

## СЕКЦИЯ «НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ»

УДК 666.3-1-12-127

### **Прессование шихты на основе базальтовых волокон**

**Азаров М. С.,** докт. техн. наук, доцент,  
**Дробыш А. А.,** канд. техн. наук., доцент,  
**Степанова О. В.,** студент,  
**Саксонов И. В.,** студент

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация:

В статье представлена методика уплотнения для базальтового волокна в составе сложной шихты в принятом технологическом диапазоне давлений прессования (20...50 МПа).

Применение пористых материалов на основе керамических волокон для изготовления фильтрующих элементов актуально, благодаря возможности их эксплуатации при высоких тепловых нагрузках. В отличие от известных тканых материалов (волоконные базальтовые плиты) размер и конфигурация пор создаваемых пористых материалов остаются постоянными в процессе эксплуатации за счет жесткости каркаса. Такое техническое решение позволяет повысить качество очистки и кардинально уменьшить габариты фильтрующих устройств.

При обработке давлением пакетов базальтовых волокон (длина превышает поперечные размеры на 2–3 порядка) проявляется жестко-гибкий характер их деформирования. Наличие нескольких контактных узлов для каждого волокна затрудняет их относительное смещение. Защемление в контактных узлах приводит к деформации в области контактных узлов. Кроме увеличения контактных площадок за счет изгиба волокон образуется их взаимное механическое зацепление. Возможность изготовления пористых материалов на основе волокон реализовано лишь для пластичных материалов. Как правило, обработке давлением подвергают металлические волокна. Композиционные

пористые материалы с жесткой системой микрофильтрационных транспортных пор из базальтовых волокон ранее не создавались.

Наличие наполнителей (порообразователя, пластификатора) в составе шихты по мере возрастания плотности приводит к изменению деформационного механизма уплотнения. Наполнитель, являясь пластифицированной массой с незначительной сжимаемостью, затрудняет объемную деформацию уплотняемого дискретного тела по двум основным причинам. С ростом плотности наполнитель воспринимает все большую долю общей нагрузки, при этом имеет место рост сопротивления движения массы наполнителя через поры и уменьшается возможность сдвига контактов между волокнами, без которого невозможен рост плотности формируемого тела, поскольку статический коэффициент сопротивления сдвигу контактов существенно больше кинетического. Поэтому модель деформирования базальтовых волокон в составе сложной шихты целесообразно адаптировать к конкретной группе материалов, имеющих сходные реологические свойства, а повышение достоверности модели может быть обеспечена за счет использования при ее разработке физически обоснованных параметров, подлежащих экспериментальному определению. Увеличение давления прессования сложной шихты на основе базальтовых волокон за пределы 50 МПа не приводит к практически значимому для пористых проницаемых материалов росту плотности. Поэтому моделирование целесообразно проводить для принятого технологического диапазона.

Такой процесс уплотнения для множества материалов весьма удовлетворительно описывается уравнением [1]:

$$\delta = \delta_{\epsilon} \cdot \frac{\vartheta^n - \vartheta_0^n}{1 - \vartheta_0^n}, \quad (1)$$

где  $\vartheta$  – относительная плотность порошкового тела в рассматриваемый момент процесса уплотнения;  $\vartheta_0$  – начальная относительная плотность порошкового тела;  $p_k$  – критическая величина давления прессования, соответствующая максимальному уплотнению;  $n$  – показатель степени, постоянный в значительном интервале плотностей материала.

Основываясь на практическом опыте многих исследователей в области порошковой металлургии и композиционных материалов, можно утверждать следующее. Большинство материалов с ограниченным ресурсом пластичности подвергаются уплотнению в составе смесей, то есть, при наличии каких-либо дополнительных компонентов: связующих, пластифицирующих, порообразующих и др. В полной мере это касается и базальтового волокна [2]. В силу многокомпонентности прессуемых составов, значительного множества соотношений компонентов, принципиально различных и не всегда известных реологических свойств составляющих, которые, к тому же, зачастую не имеют стабильных механических характеристик за пределами поставляемой партии, аналитический расчет значений показателя степени  $n$  и предельного напряжения сжатия  $p_k$  для сложных смесей практически реализован быть не может. Прессуемое тело, состоящее из базальтового волокна с наполнителем, представляет собой дискретную среду с принципиально отличными условиями контактного силового взаимодействия частиц. Здесь кроме силового контактного взаимодействия базальтового волокна имеет место силовое контактное взаимодействие базальтового волокна и наполнителя, которое постепенно приближает напряженное состояние в окрестностях контактных областей гидростатическому, что способствует увеличению сопротивления прессуемого тела уплотнению.

Практически важной для материалов с ограниченным ресурсом пластичности является разработка *методики* определения коэффициентов в принятой математической модели, позволяющей определить область применимости модели и обеспечить максимальную адекватность модели деформационным процессам, реализующимся при уплотнении конкретного материала в достаточно широком интервале его технологических характеристик: например, гранулометрического состава основного компонента.

В диапазоне давлений 20–50 МПа способом радиального прессования были изготовлены образцы прессовок из шихты на базальтового волокна марки БС16-6-76 в форме труб с размерами:  $\varnothing 50 \times 40$  мм, длина – до 600 мм. Пористость (плотность) образцов определяли по ГОСТ 18898-73. Результаты экспериментально установленных значений плотности изделий в зависимости от давления прессования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения плотности в зависимости от давления прессования и размера гранул из базальтового волокна

| $p$ , МПа | Фракции гранул из базальтового волокна, мкм |                                |                                |
|-----------|---|--------------------------------|--------------------------------|
|           | > 200                                       | 200–315                        | 315–630                        |
|           | $\vartheta_{\text{прессовка}}$              | $\vartheta_{\text{прессовка}}$ | $\vartheta_{\text{прессовка}}$ |
| 20        | 0,680                                       | 0,720                          | 0,740                          |
| 25        | 0,760                                       | 0,812                          | 0,790                          |
| 30        | 0,800                                       | 0,839                          | 0,800                          |
| 35        | 0,822                                       | 0,859                          | 0,840                          |
| 40        | 0,830                                       | 0,860                          | 0,852                          |
| 45        | 0,840                                       | 0,870                          | 0,853                          |

Принимая в качестве базовой зависимости плотности прессовки от давления прессования выражение (1), определим для величины  $p_k$ , относящейся к материалу основного компонента шихты, величину показателя степени  $n$ , решая уравнение (1) относительно  $n$  численными методами для полученных экспериментально фиксированных точек  $p = f(\vartheta)$ . Результаты такого расчета приведены на рисунке 1.

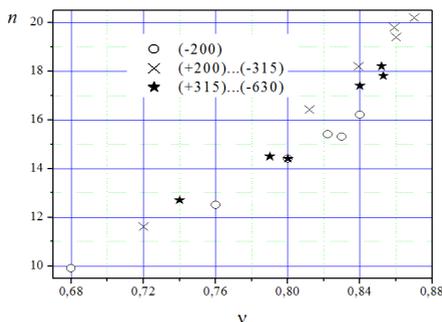


Рис. 1 – Расчетные зависимости  $n$  от плотности прессовок

Заметно, что по мере возрастания плотности прессовки значение  $n$  увеличивается, причем увеличивается по закономерности, близкой к линейной, что дает основания для поиска функции  $n = f(\vartheta)$  в виде:

$$n = k \cdot \vartheta + t, \quad (2)$$

где  $k$  и  $t$  – коэффициенты аппроксимации.

Для шихты сложного состава при расчете  $\vartheta$  следует учитывать только объем базальтового волокна. Расчет числа контактов  $K_\alpha$  различного гранулометрического состава, спрессованного в составе сложной шихты при различной объемной доле базальтового волокна (от 20 до 50 %) в принятом диапазоне давлений осуществляли по формуле:

$$K_\alpha = \frac{(\Pi + 3) + \sqrt{\Pi^2 - 10 \cdot \Pi + 9}}{2 \cdot \Pi}, \quad (3)$$

где  $\Pi$  – пористость материала, отнесенная к базальтовому волокну.

Было установлено, что величина  $K_\alpha$  изменяется в пределах 2,84...4,85 и возрастает с увеличением давления прессования и ростом объемной доли волокна в шихте.

Аппроксимацией полиномом 2-й степени установлены следующие выражения:

$$k = -5084,83 + 17484,24 \cdot \vartheta_0 - 14842,9 \cdot \vartheta_0^2 \quad (4)$$

$$t = -3717,66 - 12747,13 \cdot \vartheta_0 - 10824,3 \cdot \vartheta_0^2 \quad (5)$$

С учетом выражений (4) и (5) уравнение (2) принимает вид:

$$n = (17484,24 \cdot \vartheta_0 - 14842,9 \cdot \vartheta_0^2 - 5084,83) \cdot \vartheta - (12747,13 \cdot \vartheta_0 - 10824,3 \cdot \vartheta_0^2 - 3717,66) \quad (6)$$

Математическая модель прессования сложной шихты на основе базальтовых волокон, таким образом, может быть представлена формулой (1), где показатель степени  $n$  определяется нелинейным уравнением (6).

Для оценки достоверности полученной модели сравнивали расчетные данные с экспериментальными (рисунок 2) в принятом технологическом диапазоне давлений. Заметно, что расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными (погрешность расчета относительной плотности не превышает 3 %).

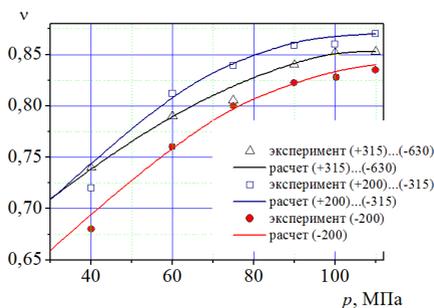


Рис. 2 – Зависимость плотности от давления прессования

Предложенная расчетно-экспериментальная методика позволила уточнить контактную модель уплотнения дискретных сред [1] для базальтового волокна в составе сложной шихты [3], что обеспечивает повышение точности прогнозирования свойств получаемых пористых изделий в принятом технологическом диапазоне давлений прессования (20–50 МПа). Предложенная модель ориентирована на гранулы с размером до 630 мкм из базальтового волокна марки БС16-6-76.

### Список используемых источников

1. Дегтярев, И. С. Колмогоров В. Л. Диссипация мощности и кинематические соотношения на поверхности разрыва скоростей в сжимаемом жестко-пластическом материале / Дегтярев И. С., Колмогоров В. Л. // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1972. – № 5. – С. 167–173.
2. Сегал, В. М. Структурные параметры в теории пластичности пористых тел // Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов. Киев: Наук. думка. 1985. – С. 43–51.
3. Азаров С. М. Особенности формования пористых керамических материалов при радиальном прессовании шихты на основе базальтовых волокон Е. Е. Петюшик, С. М. Азаров, А. А. Дробыш, Т. Е. Евтухова, И. В. Фомихина, Т. В. Гамзелева // Порошковая металлургия: Респ. межвед. сб. науч. трудов / редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: НАН Беларуси, 2021. – Вып. 44. – С. 130–133.