

УДК 621.762

д.т.н. Рябичева Л. А.

(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, ryabic@gmail.com),

Дядичев А. В.

(ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского»,

г. Симферополь, Республика Крым, tr.dyadichev@mail.ru)

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ПОРОШКОВЫХ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ ПЛОТНОСТЬ

В работе выполнено компьютерное моделирование уплотнения и формоизменения порошковой пористой заготовки. Показано, что высокое гидростатическое давление позволяет получить высокоплотную полую деталь с тонкой стенкой. Предложено учитывать такую зависимость при проектировании технологического процесса с припуском по высоте и его последующим удалением.

Ключевые слова: прямое выдавливание, порошковая деталь, относительная плотность, гидростатическое давление.

Развитие машиностроения неразрывно связано с применением прогрессивных методов производства деталей различными видами обработки металлов. Расширяется использование процессов, основанных на холодной пластической деформации заготовок, в том числе полученных методами порошковой металлургии. Такие процессы обеспечивают изготовление деталей с точными размерами и высоким качеством поверхности и, следовательно, позволяют сократить, а чаще полностью исключить операции обработки резанием. Холодная пластическая деформация в сочетании с термической обработкой обеспечивает стабильное получение заданных физико-механических свойств и структуры металла, необходимых для повышения надежности и долговечности как деталей, так и узлов машины в целом [1, 2].

Особый интерес представляет холодное выдавливание, позволяющее получать изделия сложной конфигурации с внутренними полостями и тонкими стенками, большими перепадами сечений. Холодное выдавливание обеспечивает сокращение расхода металла по сравнению обработкой резанием в 2–3 раза и более высокую производительность [3].

Процесс прямого выдавливания деталей из порошкового материала состоит из двух

стадий — уплотнения и формоизменения [1]. Прямое выдавливание порошковых материалов приводит к увеличению гидростатического давления, что повышает пластичность металла и обеспечивает получение высокой плотности. Это особенно важно для порошковых материалов, при деформировании которых одновременно с повышением пластичности необходимо добиться высокой равноплотности [4]. Типовыми деталями, которые целесообразно изготавливать прямым выдавливанием из порошковых материалов, являются детали типа тел вращения с внутренними полостями и тонкими стенками. При этом существует сложность получения равномерной плотности по тонкой стенке детали.

При выполнении операций порошковой металлургии определяют относительную плотность по формуле

$$\theta = 1 - \frac{\vartheta}{2},$$

где ϑ — относительная плотность прессовки.

Формирование высокой относительной плотности детали объясняется влиянием гидростатического давления на процессы уплотнения и формообразования.

В работе [5] получено условие пластичности пористого тела в виде

$$3I_2^1 + \varphi I_1^2 = \psi \sigma_T^2,$$

где I_1 — первый инвариант тензора напряжений;

I_2 — второй инвариант девиатора напряжений;

σ_T — предел текучести материала.

Показано, что пористость материала связана с первым инвариантом тензора напряжений, величина которого определяется значением функции пористости φ . В результате получен критерий, определяющий рост или уменьшение пористости: при $\varphi > 0$, $d\theta > 0$, если $I_1 > 0$, если $d\theta < 0$, то $I_1 < 0$.

Отсюда следует, что изменение объема пористого тела непосредственно связано с первым инвариантом тензора напряжений или гидростатическим давлением.

Актуальным является исследование возможности получения порошковых полых деталей с тонкой стенкой. Очевидно, анализ гидростатического давления позволит объяснить изменение относительной плотности в порошковых деталях в зависимости от размеров детали.

Целью работы является определение изменения относительной плотности по толщине стенки порошковых полых деталей путем компьютерного моделирования прямого выдавливания и экспериментальная проверка полученных зависимостей.

В работах Дж. Грина и М. Абоаф [5, 6] отмечается, что в спеченном пористом материале, в отличие от несжимаемого, гидростатическое давление вызывает текучесть. Поэтому критерий пластичности для таких материалов должен быть функцией гидростатического давления. Формирование очага уплотнения при прямом выдавливании можно объяснить изменением гидростатического давления.

Объект исследования — технологический процесс прямого выдавливания по-

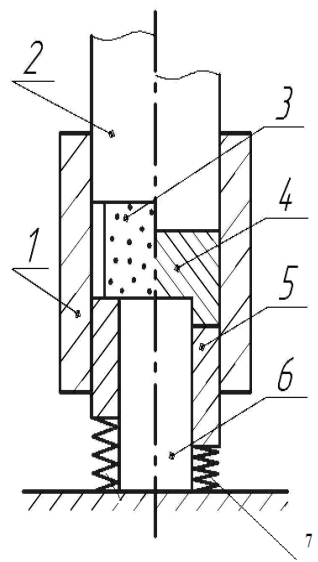
рошковой полый детали с различной толщиной кольцевой стенки.

Предмет исследования — закономерности изменения относительной плотности порошковой полый детали при разном гидростатическом давлении.

Задачи исследования:

- моделирование изменения относительной плотности порошковой детали;
- изучение формирования очага уплотнения;
- моделирование гидростатического давления;
- доказательство влияния гидростатического давления на равноплотность порошковой полый детали.

Прямое выдавливание выполняли по схеме (рис. 1). Исходную пористую заготовку 3 устанавливали в матрицу 1 на подвижный пуансон 5 с противодействием, создаваемым подвижным упором 6. Верхним пуансоном 2 выдавливали образец 5. При выполнении операции использовали пуансон с различными диаметрами, в результате чего изменялась толщина стенки полый детали.



1 — матрица, 2 — верхний пуансон, 3 — заготовка, 4 — образец, 5 — подвижный упор, 6 — нижний пуансон

Рисунок 1 Схема прямого выдавливания

Компьютерное моделирование прямого выдавливания выполняли на деталях с толщиной стенки 7, 4, 2 мм. Параметры заготовки: цилиндрический образец $\text{Ø}28,5 \times 26,3$ мм; высота полости изменялась в зависимости от толщины стенки, мм; относительная толщина стенки составила $b/h = 0,47; 0,27; 0,14$. Материал — медный порошок ПМС-1, исходная относительная плотность $\bar{\rho}_0 = 0,9$, исходная пористость 15 %.

Кривые упрочнения для меди марки ПМС-1 заданы в табличном виде для различных скоростей деформации и выбраны из базы материалов пакета Deform 10.2. Условие текучести материала выбирали по Мизесу. При моделировании прямого выдавливания элементы штампа считали абсолютно жесткими объектами. Скорость движения пуансона составляла 0,5 мм/с.

Исходную пористую заготовку 3 устанавливали в матрицу 1 на нижний пуансон 6 и подвижный упор 5 с противодействием, создаваемым пружинами. Верхним пуансоном 2 выдавливали образец 4.

Для описания трения между заготовкой и деформирующим инструментом использовали закон Зибеля: $\tau_f = m\sigma_s$, где m — фактор трения; для процессов холодной деформации при наличии смазки дисульфида молибдена принято значение $m = 0,05$. Противодействие принимали 120 МПа [7].

На рисунке 2 показана картина распределения относительной плотности при прямом выдавливании порошковой полый детали с различной толщиной стенки. Как видно, формируются два очага уплотнения: один занимает донную и кольцевую части детали и имеет относительную плотность, равную 1; второй находится на торцевой части детали и имеет среднюю относительную плотность 96 %. При этом разноплотность на этих участках составляет 8 %.

На рисунке 3 показана эволюция очага уплотнения при прямом выдавливании детали с толщиной стенки 7 мм при изменении глубины полости детали.

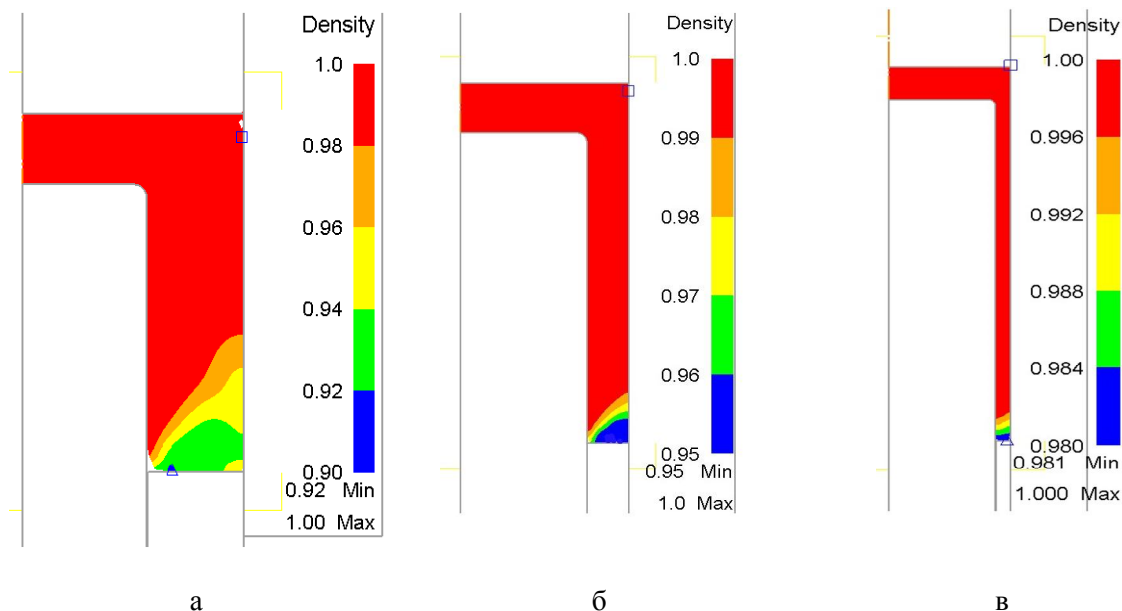


Рисунок 2 Картина распределения относительной плотности при прямом выдавливании порошковой полый детали с различной толщиной стенки: а — 7 мм, б — 4 мм, в — 2 мм

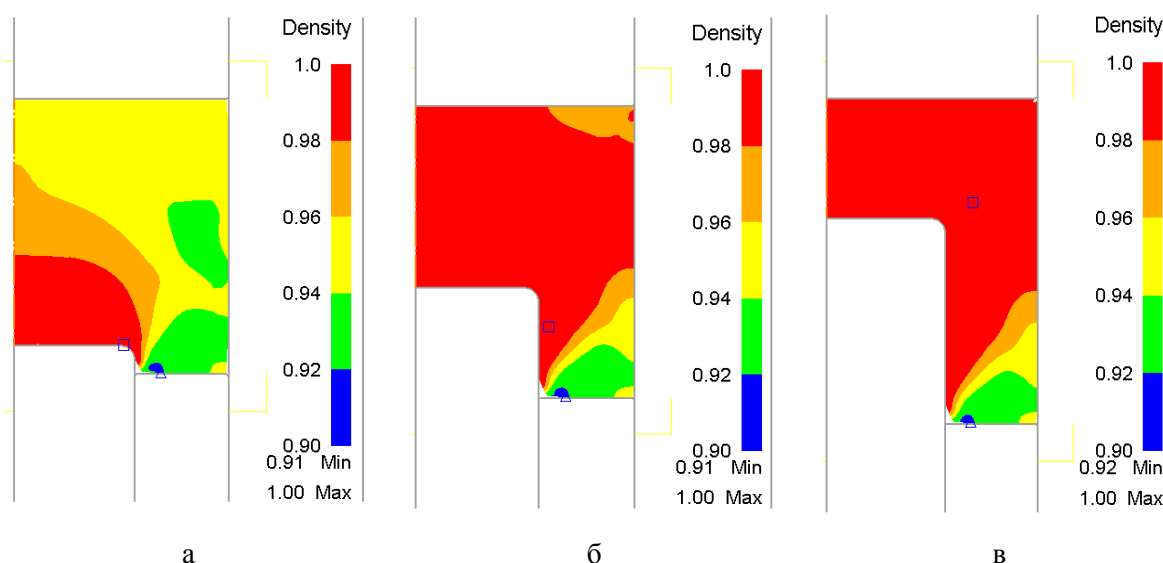


Рисунок 3 Эволюция очага уплотнения при толщине стенки 7 мм и различной глубине полости: а — 2,2 мм; б — 8,2 мм; в — 14,7 мм

При глубине полости 2,2 мм (рис. 3, а) формируется первый очаг уплотнения с максимальной относительной плотностью, которая распространяется на незначительную высоту донной части стакана. Далее по высоте донной части относительная плотность уменьшается от 1 до 0,96. В угловой части наблюдаются области с относительной плотностью 0,94. Для глубины полости 2,2 мм характерна неравномерность относительной плотности. При глубине 8,2 мм первый очаг уплотнения увеличивается и появляется второй очаг на торцевой части стакана с большой неравномерностью. При глубине 14,7 мм очаг уплотнения занимает еще больший объем, а неравномерность смещается к торцу детали с относительной плотностью 0,96.

На рисунке 4 показана картина распределения гидростатического давления при прямом выдавливании с противодавлением 120 МПа и разной толщиной стенки детали. Как видно гидростатическое сжатие увеличивается с увеличением высоты полости и уменьшением стенки. Но деталь с толщиной стенки можно получить несмотря на высокое гидростатическое давление, что свидетельствует о его роли при выдавливании порошковых деталей.

Таким образом, моделирование показало влияние гидростатического давления на уплотнение полых порошковой детали. Чем меньше толщина стенки, тем больше гидростатическое сжатие по всей высоте стенки. При этом уменьшается высота участка с неравномерной плотностью. Это уменьшение составляет 0,68 %. Такие исследования показывают возможность получать порошковые полые детали с тонкой стенкой. Очевидно, можно проектировать технологический процесс с припуском по торцевой части детали с последующим его удалением.

Полученные данные проверены экспериментально для различных величин противодействия и соотношений b/h (рис. 5). С ростом b/h относительная плотность растет у всех образцов. При этом при выдавливании без противодействия она увеличивается до 0,978, а затем уменьшается в связи с образованием трещин на торцевой части образца. При наличии противодействия относительная плотность растет, практически достигая беспористого состояния. Однако при противодействии 120 МПа относительная плотность значительно больше. Относительная плотность, практически равная 1, достигается при отношении $b/h = 0,47$.

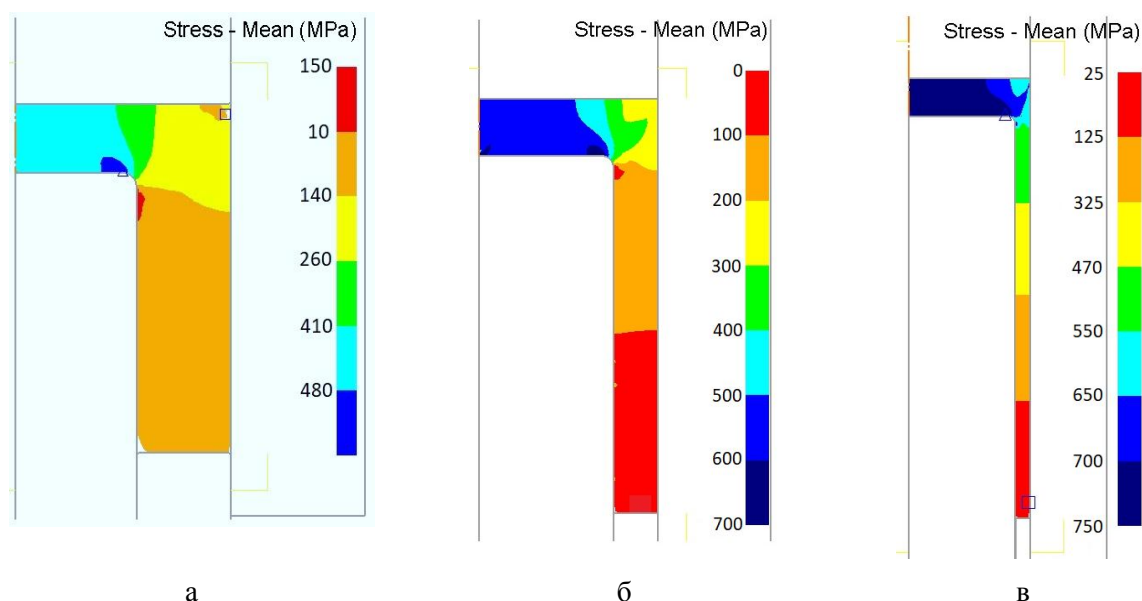


Рисунок 4 Картина распределения гидростатического давления при прямом выдавливании порошковой полый детали с различной толщиной стенки: а — 7 мм, б — 4 мм, в — 2 мм

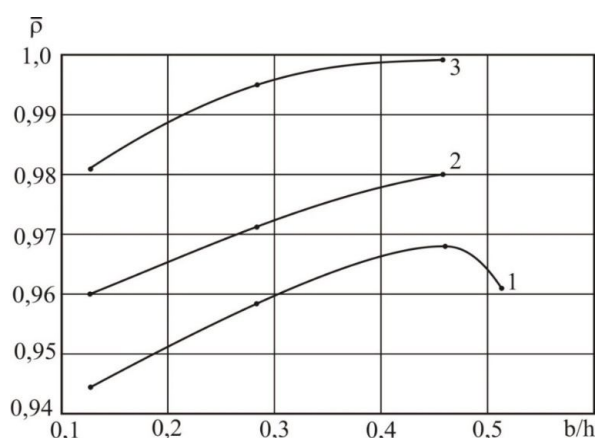


Рисунок 5 Изменение относительной плотности в зависимости от относительной толщины стенки при различном противодавлении:

1 — без противодействия; 2 — с противодавлением 95 МПа; 3 — с противодавлением 120 МПа

Для оценки равномерности образцы разрезали на три части: донную, кольцевую и торцевую (рис. 6). Анализ относительной плотности показал, что при выдавливании без противодействия при различной глубине полости она мало отличается в донной части. В кольцевой части относительная плотность при $b/h = 0,47$ отличается приблизительно на 3 %, а в торцевой части — на 8,9 %. Такие данные свидетельствуют о значительной неравно-

плотности по объему образца при прямом выдавливании без противодействия. При выдавливании с противодавлением 120 МПа и том же соотношении размеров сравнение относительной плотности донной и торцевой частей показывает, что они отличаются на 2,6 %, что свидетельствует о наличии неравноплотности (табл. 1).

Распределение плотности при прямом выдавливании полый детали с толщиной стенки 7 мм показано в таблице 1.



Рисунок 6 Образцы для анализа равномерности:
а — донная, б — кольцевая, в — торцевая части

Таблица 1

Распределение плотности в объеме порошковой полый детали

Толщина стенки детали, мм	Среднестатистическая плотность, г/см ³		
	донной части	угловой части	по толщине стенки
7	8,84	8,87	8,94
4	8,89	8,90	8,94
2	8,94	8,94	8,94

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Гидростатическое давление оказывает влияние на технологию изготовления порошковой детали высокой плотности.

2. С ростом высоты полости порошковой детали по объему появляются два очага уплотнения высокой плотности и по торцевой части очаг с неравномерной плотностью.

3. Гидростатическое давление увеличивается с уменьшением толщины кольцевой

стенки порошковой полый детали, но при этом позволяет получить детали с тонкой стенкой и равномерной плотностью.

4. При проектировании технологического процесса изготовления порошковых полых деталей с тонкой стенкой рекомендуется назначать припуск по торцевой части детали, величина которого соизмерима с припуском по ГОСТ, с последующим его удалением.

Библиографический список

1. Кипарисов, С. С. Порошковая металлургия [Текст] / С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон. — М. : Металлургия, 1972. — 528 с.
2. Рябичева, Л. А. Применение теории пластичности пористых тел к анализу связи пористости с осевой деформацией при свободной осадке [Текст] / Л. А. Рябичева, О. П. Гапонова // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту. — 2008. — № 8 (126). — Ч. 2. — С. 21–27.
3. Скороход, В. В. Актуальные проблемы континуальной теории и структурного моделирования процессов деформации порошков и пористых тел [Текст] / В. В. Скороход // Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов. — К. : Наук. думка, 1985. — С. 6–11.
4. Проскуряков, Ю. Г. Дорнование отверстий [Текст] / Ю. Проскуряков. — М. : Машгиз, 1961. — 190 с.
5. Грин, Р. Дж. Теория пластичности пористых тел [Текст] / Р. Дж. Грин // Механика. — 1973. — № 4. — С. 109–120.
6. Aboaf, M. Modelisation numerique de la deformationa chaud de poudres metalliques [Text] / M. Aboaf, J. T. Chenot // Journal of theoretical and applied mechanics. — 1986. — № 5. — P. 121–140.

7. Рябичева, Л. А. Экспериментальное исследование противодействия при выдавливании полых деталей из порошковой пористой заготовки [Текст] / Т. Б. Коробко, А. В. Дядичев // Сборник научных трудов ДонГТИ. — 2021. — Вып. 25 (68). — С. 21–25.

© Рябичева Л. А.

© Дядичев А. В.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ПуХЛ ЛГУ им. В. Даля Гутько Ю. И.,
к.т.н., доц., зав. каф. ОМДМ ДонГТИ Денищенко П. Н.**

Статья поступила в редакцию 29.09.2022.

Doctor of Technical Sciences Riabicheva L. A. (LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, ryabic@gmail.com), **Diadichev A. V.** (FSAEI HE “Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky”, Simferopol, Republic of Crimea, mr.dyadichev@mail.ru)

INFLUENCE OF POWDER HOLLOW PARTS SIZES ON THE RELATIVE DENSITY

Computer simulation of compaction and moldability of a powdered porous blank is performed in the work. It is shown that high hydrostatic pressure allows us to obtain a high-density hollow part with a thin wall. It is proposed to take this dependence into account when designing a technological process with extra height and its subsequent removal.

Key words: direct extrusion, powder part, relative density, hydrostatic pressure.