

УДК: 621.762

DOI 10.21661/r-559449

Дин Кай Цзянь

**РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ НЕПРЕРЫВНОГО ФОРМОВАНИЯ
ИЗДЕЛИЙ ИЗ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Аннотация: в статье приведены основные результаты теоретического исследования процесса непрерывного формования ультрадисперсных порошковых материалов для получения длинномерных изделий с нанокристаллической структурой. В рамках гипотезы о сходстве напряженного состояния в сжимаемых и несжимаемых материалах в канале прессования установлено распределение напряжения вдоль канала прессования. При использовании уравнения Г.М. Ждановича с новыми граничными условиями найдено распределение плотности материала по длине канала прессования.

Ключевые слова: упрочнение, формализация, выбор, эксплуатационные требования.

Ding Kai Jian

**DEVELOPING THE THEORY OF CONTINUOUS PRESSING PRODUCTS
MADE OF ULTRA - DISPERSED COMPOSITE POWDER MATERIALS**

Abstract: in article there are discussed the basic results of theoretical investigating continuous ultra-dispersed powder materials pressing process for obtaining lengthy products with nano-crystal structure. Within the framework of the hypothesis about similarity under stress conditions in compressible and incompressible materials in the pressing channel, the pressure distribution along the pressing channel is established. Using G.M. Zhdanovich equation with new material density distribution boundary conditions along the length of the pressing channel is found.

Keywords: ultra-dispersed, powder, continuous, pressing, pressure, density.

Введение

В настоящее время существуют три основных направления получения объемных наноструктурных материалов: контролируемая кристаллизация аморфных материалов, компактирование ультрадисперсных порошков и интенсивная пластическая деформация материалов с обычным размером зерна [1].

Направление, связанное с компактированием ультрадисперсных порошков, развивается, главным образом, по двум вариантам. В первом случае используется метод испарения и конденсации атомов для образования нанокластеров, осаждаемых на поверхность вращающегося цилиндра в атмосфере разреженного инертного газа. В результате получают образцы диаметром 5...15 мм и толщиной 0,2...0,3 мм с плотностью 70...95% от теоретической плотности соответствующего материала [2]. Полученные компактные наноматериалы, в зависимости от условий испарения и конденсации, состоят из зерен со средними размерами от единиц до десятков нанометров. Создание из порошков плотных, близких к 100% теоретической плотности наноматериалов, до сих пор является сложной и не решенной проблемой. Нанокристаллические порошки плохо прессуются и традиционные методы статического прессования не дают результатов.

Другой способ связан с компактированием порошков, полученных способами механического измельчения и механического легирования [3]. Здесь также имеются проблемы компактирования получаемых нанопорошков и изготовления объемных наноструктурных изделий с высокой плотностью. Для получения компактных материалов с малой пористостью применяют метод горячего прессования одновременно со спеканием. В данном случае давление прессования снижается в десятки раз по сравнению с холодным прессованием. Температура горячего прессования в зависимости от природы спекаемого материала находится в пределах 50...90% от температуры плавления основного компонента. Однако повышение температуры компактирования приводит к быстрому росту зерен и выходу из наноструктурного состояния, а консолидация нанопорошков при низких температурах, даже в условиях высоких приложенных давлений, ведет к остаточной пористости.

Перечисленные выше способы компактирования ультрадисперсных порошковых материалов позволяют получать изделия с предельными размерами в несколько миллиметров. Наибольшее развитие в области нанотехнологий получили, главным образом, новые технологические процессы инженерии поверхностей, обеспечивающие значительное повышение эксплуатационных свойств изделий [4, 5]. На сегодняшний день не существует промышленной технологии изготовления изделий из композиционных порошковых материалов с объемной наноструктурой и размерами, необходимыми и достаточными для массового применения в промышленности.

В этой связи, наиболее актуальным направлением фундаментальных исследований становится разработка научных принципов создания и методов управления структурой и свойствами объемных нанокристаллических композиционных материалов различного функционального назначения. Разработка теории и технологии компактирования и формообразования изделий из нанокристаллических композиционных порошковых материалов распространяется на порошковые конструкционные, электротехнические, жаропрочные, жаростойкие, тугоплавкие, фрикционные, антифрикционные, капиллярно-пористые, эрозионно стойкие материалы, материалы для авиации, космоса и атомной энергетики.

Для получения объемных наноструктурных материалов высокой плотности необходимы способы, позволяющие в процессе формирования изделия генерировать интенсивные пластические или сдвиговые деформации. Для формирования изделий, близких к 100% теоретической плотности наноматериалов, высокие степени деформации должны быть локальными в объеме изделия и непрерывными в процессе его изготовления. Для крупногабаритных или длинномерных изделий с нанокристаллической структурой формообразующее воздействие на изделие должно иметь непрерывный характер.

Способ формования композиционных порошковых материалов, представленный на схеме (рис. 1), имеет предпосылки для создания интенсивных сдвиговых деформаций и получения изделий неограниченной длины.

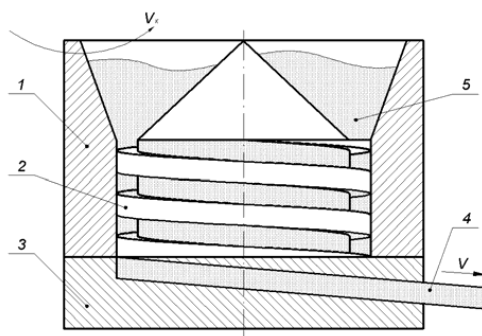


Рис. 1. Схема непрерывного формования порошковых материалов: 1 – корпус; 2 – оправка; 3 – матрица; 4 – изделие; 5 – порошковая композиция; V_k – скорость перемещения корпуса; V – скорость перемещения изделия

1. Классификация порошковых материалов в зависимости от соотношения коэффициентов внешнего и межчастичного трения.

Характер движения материала в канале оправки (далее, канал прессования) существенно зависит от вида канала и соотношения коэффициентов внешнего и межчастичного трения материала. В канале переменного сечения всегда будет иметь место сдвиговое течение материала. Поведение материала в канале постоянного сечения будет определяться соотношением коэффициентов внешнего и межчастичного трения.

В зависимости от соотношения коэффициентов внешнего и межчастичного трения формируемые материалы можно разделить на две группы.

1. Материалы, коэффициент внешнего трения которых больше коэффициента межчастичного трения.

2. Материалы, коэффициент внешнего трения которых меньше коэффициента межчастичного трения.

Экструзия материалов первой группы хорошо изучена и широко используется в промышленности. К ним относятся растворы и расплавы полимеров, растворы глин, пищевые массы, дисперсные текучие системы (суспензии, эмульсии, пасты и др.). Порошковая металлургия в этой группе материалов представлена пластифицированными порошковыми материалами, которые при температуре экструзии переходят в жидкое состояние. В основе математического описания

процессов деформации таких материалов лежит гидродинамическая теория течения. Одним из основных граничных условий гидродинамики является прилипание жидкости к поверхности твердого тела. И хотя известна разница между поведением смачивающих и несмачивающих жидкостей, но реальная шероховатость контакта нивелирует их поведение при течении. Поэтому для течения жидкостей характерна неоднородность скоростей в потоке.

Ко второй группе материалов относятся ультрадисперсные металлические порошковые материалы, а также композиции на их основе. Коэффициент межчастичного трения этих материалов намного больше коэффициента внешнего трения, что подтверждается экспериментально многими исследователями [6]. Поэтому поведение порошковых материалов в канале постоянного сечения под действием касательных напряжений трения будет принципиально отличаться от поведения жидкостей.

2. Основные допущения.

Теоретический анализ процессов, происходящих при прессовании порошков, сопряжен со значительными математическими трудностями и поэтому невозможен без принятия некоторых упрощающих допущений.

Первое – перемещение материала в канале постоянного сечения осуществляется без пластического течения.

Величина касательных напряжений внутри материала, находящегося в канале прессования, определяется величиной касательных напряжений на поверхности контакта материала с оправкой и корпусом. Поскольку коэффициент внешнего трения материала меньше коэффициента межчастичного трения, а канал имеет постоянное сечение, то величина касательных напряжений внутри материала не может превысить контактных касательных напряжений. В этих условиях перемещение материала в канале оправки будет происходить без сдвигового течения, подобно перемещению уплотняемого твердого тела.

Второе – уплотнение материала в канале оправки осуществляется преимущественно под действием напряжения, ориентированного вдоль канала.

Формование материала в канале сопровождается изменением его плотности от минимального значения в зоне загрузки, до максимального на выходе из канала прессования. Такой характер изменения плотности материала обусловлен действием силы сопротивления выдавливанию со стороны матрицы. В сравнении с изменением плотности материала вдоль канала прессования изменение плотности по сечению канала будет пренебрежимо мало. Исходя из этого, можно сделать предположение о том, что уплотнение материала в канале прессования происходит под действием напряжения, ориентированного вдоль канала.

3. Гипотеза о сходстве напряженного состояния в сжимаемых и несжимаемых материалах в канале прессования.

При наблюдении за процессом формования порошковых материалов в канале не установлено существенных различий в поведении сжимаемых и несжимаемых материалов. Это объясняется тем, что по мере перемещения сжимаемых материалов вдоль канала прессования их способность к изменению объема уменьшается и на выходе из канала становится минимальной. Т.е. свойства сжимаемых материалов, в частности плотность, при их перемещении к выходу из канала прессования приближаются к свойствам несжимаемых. Поскольку изменение плотности материала происходит под влиянием действующих в канале прессования напряжений, то сказанное выше может служить предпосылкой для принятия следующей гипотезы: напряженное состояние сжимаемых материалов в канале прессования подобно напряженному состоянию несжимаемых материалов.

4. Движение материала в канале прессования.

В соответствии с гипотезой о сходстве напряженного состояния сжимаемых и несжимаемых материалов анализ движения материала в канале оправки проведем для несжимаемого материала [7].

В системе координат, связанной с оправкой, план скоростей системы оправка-материал-корпус в произвольной точке А канала имеет вид, показанный на рис.2, где \bar{V} – скорость перемещения материала; \bar{V}_k – скорость перемещения корпуса; \bar{V}_{KM} – скорость перемещения корпуса относительно материала; φ – угол подъема винтовой линии оправки; α – угол между векторами \bar{V}_k и \bar{V}_{KM} .

Скорость перемещения материала \bar{V} направлена вдоль канала и по абсолютной величине меньше \bar{V}_k , так как в системе оправка-материал-корпус имеет место окружное проскальзывание материала относительно корпуса. О степени проскальзывания можно судить по величине коэффициента окружного проскальзывания

$$\eta = 1 - \frac{\omega}{\omega_K} = 1 - \frac{V}{V_K} \cos\varphi \quad (1)$$

где ω – угловая скорость материала;

ω_K – угловая скорость корпуса.

В принятой системе координат при полном окружном проскальзывании материала относительно корпуса $V = 0$ и $\eta = 1$.

Верхнюю границу изменения скорости перемещения материала можно определить из анализа плана скоростей. Поскольку скорость перемещения материала из-за окружного проскальзывания всегда меньше скорости перемещения корпуса, то треугольник скоростей (рис.2) не может быть равнобедренным. Угол между векторами \bar{V} и \bar{V}_{KM} должен принимать значения большие 90° , так как в противном случае проекция силы трения материала по корпусу на направление движения была бы равна нулю (угол $BCA = 90^\circ$) или имела бы направление противоположное движению материала (угол $BCA < 90^\circ$), что противоречит здравому смыслу.

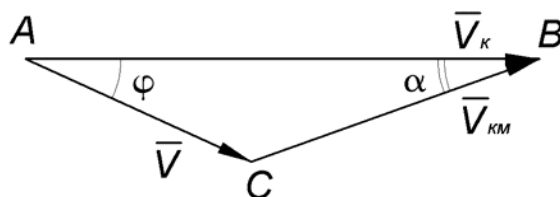


Рис. 2. План скоростей системы оправка-материал-корпус

Исходя из сказанного, диапазон изменения скорости перемещения материала в канале прессования определится следующим неравенством:

$$\theta \leq V > V_k \cos\varphi. \quad (2)$$

Нетрудно заметить, что при максимальных значениях скорости перемещения материала, т.е. когда $V \rightarrow V_k \cos\varphi$, коэффициент окружного проскальзывания

стремится к величине $\sin^2\varphi$. Таким образом, аналитически определен диапазон изменения скорости и коэффициента окружного проскальзывания материала.

5. Распределение плотности материала вдоль канала прессования

Высказанная ранее гипотеза о сходстве напряженного состояния в сжимаемых и несжимаемых материалах в канале прессования позволяет получить аналитические выражения для определения энергосиловых параметров процесса. Получено уравнение распределения напряжений в несжимаемом материале по длине канала прессования.

$$\sigma_z = p_0 e^{-AZ}, \quad (3)$$

где p_0 – давление на выходе из канала прессования; A – коэффициент, зависящий от соотношения коэффициентов внешнего и межчастичного трения ультрадисперсных порошковых материалов и геометрии канала прессования.

Для нахождения распределения плотности реального формуемого материала, т.е. сжимаемого вдоль канала прессования, необходимо теперь перейти от рассмотрения несжимаемых материалов к рассмотрению сжимаемых.

Согласно гипотезе о сходстве напряженного состояния в сжимаемых и несжимаемых материалах уравнение (3) будет справедливо и для сжимаемого материала.

Своеобразие рассматриваемого процесса непрерывного формования ультрадисперсных порошковых материалов состоит в том, что уплотнение материала в канале прессования осуществляется силами внешнего трения, среди которых преобладают активные. Под активной силой трения следует понимать такую силу, направление действия которой совпадает или имеет острый угол с направлением движения материала. Соответственно пассивной силой трения будем считать силу, направление действия которой противоположно или имеет тупой угол с направлением движения материала. Перемещение материала вдоль канала прессования и его уплотнение в процессе этого перемещения свидетельствует о преобладании активных сил трения над пассивными. Поэтому для уплотнения материала в канале прессования будет справедливым уравнение Г.М.Ждановича, выведенное для идеального процесса прессования (т.е. без учета сил пассивного трения) [8–11], в форме, удовлетворяющей граничным условиям:

при $\rho = \rho_l$, $\sigma = \rho_l g h$, где ρ – текущая плотность материала; ρ_l – плотность материала в зоне загрузки; g – ускорение свободного падения; h – глубина канала прессования.

$$\sigma = p_k \frac{\theta^n - \theta_l^n}{1 - \theta_l^n} + \rho_l g h \quad (4)$$

где p_k – давление, необходимое для получения компактного материала; θ – относительная текущая плотность материала; θ_l – относительная плотность материала в зоне загрузки; n – показатель степени.

Величина показателя степени n зависит от всех основных факторов, определяющих характер и особенности процесса прессования порошковых материалов, а его среднее «интегральное» значение составляет [8].

$$n = 1 + \frac{2}{1 - \theta_l} \quad (5)$$

Подставив в (4) уравнение (3) и преобразовав его, получим выражение для нахождения распределения плотности материала по длине канала прессования

$$\theta = \sqrt[n]{\left[\frac{p_0}{p_k} e^{-AZ} - \frac{\rho_l g h}{\rho_k} \right] (1 - \theta_l^n) + \theta_l^n} \quad (6)$$

Полученное выражение создает предпосылки для возможности формования изделий из ультрадисперсных порошковых материалов с заданной плотностью на выходе из канала прессования.

Список литературы

1. Григорьев С.Н. Современное вакуумно-плазменное оборудование и технологии комбинированного упрочнения инструмента и деталей машин / С.Н. Григорьев // Технология машиностроения. – 2004. – №3. – С. 20–26. – EDN PCZJNZ.
2. Черпаков Б.И. Тенденции развития технологического оборудования в начале XXI века / Б.И. Черпаков, С.Н. Григорьев // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2003. – №10. – С. 2–7. – EDN PCZJOJ.
3. Григорьев С.Н. Технологии нанообработки / С.Н. Григорьев, А.А. Грибков, С.В. Алешин. – Старый Оскол: ТНТ, 2008. – 320 с. EDN QYUHFH.
4. Андреев А.А. Технологические особенности получения композиционных наноструктурных покрытий вакуумно-плазменными методами / А.А. Андреев ,

В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев // Технология машиностроения. – 2005. – №7. – С. 47–52. – EDN PELAFJ.

5. Григорьев С.Н. Наноструктурные износостойкие покрытия, полученные методами физического осаждения вещества в вакууме / С.Н. Григорьев, А.А. Андреев, В.М. Шулаев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – №9. – С. 4–8. – EDN PVITLF.

6. Жданович Г.М. Теория прессования металлических порошков / Г.М. Жданович. – М.: Металлургия, 1969. – 264 с.

7. Красновский А.Н. Разработка технологии непрерывного формования изделий из порошковых материалов и композиций: автореф.т дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. / А.Н. Красновский. – 1990. – EDN QYVDWX.

8. Анциферов В.Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / В.Н. Анциферов. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с. – EDN TJNRXN.

9. Григорьев С.Н. Технология комбинированного поверхностного упрочнения режущего инструмента из оксидно-карбидной керамики / С.Н. Григорьев, М.А. Волосова // Вестник машиностроения. – 2005. – №9. – С. 32–36. – EDN HSHWPP.

10. Григорьев С.Н. Компактный источник пара материала проводящей мишени, распыляемой ионами с энергией 3 кЭв при давлении 0.05 Па / С.Н. Григорьев, Ю.А. Мельник, А.С. Метель [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – №5. – С. 127–133. – EDN KWIGTT.

11. Григорьев С.Н. Разработка технологии нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент на основе минералокерамики и кубического нитрида бора / С.Н. Григорьев, В.Г. Боровский // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2003. – №3. – С.5–6. – EDN ORIYEH.

Дин Кай Цзянь – канд. техн. наук, профессор, Технологический университет Китая, Китайская Народная Республика.

Ding Kai Jian – Candidate of Technical Sciences, Professor, Technological University of China. People's Republic of China.
