

СТАТЬИ

УДК 539.4:539.3(575.2)

**СУПЕРТОНКИЕ ВОЛОКНА НА ОСНОВЕ АЛЕВРОЛИТА И БАЗАЛЬТА,  
ДОБЫВАЕМЫХ В КЫРГЫЗСТАНЕ**

**Айдаралиев Ж.К., Кайназаров А.Т., Исманов Ю.Х., Абдиев М.С.,  
Атырова Р.С., Сопубеков Н.А.**

*Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры  
им. Н. Исанова, Бишкек, e-mail: i\_yusupjan@mail.ru*

В статье приведен сравнительный анализ физико-химических и физико-технических характеристик супертонких волокон, получаемых из алевролита и базальта. Показано, что использование электродугового метода плавления горных пород имеет ряд преимуществ по сравнению с методом пламенного обжига. Экспериментально обосновано, что количество неволоконистых включений в минеральном холсте сильно зависит от содержания  $Fe_2O_3$  в расплаве. Установлено, что при уменьшении доли  $Fe_2O_3$  и увеличении концентрации  $Si_2O_3$  и  $Al_2O_3$  в расплаве происходит уменьшение количества неволоконистых включений – «корольков» – в формирующемся минеральном холсте. Так как на концентрацию  $Fe_2O_3$  в расплаве влияет тип используемого технологического процесса, то, подбирая его соответствующим образом, можно влиять на степень засоренности волоконного холста неволоконистыми включениями. Сравнительный анализ химического состава и механических свойств супертонких волокон, получаемых из алевролита и базальта, показал, что по всем характеристикам супертонкие волокна на основе алевролита не уступают волокнам, изготовленным из базальта. Сравнение характеристик супертонких волокон из алевролита и базальта показало, что вместо базальтовых супертонких волокон можно использовать алевролитовые волокна при производстве матов и шнуров для теплоизоляции, изоляции оборудования, использующего нагрев (печи, сушильные барабаны, электрофильтры), и охлаждающих камер. Учитывая большие запасы алевролита в Кыргызстане, это направление производства минеральных волокон становится актуальным и весьма перспективным.

**Ключевые слова:** базальт, алевролит, супертонкие волокна из базальта и алевролита, «корольки», горячий пар, сжатый воздух

**SUPERFINE FIBERS ON THE BASIS OF ALEURROLITE  
AND BASALT PRODUCED IN KYRGYZSTAN**

**Aydaraliev Zh.K., Kaynazarov A.T., Ismanov Yu.Kh., Abdiev M.S.,  
Atyrova R.S., Sopubekov N.A.**

*Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov, Bishkek,  
Kyrgyzstan, e-mail: i\_yusupjan@mail.ru*

The article presents a comparative analysis of the physicochemical and physico-technical characteristics of superfine fibers obtained from aleurolite and basalt. It is shown that the use of electric arc method of rock melting has a number of advantages compared with the method of flame heating. It is experimentally substantiated that the amount of non-fibrous inclusions in a mineral canvas strongly depends on the content of  $Fe_2O_3$  in the melt. It has been established that with a decrease in the proportion of  $Fe_2O_3$  and an increase in the concentration of  $Si_2O_3$  and  $Al_2O_3$  in the melt, there is a decrease in the number of non-fibrous inclusions in the forming mineral canvas. Since the concentration of  $Fe_2O_3$  in the melt is influenced by the type of process used, then, by selecting it accordingly, it is possible to influence the degree of contamination of the fiber scrim with non-fibrous inclusions. A comparative analysis of the chemical composition and mechanical properties of superfine fibers obtained from aleurolite and basalt showed that, according to all characteristics, superfine fibers based on aleurolite are not inferior to fibers made of basalt. Comparison of the characteristics of superfine fibers from aleurolite and basalt showed that instead of basalt superfine fibers, aleurolite fibers can be used in the production of mats and cords for thermal insulation, insulation of equipment using heat (furnaces, drying drums, electric filters), and cooling chambers. Given the large reserves of aleurolite in Kyrgyzstan, this direction of the production of mineral fibers becomes relevant and very promising.

**Keywords:** basalt, aleurolite, superfine fibers from basalt and aleurolite, non-fibrous inclusions, hot steam, compressed air

Современные технологии позволяют получать из базальтовых и алевролитовых пород супертонкие волокна различного диаметра и длины. Такие волокна широко используются при изготовлении различных теплоизоляционных изделий, таких как прошивные маты, плиты различной плотности и жесткости [1–3]. Полученные на основе таких технологий изделия обладают высокими теплоизоляционными характеристиками и поэтому широко используются

для теплоизоляции различных сооружений и устройств.

Базальтовые волокна становятся весьма перспективным материалом, если привлечь во внимание большие запасы базальтовых и алевролитовых пород в Кыргызстане и хорошо отработанные технологии получения волокон с помощью электрического нагрева [4].

Большие запасы алевролитового сырья в Кыргызстане предопределили результа-

ты исследования, представляющего собой сравнительный анализ состава и свойств супертонких волокон, полученных из базальта и алевролитового сырья, с целью широкого использования алевролита при производстве супертонкого минерального волокна.

Цель исследования: сравнительный анализ характеристик супертонких волокон из базальта и алевролита, добываемых в Кыргызстане, с целью промышленного производства супертонких волокон на основе алевролита.

### Материалы и методы исследования

Технологический процесс получения супертонких волокон из алевролитового сырья состоит из нескольких этапов.

В отдельном помещении размещают дробильный участок, на котором установлены дробилки марки АД 100/150 для дробления алевролитового сырья до фракции 3–40 мм. После дробления исходное сырье подвозится к мостовому подъемнику, с помощью которого оно подается в бункер, в котором размещены электродуговые печи.

Выбор электродугового метода плавления горных пород, вместо широко используемого способа плавления горных пород методом пламенного обогрева, при котором тепло плавящемуся материалу передается от факела, образующегося при сжигании природного газа над расплавом, обусловлен несколькими причинами. Печи при пламенном обогреве имеют большие габариты, что обуславливает значительные тепловые потери, расход огнеупоров и капитальные затраты [5]. Следовательно, эффективность применения газопламенных печей в минераловатной промышленности невысока.

Использование дополнительного электрического обогрева принципиально отличает процесс теплообмена от процесса, проходящего при пламенном обогреве. Тепло, выделяясь непосредственно в расплаве, подводится к плавящейся шихте снизу. При этом интенсивность процесса плавления резко возрастает. Исследованиями показано, что при использовании дополнительного электроподогрева за счет введения тепла в количестве 10% от общего удается поднять производительность плавильной печи на 30%.

Дополнительным аргументом в пользу использования электрической энергии для плавления горных пород является то, что пропускание электрического тока через расплав позволяет воздействовать на электрические силы взаимодействия молекул в расплаве эффективней, чем традиционными способами подвода тепла. Это позволяет снизить вязкость расплава без повышения его температуры, что, в свою очередь, позволяет уменьшить диаметр получаемого волокна, а также повысить степень однородности расплава [1].

Холст из супертонкого алевролитового волокна получают посредством плавки алевролитового щебня в электродуговой печи при температуре 1400–1500 °С и продувания полученного расплава через дутьевую головку сжатым воздухом. Контроль над распределением теплового поля в зоне плавления осуществлялся интерферометрическим методом [6–7]. Полученное волокно осаждается на сетчатый конвейер вертикальной камеры волоконоохлаждения, в которой создается разрежение воздуха с помощью отсасывающего вентилятора.

Вертикально-дутьевой способ переработки расплава в супертонкое волокно и последующее осаждение волокна в вертикальной камере обеспечивают получение равномерного минерального ковра. При этом размеры холста (минерального ковра) составляют: длина – 2100 мм, ширина – 1500 мм.

При производстве тонкого минерального волокна из горных пород используются в основном два типа технологий [8–10]:

- раздувание струи расплавленной породы горячим паром (РГП);
- раздувание струи расплавленной породы сжатым воздухом (РСВ).

### Результаты исследования и их обсуждение

Химический анализ базальтовых волокон проводился методом силикатного анализа [11]. Определение содержания  $\text{SiO}_2$  проводилось с помощью желатина в азотно-кислой среде. Содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}_3$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  определяли комплексометрическим методом.

Раздельное определение содержания оксидного железа в стекловидных и термообработанных базальтовых волокнах проводилось по методике, разработанной Т.С. Дубровским [11].

На качество материалов на основе волокон из базальта и алевролита значительное влияние оказывает присутствие в волокноном холсте включений неволоконного типа, называемых «корольками» [1–3]. Содержание «корольков» в волокноном холсте в значительной мере определяется конструкцией дутьевой головки, а также типом энергоносителя (горячий сжатый воздух или горячий, сухой водяной пар), который используется при формировании волокон из расплавленных базальта или алевролита (рис. 1–3).

Подробный анализ процесса волоконообразования показал, что на формирование «корольков» влияет не только сам механизм процесса волоконообразования, но и химический состав расплава. Наличие окиси и закиси железа влияет на процесс кристаллизации расплава. Экспериментально установлено, что в процессе кристаллизации происходит восстановление части окислов до металлического железа, и это приводит к уменьшению количества неволоконистых включений – «корольков». Как видно из табл. 2, процентное содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в «корольках» превышает его содержание в волокнах, поэтому уменьшение содержания  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в расплаве приводит к уменьшению количества «корольков» в холсте. Так как степень восстановления металлов сильно зависит от используемого технологического процесса, то, в конечном счете, на засоренность волокноного холста «корольками» сильно влияют технологические факторы.

**Таблица 1**  
Характеристики «корольков», присутствующих в холсте из супертонких волокон, в зависимости от используемой технологии производства и месторождений сырья (базальта и алевролита)

| Параметры «корольков»                             | Месторождение        |                           |                           |
|---|----------------------|---------------------------|---------------------------|
|   | Алевролит, Таш-Булак | Базальт, Сулуу-Терек, РСВ | Базальт, Сулуу-Терек, РГП |
| Объемное содержание «корольков», $\Delta V_m, \%$ | 3                    | 4,5                       | 6,5                       |
| Диаметр «королька», мкм                           | 4                    | 2,5                       | 2                         |
| Длина «королька», мкм                             | –                    | 20                        | 13                        |
| Толщина «королька», мкм                           | 15                   | 7                         | 10,5                      |

**Таблица 2**  
Химический состав базальта и алевролита в различных состояниях и из разных месторождений

| № п/п | Наименование              | SiO <sub>2</sub> | FeO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (разд) | TiO <sub>2</sub> | MnO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ) | ППП   |
|-------|---------------------------|------------------|------|---------------------------------------|------------------|------|--------------------------------|------|------|------------------|-------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------------------|-------|
| 1     | Базальт (Сулуу-Терек)     | 44               | 5,62 | 5,33                                  | 2,30             | 0,20 | 14,80                          | 8,33 | 6,3  | 0,74             | 4,10              | <0,10           | 0,64                          | 11,57                                | 6,79  |
| 2     | Алевролит (Таш-Булак)     | 33,7             | 1,94 | 1,74                                  | 0,48             | 0,10 | 9,25                           | 22,4 | 3,49 | 1,64             | 1,35              | 0,14            | 0,14                          | –                                    | 22,09 |
| 3     | Базальтовый расплав       | 55,2             | 5,4  | 3,94                                  | 1,94             | 0,13 | 15,50                          | 8,40 | 3,7  | 2,10             | 3,26              | <0,10           | 0,41                          | 9,93                                 | <0,30 |
| 4     | Супертонкое волокно (РГП) | 52,0             | 6,05 | 3,13                                  | 2,23             | 0,18 | 16,00                          | 9,82 | 4,2  | 2,15             | 3,10              | <0,10           | 0,47                          | 9,85                                 | <0,30 |
| 5     | Супертонкое волокно (РСВ) | 54,9             | 8,06 | 1,61                                  | 1,59             | 0,20 | 12,00                          | 9,61 | 7,7  | 0,26             | 3,68              | <0,10           | <0,10                         | 10,56                                | <0,30 |
| 6     | Состав «корольков»        | 52,4             | 9,58 | 2,14                                  | 2,31             | 0,17 | 15,00                          | 9,18 | 3,8  | 2,12             | 3,04              | <0,10           | 0,44                          | 12,77                                | <0,30 |

Расчет объемного содержания «корольков» производился точечным методом Салтыкова [12]. Метод представляет собой наложение сетки на изображение, полученное с помощью микроскопа, и подсчет числа узлов наложенной сетки, которые попадают на изображения «корольков». Полученное значение подставляется в формулу

$$\Delta V = (n_1/n) \cdot 100\%,$$

здесь  $\Delta V$  – числовое значение объемного содержания «корольков»,  $n_1$  – численное значение количества узлов сетки, перекрывающих «корольки»,  $n$  – численное значение общего количества узлов сетки.

В табл. 1 представлены усредненные значения характеристик «корольков».

Изменения состава и структуры расплава горных пород приводит к улучшению прочностных и других характеристик материала. Результаты химического анализа приведены в табл. 2.

По данным химического анализа расплава базальта Сулуу-Терека потери при

прокаливании (ППП) составляют 6,79%. При плавлении базальтов улетучиваются легкие компоненты, которые образуются за счет разложения карбонатов, сульфитов, сульфатов металлов. При увеличении температуры до 800 °С закись железа FeO (5,62%) частично переходит в Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,22–4,04%), что приводит к увеличению содержания Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в расплаве. Возможный механизм восстановления железа связан с присутствием CO в атмосфере плавильной печи. Химический анализ показывает, что в составе волокна общее содержание оксида железа уменьшается на 14,86%. Экспериментально установлено, что в процессе плавления базальта происходит частичное восстановление железа из Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> под воздействием технологических факторов. Как результат, на дне печи появляется металлический осадок. Следовательно, за счет улетучивания легких компонентов и восстановления железа увеличивается концентрация SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в составе волокон.

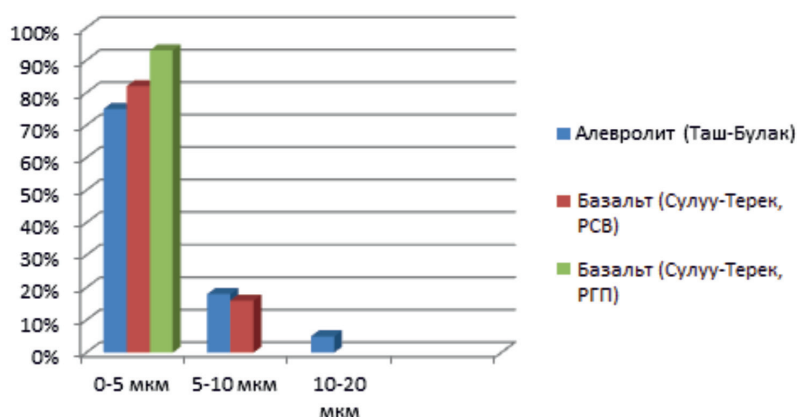


Рис. 1. Зависимость объемного содержания «корольков» от их диаметров

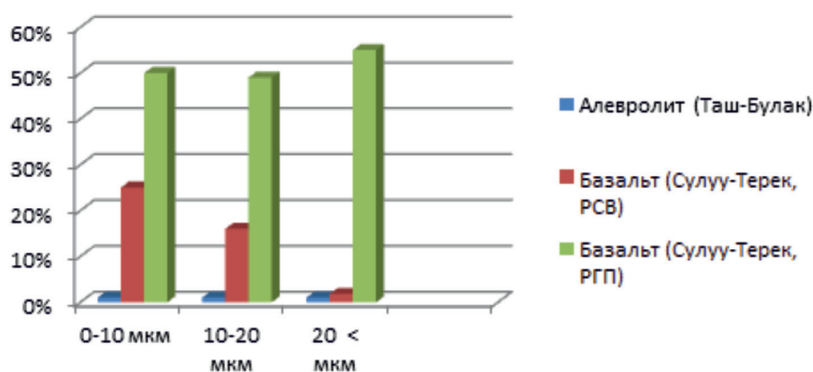


Рис. 2. Зависимость объемного содержания «корольков» от их длин

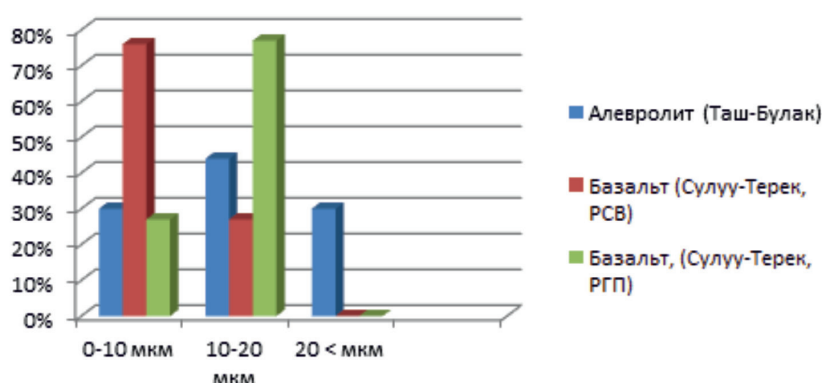


Рис. 3. Зависимость объемного содержания «корольков» от их толщин

Таблица 3

Значения физико-технических характеристик минеральной ваты из алевролита и базальта

| № п/п | Характеристики                                   | Значения              |                     |
|-------|--|-----------------------|---------------------|
|       |  | Алевролитовые волокна | Базальтовые волокна |
| 1     | Диаметр волокон, мкм                             | 1,26–1,27             | 1,5–3               |
| 2     | Температура применения, °С                       | –269 ÷ +700           | –270 ÷ +750         |
| 3     | Температура спекания, °С                         | 1050                  | 1060                |
| 4     | Плотность при давлении 490 Па, кг/м <sup>3</sup> | 35÷75                 | 35–50               |
| 5     | Коэффициент теплопроводности при 25 °С, Вт/м·К   | 0,033÷0,04            | 0,032–0,039         |
| 6     | Гигроскопичность, %                              | 0,5÷1                 | 0,3–0,9             |
| 7     | Показатель водостойкости, л/П                    | 3,5–4                 | 3,5–3,8             |
| 8     | Кислотоустойчивость, %                           | 80–90                 | 85–95               |
| 9     | Паростойкость, %                                 | 90÷99,8               | 95–99               |
| 10    | Коррозионная стойкость к сплавам алюминия        | не корродирует        | не корродирует      |
| 11    | Нормальный коэффициент звукопоглощения           | 0,90÷0,99             | 0,92÷0,99           |
| 12    | Коэффициент фильтрации                           | 0,7÷0,9               | 0,8÷0,9             |

В табл. 3 приводятся значения физико-технических характеристик готовой продукции, изготовленной из алевролитового и базальтового волокон.

Наибольшее значение температуры, при котором еще могут использоваться изделия на основе алевролитовых или базальтовых супертонких волокон, равно +700 °С (электропечи и др.), наименьшее значение температуры равно –269 °С (в холодильных камерах).

Таким образом, по всем характеристикам алевролит, добываемый на месторождении Таш-Булак, удовлетворяет требованиям существующих стандартов и может без ограничения применяться в строительных и других отраслях.

### Выводы

Показано, что использование электродугового метода плавления горных пород

имеет ряд преимуществ по сравнению с методом пламенного обжига.

Экспериментально обосновано, что количество неволоконистых включений в минеральном холсте сильно зависит от содержания Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в расплаве. Установлено, что при уменьшении доли Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и увеличении концентрации SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в расплаве происходит уменьшение количества неволоконистых включений – «корольков» – в формирующемся минеральном холсте. Так как на концентрацию Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в расплаве влияет тип используемого технологического процесса, то, подбирая его соответствующим образом, можно влиять на степень засоренности волоконного холста неволоконистыми включениями.

Сравнительный анализ химического состава и механических свойств супертонких волокон, получаемых из алевролита и базальта, показал, что по всем характеристи-

кам супертонкие волокна на основе алеврита не уступают волокнам, изготовленным из базальта. Учитывая большие запасы алеврита в Кыргызстане, это направление производства минеральных волокон становится актуальным и весьма перспективным.

#### Список литературы

1. Ормонбеков Т.О. Техника и технология производства базальтовых волокон. Бишкек: Илим, 2009. 152 с.
2. Ормонбеков Т.О., Байсалов Э.А., Дубинин Ю.Н. Технология, оборудование и производство базальтовых волокон электрическим плавлением пород. Бишкек: Илим, 2011. 96 с.
3. Спиринов Ю.Л. Справочник по производству теплозвукоизоляционных материалов. М.: Наука, 2010. 432 с.
4. Попенко И.В., Шевченко О.Г. Волокна и теплоизоляционные материалы на их основе. Киев: Укр. НИИТИ, 1985. 32 с.
5. Волгина Ю.М. Теплотехническое оборудование стекольных заводов. М.: Стройиздат, 1982. 276 с.
6. Ismanov Y.Kh., Tynyshova T.D., Aidaraliev Z.K. Wide-range holographic interferometer. *Optical Engineering*. 2018. Vol. 57. No. 12. 124106.
7. Исманов Ю.Х. Интерферометрия на основе метода бесчелювной радужной голографии // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. 2015. № 4 (40). С. 194–198.
8. Ормонбеков Т.О., Дубинин Ю.Н., Айдаралиев Ж.К. Базальтовое волокно и способ его изготовления // Патент на изобретение КР. Кыргызпатент № 1165. 2011.
9. Абдыкалыков А.А., Айдаралиев Ж.К., Дубинин Ю.Н., Кайназаров А.Т. Перспективы применения плазматрона для плавильной печи базальта // Вестник КГУСТА. 2016. Т. 4. № 54. С. 29–34.
10. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 2009. 446 с.
11. Дубровский В.А., Махова М.Ф., Первеева Л.А. Методика определения температуры нижнего предела кристаллизации стекол с помощью дериватографа // Методы исследования технологических свойств стекла. М.: ВНИИЭСМ, 1970. С. 40–43.
12. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М.: Наука, 2009. 376 с.