

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМОВАНИЯ НА ДИАМЕТР И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАЗАЛЬТОВЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ ВОЛОКОН

Н.Н. Ходакова, О.С. Татаринцева

*Показано, что на прочностные характеристики базальтовых волокон большое влияние оказывают условия их формирования, то есть тепловое прошлое, температура, скорость вытягивания, диаметр фильеры и др. Нарушение режима формирования волокон искажает зависимость их прочности от диаметра волокна.*

*Ключевые слова: расплав, вязкость, базальтовые волокна, диаметр, прочность, условия формирования, кристаллизация..*

На прочность волокон большое влияние оказывает метод и условия формирования, тепловое прошлое стекла и, главным образом, состояние поверхности волокна и ее физико-химическое взаимодействие с окружающей средой.

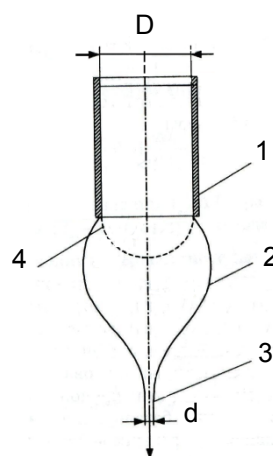
Под воздействием влажного воздуха или воды прочность волокна падает на 15-30 %.

Влияние температурно-временных условий получения расплава (теплого прошлого) на его физико-химические свойства исследовалось нами ранее [1] и было показано, что с повышением температуры плавления с 1450 °С до 2000 °С улучшаются его однородность и вытяжные свойства, прекращаются обрывы волокон и обеспечивается их стабильная вытяжка.

Процесс формирования непрерывных базальтовых волокон можно условно разделить на три стадии: истечение вязкого расплава через отверстие фильеры; вязкая деформация массы расплава под действием приложенных сил; отверждение. При выходе расплава из фильеры расплав образует сферическую поверхность (рисунок 1).

Согласно литературным данным [2], повторный переплав стекломассы при температуре (1620-1640 °С) приводит к значительному повышению гомогенности стекла.

При уменьшении времени натекания капля на фильере скорость охлаждения их возрастает, и показатель их неоднородности также улучшается (неоднородность становится меньше). Однако, если формирование волокна происходит при температуре, близкой к температуре верхнего предела кристаллизации стекломассы  $T_{ВГК}$ , то возможно значительное ухудшение показателя неоднородности.



1 – фильера; 2 – луковица; 3 – вытягиваемое волокно; 4 – сферическая начальная поверхность формирования капли

Рисунок 1. Формирование волокна при фильерном способе его получения.

При формировании волокна на первом участке от среза фильеры до сечения луковицы диаметром 200-300 мкм средняя скорость охлаждения расплава на три порядка меньше скорости охлаждения струи стекломассы на втором участке, где скорость охлаждения резко возрастает в стадии формирования волокон. Скорость охлаждения зависит от диаметра  $d$  получаемого волокна. С увеличением диаметра волокон скорость их охлаждения падает, а при  $d$  более 100 мкм процесс их охлаждения в зоне формирования приближается к режиму охлаждения массивного стекла, то есть чем больше  $d$ , тем меньше скорость охлаждения волокна.

Наиболее опасным местом в зоне формирования, с точки зрения возникновения де-

фектов, является область перехода расплава от первого участка ко второму, где температура стекломассы приближается к температуре кристаллизации стекол. В этих условиях для маловязких, склонных к кристаллизации стекол в зависимости от темпа охлаждения могут наблюдаться ликвационные явления в расплаве стекла, а при значительном снижении скорости охлаждения – кристаллизация стекломассы. Поэтому второй участок формования является опасным с точки зрения возникновения поверхностных дефектов, так как диаметр луковицы на втором участке соизмерим с диаметром получаемого волокна, а величина вязкости стекломассы резко возрастает.

Таким образом, поверхностные микродефекты, возникающие в зоне формования, определяются кристаллизационной способностью расплава и натяжением, возникающим в стекломассе под действием формирующей силы. Степень влияния указанных параметров зависит от скорости охлаждения стекломассы в зоне формования. Повышение скорости охлаждения на втором участке зоны формования позволяет затормозить процесс фазового разделения и рост кристаллов, тем самым уменьшить образование микродефектов на поверхности волокон и повысить их прочность.

Однако увеличение скорости охлаждения расплава влечет за собой нарастание натяжений в стекломассе, что приводит к повышению повреждаемости волокон при выработке и понижению прочности. Поэтому необходимо подобрать оптимальные условия охлаждения, при которых достигается максимальная прочность волокон.

Эффект более высокой прочности волокон по сравнению с массивным стеклом обусловлен более однородной структурой высокотемпературного расплава стекла, из которого вырабатываются волокна, высокой скоростью их охлаждения при вытягивании, предупреждающей образование опасных микродефектов и микротрещин на поверхности волокон в процессе их формования [3].

В настоящей работе исследовано влияние температуры расплава, а также скорости вытяжки (намотки на бобину) на диаметр и прочностные свойства волокон. В качестве сырья для получения базальтовых непрерывных волокон послужили три усредненные технологические пробы метабазальтов Республики Башкортостан (пр. 1, пр. 2 и пр. 3), отличающиеся химическим составом и, как следствие, вязкостью, скоростью твердения

(температурной зависимостью вязкости) и кристаллизационной способностью, оцениваемой по температуре верхнего предела кристаллизации  $T_{\text{впк}}$  (таблица 1).

Таблица 1 - Физико-химические свойства исследуемых расплавов

№	Вязкость, Па·с, при температуре, °С					$T_{\text{впк}}$ , °С
	1250	1300	1350	1400	1450	
1	94	42	22	12	8	1263
2	110	51	30	19	12	1275
3	47	26	15	8	6	1310

Проведенные нами ранее экспериментальные исследования показали, что способностью к дискретному и непрерывному волоконообразованию обладают расплавы, которые имеют вязкость при температуре выработки, равную 10-30 Па·с. Исследуемые расплавы имеют такую вязкость в интервале температур 1350-1400 °С.  $T_{\text{впк}}$  у пр. 1 и пр. 2 имеет обычное для базальтовых расплавов значение. У пр. 3 значение  $T_{\text{впк}}$  довольно высокое, что отрицательно сказывается на температурном интервале вытяжки волокна.

На рисунке 2 представлены экспериментально полученные температурные зависимости диаметра волокна, вытянутого при скорости  $V = 1830$  м/мин с использованием фильеры диаметром  $D = 3,6$  мм, из которых видно, что с ростом температуры расплава в печи диаметр волокна уменьшается, но еще более резко он снижается при уменьшении диаметра фильеры (таблица 2).

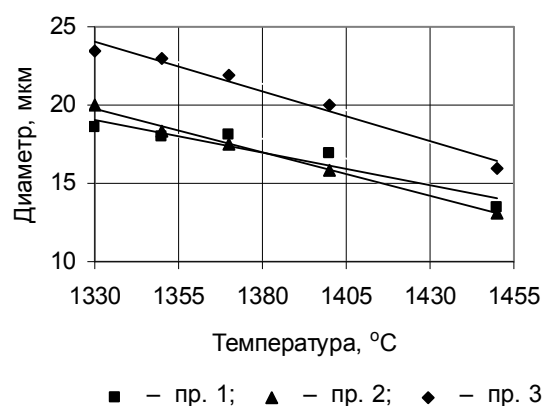


Рисунок 2 - Зависимость диаметра волокна от температуры расплава в печи.

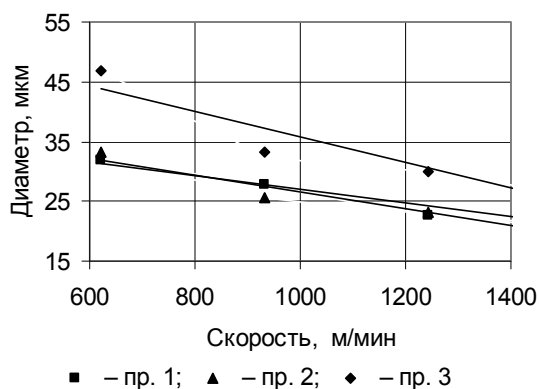
## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМОВАНИЯ НА ДИАМЕТР И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАЗАЛЬТОВЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ ВОЛОКОН

**Таблица 2 - Зависимость диаметра волокна от температуры расплава и диаметра фильеры**

T, °C	Средний диаметр волокна, мкм	
	D = 1,8 мм	D = 3,6 мм
1400	4,7	23,8
1420	4,4	19,6
1450	4,2	12,5

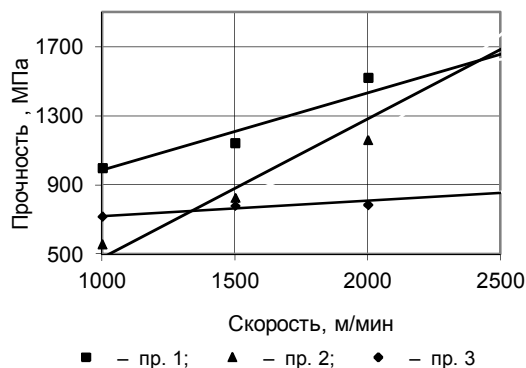
Известно, что с уменьшением диаметра волокна снижается вероятность опасных дефектов на его поверхности [4, 5]. Получение высокопрочных силикатных волокон возможно при оптимальном соотношении скоростей охлаждения и натяжения в расплавленном стекле в зоне их формования.

На диаметр волокна большое влияние оказывает скорость его вытяжки (рисунок 3).



**Рисунок 3 - Зависимость диаметра элементарного волокна от скорости его вытягивания.**

Чем выше скорость вытяжки волокна, тем меньше его диаметр, причем, зависимость эта тем сильнее, чем ниже вязкость расплава. От скорости вытяжки волокна зависит и его прочность (рисунок 4).



**Рисунок 4 - Зависимость прочности волокна от скорости вытяжки.**

При увеличении скорости вытяжки уменьшается диаметр волокна, следовательно, уменьшается количество дефектов в его поверхностном слое и увеличивается прочность волокна, что подтверждается данными, приведенными в таблице 3.

**Таблица 3 - Физико-механические свойства волокон, полученных из расплавов с T = 1300 °C**

№ пробы	V, м/мин	d, мкм	P, гс	σ, МПа
1	621	31,9	79,5	1000
	932	27,9	59,1	966
	1243	22,7	62,4	1569
	1554	21,4	51,5	1373
2	621	33,2	47,5	558
	932	25,7	42,6	827
	1243	23,2	45,5	1090
	1554	19,6	53,8	1801
3	621	46,9	104,3	719
	932	33,2	67,2	781
	1243	30,0	56,8	739
	1554	25,6	45,6	866

*Примечание: P – разрывная нагрузка волокна, σ – разрушающее напряжение волокна.*

Из всего вышеизложенного видно, что с увеличением температуры на 100 °C при постоянной скорости намотки диаметр волокна уменьшается в 1,3-1,4 раза для фильеры с отверстием 1,8 мм и в 1,5-1,9 раз для фильеры с отверстием 3,6 мм. При повышении скорости вытягивания волокна в 2-2,5 раза диаметр его уменьшается в 1,7-2,1 раза.

У маловязких стекол (пр. 3) уменьшение диаметра от скорости намотки больше, чем у более вязких (пр. 1 и пр. 2) из-за увеличения дебита стекломассы (количества расплава, протекающего через фильеру в единицу времени).

На прочностных показателях волокон сказывается также влияние масштабного фактора: с ростом диаметра волокна снижается его прочность.

Таким образом, проведенные экспериментально-теоретические исследования показали, что условия формования (температура, скорость вытягивания, диаметр фильеры) оказывают большое влияние на прочность волокон, поэтому нарушение режима формования волокон может искажать зависимость их прочности от диаметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Татаринцева О.С., Ходакова Н.Н. Влияние условий получения базальтовых стекол на их физико-химические свойства и температурный интервал выработки непрерывных волокон // Физика и химия стекла. – 2012. – № 1, т.38 – С. 89-95.
2. Стеклообразное состояние. / Труды третьего Всесоюзного совещания. Ленинград, 16-20 ноября 1959 г. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. – 534 с.
3. Асланова М.С. Влияние различных факторов на механические свойства стеклянных волокон // Стекло и керамика. – 1960. – № 11. – С. 10-15.
4. Стеклянные волокна / Под ред. М.С. Аслановой. – М.: Химия, 1979. – 256 с.
5. Зак А.Ф. Физико-химические свойства стеклянного волокна. – М.: Ростехиздат, 1962. – С. 252-255.

**Ходакова Н. Н.** - старший научный сотрудник лаборатории материаловедения минерального сырья Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), *labmineral@mail.ru*, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел.(3854)30-59-06.

**Татаринцева О.С.** - д-р техн. наук, доцент, зав. лабораторией материаловедения минерального сырья Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), *labmineral@mail.ru*, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел.(3854)30-58-82.