

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОЧНОСТЬ БАЗАЛТО- И СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

А.Н. Блазнов, В.Ф. Савин, Е.В. Атясова, Ф.И. Бабенко, Ю.Ю. Федоров

*Проведены испытания трех видов композитов на продольный изгиб при различных температурах в диапазоне от минус 70 °С до плюс 60 °С в двух независимых лабораториях. Получена степенная зависимость прочности от температуры. Показано, что с понижением температуры прочность и деформация материалов увеличиваются, модуль Юнга практически не изменяется.*

*Ключевые слова: композиты, базальтопластик, стеклопластик, продольный изгиб, морозостойкость, прочность, модуль Юнга, деформация.*

### ВВЕДЕНИЕ

По данным многолетних наблюдений в различных регионах России температура воздуха в разные периоды года изменяется от минус 70 °С до плюс 60 °С. Поэтому для установления температурного диапазона хранения и эксплуатации изделий необходимо исследовать температурную зависимость прочности полимерных композиционных материалов в указанном интервале температур.

Верхний температурный диапазон эксплуатации армированных композитов ограничен температурой начала перехода полимерной матрицы из стеклообразного в высокоэластическое состояние. У исследуемых базальто- и стеклопластиков граница начала перехода не ниже плюс 79 °С [1], но вопрос подтверждения упругопрочностных характеристик при температуре плюс 60 °С для применимости метода продольного изгиба к определению прочности требует прямого эксперимента.

Для оценки нижней границы эксплуатации и испытаний на морозостойкость в лаборатории ООО «Бийский завод стеклопластиков» (БЗС) была разработана установка, принцип действия которой основан на охлаждении образцов с помощью жидкого азота, испаряемого нагревателем, без дополнительного газообразного хладоносителя [2]. Установка используется для оценки хладоустойчивости по изменению прочностных свойств, и морозостойкости по изменению деформационных свойств [3, 4]. Для изучения температурной зависимости прочности стеклопластика применяли метод продольного изгиба [5], разработанный и внедренный на БЗС.

Классическая теория продольного изгиба идеального тонкого упругого стержня дает выражения для определения прочности  $\sigma$ , предельной деформации  $\varepsilon$  и модуля Юнга  $E$  материала, из которого изготовлен стержень:

$$\sigma = \frac{P \cdot f}{w} \pm \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot d^2}, \quad (1)$$

$$\varepsilon = \pm d / 2\rho, \quad (2)$$

$$E = \sigma / \varepsilon, \quad (3)$$

где  $P$  – осевая сила,  $f$  – прогиб,  $w$ ,  $d$  – момент сопротивления поперечного сечения и диаметр образца,  $\rho$  – радиус кривизны изогнутой линии в средней части, в месте наибольшего прогиба.

Как показали расчеты и измерения, составляющая напряжения в выражении (1), обусловленная растяжением/сжатием, занимает около 1,0–1,5 % от прочности, поэтому влиянием растяжения/сжатия при испытаниях на продольный изгиб можно пренебречь.

Для определения величины прогиба  $f$  и радиуса кривизны  $\rho$  в выражениях (1) и (2) численным решением уравнения продольного изгиба упругого стержня получены формулы [6], которые связывают в безразмерном виде  $f$  и  $\rho$  с величиной осевого перемещения  $\Delta$ , измеряемой в эксперименте. Для круглых упругих стеклопластиковых стержней выражения для определения прочности и деформации принимают вид [6,7]:

$$\sigma = \pm \frac{32}{\pi^2 d^3} \cdot PL \times \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{(\delta + 0,2519\delta^2 + 0,077267\delta^3 + 0,078775\delta^4)}{(0,125 - 0,0152\delta - 0,0083\delta^2)}} \times \frac{1}{(1 + 0,5038\delta + 0,2318\delta^2 + 0,3151\delta^3)}; \quad (4)$$

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОЧНОСТЬ БАЗАЛТО- И СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

$$\varepsilon = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{L} \cdot \pi \times \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{(\delta + 0,2519\delta^2 + 0,077267\delta^3 + 0,078775\delta^4)}{(0,125 - 0,0152\delta - 0,0083\delta^2)}} \quad (5)$$

Здесь  $\delta = \Delta/L$  – относительное сближение концов стержня при продольном изгибе;  $L$  – исходная длина стержня.

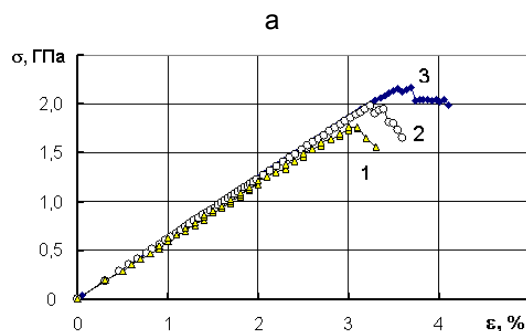
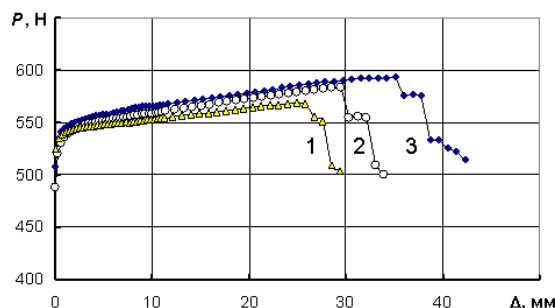
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Было испытано три партии изделий диаметром 5,5 мм в диапазоне температур от минус 70 °С до плюс 60 °С. Охлаждение и термостатирование образцов при заданной температуре осуществляли в установке, обеспечивающей поддержание в ней температуры до минус 70 °С, снабженной средствами регулирования и контроля [2]. Нагрев образцов и выдержку при температуре плюс 60 °С производили в термощкафу. На каждый образец помещали термостатирующую рубашку, которая сохраняла температуру на поверхности образца в течение времени испытаний (около 1 мин.).

Образцы, выдержанные при разных температурах, испытывали методом продольного изгиба [5] в одинаковых условиях: при температуре (23±2) °С и скорости перемещения активного захвата машины 50 мм/мин. В результате испытаний определили значение модуля, предельной деформации, прочности и плотности энергии разрушения образцов  $Q$ .

На рисунке 1 приведены типичные диаграммы нагружений образцов, из которых видно, что в исследованном диапазоне температур (в стеклообразном состоянии) стержни ведут себя подобно линейно-упругим. Отклонения не превышают 1,5 %.

Это подтверждает правомерность использования метода продольного изгиба для механических испытаний в исследованном диапазоне температур.



**Рисунок 1 – Диаграммы нагружения стеклопластиковых стержней продольным изгибом: зависимость силы от перемещения (а) и зависимость напряжения от деформации (б) при температурах: 1 – плюс 60 °С; 2 – плюс 23 °С, 3 – минус 8 °С**

Средние значения и коэффициенты вариации определяемых характеристик приведены в таблице 1. По данным рисунка 1 и таблицы 1 следует, что предельная деформация и прочность стеклопластика с увеличением температуры снижаются, в то время как модуль упругости остается практически неизменным.

**Таблица 1 – Результаты испытаний стеклопластиковых стержней при различных температурах в лаборатории БЗС**

№ партии	$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \%$	$V_\varepsilon, \%$	$E, \text{ГПа}$	$V_E, \%$	$\sigma, \text{ГПа}$	$V_\sigma, \%$	$Q, \text{МДж/м}^3$	$V_Q, \%$
1	-8	3,63	5,19	60,71	4,28	2,08	4,53	4,73	8,20
	23	3,37	4,15	58,76	5,26	1,89	4,32	3,95	8,62
	60	3,06	5,22	59,06	3,13	1,70	4,43	3,27	8,52
2	-30	3,65	3,31	55,72	5,04	2,05	4,15	4,70	5,53
	23	3,24	4,15	52,65	4,92	1,73	5,04	3,30	7,65
	50	3,05	5,83	51,90	4,48	1,58	6,61	3,05	11,5
3	60	2,88	10,1	53,67	7,03	1,54	11,58	2,82	19,9
	23	3,49	7,52	66,12	1,80	2,15	5,76	5,00	13,5
	-70	4,67	6,00	65,21	2,09	3,13	8,94	9,06	12,6

Примечание.  $V_\varepsilon, V_E, V_\sigma, V_Q$  – коэффициенты вариации параметров

Повышение прочности и плотности энергии разрушения объясняется увеличением деформативности стеклопластика при отрицательных температурах. Это является надежным доказательством морозостойкости исследованных стеклопластиковых стержней.

Для оценки температурной зависимости прочности данные таблицы 1 преобразовали: привели все значения прочности к комнатным условиям испытаний с помощью выражения:

$$\gamma = \sigma_i^T / \sigma_i^{T_K}, \quad (6)$$

где  $\gamma$  – относительная приведенная прочность,  $i$  – номер партии образцов по таблице 1,  $\sigma_i^T$ ,  $\sigma_i^{T_K}$  – прочность при температуре  $T$  и комнатной температуре  $T_K$  (плюс 23 °С) соответственно.

Полученная зависимость относительной прочности от температуры имеет степенной вид (рисунок 2).

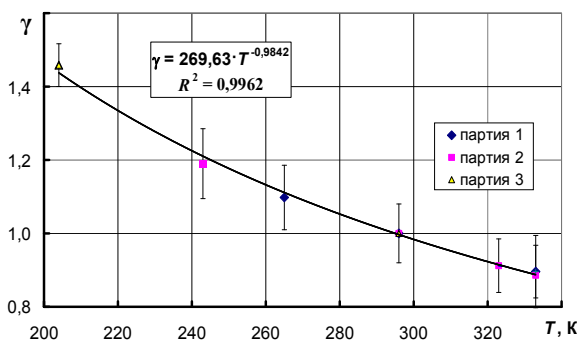


Рисунок 2 – Зависимость относительной прочности от температуры

Параллельно температурные испытания композитных стержней на продольный изгиб были проведены в лаборатории полимерных композиционных материалов Института проблем нефти и газа (ИПНГ СО РАН, г. Якутск) на специальной установке [8]. В этих испытаниях для чистоты эксперимента образец вме-

сте с захватами был установлен внутри термокамеры.

Независимые испытания в ИПНГ СО РАН подтвердили температурную зависимость прочности образцов стеклопластиков, полученную на БЗС. Из данных рисунка 3 видно, что испытываемые стержни обладают свойством линейной упругости вплоть до разрушения при температурах минус 60 °С и плюс 20 °С.

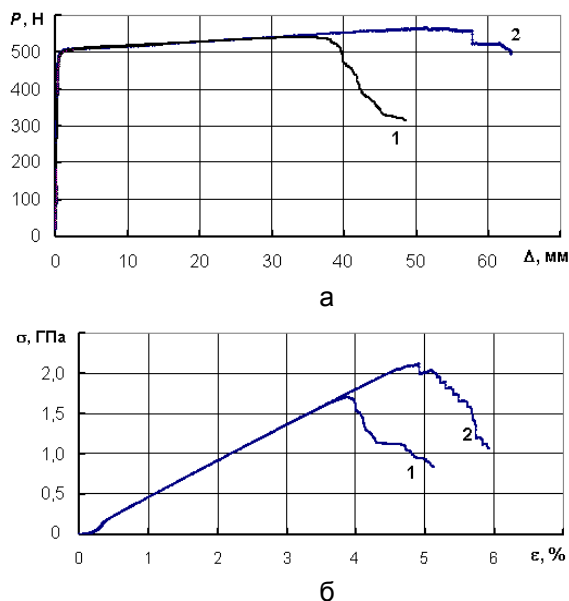


Рисунок 3 – Диаграммы нагружения стеклопластиковых стержней продольным изгибом на установке ИПНГ: зависимость силы от перемещения (а) и зависимость напряжения от деформации (б) при температурах: 1 – плюс 20 °С, 2 – минус 60 °С

Результаты испытаний исходных образцов из различных композиционных материалов при разных температурах и образцов, экспонированных на открытом воздухе в течение 1 и 2 лет, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний пластиков на продольный изгиб в лаборатории ИПНГ СО РАН

Значение характеристики при температуре испытаний						
Условия хранения	+20 °С			-60 °С		
	σ, ГПа	ε, %	E, ГПа	σ, ГПа	ε, %	E, ГПа
1	2	3	4	5	6	7
<b>Базальтопластик на эпоксидном связующем</b>						
Исходные	1,59±0,127	3,53±0,248	44,4±0,61	1,75±0,021	3,58±0,153	48,2±1,24
Старение 1 год	1,49±0,045	3,27±0,092	45,2±1,65	1,63±0,245	3,32±0,655	48,5±2,13
Старение 2 года	1,41±0,001	3,08±0,280	48,2±4,98	1,93±0,142	4,19±0,15	46,9±1,05

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОЧНОСТЬ БАЗАЛЬТО- И СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

Продолжение таблицы 2

<b>Стеклопластик на эпоксидном связующем</b>						
1	2	3	4	5	6	7
Исходные	1,89±0,043	3,75±0,26	50,7±3,55	2,34±0,003	4,73±0,15	49,1±1,29
Старение 1 год	2,02±0,048	3,82±0,074	52,9±0,28	2,25±0,053	4,82±0,15	47,4±0,16
Старение 2 года	1,971±0,833	3,78±0,071	53,3±2,36	2,35±0,054	4,62±0,09	51,9±1,67
<b>Стеклопластик на полиэфирном связующем</b>						
Исходные	1,97±0,07	3,62±0,11	54,9±0,58	2,45±0,076	4,55±0,12	54,2±0,42
Старение 1 год	1,93±0,11	3,59±0,26	54,2±0,96	2,45±0,024	4,52±0,03	54,5±0,65
Старение 2 года	1,95±0,07	3,58±0,15	55,6±1,77	2,55±0,038	4,65±0,14	56,4±0,91

По данным таблицы 2 можно заключить, что для всех трех видов композитных стержней характерно повышение деформации и прочности при снижении температуры, а модуль упругости практически не зависит от нее. Эти данные находятся в соответствии с данными таблицы 1. Из результатов испытаний образцов после старения следует, что деградации прочности за указанный период не происходит, и температурная зависимость прочности сохраняется.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате применения для испытаний метода продольного изгиба в температурном диапазоне хранения и эксплуатации стекло- и базальтопластиковых стержней получены значения модуля упругости, прочности, предельной деформации и плотности энергии, которые гарантируют работоспособность изделий в соответствии с требованиями технических условий в диапазоне от минус 70 °С до плюс 60 °С. Получена температурная зависимость прочности стеклопластиков, которая имеет степенной вид. Показано, что с понижением температуры модуль упругости практически не меняется, а прочность и предельная деформация возрастают для трех видов испытанных композитов, что доказывает их хладостойкость и морозостойкость.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савин, В.Ф. Методика определения термомеханических характеристик полимерных композиционных материалов / В.Ф. Савин, А.Н. Луговой, Ю.П. Волков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2003. – Т. 69. – № 6. – С. 40-43.
2. Блазнов, А.Н. Разработка установки и проведение испытаний на морозостойкость стеклопластиковых образцов / А.Н. Блазнов, В.Ф. Са-

вин, Л.С. Тимахович // Материалы 2-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности» (14-15 мая 2009 г., г. Бийск). – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2009. – С. 71-77.

3. Булманис, В.Н. Эксплуатационная устойчивость полимерных волокнистых композитов и изделий в условиях холодного климата: дисс... д.т.н. – Якутск: ИФТПС СО АН СССР, 1989. – 472 с.

4. Стручков, А.С. Хладостойкость и особенности сопротивления разрушению нефтегазовых пластмассовых труб: дис. ... д.т.н. – Якутск, 2005. – 398 с.

5. Пат. РФ № 2451281. Способ определения механических характеристик стержней из полимерных композиционных материалов и устройство для его реализации (варианты) / А.Я. Рудольф, С.П. Поздеев, В.Ф. Савин, А.Н. Луговой, А.Н. Блазнов, О.В. Старцев, В.Б. Тихонов, М.Ю. Локтев: заявка № 2010139689/28 от 27.09.2010; опубл. 20.05.2012; бюл. № 14.

6. Блазнов, А.Н. Аппроксимирующие выражения для описания параметров тонкого продольно изогнутого, шарнирно опертого стержня / А.Н. Блазнов, А.Н. Луговой, В.Ф. Савин // Известия вузов. Машиностроение. – 2004, № 12. – С. 16-26.

7. Блазнов, А.Н. Методы механических испытаний композиционных стержней: монография / А.Н. Блазнов, В.Ф. Савин, Ю.П. Волков и др.; под ред. А.Н. Блазнова, В.Ф. Савина. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2011. – 314 с.

8. Федоров, Ю.Ю. Прочность пултрузионных стержней из армированных реактопластов для строительных конструкций в условиях холодного климата / Ю.Ю. Федоров, Г.П. Лапий, А.А. Архипов. // Труды IV Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата: Секция 3. Полимерные и композиционные материалы и изделия для эксплуатации в экстремальных климатических условиях. – Якутск: Издательство СО РАН, 2008.

**Блазнов Алексей Николаевич**  
Федеральное государственное бюджетное учре-

ждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), Старший научный сотрудник лаборатории Материаловедения минерального сырья, д.т. н., доцент, 8-(3854) 30-59-06

**Савин Владимир Федорович** ООО «Бийский завод стеклопластиков», Начальник лаборатории, к. т. н. [vladimir.savin@bzs.ru](mailto:vladimir.savin@bzs.ru)

**Атасова Евгения Владимировна** Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», ас-

пирант кафедры Машины и аппараты химических и пищевых производств, [zhenecka0112@mail.ru](mailto:zhenecka0112@mail.ru).

**Бабенко Федор Иванович** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории Полимерных композиционных материалов, к.т.н., с.н.с., [grlariy@yandex.ru](mailto:grlariy@yandex.ru)

**Федоров Юрий Юристанович** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук, с.н.с. лаборатории Полимерных композиционных материалов, к.т.н., [yuristan@yandex.ru](mailto:yuristan@yandex.ru)