

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ ОТ УСИЛИЙ КОМПАКТИРОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ ЗАГОТОВОК

М.Н. Самодурова, Л.А. Барков, С.А. Мымрин, В.А. Иванов, Н.С. Джигун

Представлен анализ известных теоретических зависимостей плотности от усилий, выполненных отечественными и зарубежными учеными, и экспериментальных результатов для их оценки, полученных учеными Южно-Уральского государственного университета в промышленных условиях на порошках молибдена и вольфрама.

Ключевые слова: теоретические зависимости, плотность, усилие, порошки, молибден, вольфрам.

Теоретические зависимости

Уже в середине XX века в порошковых технологиях возникла потребность в теоретических зависимостях плотности порошковых заготовок от усилий их компактирования в пресс-формах. В тот период все порошковые материалы, а в первую очередь металлические порошки, относили к дискретным средам, и ученые пытались построить дискретно-контактную теорию формования порошков.

Первым такую зависимость для контактной теории дискретных сред в 1948 г. предложил известный русский ученый М.Ю. Бальшин [1, 2] в виде уравнения

$$\lg p = m \lg \bar{\rho} + \lg p_{\max}, \quad (1)$$

где p_{\max} – удельное усилие формования, необходимое для получения заготовки 100 % плотности; p – действующее удельное усилие формования; m – фактор формования; $\bar{\rho}$ – относительная плотность заготовки.

При выводе этой зависимости, основанной на анализе контактного взаимодействия частиц порошка, приняты следующие допущения:

а) упрочнение в процессе формования порошка отсутствует и удельное усилие формования на поверхности контакта порошка с пуансоном постоянно;

б) деформируемая среда в процессе формования описывается физическим законом Гука для упругой среды;

в) напряженное состояние прессуемой заготовки близко к схеме одноосного сжатия.

После М.Ю. Бальшина многие зарубежные и отечественные ученые также стали предлагать свои эмпирические зависимости для контактной теории, связывающие плотность заготовки с усилием формования в пресс-форме.

Среди них можно назвать немецких ученых [3, 4], известных чешских и английских ученых [5, 6]. Предложенные этими учеными зависимости подробно анализируются в капитальной монографии Г.М. Ждановича [7], активного приверженца «контактной теории» формования порошков. Г.М. Жданович полагает, что частицы порошка

представляют собой обособленные физические тела, подчиняющиеся законам статистической механики. С помощью этих законов Г.М. Жданович получил ряд зависимостей плотности прессовок от усилий формования порошков в пресс-формах. Вот одна из его зависимостей [7]:

$$p = p_{\max} \frac{\bar{\rho}^n - \bar{\rho}_n^n}{1 - \bar{\rho}_n^n}, \quad (2)$$

где $\bar{\rho}_n^n$ – относительная насыпная плотность порошка; n – фактор формования, подсчитываемый по формуле

$$n = 1 + \frac{2}{\Pi_n}, \quad (3)$$

где Π_n – пористость насыпки порошка.

Следует отметить, что дискретно-контактные представления о формовании порошков и получение на этой основе зависимости подробно анализируются в монографии украинских ученых [8].

Из этого анализа следует, что для перехода от контактного взаимодействия отдельных частиц друг с другом и описания процесса компактирования порошковых заготовок требуются специальные гипотезы.

М.Ю. Бальшин в качестве единичной частицы рассматривает конический пирамидальный твердый индентор, внедряющийся в более мягкую частицу, ограниченную плоской поверхностью. При этом определяются геометрические и силовые параметры взаимодействия указанных частиц, и строится основа контактной теории формования порошков [9]. Конечно, в настоящее время специалисту в области формования порошковых материалов очень трудно поверить в описанный механизм взаимодействия частиц при их компактировании и принять контактную теорию. Однако уравнение (1), выведенное М.Ю. Бальшиным в результате обработки экспериментальных кривых «давление–плотность» для целого ряда порошковых материалов достаточно точно описывает реальные процессы формования порошков. Это доказано учеными кафедры МиТОМД ЮУрГУ в результате выполнения большого объема экспериментальных исследований на порошках молибдена, выполненных в промышленных условиях [10–12].

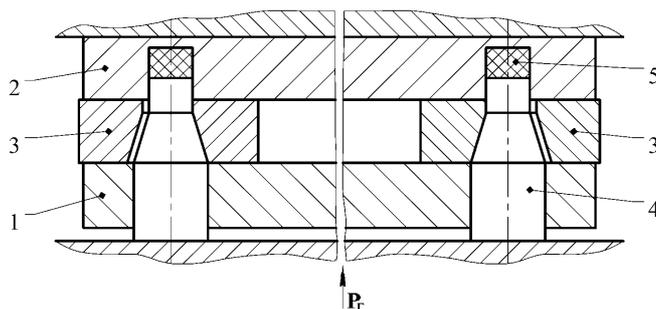


Рис. 1. Пресс-форма для прессования штабиков из порошка молибдена: 1, 2 – щеки пресс-формы; 3 – боковые пластины; 4 – пальцы; 5 – упругие элементы

Таблица 1

Параметры исследованных порошков

№ партии	Насыпная плотность $\rho_n, \text{т/м}^3$	Средний размер зерен по Фишеру $d, \text{мкм}$	Содержание примесей, не более, %				
			Fe + Al	Ni	Si	O ₂	Ca + Mg
1	1,104	4,10					
2	1,378	4,95	0,018	0,005	0,014	0,3	0,014
3	1,488	7,80					

Экспериментальные зависимости

Из порошков молибдена марки МЧ компактировали в холодном состоянии штабики сечением 18×18 мм и длиной 600 мм на промышленных гидравлических прессах специальной конструкции марки П-801 [13]. Такие штабики используются в качестве исходных заготовок после спекания для горячей обработки давлением, а полученная из них проволока применяется в электронной и других современных отраслях промышленности. В качестве технологической оснастки использовали промышленные пресс-формы, конструкции авторов исследования [14]. В собранном для засыпки порошка виде пресс-форма показана на рис. 1.

Сборка пресс-формы выполняется путем приложения горизонтальных усилий P_r от горизонтального плунжера специализированного пресса П-801. Прессование штабиков осуществляется за счет движения вертикального пуансона со скоростью 2,5 мм/с от усилия вертикального плунжера гидравлического пресса.

Основные параметры и содержание примесей в порошках молибдена марки МЧ разных партий даны в табл. 1. Значения насыпной плотности ρ_n варьировали намеренно с целью исследования ее влияния на плотность штабиков. Удельное давление прессования находилось в пределах от 200 до 315 МПа. Массу засыпки порошка для получения штабиков квадратного сечения определяли в зависимости от ρ_n и удельного давления прессования p .

Плотность прессованных штабиков измеряли специальным радиоизотопным измерителем плотности конструкции сотрудников предприятия [15].

По результатам исследований построена графическая зависимость относительной плотности штабиков от удельных давлений прессования.

Как видно из рис. 2, логарифмические функции $\lg p = f(\lg \bar{\rho})$ прямолинейны для всех исследованных значений ρ_n . Уравнение М.Ю. Бальшина достаточно точно описывает процесс холодного прессования штабиков молибдена. Графики на рис. 2 позволяют определить значения фактора m и удельного усилия p_{\max} в уравнении (1), равных соответственно тангенсу угла наклона прямой к оси $\lg \bar{\rho}$ и отрезку, отсекаемому этой прямой от оси $\lg p$.

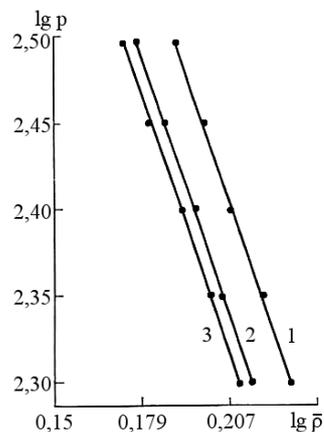


Рис. 2. Изменение относительной плотности штабиков от удельного давления прессования в логарифмических координатах для порошков молибдена с $\rho_n = 1,104 \text{ т/м}^3$ (1); $\rho_n = 1,378 \text{ т/м}^3$ (2); $\rho_n = 1,488 \text{ т/м}^3$ (3)

Значение фактора m оказалось постоянным и не зависящим от ρ_n , равным для всех случаев значению 5,29, а значения p_{\max} зависят от ρ_n и уменьшаются с увеличением значений ρ_n от 3119,1 до 2552,7 МПа.

Результаты экспериментальных исследований использовали также для подсчетов удельных уси-

Параметры порошка и процесса прессования штабиков длиной 503 мм

Параметры порошка		p , МПа	Усилие прессования, кН	Параметры штабиков, мм		Плотность штабиков, т/м ³
ρ_n , т/м ³	d зерна, мкм			Высота	Ширина	
4,29	3,25	441,62	2815,3	13,27	12,67	12,125
		500,50	3190,7	13,03	12,66	12,320
4,55	4,10	3,87,73	2439,9	13,17	12,70	12,238
		441,62	28,15,3	13,0	12,69	12,451
5,18	4,55	500,50	3190,7	12,80	12,69	12,640
		382,73	2439,9	12,94	12,67	12,527
5,18	4,55	441,62	2815,3	12,72	12,66	12,738
		500,50	3190,7	12,51	12,66	12,922

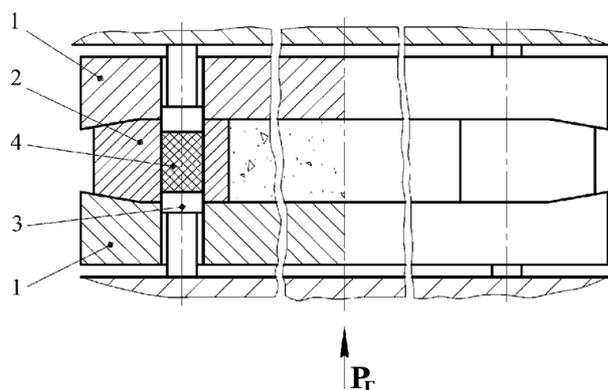
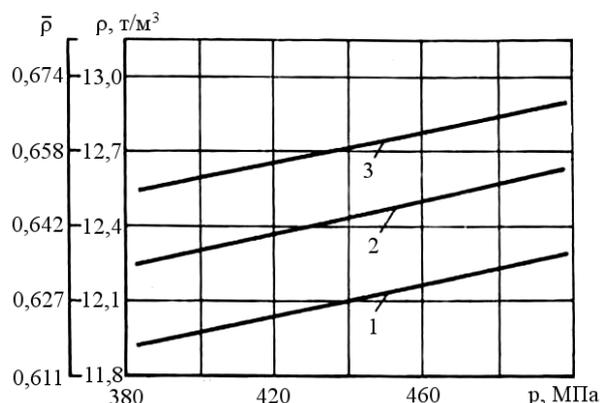


Рис. 3. Пресс-форма для прессования штабиков из порошков вольфрама: 1 – щеки; 2 – боковые пластины; 3 – пальцы; 4 – упругие элементы

Рис. 4. Зависимость плотности штабика от удельного давления прессования вольфрама марки ВЧ: 1 – $\rho_n = 4,29$ т/м³; 2 – $\rho_n = 4,55$ т/м³; 3 – $\rho_n = 5,18$ т/м³

лий прессования по уравнению К. Конопицкого, приведенного в источнике [3], уравнению С. Торре, приведенного в источнике [4], уравнению Агте–Петрдлика, приведенного в источнике [6]. Все эти уравнения дают удовлетворительные результаты только при малых значениях удельных усилий, в основном до 120 МПа.

В промышленных условиях порошок чистого молибдена марки МЧ прессуют при минимальных удельных усилиях, равных 200 МПа, а порошки гетерогенных марок молибдена типа МТ, МИ и МЛ требуют усилий прессования до 500 МПа [15].

По этой причине уравнения зарубежных ученых для подсчета плотности прессовок из молибдена при заданных усилиях использовать не следует.

Проверка зависимости Г.М. Ждановича (2) показала, что при заданных удельных усилиях получаются заниженные в два раза по сравнению с экспериментальными данными значения плотности.

Учеными кафедры МиТОМД ЮУрГУ на основе теории вероятности и результатов промышленного многофакторного эксперимента по компактированию порошка вольфрама марки ВЧ получено уравнение регрессии (4) [12], предназначенное для определения значения относительной плотности штабика $\bar{\rho}$ в зависимости от выбранного удельного усилия прессования p и относительной

насыпной плотности $\bar{\rho}_n$. Параметры порошка марки ВЧ и процесса прессования даны в табл. 2.

$$\bar{\rho} = 4,7054 + 0,00017p - 4,2872 e^{-0,1486 \bar{\rho}_n} \quad (4)$$

Штабики указанных размеров прессовали на специализированном промышленном гидравлическом прессе марки К25.033 с горизонтальным и вертикальным плунжерами [13]. В качестве технологической оснастки использовали разборную пресс-форму конструкции авторов публикации [12]. Общий вид этой пресс-формы по изобретению [16] показан на рис. 3.

На основе регрессионного уравнения (4) выполнены расчеты и построены графические зависимости плотности от давления для разных значений насыпной плотности, приведенные на рис. 4.

Таким образом, представлены полученные еще в 40–60 годы прошлого века учеными России и зарубежных стран зависимости плотности от усилий прессования порошковых заготовок и выполнена проверка их применимости в промышленных условиях прессования штабиков из порошков молибдена и вольфрама.

Исследования выполнены при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение 14.B37.21.0077.

Литература

1. Бальшин, М.Ю. Порошковое металловедение / М.Ю. Бальшин. – М.: Металлургиздат, 1948. – 332 с.
2. Бальшин, М.Ю. Порошковая металлургия / М.Ю. Бальшин. – М.: Машигиз, 1948. – 254 с.
3. Koporický, K. Radex-Rundschan / K. Koporický. – 1948. – P. 141–148.
4. Torre, C. Berg und Huttenmannische monatsh / C. Torre. – 1948. – P. 62–67.
5. Agte, C. Kurs praskove metallurgie / C. Agte, M. Petralik. – Praha, 1951. – 113 p.
6. Smith, G. Metal Industry / G. Smith. – 1948. – Vol. 72. – P. 427.
7. Жданович, Г.М. Теория прессования металлических порошков / Г.М. Жданович. – М.: Металлургия, 1969. – 264 с.
8. Феноменологические теории прессования порошков / М.Б. Штерн, Г.Г. Сердюк, Л.А. Макименко и др. – Киев: Наукова думка, 1982. – 140 с.
9. Бальшин, М.Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна / М.Ю. Бальшин. – М.: Металлургия, 1972. – 336 с.
10. Экспериментальная проверка зависимостей давление-плотность при прессовании молибденовых порошков / М.Л. Ямпольский, Л.А. Барков, С.А. Мыррин и др. // Металлы. – 1990. – № 5. – С. 72–74.
11. Исследование прессования штабиков из порошков молибдена / С.А. Мыррин, В.Э. Кузнецов, М.Л. Ямпольский и др. // Цветные металлы. – 1990. – № 8. – С. 98–100.
12. Мыррин, С.А. Экспериментальное исследование процесса холодного прессования штабиков из порошков вольфрама / С.А. Мыррин, В.Э. Кузнецов, Л.А. Барков и др. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1990. – № 9. – С. 15–18.
13. Оборудование для обработки давлением порошков и порошковых заготовок / под ред. Л.А. Баркова. – Челябинск: Металл, 1992. – 296 с.
14. А.с. 1694344 СССР, МКП³ В 22 F 3/02. Пресс-форма для прессования порошков / М.Л. Ямпольский, Л.А. Барков, С.А. Мыррин и др. (СССР). – № 4695811; заявл. 24.05.89; опубл. 30.11.91, Бюл. № 44. – 4 с.: ил.
15. Барков, Л.А. Обработка давлением молибдена и его сплавов / Л.А. Барков. – Челябинск: ЧПИ, 1986. – 89 с.
16. А.с. 1803261 СССР, МКП³ В 22 F 3/02. Пресс-форма для прессования изделий из порошков / Л.А. Барков, М.Л. Ямпольский, С.А. Мыррин. – № 4901425; заявл. 09.01.91; опубл. 23.03.93, Бюл. № 11. – 4 с.: ил.

Самодурова Марина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры машин и технологий обработки материалов давлением, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. Тел.: (351)2679224. E-mail: sm@susu.ac.ru.

Барков Леонид Андреевич, доктор технических наук, профессор кафедры машин и технологий обработки материалов давлением, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76.

Мыррин Сергей Александрович, кандидат технических наук, генеральный директор, НПО «ПРОМИН». 454008, г. Челябинск, Свердловский тракт, 38. E-mail: Promin@list.ru.

Иванов Василий Александрович, старший преподаватель кафедры машин и технологий обработки материалов давлением, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. E-mail: Vasilij.A.Ivanov@gmail.com.

Джигун Николай Сергеевич, студент кафедры машин и технологий обработки материалов давлением, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76.

Bulletin of the South Ural State University
Series "Metallurgy"
2013, vol. 13, no. 1, pp. 150–154

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL DEPENDENCES OF DENSITY ON THE FORCE OF COMPACTION OF POWDER BLANKS

M.N. Samodurova, L.A. Barkov, S.A. Myrmin, V.A. Ivanov, N.C. Dzhigun

The paper presents an analysis of existing theoretical dependences of density on the force of compaction and experimental results for their estimation obtained by the researchers of the South Ural State University in industrial conditions with the powders of molybdenum and tungsten.

Keywords: theoretical dependences, density, force, powders, molybdenum, tungsten.

Samodurova Marina Nikolaevna, candidate of engineering science, associate professor of the Machines and Technologies of Material Deformation Processes Department, South Ural State University. 76 Lenin avenue, Chelyabinsk, Russia 454080. Tel.: 7(351)2679224. E-mail: sm@susu.ac.ru.

Barkov Leonid Andreevich, doctor of engineering science, professor of the Machines and Technologies of Material Deformation Processes Department, South Ural State University. 76 Lenin avenue, Chelyabinsk, Russia 454080.

Mymrin Sergey Aleksandrovich, candidate of engineering science, general director, NPO "PROMIN". 38 Sverdlovsk road, Chelyabinsk, Russia 454008. E-mail: Promin@list.ru.

Ivanov Vasily Aleksandrovich, senior lecturer of the Machines and Technologies of Material Deformation Processes Department, South Ural State University. 76 Lenin avenue, Chelyabinsk, Russia 454080. E-mail: Vasilij.A.Ivanov@gmail.com.

Dzhigun Nikolay Sergeevich, student of the Machines and Technologies of Material Deformation Processes Department, South Ural State University. 76 Lenin avenue, Chelyabinsk, Russia 454080.

Поступила в редакцию 11 марта 2013 г.