

Кафедра ФВТМ ИФВТ ТПУ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Модуль 3

Разработчик:

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

ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ И ИХ СВОЙСТВА

Металлическим порошком - называется совокупность частиц металла, сплава или металлоподобного соединения размерами до миллиметра, находящихся в контакте и не связанных между собой. **Лигатурами** - называются вспомогательные сплавы, применяемые для жидкотекучести. Частица представляет собой индивидуальное тело с небольшими размерами во всех трех измерениях. В большинстве случаев размеры частиц, используемых в ПМ, составляют 10-100 мкм. В связи с этим они имеют развитую поверхность, во многом определяющую их поведение при дальнейшей обработке и отличающую ее от обычных материалов даже идентичного состава. Второй главной особенностью частицы является значительно большее содержание (относительное) в ней *объемных дефектов* – пор и включений.

Классификация методов получения порошков

Производство порошка – первая технологическая операция метода **порошковой металлургии**. Способы получения порошков весьма разнообразны, что позволяет широко варьировать их свойства. Это, в свою очередь, делает возможным придание изделиям из порошка требуемых физических, механических и других специальных свойств. Кроме того, метод изготовления порошка в значительной мере определяет его качество и себестоимость.

Способы получения порошков делятся на *механические и физико-химические*.

Механические методы обеспечивают превращение исходного материала в порошок без заметного изменения его химического состава. Чаще всего используют измельчение твердых материалов в **мельницах** различных конструкций и **диспергирование расплавов**.

К *физико-химическим методам* относят технологические процессы производства порошков, связанные с физико-химическими превращениями исходного сырья. В результате получаемый порошок по химическому составу существенно отличается от исходного материала.

Механические методы получения порошков

Основным механическим методом получения порошков относятся:

1. Дробление и размол твердых материалов.

Измельчение стружки, обрезков и компактных материалов проводят в шаровых, вихревых, молотковых и других **мельницах**, к.п.д. которых сравнительно невелик. Получают порошки Fe, Cu, Mn, латуни, бронзы, хрома, алюминия, сталей.

2. Диспергирование расплава.

Струю расплавленного металла диспергируют механическим способом (воздействием центробежных сил и др.) или действуя на нее потоком энергоносителя (газа или жидкости). Получают порошки алюминия, свинца, цинка, бронзы, латуни, железа, чугуна, стали.

3. Грануляция расплава.

Порошок образуется при сливании расплавленного металла в жидкость (например, в воду). Получают крупные порошки железа, меди, свинца, олова, цинка.

4. Обработка твердых (компактных) металлов резанием.

При станочной обработке литых металлов или сплавов подбирают такой режим резания, который обеспечивает образование частиц, а не стружки. Получают порошки стали, латуни, бронзы, магния.

Механическое измельчение компактных металлов широко распространено в **порошковой металлургии**. Измельчение может быть дроблением, размолом, истиранием. Наиболее целесообразно применять механическое измельчение при производстве порошков хрупких металлов и сплавов, таких как Si, Be, Cr, Mn, сплавы Al с Mg и др. Размол вязких

пластичных металлов (Zn, Al, Cu) затруднен, так как они в основном расплющиваются, а не разрушаются.

При измельчении комбинируют *раздавливание* и *удар* (при получении крупных частиц) и *истирание* и *удар* (при тонком измельчении). При дроблении затрачиваемая энергия расходуется на упругую и пластическую деформацию, на теплоту и на образование новых поверхностей. При дроблении под действием внешних сил в наиболее слабых местах тела образуются замкнутые или начинающиеся у поверхности трещины. Разрушение наблюдается тогда, когда трещины пересекают твердое тело по всему его сечению в одном или нескольких направлениях. В момент разрушения напряжения в деформирующемся теле превышают некоторое предельное значение (предел прочности материала).

Работа, затрачиваемая на измельчение, представляет собой сумму

$$\sigma \Delta S + K \Delta V.$$

Слагаемое $\sigma \Delta S$ - это энергия, расходуемая на образование новых поверхностей раздела при разрушении твердого тела (σ - удельная поверхностная энергия, ΔS - происходящее при измельчении приращение поверхности).

Слагаемое $K \Delta V$ - выражает энергию деформации (K - работа упругой и пластической деформации на единицу объема твердого тела, а ΔV - часть объема тела, подвергшаяся деформации).

При крупном дроблении вновь образующаяся поверхность невелика.

Поэтому $\sigma \Delta S \ll K \Delta V$

и расход энергии приблизительно пропорционален объему разрушаемого тела.

При тонком измельчении вновь образующаяся поверхность очень велика и

$$\sigma \Delta S \gg K \Delta V.$$

Поэтому расход энергии на измельчение приблизительно пропорционален вновь образующейся поверхности.

Среди методов измельчения твердых материалов наибольшее распространение получили обработка металлов резанием с образованием мелкой стружки или опилок, измельчение металла в шаровых, вихревых, молотковых и других мельницах, ультразвуковое диспергирование.

В качестве примера рассмотрим размол в шаровых мельницах.

Простейший аппарат для измельчения дробленых твердых материалов - шаровая вращающаяся мельница, которая представляет собой металлический цилиндрический барабан (Рисунок 2). Внутри барабана находятся размольные тела полиэдрической или округлой формы, чаще всего стальные или твердосплавные шары. При вращении мельницы размольные тела поднимаются на некоторую высоту в направлении вращения, затем падают или скатываются и измельчают материал, истирая его и раздробляя. Соотношение между дробящим и истирающим действием размольных тел в мельнице зависит от отношения диаметра цилиндра D к длине цилиндра L при одинаковом объеме. При $D:L > 3$ преобладает дробящее действие размольных тел (полезно для измельчения хрупких тел), при $D:L < 3$ - истирающее действие (более эффективное для измельчения пластичных материалов).

На интенсивность и механизм размола оказывают сильное влияние скорость вращения барабана мельницы, число и размер размольных тел, масса измельчаемого материала, продолжительность и среда размола. С увеличением скорости вращения барабана мельницы размольные тела падают с большей высоты, производя главным образом дробящее действие. При дальнейшем увеличении скорости вращения барабана размольные тела будут вращаться с барабаном и материал будет измельчаться незначительно. Эту скорость называют **критической скоростью** вращения.

Рассмотрим поведение единичного размольного тела, например шара (Рисунок 3). Одиночный шар весом P на поверхности барабана мельницы, вращающегося со скоростью v (м/с), в точке m будет находиться под действием центробежной силы, равной Pv^2/gR , где g – ускорение силы тяжести, R – внутренний радиус барабана мельницы. При угле подъема α сила собственного веса шара может быть разложена на силы, одна из которых направлена по радиусу и равна $P \sin \alpha$, а другая – по касательной и равна $P \cos \alpha$.

Не принимая во внимание трение, можно установить, что одиночный шар будет удерживаться на стенке барабана до тех пор, пока

$$(Pv^2/gR) = P \sin \alpha, \text{ или } (v^2/gR) = \sin \alpha.$$

Если скорость вращения n такова, что в момент прохождения шара через зенит, при котором $\alpha = 90^\circ$, шар остается на стенке барабана, то $\sin 90^\circ = v^2/gR = 1$, или $v^2 = gR$. При этом число оборотов барабана мельницы $n_{кр}$ (об/мин), а $v = \pi D n_{кр} / 60$, поэтому

$$\pi^2 D^2 n_{кр}^2 / 60^2 = g D / 2 \quad (1)$$

где D — внутренний диаметр барабана мельницы. Отсюда находим, об/мин:

$$n_{кр} = \sqrt{g/2\pi^2(60/\sqrt{D})} = 42,4/\sqrt{D} \quad (2)$$

На процесс измельчения большое влияние оказывает масса шаров и ее отношение к массе измельчаемого материала. Обычно в мельницу загружают 1,7-1,9 кг стальных шаров на 1 л. объема. При этом **коэффициент заполнения ϕ барабана мельницы** является оптимальным, и составляет 0,4 - 0,5. При больших значениях ϕ шары сталкиваются друг с другом, теряя энергию, и не производят достаточно эффективного измельчающего действия, а при меньшей загрузке шаров резко снижается производительность измельчающего устройства. Количество (масса) загружаемого для размола материала должно быть таким, чтобы после начала измельчения его объем не превышал объема пустот (зазоров) между размольными телами. Если материала будет больше, то часть его, не вмещающаяся в зазоры, измельчается менее интенсивно. Обычно соотношение между

массой размольных тел и массой измельчаемого материала составляет 2,5 - 3. При интенсивном измельчении это соотношение увеличивается до 6 - 12 и даже больше.

Размер размольных тел (диаметр шаров) также оказывает влияние на процесс размола. Размер размольных тел должно быть в пределах 5 - 6% внутреннего диаметра барабана **мельницы**. Лучше применять набор размольных тел по размерам (например, при соотношении 4:2:1).

Для интенсификации процесса размола его проводят в жидкой среде, что препятствует распылению материала. Кроме того, проникая в микротрещины частиц, жидкость создает большое капиллярное давление, способствуя измельчению. Жидкость также уменьшает трение как между размольными телами, так и между частицами обрабатываемого материала. Жидкой средой обычно служат спирт, ацетон, вода, некоторые углеводороды и пр.

Длительность размола составляет от нескольких часов до нескольких суток.

Для **шаровых вращающихся мельниц** соотношение средних размеров частиц порошка до и после измельчения, называемое **степенью измельчения**, составляет 50 – 100. Форма частиц, получаемая в результате размола в шаровых вращающихся мельницах, обычно осколочная, т.е. неправильная, с острыми гранями, а шероховатость их поверхности невелика.

Возможны несколько режимов измельчения. Наконец, может быть создан еще один вариант режима размола, получивший название *режима скольжения*. При использовании мельниц с гладкой внутренней поверхностью барабана и при небольшой относительной загрузке размольные тела не циркулируют внутри барабана мельницы. Вся их масса скользит по поверхности вращающегося барабана и их взаимное перемещение почти отсутствует. Этот режим называют режимом скольжения (сектор *ABC*, Рисунок 4, а). Измельчение материала при таком режиме размола малоэффективно, так как происходит путем истирания его лишь между внешней поверхностью размольных тел и стенкой барабана мельницы.

При получении измельченных материалов с размером частиц порядка 1 мкм размол путем дробления падающими шарами становится малоэффективным. В таких случаях применяют *режим перекатывания шаров* (Рисунок 4, б), при котором они не падают, а поднимаются вместе со стенкой **вращающегося барабана мельницы** и затем скатываются по наклонной поверхности, образованной их массой. Измельчаемый материал истирается между шарами, циркулирующими в объеме, занимаемом их массой. При режиме перекатывания различимы четыре зоны движения шаров: зона их подъема по стенке барабана с некоторой не очень высокой скоростью, зона скатывания с наибольшей

скоростью, зона встречи скатившихся шаров со стенкой барабана и центральная застойная зона, в которой шары почти неподвижны. Увеличивая скорость вращения барабана мельницы, можно повысить эффективность режима перекачивания путем сужения или полной ликвидации застойной зоны в шаровой загрузке.

Наличие перекачивания или скольжения размольных тел при вращении барабана мельницы зависит (при прочих равных условиях) от относительной загрузки ϕ . При загрузке большого числа шаров (или размольных тел другой формы, но обязательно полиэдрической) происходит перекачивание, а при малой загрузке — скольжение. Изменяя величину загрузки мельницы размольными телами, можно получать в одних случаях режим перекачивания, а в других — режим скольжения, причем в зависимости от устанавливаемого режима эффективность размола будет различной.

Кроме вращающихся мельниц используют также вибрационные, планетарные, центробежные и гироскопические мельницы (вращаются относительно горизонтальных и вертикальных осей), мельницы с магнитно-индукционным вращателем (для ферромагнитных материалов), вихревые мельницы (измельчение за счет создания вихревых потоков, создаваемых двумя пропеллерами, расположенных друг против друга), молотковые мельницы (используется молот для дробления губчатых материалов).

Другим распространенным методом получения порошков является *диспергирование расплавов*.

Диспергирование расплавленного металла или сплава струей сжатого газа, жидкости или механическим способом позволяет получать порошки, называемые *распыленными*. Процесс характеризуется высокими производительностью, технологичностью, степенью автоматизации и сравнительно малыми энергозатратами, экологически чистый. Промышленное производство порошков в нашей стране составляет в соотношении 4-5 : 1 в пользу распыленных порошков.

В настоящее время метод распыления широко используют для получения не только порошков железа, сталей и других сплавов на основе железа, но и порошков алюминия, меди, свинца, цинка, тугоплавких металлов (титана, вольфрама и др.), а также сплавов на основе этих цветных металлов. Распыление весьма эффективно при получении порошков многокомпонентных сплавов и обеспечивает объемную равномерность химического состава, оптимальное строение и тонкую структуру каждой образующейся частицы. Это связано с перегревом расплава перед диспергированием, что приводит к высокой степени его однородности на атомарном уровне из-за полного разрушения наследственной структуры твердого состояния и интенсивного перемешивания, и кристаллизацией

дисперсных частиц с высокими скоростями охлаждения – от $10^3 - 10^4$ до нескольких десятков и даже сотен миллионов градусов в секунду.

Методы распыления металлического расплава различаются по виду затрачиваемой энергии (нагрев индукционный или косвенный, электродуговой, электронный, лазерный, плазменный и др.), виду силового воздействия на расплав при диспергировании (механическое воздействие, энергия газовых и водяных потоков, силы гравитационные, центробежные, воздействия ультразвука и т.д.) и по типу среды для его создания и диспергирования (восстановительная, окислительная, инертная или какая-либо иная среда заданного состава, вакуум).

Сущность получения металлических порошков из расплава заключается в нарушении сплошности его потока (струи или пленки) под действием различных источников возмущений с возникновением дисперсных частиц.

Центробежное распыление представляет собой один из основных видов диспергирования расплава. По методу вращающегося электрода распыление происходит в момент формирования расплава (Рисунок 5 – электрическая дуга, или электронный луч, плазма или другие источники энергии). Образовавшаяся на торце расходуемого электрода, вращающегося со скоростью 2000–20000 об/мин, пленка расплава толщиной 10–30 мкм под действием центробежных сил перемещается к его периферии и срывается с его кромки в виде частиц-капель преимущественно размером 100–200 мкм (увеличение диаметра расходуемого электрода и скорости его вращения приводит к уменьшению размера частиц-капель) Кристаллизация капель со скоростью охлаждения порядка 10^4 °C/сек происходит в атмосфере инертного газа.

При других схемах диспергирования (Рисунок 6) плавление металла проводят автономно, вне зоны распыления. Когда струю расплава подают на вращающийся со скоростью до 24000 об/мин диск, на его вогнутой поверхности образуется пленка жидкого металла, от которой затем отрываются капли-частицы преимущественно размером <100 мкм и кристаллизуются в атмосфере инертного газа со скоростью $10^5 - 10^6$ °C/сек.

В последнее время активно развиваются методы распыления расплавов, обеспечивающие очень высокие скорости охлаждения частиц. Один из вариантов, обеспечивающий затвердевание жидкой капли со скоростью $10^7 - 10^8$ °C/с, позволяет получать так называемые РИБЗ – (распыленные и быстрозакаленные порошки), когда на пути летящей капли устанавливают охлаждаемый экран под углом 15–45° к направлению ее движения; при ударе об экран капля перемещается по его поверхности и последовательно кристаллизуется в виде частицы пластинчатой формы.

На установке для сверхбыстрого охлаждения в вакууме или инертном газе (Рисунок 7, а) капли расплава 1 выдуваются аргоном из отверстия в графитовом тигле 2, находящемся в трубчатой индукционной печи 3, и попадают на медный крылообразный кристаллизатор 4, вращающийся со скоростью до 10^4 об/мин (встречная скорость движения капли и кристаллизатора до 500 м/с).

Высокоскоростное затвердевание расплава обеспечивает извлечение малых объемов металла кромкой быстровращающегося (2000–5000 об/мин) в вертикальной плоскости диска из высокотеплопроводного материала (Рисунок 6, б). При контакте с расплавом на кромке диска затвердевает некоторый слой металла, затем он выходит из расплава и охлаждается, после чего частица отделяется от кромки диска (скорость охлаждения 10^6 – 10^8 °C/с).

В любом случае методы распыления при кристаллизации капли расплава со скоростью более 10^6 °C/с приводят к получению порошков, частицы которых имеют аморфную структуру, придающую им чрезвычайно специфические свойства, позволяющие создавать уникальные материалы для различных отраслей техники.

Физико-химические способы получения порошков

Дадим краткую характеристику некоторым физико-химическим методам получения порошков.

1. Химическое восстановление:

а - восстановление происходит из оксидов и других твердых соединений металлов.

Этот способ является одним из наиболее распространенных и экономичных способов. В общем случае простейшую реакцию восстановления можно представить как:



где *Me* – любой металл, порошок которого хотят получать; *A* – неметаллическая составляющая восстанавливаемого соединения *MeA* (кислород, хлор, фтор, солевой остаток и др.); *X* – восстановитель; *Q* – тепловой эффект реакции.

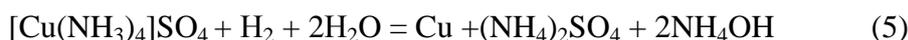
Восстановителями служат газы (водород, конвертированный природный газ и др.), твердый углерод (кокс, сажа и др.) и металлы (натрий, кальций и др.). Исходным сырьем являются окисленные руды, рудные концентраты, отходы и побочные продукты металлургического производства (например, прокатная окалина), а также различные химические соединения металлов.

Таким путем получают порошки Fe, Cu, Ni, Co, W, Mo, Ti, Ta, Zr, U и других металлов и их сплавов, а также соединений с неметаллами (карбиды, бориды и др.)

б - химическое восстановление различных соединений металлов из водных растворов.

Этот способ также является одним из самых экономичных способов, позволяющий получать высококачественные металлические порошки. Восстановитель – водород или оксид углерода. Исходное сырье – сернокислые или аммиачные растворы солей соответствующих металлов.

В качестве примера применения этого метода рассмотрим получение порошка меди. Медь может быть выделена восстановлением водородом как из кислых, так и щелочных растворов. Обычно используют раствор сульфата меди или медноаммиачной комплексной соли; реакции восстановления имеют вид:



Восстановление проводят при суммарном давлении газа 2,4–3,5 или 3,5–4,5 МПа и температуре 140–170 или 180–200°C, соответственно. Извлечение меди в осадок составляет около 99%. Скорость процесса восстановления возрастает с увеличением количества суспендированной меди.

Химическая чистота порошков, полученных таким способом, высокая (99,7–99,9% Cu, <0,1% O₂, <0,01% Fe), а себестоимость меньше себестоимости электролитических порошков меди. Форма частиц может быть самой разнообразной: дендритной, округлой и др. Таким путем получают порошки Cu, Ni, Co, Ag, Au.

в - химическое восстановление газообразных соединений металлов.

Порошки металлов высокой чистоты можно получить из низкокипящих хлоридов и фторидов вольфрама, молибдена, рения, ниобия или тантала по реакции:



где Γ – хлор или фтор.

Для получения высокодисперсных порошков металлов или их соединений (карбидов, нитридов и др.) перспективны плазмохимические методы. Восстановителем служит водород или углеводороды и конвертированный природный газ. Низкотемпературную (4000–10000°C) плазму создают в плазмотроне электрической дугой высокой интенсивности, через которую пропускают какой-либо газ или смесь газов. В плазменной восстановительной струе происходит превращение исходных материалов в конденсированную дисперсную фазу. Метод используется для получения порошков тугоплавких металлов W, Mo, Ni.

2. Электролиз водных растворов или расплавленных солей различных металлов.

На катоде под действием электрического тока осаждают из водных растворов или расплавов солей чистые порошки практически любых металлов. Стоимость порошков высока из-за больших затрат электроэнергии и сравнительно низкой производительности

электролизеров. Таким путем получают из водных растворов – порошки Cu, Ni, Fe, Ag, а из расплавленных сред – порошки Ta, Ti, Zr, Fe.

3. Диссоциация карбониллов.

Карбонилами называют соединения элементов с CO общей формулы $Me_a(CO)_c$. Карбонилы являются легколетучими, образуются при сравнительно небольших температурах и при нагревании легко разлагаются.

В промышленных масштабах диссоциацией карбониллов производят порошки Ni, Fe, Co, Cr, Mo, W и некоторых металлов платиновой группы. Схематически карбонил - процесс идет по схеме:



В первой фазе по реакции (7) исходное сырье Me_aB_b , содержащее металл Me в соединении с балластным веществом B , взаимодействует с CO, образуя промежуточный продукт (**карбонил**). Во второй фазе карбонил металла при нагреве разлагается по реакции (8) на металл и CO.

Реакция (7) образования карбонила идет везде, где CO соприкасается с поверхностью металла в исходном сырье: снаружи твердого тела, в его трещинах и порах. В некоторых случаях возможно образование нескольких карбониллов.

Термическая диссоциация карбонила на металл и CO в большинстве случаев наступает при невысокой температуре. В первый момент появляются атомы металла и газообразные молекулы CO. Частицы порошка формируются в результате кристаллизации парообразного металла в два этапа: сначала образуются зародыши, а затем из них вырастают собственно порошинки различной формы, что является результатом адсорбции паров металла на поверхности каждого из зародышей.

Расширение производства карбонильных порошков существенно сдерживается их высокой стоимостью, так как они в десятки раз дороже восстановленных порошков аналогичных металлов.

4. Термодиффузионное насыщение.

Чередующиеся слои или смесь порошков разнородных металлов нагревают до температуры, обеспечивающей их активное взаимодействие. Получают порошки латуни, сплавов на основе хрома, высоколегированных сталей.

5. Испарение и конденсация.

Для получения порошка металл испаряют и затем конденсируют его пары на холодной поверхности. Порошок является тонкодисперсным, но содержит большое количество оксидов. Получают порошки Zn, Cd и других металлов с невысокой температурой испарения.

6. Межкристаллитная коррозия.

В компактном (литом) металле или сплаве при помощи химического травителя разрушают межкристаллитные прослойки. Получают порошки коррозионностойких и хромоникелевых сталей.

СВОЙСТВА ПОРОШКОВ И МЕТОДЫ ИХ КОНТРОЛЯ

Металлические порошки характеризуются *химическими, физическими и технологическими* свойствами. Основные характеристики порошков указывают в ГОСТах или технических условиях (ТУ).

Химические свойства

Химический состав порошка зависит от метода его производства, а также от степени чистоты исходных материалов. Химический анализ проводят по методикам, большинство которых аналогично применяемым при анализе состава литых металлов и сплавов. Содержание основного металла или сумма основных компонентов сплава в порошках составляет, как правило, не ниже 98–99%.

В металлических порошках содержится значительное количество газов (O_2 , H_2 , N_2 и др.), как адсорбированных на поверхности, так и попавших внутрь частиц в процессе изготовления или при последующей обработке. Большие количества газов увеличивают хрупкость порошков и затрудняют как прессование, так и спекание. Поэтому целесообразна обработка порошков, особенно высокодисперсных, в вакууме, что обеспечивает эффективное газоотделение.

Важными химическими особенностями порошков являются их токсичность и пирофорность (способность порошка к самовозгоранию при соприкосновении с воздухом). Практически все порошкообразные металлы оказывают вредное воздействие на организм человека, находящегося в контакте с ними, хотя в компактном состоянии большинство металлов безвредны. Пирофорность может привести к воспламенению порошка и даже взрыву. Особенно это относится к очень мелким порошкам Zr, Al, Mg, Fe, Co и некоторых других металлов. В связи с этим при работе с металлическими

порошками обязательно соблюдение специальных мер безопасности и личной гигиены.

Физические свойства

Форма частиц

В зависимости от метода получения форма частиц порошка может быть сферической (распыление), губчатой (восстановление), осколочной (измельчение в шаровых мельницах), тарельчатой (измельчение в вихревой мельнице), дендритной (электролиз), каплевидной (распыление). Первичная форма частиц может несколько видоизменяться при последующей обработке порошка (размоле, отжиге, грануляции и др.). Для определения формы частиц используют оптические или электронные микроскопы.

Форма частиц существенно влияет на технологические свойства порошка, а также плотность, прочность и однородность свойств заготовок из него.

Размер частиц и гранулометрический состав

Металлические порошки представляют собой совокупность частиц размером от долей микрометра до миллиметра. Практически никогда не встречаются металлические порошки с частицами одного размера. Самый широкий диапазон по размерам частиц у порошков, получаемых восстановлением и электролизом. Количественное содержание массы частиц в определенных фракциях по отношению к общему количеству порошка называют гранулометрическим составом порошка. Его выражают обычно либо в виде таблиц, либо графически в виде кривой зернистости. В зависимости от крупности частиц для определения гранулометрического состава порошка используют ситовый, микроскопический и другие виды анализа.

Удельная поверхность

Удельная поверхность порошка представляет собой сумму наружных поверхностей всех частиц, имеющих в единице его объема или массы. Для металлических порошков характерна поверхность от 0,01 до 1 м²/г, хотя в отдельных случаях у очень мелких порошков она может достигать и значительно большей величины (например, 4 м²/г для высокодисперсного порошка вольфрама, 20 м²/г для порошка карбонильного никеля и др.).

Удельная поверхность влияет на поведение порошков при формовании и спекании. Она зависит от размера и формы частиц. Для измерения удельной поверхности порошка применяют метод адсорбции или используют данные по газопроницаемости.

Сущность адсорбционного метода состоит в определении количества вещества, покрывающего поверхность частиц порошка плотным мономолекулярным слоем. Наиболее широко применяют адсорбцию паров азота или криптона при низких температурах (-196°C) и метанола CH_3OH при комнатной температуре.

Более быстрым, но менее точным является определение удельной поверхности порошка по скорости фильтрации газа или жидкости через слой порошка, а также через пористый брикет. Методы основаны на существовании зависимости между удельной поверхностью и пористостью порошка (брикета) и скоростью потока, давлением и вязкостью газа (жидкости), протекающего через слой порошка (брикета).

Необходимо помнить, что реальная (действительная) поверхность частиц из-за их шероховатости всегда больше рассчитанной, исходя из габаритных размеров частиц.

Плотность

При анализе определяют истинную плотность частицы порошка, носящая название пикнометрической $\gamma_{\text{в}}$ г/см³, которая всегда несколько отличается от теоретической (рентгенографической) плотности вещества порошка. Это объясняется наличием в частицах порошка примесей, закрытой пористости, дефектностью кристаллической решетки и другими причинами.

Микротвердость

Микротвердость частицы порошка характеризует ее способность к деформированию, что важно для оценки возможного поведения порошка при формовании. Она в значительной степени зависит от содержания в частицах порошка различных примесей и искаженности кристаллической решетки.

При определении микротвердости измеряют диагональ отпечатка от вдавливания алмазной пирамидки с углом при вершине 136° под действием нагрузок 0,5 – 200 г в шлифованную поверхность частицы. Исследуемый порошок смешивают с бакелитом или оргцементом. Смесь прессуют в небольшие брикеты, которые затем нагревают для полимеризации наполнителя. Затем брикеты с одного из торцов шлифуют и полируют. Для измерения микротвердости используют приборы ПМТ-3 и ПМТ-5.

Технологические свойства

Насыпная плотность и плотность утряски

Насыпная плотность

$\gamma_{\text{нас}}$, г/см³,

есть объемная характеристика порошка, и представляет собой массу единицы его объема при свободной насыпке. Ее величина зависит от плотности упаковки частиц порошка при свободном заполнении ими какого-либо объема. Она тем больше, чем крупнее и более правильной формы частицы порошка и чем больше их пикнометрическая плотность. Наличие выступов и неровностей на поверхности частиц, а также увеличение поверхности в связи с уменьшением размера частиц повышает межчастичное трение, что затрудняет их перемещение относительно друг друга и приводит к снижению насыпной плотности.

Величину, обратную насыпной плотности, называют **насыпным объемом** $V_{\text{нас}}$, см³/г, который представляет собой объем, занимаемый единицей массы порошка при его свободной насыпке. Насыпная плотность порошка влияет на объемное дозирование и сам процесс формования, а также на величину **усадки при спекании** (чем меньше насыпная плотность, тем больше усадка).

При воздействии на свободно насыпанный порошок механических виброколебаний происходит уменьшение объема на 20–50%. Отношение массы порошка к величине этого нового, уменьшенного объема называют **плотностью утряски**. Максимальная плотность утряски достигается на порошках со сферической формой частиц при минимальной шероховатости их поверхности.

Текучесть

Текучесть порошка характеризует его способность с определенной скоростью вытекать из отверстий, что очень важно для рациональной организации процесса прессования: хорошая текучесть нужна для быстрого и равномерного наполнения **прессформы** при объемном дозировании порошка.

Текучесть выражают числом секунд, за которое 50 г порошка вытекает через калиброванное отверстие диаметром 2,5 мм конусной воронки.

Текучесть порошка обычно уменьшается, а время истечения возрастает при увеличении **удельной поверхности** и шероховатости частиц, а также усложнении их формы, так как при этом затрудняется относительное перемещение частиц. Окисление в большинстве случаев повышает текучесть порошка в связи с уменьшением коэффициента трения и сглаживания рельефа поверхности частиц. Значительно понижает текучесть влажность порошка.

Уплотняемость, прессуемость и формуемость

Уплотняемость порошка показывает его способность изменять начальную плотность укладки частиц в процессе прессования. Эта характеристика оценивается по плотности прессовок, изготовленных при давлениях прессования 200, 400, 500, 600, 700 и 800 МПа в цилиндрической прессформе. Массу навески порошка вычисляют по формуле:

$$m = 0,79d^3\gamma_k \quad (9)$$

где d – диаметр отверстия матрицы **прессформы**, см; γ_k – плотность материала порошка, г/см³. Данные по уплотняемости порошка представляют

в виде таблицы или графика зависимости плотности прессовок от усилия прессования.

Прессуемость порошка оценивают его способностью образовывать прессовку под воздействием определенного давления. Эта характеристика дает качественную оценку свойств порошка, комплексно связанную с уплотняемостью и формуемостью.

Формуемость порошка оценивает его способность сохранять приданную ему форму при прессовании в заданном интервале пористости. Эта характеристика порошка определяется при прессовании навески массой не менее 200 г. в прессформе с последующим определением границ (минимального и максимального значения) интервала пористости (плотности) при котором прессовки после извлечения из прессформы не осыпаются и не имеют расслоения. Формуемость порошка зависит от формы, размера и состояния поверхности частиц.

Хорошая прессуемость облегчает и удешевляет процесс формования порошка, а хорошо формующиеся порошки дают прочные неосыпающиеся формовки. Как правило, порошки с хорошей формуемостью обладают не очень хорошей прессуемостью, и наоборот. Чем выше насыпная плотность порошка, тем хуже формуемость и лучше прессуемость.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **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.
2. **Твердые сплавы:** пер. с нем. / Киффер Р., Бенезовский Ф. – М.: Металлургия, 1971. – 392 с.

3. **Производство порошковых изделий:** Учебник для техникумов. 2-е изд., перераб. и доп. Либенсон Г.А. – М.: Металлургия, – 1990. – 240 с.
4. **Кипарисов С.С., Либенсон Г.А.** Порошковая металлургия: Учебник для техникумов– 3-е изд. перераб. – М.: Металлургия, 1991. - 432 с.

Демонстрационный материал

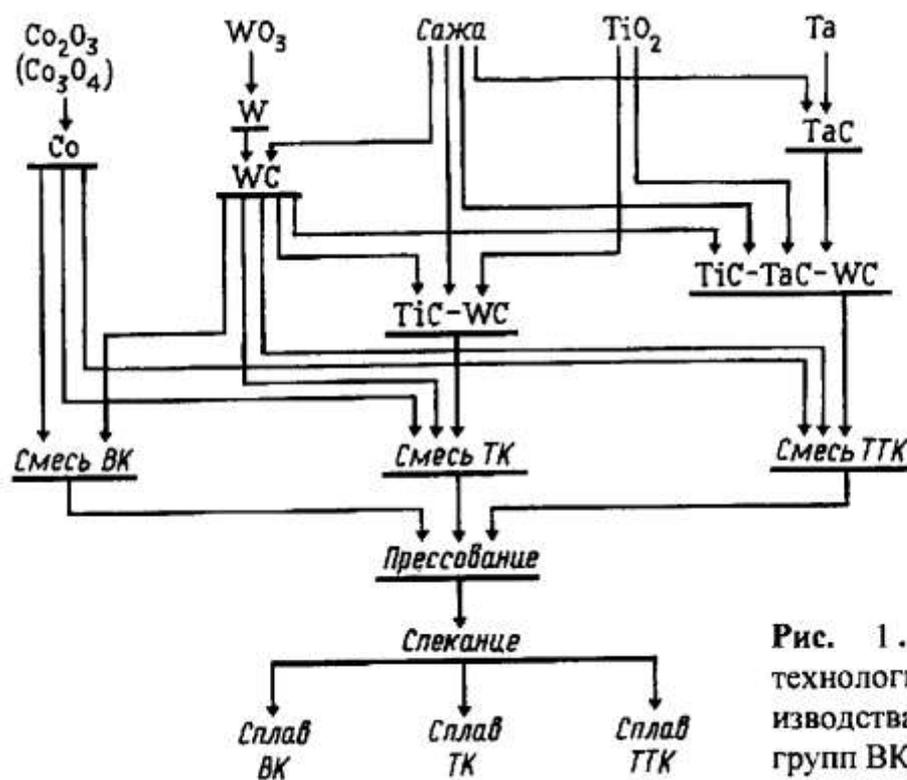


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема производства твердых сплавов групп BK, ТК и ТТК

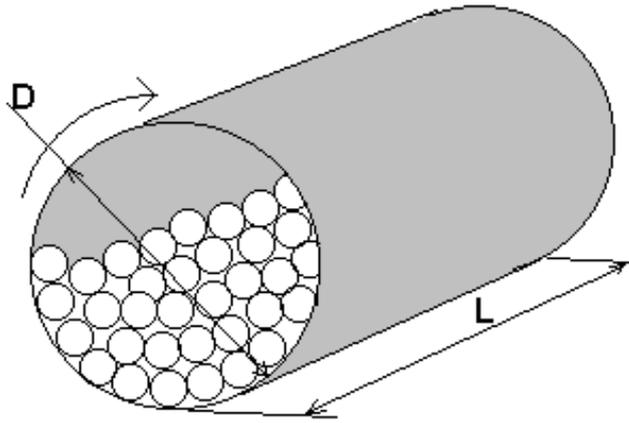


Рисунок 2 – Схема шаровой мельницы.

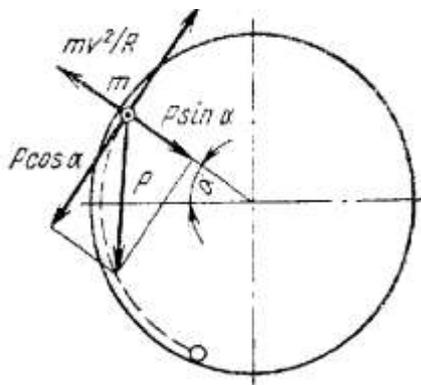


Рисунок 3 - Схема к расчету критической скорости вращения барабана шаровой мельницы

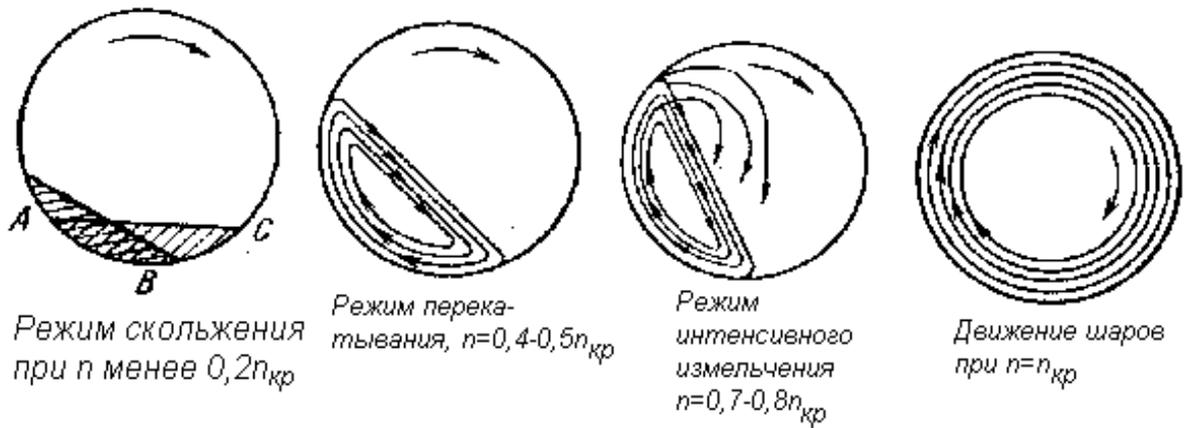


Рисунок 4 – Схемы движения размольных тел в шаровой вращающейся мельнице.

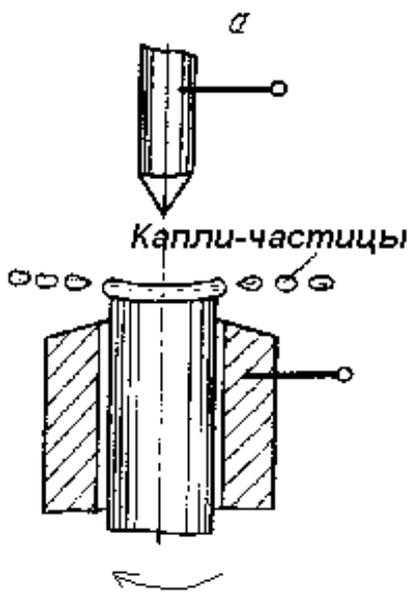


Рисунок 5 – Схема центробежного распыления расплава.

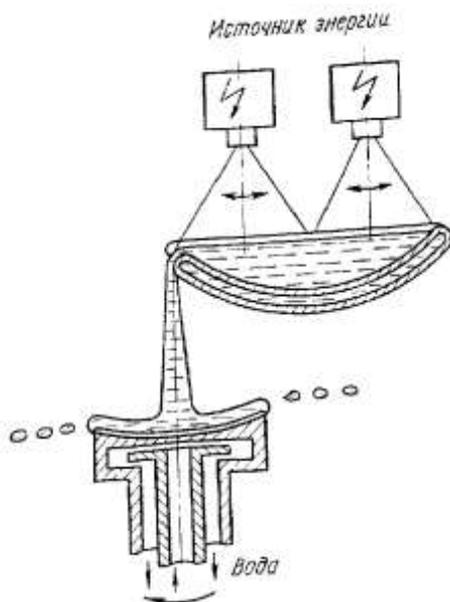


Рисунок 6 – Схема диспергирования при автономной подаче жидкого металла

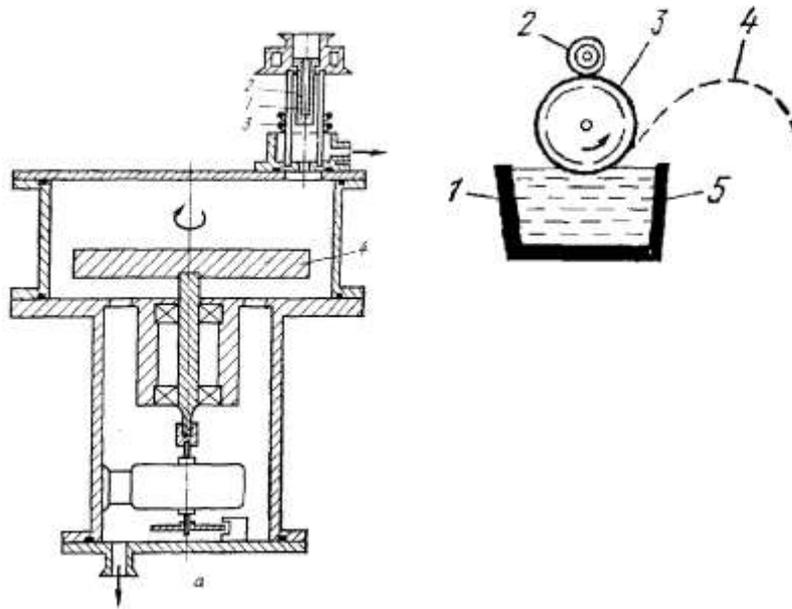


Рисунок 7 – Схема получения распыленных и быстрозакаленных порошков