

1. Дуббель, Г. Справочная книга по машиностроению, в 2-х т, т. 1 / Г. Дуббель. – М.: Государственное техническое изд-во, 1929. – 768 с.

2. Дубинин, А. М. Паровая бескислородная газификация углей / А. М. Дубинин // Промышленная теплотехника. – 1990, т. 12, № 2. – С. 97-100.

3. Глуценко, И. М. Теоретические основы технологии горючих ископаемых / И. М. Глуценко. – М.: Metallurgia, 1990. – 296 с.

4. Баскаков, А. П. О механизме паровой газификации / А. П. Баскаков, А. М. Дубинин, В. Г. Тупоногов, Д. В. Филиппов // Промышленная теплоэнергетика. – 2008, № 4. – С. 40-42.

5. Sharma, D. K. Modeling the Steam Gasification Reactions for Reactor Design / D. K. Sharma // Energy Sources. – 2011, Part. A., 33. – P. 57-71.

6. Balat, M. Hydrogen-Rich Gas Production from Biomass via Pyrolysis and Gasification Processes and Effects of Catalyst on Hydrogen Yield / M. Balat // Energy Sources. – 2008, Part. A., 30. – P. 552-554.

7. Физическая химия. Теоретическое и практическое руководство / под ред. акад. Б. П. Никольского. – Л.: Химия, 1987. – 880 с.

УДК 662.764; 66.011

## МИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ КAVKAZA ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН

Н.Н. Ходакова, Т.К. Углова, В.В. Фирсов, О.С. Татаринцева

*Исследована возможность получения из изверженных горных пород Кавказского региона базальтовых волокон. Показано, что из расплавов этих пород в широком температурном интервале формируются утолщенные и грубые непрерывные волокна. На установке с индукционным способом плавления минерального сырья и акустическим раздувом расплава воздухом получены штапельные волокна (базальтовая вата) с характеристиками, отвечающими требованиям нормативной документации.*

*Ключевые слова: горные породы, базальтовые непрерывные и штапельные волокна, вязкость, поверхностное натяжение, кристаллизационная способность.*

### ВВЕДЕНИЕ

Анализ применяемых в отечественной и зарубежной практике сырьевых материалов для производства волокон показывает, что наиболее качественную и долговечную продукцию можно получать из горных пород магматического происхождения, запасы которых практически неисчерпаемы.

Большинство разведанных месторождений эксплуатируется для добычи строительного щебня. Поэтому исследования, направленные на рациональное использование местного минерального сырья, каковым являются неизвестные ранее производителям базальтоволокнистой продукции породы ряда месторождений Кавказского региона, и расширение номенклатуры сырья, пригодного для выработки различного вида базальтовых волокон, безусловно, актуальны.

Различают два основных вида базальтовых волокон: штапельное и непрерывное. Непрерывные волокна имеют длину, дости-

гающую нескольких десятков километров. Длина штапельных волокон находится в пределах от нескольких миллиметров до десятков сантиметров.

Непрерывные волокна по диаметру  $d$  разделяются на тонкие (4–20 мкм) и грубые (свыше 20 мкм), а штапельные классифицируются в зависимости от диаметра на микротонкие (менее 0,5 мкм), ультратонкие (более 0,5 мкм), супертонкие (1–3 мкм), тонкие (4–12 мкм), утолщенные (13–25 мкм) и грубые (более 25 мкм) [1].

Диаметр элементарных волокон существенно влияет на их свойства – активную поверхность, прочность, гибкость, плотность, теплопроводность, звукопоглощение, тем самым определяя области их использования. Микро- и ультратонкие волокна используются при изготовлении термостойких бумагоподобных материалов для электроизоляции и вакуумно-многослойной изоляции, в производстве авиационных матов и др.

Супертонкие волокна применяются в промышленности и энергетике для изоляции технологического оборудования и трубопроводов и являются сырьем для создания широкого спектра теплоизоляционных материалов в виде прошивных матов, плит, картонов, шнуров, скорлуп и пр. Тонкие волокна предназначены для широкого использования в производстве строительных теплозвукоизоляционных и композиционных материалов, изготовления фильтров грубой очистки газовых и воздушных сред. Утолщенные штапельные волокна находят применение в качестве фильтровальной основы дренажных систем гидротехнических сооружений, для фильтрации кислых и щелочных сред. Грубые волокна, в силу малой удельной поверхности, обладают не только низкой гигроскопичностью, но и минимальной водоудерживающей способностью, вследствие чего могут использоваться для дисперсного армирования цементных бетонов. Из тонких непрерывных волокон изготавливаются ткани, дорожные сетки, намоточные и пресованные пластики, длинномерные гибкие полосы для изоляции стыков конструкций, швейные нити для прошива теплоизоляционных изделий и др.

Выбор сырья для выработки определенного вида волокон должен осуществляться с учетом влияния его химического состава на физико-химические свойства расплава, а также условий протекания технологических процессов плавления и волокнообразования. Пригодность стекол для выработки из них волокон определяется их физико-химическими свойствами: химической однородностью, газонасыщенностью, уровнем поверхностного натяжения, способностью к кристаллизации, вязкостью и скоростью твердения.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Ниже представлены результаты исследования горных пород месторождений, базирующихся на Кавказе: Фиагдонского с участков Бугультадон (вариолит) и Дзамарашдон (диабазы) и Джимидонского (амфиболит) в качестве сырья для производства базальтовых штапельных и непрерывных волокон.

Для сравнения в работе использованы полученные ранее результаты исследования габбро Малетинского месторождения (Алтайский край), рекомендованного для получения штапельных супертонких волокон, и базальта Марнеульского месторождения (Грузия), при-

знанного лучшим минеральным сырьем для производства тонких непрерывных волокон.

Химический состав горных пород приведен в таблице 1, из которой видно, что полностью удовлетворяет требованиям нормативно-технической документации к сырью из горных пород для производства штапельных [2] и тонких непрерывных [3] волокон, только диабаз пробы 1. Небольшие отклонения от требований по содержанию оксидов железа и щелочноземельных металлов имеются у остальных исследуемых пород.

Для предварительной оценки сырья на пригодность для выработки волокон в производственной практике обычно пользуются значением модуля кислотности  $M_k$ . По литературным данным [1], в зависимости от типа плавильного агрегата для выработки штапельных волокон применяется сырье, химический состав которого обеспечивает модуль кислотности в диапазоне 1,5–5, а непрерывные волокна формируются из расплавов с  $M_k$  от 3,5 до 6. Значения этого показателя у большинства исследуемых пород предполагают возможность выработки из них как штапельных, так и непрерывных волокон.

В лабораторных условиях с использованием электрической печи прямого нагрева были получены химически однородные гомогенные расплавы. Условия стекловарения для каждой из пород различны, однако в целом можно отметить, что все они при 1450 °С полностью расплавляются. При этом, если диабазы плавятся с умеренным газовыделением в интервале температур 1320–1350 °С и очень незначительным, продолжающимся вплоть до 1450 °С, процессы плавления вариолита и амфиболита сопровождаются бурным кипением расплавов в диапазоне от 1360 °С до 1380 °С и умеренным до достижения температуры 1420 °С. Эти данные находятся в соответствии с результатами определения поверхностного натяжения  $\sigma$  стекол (таблица 2), высокий уровень которого обуславливает длительное газовыделение в процессе стекловарения.

Исследования стекол под микроскопом подтвердили переход систем в однофазное жидкое состояние с небольшим количеством газовых включений.

Характерной особенностью базальтовых расплавов является увеличение скорости твердения и охлаждения внешних слоев при пониженной скорости твердения внутренних. Это явление подтверждается резко выраженной зависимостью вязкости  $\eta$  от температуры (рисунок 1).

Таблица 1 - Химический состав горных пород

Наименование оксида	Содержание оксида, % масс.								
	Требования к сырью для производства волокон		Вариолит	Диабаз			Амфиболит	Габбро	Базальт
	штапельных	непрерывных		пр. 1	пр. 2	пр. 3			
SiO <sub>2</sub>	39,0-	47,0-55,0	50,07	47,98	44,80	50,19	49,88	46,53	51,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	51,0	14,0-20,0	14,97	15,97	18,41	17,18	15,18	16,59	17,10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO	10,0-	7,0-13,5	11,14	9,85	7,88	9,52	12,66	11,78	9,20
CaO	19,0	7,0-11,0	7,60	8,23	4,23	6,30	7,26	10,41	8,20
MgO	10,0-	3,0-8,5	7,54	7,10	13,42	5,79	4,79	4,37	5,80
TiO <sub>2</sub>	18,0	0,2-2,0	1,48	2,10	0,61	1,01	2,03	2,18	1,60
MnO, не более	8,0-13,0	0,25	0,14	0,20	0,19	0,22	0,22	0,17	0,14
	4,0-12,0	2,5-7,5	3,04	4,69	3,66	5,68	4,38	4,46	5,70
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	2,0-5,0	0,2	0,18	0,05	–	–	0,27	–	–
SO <sub>3</sub> , не более	0,2-0,3	5,0	3,61	3,88	5,70	3,49	3,33	2,94	0,70
	2,0-5,0	3,5-6,0	4,30	3,58	4,17	5,57	5,40	4,27	4,90
ппп, не более	–	–	–	–	–	–	–	–	–
M <sub>к</sub>	5,0	–	–	–	–	–	–	–	–
	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание: ппп – потеря при прокаливании

Таблица 2 - Физико-химические свойства расплавов

Наименование параметра	Значение параметра						
	Вариолит	Диабаз			Амфиболит	Габбро	Базальт
		пр. 1	пр. 2	пр. 3			
σ, Н/м, при t, °C							
1230	0,379	0,376	0,371	0,373	0,377	0,373	0,370
1250	0,380	0,377	0,376	0,375	0,379	0,375	0,372
1270	0,384	0,378	0,380	0,380	0,383	0,377	0,373
1280	0,386	0,379	0,382	0,382	0,384	0,378	0,374
1300	0,387	0,380	0,383	0,383	0,386	0,379	0,375
t <sub>впк</sub> , °C	1290	1298	1296	1292	1257	1260	1240
Θ, град, при t, °C							
1200	29,0	87,0	93,5	51,8	36,3	90,0	50,0
1225	23,8	57,0	58,5	37,6	21,5	45,5	24,5
1250	16,0	21,5	25,0	20,3	17,5	22,0	18,2
1275	9,5	13,8	19,0	15,0	10,3	20,8	15,8
1300	7,8	7,3	9,5	9,7	8,1	11,0	12,4
1325	5,7	6,2	7,7	6,8	5,2	-	-

В соответствии с литературными [4, 5] и полученными нами ранее экспериментальными данными производство штапельных волокон возможно из расплава, имеющего вязкость при 1400 °C менее 9 Па·с, а непрерывные волокна формируются из расплавов, вязкость которых при температуре выработки находится в интервале 10–30 Па·с.

Для диабазов и амфиболита вязкость остается достаточно низкой в широком температурном диапазоне, что является положительным фактором в производстве штапель-

ных волокон, а кривая вязкости вариолита практически совпадает с температурной зависимостью этого параметра для расплава марнеульского базальта.

Характеристикой стекломассы, определяющей нижнюю границу температурного интервала выработки волокон t<sub>ивв</sub>, является кристаллизационная способность, зависящая от числа центров кристаллизации, образующихся в единице объема в единицу времени.

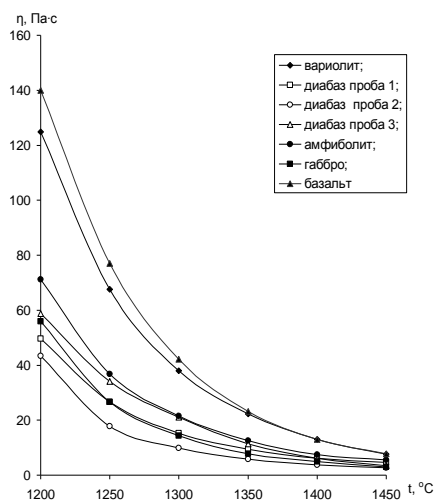


Рисунок 1 - Температурная зависимость вязкости базальтовых расплавов

Для промышленных стекол, применяемых в производстве волокон, температура верхнего предела кристаллизации  $t_{впк}$  не превышает 1150 °С, в то время как для базальтовых расплавов различного химического состава она, как правило, выше на 100–170 °С. Это объясняется наличием в базальтах в качестве одного из основных породообразующих минералов пироксена, способствующего активному изоморфизму стекла и тем самым повышению его кристаллизационной способности. Исследования стекол показали, что объемная кристаллизация в них отсутствует, а  $t_{впк}$  у вариолита и диабазов несколько выше, чем у стекол сравнения и амфиболита, что может привести к сужению  $t_{ивв}$

Фактором, определяющим верхнюю границу  $t_{ивв}$ , является растекание стекломассы по фильерной пластине, то есть смачивание. Скорость процесса растекания стекла обусловлена кинетикой вязкого течения и характером изменения вязкости с температурой. Смачиваемость железосодержащими базальтовыми расплавами, платины, из которой изготавливают фильерные питатели, высока и возрастает при повышении температуры за счет уменьшения сцепления между частицами расплава и материалом питателя, поэтому получение непрерывных волокон из горных пород с высоким содержанием железа встречает значительные трудности. Из данных таблицы 2 видно, что у всех исследуемых расплавов в интервале температур 1200–1325 °С краевой угол смачивания  $\Theta$  резко уменьшается, а при дальнейшем ее повышении расплав растекается по пластине, приводя к полному ее смачиванию.

Склонность расплавов к волокнообразованию оценивали по температурному интервалу выработки непрерывных волокон на однофильерной лабораторной установке, включающей в себя электрическую печь с платинородиевым нагревателем, наматывающее устройство и платиновые тигли с фильерой диаметром D 1,8 мм для вытяжки тонкого и 4 мм для получения тонкого и грубого волокон.

Тонкие волокна через фильеру диаметром 1,8 мм вытягиваются из расплава диабаза пр. 1, но температурный интервал их выработки слишком мал для гарантированного стабильного волокнообразования в промышленных условиях.

Таблица 3 - Температурный интервал выработки непрерывных волокон

Наименование породы	D=1,8 мм, V=1560 м/мин		D=4 мм			
	$t_{ивв}, °C$	d, мкм	V=5 м/мин		V=1560 м/мин	
			$t_{ивв}, °C$	d, мкм	$t_{ивв}, °C$	d, мкм
Вариолит	—	—	1300-1380	220-50	1300-1380	19,0-10,0
Диабаз, пр.1	1420-1440	9,0-6,5	1360-1440	485-50	1360-1440	35,0-18,5
Диабаз, пр.2	1450	14,0	1350-1400	340-90	1350-1400	48,0-23,5
Диабаз, пр.3	—	—	1300-1390	310-70	1300-1390	28,0-14,5
Амфиболит	1380	9,5	1300-1390	370-130	1300-1390	40,0-19,5
Габбро	1410-1450	12,0-7,0	1300-1430	320-20	—	—
Базальт	1370-1450	11,0-7,0	1300-1450	400-80	—	—

У всех исследуемых расплавов при использовании фильеры диаметром 4 мм отмечен довольно значительный  $t_{\text{ивв}}$  (таблица 3). Однако, к тонким, согласно классификации [1], можно отнести только волокна, полученные из расплава вариолита. При скорости вытяжки  $V$  5 м/мин в широком температурном диапазоне из расплавов формируются грубые волокна диаметром свыше 50 мкм. На промышленной установке с индукционным способом плавления горных пород в водоохлаждаемом тигле и акустическим раздувом расплава сжатым воздухом были получены мелкообъемные партии минеральной (базальтовой) ваты, удовлетворяющей требованиям ГОСТ 4640-2011 для марок ВМТ (тонкое волокно) и ВМСТ (супертонкое волокно).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совокупность полученных в ходе лабораторных исследований данных и результатов промышленных испытаний показывают возможность переработки горных пород Кавказского региона в штапельные супертонкие и

тонкие волокна, а также непрерывные грубые, но малый температурный интервал выработки не позволяет рекомендовать их для промышленного производства тонких непрерывных волокон.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джигирис Д.Д. Основы производства базальтовых волокон и изделий / Д.Д. Джигирис, М.Ф. Махова. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 412 с.
2. ТУ 07508902-140-94. Сырье из горных пород для производства штапельных волокон. Технические условия. – Бийск, 1994. – 10 с.
3. ТУ 5717-041-10018691-2011. Сырье из горных пород для производства непрерывного волокна. Технические условия. – Бийск, 2011. – 13 с.
4. Дубровский В.А., Рычко В.А., Бачило Т.М., Лысюк А.Г. Базальтовые расплавы для формования штапельного волокна // Стекло и керамика. – 1968. – № 12. – С. 18–20.
5. Джигирис Д.Д., Махова М.Ф., Горобинская В.Д., Бомбырь Л.Н. Базальтовое непрерывное волокно // Стекло и керамика. – 1983. – № 9. – С. 14–16.

УДК 622.648.24

## ПЕРЕРАБОТКА УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ В СЫРЬЕ ДЛЯ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

А.В. Неведров, А.В. Папин

*Исследованы качественные характеристики угольных шламов. Проведены экспериментальные исследования по их обогащению методом масляной агломерации. Определены качественные характеристики угольных концентратов, полученных из угольных шламов.*

*Ключевые слова: угольный шлам, угольный концентрат, масляная агломерация, обогащение, зольность, когенерационные устройства.*

Современный этап развития энергетики характеризуется переходом к увеличению вклада децентрализованных систем энергообеспечения, позволяющих одновременно вырабатывать электрическую и тепловую энергию с высоким общим КПД, достигающим 85–90 %. В связи с истощением запасов органического топлива особое значение имеют разработки, в которых в качестве топлива используется органическое сырье, получаемое из производственных отходов. Планируемый рост использования биомассы и отходов производства, содержащих органическое сырье, в различных областях народного хозяйства страны вызван необходимостью повышения экономической эффективности выработки электрической и тепловой энергии в

условиях постоянного роста цен на традиционные виды топлива.

Одним из возможных направлений решения этой задачи является газификация органического сырья с получением газообразного энергоносителя и его использование в эффективных когенеративных системах, вырабатывающих одновременно электрическую и тепловую энергию.

Наиболее эффективным сырьем для процесса газификации является уголь.

По добыче угля Россия наряду с США и КНР занимает одно из первых мест в мире. С ростом добычи непрерывно растет абсолютная масса углей, направляемых на обогащение.