

УДК 621.762

Попивненко Л. В.
Щасная К. О.

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПРОЧНОСТЬ ФОРМУЕМЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЗАКРЫТЫХ ПРЕСС-ФОРМАХ

Производство изделий из металлических порошков (порошковая металлургия) относится к наиболее прогрессивным технологиям машиностроения. Данная технология позволяет получать изделия с уникальными свойствами при минимальном количестве отходов. Этим объясняется быстрое развитие производства изделий из металлических порошков в последние годы [1–4].

К основным операциям технологии порошковой металлургии относятся [1]: подготовка порошков и порошковых смесей; формование порошков, в том числе, различными методами обработки давлением; спекание формовок для увеличения их прочности; дополнительная обработка (калибровка, пропитка маслами и другими материалами, термическая обработка, механическая обработка, и др.).

Прессование (формование) порошков применяют для придания заготовкам требуемой конфигурации и прочности, достаточной для их выталкивания из матрицы и транспортировки к печи спекания без разрушения [1, 2]. Прочность прессовок особенно важна для изделий тонкого сечения и при низкой плотности. Дополнительное повышение прочности неспеченных прессовок открывает новые возможности технологии порошковой металлургии. Так, в некоторых случаях, можно отказаться от последующего спекания, например, при изготовлении статоров микродвигателей и ряда магнитов. Увеличение прочности порошковых прессовок в некоторых случаях позволяет осуществлять их механическую обработку до спекания.

Практика показывает, что механическая обработка порошковых заготовок после спекания для ряда материалов (титан, твердые сплавы и т.д.) приводит к чрезвычайно высокому износу режущего инструмента. Этот эффект особенно ярко проявляется при обработке изделий с пористостью более 10% и является следствием прерывания процесса при попадании инструмента в поры, возникновения ударных нагрузок и вибрации [5].

Порошковые заготовки до спекания обладают чрезвычайно малым сопротивлением резанию. Поэтому износ режущего инструмента при обработке неспеченных прессовок является минимальным. В результате появляется возможность экономичного изготовления изделий сложной формы из порошков даже в случае применения простой штамповой оснастки и небольших производственных серий. Это особенно важно при изготовлении изделий с пористой поверхностью, например, фильтров, подшипников скольжения, медицинских имплантатов и др. [6]. Пористая поверхность определяет функциональные свойства таких изделий. Если их механическую обработку проводить после спекания, то пористая поверхность «замывается». Этот эффект не наблюдается при механической обработке до спекания.

Известно, что при прессовании изделий сложной формы возникает значительная неравномерность плотности в их объеме. Это приводит к повышенному искажению формы заготовок при спекании и неоднородности свойств получаемых изделий [7–9]. При прессовании заготовок простой формы (например, цилиндров) и последующем изготовлении из них механической обработкой изделий сложной формы, неравномерность плотности получается намного меньше. В результате искажение формы при спекании уменьшается, изделия получают более точными и с равномерно распределенными прочностными характеристиками.

Согласно данным источников [1–3] изделия из порошков принято подразделять на шесть классов сложности в зависимости от их геометрии (рис. 1).

Как следует из рис. 1 изделия первых трех классов (а–в) имеют относительно простую геометрическую форму. К более сложным относят изделия с двумя переходами по высоте

(буртики, дно, уступы) (см. рис. 1, г). К этому классу причисляют также детали, имеющие цилиндрическую форму с переходами и без, формирование которой не требует сложной оснастки. Изделия с тремя переходами по высоте, отрезками, тонкими элементами и глубокими поднутрениями относятся к наиболее сложным (рис. 1, д–е). Следует отметить, что ни один из классов сложности не предусматривает прессование изделий с отверстиями и замкнутыми поднутрениями, перпендикулярными к оси прессования. Примеры таких деталей показаны на рис. 2. Вышеуказанные элементы могут быть выполнены с применением механической обработки прессовок в неспеченном состоянии.

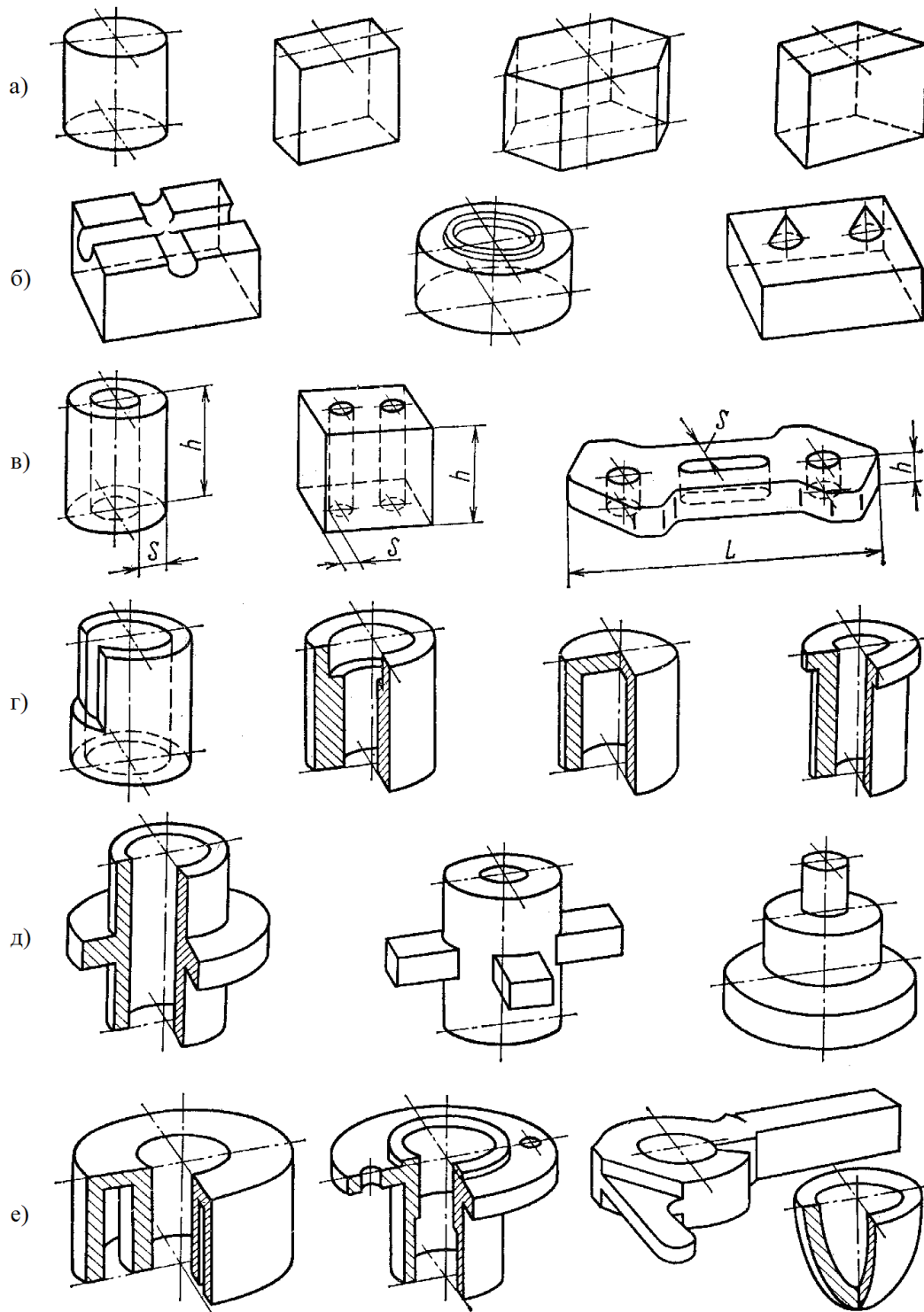


Рис. 1. Классификация порошковых изделий по группам сложности в зависимости от их геометрии

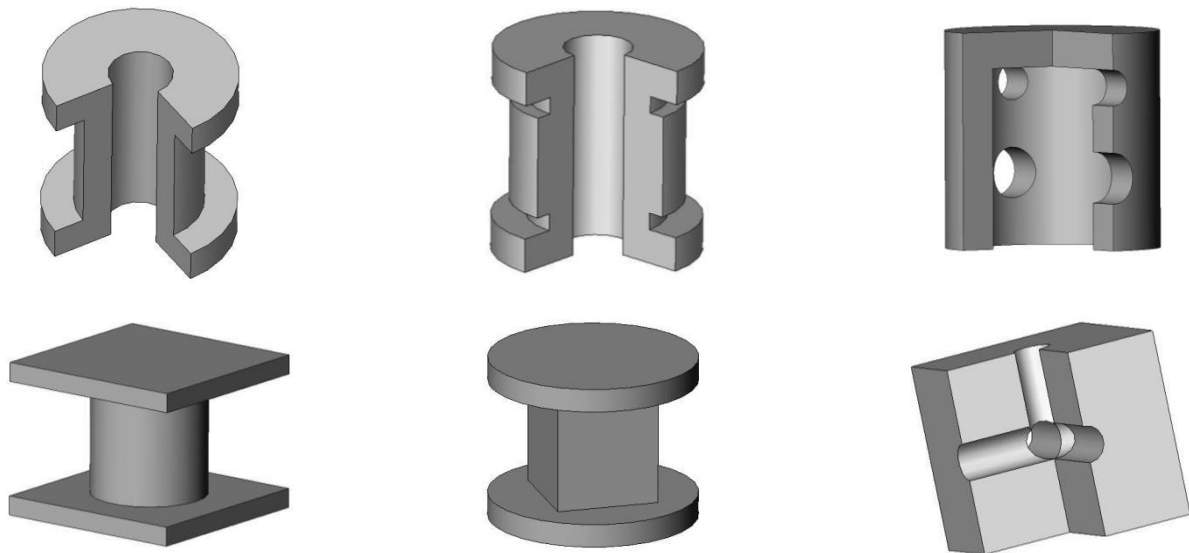


Рис. 2. Типичные представители изделий, которые сложно изготовить традиционными методами порошковой металлургии

Факторы, влияющие на возможность механической обработки неспеченных заготовок, в настоящее время еще мало изучены. Вместе с тем, очевидно, что на эту возможность большое влияние оказывает прочность неспеченных прессовок. Поэтому повышение прочности неспеченных прессовок является актуальной задачей, имеющей важное значение для технологии производства порошковых изделий. Однако в настоящее время ещё недостаточно исследованы процессы хрупкого разрушения порошковых прессовок. В частности, имеется лишь очень ограниченное количество работ, где делаются попытки предсказания хрупкого разрушения этих прессовок в процессах их обработки давлением [4; 10–13]. Вместе с тем, исследования в этом направлении чрезвычайно важны, так как позволяют обоснованно назначать технологические параметры и правильно конструировать штамповую оснастку.

Целью работы является анализ факторов, определяющих прочность формуемых порошковых материалов в закрытых пресс-формах.

Согласно современным представлениям, металлические порошковые материалы приобретают определенную прочность после прессования в результате холодной сварки частиц под давлением и механического зацепления частиц между собой. Считается, что зацепление частиц является главным механизмом при малых и средних степенях уплотнения, а холодная сварка частиц преобладает при высоких степенях уплотнения. С позиции этих представлений можно объяснить влияние различных технологических факторов на прочность неспеченных порошковых прессовок. К этим факторам относятся: форма и размер частиц, состояние их поверхности, химический состав материала порошка, давление и температура прессования, плотность прессовок, наличие и вид применяемой смазки и др. Рассмотрим влияние этих факторов.

Материал порошка. Материал порошка оказывает очень существенное влияние на прочность прессовок [14; 15]. Как показано в табл. 1, в общем случае прочность прессовок уменьшается с увеличением предела текучести и твердости материала порошка. Одновременно увеличивается давление необходимое для прессования до заданной плотности. Это связано с тем, что более прочные и твердые порошки хуже деформируются при прессовании и с трудом образуют межчастичные соединения [10].

Прочность прессовок из порошка заданного химического состава может существенно изменяться в зависимости от параметров технологии его получения. Это связано с тем, что характеристики порошка зависят от технологии его изготовления. В качестве примера рассмотрим данные для порошка меди, полученного путем восстановления сферического порошка оксида меди (табл. 2).

Таблица 1

Влияние материала порошка на прочность прессовок

Материал порошка	Предел текучести $\sigma_{0,2}$	Давление, необходимое для прессования до $\rho=0,8$	Прочность прессовок при $\rho=0,8$
	МПа	МПа	
Медь	62	204	38,2
Железо	124	358	14,2
Нержавеющая сталь 304L	207	484	6,34

Таблица 2

Характеристики медного порошка и прочность прессовок полученных из восстановленного сферического порошка оксида меди [16]

Температура восстановления порошка, °С	204	427	649	982
Насыпная плотность, г/см ³	3,62	3,60	3,67	4,18
Потери H ₂ , вес %	0,47	0,18	0,07	0,00
Удельная поверхность (ВЕТ), м ² /г	0,646	0,098	0,078	0,013
Внутричастичная пористость порошка, см ³ /г	0,0455	0,0467	0,0401	0,0243
Прочность прессовок при плотности 6,77 г/см ³ , МПа	3,94	1,79	1,93	0,20

Форма и размер частиц порошка. Поскольку прочность в значительной степени связана с механическим зацеплением и переплетением выступов и неровностей частиц порошка, форма частиц является одним из наиболее важных факторов, влияющих на прочность неспеченных порошковых прессовок [17]. Известно, что высокую прочность имеют прессовки из порошков с дендритной формой частиц. К ним относится, например, электролитические порошки меди и железа. Порошки с частицами сферической формы очень плохо прессуются и прессовки имеют низкую прочность. Обычно такие порошки получают распылением металлических расплавов струей газа. При распылении расплавов водой получаются порошки с частицами неправильной формы. Частицы неправильной формы имеют также порошки, полученные восстановлением оксидов. Прочность прессовок из таких порошков высокая. Порошки с чешуйчатой формой частиц (полученные при размоле в шаровых и вибромельницах) очень плохо прессуются, а полученные из них прессовки склонны к растрескиванию и расслоению [18]. Влияние способа изготовления, а, следовательно, и формы частиц порошка на прочность прессовок до спекания иллюстрирует рис. 3 [19].

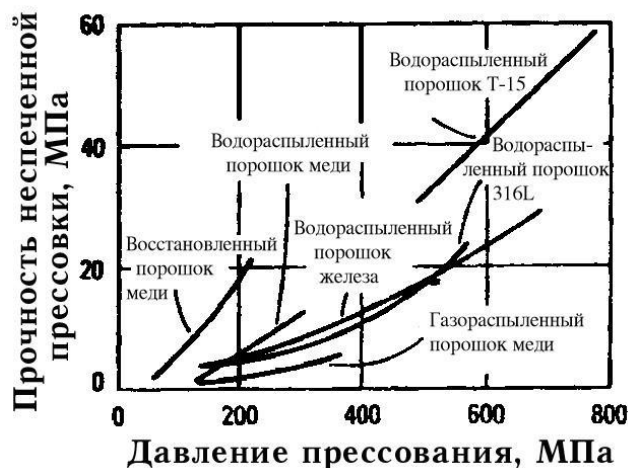


Рис. 3. Прочность неспеченных прессовок в зависимости от способа изготовления порошка

С уменьшением размера частиц порошка и увеличением площади их поверхности прочность прессовок, как правило, увеличивается [20]. В качестве примера, на рис. 4 приведены данные для электролитического порошка железа [21].

Как видно из рис. 4, с уменьшением размера частиц и увеличением площади их поверхности количество зацеплений между частицами при прессовании возрастает. Поэтому увеличивается и прочность неспеченных прессовок.



Рис. 4. Влияние размера частиц на прочность неспеченных образцов из электролитического порошка железа после изостатического прессования: 1 – грубый порошок: 100% – 42+100 меш; 2 – средний: 22% – 325 меш, 78% – 65+325 меш; 3 – тонкий порошок: 100% – 325 меш

Состояние поверхности частиц порошка. Значительное влияние на величину прочности прессовок оказывает состояние поверхности частиц порошка [17; 22]. Большинство металлических порошков покрыты тонким слоем оксидов, который возникает в процессе изготовления порошка или при его выдержке на воздухе. Влияние пленки оксидов на прочность прессовок зависит от того, разрушается ли эта пленка при прессовании или нет. Для порошков меди и железа оксидирование поверхности частиц приводит к существенному уменьшению прочности прессовок. Рис. 5 иллюстрирует уменьшение прочности для медного порошка. Вместе с тем он показывает, что прочность прессовок из порошка нержавеющей стали не зависит от оксидирования поверхности частиц. Оксидные пленки на этих порошках были созданы в результате низкотемпературного нагрева на воздухе.

С увеличением толщины оксидной пленки прочность прессовок уменьшается [33]. Сначала прочность резко падает, а затем стабилизируется на определенном уровне. Соответствующие данные для порошка меди показаны на рис. 6. Прочность прессовок резко уменьшается при увеличении толщины слоя до величины 200 Å, а затем уменьшение идет медленно и постепенно.

Давление прессования и пористость. С увеличением давления прессования и, следовательно, плотности прессовок, их прочность увеличивается [1–5]. Это связано с тем, что при росте давления деформация частиц увеличивается, и они прочнее сцепляются, а иногда и свариваются друг с другом. С другой стороны, наличие пористости в прессовке приводит к уменьшению части площади поперечного сечения образца, передающей напряжения при нагружении [8; 9]. Поры являются также концентраторами напряжений и источниками образования трещин [1]. Влияние давления на прочность прессовок иллюстрирует, например, рис. 4. Существуют различные зависимости, связывающие относительную плотность после прессования (ρ) и прочность порошковых прессовок при их сжатии или трехточечном изгибе (σ). Наиболее известные из них экспоненциальная зависимость Дакворта [23]:

$$\sigma = K_d \exp(m_d \rho), \quad (1)$$

и степенная зависимость Эдье [24]:

$$\sigma = K_e \rho^{m_e}, \quad (2)$$

где K_d и m_d , K_e и m_e – постоянные для данного порошкового материала;
 ρ – относительная плотность.



Рис. 5. Влияние поверхностных оксидных пленок на прочность прессовок из порошков меди и нержавеющей стали 316L [19]

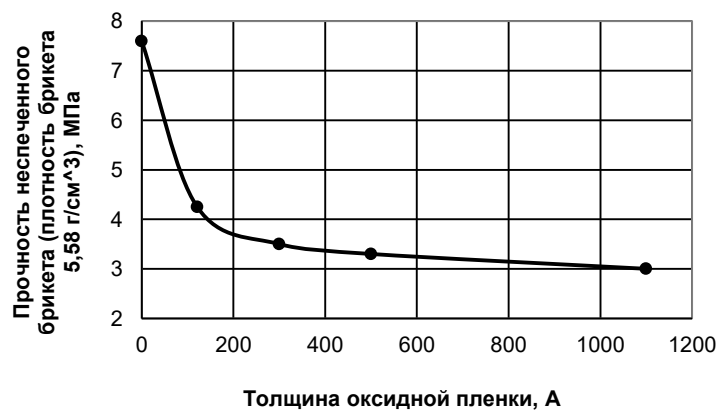


Рис. 6. Прочность поверхностно окисленного медного порошка [10]

Скорость и цикличность прессования. В литературе существуют противоречивые сведения в отношении влияния скорости прессования на прочность прессовок. Так, согласно данным, приведенным в источнике [16], прочность прессовок увеличивается при переходе от статического к динамическому прессованию. С другой стороны, согласно данным того источника, прочность прессовок увеличивается, если прессование осуществляется с меньшей скоростью. Данное противоречие можно объяснить следующим образом. При динамическом прессовании на контактных поверхностях частиц развиваются высокие температуры, способствующие их сварке. При более низких скоростях прессования преобладают эффекты типа кратковременной ползучести. В результате, зацепление частиц порошка становится лучше и прочность прессовок увеличивается.

Выдержка под давлением. Выдержка прессовки под давлением оказывает некоторое влияние на ее прочность в неспеченном состоянии (табл. 3).

Таблица 3

Влияние времени выдержки под давлением на прочность при трехточечном изгибе прессовок из порошка электролитической меди [16]

Давление	Прочность при изгибе, МПа	
	Без смазки	1 % смазки
Без выдержки	36	20
Выдержка 2 с.	38	21
Выдержка 5 с	40	22
Выдержка 10 с.	41	21
Выдержка 300 с.	42	21,5

По данным, представленным в табл. 3, можно сделать вывод о том, что прочность прессовок из порошка меди незначительно растет при выдержке в течение 5 секунд. Дальнейшее увеличение времени выдержки под давлением не оказывает значительного влияния на прочность. Увеличение прочности объясняется дополнительной деформацией частиц в результате кратковременной ползучести.

Температура прессования. Температура оказывает существенное влияние на прессуемость металлических порошков, а, следовательно, и на прочность получаемых прессовок [25]. С уменьшением температуры прессования пластичность порошков снижается, а прочность частиц увеличивается. В результате, при определенном давлении прессования плотность и прочность прессовок получаются ниже. Соответствующие данные для порошка меди приведены в табл. 4.

Таблица 4

Плотность и прочность прессовок из порошка меди при низкотемпературном прессовании [16]

Параметры прессования	Плотность, г/см ³	Прочность, МПа
Прессование при комнатной температуре	7,59	36
Прессование при 73 °С	7,34	28
Прессование с 1 % смазки при комнатной температуре	7,47	20
Прессование с 1 % смазки при 73 °С	7,15	7

В последнее время в промышленности получает распространение процесс теплового прессования порошков при температуре 130–150 °С. При нагреве, в результате некоторого снижения предела текучести материала порошка, плотность и прочность прессовок увеличиваются [25]. Следует отметить, что имеющиеся в литературе данные получены при прессовании определенным давлением. При этом плотность прессовок не является постоянной. Следовательно, до конца не ясно является увеличение прочности прессовок следствием повышения температуры прессования или следствием увеличения плотности. Для решения этого вопроса необходимы дополнительные исследования.

Вид и количество смазывающих добавок. Введение графита и большинства смазок уменьшает прочность прессовок значительно больше, чем это следует из правила смесей [4]. Отрицательный эффект смазок более выражен при высоких давлениях прессования. Физическая причина уменьшения прочности состоит в замене части контактов металл–металл на контакт металл–смазка [1]. Отметим, что снижение прочности прессовок в определенных пределах зависит от вида применяемой смазки. Поэтому при изготовлении изделий методами порошковой металлургии следует отдавать предпочтение смазке рабочих поверхностей инструмента по отношению к её непосредственному введению в порошок. Кроме того, следует тщательно выбирать тип смазки и не добавлять ее в большом количестве [19].

ВЫВОДЫ

Анализ литературных источников показывает, что на прочность неспеченных прессовок оказывают влияние многочисленные факторы, которые разделяют на четыре группы: геометрические, внутренние, технологические и факторы, относящиеся к поверхности частиц. При этом наиболее существенное влияние на прочность неспеченных прессовок оказывают технологические факторы (давление и температура прессования, скорость нагружения, время выдержки под давлением), от совокупного влияния которых зависит степень зацепления частиц друг с другом и количество образовавшихся за счет холодной сварки контактов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кипарисов С. С. Порошковая металлургия / С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1991. – 432 с. : ил. – ISBN 5-229-00754-0.
2. German R. M. Powder metallurgy Science / R. M. German. – Princeton : Metal Powder Industries Federation, 1994. – 472 p.
3. Никифорова Э. М. Теоретические основы, технология получения и свойства порошковых материалов / Э. М. Никифорова, О. А. Артемьева, А. Г. Верхотуров. – Красноярск : ИМП СФУ, 2009. – 304 с.
4. Герман Р. М. Порошковая металлургия от А до Я / Р. М. Герман ; пер. с англ. О. В. Падалко ; Г. А. Либенсона ; под. ред. О. В. Падалко. – Долгопрудный : Интеллект, 2009. – 336 с.
5. Powder Metallurgy Equipment Manual. – Princeton, NJ : MPIF, 1986. – 200 p.
6. Bram M. Endkonturnahe Bauteile mit funktioneller Porosität / M. Bram, A. Laptev, H. P. Buchkremer, D. Stöver // Konstruktion. – 2002. – Bd. 54, N 9, – S. IW3–IW4.
7. Григорьев О. Н. Моделирование процесса уплотнения порошка Al_2O_3 при горячем прессовании в жесткой матрице / Е. Е. Майборода, Ю. А. Панфилов, М. Б. Штерн // Порошковая металлургия. – 2003. – № 5/6. – С. 1–10.
8. Штерн М. Б. Численное моделирование процессов прессования порошковых изделий сложной формы в жестких матрицах : влияние схемы прессования на распределение плотности. I. Механическая модель влияния схемы прессования на распределение плотности / М. Б. Штерн, О. В. Михайлов // Порошковая металлургия. – 2002. – № 11/12. – С. 29–36.
9. Михайлов О. В. Численное моделирование процессов прессования порошковых изделий сложной формы в жестких матрицах : влияние схемы прессования на распределение плотности. II. Методика моделирования и анализ схем формования / О. В. Михайлов, М. Б. Штерн // Порошковая металлургия. – 2003. – № 3/4. – С. 7–16.
10. Klar E. On green strength and compressibility in metal powder compaction / E. Klar, W.N. Shafer // Modern Developments in Powder Metallurgy. – Princeton, NJ : MPIF. – 1977. – Vol. 9 – 560 p.
11. Portal G. Relationship between compaction pressure, green density, and green strength of powder compacts used in thermal batteries / G. Portal, E. Euvrard, P. Tailhades, A. Rousset // Powder Metallurgy. – 1999. – Vol. 42, № 1. – P. 34–40.
12. Lefebvre L. P. Improving iron compact green strength using powder surface modification / L. P. Lefebvre, Y. M. Henuset, Y. Deslandes, G. Pleiyier // Powder Metallurgy. – 1999. – Vol. 42. – P. 325–330.
13. Вяль Е. Ю. Разработка технологии прессования порошковых заготовок, обеспечивающих возможность их обработки в неспеченном состоянии : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Елена Юрьевна Вяль. – Краматорск, 2003. – 145 с.
14. Бальшин М. Ю. Основы порошковой металлургии / М. Ю. Бальшин, С. С. Кипарисов. – М. : Металлургия, 1978. – 184 с.
15. Григорьев А. К. Порошковая металлургия / А. К. Григорьев, Б. П. Грохольский. – Л. : Лениздат, 1982. – 144 с.
16. Handbook of Powder Metallurgy. – NY : Chemical Publishing Co. – 1982. – 604 p.
17. Klar E. On the nature of green strength / E. Klar, W.N. Shafer // International Journal of Powder Metallurgy. – 1969. – Vol. 5, № 2. – P. 5–10.
18. Ермаков С. С. Порошковые стали и изделия / С. С. Ермаков, Н. Ф. Вязников. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 318 с. : ил.
19. Metals Handbook 9th Edition, Vol. 7 Powder metallurgy. – Metals Park, OH : ASM, 1984. – 898 p.
20. Easterling K. E. The role of surface energy and powder geometry in powder compaction / K. E. Easterling, A. R. Thölen // Powder Metallurgy. – 1973. – Vol. 16, № 31. – P. 112–118.
21. Van Buren C. E. Hydrostatic pressing of powders / C. E. Van Buren, H. H. Hirsch // Powder Metallurgy. – NY : Interscience, 1961. – P. 403–441.
22. Zenger D. S. Advanced in powder metallurgy and particulate materials / D. S. Zenger, H. Cai. – Princeton, NJ : MPIF. – 1996. – Vol. 6. – P. 273–280.
23. Duckworth W. // Journal of American Ceramic Society. – 1953. – Vol. 36. – P. 68–75.
24. Eudier M. // Powder Metallurgy. – 1962. – Vol. 9. – P. 278–288.
25. Ермаков С. С. Влияние холодного и горячего статического и динамического прессования на структуру и свойства спеченных материалов / С. С. Ермаков, Г. Т. Резников // Порошковая металлургия. – 1977. – № 10. – С. 61–65.

REFERENCES

1. Kiparisov S. S. *Poroshkovaja metallurgija* / S. S. Kiparisov, G. A. Libenson. – 3-e izd., pererab. i dop. – M. : Metallurgija, 1991. – 432 s. : il. – ISBN 5-229-00754-0.
2. German R. M. *Powder metallurgy Science* / R. M. German. – Princeton : Metal Powder Industries Federation, 1994. – 472 p.
3. Nikiforova Je. M. *Teoreticheskie osnovy, tehnologija poluchenija i svojstva poroshkovyh materialov* / Je. M. Nikiforova, O. A. Artem'eva, A. G. Verhoturov. – Krasnojarsk : IMP SFU, 2009. – 304 s.
4. German R. M. *Poroshkovaja metallurgija ot A do Ja* / R. M. German ; per. s angl. O. V. Padalko ; G. A. Libensona ; pod. red. O. V. Padalko. – Dolgoprudnyj : Intellekt, 2009. – 336 s.
5. *Powder Metallurgy Equipment Manual*. – Princeton, NJ : MPIF, 1986. – 200 p.
6. Bram M. *Endkonturnahe Bauteile mit funktioneller Porosität* / M. Bram, A. Laptev, H. P. Buchkremer, D. Stöver // *Konstruktion*. – 2002. – Bd. 54, N 9, – S. IW3–IW4.
7. Grigor'ev O. N. *Modelirovanie processa uplotnenija poroshka Al₂O₃ pri gorjachem pressovanii v zhestkoj matrice* / E. E. Majboroda, Ju. A. Panfilov, M. B. Shtern // *Poroshkovaja metallurgija*. – 2003. – № 5/6. – S. 1–10.
8. Shtern M. B. *Chislennoe modelirovanie processov pressovanija poroshkovyh izdelij slozhnoj formy v zhestkih matricah : vlijanie shemy pressovanija na raspredelenie plotnosti. I. Mehanicheskaja model' vlijanija shemy pressovanija na raspredelenie plotnosti* / M. B. Shtern, O. V. Mihajlov // *Poroshkovaja metal-lurgija*. – 2002. – № 11/12. – S. 29–36.
9. Mihajlov O. V. *Chislennoe modelirovanie processov pressovanija poroshkovyh izdelij slozhnoj formy v zhestkih matricah : vlijanie shemy pressovanija na raspredelenie plotnosti. II. Metodika modelirovanija i analiz shem formovanija* / O. V. Mihajlov, M. B. Shtern // *Poroshkovaja metallurgija*. – 2003. – № 3/4. – S. 7–16.
10. Klar E. *On green strength and compressibility in metal powder compaction* / E. Klar, W.N. Shafer // *Modern Developments in Powder Metallurgy*. – Princeton, NJ : MPIF. – 1977. – Vol. 9 – 560 p.
11. Portal G. *Relationship between compaction pressure, green density, and green strength of powder compacts used in thermal batteries* / G. Portal, E. Euvrard, P. Tailhades, A. Rousset // *Powder Metallurgy*. – 1999. – Vol. 42, № 1. – P. 34–40.
12. Lefebvre L. P. *Improving iron compact green strength using powder surface modification* / L. P. Lefebvre, Y. M. Henuset, Y. Deslandes, G. Pleiyier // *Powder Metallurgy*. – 1999. – Vol. 42. – P. 325–330.
13. Vjal' E. Ju. *Razrabotka tehnologii pressovanija poroshkovyh zagotovok, obespechivajushhijh vozmozhnost' ih obrabotki v nespechenom sostojanii : dis. ... kand. tehn. nauk : 05.03.05* / Elena Jur'evna Vjal'. – Kramatorsk, 2003. – 145 s.
14. Bal'shin M. Ju. *Osnovy poroshkovej metallurgii* / M. Ju. Bal'shin, S. S. Kiparisov. – M. : Metallurgija, 1978. – 184 s.
15. Grigor'ev A. K. *Poroshkovaja metallurgija* / A. K. Grigor'ev, B. P. Grohol'skij. – L. : Lenizdat, 1982. – 144 s.
16. *Handbook of Powder Metallurgy*. – NY : Chemical Publishing Co. – 1982. – 604 p.
17. Klar E. *On the nature of green strength* / E. Klar, W.N. Shafer // *International Journal of Powder Metallurgy*. – 1969. – Vol. 5, № 2. – P. 5–10.
18. Ermakov S. S. *Poroshkovye stali i izdelija* / S. S. Ermakov, N. F. Vjaznikov. – 4-e izd., pererab. i dop. – L. : Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1990. – 318 s. : il.
19. *Metals Handbook 9th Edition, Vol. 7 Powder metallurgy*. – Metals Park, OH : ASM, 1984. – 898 p.
20. Easterling K. E. *The role of surface energy and powder geometry in powder compaction* / K. E. Easterling, A. R. Thölén // *Powder Metallurgy*. – 1973. – Vol. 16, № 31. – P. 112–118.
21. Van Buren C. E. *Hydrostatic pressing of powders* / C. E. Van Buren, H. H. Hirsch // *Powder Metallurgy*. – NY : Interscience, 1961. – P. 403–441.
22. Zenger D. S. *Advanced in powder metallurgy and particulate materials* / D. S. Zenger, H. Cai. – Princeton, NJ : MPIF. – 1996. – Vol. 6. – P. 273–280.
23. Duckworth W. // *Journal of American Ceramic Society*. – 1953. – Vol. 36. – P. 68–75.
24. Eudier M. // *Powder Metallurgy*. – 1962. – Vol. 9. – P. 278–288.
25. Ermakov S. S. *Vlijanie holodnogo i gorjachego staticheskogo i dinamicheskogo pressovanija na strukturu i svojstva spechennyh materialov* / S. S. Ermakov, G. T. Reznikov // *Poroshkovaja metallurgija*. – 1977. – № 10. – S. 61–65.

Попивненко Л. В. – канд. техн. наук, ст. преп. ДГМА

Щасная К. О. – магистр ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: mto@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 13.03.2017 г.