

### Список литературы

1. Анализ теплофизических процессов при газопламенном формировании полимерных покрытий / П.А. Витязь, В.И. Жорник, М.А. Белоцерковский, Р.О. Азизов, М.Х. Саидов // Вестник ПГУ, Сер. С: Фундаментальные науки. – 2008. – № 3. – С. 73–80.
2. Белоцерковский, М.А. Активированное газопламенное напыление покрытий порошками полимеров / М.А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 6. – С. 19-23.
3. Белоцерковский, М.А. Повышение качества газопламенных покрытий из порошковых материалов / М.А. Белоцерковский, В.Т. Сахнович // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1991. – № 2. – С. 33–36.

## ВЛИЯНИЕ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОМПАКТНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Александров В.М.<sup>1</sup>, Шелег В.К.<sup>2</sup>, Лобачев В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Обособленное хозяйственное структурное подразделение «Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством», г. Минск, Республика Беларусь, email: impuls@bn.by*

<sup>2</sup> *Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь*

Успешное решение задач, связанных с повышением эффективности применения проницаемых материалов и конструкций на их основе, при одновременном улучшении их технических характеристик ведет к необходимости создания новых композиционных материалов, к числу которых относятся компактно-пористые материалы (КПМ).

Благодаря присутствию в структуре КПМ разнородных материалов в виде компактной и пористой составляющих, требования, предъявляемые к их свойствам, несколько отличаются от традиционных. Выполненные исследования по изучению работоспособности КПМ показали, что, несмотря на то, что воздействие внешней среды испытывает поверхность пористого материала, основной причиной их разрушения является недостаточная связь между материалом пористого слоя и подложки, что обуславливает необходимость контроля прочности сцепления (качество соединения) пористой и компактной составляющих.

Цель работы – исследование консолидации компактно-пористых материалов в процессе импульсного нагружения.

В качестве показателя структурных свойств компактно-пористых материалов выбрана пористость пористой составляющей и каркасных – коэффициент контактирования пористой составляющей к компактной подложке. Эти показатели в основном определяют комплекс каркасных и структурных свойств КПМ, а также и изделий из него.

В большинстве своем механическая связь между подложкой и дискретными частицами образуется в результате механического сцепления подложки и дискретных частиц в виде порошка, имеющих, в большинстве своем, шероховатую исходную поверхность. Процесс формирования металлических контактов между подложкой и дискретным материалом определяется, в частности, технологическими параметрами импульсного формования. При этом наряду с уменьшением площади поверхности системы в целом увеличивается площадь контакта между компактной подложкой и пористым телом, и происходит первоначальное формирование точечных контактов.

Основными факторами, определяющими процесс гидродинамического прессования на ГДМ, являются вид и величина заряда пороха, условия его зарядания, масса

разделительного поршня, объем рабочей камеры и рабочая жидкость в ней, количество прессуемого порошка и оболочка, в которой осуществляется прессование.

Основная задача по выбору оптимальных параметров гидродинамического прессования состоит в решении системы уравнений, описывающих поведение и влияние этих факторов на основные свойства прессуемых материалов. Возможность регулирования этих свойств заключается в подборе основных факторов, перечисленных выше. Необходимо найти граничные условия, позволяющие получать максимально возможную пористость при одновременном наличии необходимой эксплуатационной прочности прессовок, при этом обеспечивая равномерное порораспределение и высокую стабильность этих свойств. Для решения этой задачи произведен анализ влияния указанных факторов на параметры силового воздействия и свойства получаемых прессовок применительно к схеме прессования на ГДМ. Принимаются следующие допущения, не вносящие существенных погрешностей в вычисления:

- потеря энергии на теплоотдачу отсутствует;
- утечка газов из камеры сгорания не имеет места;
- процесс прессования в рабочей камере проходит при постоянном количестве жидкости;
- герметизирующая оболочка и поршень несжимаемы.

Расчет энергосиловых параметров гидродинамического прессования производится решением системы уравнений, описывающих протекающие процессы:

горения заряда пороха

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{P_1}{I_k} \sqrt{\alpha^2 + 4\alpha\lambda\Psi}; \quad (1)$$

движения поршня

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = S_1 p_1(x_1, x_2, \Psi, t) - S_2 p_2(x_1, x_2), \quad (2)$$

сжимаемости рабочей жидкости

$$p_2 = A \left( 1 - \frac{x_1 - x_2}{L} \right)^{-n} - B, \quad (3)$$

движения оболочки

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = S_2 p_2(x_1, x_2) - S_2 p_3(x_2), \quad (4)$$

сжимаемости порошка

$$p_3 = A_1 \left( 1 - \frac{x_2}{l} \right)^{-n_1} - B_1, \quad (5)$$

энергосилового баланса

$$\frac{f \cos \Psi}{\theta} - \frac{P_1}{\theta} (W_\Psi + S_1 x_1) = \frac{m_1}{2} \left( \frac{dx_1}{dt} \right)^2 + \frac{m_2}{2} \left( \frac{dx_2}{dt} \right)^2 + \int_0^{w_1} p_2 dW + \int_0^{w_2} p_3 dW, \quad (6)$$

где  $\Psi$  - относительная часть сгоревшего пороха к моменту времени  $t$ ;

$t$  - время;

$p_1$  - давление в камере сгорания;

$I_k, \alpha, \lambda, f, \theta$  - характеристики природы и формы пороха;

$m_1, m_2, \omega$  - массы поршня, оболочки, пороха;

$x_1, x_2$  - перемещение поршня и оболочки;

$S_1, S_2$  - площадь поперечного сечения поршня со стороны камеры сгорания и рабочей камеры;

$p_2, p_3$  - давление воды и поршня;

$A, B, n, A_1, B_1, n_1$  - постоянные коэффициенты;

$L, l$  - высота столба жидкости и порошка;

$W_{\psi}$  – объем камеры сгорания к моменту времени  $t$ ;

$W_1, W_2$  – величины изменения объемов столба жидкости и порошка к моменту времени  $t$ .

Взаимосвязь пористости прессовки от основных параметров гидродинамического прессования следующая:

$$\Pi = 1 - \frac{M}{S_2(l-x_2)\rho_T}, \quad (7)$$

где  $M$  – масса прессуемого порошка;

$\rho_T$  – плотность компактного материала порошка.

Решение системы уравнений и экспериментальные данные позволяют проанализировать изменение давления в камере сгорания и рабочей камере, а также влияние заряда пороха, массы прессуемого порошка и поршня, начального давления  $p_{cp}$  (среза чеки), при котором начинается перемещение поршня, на уплотняемость порошковых материалов.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что указанные параметры целесообразно регулировать изменением массы поршня, величины заряда и давления начала движения поршня – давления среза чеки  $p_{cp}$ .

Увеличение массы поршня приводит к уменьшению скорости нарастания давления и увеличению времени прессования. При этом давление в рабочей камере с увеличением массы поршня также увеличивается.

Для получения высокой пористости прессовок необходимо уменьшать массу разделительного поршня. В этом случае можно иметь колебательную систему «пороховые газы – поршень – жидкость» еще при горении пороха в камере сгорания. Кинетика этого процесса определяет циклический характер нарастания давления в рабочей камере, причем в первых циклах давление увеличивается, и в каждом цикле имеет место высокая скорость нарастания давления. Общее время прессования увеличивается на 30 – 40 %, что положительно сказывается на получении качественных высокопористых прессовок. Существенное влияние на параметры гидродинамического прессования оказывает первоначальное давление, которое необходимо приложить к поршню для начала его перемещения и которое регулируется прочностью срезаемой чеки  $p_{cp}$ . Давление среза изменяет время приложения нагрузки.

Величина заряда пороха выбирается в зависимости от свойств прессуемого порошка, его массы и необходимой степени его уплотнения. Таким образом, моделирование ударного взаимодействия дискретных материалов в процессе импульсного нагружения заключается в прогнозировании свойств прессовок в зависимости от выбранных параметров гидродинамического прессования.

Экспериментальные исследования влияния параметров силового воздействия на структуру материалов, зоны контакта, порового пространства показали следующие зависимости: уплотняемость исходных порошков тем выше, чем крупнее их частицы и меньше их фактор формы. Состояние поверхности частиц порошка также оказывает существенное влияние на образование прочных межчастичных контактов при прессовании.

При массе заряда пороха 0,063 кг исследуемые образцы не уплотнялись и заготовка при разборке оснастки разрушалась. При массе заряда 0,08 - 0,1 кг заготовка формовалась, но ее механическая прочность была недостаточна для дальнейшего проведения технологических операций (транспортировки, подготовки к спеканию). С увеличением массы заряда ВВ до 0,13 кг относительная плотность заготовок возросла до расчетной (достижимая плотность прессовок составила 70 – 80 %). Это объясняется тем, что возросла длительность импульса - обжиг порошка происходит не только вследствие взаимного перемещения частиц порошка и уменьшения размеров межчастичных пор, но и пластической деформации. Длительность импульса влияет на скорость детонации и время действия нагрузки: увеличивается время действия давления, что способствует более

плавному снятию нагрузки и, следовательно, лучшему сохранению заготовки. Дальнейшее увеличение массы заряда до 0,15 кг не дало существенного улучшения свойств заготовки. Напротив, плотность заготовки снижалась, что объяснимо действием избыточного давления детонации, и, как следствие, сильной релаксационной волной, нарушающей межкристаллитное сцепление, достигнутое за счет волн сжатия. При массе заряда 0,18 кг заготовка растрескивается.

В процессе обработки технологических режимов были изготовлены экспериментальные образцы в количестве 10 штук из порошков титана фракции 40 - 63 мкм, 63 – 100 мкм, 100 – 160 мкм при давлениях прессования от 100 до 250 МПа, материал подложки: сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72.

Для пористой составляющей определены структурные свойства материалов – пористость, максимальная и средняя величина пор.

Результаты исследований приведены в табл. 1 и графически представлены на рис. 1.

Таблица 1 – Свойства экспериментальных образцов.

Материал пористой составляющей и фракция	Давление прессования, МПа	Пористость, %	Средняя величина пор, мкм	Максимальная величина, пор, мкм
Титан ТПП, 40 -63 мкм	250	26	10	15
	200	32	12	18
	100	43	15	32
1	2	3	4	5
1	2	3	4	5
Титан ТПП, 63 - 100 мкм	250	30	15	20
	200	35	20	25
	100	47	35	42
Титан ТПП, 100 - 160 мкм	250	33	20	25
	200	37	25	30
	150	43	30	37
	100	48	34	42

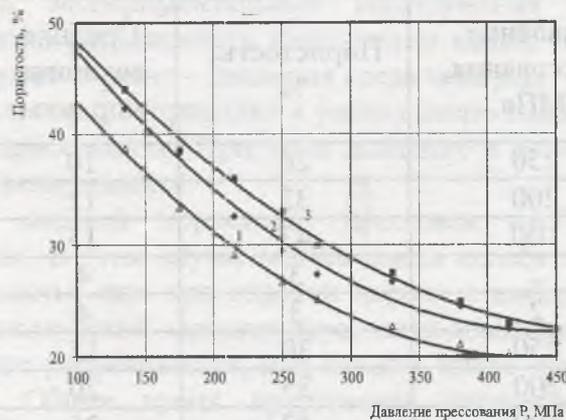
Как видно из результатов исследований, оптимальным давлением прессования является 150 – 200 МПа, при котором пористость составляет 37 – 43 %, что соответствует значениям, предъявляемым к фильтроэлементам, используемым в технологии водоподготовки.

Стабильность каркасных свойств компактно-пористого материала в значительной степени обусловлено структурой и количеством контактов, сформированных в процессе прессования в зоне взаимодействия «пористая составляющая – компактный материал». Решение этой задачи достигается проведением анализа явлений, происходящих в микрообъемах контактирования каждой отдельной частицы пористой составляющей, находящейся во взаимодействии с компактным материалом, и количественной оценки суммарной величины общего контакта пористой составляющей к компактной. Количественная оценка доли суммарного контакта на номинальной длине контактирования пористого материала с компактным дает возможность более дифференцировано и надежно контролировать структуру и прогнозировать свойства контактов.

Для выявления действительного контакта изготавливали микрошлифы и проводили предварительный металлографический анализ микроструктуры единичных контактов при увеличении большим того, при котором производится измерение следов сечения плоскостью шлифа поверхностей контактирования частиц с компактным материалом. Цель предварительного металлографического анализа микроструктуры – качественная

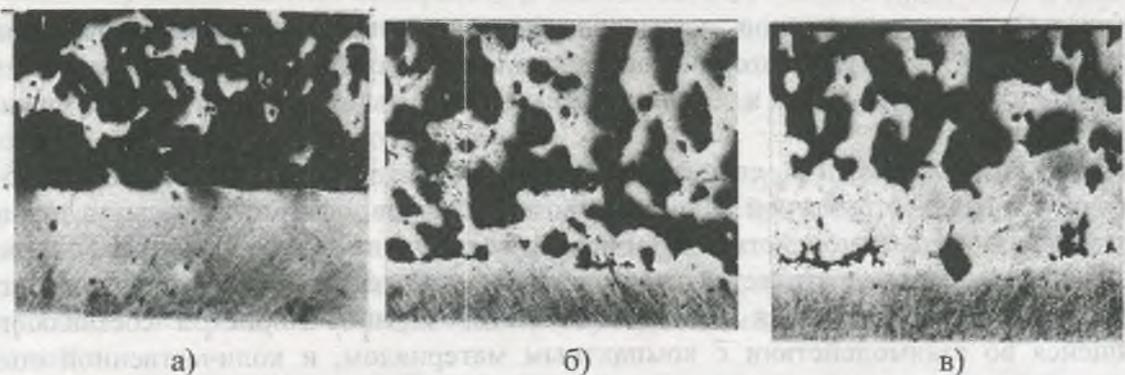
оценка структуры единичного контакта, наличия границы раздела между взаимодействующими объектами. За количественную меру контактирования принято отношение длины суммарного металлографически выявленного металлического контакта на следе пересечения произвольной плоскостью плоскости шлифа пористой составляющей к общей длине – коэффициент контактирования. На рис. 2 приведены фотографии микроструктур зон контактирования титанового порошка ТПП фракции 100 - 160 мкм при давлениях прессования 100, 150 и 200 МПа.

Установлено, что при давлении прессования 100 МПа коэффициент контактирования не превышает 0,35, с увеличением давления прессования он увеличивается до 0,5 – 0,55 при давлении 150 МПа и 0,65 при давлении 250 МПа, однако при этом давлении прессования пористость пористой составляющей снижается до уровня, недостаточного для использования в качестве фильтрующего материала. Зависимость величины коэффициента контактирования от давления прессования для различных фракций титанового порошка приведена на рис. 3.



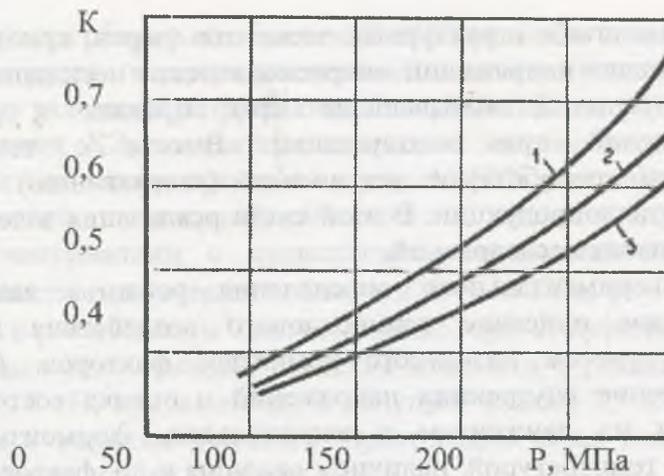
1 – порошок титана дисперсностью 40 – 63 мкм; 2 – порошок титана дисперсностью 63 – 100 мкм; 3 – порошок титана дисперсностью 100 – 160 мкм

Рисунок 1 – Зависимость пористости экспериментальных образцов из порошка титана от давления прессования.



а) давление прессования 100 МПа; б) давление прессования 150 МПа;  
в) давление прессования 250 МПа

Рисунок 2 – Фотографии микроструктур зон контактирования титанового порошка ТПП фракции 100 – 160 мкм.



- 1 – порошок титана дисперсностью 100 – 160;  
 2 – порошок титана дисперсностью 63 - 100 мкм;  
 3 – порошок титана дисперсностью мкм 40 – 63 мкм.

Рисунок 3 – Зависимость величины коэффициента контактирования от давления прессования для различных фракций титанового порошка.

**Заключение.** Проведены исследования влияния силового воздействия на структуру и свойства компактно-пористых материалов. Определена оптимальная величина порохового заряда при гидродинамическом прессовании 0,13 - 0,14 кг, обеспечивающего давление прессования 150 – 200 МПа. Проведены исследования экспериментальных образцов и определены зависимости их структурных свойств от параметров силового воздействия (давления прессования) и свойств исходных материалов. При давлении прессования 150 – 200 МПа пористость пористой составляющей составляет 37 – 43 %, средний размер пор 25 – 30 мкм, коэффициент контактирования пористой составляющей к компактной равен 0,5 – 0,55.

#### Список литературы

1. Александров, В.М. Исследование процесса получения и свойства компактно-пористых материалов [Текст] / В.М. Александров, А.Г. Косторнов, В.К. Шелег: Порошковая металлургия. -2009.- Вып.32. С. 211-215.- Библиогр.: с. 229.
2. Косторнов, А.Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов [Текст] / А. Г. Косторнов : Монография в 2-х томах. Киев: Наукова думка, 2002 г.

### АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ПРОКАТКЕ

Плескачевский Ю.М.<sup>1</sup>, Шилько С.В.<sup>1</sup>, Петроковец Е.М.<sup>1</sup>, Куземкина Г.М.<sup>1</sup>,  
 Чой Х.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси

<sup>2</sup>Университет Кумина (Республика Корея)

#### Введение

Дефектность металлических заготовок, получаемых при литье, прокатке, ковке, штамповке и т.п., является экономически значимой проблемой. Уже на стадии кристаллизации слитка возникают значительные остаточные напряжения и начальные неоднородности структуры в виде зон ликвации, усадочных раковин и т.д. В последующих технологических операциях продолжается формирование напряженного состояния заготовки либо в направлении релаксации и выравнивания внутренних напряжений, либо их концентрации. Знак и уровень напряжений определяют эволюцию