

Влияние радиационного воздействия на физико-механические свойства углепластика

Г.И. Бритвич, Н.К. Булгаков, В.Н. Рядовилов, А.Г. Холоденко
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Л.А. Климакова, О.Н. Комиссар, А.О. Половый
ГНЦ ОНПП "Технология", Обнинск, Россия

Образцы эпоксидного углепластика производства ОНПП "Технология" (г. Обнинск) облучались потоком $2\div4 \times 10^{14}$ протонов/см² с энергией $E = 0.8\div1.34$ ГэВ от кольцевого инжектора Серпуховского ускорителя для изучения его физико-механических характеристик. Дозы, которые образцы набирали во время облучения, соответствуют одинарному и двойному сроку эксплуатации опорных структур из углепластика Внутреннего Детектора установки АТЛАС. Термоупругие свойства образцов до и после облучения измерялись по методике ОНПП "Технология".

Введение

При создании опорных структур Внутреннего Детектора (ВД) установки АТЛАС для ускорителя LHC (ЦЕРН, Швейцария) [1] широко используются композитные материалы на основе углепластиков. За предполагаемый период эксплуатации (10 лет) данные структуры будут испытывать радиационное воздействие порядка сотен грэй. Становится актуальным вопрос сохранения их физико-механических характеристик в продолжение всего срока эксплуатации.

При выполнении работы ставились *следующие задачи*:

- подтверждение радиационной стойкости эпоксидного углепластика КМУ-4Л российского производства, предназначенного для использования в качестве конструкционного материала опорных конструкций внутреннего детектора установки АТЛАС;
- определение степени влияния радиационного воздействия на физико-механические характеристики конструкционного пластика в течение расчетного срока эксплуатации детектора (10 лет);
- определение радиационного ресурса материала в конструкции на базе двойного срока эксплуатации (20 лет).

1. Величина и характеристики радиационного воздействия

Облучение проводилось в пучке бустера ИФВЭ. Энергия протонов равнялась 1 ГэВ. Средний поток протонов через образцы составлял 5×10^{13} p/см² час. Интегральный поток протонов прошедших через каждый исследуемый образец, измерялся методом активационного анализа по количеству изотопов ²²Na и ²⁴Na, образовавшихся в алюминиевых фольгах [2]. Имелось две группы образцов. Одна группа облучалась до величины интегрального потока протонов $(2.6 \pm 0.5) \times 10^{14}$ p/см² и вторая до $(4.3 \pm 0.8) \times 10^{14}$ p/см², соответствующих одинарному и двойному сроку эксплуатации конструкции в составе детектора.

2. Объекты исследований

Исследования проводились на стандартных однонаправленных и армированных образцах из углепластика КМУ-4Л на основе наполнителя из углеродной ленты ЛУ-П/0,1-А ГОСТ 28006-88 и связующего ЭНФБ ТУ 1-596-36-98. Характеристика образцов для исследований представлена в табл. 1.

Таблица 1. Образцы для исследования влияния радиационного воздействия на характеристики углепластика КМУ-4Л.

Назначение образцов	Размер в плане, мм	Схема армирования	Величина радиационного воздействия, P/см ²
Образцы для определения предела прочности и модуля упругости при растяжении	250 × 20	±30°	0
		±60°	
		±60°/0° ₄ /±60°	
		±30°	2×10 ¹⁴
		±60°	
		±60°/0° ₄ /±60°	
		±30°	4×10 ¹⁴
		±60°	
		±60°/0° ₄ /±60°	
Образцы для определения ТКЛР в диапазоне температур от 20 до 100 °С	50 × 10	0°	0
		90°	2×10 ¹⁴
		0°	
		90°	
		0°	4×10 ¹⁴
		90°	
Образцы для определения компонентного состава	20 × 25	±60°/0° ₄ /±60°	0
		±60°/0° ₄ /±60°	2×10 ¹⁴
		±60°/0° ₄ /±60°	4×10 ¹⁴

3. Виды испытаний и испытательное оборудование

Экспериментально исследовались следующие характеристики материала:

- предел прочности при одноосном растяжении σ ;
- модуль упругости при одноосном растяжении E;
- термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР) в диапазоне от 25 до 100°С;
- компонентный состав пластика (плотность ρ , пористость П, объемное и массовое содержание волокна V_v/M_v и связующего $V_{св}/M_{св}$).

Испытания проводились в соответствии с нормативными документами и на оборудовании, перечень которых представлен в табл. 2.

Таблица 2. Стандарты и оборудование для испытаний.

Вид испытаний	Стандарт	Оборудование
Определение σ и E	ГОСТ 25.601-80	Испытательная машина Zwick-1464
Определение ТКЛР	ПМ 596.998	Дилатометр фирмы ВАНР
Определение компонентного состава	ПМ 596.1090, ПМ 596.1182, ГОСТ 15139-69	Автопикнометр 1320

4. Результаты экспериментальных исследований

Результаты экспериментального определения прочностных и упругих свойств однонаправленного и армированного углепластика КМУ-4Л при растяжении представлены в табл. 3. Соответствующие зависимости предела прочности и модуля упругости материала от радиационного воздействия представлены на рис. 1 и 2.

Таблица 3. Экспериментальные значения предела прочности и модуля упругости при растяжении углепластика КМУ-4Л.

Схема армирования	Без облучения		Одинарная доза, $N = 2 \cdot 10^{14} \text{ P/cm}^2$		Двойная доза, $N = 4 \cdot 10^{14} \text{ P/cm}^2$	
	E_x , ГПа	σ_x , МПа	E_x , ГПа	σ_x , МПа	E_x , ГПа	σ_x , МПа
0°	146,3	700	147,2	703	-	-
90°	-	-	-	-	8,6	23
$\pm 30^\circ$	40,4	356	38,9	387	45,5	394
$\pm 60^\circ$	7,3	50	7,6	51	8,7	66
$\pm 60/0^\circ_4/\pm 60^\circ$	63,6	422	65,1	399	64,4	395

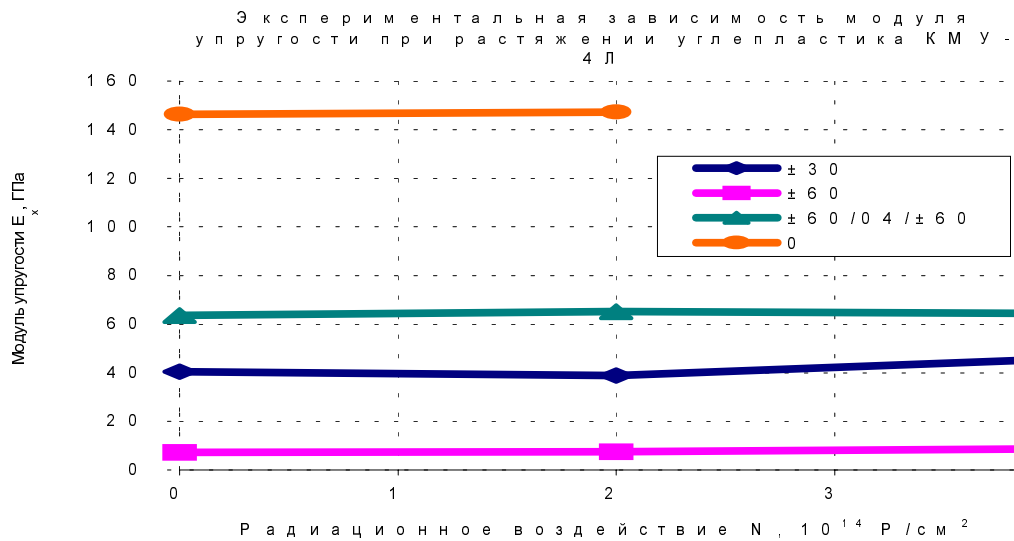


Рис. 1

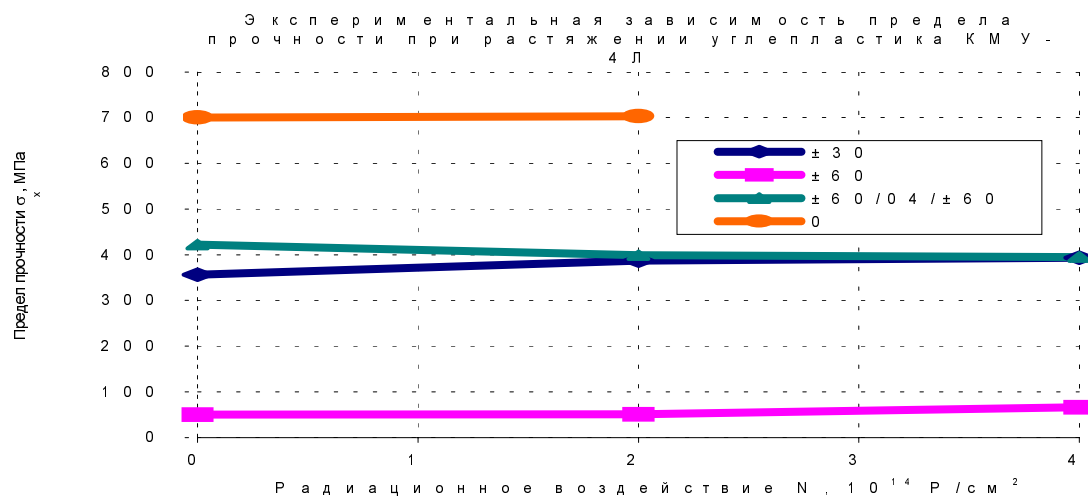


Рис. 2

Данные замеров ТКЛР однонаправленного углепластика КМУ-4Л в диапазоне температур от 20 до 100 °С даны в табл. 4. На рис. 3 и 4 представлены полученные на основании этих данных зависимости ТКЛР (для продольного и поперечного направлений соответственно) в исследуемом диапазоне температур применительно к однонаправленному материалу с разной степенью радиационного воздействия.

Таблица 4. Экспериментальные значения ТКЛР однонаправленного углепластика КМУ-4Л.

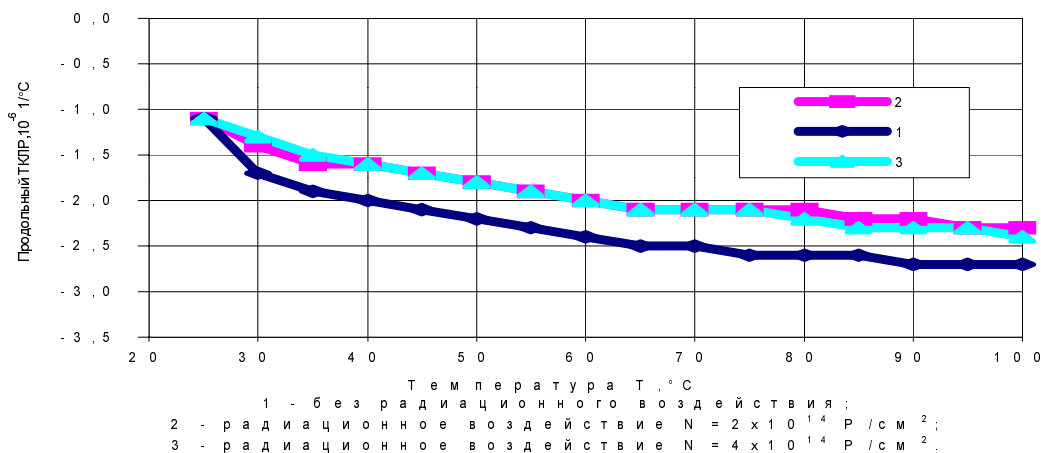
Т, °С	Продольное направление			Поперечное направление		
	Без воздействия	$N=2 \cdot 10^{14} P/cm^2$	$N=4 \cdot 10^{14} P/cm^2$	Без воздействия	$N=2 \cdot 10^{14} P/cm^2$	$N=4 \cdot 10^{14} P/cm^2$
25	-1,1	-1,1	-1,1	10,3	16,3	7,9
30	-1,4	-1,7	-1,3	12,5	16,5	10,9
35	-1,6	-1,9	-1,5	14,6	17,0	14,1
40	-1,6	-2,0	-1,6	15,5	17,5	14,8
45	-1,7	-2,1	-1,7	16,1	17,8	15,8
50	-1,8	-2,2	-1,8	16,8	18,6	16,6
55	-1,9	-2,3	-1,9	17,7	19,4	17,5
60	-2,0	-2,4	-2,0	18,1	19,6	18,2
65	-2,1	-2,5	-2,1	19,0	19,9	18,6
70	-2,1	-2,5	-2,1	19,1	20,2	19,0
75	-2,1	-2,6	-2,1	19,5	20,6	19,5
80	-2,1	-2,6	-2,2	19,8	20,9	19,7
85	-2,2	-2,6	-2,3	20,1	21,2	20,1
90	-2,2	-2,7	-2,3	20,4	21,4	20,3
95	-2,3	-2,7	-2,3	20,8	21,9	21,0
100	-2,3	-2,7	-2,4	21,1	22,1	21,3

Результаты исследования компонентного состава исходного углепластика (без воздействия) и углепластика, подвергнутого одинарной и двойной дозе радиационного воздействия, даны в табл. 5. Соответствующие зависимости для исследованных параметров (плотности, пористости материала, содержание волокна и связующего в пластике) представлены на рис. 5–8.

Таблица 5. Компонентный состав углепластика КМУ-4Л.

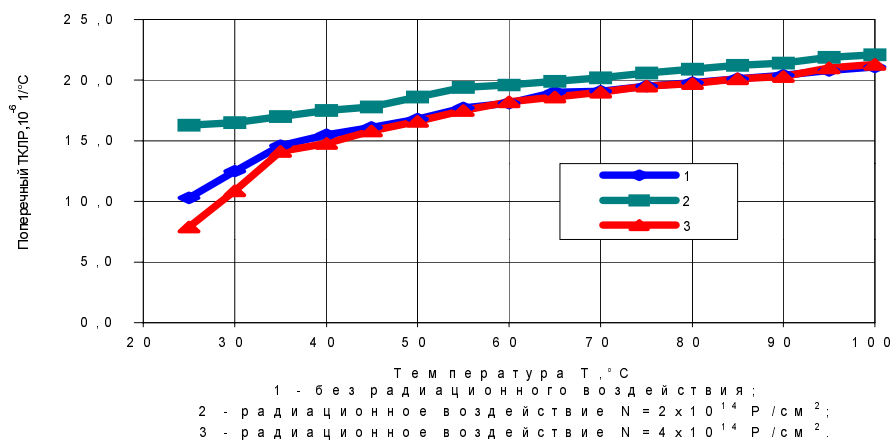
Параметр	Без воздействия	$N = 2 \cdot 10^{14} P/cm^2$	$N = 4 \cdot 10^{14} P/cm^2$
ρ , г/см ³	1,512	1,516	1,510
П, %	0,9	1,2	0,7
V_v , %	58,6	59,2	58,3
$V_{св}$, %	40,5	39,5	41,0
M_v , %	66,5	67,3	66,0
$M_{св}$, %	33,5	32,7	34,0

Экспериментальная зависимость продольного ТКЛР однонаправленного углепластика КМУ-4Л от температуры



Р и с . 3

Экспериментальная зависимость поперечного ТКЛР однонаправленного углепластика КМУ-4Л от температуры



Р и с . 4

Заключение

Анализ результатов проведенного комплекса экспериментальных исследований по оценке влияния радиационного воздействия на характеристики углепластика КМУ-4Л позволяет сделать следующие выводы:

- Не выявлено влияния радиационного воздействия (в исследованном спектре и диапазоне нагружения) на термические, упругие, прочностные свойства и физические характеристики углепластика.
- Полученные вариации экспериментально определенных параметров находятся в пределах точности эксперимента. Некоторое несоответствие результатов замеров пористости пластика прогнозируемым значениям может быть объяснено недостаточным объемом экспериментальных данных.
- Подтверждена радиационная стойкость эпоксидного углепластика КМУ-4Л для использования в качестве конструкционного материала опорных конструкций внутреннего детектора установки ATLAS.
- Радиационный ресурс углепластика КМУ-4Л на базе двойного срока эксплуатации составляет 100%.

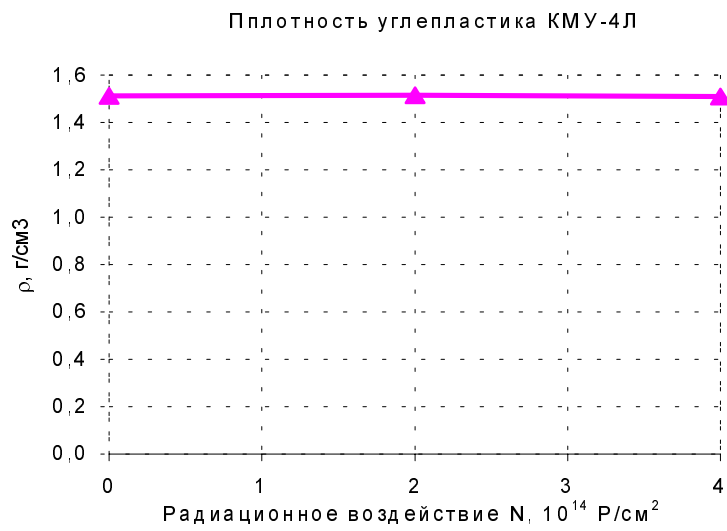


Рис. 5

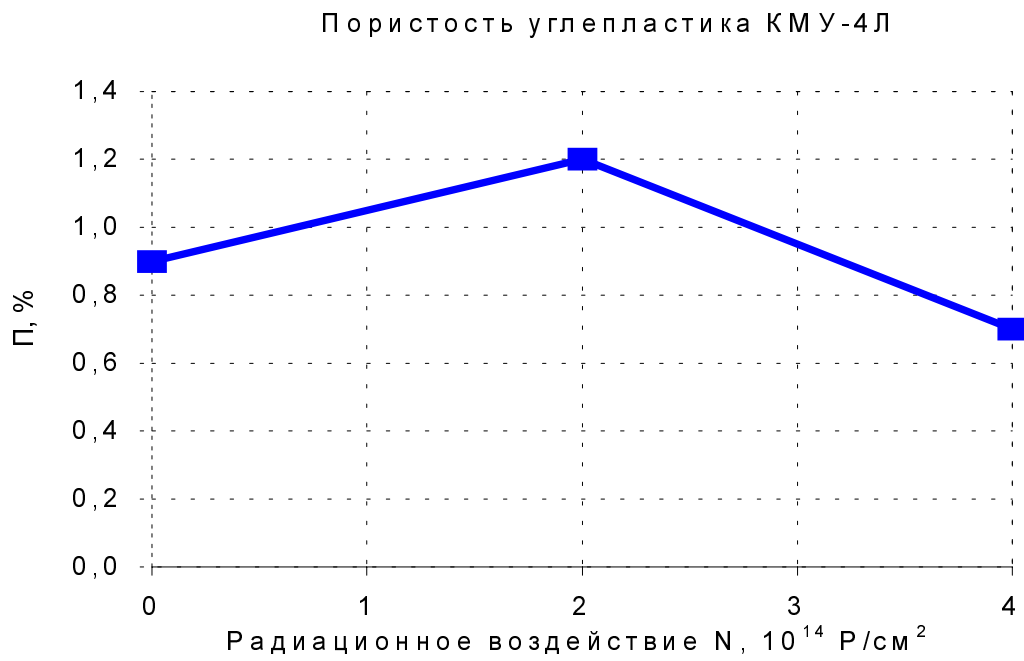


Рис. 6

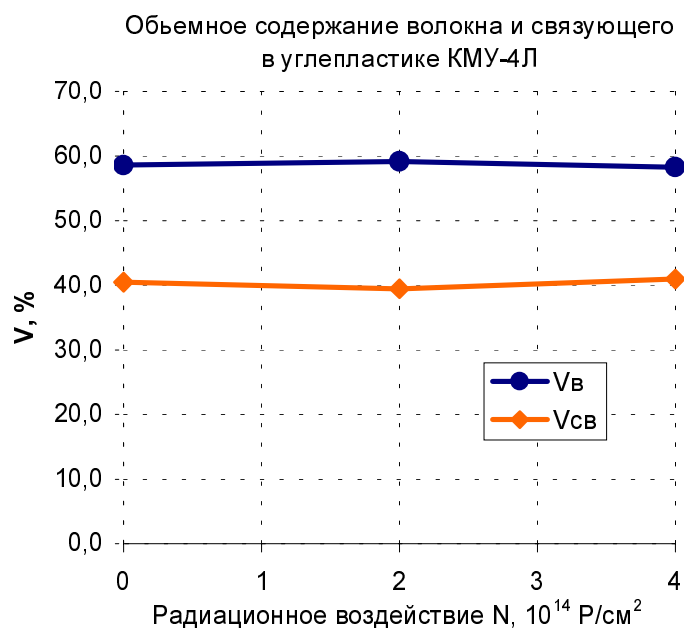


Рис. 7

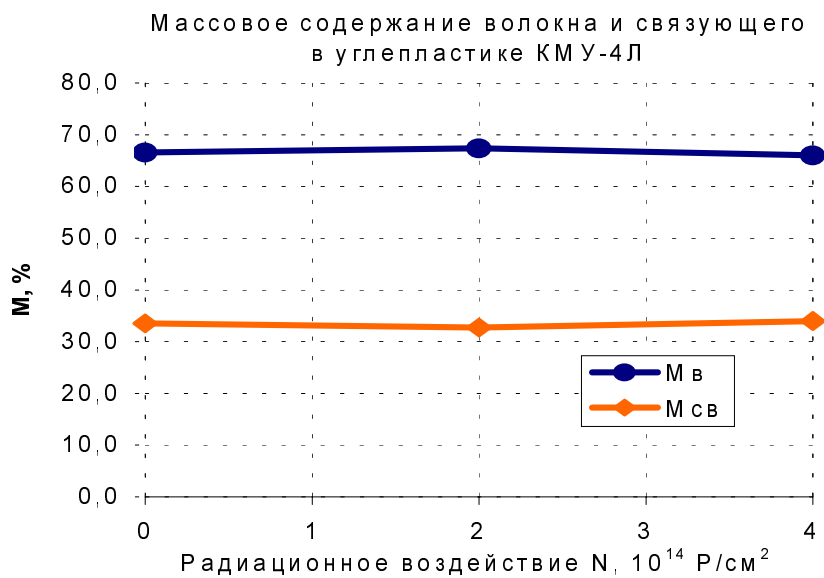


Рис. 8

Литература

1. ATLAS Tech. Prop. CERN/LHC/94-43, 1994.
2. Radiological safety aspects of the operation of proton accelerators IAEA Technical Reports series 283. Vienna, 1998.
Barbier M. Induced radioactivity. Amsterdam: North Holland, 1969.
Knoll, Glen F. Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons. Inc., 1989.