствуют потери давления на преодоление трения о стенку.

Гидростатическое формование (масло, вода, глицерин)

Газостатическое формование (гелий, аргон) не порошок , а уже форму.

Формование в толстостенной эластичной оболочке (10-20 мм) Оболочки: парафин, воск, водный раствор желатина с добавками глицерина эпоксидных смол и каучука.

#### **4.2.3. Шликерное формование.**

Длительный процесс.

Шликерное формование – формование металлического порошка заполнением шликером пористой формы, обеспечивающей удаление жидкости из шликера.

**Шликер** – устойчивая суспензия металлического порошка.

Жидкая фаза шликера должна иметь низкое давление пара, низкую воспламеняемость и токсичность, малую вязкость и не должна активно химически взаимодействовать с твердой фазой. ОСНОВА ШЛИКЕРА – вода с парафином и полиэтиленом.

Главное свойство **шликера** – высокая текучесть.

**Формы адсорбционные и неадсорбционные**

**Термопластические шликеры (70-100 °С)**

#### **4.2.4. Другие процессы формования.**

Прокатка порошка – формование порошка в прокатном стане,

Мундштучное формование – продавливание через отверстие, определяющее форму и размер поперечного сечения порошковой формовки. Аналог – инъекционное формование.

Вибрационное формование или импульсное.

### **РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

- 1. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А.** Порошковая металлургия: Учебник для техникумов– 3-е изд. перераб. – М.: Металлургия, 1991. - 432 с.
- 2. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них.** Учебное пособие для вузов / Панов В.С., Чувилин А.М. – М.: «МИСИС», 2001. – 428 с.
- 3. Производство порошковых изделий:** Учебник для техникумов. 2-е изд., перераб. и доп. Либенсон Г.А. – М.: Металлургия, – 1990. – 240 с.

*Демонстрационный материал*

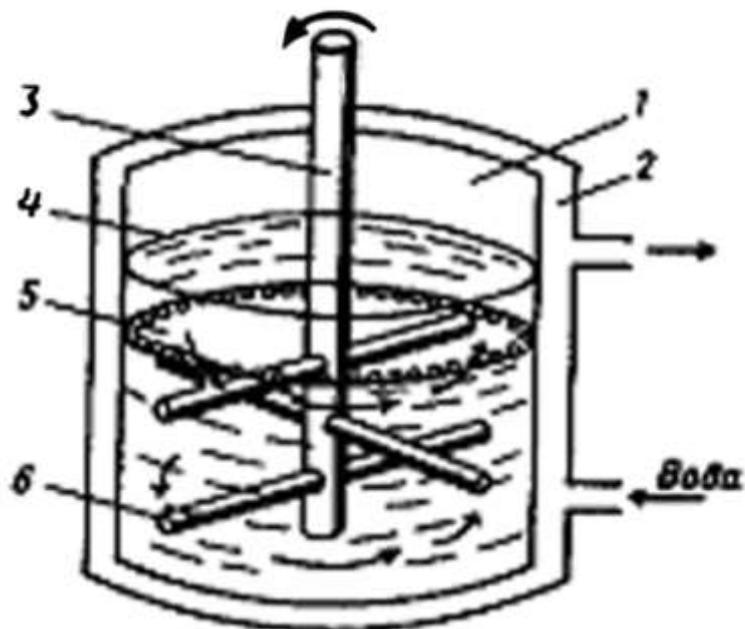


Рис.1. Схематическое изображение АТТРИТОРА.

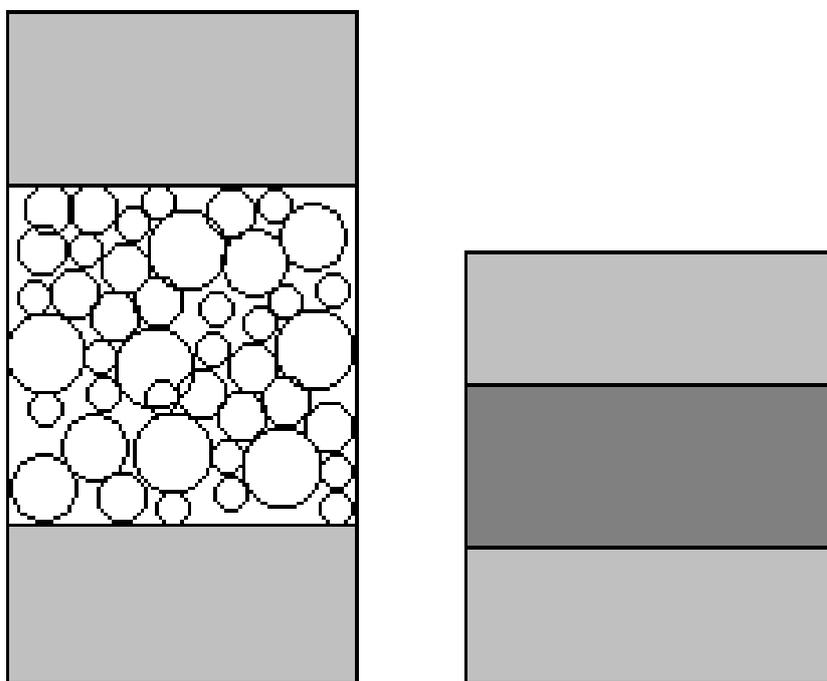


Рис. 2 – Схема изменения объема при формировании порошков.

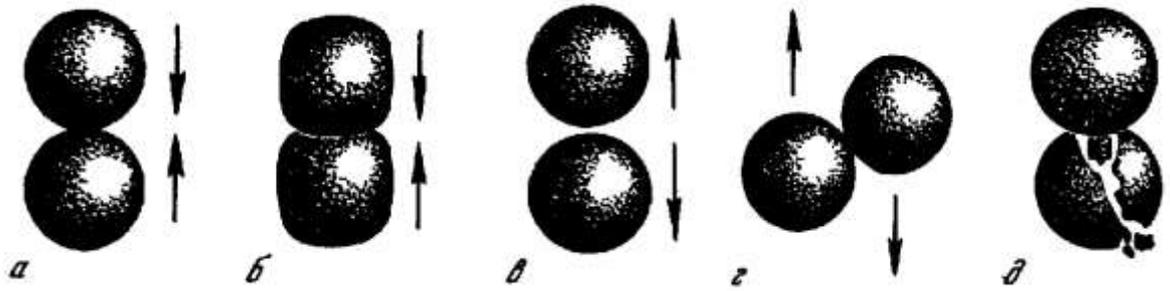


Рис. 3 – Схемы перемещения частиц порошков при формовании.

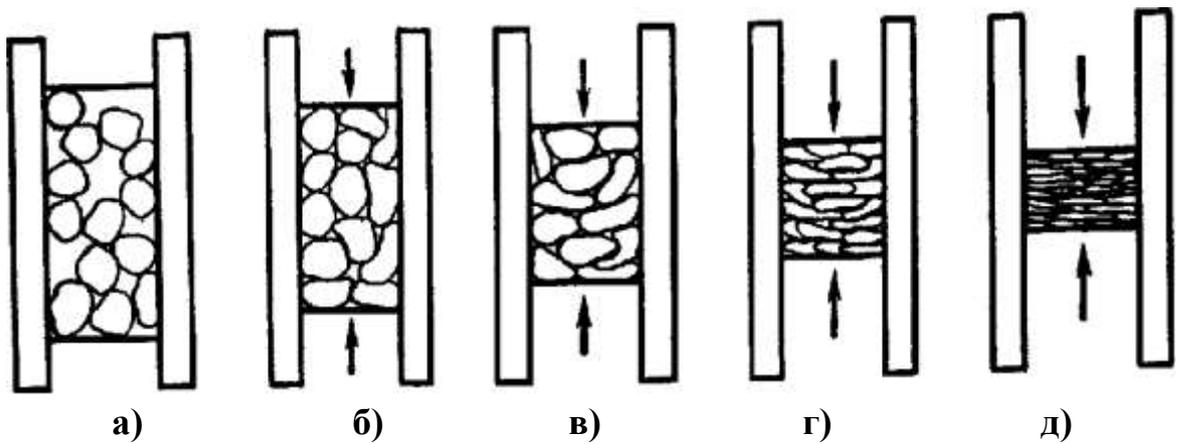


Рис. 4 – Стадии формования порошков.

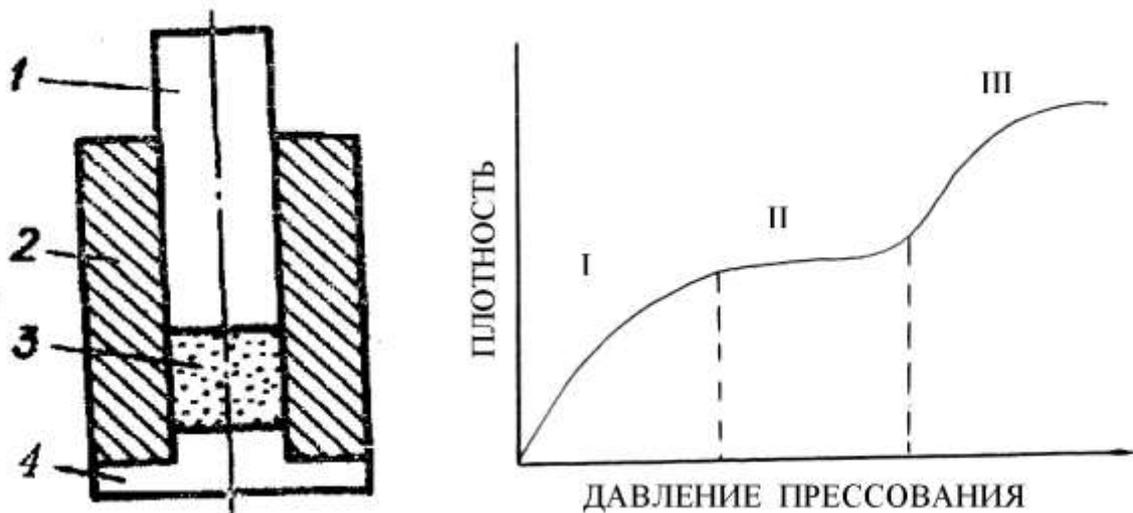


Рис. 5. – Пресс-форма для холодного формования порошков (а) и идеализированная кривая уплотнения порошка (б) при прессовании пластичных металлов.

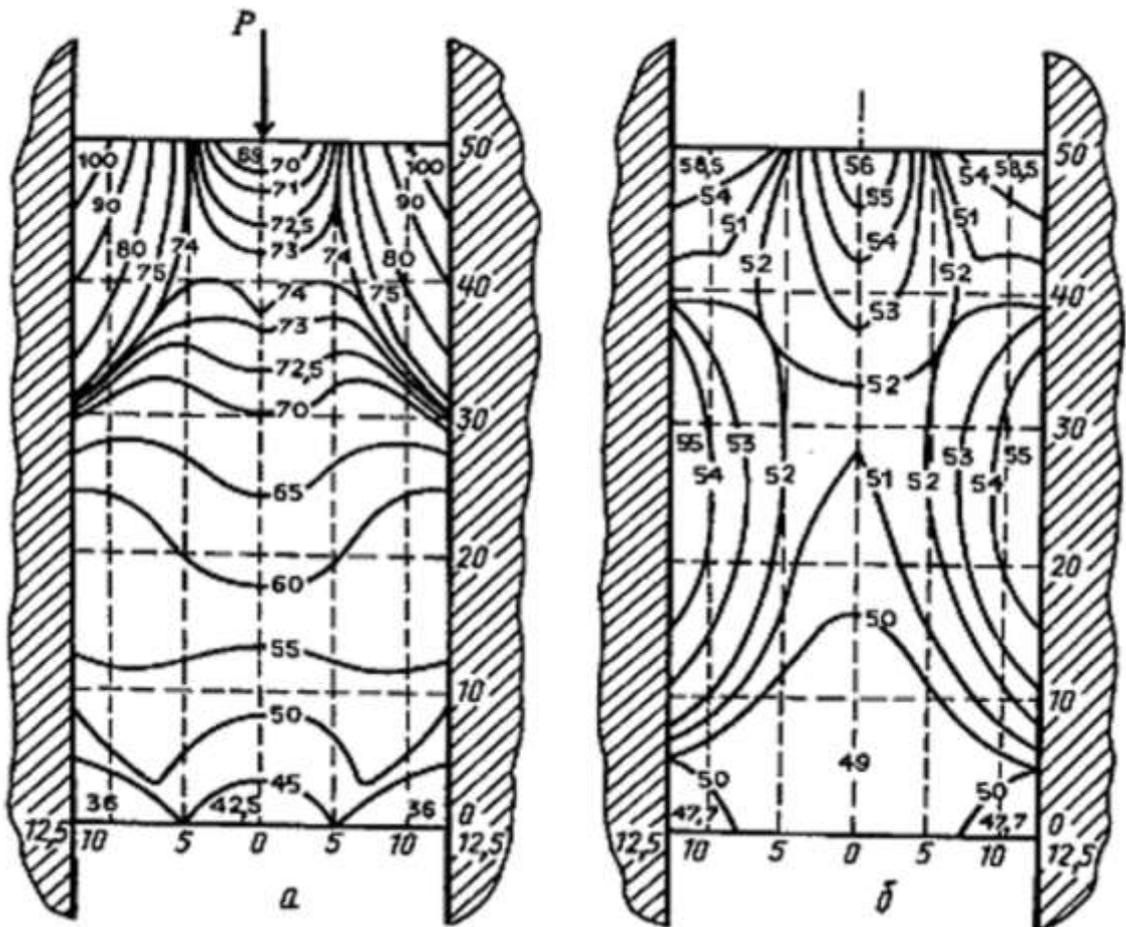


Рис. 6 – Изменение вертикального давления прессования (а) и плотности цилиндрического брикета из смеси WC+15%Co (б).

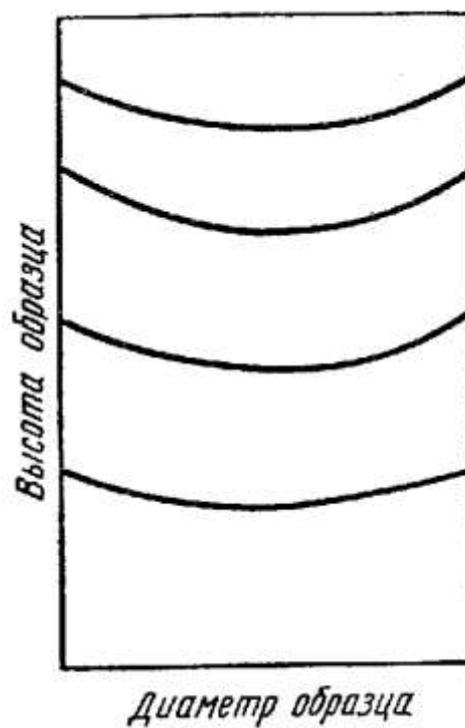
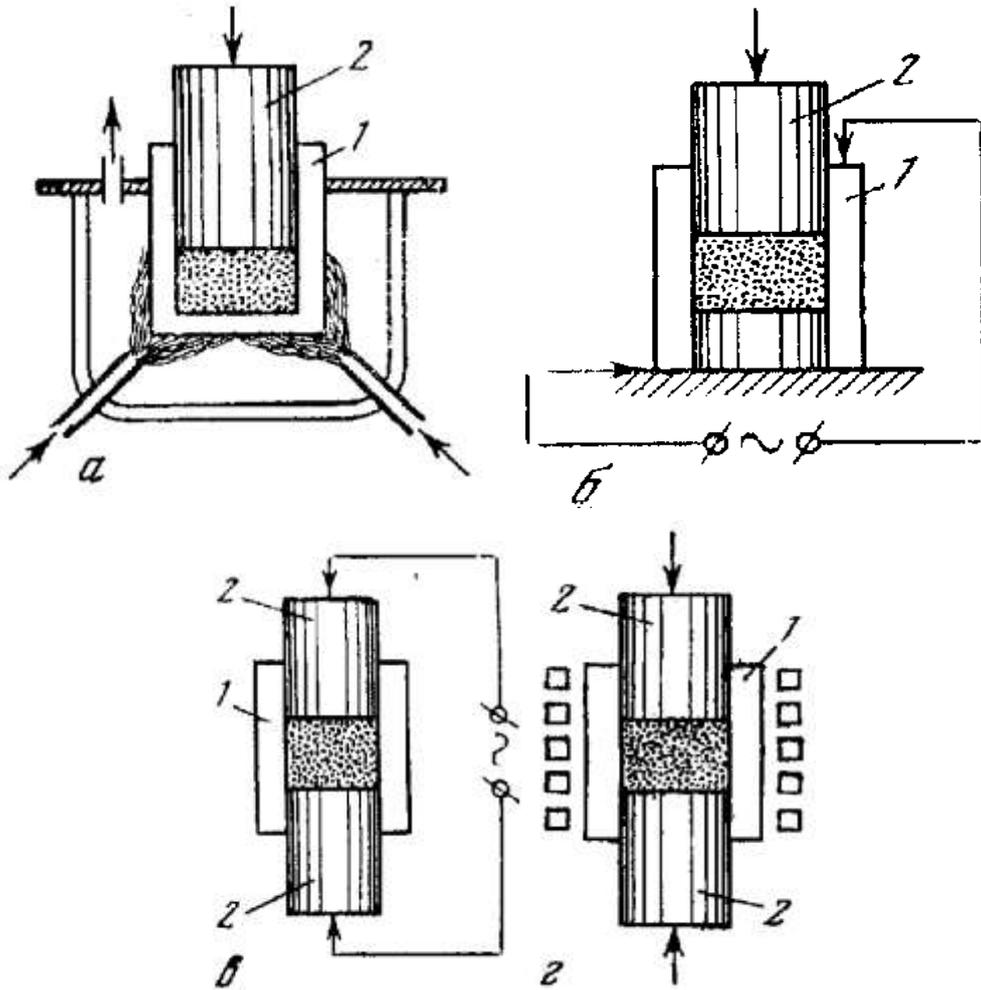


Рис. 7 – Схема распределения плотности по вертикальному сечению

прессовки (давление приложено сверху).



**Рис. 8** – Способы нагрева при горячем формовании.  
а – внешний нагрев, б – электронагрев пресс-формы, в – электронагрев порошка, г – высокочастотный нагрев (1 – матрица, 2 – пуансон).