

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Л.З. Галстян

Национальный политехнический университет Армении

В сложных условиях эксплуатации использование порошка может быть достигнуто только при достижении его абсолютной плотности в случае устранения всех типов пористости. Изостатическая концентрация и горячее изостатическое формование являются частично наиболее перспективными методами конденсации нерегулярно вытянутых порошков или частиц холодного прессования. В случае одновременного воздействия температуры и давления практически для всех твердых материалов можно достичь 100%-й или близкой к ней плотности. Другой способ получения абсолютной плотности обеспечивает горячее или холодное прессование после промежуточной подготовки порошка.

Обосновывается возможность применения горячей экструзии синтеза порошковых композиционных материалов на металлической основе. Экструзия обеспечивает получение беспористой структуры и совмещает процессы прессования и спекания, а высокие скорости формования полностью устраняют отрицательное взаимодействие матрицы и упрочняющей фазы. Выявлены механизмы и кинетика уплотнения, а также процессы структурообразования композиционных материалов и высокие механические свойства. Создание материалов и изделий с беспористой структурой является основополагающим направлением в области порошковой металлургии. Пористость представляет собой несплошность, т.е. структурный дефект, который не только существенно снижает прочностные свойства композиционного материала, но и вызывает ускоренное старение и коррозию. При горячей экструзии достигаются максимальные степени деформации ($\varepsilon=60...90\%$), тогда как при статическом и динамическом прессовании они не превышают 15...20%. Кроме того, процесс экструзии отличается сдвиговыми пластическими деформациями, вызываемыми действием девиаторных напряжений.

Ключевые слова: порошок, абсолютная плотность, экструзия, коэффициент растяжения, механические свойства, изостатическое прессование.

Введение. Доступная плотность деталей зависит от давления прессования (изостатическое прессование). В процессе уплотнения различается несколько этапов. Во время пластической деформации порошковые частицы увеличиваются, сглаживается контактная поверхность, оксидная пленка разрушается, и в результате механических сцеплений накапливаются порошковые частицы. При дальнейшем увеличении контактной поверхности усиливается влияние межчастичной адгезии. Частицы, у которых дальнейшая деформация исчерпана, разрушаются, и далее следует холодная сварка. У порошковых частиц механическое сцепление и холодная сварка частиц порошка зависят от поверхностных зон сдвига вследствие асимметричного приложения сил. Вот

почему легче получить более прочные прессованные заготовки из порошков с частицами неправильной формы, чем из порошков со сферическими частицами. Следовательно, твердость прессованных зависит от степени поверхностного наклепа, дисперсности порошковых частиц, наличия оксидных пленок, а также от свойств межзеренных границ. Одновременное действие этих факторов может привести к более высокой твердости соответствующих пластичных материалов.

Использование порошкового материала в условиях, требующих высоких эксплуатационных свойств, возможно только при достижении абсолютной его плотности, т.е. при устранении всех видов пористости.

При разработке порошковых материалов использованы различные методы. Большинство исследований велось в двух направлениях:

- непосредственное уплотнение порошка с достижением абсолютной плотности;
- предварительное формование порошка с последующей обработкой полученной заготовки давлением (т.е. с помощью процессов деформации) до абсолютной плотности.

Постановка задачи и обоснование методики. Целью работы является проведение сравнительного анализа технологических процессов получения высокопрочных композиционных материалов различными методами порошковой металлургии из многокомпонентных металлических порошков с уделением приоритетного внимания горячей экструзии.

Для достижения различной плотности материала применяют различные способы, такие как изостатическое прессование и обработка порошковых заготовок давлением.

Изостатическое прессование. Принципиальным недостатком прессования в пресс-формах является неоднородная плотность получаемых заготовок вследствие трения частиц порошка о стенки пресс-формы.

Изостатическое уплотнение и, в частности, горячее изостатическое прессование (ГИП) [1] - наиболее перспективный способ непосредственного уплотнения свободно насыпанных порошков или холоднопрессованных брикетов. Одновременным воздействием температуры и давления можно достичь 100%-й или близкой к ней плотности у большинства трудноподающихся к обработке материалов (рис. 1).

С устранением трения о стенки пресс-формы достигается не только равномерная по объему, но и более высокая плотность прессуемой детали, чем при прессовании в матрицах (рис. 2).

Для передачи давления при комнатной температуре пригодны масла, водные эмульсии. Прессуемый порошок засыпают в гидронепроницаемую оболочку и тщательно утрамбовывают. До закрытия оболочки из нее эвакуируют воздух, находящийся в засыпке, чтобы он (при приложении давления) не выделялся из

прессуемой заготовки и не приводил к образованию в ней трещин. Оболочки готовят из тонкой резиновой или высокополимерной фольги и закладывают в каркас из проволоочной ткани. Такой каркас придает заготовкам требуемую форму, не предъявляя высоких требований по размерам.

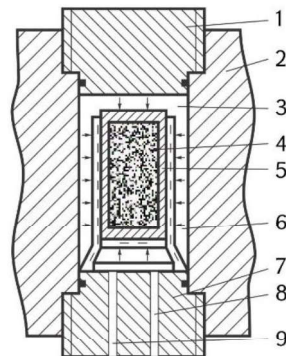


Рис.1. Схема изостатического прессования:

1 - верхний затвор; 2 - камера высокого давления; 3 - жидкость под высоким давлением; 4 - эластичная форма; 5 - засыпанный порошок; 6 - перфорированный короб; 7 - нижний затвор; 8 - ввод жидкости для создания высокого давления; 9 - слив жидкости [1]

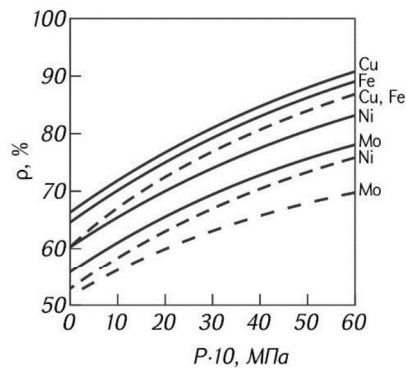


Рис. 2. Зависимость плотности r от давления p при обычном двустороннем (пунктирные линии) и изостатическом (сплошные линии) прессовании [2]

Изостатическое прессование рекомендуют для получения больших симметричных относительно оси вращения трубчатых деталей из труднопрессуемых порошков, например, нитрида кремния, оксидов, материалов на основе углерода, твердых сплавов, молибдена и вольфрама. Трубки и другие тела с полостями прессуют с помощью вставок из материалов с малой сжимаемостью (твердые сплавы) во избежание напряжений в заготовке после снятия давления. Вышеуказанные порошки изостатически прессуют и при получении крупных электродов дуговых печей (на современных установках можно изготавливать детали массой 1-2Т). Изостатическим прессованием получают также детали с

однородной структурой, небольшие инструменты из твердых сплавов и быстрорежущей стали. При повышенных требованиях к плотности такие детали дополнительно (после спекания) изостатически доуплотняют.

Для горячего изостатического прессования при температурах до 1700° С в агрегате монтируют нагреватель, в который помещают прессуемую заготовку. На нагревателе имеется слой теплоизоляции, чтобы стенки самого агрегата не слишком нагревались. Давление передается аргоном, подаваемым внутрь установки. Рабочее давление, достигающее 400 МПа, создается компрессором и является следствием нагрева в замкнутой камере.

Успешно поддаются горячему изостатическому прессованию специальные сплавы, композиционные материалы и тугоплавкие металлы. Улучшение свойств этих материалов связано с однородной структурой, изотропными свойствами и малыми размерами зерна, достигаемыми при горячем изостатическом прессовании.

Усилие, создаваемое при всестороннем изостатическом обжатии, дает дополнительную возможность повышения плотности. Напряжение сдвига, возникающее внутри брикета, можно выразить следующей формулой:

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2,$$

где σ_1 - напряжение, вызываемое усилием вдоль оси; σ_2 - напряжение, вызываемое изостатическим обжатием.

По существу, этот метод повышает показатели работы процесса; при изостатическом давлении 84 МПа и напряжении сдвига 210 МПа железная губка прессуется до относительной плотности 80%. Контролирующим механизмом уплотнения является перегруппировка частиц, вызванная наложением сдвиговых напряжений.

Прессованием и спеканием твердых сплавов нельзя избежать остаточной пористости (до 0,5...1%), в связи с чем затрудняется достижение нужной прочности при изгибе из-за влияния пор на образование трещин. Лишь после дополнительного уплотнения под давлением при 1300 ... 1400°С можно еще понизить остаточную пористость и одновременно заметно повысить прочность на изгиб (рис. 3).

Обработка порошковых заготовок давлением. Другой способ достижения абсолютной плотности предусматривает получение промежуточной пористой порошковой заготовки, затем ее уплотнение холодной или горячей обработкой давлением. Схема процесса показана на рис. 4.

Пористость промежуточной заготовки устанавливают в зависимости от степени последующей деформации; она может достигать 25% или же, наоборот, быть менее 1%.

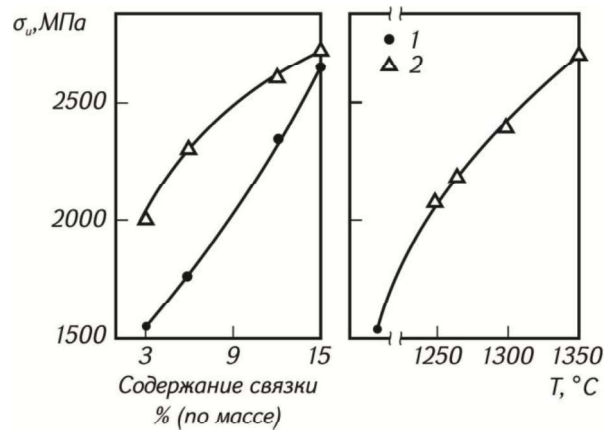


Рис.3. Влияние содержания связки ($t=1350^\circ\text{C}$) и температуры ГИП на прочность твердых сплавов: 1 - спеченные образцы; 2 - образцы после ГИП, $P=200$ МПа [3]

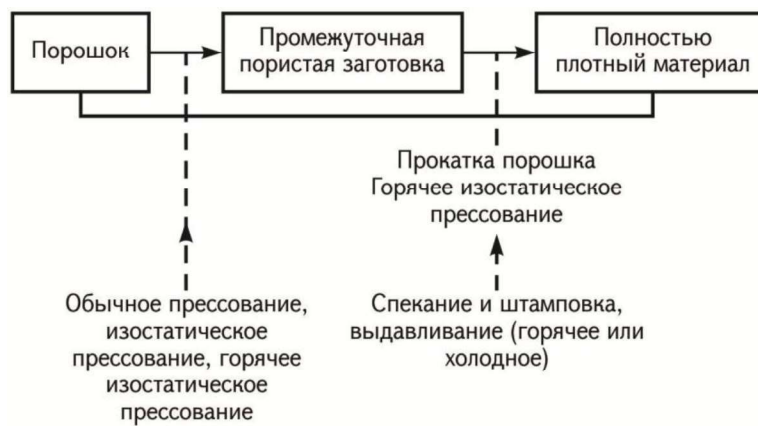


Рис. 4. Схема процесса получения высокоплотного материала с использованием промежуточной порошковой заготовки

Из различных видов обработки давлением чаще всего применяют штамповку, выдавливание (экструзия) или прокатку при нормальной или повышенной температурах.

В работе [3] изложены основные положения и результаты экспериментов по горячей экструзии металлокерамических материалов. В этой связи определенный интерес представляют исследования механических свойств титана и его сплавов, полученных различными способами (табл.).

Таблица

*Механические свойства титана и его сплавов, полученных
различными способами*

Составы	НВ, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	КС, кДж/м ²
1. Пирометаллургией (стандартные)					
BT1-1	1200... 1400	450...550	≥ 25	≥ 50	650
Ti -4%Al	2500	650	13	31	530
Ti-6%Al-4%V	3100	930	17	38	500
2. Порошковой металлургией (горячее прессование, ~ 1150...1200° С)					
Ti	1150	405	18	41	450
Ti-4%Al	2010	580	8	25	360
Ti - 6%Al - 4%V	2710	815	9	14	310
3. Порошковой металлургией (горячая экструзия, ~1150... 1200 °С, $\lambda = 4$)					
Ti	1420	550	35	55	670
Ti -4%Al	2580	690	14	36	560
Ti - 6%Al - 4%V	3160	950	15	35	520

Результаты исследования. Создание материалов и изделий с беспористой структурой ($\theta=0\%$) является основополагающим направлением в области порошковой металлургии. Пористость представляет собой несплошность, т.е. структурный дефект, который не только существенно снижает прочностные свойства и износостойкость материала, но и вызывает ускоренное старение и коррозию. Тем не менее объяснить различие механических свойств (особенно по ударной вязкости КСУ) только остаточной пористостью не совсем правомерно. Другой и весьма весомой причиной низкого уровня свойств спеченных материалов является недостаточное сращивание [4], определяемое параметром, получившим название минимальная степень деформации (МСД). Так, для сращивания (схватывания) металлов при комнатной температуре МСД составляет: Fe - 81%, Ni - 90%, Си - 80%, Al - 57% (при 377°С - 47%). Кроме МСД, важными критериями сращивания являются температура и продолжительность спекания, которые обеспечивают межчастичную металлическую связь и, следовательно, структурную консолидацию порошкового материала в целом.

При горячей экструзии достигаются максимальные степени деформации ($\epsilon=60...90\%$), тогда как при статическом и динамическом прессовании они не превышают 15...20%. Кроме того, процесс экструзии отличается сдвиговыми пластическими деформациями, вызываемыми действием девиаторных напряжений [5]:

$$f = \alpha J_1^2 + 3J_2 - \beta \sigma_s^2 = 0,$$

где α , β - функции пористости; J_1 - первый инвариант тензора напряжений; J_2 - второй инвариант девиатора напряжений.

При $\alpha=0$, $\beta=0$ критерий пластичности Куна и Дауни переходит в критерий Губера-Мизеса. Именно реализация этих факторов, т.е. высоких степеней деформаций и сдвиговых пластических деформаций, обеспечивает не только

получение беспористых структур, но и полное сращивание порошковых материалов при горячей экструзии.

Нами сформулировано условие получения беспористых (компактных, $\theta=0\%$) металлокерамических материалов и изделий при экструзии:

$$\lambda_{\text{кк}} \geq \exp \left[\frac{P_3}{K \cdot \sigma_{\text{вз}} e^{4mf\vartheta(1-\vartheta)}} \right].$$

Здесь P_3 - давление при экструзии; k - коэффициент, учитывающий сопротивление материала деформированию, численно равный 2,5...3,5; $\sigma_{\text{вз}}$ - прочность материала на разрыв при температуре экструзии; $m = L_k/D_k$, где L_k - длина (высота) заготовки, D_k - диаметр заготовки (контейнера); f - коэффициент трения заготовки о стенки контейнера; ϑ - коэффициент Пуассона материала заготовки.

Для каждого металла и сплава существует свое критическое значение $\lambda_{\text{кр}}$, при котором обеспечивается 100% -е компактирование пористой заготовки. При $\lambda_{\text{кр}} < \lambda_{\text{кр}}$ экструдированное изделие будет пористым, при $\lambda_{\text{кр}} \geq \lambda_{\text{кр}}$ - беспористым. Для черных и цветных металлов рекомендуется: $4 \leq \lambda_{\text{кр}} \leq 8$.

Заключение. Твердость прессования зависит от степени полученного наклепа, дисперсии порошковых частиц, наличия оксидной оболочки, а также от свойств промежуточной границы. Одновременное воздействие этих факторов может привести к более высокой твердости пластиковых материалов.

Горячую экструзию титана и его сплавов целесообразно сочетать со спеканием. Подтверждены оптимальные параметры горячей экструзии: температура $T=1100...1150^\circ\text{C}$, коэффициент экструзии $\lambda=4...6$, что позволяет получать беспористые титановые сплавы ($\theta=0\%$) с максимальными механическими свойствами.

Литература

1. Порошковая металлургия. Спеченные композиционные материалы / Под ред. **Б. Шатта**. -М.: Металлургия, 1983.-520с.
2. **Andrievsky R.A.** On the Temperature Dependence of Densification in Sintering // Science of sintering.-1984.-V.16, N1.-P.3-6.
3. Физика прочности волокнистых композиционных материалов с металлической матрицей / **М.Х. Шоршоров, Л.М. Устинов и др.**-М.: Металлургия, 1989. – 201 с.
4. **Петросян А.С.** Экспериментально-теоретические исследование процессов экструзии металлокерамического титана и его сплавов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2002. -Т.LV, N13.- С. 371-378.
5. **Манукян Н.В.** Порошковая металлургия на пороге 3000-летия.-Ереван: Тигран Мец, 2000.-208 с.

Поступила в редакцию 31.10. 2018.
Принята к опубликованию 26.12.2018.

**ԲԱՐՁՐՈՐԱԿ ՓՈՇԵԿՈՄՊՈԶԻՏՏՅՈՒՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԱՏԱՑՄԱՆ
ՓՈՇԵՄԵՏԱԼՈՒՐԳԻԱՅԻ ՄԵԹՈԴՆԵՐԸ**

L.Զ. Գալստյան

Շահագործման բարդ պայմաններում փոշենյութի օգտագործումը հնարավոր է միայն նրա բացարձակ խտությանը հասնելու, այսինքն՝ բոլոր տեսակի ծակոտիների վերացման դեպքում: Իզոստատիկ խտացումը և տաք իզոստատիկ մամլումը մասամբ առավել հեռանկարային եղանակներ են անկանոն լցոնված փոշու կամ սառը մամլված դետալների խտացման համար: Գրեթե բոլոր դժվար մշակվող նյութերի համար ջերմաստիճանի և ճնշման միաժամանակ ազդեցության դեպքում կարելի է հասնել 100% կամ դրան մոտ խտության: Բացարձակ խտության ստացման մյուս եղանակը նախատեսում է միջանկյալ փոշենախապատրաստվածքի ստացումից հետո տաք կամ սառը ճնշմամբ մշակում: Հիմնավորված է տաք արտամղման կիրառման հնարավորությունը տարբեր մետաղական հիմքերով կոմպոզիտային փոշենյութերի ստացման համար: Արտամղման գործընթացն ապահովում է անծակոտկեն կառուցվածքի ստացումը, համատեղելով մամլման և եռակլաման պրոցեսները, իսկ ձևավորման բարձր արագությունը լիարժեքորեն բացառում է մայրակ-ամրացնող ֆազ փոխազդեցությունները: Բացահայտված են ամրացման մեխանիզմը և կինետիկան, ինչպես նաև կոմպոզիտային նյութերի կառուցվածքագոյացումը և բարձր մեխանիկական հատկությունների ապահովումը: Այսպիսով, անծակոտկեն կառուցվածքով նյութերի և շինվածքների մշակումը համարվում է հիմնական ուղղություն փոշեմետալուրգիայի ոլորտում: Ծակոտկենությունը ստեղծում է անհամասեռություն՝ որպես կառուցվածքային արատ, որը ոչ միայն զգալիորեն իջեցնում է ամրային հատկությունները, այլև առաջ է բերում կոմպոզիտային նյութի ծերացում և կոռոզիա: Փոշեմետալուրգիայի հայտնի մեթոդներից միայն տաք արտամղման դեպքում կարելի է հասնել առավելագույն աստիճանի դեֆորմացման ($\epsilon=60\dots90\%$), այն դեպքում, երբ դինամիկ և ստատիկ մամլումների ժամանակ այդ արժեքները չեն գերազանցում 15...20%-ը: Բացի դրանից, տաք արտամղումը առանձնանում է սահքի պլաստիկ դեֆորմացումներով, որոնք առաջ են գալիս դեփիատորային լարումների ազդեցության տակ:

Առանցքային բառեր. փոշենյութեր, բացարձակ խտություն, արտամղում, ձգման գործակից, մեխանիկական հատկություններ, իզոստատիկ սեղմում:

**OBTAINING HIGH-QUALITY POWDER COMPOSITE MATERIALS BY THE
METHODS OF POWDER METALLURGY**

L.Z. Galstyan

In difficult operating conditions, the use of powder can be achieved only when its absolute density is achieved in the case of elimination of all types of porosity. Isostatic concentration and hot isostatic molding are partially the most promising methods for condensation of irregularly stretched powders or cold-pressed particles. In the case of simultaneous exposure to temperature and pressure for almost all solid materials, 100% or similar density can be achieved. Another method of obtaining absolute density provides hot or cold pressing after intermediate preparation of the powder.

The possibility of using hot extrusion of the synthesis of powder composite materials on a metal basis is substantiated. Extrusion provides a non-porous structure and combines the processes of extrusion and clumping, and the high velocities of molding completely eliminate the negative interaction of the matrix and the hardening phase. The mechanisms and kinetics of compaction, as well as the processes of structure formation of composite materials and high mechanical properties are revealed. The creation of materials and products with a non-porous structure is a fundamental direction in the field of powder metallurgy. Porosity is a discontinuity, i.e. structural defect, which not only significantly reduces the strength properties of the composite material, but also accelerates corrosion and ageing.

At hot extrusion, maximum degrees of deformation are achieved ($\varepsilon=60..90\%$), whereas with static and dynamic pressing, they do not exceed 15 ... 20%. In addition, the extrusion process is characterized by shear plastic deformations caused by the action of deviator stresses.

Keywords: powder, absolute density, extrusion, stretching ratio, mechanical properties, isostatic pressing.