

УДК 691.213.2

Оценка пригодности базальтов для производства минерального волокна

Татьяна Анатольевна ДРОЗДЮК, аспирантка, e-mail: t.drozdyuk@narfu.ru

Аркадий Михайлович АЙЗЕНШТАДТ, доктор химических наук, профессор, e-mail: a.isenshtadt@narfu.ru

Татьяна Анатольевна МАХОВА, кандидат химических наук, доцент, e-mail: t.mahova@narfu.ru

Мария Аркадьевна ФРОЛОВА, кандидат химических наук, доцент, e-mail: m.aizenstadt@narfu.ru

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова»,
163002 Архангельск, набережная Северной Двины, 17.

Аннотация. Проведен анализ существующих методов предварительной оценки пригодности базальтового сырья для производства минеральных волокон. Показано, что для такой оценки необходимо учитывать ряд параметров, которые характеризуют технологические свойства базальтового сырья, а не ограничиваться параметрами, зависящими только от химического состава. Констатируется, что такой величиной является вязкость расплава базальта, а модуль кислотности и постоянная плавкости не могут служить универсальными критериями. Выполнена оценка пригодности базальтов месторождения Мяндуха, расположенного в Архангельской обл., для изготовления минеральных волокон. Для базальтов данного месторождения определены химический состав и температура плавления, а также рассчитаны модуль кислотности, постоянная плавкости и вязкость расплава. Экспериментальные результаты позволили рекомендовать базальты месторождения Мяндуха для производства тонких непрерывных волокон.

Ключевые слова: базальт, минеральные волокна, температура плавления, базальт месторождения Мяндуха, вязкость расплава, модуль кислотности.

ASSESSMENT OF SUITABILITY OF BASALTS FOR PRODUCTION OF MINERAL FIBER

Tatiana A. DROZDYUK, e-mail: t.drozdyuk@narfu.ru

Arkady M. AYZENSHTADT, e-mail: a.isenshtadt@narfu.ru

Tatiana A. MAKHOVA, e-mail: t.mahova@narfu.ru

Maria A. FROLOVA, e-mail: m.aizenstadt@narfu.ru

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Severnaya Dvina naberezhnaya, 17,
Arkhangelsk 163002, Russian Federation

Abstract. The analysis of existing methods of preliminary assessment of the suitability of basalt raw materials for the production of mineral fibers is made. It is shown that for such an assessment it is necessary to take into account a number of parameters that characterize the technological properties of basalt raw materials, and not be limited to parameters depending only on the chemical composition. It is stated that such a value is the viscosity of the basalt melt, and the acidity module and the meltability constant can't serve as universal criteria. The assessment of the suitability of basalt of the Myanduha Deposit, located in the Arkhangelsk region, for the manufacture of mineral fibers is made. For the basalts of this deposit, the chemical composition and melting point were determined, and the acidity modulus, the meltability constant and the melt viscosity were calculated. Experimental results make it possible to recommend basalts of the Myanduha Deposit for the production of fine continuous fibers.

Key words: basalt, mineral fibers, melting point, basalt of Myanduha Deposit, melt viscosity, acidity modulus.

Среди довольно широкой номенклатуры теплоизоляционных материалов первое место по объему производства в России и за рубежом занимают изделия на основе минерального волокна.

Различают два основных вида базальтовых волокон: штапельное и непрерывное. Непрерывные волокна имеют длину, достигающую нескольких десятков километров. Длина штапельных волокон находится в пределах от нескольких миллиметров до десятков сантиметров. Непрерывные волокна по диаметру 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 применения. Микро- и ультратонкие волокна используются при изготовлении термостойких бумагоподобных материалов для электроизоляции и вакуумно-многослойной изоляции, в производстве авиационных матов и др. [2].

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 использования в производстве строительных теплозвукоизоляционных и композиционных материалов, изготовления фильтров грубой очистки газовых и воздушных сред. Утолщенные штапельные волокна служат 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 изготавливают ткани, дорожные сетки, намоточные и прессованные пластики, длинномерные гибкие полосы для изоляции стыков конструкций, швейные нити для пошива теплоизоляционных изделий и др. [3–5].

Цель данной работы — анализ существующих методов предварительной оценки пригодности базальтового сырья для производства волокон, а также оценка возможности применения базальтов месторождения Мяндуха Архангельской обл.

Известные методы предварительной оценки пригодности сырья для производства волокон основаны на величине модуля кислотности, рассчитываемого по соотношению основных химических элементов в пересчете на оксиды, и сравнении его с принятыми за эталон аналогами. В качестве таковых использовали базальты месторождения Берестовецкое (Украина) или Марнеульское (Грузия), химический состав и модуль кислотности которых приведен в *табл. 1* [6].

Модуль кислотности M_k определяли по формуле

$$M_k = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}}, \quad (1)$$

где SiO_2 , Al_2O_3 , CaO и MgO — массовое содержание оксидов, %.

Считается, что чем выше модуль кислотности M_k , тем более устойчиво минеральное волокно к воздействию воды и влаги и, следовательно, более долговечно. Однако рост значения M_k при увеличении в шихте содержания оксидов кремния и алюминия затрудняет ее плавление, повышает вязкость расплава и в итоге приводит к снижению производительности плавильного агрегата или увеличению энергозатрат на плавление.

Следует отметить, что данные по оптимальной величине модуля кислотности для разных технологических условий противоречивы. Так, согласно работе [1] в зависимости от типа плавильного агрегата для выработки штапельных волокон применяется сырье, химический состав которого обеспечивает M_k в диапазоне 1,5–5, а непрерывные волокна формируются из расплавов с M_k от 3,5 до 6.

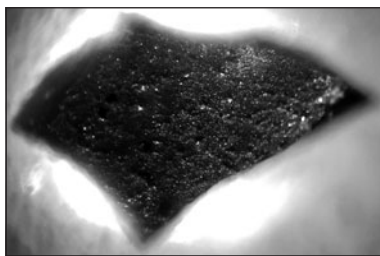
В соответствии с источником [7] M_k базальтовых двухкомпонентных шихт должен составлять не менее 1,5–1,8, а для базальтовых однокомпонентных шихт — до 4. Применение шихт с $M_k < 1,7$ уменьшает содержание стеклообразующих оксидов в расплаве, а также снижает производительность плавильных печей из-за увеличения расхода топлива на диссоциацию карбонатов. Вместе с тем при уменьшении M_k снижаются стойкость волокна к механическим и атмосферным воздействиям, водостойкость и температуростойкость волокна. Температура плавления не должна превышать 1350 °С, температура переработки расплава в тонкое волокно — 1320...1400 °С, в супертонкое волокно — 1420...1460 °С, в непрерывное волокно — 1200...1280 °С.

По мнению авторов работы [8], для получения тонких непрерывных и штапельных волокон могут использоваться породы с $M_k > 1,2$. Наиболее оптимальным считается химический состав, обеспечивающий M_k в пределах от 3 до 6.

Кроме того, важным свойством при получении расплавов из горных пород является скорость плавления [9], зависящая от совокупности процессов, которые вызывают образование гомогенной стекломассы. Скорость плавления оценивается по температурному интервалу и продолжительности плавления. Причем в качестве количественной характе-

1. Химический состав и модуль кислотности эталонных базальтов

Месторождение	Оксиды по массе, %									Модуль кислотности
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	
Берестовецкое (Украина)	48–51,9	12,2–16,5	2,7–2,9	7,5–10,2	3,9–7,6	8,2–12,1	4,1–6,9	0,3–0,6	2,3–2,6	2,02–2,25
Марнеульское (Грузия)	47,5–52,5	14–18	0,2–2	7–13,5		8–11	3,5–8,5	2,5–6		



Микрофотография расплава базальта, полученного при температуре 1300 °С

ристики данного свойства базальтов используется коэффициент k , равный отношению тугоплавких оксидов к более легкоплавким, называемый постоянной плавкостью:

$$k = \frac{\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}}{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}} \quad (2)$$

Чем меньше значение k , тем легче горная порода поддается плавлению. Результаты экспериментальных исследований сырья с различным минеральным и химическим составом показали, что горные породы, из которых возможно получение волокон, по плавкости можно разделить на две группы [10]. К первой относятся андезиты, андезито-базальты, андезитовые порфириды и некоторые диабазы, переходящие в расплав при температурах свыше 1450 °С. Вторую группу составляют горные породы, плавящиеся при температуре ниже 1450 °С. Это большая часть диабазов, амфиболиты, габбро-диабазы, базальты, базаниты, долериты, пироксеновый порфирит, амфиболитизированный пироксенит и др.

Для производства волокон предпочтительнее использовать породы второй группы, так как благодаря высокой скорости плавления требуется меньше энергозатрат на получение расплава. Однако волокна, изготовленные из сырья первой группы, обладают более высокой термо- и кислотостойкостью. Поэтому при выборе сырья необходимо ориентироваться на конкретный способ изготовления и требуемое качество волокон.

Таким образом, показатели M_k и k не являются универсальными критериями и не дают однозначных выводов о пригодности сырья того или иного месторождения для выработки соответствующего типа волокон. В качестве дополнительного критерия согласно [10] может использоваться величина вязкости расплава.

Поскольку вязкость — один из важнейших физико-химических свойств расплава, а ее измерение связано с определенными трудностями, исследователями неоднократно предпринимались попытки прогнозирования вязкости по химическому составу сырья. Как правило, теоретически найденные значения этого параметра имели низкую сходимость с экспериментальными, а сами методики достаточно сложны для применения на практике.

В настоящее время наиболее точно спрогнозировать величину вязкости по химическому составу

можно согласно следующей эмпирической зависимости [10]:

$$\eta = 3,62(\text{SiO}_2)^{3,07}(\text{Al}_2\text{O}_3)^{-0,16}(\text{CaO})^{-0,4}(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)^{1,34} \times (3) \\ \times (M_k)^{1,25}(t - 1100)^{-2,58},$$

где SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , FeO , Fe_2O_3 — массовое содержание оксидов, %; t — температура, °С.

Проведенные исследования [10] показали, что способностью к дискретному и непрерывному волоконообразованию обладают расплавы с достаточно широким диапазоном вязкости, однако оптимальной для получения качественных супертонких волокон следует считать вязкость 3–10 Па·с, а для стабильной вытяжки тонких непрерывных волокон ее величина должна находиться в пределах 10–20 Па·с.

При решении вопроса о пригодности данного сырья для производства минерального волокна, кроме химического состава, следует учитывать его физико-механические свойства: прочность кусков, температуру плавления, плавкость, вязкость расплава при различной температуре, кристаллизационную способность и др.

Месторождение базальтов Мяндуха — одно из крупнейших базальтовых месторождений на территории России — расположено в Плесецком районе Архангельской обл. Месторождение частично разрабатывается с 1994 г., хотя ранее было запланировано строительство крупного дробильно-сортировочного предприятия, оснащенного оборудованием мощностью 1200 тыс. м³ в год в системе АО «Архангельскстройматериалы».

Для проведения исследования отобрали три пробы базальтового сырья с различных участков выработки. Образцы базальта предварительно были очищены водой от пыли на сите диаметром 10 мм и доведены до постоянной массы при температуре 105 °С. После этого опытные образцы базальта измельчали в шаровой мельнице РМ 100 Retsch при следующих параметрах: скорость вращения ротора — 420 м⁻¹, продолжительность измельчения — 30 мин, 20 размольных стальных тел диаметром 20 мм. (Стоит отметить, что величины данных параметров никак не влияют на дальнейший ход работы и были приняты исходя из накопленного опыта [11, 12]).

Температурный интервал плавления образцов базальта определяли в лабораторных условиях с использованием муфельной печи типа СНОЛ 12/16 с максимальной рабочей температурой 1650 °С. Химический состав породы данного месторождения находили методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на спектрофотометре «Shimadzu EDX-800 HS».

В ходе экспериментов было установлено, что начальная температура плавления составляет 1150 °С,

2. Химический состав проб базальта месторождения Мяндуха

Проба	Массовая доля оксида											M_k	k
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	SO ₃		
№ 1	48,3	0,7	11,8	9,4	1,1	13,4	9,1	1,2	1,6	0,2	0,2	2,67	2,82
№ 2	47,75	0,53	13,8	—	13,09	14,6	8,29	0,89	0,32	0,22	—	2,69	3,12
№ 3	51,42	1,04	11,82	12,25	12,25	10,58	8,84	2,52	2,52	—	—	3,26	3,13

а конечная — 1300 °С. Исследование расплава базальта, полученного при температуре 1300 °С, под оптическим микроскопом «Микмед-6» подтвердило переход анализируемых проб в однофазное состояние с кристаллическим блеском и наличием воздушных включений (см. рисунок).

Химический состав проб базальта, а также M_k и k , рассчитанные по формулам (1) и (2), представлены в табл. 2. Сравнивая эти показатели с эталонными базальтами (см. табл. 1), можно сделать вывод, что исследуемое сырье непригодно для изготовления базальтовых волокон. Однако, опираясь на современные исследования [1, 3, 7], по M_k базальт месторождения Мяндуха подходит для производства штапельных волокон.

В соответствии с вышесказанным о том, что M_k и k не являются универсальными критериями для оценки пригодности сырья для выделки базальтовых волокон, был выполнен расчет величины вязкости для температуры жидкотекучего состояния 1300 °С по формуле

$$\eta = 3,62(47,75)^{3,07}(13,8)^{-0,16}(8,29)^{-0,4}(13,09)^{1,34} \times (2,69)^{1,25}(1300 - 1100)^{-2,58} = 18,22 \text{ Па}\cdot\text{с.}$$

Рассчитанная величина вязкости показывает, что базальт месторождения Мяндуха возможно использовать для изготовления тонких непрерывных волокон диаметром 4–12 мкм.

Выводы

1. Для оценки пригодности базальтов для производства минеральных волокон следует учитывать температуру плавления, вязкость расплава при различной температуре, прочность кусков и т. д., которые характеризуют технологические свойства базальтового сырья, а не ограничиваться параметрами, которые зависят только лишь от химического состава.

2. Для базальтов месторождения Мяндуха Архангельской обл. определены химический состав и температура плавления, равная 1300 °С, а также рассчитаны $M_k = 2,67...3,26$; $k = 2,82...3,13$; $\eta = 18,22$ Па·с.

3. Полученные результаты позволяют рекомендовать базальты этого месторождения для производства строительных теплоизоляционных материалов на основе тонких непрерывных базальтовых волокон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джигирис Д. Д., Махова М. Ф. Основы производства базальтовых волокон и изделий. М.: Теплоэнергетик, 2002. 412 с.
2. Татаринцева О. С., Ходакова Н. Н. Оценка возможности использования горных пород Сибири и Дальнего Востока в производстве базальтовых волокон // Базальтовые технологии. 2012. № 1. С. 15–17.
3. Ходакова Н. Н., Углова Т. К., Фирсов В. В., Татаринцева О. С. Минеральное сырье Кавказа для производства базальтовых волокон // Ползуновский вестник. Прикладная химия и смежные области. 2013. № 1. С. 138–142.
4. Piscioffa A., et al. Quality assessment of melanocratic basalt for mineral fiber product, Southern Urals, Russia [Оценка качества меланократового базальта и изделий из минерального волокна, Южный Урал, Россия] // Natural Resources Research. 2015. Vol. 24. No. 3. Pp. 329–337.
5. Kochergin A. V., et al. Ways to supply gabbro-basalt raw materials to mineral fiber producers [Способы поставки габбро-базальтового сырья производителям минерального волокна] // Glass and Ceramics. 2013. Vol. 69. No. 11–12. Pp. 405–408.
6. Фомичев С. В., Бабиевская И. З., Дергачева Н. П. [и др.]. Оценка и модифицирование исходного состава габбро-базальтовых пород для получения минеральных волокон и изделий каменного литья // Неорганические материалы. 2010. Т. 46. № 10. С. 1240–1245.
7. Перевозчиков Б. В. Предварительный обзор пригодности базитов северной части Тагильской зоны Урала для высокотехнологичного производства базальтового волокна // Вестник Пермского университета. Геология. 2009. № 11. С. 36–45.
8. Murase T., McBirney A. R. Properties of some common igneous rocks and their melts at high temperature [Свойства некоторых распространенных магматических пород и их расплавов при высокой темпера-

- туре] // Geol. Soc. Amer. Bull. 1973. Vol. 83. Pp. 35–63.
9. Татаринцева О. С., Зимин Д. Е. Особенности плавления горных пород и волокнообразования из расплавов // Ползуновский вестник. 2006. Т. 2. № 2. С. 158–162.
 10. Татаринцева О. С. Прогнозирование вязкости расплавов по химическому составу горных пород // Ползуновский вестник. 2008. № 3. С. 220–223.
 11. Абрамовская И. Р., Айзенштадт А. М., Лесовик В. С. [и др.]. Расчет энергоемкости горных пород как сырья для производства строительных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 10. С. 23–25.
 12. Вешнякова Л. А., Айзенштадт А. М., Фролова М. А. Оценка поверхностной активности высокодисперсного сырья для композиционных строительных материалов // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 2. С. 68–72.

REFERENCES

1. Dzhigiris D. D., Makhova M. F. *Osnovy proizvodstva bazal'tovykh volokon i izdeliy* [Basis of production of basalt fibers and products]. Moscow, Teploenergetik Publ., 2002. 412 p. (In Russian)
2. Tatarintseva O. S., Khodakova N. N. Assessment of the possibility of using rocks of Siberia and the Far East in the production of basalt fibers. *Bazal'tovyye tekhnologii*, 2012, no. 1, pp. 15–17. (In Russian).
3. Khodakova N. N., Uglova T. K., Firsov V. V., Tatarintseva O. S. Mineral raw materials of the Caucasus for the production of basalt fibers. *Polzunovskiy vestnik. Prikladnaya khimiya i smezhnyye oblasti*, 2013, no. 1, pp. 138–142. (In Russian).
4. Pisciotta A., et al. Quality assessment of melanocratic basalt for mineral fiber product, Southern Urals, Russia. *Natural Resources Research*, 2015, vol. 24, no. 3, pp. 329–337.
5. Kochergin A. V., et al. Ways to supply gabbro-basalt raw materials to mineral fiber producers. *Glass and Ceramics*, 2013, vol. 69, no. 11–12, pp. 405–408.
6. Fomichev S. V., Babievskaya I. Z., Dergacheva N. P., et al. Evaluation and modification of the initial composition of gabbro-basalt rocks for the production of mineral fibers and stone casting products. *Neorganicheskiye materialy*, 2010, vol. 46, no. 10, pp. 1240–1245. (In Russian).
7. Perevozchikov B. V. Preliminary review of the suitability of the basites of the northern part of the Tagil zone of the Urals for high-tech production of basalt fiber. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2009, no. 11, pp. 36–45. (In Russian).
8. Murase T., McBirney A. R. Properties of some common igneous rocks and their melts at high temperature. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1973, vol. 83, pp. 35–63.
9. Tatarintseva O. S., Zimin D. E. Features of rock melting and fiber formation from melts. *Polzunovskiy vestnik*, 2006, vol. 2, no. 2, pp. 158–162. (In Russian).
10. Tatarintseva O. S. Forecasting the viscosity of melts according to the chemical composition of rocks. *Polzunovskiy vestnik*, 2008, no. 3, pp. 220–223. (In Russian).
11. Abramovskaya I. R., Ayzenshtadt A. M., Lesovik V. S., et al. Calculation of energy intensity of rocks as raw material for production of building materials. *Promyshlennoe i grazhdanskoye stroitel'stvo*, 2012, no. 10, pp. 23–25. (In Russian).
12. Veshnyakova L. A., Ayzenshtadt A. M., Frolova M. A. Evaluation of the surface activity of highly disperse raw materials for composite building materials. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2015, no. 2, pp. 68–72. (In Russian).

Для цитирования: Дроздук Т. А., Айзенштадт А. М., Махова Т. А., Фролова М. А. Оценка пригодности базальтов для производства минерального волокна // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 7. С. 52–56.

For citation: Drozdyuk T. A., Ayzenshtadt A. M., Makhova T. A., Frolova M. A. Assessment of Suitability of Basalts for Production of Mineral Fiber. *Promyshlennoe i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2018, no. 7, pp. 52–56. (In Russian). ■

ЖУРНАЛ «ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО» ИНДЕКСИРУЮТ:

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА
eLIBRARY.RU

Russian Science Citation
Index (RSCI) на платформе
Web of Science

 **ULRICHSWEB™**
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

САЙТ ЖУРНАЛА «ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»: www.pgs1923.ru