

Киселева К.И., Агафонова О.А.,  
Клименко Н.Н., Киенская К.И., Нистратов А.В.  
(РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва)

## **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЩЕЛОЧЕАКТИВИРОВАННОГО ДОМЕННОГО ШЛАКА, АРМИРОВАННОГО ВТОРИЧНЫМ УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ**

В последнее время большое внимание уделяется разработке и исследованию «зеленых» композитов на основе щелочеактивированных природных и техногенных материалов кальций- и алюмосиликатного состава [1]. Основным экологическим преимуществом таких материалов является значительное снижение выбросов углекислого газа (до 80 %) по сравнению с производством обычного портландцемента.

Щелочеактивированные материалы, как и традиционные вяжущие, имеют относительно низкую прочность на растяжение и изгиб. Один из способов преодоления указанного недостатка – использование волокна в качестве армирующей добавки [2]. Механические характеристики армированных волокном щелочеактивированных композитов будут определяться параметрами исходных материалов (как самих волокон, так и цементирующей матрицы) и результатом их взаимодействия.

Известно, что углеродное волокно обладает уникальным комплексом физико-механических и функциональных свойств, благодаря которым широко применяется для армирования композиционных материалов. Практически единственным его недостатком является высокая стоимость. Вторичные углеродные волокна (ВУВ), извлеченные из отходов углепластика для повторного использования, могут стать недорогой и экологичной альтернативой углеродному волокну.

Целью данной работы является разработка дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе щелочеактивированного гранулированного доменного шлака с добавлением вторичного углеродного волокна.

Для достижения высоких прочностных характеристик композитов на основе щелочеактивированного доменного шлака необходимо добиться однородного распределения волокна в матрице и повысить уровень физико-химического взаимодействия на границе раздела между матрицей и вторичным углеродным волокном. Поскольку решающую роль в образовании адгезионных контактов между матрицей и волокном играет смачиваемость волокна, для повышения диспергируемости и улучшения смачивания волокон использовали два вида

ПАВ: 1) катионные -  $C_8H_{20}BrN$  тетраэтиламмоний бромистый и 2) анионные - додецилсульфат натрия.

Оценку влияния вида ПАВ на повышение смачивания ВУВ проводили путем исследования физико-механических свойств дисперсно-армированного композита на основе щелочеактивированного гранулированного доменного шлака при двух концентрациях волокна (0,7 и 1 об. %).

Для синтеза композита использовали гранулированный доменный шлак ПАО «Тулачермет» (ГОСТ 3476–74, ТУ 14-127-269–2008), кварцевый песок ОАО «Раменский ГОК» (ГОСТ 22551–77) и натриевое жидкое стекло ЗАО «Скопинский строительный комбинат» (ГОСТ 13078–81) с силикатным модулем  $SiO_2/Na_2O = 1$  и плотностью  $1400 \text{ кг/м}^3$ . Химический состав используемого гранулированного доменного шлака приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав используемого гранулированного доменного шлака по данным ПАО «Тулачермет»

Оксид	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	S <sub>общ</sub>
Содерж., мас. %	44,90	35,79	10,31	6,89	—	0,22	—	1,89

В качестве армирующего наполнителя использовали вторичное рубленое углеродное волокно (рис. 1а), полученное из отходов углепластика путем выжигания связующего в окислительных условиях (на воздухе) при температуре  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ .

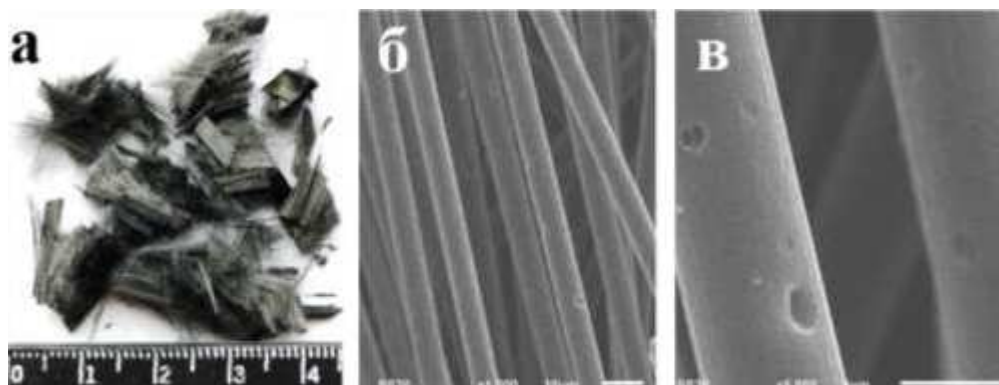


Рис. 1. Внешний вид (а) и морфология (б, в) вторичного рубленого углеродного волокна (СЭМ: б – шкала 10 мкм; в – шкала 5 мкм)

Щелочеактивированный материал получали на основе тонкомолотой смеси ( $S_{уд}=500 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) природного кварцевого песка и гранулированного доменного шлака, активированных жидким стеклом. Для получения композиционного материала ВУВ вводили в раствор жидкого стекла с ПАВ в концентрациях 0,7 и 1 % по объему, поскольку при более высоких концентрациях значительно затрудняется равно-

мерное распределение волокна в матрице. Состав сырьевой смеси приведен в таблице 2.

Таблица 2. Состав сырьевой смеси для получения композитов

Сырьевые материалы	Содержание, мас. %	
Доменный шлак	65	
Кварцевый песок	15	
Натриевое жидкое стекло	20	
+ ПАВ*	ДДСNa	C <sub>8</sub> H <sub>20</sub> BrN
Вторичное углеродное волокно	0,7 об. %	1 об. %

\*0,04 М р-р ПАВ: 1) додецилсульфат натрия (ДДСNa); 2) тетраэтиламмоний бромистый (C<sub>8</sub>H<sub>20</sub>BrN)

Образцы в форме кубов и балок получали методом прессования с последующей тепловлажностной обработкой при температуре 95±5 °С в течение 6 ч. Отвержденные композиты подвергли физико-механическим испытаниям: определили прочность при сжатии и изгибе, открытую пористость (По, %), водопоглощение (W, %) и среднюю плотность (табл.3).

Для всех композитов, независимо от вида ПАВ, наблюдается тенденция к повышению прочности на изгиб и снижению открытой пористости с увеличением концентрации волокна, что может свидетельствовать о положительном эффекте влияния ПАВ на смачивание волокна и быть предпосылкой к дальнейшему повышению содержания волокна в композите. Значения прочности на изгиб, открытой пористости и водопоглощения демонстрируют явное преимущество составов с использованием тетраэтиламмония бромистого в качестве ПАВ для модифицирования ВУВ.

Таблица 3. Физико-механические свойства композитов

Шифр серии	Прочность		По, %	W, %	ρ, г/см <sup>3</sup>
	на изгиб, МПа	на сжатие, МПа			
КМ_0,7ВУВ_ДДСNa	2,2	47	16,8	8,1	2,24
КМ_1ВУВ_ДДСNa	3,9	22	15,4	7,4	2,23
КМ_0,7ВУВ_С <sub>8</sub> Н <sub>20</sub> BrN	9,3	27	11,2	5,5	2,16
КМ_1ВУВ_С <sub>8</sub> Н <sub>20</sub> BrN	9,9	26	10,8	5,3	2,14

По результатам оптической микроскопии (рис. 2а, б, г, д) можно заключить о довольно однородном распределении волокон, случайным образом ориентированных в матрице, независимо от вида ПАВ.

Однако в единичных образцах (рис. 2в, е) наблюдаются отдельные пучки волокон, что свидетельствует о необходимости дальнейшего усовершенствования технологии их введения в композит.

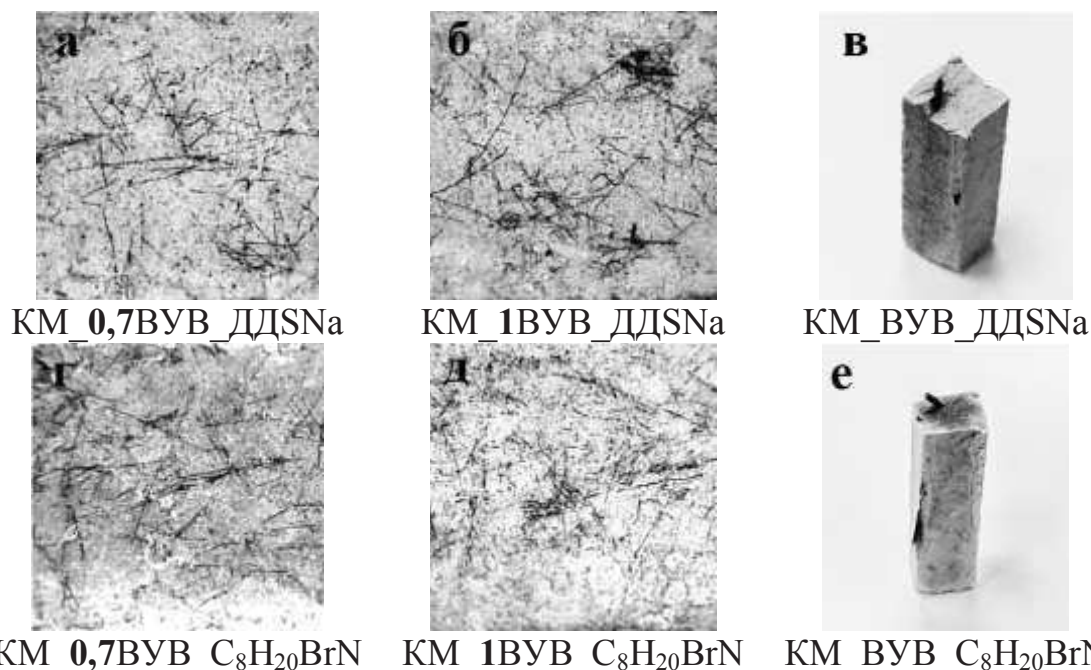


Рис. 2. Морфология поверхности (а, б, г, д) и внешний вид (в, е) образцов композитов

Таким образом, в работе исследовали влияние концентрации вторичного углеродного волокна на физико-механические свойства дисперсно-армированных композитов на основе щелочеактивированного гранулированного доменного шлака, а также влияние вида ПАВ на смачивание и однородность распределения волокна в матрице. Установили, что при использовании ПАВ с повышением концентрации волокна с 0,7 до 1 об. % физико-механические свойства демонстрируют тенденцию к увеличению. Наибольший эффект наблюдается случае использования в качестве ПАВ тетраэтиламмония бромистого.

Работа выполнена при финансовой поддержке РХТУ им. Д.И. Менделеева. Номер проекта Г-2020-023.

#### ЛИТЕРАТУРА

1.Karuppanan Gopalraj S., Kärki T. A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis // Appl. Sci. Springer International Publishing, 2020. Vol. 2, №3. P. 1–21.

2.Adesina A. Performance of fibre reinforced alkali-activated composites – A review // Materialia. Elsevier B.V., 2020. Vol. 12, № April.