

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ФОРМИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН

**С.М. АЗАРОВ², Е.Е. ПЕТЮШИК¹, И.В. ФОМИХИНА¹, А.А. ДРОБЫШ²,
Т.Е. ЕВТУХОВА², Е.И. МИХАСИК², О.М. СТЕПАНОВА², И.В. САКСОНОВ²**

¹(Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии, Минск)

²(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Приведены результаты исследований характеристик пористых материалов на основе базальтового волокна, полученных радиальным прессованием с последующим спеканием на воздухе. На основании анализа изображений структур показано, что материал характеризуется высокой пористостью. Образование пор между волокнами базальта происходит путем выгорания органической и полимерной связей. Установлено, что спекание базальтового волокна при 1050 °С и 1100 °С формирует пористый материал со структурой, характеризующейся пористостью 52–75%, средним размером пор 8–18 мкм, коэффициентом проницаемости (42–55) 10^{-12} м², прочностью на сжатие 7–13 МПа. Полученные результаты доказывают, что пористый материал из базальтового волокна способен обеспечивать лучшие фильтрующие характеристики по сравнению с аналогами.

Ключевые слова: базальт, волокно, свойства материала, структура, фазовый состав.

Введение. Интерес к использованию базальтового волокна для получения пористой керамики основан на возможности формирования волокнистой матрицы, обладающей не только высокой проницаемостью, но и достаточной технологической прочностью. Применение пористых материалов на основе керамических волокон в качестве фильтрующих материалов при очистке жидкостей и газов в системах каталитического крекинга, очистке выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания определяется возможностями эксплуатации при высоких (свыше 15 МПа) давлениях, температурах (до 700 °С) с сохранением прочности в режиме длительной эксплуатации. 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 стабильность фильтрующих характеристик, качество очистки и кардинально уменьшить габариты устройств с одновременным снижением расходов на регенерацию за счет замены фильтрующих материалов, работающих в режиме объемной фильтрации, на фильтроэлементы, у которых удаляемые загрязнения собираются на поверхности фильтрующей перегородки. В этом случае задерживаются частицы, размер которых больше пор, а затем из них образуется слой загрязнений, который также является фильтрующим материалом. Такой процесс характерен для жесткой пористой перегородки толщиной 1...20 мм с размерами пор 1...20 мкм (режим микрофильтрации), организованной в виде пластин или труб различного диаметра (фильтроэлементы), которые работают при малых скоростях фильтрования. Если при работе зернистых загрузок скорости фильтрования обычно составляют 10...25 м/ч, то скорости фильтрования в режиме микрофильтрации не должны превышать 5 м/ч. Накапливающиеся на фильтрующей поверхности загрязнения периодически удаляются в дренаж методом обратной промывки отфильтрованной водой.

Базальты по содержанию кремнезема и глинозема наиболее близки к Е-стеклу, из которого производят лучшие стеклянные нити. Но температурный интервал применения базальтовых волокон составляет от -40 °С до +700–900 °С, а стеклянных – от -60 °С до +450 °С¹. В зависимости от температуры и времени нагрева в базальте существенно изменяется содержание оксида железа. Переход FeO в Fe₂O₃ происходит при температуре выше 600 °С. Гигроскопичность базальтовых волокон не превышает 1%, стеклянных – 10–20%. В целом базальтовые волокна превосходят стеклянные по термическим, физическим, электрическим и акустическим характеристикам, а также по химической стойкости.

В то же время 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. Традиционно возможность изготовления пористых материалов на основе волокон реализовано лишь для пластичных материалов, таких как металлические или полимерные волокна. В работе [1] показано, что при радиальном прессовании дисперсная среда изменяет свою плотность лишь в результате структурной переукладки частиц, которая происходит достаточно

¹ Свойства базальтового волокна [Электронный ресурс]. – URL: <http://novitsky1.narod.ru/basalt5.htm> (дата обращения: 29.12.2022)

равномерно во всем объеме прессуемого тела. Благодаря этому удается сформировать технологически прочное изделие из частиц с низким ресурсом пластичности. Эта особенность радиального прессования позволяет получать длинномерные пористые трубы (основы фильтрующих элементов) с отношением длины к диаметру более 35.

Цель данной работы – исследование влияния режимов радиального прессования и температуры спекания на характеристики пористых материалов из базальтовых волокон.

Материал и методики исследований. В диапазоне давлений 20–50 МПа из шихты на основе базальтового волокна марки БС16-6-76 способом радиального прессования были сформованы заготовки в форме труб с размерами: $\varnothing 19$ мм, длина – 100 мм, и образцы в виде цилиндров $\varnothing 19$ мм и высотой 10 мм с последующим спеканием на воздухе в диапазоне температур 1050–1150 °С. Давление прессования – 45 МПа.

Характеристики полученных опытных образцов определяли по стандартным методикам, принятым в порошковой металлургии и материаловедении.

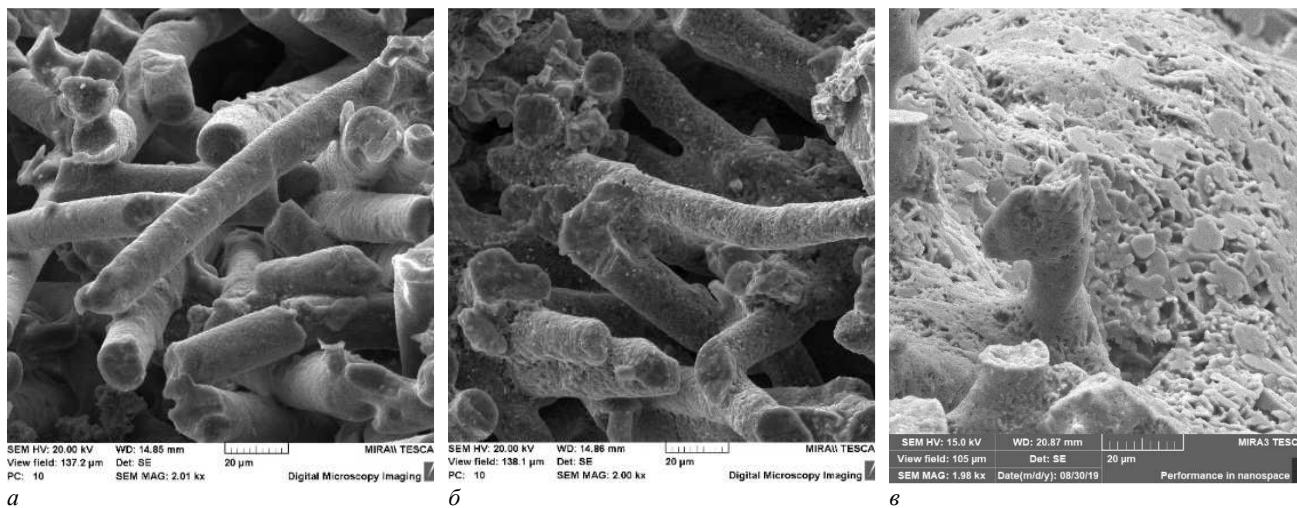
Метод испытания на сжатие заключался в определении максимальной нагрузки, предшествующей разрушению образца. Образец для испытания помещали между нажимными плитами испытательной машины таким образом, чтобы он находился в центре плит. Нагружение образца проводили плавно и непрерывно. Прочность при сжатии образца (максимальное напряжение, возникающее в момент разрушения), МПа, вычисляли по формуле

$$\sigma = \frac{P_{\max}}{S},$$

где P_{\max} – максимальная нагрузка, предшествовавшая моменту разрушения образца или появления в нем трещины, Н; S – площадь поперечного сечения, мм².

Микротвердость по Викерсу измеряли на микротвердомере «Micromet-II» с нагрузкой 300 г по ГОСТ 9450-76. Измерение проводилось на пяти разных участках.

Результаты и их обсуждение. На рисунке представлены изображения структур пористых материалов на основе базальтового волокна после спекания при различных температурах, из которых следует, что материал состоит из волокон базальта, организующих высокопористую структуру. Образование пор между волокнами базальта происходит путем выгорания органической и полимерной связей.



a – при 1050 °С; *б* – при 1100 °С; *в* – при 1150 °С

Рисунок. – Изображение структуры пористого материала на основе базальтового волокна после спекания

По сравнению с материалом, спеченным при 1050 °С (см. рисунок, *a*), увеличение температуры спекания до 1100 °С (см. рисунок, *б*) не приводит к значимому изменению структуры. Дальнейшее повышение температуры спекания до 1150 °С сопровождается сплавлением базальтовых волокон (см. рисунок, *в*). Как показано ранее в работе [2], спекание при 1050 °С и 1100 °С приводит к формированию на поверхности базальтового волокна структуры, близкой к дисперсно-упрочненной, благодаря образованию мелкодисперсных минералов. Фазовый состав пористого материала из базальтового волокна, спеченного при температуре 1050 °С, приведен в таблице 1.

Известно, что основными минералогическими составляющими базальта являются алюмосиликаты – минералы, относящиеся к группам пироксенов и плагиоклазов, представляющие собой твердые растворы пере-

менного состава. Оксиды железа входят преимущественно в состав магнетита, андрадита и других минералов. Рядом авторов установлено, что при нагреве базальтового волокна выше 1000 °С наблюдается разрушение цепочечных силикатных структур, сопровождающееся образованием низкомолекулярной железосодержащей фазы: гематита [$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$], и каркасного силиката изоморфного ряда.

Таблица 1. – Фазовый состав пористого материала из базальтового волокна после термообработки 1050 °С

Кристаллическая фаза (формула), масс. %			
Анортит ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)	Андрадит ($\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{Si}_3\text{O}_{12})$)	Оксид кремния (SiO_2)	Калий-алюмосиликатный шпинелид ($\text{K}_{0.85}\text{Al}_{0.85}\text{Si}_{0.15}\text{O}_2$)
65	9	14	11

В таблице 2 представлены значения прочности на сжатие и усредненные значения микротвердости образцов исследуемых пористых материалов.

Таблица 2. – Механические свойства пористых материалов из базальтового волокна

№ п/п	Температура спекания, °С	Максимальная нагрузка, Н	Прочность на сжатие, МПа	Микротвердость, кгс/мм ²
1	1050	1440	7,70	576,6
2	1000	1660	8,0	741,1
3	1150	2100	12,8	1011,8

Как следует из представленных результатов, наиболее прочным оказался материал, спеченный при 1150 °С: максимальная нагрузка составила 2100 Н, прочность на сжатие соответственно – 12,8 МПа. Наименьшей прочностью обладал образец, спеченный при 1050 °С: начало разрушения зафиксировано при нагрузке 1440 Н. При этом с ростом температуры спекания наблюдается значительное увеличение микротвердости исследуемых материалов (см. таблицу 2).

В таблице 3 представлены сравнительные характеристики пористых материалов из базальтового волокна и композиции «алюмосиликатный порошок – базальтовое волокно», результаты исследований характеристик которых представлены в работе [3].

Таблица 3. – Сравнительные характеристики пористых материалов

Характеристики	Материал	
	Базальтовое волокно	Алюмосиликат– базальтовое волокно
Пористость, %	52–75	37–48
Максимальный размер пор, мкм	13–29	65–86
Средний размер пор, мкм	8–18	27–30
Коэффициент проницаемости $\times 10^{-12}$, м ² *	42–55	29–47
Прочность на сжатие, МПа	7–13	21–27

Примечание: *по воздуху.

Согласно таблице 3, использование базальтового волокна позволяет сформировать структуру материала, характеризующуюся в 1,4–1,6 раза большей пористостью, 1,2–1,4 раза большим коэффициентом проницаемости по воздуху, но в 1,6–3,4 раза меньшим размером пор по сравнению с материалом из композиции «алюмосиликат – базальтовое волокно». Поэтому можно предположить, что пористый материал из базальтового волокна способен обеспечивать лучшие фильтрующие характеристики по отношению к аналогам.

Заключение. В результате проведенных исследований установлено, что спекание базальтового волокна при 1050 °С и 1100 °С формирует материал со структурой, характеризующейся пористостью 52–75%, средним размером пор 8–18 мкм, коэффициентом проницаемости (42–55) 10^{-12} м², прочностью на сжатие 7–13 МПа. Полученные результаты доказывают, что пористый материал из базальтового волокна способен обеспечивать лучшие фильтрующие характеристики по отношению к аналогам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петюшик Е.Е., Реут О.П., Якубовский А.Ч. Основы деформирования проволочных тел намотки. – Минск: Технопринт, 2003. – 218 с.
2. Влияние режимов спекания на структуру и физико-механические свойства пористых композиционных материалов на основе базальтовых волокон / Е.Е. Петюшик, С.М. Азаров, А.А. Дробыш и др. // Порошковая металлургия: сб. науч. тр. / редкол.: А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2021. – Вып. 44. – С. 134–139.
3. Структура и свойства пористых композиционных материалов на основе порошков алюмосиликатов и базальтового волокна / Е.Е. Петюшик, С.М. Азаров, А.А. Дробыш и др. // Порошковая металлургия: сб. науч. тр. / редкол.: А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2021. – Вып. 41. – С. 147–153.

REFERENCES

1. Petyushik, E.E., Reut, O.P. & Yakubovskii, A.Ch. (2003). *Osnovy deformirovaniya provolochnykh tel namotki*. Minsk: Tekhnoprint. (In Russ.)
2. Petyushik, E.E., Azarov, S.M., Drobysh, A.A., Fomikhina, I.V. Markova, L.V. & Gamzeleva, T.V. (2021). Vliyanie rezhimov spekaniya na strukturu i fiziko-mekhanicheskie svoistva poristykh kompozitsionnykh materialov na osnove bazal'tovykh volokon [The influence of sintering modes on the structure and physical and mechanical properties of porous composite materials based on basalt fibers]. *Poroshkovaya metallurgiya [Powder metallurgy]*, (44), 134–139. (In Russ., abstr. in Engl.)
3. Petyushik, E.E., Azarov, S.M., Drobysh, A.A., Fomikhina, I.V. Markova, L.V. & Gamzeleva, T.V. (2021). Struktura i svoistva poristykh kompozitsionnykh materialov na osnove poroshkov alyumosilikatov i bazal'tovogo volokna [Structure and properties of porous composite materials based on aluminosilicate powders and basalt fiber]. *Poroshkovaya metallurgiya [Powder metallurgy]*, (41), 147–153. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 05.01.2024

**INFLUENCE OF FORMATION MODES ON CHARACTERISTICS
OF POROUS MATERIALS FROM BASALT FIBERS**

**S. AZARAU², Y. PIATSIUSHYK¹, I. FOMIHINA¹, A. DROBUSH²,
T. EVTUCHOVA², E. MICHASIK², O. STEPANOVA², I. SACSONOV²**

¹(State Research and Production Association of Powder Metallurgy, Minsk)

²(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article presents the results of studying the characteristics of porous materials based on basalt fiber obtained by radial pressing followed by sintering in air. Based on the analysis of images of structures, it is shown that the material is characterized by high porosity. The formation of pores between basalt fibers occurs by burning out the organic and polymer bonds. It has been established that sintering of basalt fiber at 1050 °C and 1100 °C forms a porous material with a structure characterized by a porosity of 52–75%, an average pore size of 8–18 μm, a permeability coefficient of (42–55) 10⁻¹² m², and a strength of compression 7–13 MPa. The results obtained prove that the porous material made of basalt fiber is able to provide better filtering characteristics compared to analogues.

Keywords: basalt, fiber, material properties, structure, phase composition.