

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.172.22:677.5

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН

© Г. Е. Мостовой, Т. Д. Фирсова¹

Статья поступила 20 января 2014 г.

Представлены результаты испытаний на растяжение непрерывных базальтовых волокон (НБВ), полученных в экспериментальной электропечи. В исследованном диапазоне изменения диаметров 7,2 – 21,6 мкм показана возможность значимой линейной интерпретации масштабных зависимостей механических характеристик от диаметра волокон: для предела прочности коэффициент корреляции $r(\sigma_p, d) = (-0,70)$, для предельной деформации $r(\varepsilon_{пр}, d) = (-0,48)$, для модуля упругости $r(E, d) = (-0,44)$. Выявленные различия в масштабных зависимостях объясняются особенностями радиальной анизотропии структуры волокон и различием влияния дефектов на механические характеристики в зависимости от их расположения в радиальном направлении. Указанные факторы влияют также на корреляционные связи между механическими характеристиками НБВ: корреляция между пределом прочности и предельной деформацией составляет +0,88, между пределом прочности и модулем упругости — (+0,35) (значимое значение), тогда как между модулем упругости и предельной деформацией практически отсутствует — $r(E, \varepsilon_{пр}) = -0,02$. Диаграммы деформирования исследованных НБВ, в отличие от стеклянных и углеродных волокон, характеризуются ломаными прямыми, точка перегиба которых составляет $(0,4 - 0,6)\sigma_p$. Выявленные взаимосвязи позволяют оптимизировать технологический процесс для производства высокопрочных НБВ.

Ключевые слова: жаропрочность; базальтовые волокна; композиционные материалы; комплексная нить; фильерный узел; филаменты; коэффициент корреляции.

Базальтоволокнистые композиционные материалы — новый вид материалов, которые по многим параметрам составляют серьезную конкуренцию стекло- и углепластикам при изготовлении изделий разнообразного технического назначения [1 – 7].

Технология получения непрерывных базальтовых волокон была разработана в 1960-е годы на базе технологии создания стеклянных волокон [3]. Сырьем для их получения являются горные породы, состав которых имеет следующие соотношения компонентов, % масс.: 43 – 58 SiO_2 ; 11 – 20 Al_2O_3 ; до 16 FeO + Fe_2O_3 ; 7 – 13 CaO ; 4 – 12 MgO ; до 4 Na_2O + K_2O .

Расплавление базальтового сырья обычно проводят в печах, работающих на газовом и жидком топливе, что создает экологические проблемы и затрудняет организацию данного производства в регионах, удаленных от газовых магистралей. В 2001 г. в «НИИГрафит» совместно с НПК «Терм» было впервые разработано и внедрено оборудование производительностью 50 тонн в год комплексной базальтовой нити с экологически безопасным электрическим нагревом печи.

Электропечь для плавления базальта представляет собой стальную ванну прямоугольной формы с огне-

упорной футеровкой и теплоизоляцией. Ванна состоит из двух зон: плавильной (варочной) и выработочной (фидерной) с индивидуальной системой электропитания, регулирования и управления.

Базальтовое сырье загружают в печь через загрузочное окно в перекрытии плавильной зоны. Из плавильной зоны расплав поступает в выработочную часть электропечи. Нагрев плавильной и фидерной зон осуществляется двумя группами нагревателей: силикатными, размещенными под сводом печи, и молибденовыми, расположенными в расплаве. Температура в печи достигает 1400 – 1450 °С. Из фидерной зоны через донное отверстие под действием гидростатического давления расплав поступает в фильерный узел. Последний имеет на выходе калиброванные отверстия, через которые вытягивается соответствующее числу фильер количество элементарных волокон (филаментов), отверждающихся в холодильнике. Фильерный узел изготовлен из платинородиевого сплава, нагрев его осуществляется прямым пропусканием электрического тока.

Волокна формируются из вязкого силикатного расплава, вытекающего из фильер в виде капель. Оператор формирует филаменты в комплексную нить (в данном случае комплексная нить содержала 200 фи-

¹ ОАО «НИИГрафит», Москва, Россия;
e-mail: mostovoy.gennady@yandex.ru

Таблица 1. Механические свойства непрерывных базальтовых волокон

Номер бобины	d , мкм	ν_d , %	σ_b , МПа	ν_σ , %	E , ГПа	ν_E , %	$\varepsilon_{пр}$, %	ν_ε , %
1,1	12,3	12	2737	32,7	76	11,3	4,19	36,3
1,2	13,4	18,6	2933	28,4	84,2	8,6	4,01	31,2
1,3	13,6	15,6	2560	33,6	79,9	8,8	3,63	35,3
1,4	13,1	15,5	2504	27,7	73,6	10,9	3,79	29,8
1,5	13,9	9,9	2838	18,5	82,6	10,5	4,53	27,2
2,1	11,2	20,7	2666	30,3	77,4	10,9	3,81	30,2
2,2	12,3	12,8	3588	25,5	79,8	9,5	5,6	23,8
2,3	12,6	14,9	2913	26,9	77,5	10,2	4,34	26,3
2,4	12,7	13,8	3403	13,3	76,6	11,5	5,45	20
2,5	11,3	16,5	2977	24,8	81,4	11,9	4,2	31,4
3,1	13,2	13,6	2844	25,7	72,4	11,5	4,91	30,5
3,2	12,6	19,8	2636	34,7	66,7	16	5	36
3,3	12,3	17,8	2729	35,2	73	8,9	4,6	41,3
3,4	12,2	11,5	2545	22,6	68,3	13,6	4,2	23,8
3,5	11,9	19,3	3219	23,9	76,8	11,6	5,08	27,4
3,6	11,3	12,4	2563	23,5	66,2	10	4,34	26
4,1	14,1	19,1	3112	10,2	83,9	4,9	4,42	18,3
4,2	14,7	16,3	2719	20,2	78,4	10,1	4,07	23,1
4,3	12,7	18,9	2443	23,8	79,9	12,5	3,61	27,7
4,4	14,1	24,1	2618	35,5	79,8	14,2	3,9	32,8
4,5	13,4	18,7	2756	22	83,1	11,1	4,14	26,6
4,6	12	20	2491	20,8	76,3	11,8	3,75	20,2
5,1	15,8	15,3	2200	29,3	76,6	9,3	3,28	22,6
5,2	12,5	18	2345	22,3	75,5	8,3	3,71	27,8
5,3	14,5	17,9	2160	29,6	71,8	14,8	3,44	29,4
6,1	13,1	14,5	3141	14,4	82,2	9	4,88	17,2
6,2	13,6	16,2	2732	25,2	84,1	12,1	4,26	26,3
6,3	14	17,1	2215	27,1	75,4	10,1	3,29	27,1
6,4	12,7	18,9	2741	23,6	75,1	13,2	3,97	22,9
6,5	13,8	15,9	2950	38	74,1	12,7	3,98	37,3
6,6	13,1	18,3	2709	28,5	77,1	12,6	4,16	31,7
7,1	12,3	12	2737	32,7	76	11,3	4,19	36,3

ламентов). Нить подается на нитесборник замасливающего устройства, где на элементарные волокна наносится замасливатель, придающий нити эластичность, необходимую для намотки на бобину и последующей текстильной переработки в ровинг (некрученный жгут из необходимого числа комплексных нитей), сетки, ткани.

В данной работе исследовали 30 бобин непрерывного базальтового волокна (НБВ) из шести партий, полученных на опытной установке с электронагревом, и одну бобину, серийно произведенную из расплава в газовой печи. В качестве сырья использовали базальт Сельцовского месторождения (Украина). Физико-механические свойства базальтовых филаментов определяли на разрывной машине фирмы Instron по стандартной методике [8], которая заключалась в следующем. От каждой бобины отматывали нить и на расстоянии 200 м от начала отрезали кусок длиной ~50 мм, укладывали его на предметное стекло, выделяли с помощью препарировальной иглы отдельные мононити (филаменты) и закрепляли их в предварительно подготовленные бумажные рамочки П-образной формы с помощью клея БФ-4. Рабочая длина фи-

ламентов L_0 (расстояние между лапками — держателями волокна в рамках) составляет 10 мм. После отверждения клея определяли диаметр поперечного сечения филаментов под микроскопом микротвердомера ПМТ-3 при 600-кратном увеличении как среднее арифметическое трех измерений: одного в средней части филамента и двух — по краям рабочей длины. Затем с помощью пинцета рамку с филаментом устанавливали в захваты-прищепки машины. С помощью электротермического резака перерезали перемычку бумажной рамки и проводили испытание при скорости перемещения траверсы 5 мм/мин. От каждой бобины волокон, полученных в электропечи, было испытано по 20 – 30 филаментов (всего — 876 филаментов), а от бобины с волокнами, произведенными в газовой печи, — 60 филаментов. В табл. 1 представлены средние значения диаметра (d), предела прочности (σ_b), модуля упругости (E) и предельной деформации ($\varepsilon_{пр}$), а также коэффициенты вариации значений диаметров (ν_d), предела прочности (ν_σ), модуля упругости (ν_E) и предельной деформации (ν_ε).

Полученные результаты показали, что исследованные НБВ по величине модуля упругости соп-

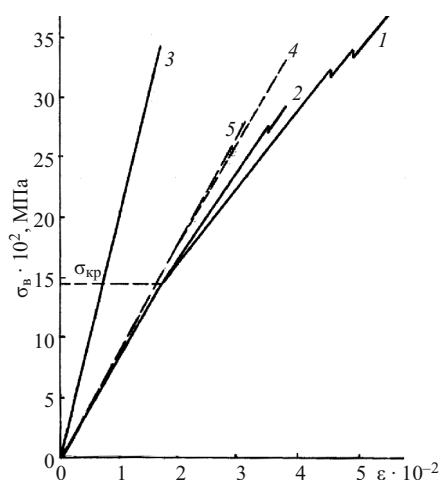


Рис. 1. Диаграммы деформирования непрерывных волокон: 1 и 2 — базальтовые волокна, полученные из расплава в электропечи и в газовой печи; 3 — углеродные волокна УКН-5000; 4 и 5 — стеклянные волокна Е

ставимы с высокомодульными стеклянными волокнами, а по прочности — с волокнами из Е-стекла и со многими марками углеродных волокон на основе полиакрилонитрила (УКН-5000, Кулон и др.) [3]. Установлено также, что для базальтовых филаментов характерна четко выраженная нелинейность диаграмм деформирования (рис. 1, кривые 1 и 2) в отличие от стеклянных и углеродных волокон, которые деформируются линейно-упруго вплоть до момента разрушения (см. рис. 1, кривые 3, 4 и 5).

На полученных диаграммах фиксировалась локализованная область перегиба в точке, соответствующей $\sigma_{кр} = (0,4 - 0,6)\sigma_b$. При нагружении выше точки перегиба наклон линейной диаграммы уменьшался и составлял 0,87–0,93 от первоначального наклона. Дальнейшее деформирование после перегиба происходило также практически линейно вплоть до момента разрушения филамента.

Можно предположить, что нелинейная форма диаграмм деформирования обусловлена радиальной неоднородностью структуры волокна (оболочка – ядро), возникновение которой объясняется особенностями химического состава и процесса охлаждения базальтовых волокон.

Горные породы, из которых получают НБВ, являются железосодержащими силикатными системами в отличие от сырья, используемого для производства стеклянных волокон. Характерная особенность железосодержащих силикатных систем — более высокая скорость твердения и охлаждения внешних слоев, чем внутренних, что связано с влиянием оксидов железа (FeO и Fe_2O_3), способствующих поглощению нагрузочными слоями инфракрасных лучей. Скорость же твердения и охлаждения расплавов из обычных стекол зависит в основном от теплоемкости и теплопроводности [4]. При определенной скорости охлаждения базальтового расплава в нем образуются центры кри-

сталлизации. Поскольку волокно формируется из капли базальтового расплава, обладающего высокой вязкостью и низкой теплопроводностью, то при вытяжке происходят частичное текстурирование поверхностных слоев (оболочки) и их кристаллизация, что приводит к появлению эффекта экрана: охлаждение внутренней части (ядра) замедляется и текстурирование в ней практически не происходит [9].

Относительно низкий модуль упругости НБВ (70–90 ГПа), который примерно в 3–4 раза меньше модуля упругости углеродных волокон, и значительная их деформативность обуславливают, по всей вероятности, более низкую, чем в углеродных волокнах, скорость распространения микротрещин. Это приводит к замедлению процесса накопления дефектов.

Различная скорость накопления дефектов в наружных и внутренних слоях волокна привела к тому, что при деформировании базальтовых волокон, в отличие от углеродных, последовательно происходят два процесса, которые фиксируются диаграммами деформирования. Первый (начальный) практически упруго-линейный, когда деформации оболочки и сердцевины равны, а второй характеризуется в оболочке НБВ поперечных микротрещин. Поэтому поверхностные слои частично перестают воспринимать нагрузку, которая затем перераспределяется между текстурированными и нетекстурированными фрагментами структуры волокна. Вследствие меньшей аксиальной текстурированности структуры в ядре и ее большей деформативности процесс перераспределения нагрузки сопровождается замедлением трещинообразования. Этим объясняется уменьшение наклона кривой деформирования и появление на ней перегиба. При нагрузках, близких к разрушающим, на диаграммах появлялись ступеньки (см. рис. 1, кривые 1 и 2), которые соответствовали началу макроразрушения в результате образования и развития на поверхности волокон поперечных трещин.

Наличие текстурированной оболочки, как показали испытания, не является определяющим фактором влияния дефектов на механические свойства базальтовых волокон.

На основе полученных экспериментальных данных были построены гистограммы распределения значений предела прочности, предельной деформации, модуля упругости и диаметров НБВ. Для совмещенного построения гистограмм на одном графике абсолютные значения механических характеристик были преобразованы в безразмерные величины нормированием на минимальные значения характеристик (рис. 2). При этом отношения максимальных значений E , d , σ_b , $\epsilon_{пр}$ к минимальным составили 2,8, 3,0, 11,9, 12,7 соответственно. Диапазон изменений относительных значений модуля упругости и диаметра волокон почти в 4 раза меньше, чем предел прочности и предельной деформации.

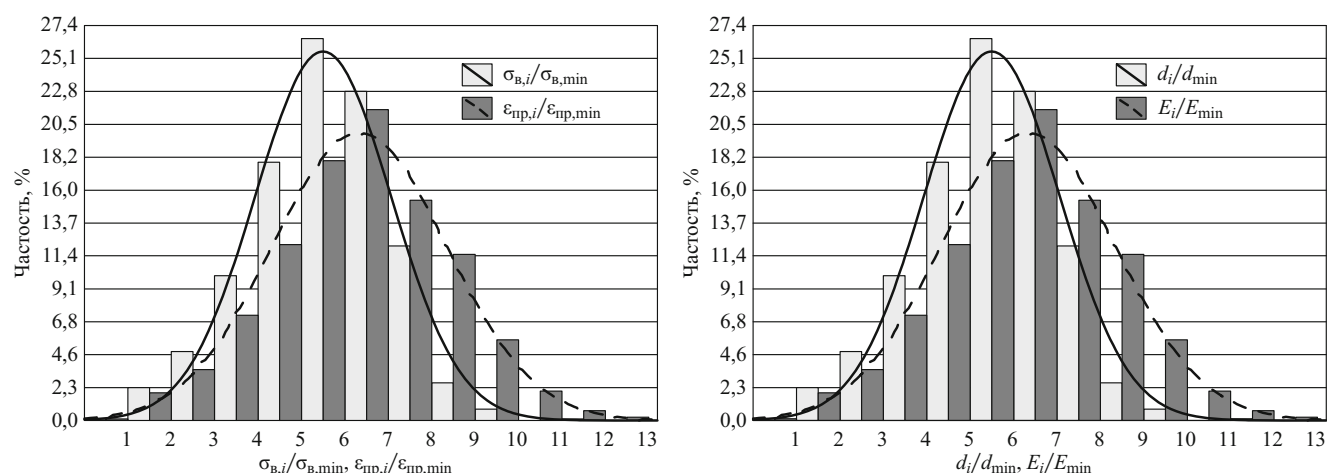


Рис. 2. Гистограммы нормального распределения значений предела прочности, предельной деформации, а также диаметров и модуля упругости НБВ

Все построенные гистограммы подчиняются нормальному закону распределения и являются одно-модальными, т.е. изменение механических свойств контролируется одним типом дефектов, характерным для всего сечения волокна и не зависящим от их расположения в радиальном направлении. В данном случае это возможно, вероятно, из-за незначительной толщины поверхностного текстурированного слоя и плавного увеличения угла разориентации фрагментов структуры (кристаллитов) в радиальном направлении от поверхности к центру волокна.

Наличие текстурированности исследованных волокон подтверждается масштабной зависимостью механических свойств НБВ от диаметра филамента. Для построения указанных масштабных зависимостей весь массив полученных экспериментальных данных ($n = 876$) был разбит на серии, число которых соответствовало количеству дискретных значений диаметра волокон $m = 48$. Каждому i -му диаметру соответствовала своя выборка значений прочности, модуля упругости и предельной деформации. Величина i -й выборки колебалась от 2 до 49. Вариации значений прочности в выборках менялись в пределах 17,3 – 37,1 %, модуля упругости — в пределах 7,6 – 17,4 %, предельной деформации — в пределах 20,1 – 40,5 %; все они не зависели ни от величины выборки, ни от диаметра филамента.

Изменчивость механических свойств базальтовых волокон одного и того же диаметра объясняется, возможно, различием в химическом составе волокон разных катушек, а также дефектностью (трещиноватостью) поверхностных слоев, обусловленной различием в напряженном состоянии, возникающем в результате прохождения волокна через фильерный узел и последующего охлаждения.

На рис. 3 показаны зависимости прочности, предельной деформации и модуля упругости от диаметра базальтовых волокон в исследованном диапазоне $\Delta d = 7,2 - 21,6$ мкм.

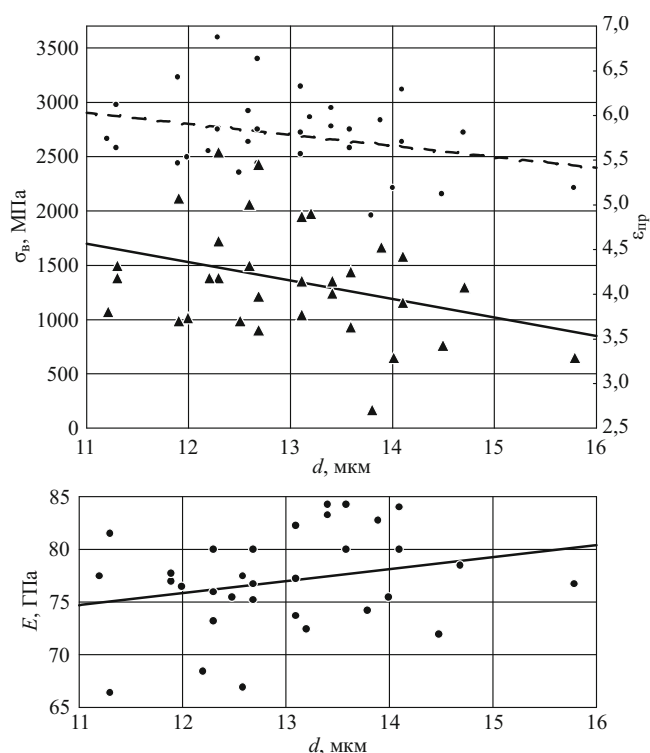


Рис. 3. Масштабные зависимости предела прочности (точки), предельной деформации (треугольники) и модуля упругости от диаметра НБВ: $\sigma_b = 3549,6 - 66,8d$, $r(\sigma_b, d) = -0,70$; $\epsilon_{np} = 4,98 - 0,07d$, $r(\epsilon_{np}, d) = -0,48$; $E = 83,3 - 0,49d$, $r(E, d) = -0,44$

Математическая обработка выявила возможность представления полученных экспериментальных данных также полиноминой, логарифмической и экспоненциальной зависимостями (табл. 2).

Экстраполяция этих зависимостей за пределы исследованного диапазона изменения Δd неправомерна. Так, для волокон с реально достижимым минимальным значением диаметра $d = 1$ мкм рассчитанное по этим зависимостям отличие в прочности составляет 2500 МПа, при этом максимальное значение показала логарифмическая зависимость ($\sigma_b = 4827,7$ МПа). Для

Таблица 2. Расчетные значения механических характеристик НБВ

Вид аналитической зависимости	Диаметр НБВ d , мкм							
	1,0	5,0	7,2	10,0	15,0	21,6	30,0	50,0
$\sigma_b = 3549,6 - 66,8d$	3482,8	3215,6	3068,6	2881,6	2547,6	2106,7	1545,6	209,6
$\sigma_b = 3133,2 - 2,4d - 2,3d^2$	3128,5	3063,7	2996,7	2879,2	2579,7	2008,3	991,2	-2736,8
$\sigma_b = 4827,7 - 1963,4 \lg d$	4827,7	3455,3	3144,4	2864,3	2518,6	2207,6	1927,5	1491,9
$\sigma_b = 3773,5 \exp(-0,027d)$	3673,0	3297,0	3106,8	2880,6	2516,8	2106,0	1678,7	978,2
$\epsilon_{пр} = 4,98 - 0,07d$	4,91	4,63	4,48	4,28	3,93	3,47	2,88	1,48
$\epsilon_{пр} = 4,23 + 0,05d - 0,0041d^2$	4,28	4,38	4,38	4,32	4,06	3,40	2,04	-3,52
$\epsilon_{пр} = 6,22 - 1,94 \lg d$	6,22	4,86	4,56	4,28	3,94	3,63	3,35	2,92
$\epsilon_{пр} = 5,12 \exp((-0,0178d))$	5,03	4,68	4,50	4,29	3,92	3,49	3,00	2,10
$E = 83,30 - 0,49d$	82,81	80,85	79,77	78,40	75,95	72,72	68,60	58,80
$E = 85,60 - 0,84d + 0,013d^2$	84,77	81,73	80,23	78,50	75,93	73,52	72,10	76,10
$E = 93,3 - 14,98 \lg d$	93,30	82,83	80,46	78,32	75,68	73,31	71,17	67,85
$E = 83,22 \exp(-0,0062d)$	82,79	80,76	79,66	78,29	75,90	72,86	69,16	61,10

Таблица 3. Максимальные значения механических характеристик исследованных НБВ

Определяемая характеристика	Тип зависимости	Расчетное максимально возможное значение характеристики при $d \rightarrow 0$	Максимальное полученное значение характеристики
σ_b , МПа	Экспоненциальная	3773,5	5884,4
E , ГПа	Полиномная	85,6	120,3
$\epsilon_{пр}$, %	Экспоненциальная	5,12	8,4

реально получаемых волокон диаметром $d = 50$ линейная и полиномная зависимости дают нереальные отрицательные значения прочности, а логарифмическая зависимость показывает $\sigma_b = 1330$ МПа, экспоненциальная зависимость — 287 МПа (см. табл. 2).

В исследованном же интервале значений Δd расчеты прочности по указанным зависимостям дают близкие результаты. Поэтому для технологических целей можно использовать простую линейную зависимость, так как коэффициент корреляции между пределом прочности и диаметром волокон $r(\sigma_b, d)$ достаточно высок и равен $-0,70$.

Для данных волокон масштабная зависимость прочности носит явный характер: предел прочности при увеличении диаметра с 7,2 до 21,6 мкм уменьшается в 1,5 раза — с 3068,6 до 2106,7 МПа.

Масштабные зависимости предельной деформации $r(\epsilon_{пр}, d)$ и модуля упругости $r(E, d)$ проявились в меньшей степени: коэффициенты корреляции составили соответственно $(-0,48)$ и $(-0,44)$. Степень коррелированности параметров $\epsilon_{пр}$ и E от d определяли с помощью критерия Стьюдента по формуле [10]:

$$t_{расч} = |r| \sqrt{\frac{m-2}{1-r^2}}.$$

Сравнивая при уровне значимости $q = 0,05$ и числе степеней свободы $f = m - 2 = 48 - 2 = 46$ расчетный критерий $t_{расч}$ с табличным значением $t_{табл}$, получили,

что для предельной деформации $t_{расч} = 3,63 > t_{табл} = 2,01$, а для модуля упругости $t_{расч} = 3,32 > t_{табл} = 2,01$.

Таким образом, и в случае, когда объем выборки значителен, принимается гипотеза о коррелированности параметров $\epsilon_{пр}$ и E от d . Поэтому для технологических расчетов также можно использовать линейные зависимости между данными параметрами и диаметром волокна для указанного диапазона Δd (см. рис. 3).

Полученные экспериментальные данные по изменению модуля упругости и предельной деформации с изменением диаметра волокон можно описать аналитически не только линейной зависимостью в исследованном диапазоне изменения диаметров НБВ, но так же, как и для прочности, полиномной, логарифмической и экспоненциальной зависимостями. Но экстраполяция указанных зависимостей за пределы исследованного диапазона Δd будет некорректна, как и в случае с экстраполяцией значений прочности. Так, при $d = 0$ получаем неоправданно низкие максимально возможные расчетные значения указанных механических характеристик базальтовых волокон (табл. 3).

Характеристики, рассчитанные по указанным зависимостям, оказались в 1,6 раза меньше экспериментальных максимальных значений для σ_b и $\epsilon_{пр}$ и в 1,4 раза — для E . Одной из причин занижения прогнозируемых механических характеристик является большой разброс экспериментальных данных (логарифмическая зависимость для оценки предельных значений неприменима, так как при $d \rightarrow 0$ σ_b , $\epsilon_{пр}$ и E стремятся к бесконечности).

Анализ гистограмм распределения механических характеристик исследованных НБВ показал, что по разработанной технологии (в электропечи) можно получить высокопрочные волокна с $\sigma_b \geq 4000$ МПа и модулем упругости $E \geq 100$ ГПа.

В результате статистической обработки полученных результатов установлено, что для исследованных волокон характерно наличие четкой корреляционной связи между прочностью и предельной деформацией в

исследованном интервале изменения значений диаметров НБВ [$r(\sigma_b, \epsilon_{пр}) = +0,88$] и отсутствие такой связи между модулем упругости и предельной деформацией [$r(E, \epsilon_{пр}) = -0,03$] (рис. 4, а). Корреляционную связь между пределом прочности и предельной деформацией в аналитическом виде можно представить в виде уравнения

$$\sigma_b = 653,4 + 493,0\epsilon_{пр}.$$

Различие в корреляционных связях $r(\sigma_b, \epsilon_{пр})$ и $r(E, \epsilon_{пр})$ обусловлено сутью самих силовых характеристик. Предел прочности моноволокон определяет максимально возможную удельную нагрузку, которую они могут выдержать, не разделяясь на отдельные фрагменты, а модуль упругости характеризует упругие свойства волокон и является упругой константой материала, которая в меньшей степени зависит от дефектов структуры волокон, чем предел прочности. Последний зависит в первую очередь от химического состава и от особенностей анизотропии структуры, степени текстурированности структурных элементов и ее распределения в радиальном направлении. Немалую роль также играет общая дефектность структуры в виде пор, трещин, инородных включений, распределения дефектов в объеме волокон.

Сравнительно небольшие вариации модуля упругости исследованных волокон (8,3 – 16,0 %) по сравнению с вариациями предела прочности и предельной деформации свидетельствуют об относительной однородности химического расплава, из которого были получены НБВ, относительно стабильных условиях прогрева и вытяжки в фильерной зоне.

Для малопластичных материалов, какими являются НБВ, предел прочности, как и предельная деформация (в отличие от модуля упругости), в большой степени зависит не только от указанных выше причин, но и от состояния поверхности. Наличие твердых инородных частиц или даже одной или нескольких микротрещин и их дальнейшее развитие при нагружении могут привести к преждевременному разрушению волокна, не повлияв на величину модуля упругости.

Эти различия оказали влияние и на степень коррелированности между модулем упругости и пределом прочности (рис. 4, б): коэффициент корреляции $r(\sigma_b, E)$ оказался в 2,5 раза меньше, чем $r(\sigma_b, \epsilon_{пр})$, и составил +0,39. Проверка значимости полученного коэффициента подтвердила это предположение: $t_{расч} = 2,53 \geq t_{табл} = 2,01$. Корреляционную связь в аналитическом виде можно представить в виде уравнения

$$\sigma_b = 471,9 + 29,1E.$$

Проведенные исследования показали, что по физико-механическим свойствам НБВ, полученные на опытной установке с электронагревом, не уступают базальтовым волокнам, произведенным в промышленной газовой печи.

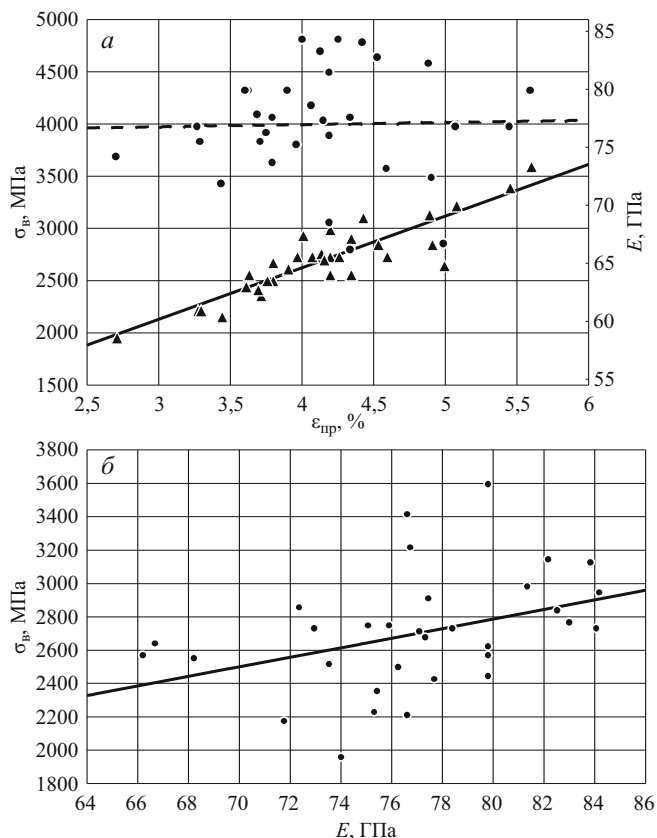


Рис. 4. Корреляционные зависимости предела прочности (▲) и модуля упругости (●) от предельной деформации (а), а также предела прочности от модуля упругости (б) НБВ

В обеих установках в качестве сырья для волокон использовали базальт одного состава. Электронагрев, являясь экологически чистым процессом, позволяет так же, как и газовый нагрев, обеспечивать гомогенизацию базальтового расплава и получать НБВ с высоким уровнем физико-механических свойств.

Выявленные взаимосвязи между механическими характеристиками и масштабные зависимости НБВ от диаметра, выражаемые линейными зависимостями, позволяют оптимизировать технологический процесс для получения высокопрочных НБВ — с $\sigma_b > 4000$ МПа и $E > 100$ ГПа.

Авторы выражают благодарность директору ООО «Вултекс» (Украина), канд. техн. наук Ю. Л. Цыбуле за предоставленные базальтовые волокна промышленного производства, а также инженеру ОАО «НИИГрафит» Е. В. Бахасовой за участие в проведении механических испытаний базальтовых волокон, требующих большого мастерства и ювелирной точности как при подготовке волокна, так и при проведении испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Татаринцева О. С., Ходакова Н. Н. Армирующий материал для композиционных материалов / Строительные материалы. 2004. № 12. С. 38 – 40.

2. Сравнительные характеристики стеклянных, минеральных и базальтовых волокон: Обзор. — Нижняя Тура. ООО ТД УРАЛЬСКИЙ БАЗАЛТ. URL: uralbazalt.ru/news/11/05/2013u (дата обращения: 10.10.2014).
3. **Громков Б. К., Смирнов Л. Н., Трофимов А. Н., Жаров А. И., Семенов О. Н., Юдин А. А., Кошелев В. Ю.** Горные породы для производства базальтовых волокон: сб.: Базальтоволокнистые материалы / Под ред. В. И. Костикова и Л. Н. Смирнова. — М.: ООО «Информконверсия», 2001. (Научная библиотека журнала «Конверсия в машиностроении». Вып. 5. Приложение к журналу № 4. 2000. С. 54 – 64.)
4. Обзор: СНИП. Расчетные теплотехнические показатели минеральных ват, пеностекла, газостекла, стекловаты, Роквула, URSA, теплоемкость, теплопроводность и теплоусвоение в зависимости от плотности и влажности, паропроницаемость. URL: www.DPVA.info (дата обращения: 10.10.2014).
5. **Максименко В. А., Шабля В. Ф., Шевченко О. В.** Применение базальтоволокнистых материалов в московском строительстве: сб. Базальтоволокнистые материалы / Под ред. В. И. Костикова и Л. Н. Смирнова. — М.: ООО «Информконверсия», 2001. (Научная библиотека журнала «Конверсия в машиностроении». Вып. 5. Приложение к журналу № 4. 2000. С. 214 – 216.)
- 6а. **Рабинович Ф. Н.** Базальтовые волокна для армирования строительных конструкций: сб. Базальтоволокнистые материалы / Под ред. В. И. Костикова и Л. Н. Смирнова. — М.: ООО «Информконверсия», 2001. (Научная библиотека журнала «Конверсия в машиностроении». Вып. 5. Приложение к журналу № 4. 2000. С. 171 – 177.)
- 6б. Пат. 2117834 Российская Федерация. Армирующий наполнитель, фрикционный полимерный материал и тормозная автомобильная колодка / Пинхасович А. В.; заявитель и патентообладатель Научно-производственная фирма «Контур»; заявл. 23.02.96, опубл. 20.08.1998.
7. Пат. 2200657 Российская Федерация. Способ производства труб из бетонных смесей / Афанасьев Е. П., Жариков И. В., Тарасов С. Н., Солдатова Н. Н., Муфтиев Л. Р., Пономарев М. Н., заявители и патентообладатели Афанасьев Е. П., Жариков И. В.; заявл. 04.02.2002; опубл. 20.03.2003.
8. ГОСТ 6943.5–79. Материалы текстильные стеклянные. Метод определения разрывного напряжения элементарной нити. — М.: Национальные стандарты, 2007.
9. Волокнистые материалы из базальтов Украины. — Буча: Изд. Украинского филиала ВНИИСПВ, 1962. — 77 с.
10. **Пижурин А. А., Розенблит М. С.** Исследования процессов деревообработки. — М.: Лесная промышленность. 1984. — 232 с.