

УДК 621.762.04:621.762.073

Попивненко Л. В.
Руденко Н. А.**ПРЕССОВАНИЕ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЗАКРЫТЫХ
ПРЕСС-ФОРМАХ С КОНТРОЛИРОВАННЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ЗАЗОРА МЕЖДУ
ПУАНСОНАМИ И МАТРИЦЕЙ**

Среди разнообразных способов уплотнения порошковых материалов различного назначения наиболее распространенным является прессование в закрытых пресс-формах. Широкая применимость этого метода объясняется простотой реализации, высокой производительностью, легкостью механизации и автоматизации, возможностью использовать прессовое оборудование широкой номенклатуры, сравнительной простотой пресс-оснастки, а также высокой точностью получения неспеченных заготовок по форме и размерам (с учетом изменения размеров после выпрессовки и спекания), соответствующих готовым изделиям. В большинстве случаев изделия, спрессованные в закрытых пресс-формах, никакой дальнейшей механической обработке не подвергаются, а после спекания поступают либо в эксплуатацию, либо проходят дополнительную обработку в целях улучшения состояния поверхности, повышения точности по размерам или придания специальных свойств (термическую и химико-термическую обработку, пропитку и т. п.) [1–3].

Однако при всех своих преимуществах метод прессования порошковых материалов в закрытых пресс-формах имеет и недостатки. К ним относят:

- необходимость изготовления с высокой точностью и чистотой рабочих поверхностей деталей пресс-форм, что заметно увеличивает их стоимость;
- ограниченность получения деталей по форме и массе;
- неравномерное распределение пористости в прессовках, возникающее из-за действия внутренних и внешних сил трения;
- невозможность получения бездефектных прессовок при давлениях прессования выше 1000 МПа, так как при таких давлениях происходит усиление эффекта упругого последействия на этапе выпрессовки, что приводит к появлению на теле прессовок расслаивающих трещин и зон скола;
- при высоких давлениях прессования увеличивается величина абразивного износа рабочих поверхностей матриц и пуансонов.

Для большинства порошковых материалов, уплотняемых в закрытых пресс-формах, диапазон практически применяемых давлений прессования составляет 150–600 МПа, что позволяет получать неспеченные прессовки с остаточной пористостью порядка 40–10 %. Однако для получения высокопрочных спеченных материалов необходимо изготавливать прессовки с остаточной пористостью 4–2 %. Это вызывает необходимость увеличения давления прессования. При этом в исходную порошковую шихту с целью уменьшения сил трения необходимо добавлять смазочные материалы, что увеличивает себестоимость конечной продукции.

Кроме того, рост давления прессования вызывает увеличение упругой деформации матрицы в диаметральном направлении, которая после снятия давления обуславливает большую степень роста формовки внутри матрицы. Это может стать причиной разрыва контактов между частицами спрессованного материала, что в процессе выпрессовки приведет к образованию расслаивающих трещин, зон скалывания или разрушению прессовки.

На основании выше сказанного можно сделать вывод, что традиционные конструкции пресс-форм с неразъемными матрицами не позволяют осуществлять процесс компактирования порошковых материалов при давлениях прессования выше 800–1000 МПа. Особенно это касается низкопластичных и твердых порошковых материалов.

Разумным выходом из сложившейся ситуации является применение для прессования порошковой шихты пресс-форм нового конструктивного исполнения, что позволит получать бездефектные прессовки при давлениях выше 1000 МПа.

Целью данной работы является проверка возможности получать в закрытой пресс-форме с цельной матрицей бездефектные прессовки в диапазоне давлений прессования 50–1800 МПа. Для этого релаксация напряжений в теле прессовки, возникших в ней в процессе прессования, должна осуществляться не при выходе прессовки из матрицы, а внутри матрицы перед этапом выпрессовки. Такое технологическое решение потребует нового конструктивного исполнения пресс-формы. В рамках данной работы исследовалась справедливость принятого решения.

Исходные порошковые материалы. В качестве исходных материалов для экспериментальных исследований были использованы водораспыленный порошок железа, порошок меди, полученный электролитическим способом и порошок графита.

Порошок железа марки ПЖР 3.200.28 (ГОСТ 9849-86) был изготовлен на Броварском заводе порошковой металлургии (Украина) распылением расплава водой высокого давления. Частицы порошка имеют неправильную форму с многочисленными мелкими выступами.

Частицы электролитического порошка меди марки ПМС-1 (ГОСТ 4960-75) производства ОАО «Уралэлектромедь» (г. Верхняя Пышма, Россия) имеют выраженное дендритное строение.

Порошок графита марки ГК-1 (ГОСТ 4404-78) был получен на Завальевском графитовом комбинате (г. Завальевск, Украина) и имел следующие технические характеристики: массовая доля золы – не более 1 %; остаток на сетке № 0063 – не более 0,5 %. Частицы порошка имеют выраженную пластинчатую форму.

В табл. 1 и табл. 2 приведены данные по химическому составу использованных в экспериментах порошков железа и меди согласно сертификатам производителей.

Таблица 1

Химический состав порошка железа, использованного для экспериментов

Порошок	Содержание химических элементов, % от общей массы						
	Fe	C	Si	Mn	S	P	O
Железо водораспыленное	Осн.	0,026	0,029	0,08	0,02	0,02	0,36

Таблица 2

Химический состав порошков меди, использованных для экспериментов

Порошок	Содержание химических элементов, % от общей массы						
	Cu	Fe	Pb	Si	As	Sb	O
Медь электролитическая	Осн.	0,0018	0,05	–	0,003	0,005	0,3

Приготовление порошковых смесей. В качестве исходных материалов для приготовления порошковых смесей использовались выше описанные порошки железа, меди и графита. При составлении смесей содержание порошков железа, меди и графита изменялось по массе (Fe = 94,3 %, Cu = 5 %, C = 0,7 %). Такое содержание компонентов в смеси системы железо – медь – графит принято на основании анализа данных литературных источников в Украине по вопросам конструкционных спеченных материалов [1, 4]. Смесь указанного состава, используется при производстве шестерен [1].

Массы навесок порошковых компонентов определяли исходя из массы испытуемых образцов и требуемой их пористости по формуле:

$$m_i = m_{см} X_i, \quad (1)$$

где $m_{см}$ – масса порошковой смеси (образца), г; X_i – доленое содержание компоненты в смеси.

Массу образцов системы Fe–Cu–C рассчитывали по формуле:

$$m_{\text{см}} = V\rho_{\text{см}}K_1K_2K_{\text{П}}, \quad (2)$$

где V – объём образца (прессовки), см^3 ; $\rho_{\text{см}}$ – теоретическая плотность порошковой смеси, $\text{г}/\text{см}^3$; $K_1 = 1,005\text{--}1,09$ – коэффициент, учитывающий потери порошка при прессовании; $K_2 = 1,01\text{--}1,03$ – коэффициент, учитывающий потери порошка при спекании; $K_{\text{П}}$ – коэффициент плотности прессовки, определяемый по формуле:

$$K_{\text{П}} = 1 - \frac{\text{П}}{100}. \quad (3)$$

Объём прессовки подбирали таким образом, чтобы соотношение его высоты к диаметру не превышало единицы.

Плотность смеси системы Fe–Cu–C рассчитывали по формуле:

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\frac{X_{\text{Fe}}}{\rho_{\text{Fe}}} + \frac{X_{\text{Cu}}}{\rho_{\text{Cu}}} + \frac{X_{\text{C}}}{\rho_{\text{C}}}}, \quad (4)$$

где X_{Fe} – долевое содержание порошка железа в смеси по весу; $\rho_{\text{Fe}} = 7,86 \text{ г}/\text{см}^3$ – плотность железа; X_{Cu} – долевое содержание порошка меди в смеси по весу; $\rho_{\text{Cu}} = 8,92 \text{ г}/\text{см}^3$ – плотность меди; X_{C} – долевое содержание порошка графита в смеси по весу; $\rho_{\text{C}} = 2,253 \text{ г}/\text{см}^3$ – плотность графита.

Смешивание порошков. Смешивание компонентов системы Fe–Cu–C выполняли в ручную. В качестве смесительной камеры использовали стеклянную банку емкостью 250 мл. С целью повышения однородности получаемых смесей, а также уменьшения пыления и ликвации графита при смешивании, в смеси добавляли 2 % керосина (по массе) [1]. Продолжительность смешивания составляла 30 минут. Объём смешиваемых компонентов составлял примерно 1/3 объёма банки. По окончании процесса смешивания все смеси просушивались при температуре 100 °С в печи в течение 60 минут. Сушка необходима для удаления керосина из смесей, так как его присутствие значительно ухудшает текучесть смесей, что вызывает трудности при засыпке смесей в матрицу. Полученная смесь имела визуально гомогенное распределение компонентов.

Прессование порошковой смеси. Для прессования навесок порошковой смеси системы Fe–Cu–C по рекомендациям источников [5–7] была разработана и изготовлена закрытая пресс-форма, элементы которой показаны на рис. 1. В качестве прототипа предлагаемого конструктивного решения была принята закрытая пресс-форма, конструкция и принцип работы которой описаны в работах [8, 9].

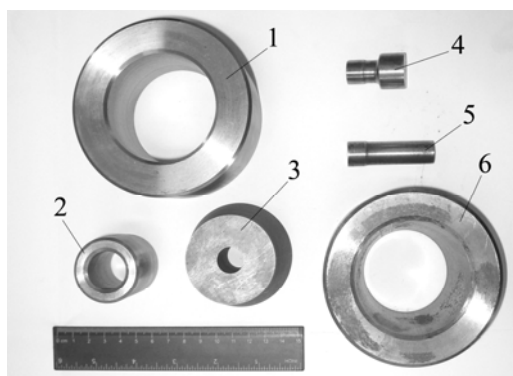


Рис. 1. Закрытая пресс-форма для прессования цилиндрических образцов по односторонней схеме нагружения:

1 – проставка; 2 – втулка нажимная; 3 – матрица с конической наружной поверхностью; 4 – пуансон нижний; 5 – пуансон верхний; 6 – бандаж

Конструкция пресс-формы, элементы которой показаны на рис. 1, позволяет осуществлять релаксацию напряжений, возникающих в теле прессовки в процессе прессования, внутри матрицы до начала этапа выпрессовки. С этой целью наружная поверхность матрицы и внутренняя поверхность зажимной втулки выполнены коническими, благодаря чему имеется возможность осуществлять напрессовку зажимной втулки на матрицу с целью создания контролируемого изменения зазора между соответствующими поверхностями пуансонов и матрицы. Величина изменения зазора устанавливается экспериментально в зависимости от свойств уплотняемого материала и потребного давления прессования.

На рис. 2 показаны этапы прессования цилиндрических образцов в закрытой пресс-форме новой конструкции.

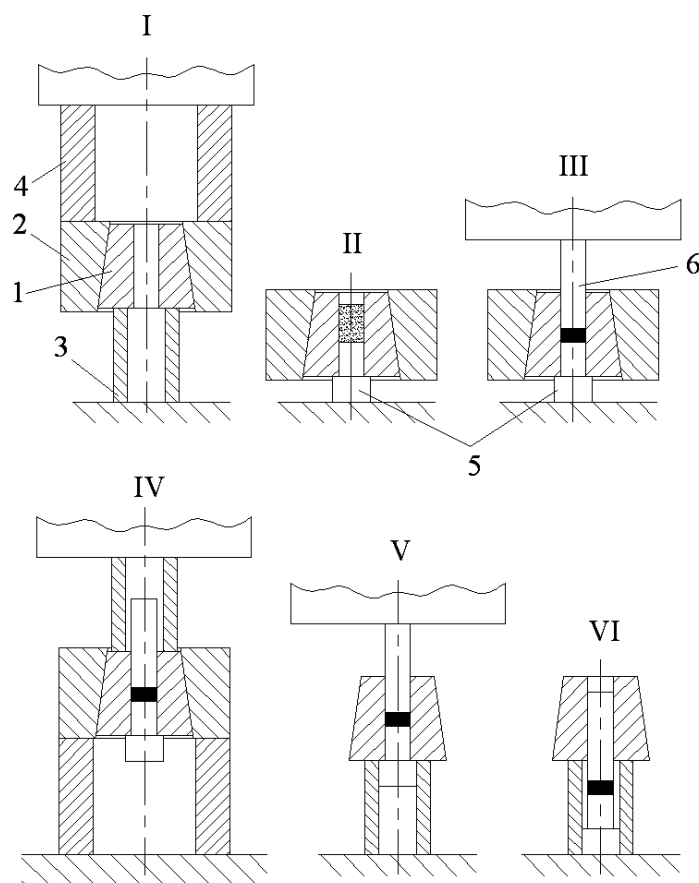


Рис. 2. Этапы цикла прессования порошковых материалов по односторонней схеме нагружения в закрытой пресс-форме с разъемными бандажом и матрицей:

I – зажим матрицы в зажимной втулке; II – засыпка шихты в матрицу; III – прессование; IV – выпрессовка матрицы из зажимной втулки; V, VI – выпрессовка образца; 1 – матрица коническая; 2 – втулка зажимная; 3 – втулка; 4 – проставка; 5 – пуансон нижний; 6 – пуансон верхний

Для сравнения возможностей новой и пресс-формы типовой конструкции прессование смеси указанного состава выполняли в первом случае с изменением зазора между пуансонами и матрицей, а во втором случае без изменения зазора, для чего при прессовании порошковой шихты зажимную втулку (см. рис. 2, поз. 2) не использовали.

Процесс уплотнения выполняли на гидравлической испытательной машине сжатия модели ПСУ-50 усилием 500 кН.

Анализ результатов экспериментов. Уплотнение порошковых навесок без применения смазки в диапазоне давлений 100–900 МПа с шагом 100 МПа позволило получить бездефектные прессовки при обеих схемах прессования. Однако при повышении давления прессования до 1000 МПа на прессовке, отпрессованной в закрытой пресс-форме по традиционной

схеме, появились расслаивающие трещины (рис. 3). При этом на образцах отпрессованных в пресс-форме новой конструкции никаких дефектов обнаружено не было. Отметим, что в процессе выпрессовки образцов из пресс-формы с регулируемым зазором между пуансонами и матрицей зафиксировать усилие выпрессовки по силовому индикатору испытательной машины не удалось. Это говорит о том, что усилие выпрессовки было крайне малым.

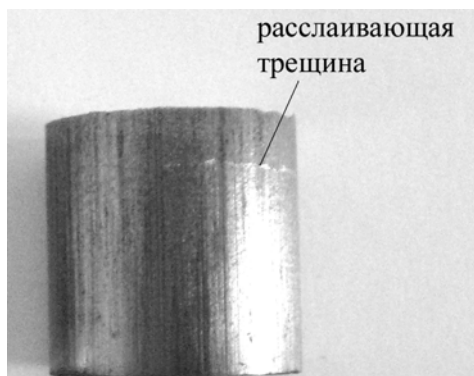


Рис. 3. Образец, отпрессованный в закрытой пресс-форме по традиционной схеме при давлении 1000 МПа без применения смазки

Поскольку появление расслаивающих трещин связано с величиной бокового давления на стенки матрицы пресс-формы, то с целью его уменьшения в уплотняемую смесь добавляли 0,5 % (по массе) стеарата цинка. Кроме того, стенки матрицы смазывали машинным маслом. Комбинированное применение смазок при уплотнении порошкового материала по традиционной схеме позволило получить бездефектную прессовку при давлении прессования 1000 МПа. Однако дальнейшее повышение давления до 1100 МПа привело к появлению на прессовке после её извлечения из матрицы зон скола (рис. 4), а в случае уплотнения при давлении 1200 МПа произошло полное разрушение прессовки (рис. 5).

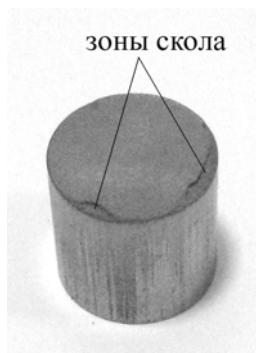


Рис. 4. Результат прессования в закрытой пресс-форме по традиционной схеме при давлении 1100 МПа с комбинированным применением смазок



Рис. 5. Результат прессования в закрытой пресс-форме по традиционной схеме при давлении 1200 МПа с комбинированным применением смазок

Таким образом, можно констатировать, что возможности уплотнения рассматриваемого материала по традиционной схеме нагружения при давлении прессования выше 1000 МПа даже при комбинированном применении смазок бесперспективно.

Отметим, что в диапазоне давлений прессования 1000–1200 МПа, в пресс-форме новой конструкции были получены бездефектные прессовки без применения смазок. С целью выявления возможности получения бездефектных прессовок в закрытой пресс-форме новой конструкции при более высоких давлениях было принято решение расширить диапазон давлений прессования до 1800 МПа. Во всех случаях усилие на прессовку зажимной втулки на матрицу составляло 85 кН, смазка не применялась. После прессования образцы спекали с образованием жидкой фазы при температуре 1150 °С. Время выдержки при этой температуре составляло 3 часа. Охлаждение образцов осуществляли вместе с печью. Для определения относительной плотности образцов их взвешивали и обмеряли соответственно до и после процесса спекания. Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты экспериментальных исследований

Давление прессования, МПа	Наличие дефектов	Усилие распрессовки матрицы, кН	Давление выпрессовки, образцов, МПа	Относительная плотность до спекания	Относительная плотность после спекания
900	нет	–	–	0,938	0,949
1000	нет	–	–	0,941	0,952
1100	нет	–	–	0,945	0,956
1200	нет	–	–	0,949	0,961
1300	нет	–	–	0,951	0,964
1400	нет	–	–	0,953	0,969
1500	нет	1	–	0,955	0,973
1600	нет	1,7	0,5	0,958	0,978
1700	нет	2	0,8	0,962	0,981
1800	нет	2,2	1	0,967	0,984

Из табл. 3 видно, что в рассмотренном диапазоне давлений прессования удалось получить бездефектные прессовки во всех случаях. При этом усилие выпрессовки изделия из матрицы удалось зафиксировать, лишь достигнув давления прессования 1500 МПа.

Кроме того, из табл. 3 видно, что для спеченных образцов, которые были получены при давлениях прессования выше 1500 МПа, удалось достичь плотности материала, которая после спекания стала близка к плотности компактных материалов. Возможно, увеличение времени выдержки при температуре спекания, позволит ещё больше повысить конечную плотность за счет «залечивания» остаточных пор. Однако в данной работе влияние времени выдержки при температуре спекания на достигаемую плотность образцов, спрессованных при давлениях выше 1500 МПа, не исследовалось. Следует отметить, что ограничение давления прессования величиной 1800 МПа, объясняется механическими свойствами материалов пуансонов и матрицы (сталь X12M). Применение более прочных материалов позволит увеличить давление прессования.

Таким образом, предлагаемый способ уплотнения в закрытой пресс-форме обеспечивает получение бездефектных неспеченных изделий в диапазоне давлений прессования 50–1800 МПа. Возможность осуществлять распрессовку зажимной втулки и матрицы перед

этапом выпрессовки позволяет разгрузить матрицу от упругих деформаций, что обеспечивает уменьшение давления выпрессовки в 50–70 раз. Предлагаемый цикл прессования порошковых материалов позволяет минимизировать применение смазок, не уменьшая абразивную стойкость рабочих поверхностей пуансонов и матриц, при этом номенклатура уплотняемых материалов может быть существенно расширена. Однако следует отметить, что описанная технология применима для получения только осесимметричных изделий простой формы.

ВЫВОДЫ

1. Предложена новая конструкция закрытой пресс-формы, которая предусматривает контролируемое изменение зазора между пуансонами и матрицей до начала этапа прессования и перед этапом выпрессовки, что позволяет уплотнять порошковые материалы в диапазоне давлений прессования 50–1800 МПа, при этом в применении смазок либо нет необходимости, либо их использование минимально.

2. Возможность осуществления релаксации напряжений, возникших в теле прессовки в процессе прессования, перед этапом выпрессовки позволяет уменьшить давление выпрессовки в 50–70 раз. Это способствует увеличению срока службы рабочих поверхностей матрицы и пуансонов за счёт уменьшения их износа в результате абразивного воздействия спрессованного материала на этапе выпрессовки.

3. Величину изменения зазора между пуансонами и матрицы пресс-формы необходимо подбирать экспериментально, исходя из свойств уплотняемого порошкового материала и потребного давления прессования.

4. Ограничение максимальной величины давления прессования зависит от механических свойств материала пуансонов и матрицы.

5. Оптимальное сочетание давлений прессования порошковых материалов и режимов спекания позволит получать материалы, плотность которых близка к плотности компактных тел.

6. Предлагаемый технологический цикл уплотнения порошковых материалов в закрытой пресс-форме позволяет расширить номенклатуру изготавливаемых изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кипарисов С. С. Порошковая металлургия / С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон. – М. : Металлургия, 1971. – 528 с.
2. Höganäs Handbook for Sintering Components. Chapter 5. Compacting Tools, 1997.
3. Либенсон Г. А. Процессы порошковой металлургии. Т. 2. Формование и спекание / Г. А. Либенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницкий. – М. : МИСИС, 2002. – 318 с.
4. 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. – 319 с. : ил.
5. Раковский В. С. Порошковая металлургия в машиностроении : справочник / В. С. Раковский, В. В. Саклинский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1972. – 128 с.
6. Радомысльский И. Д. Пресс-формы для порошковой металлургии. Расчет и конструирование / И. Д. Радомысльский, Е. Л. Печентковский, Г. Г. Сердюк. – Киев : Техника, 1970. – 172 с.
7. Клячко Л. И. Оборудование и оснастка для формования порошковых материалов / Л. И. Клячко, А. М. Уманский, В. Н. Бобров. – М. : Металлургия, 1986. – 336 с.
8. Роганов Л. Л. Технология прессования порошковых материалов в закрытых матрицах при давлениях прессования свыше 1000 МПа / Л. Л. Роганов, Л. В. Попивненко, О. А. Чудненко // Сборник тезисов. V Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Интеллект молодых – производству 2007». – Краматорск : ЗАО «НКМЗ», 2007. – С. 86–88.
9. Пат. и 200807063, МПК В30В 15/02, 11/02. Пресс-форма для пресования порошковых материалов / Л. Л. Роганов, Л. В. Попивненко. – № 39020 ; заявлено 21.05.2008 ; опубл. 26.01.2009, Бюл. № 12.

Попивненко Л. В. – ст. преподаватель кафедры МТО ДГМА;

Руденко Н. А. – аспирант ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: mto@dgma.donetsk.ua