

УДК 678. 046

## СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУР СТЕКЛЯННЫХ ВОЛОКОН, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

**А. С. БОРОДУЛИН**

МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
e-mail: asb@emtc.ru

*Приведен обзор свойств различных типов стеклянных волокон, стеклотканей, стекломатов и стеклолент, используемых при производстве изделий из стеклопластиков и полиармированных композиций. Исследована структура стеклянных волокон различных типов.*

**Ключевые слова:** непрерывные стеклянные волокна, стекломаты, аппрет, стеклопластики, полимерные композиционные материалы.

**П**ри изготовлении различных деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) все более широкое распространение получают полиармированные материалы, к которым относятся ПКМ, состоящие из одной матрицы с распределенными в ней армирующими компонентами различных видов. В этом случае возможны следующие варианты [1, 2]:

- 1) волокна различных типов могут быть равномерно распределены в первичной нити;
- 2) ткань может состоять из различных нитей;
- 3) возможно чередование слоев листовых армирующих материалов с различными волокнами по слоям.

При получении полиармированных ПКМ широкое распространение получили стеклянные волокна, которые получили широчайшее применение при изготовлении стеклопластиков. По сравнению с другими типами волокон, например, с углеродными, стеклянные уступают им по многим показателям, тем не менее их невысокая стоимость привела к тому, что по объему потребления стеклянные волокна существенно опережают все остальные типы волокнистых наполнителей.

Первым творцом стеклянных волокон была природа. При извержении вулканов капли лавы, подхваченные сильными порывами ветра, вытягивались в длинные волокна. Именно такие стеклянные нити были обнаружены около Везувия. Позже, тонкие стеклянные нити использовали для украшения посуды. Массовое производство стеклянного волокна было начато в США в 1937 г.

Стеклянные волокна получают высокоскоростной вытяжкой из однородной стекловидной массы, представляющей собой сплав различных оксидов [3], например,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  и др.

К преимуществам стеклянных волокон относятся:

- 1) низкая стоимость;
- 2) хорошая теплостойкость;
- 3) устойчивость к химическому и биологическому воздействию;
- 4) высокая прочность предел прочности при сжатии 3500 МПа;
- 5) низкая теплопроводность;

Общим недостатком всех стеклянных волокон является:

- 1) малое удлинение и как его следствие, хрупкость;
- 2) нестойкость к истиранию;
- 3) большая плотность 2500 кг/м<sup>3</sup>
- 4) низкая стойкость к атмосферной влаге (влаге разрыхляет поверхность волокна и поэтому для его защиты используются различные аппреты).

Все стеклянные волокна условно можно разделить на два больших класса (табл. 1, 2): относительно дешевые волокна общего применения (стекловолокно марки *E*) и дорогостоящие волокна специального применения (*S* — высокой прочности, *C* — высокой химической стойкости, *M* — с высоким модулем упругости, *AR* — щелочестойкие, *ECR* — устойчивые в агрессивных средах и т.д.) [4–7].

Для производства изоляционных ПКМ применяется только бесщелочное (или малощелочное) алюмосиликатное или алюмоборосиликатное стекловолокно. Для конструктивных

\* Отдельные результаты настоящей работы получены при финансовой поддержке по проекту № 16.523.11.3012.

## 1. Свойства стеклянных волокон

Свойство	Тип волокна					
	<i>E</i> (с бором)	<i>E</i> (без бора)	<i>S</i>	<i>AR</i>	<i>ECR</i>	Базальт
Температура размягчения, °С	830—860	916	1056	—	880	1100—1200
Температура плавления, °С	1066—1077	1200	1500	1180—1200	1159—1166	1200—1300
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,54—2,55	2,62	2,48—2,49	2,6—2,7	2,66—2,68	2,67
Коэффициент линейного расширения, 10 <sup>6</sup> С <sup>-1</sup>	4,9—6,0	6	2,9	7,5	5,9	—
Прочность, МПа	3100—3500	3100—3500	4380—4590	3100—3500	2800—3000	2700—3500
Модуль упругости, ГПа	76—78	80—81	88—91	72—74	80—83	70—90
Удлинение до разрыва, %	4,5—4,9	4,6	4,5—4,9	2,0—2,4	4,5—4,9	3

## 2. Сравнительные характеристики стеклянных волокон

Показатель	Стекло ВМП	Стекло <i>E</i>
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2580	2540
Прочность при растяжении, ГПа	4200	3400
Модуль упругости при растяжении, ГПа	95	72
Коэффициент Пуассона	0,25	0,24
Коэффициент линейного термического расширения, 10 <sup>6</sup> (1/°С)	3,5	5,5
Температура размягчения, °С	945	840

стеклопластиков, как правило, используют бесщелочное магнийалюмосиликатное или алюмосиликатное стекловолокно. Для стеклопластиков неотчетливого назначения можно использовать и щелочесодержащее стекловолокно. Самую большую прочность имеют непрерывные стекловолокна из бесщелочного и кварцевого магнийалюмосиликатного стекла. Повышенное содержание щелочей в исходном стекле значительно снижает прочность стекловолокон.

Механические свойства обоих видов волокон на основе *E*-стекла почти одинаковы. Прочность на разрыв составляет от 3100 до 3500 МПа. Однако модуль упругости у волокон без оксида бора несколько выше (80—81 ГПа), чем у обычных волокон (76—78 ГПа). Основным отличием стекловолокон марки *E* без бора является более чем в семь раз большая кислотостойкость [8]. По своей кислотостойкости эти волокна приближаются к химически стойким волокнам на основе *ECR* стекла. Плотность борсодержащих стеклянных волокон несколько ниже (2,55 г/см<sup>3</sup>) по сравнению со своим экологически чистым аналогом (2,62 г/см<sup>3</sup>). Структура обычных стеклянных волокон марки *E* и волокон, в состав которых входит оксид бора показаны на рис. 1, 2. Плотность *E*-стекла выше, чем у стекол других типов (за исключением *ECR*-стекла).

Стекловолокно марки *S* (ВМП) обладает рекордными значениями прочности и модуля упругости для данного класса материалов. Лучшая продукция из *S*-стекла близка по своему качеству углеродному волокну. Прочность волокон при комнатной температуре составляет 4380/4590 МПа, модуль упругости — 88—91 ГПа, прочность лучших образцов волокна марки ВМП до 7000 МПа.

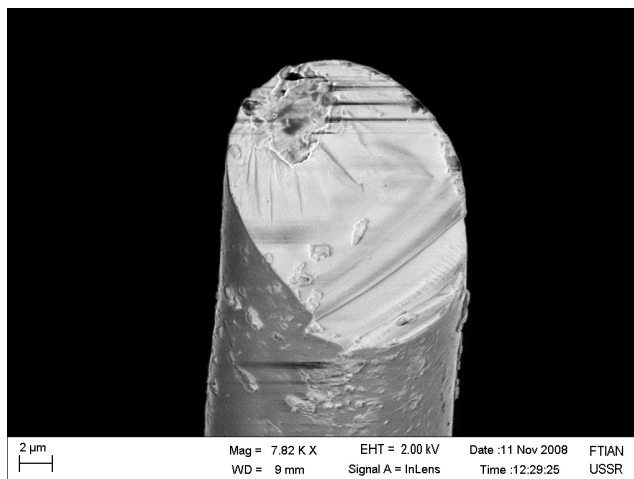


Рис. 1. Структура стеклянных волокон марки *E* (без оксида бора) РЕДАКТОРУ. Предоставьте эл. версию рис.

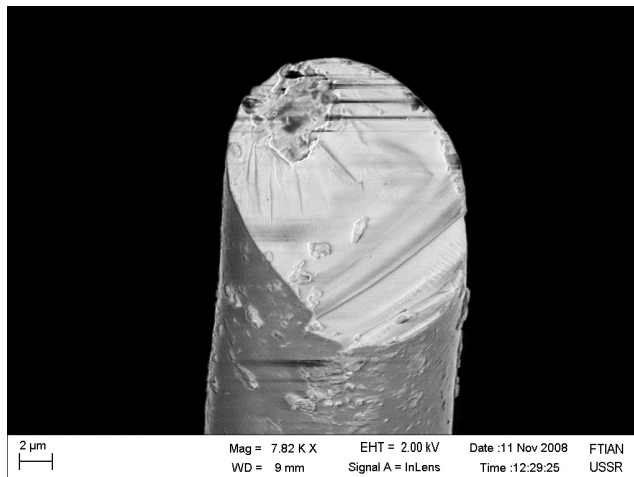


Рис. 2. Структура стеклянных волокон марки *E* (с оксидом бора)

### 3. Марки стеклянных тканей

Марка ткани	Количество нитей на 1 см, н/см	Вид переплетения ткани	Вид замасливателя и аппретирующего вещества	
			Основа	Уток
T-10	36 + 1	20 ± 1	Сатин 8/3	№ 14, парафиновая эмульсия
T-10 (ВМП)	36 + 1	20 ± 1	Сатин 8/3	№ 14, № 4с
T-25 (ВМП)	10 + 1	6 ± 1	Полотняное	№ 78, № 14, парафиновая эмульсия
T-50 (ВМП)	24 ± 1	18 ± 1	Двухосновная ткань	78
T-60 (ВМП)	28 + 1	6 ± 1	Полотняное	№ 14
T-15	24 + 1	18 ± 1	Сатин 5/3	№ 76
T-45	22 + 1	16 ± 1	Сатин 5/3	№ 76

### 4. Физико-механические показатели стеклянных тканей

Марка ткани	Номинальная масса единицы площади, г/м <sup>2</sup>	Номинальная толщина ткани, мм	Разрывная нагрузка Н, не менее	
			Основа	Уток
T-10	290	0,23	2450—2940*	1323—1568*
T-10 (ВМП)	310	0,25	3136	1764
T-25 (ВМП)	365	0,25—0,30*	3920—4410*	294—343*
T-50	360 ± 30	0,31 ± 0,03	4704	686
T-60	235 ± 15	0,22	2546	—
T-15	160 ± 16	0,19 ± 0,03	785	687
T-45	216 ± 16	0,26 ± 0,03	1176	784
T-64 (ВМП)	95 ± 5	0,085—0,010	882	490

Примечание: \* В зависимости от типа замасливателя

Прочность на разрыв волокон на основе AR-стекла довольно низка и составляет около 1500—1700 МПа. Модуль упругости 72—74 ГПа.

Такие волокна самые тяжелые среди всех видов стекловолокна, их плотность составляет около 2,7 г/см<sup>3</sup>. Основной характеристикой таких волокон является их устойчивость в щелочной среде. Потеря массы после кипячения в насыщенном растворе NaOH для волокон на основе AR-стекла составляет 2—3%. Для сравнения эта же характеристика для базальтовых волокон составляет 6—7% [9, 10].

Стекловолокно ECR было разработано специально для использования в агрессивных средах, например устойчивость в кислых средах в 4—5 раз выше. При этом прочность этих волокон остается на уровне стекловолокна E и составляет порядка 2800—3000 МПа, модуль упругости около 80—83 ГПа. Несмотря на то, что плавление и выработка волокон из ECR проводят при более низких температурах его стоимость превышает стоимость стекловолокна E из-за наличия дорогих компонентов [11].

Основные марки стеклянных тканей, их строение, виды замасливателей и аппретирующих

### 5. Физико-механические показатели стеклянных ровингов

Наименование показателя		Норма для ровинга, предназначенного для			
		рубки — Р	намотки — Н	ткачества — Т	
Допускаемое отклонение по линейной плотности от номинальной плотности, %:	для среднего значения	±7	±5	±5	
	для единичного значения	±16	±11	±11	
Массовая доля влаги, не более, %		0,2	0,3	—	
Массовая доля замасливателя, %:	замасливатель «парафиновая эмульсия»	Не более 1,0	Не более 2,0	Не более 2,0	
	прямые замасливатели (кроме 14 и 30)	Не менее 0,3	Не менее 0,3	Не менее 0,3	
	замасливатели 14 и 30	Не менее 0,3	Не менее 0,3	Не менее 0,3	
Удельная разрывная нагрузка ровинга. мН/текс (гс/текс), не менее:	из стекла типа E	—	396 (40)	245 (25)	
	из стекла типа R:	10 мкм	—	559 (57)	—
		13 мкм	—	480 (49)	—
		19 мкм	—	431 (44)	—
	из стекла типа S:	10 мкм	—	571 (58)	—
		13 мкм	—	490 (50)	—
19 мкм		—	441 (45)	—	
Жесткость, мм, не менее		80	—	—	
Провисание, мм, не более		—	60	120	

составов, применяемые при изготовлении стеклопластиков конструкционного назначения приведены в табл. 3, физико-механические показатели тканей представлены в табл. 4.

При получении непрерывных стеклянных волокон используют два основных типа замасливателя:

1) технологические замасливатели, которые предотвращают механическое повреждение волокна при текстильной переработке;

2) гидрофобно-адгезионные замасливатели, образующие на поверхности волокна прочные покрытия.

Перед нанесением связующего технологические замасливатели, как правило, удаляют. Парафино-эмульсионный замасливатель, который относится к технологическим замасливателям, приводит к уменьшению прочности на 12...25%.

Основные физико-механические показатели ровингов из стеклянных комплексных (сложенный ровинг) или элементарных нитей (прямой ровинг) для изготовления тканых и нетканых материалов представлены в табл. 5. Характеристики тканей производства ОАО «НПО Стеклопластик» представлены в табл. 6.

#### 6. Ткани из стеклянных полых волокон

Марка ткани	Ширина, мм	Толщина, мм	Масса единицы площади, г/м <sup>2</sup>	Переплетение
T-45 (П)	950	0,26	216	Сатин 5/3
T-15 (П)	950	0,19	160	Сатин 5/3
T-С 8/3 (П)	950	0,26	205	Сатин 8/3

Технология изготовления материалов из стеклянных волокон должна быть таковой, чтобы

они не подвергались истиранию и изгибу (т.е. по возможности необходимо исключить текстильные и ткацкие процессы).

При изготовлении стеклопластиков следует учитывать, что чем тоньше и равномернее пленка связующего, тем выше прочность ПКМ. Для тонких волокон (7—8 мкм), толщина пленки отвержденного связующего должна составлять 0,2—0,4 мкм (т.е. 2,5%).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуртовник И.Г. и др., Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. М.: Мир, 2002. 368 с.
2. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. «НОТ», 2008. 820 с.
3. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы. М.: «Логос», 2006. 400 с.
4. Комков М.А., Тарасов В.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения: учеб. пос. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 431 с.
5. Горбаткина Ю.А., Иванова-Мумжиева В.Г., Путятина А.С., Ульянова Т.М. Прочность границы раздела в соединениях дисперсно-наполненных эпоксидных связующих с волокнами // Механика композитных материалов. 2007. Т. 43. № 1. С. 3—14.
6. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении // Научные редакторы А.Г. Братухин, В.С. Боголюбов, О.С. Сироткин. М.: Готика, 2003. 516 с.
7. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. М.: Техносфера, 2004. 408 с.
8. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. «НОТ», 2008. 820 с.
9. Хозин В.Г. Усиление эпоксидных полимеров. Казань: Изд-во ПИК «Дом печати», 2004. 446 с.
10. Коган Д.И., Попов Ю.О., Хрульков А.В. «Разработка материалов и технологии получения однонаправленных препрегов теплостойких материалов на основе арамидных, стеклянных и других жгутовых наполнителей и растворных, расплавных и клеевых связующих» // Отчет о научно-технической деятельности ФГУП «ВИАМ» за 2006 г. (Сборник реферативных статей). М.: ВИАМ, 2007. С. 229—231.
11. Гутников С.И., Лазорьяк Б.И., Селезнёв А.Н. Стеклянные волокна. Учеб. пос. для студентов по специальности «Композиционные наноматериалы». М.: Изд-во МГУ имени М.В. Ломоносова, 2010. 68 с.