

ВЛИЯНИЕ ЛАБОРАТОРНО ИМИТИРУЕМЫХ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ УГЛЕПЛАСТИКОВ

*В.А. Лотоцкая, Л.Ф. Яковенко, Е.Н. Алексенко, В.В. Абраимов,
Г.И. Сальтевский, И.П. Зарицкий*

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины,
Харьков, Украина*

E-mail: lototskaya@ilt.kharkov.ua; факс +38(057)345-05-93, тел. +38(057)540-30-19

Приведены результаты исследования влияния температуры в интервале 373...77 К на статическую и циклическую прочности однослойного однонаправленного углепластика, входящего в состав солнечных батарей космических аппаратов (КА). Установлены характер и величина изменения циклической долговечности при комнатной температуре углепластика в поперечном направлении без покрытия и с покрытием после комплексного воздействия орбитального термоциклирования и потоков совмещенных пучков протонов и электронов.

ВВЕДЕНИЕ

Углепластики, используемые в многопрофильных конструкциях криогенно-вакуумной и космической техники, обладают высокими удельными показателями статической прочности и жесткости, виброустойчивостью и размерной стабильностью в диапазоне температур -150...+150 °С. Основную часть конструкционных углепластиков составляют композиты на основе эпоксидных связующих, обладающих высокой адгезией к армирующим волокнам, малой усадкой и когезионной прочностью в отвержденном состоянии. Недостатком таких материалов является хрупкость матрицы. Вследствие этого в слоистых армированных пластиках наблюдается пониженное сопротивление развитию трещин в направлении ориентации слоев и между ними. Особенно значительно влияние степени хрупкости матрицы при циклическом нагружении композита и под воздействием факторов космического пространства (ФКП). В то же время надежность функционирования элементов космических конструкций, деталями обшивки которых являются углепластики, в значительной степени определяется способностью этих материалов сохранять эксплуатационные характеристики в условиях длительного воздействия ФКП.

Целью настоящей работы являются исследования влияния температуры в интервале 373...77 К и комплексного воздействия орбитального термоциклирования и потоков совмещенных пучков протонов и электронов на циклическую прочность однослойных углепластиков, используемых в качестве обшивки сотового каркаса солнечных батарей (СБ) КА.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованные материалы.

1. Однослойный однонаправленный эпоксиглепластик (лист толщиной 0,14 мм): армирующий компонент – углеродные волокна ЭЛУР-П-0,08

ТУ6-06; И81-85; матричный компонент – эпоксидная смола ЭДТ-69Н ТИ59-1035-92.

2. Однослойный однонаправленный эпоксиглепластик (лист толщиной 0,135 мм): армирующий компонент – углеродная лента ЭЛУР-П-0,1 ТУ-06, И81-85; матричный компонент – эпоксидная смола ЭДТ-69Н ТИ59-1035-92.

3. Однослойный однонаправленный эпоксиглепластик (лист толщиной 0,20 мм), ламинированный с одной стороны полиимидной пленкой ППМ ТУ6-42-182-92 и эмалью терморегулирующей ЭУ-01 ТУ У24.3-02070921.004-2003. Компоненты те же.

Образцы для испытаний первого углепластика вырезали из листа в двух направлениях: параллельно (продольные образцы) и перпендикулярно (поперечные образцы) армирующему компоненту. Для второго и третьего углепластиков исследовали только поперечные образцы.

Влияние изменения температуры на циклическую прочность при переменном растяжении в продольном и поперечном направлениях изучены на образцах первого углепластика (ЭЛУР-П-0,08 + ЭДТ-69Н). Для оценки уровня амплитуды напряжений в многоцикловой области предварительно определены значения предела прочности углепластика.

Влияние ФКП исследовано на поперечных образцах углепластиков второго и третьего типов.

Механические испытания образцов с усилием более 100 Н проводили:

– на статическую прочность на испытательной машине FPZ-100/1, снабженной низкотемпературной приставкой конструкции ФТИНТ НАН Украины [1];

– на усталость при переменном растяжении с коэффициентом асимметрии цикла $R=0,1$ и частотой 10 Гц на усталостной машине с гидравлическим приводом, созданной также во ФТИНТ [2]. Было выбрано базовым число циклов – $5 \cdot 10^5$.

Образцы с усилием от 0,2 до 100 Н испытывали на универсальном стенде (рис. 1), специально разработанном для этих целей, как при статическом одноосном растяжении, так и на усталость при

переменном растяжении с теми же параметрами ($R=0,1; 10 \text{ Гц}, 5 \cdot 10^5$). Во всех случаях погрешность измерения нагрузки не превышала 1 % от измеряемой величины.

Механические характеристики продольных образцов первого углепластика (ЭЛУР-П-0,08 + ЭДТ-69Н) исследованы при температурах 373, 293 и 77 К, а поперечных – при 373, 293 и 150 К. Различие температур испытания связано с необходимостью изменения типа деформирующих устройств для образцов различной ориентации.

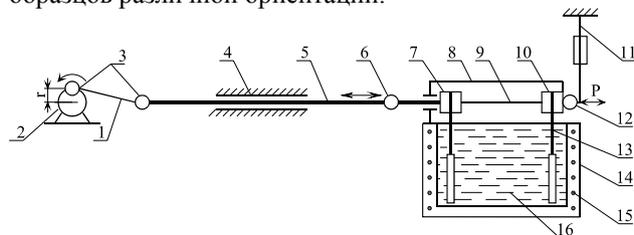


Рис. 1. Схема универсального стенда: 1 – шатун; 2 – эксцентрик; 3, 6, 12 – шарниры; 4 – направляющая втулка; 5 – шток; 7, 10 – захваты; 8 – крышка; 9 – образец; 11 – динамометр; 13 – хладопровод; 14 – термостат; 15 – нагревательная спираль; 16 – жидкий азот

При испытаниях более прочных продольных образцов в деформационных машинах испытательный узел расположен вертикально и легко погружается в криостат с жидким азотом. В универсальном стенде силовой шток с поперечным образцом расположен горизонтально (см. рис. 1). Поэтому охлаждение осуществляли через гибкие медные жгуты 13, закрепляемые с одной стороны на захватах образца, а с другой – помещенные в термостат 14 с жидким азотом. При таком охлаждении удалось достигнуть температуры 150 К. Образцы нагревали с помощью печи. Температуру контролировали медь-константановой термопарой, которую закрепляли на образце. Точность поддержания температуры $\pm 2 \text{ К}$.

На исходных образцах поперечного направления углепластиков второго и третьего типов получены кривые усталости на воздухе при комнатной температуре. На полученной кривой усталости каждого материала была выбрана «реперная точка», соответствовавшая максимальному напряжению цикла, при котором значения циклической долговечности находились вблизи $N=1 \cdot 10^5$ циклов. При выбранной фиксированной амплитуде напряжения в цикле проведено испытание пяти исходных образцов каждого материала и пяти образцов каждого материала, прошедших воздействие ФКП, и определены средние значения их долговечности. Оценка воздействия ФКП на циклическую долговечность материалов выполнена путем сравнения средних значений \bar{N} в «реперной точке» до и после воздействия ФКП.

Комплексное воздействие лабораторно имитируемых ФКП. Образцы углепластиков второго и третьего типов подвергались

термоциклированию в интервале температур $+100 \dots -100 \text{ }^\circ\text{C}$ (число циклов – 100, длительность цикла – 45 мин) и радиационному воздействию, соответствующему году пребывания КА на околоземной орбите с высотой $H = 350 \text{ км}$ и наклоном $i = 52^\circ$. Соответствующие флюенсы протонов и электронов с энергией 160 кэВ равны $F_p = 8,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и $F_e = 1,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

Термоциклическое воздействие по заданной программе проводили согласно стандарту ECSS-Q-70-04А в автоматизированном стенде ТВЦ конструкции ФТИНТ НАН Украины. Давление остаточных газов в камере перед испытанием составляло 10^{-5} Па , во время испытаний – $6 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$.

Радиационное воздействие пучками протонов и электронов с энергией 160 кэВ на образцы исследуемых материалов осуществляли с использованием ускорителей электронов и протонов на совмещенных пучках комплексного имитатора КИФК, созданного во ФТИНТ НАНУ [3]. Давление остаточных газов в вакуумной камере КИФК до начала облучения составляло $1 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$, в процессе облучения – $3 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$. Методика расчета режимов облучения в имитационных экспериментах приведена в [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние температуры. На рис. 2 схематично приведены характерные диаграммы растяжения углепластика ЭЛУР-П-0,08 + ЭДТ-69Н в продольном (а) и поперечном (б) направлениях. Для продольных образцов диаграммы растяжения при всех температурах испытания практически линейные. Значение относительного удлинения в момент разрушения не превышает 2 %, при этом непосредственно упругая деформация, оцененная по определенным значениям модуля упругости на начальном участке кривой деформирования, составляет $\approx 1 \%$. Разрушение продольных образцов при всех температурах исследования происходит путем нарушения связи волокно–матрица в местах пересечения волокна с одной из нитей утка, разрыва волокна и последующего разрыва матричного компонента.

Для поперечных образцов вид диаграммы растяжения зависит от температуры испытания. Так, если при 150 К диаграмма растяжения практически линейная, а относительное удлинение в момент разрушения $\approx 2 \%$, то при 293 К наблюдается переход к высокоэластичной деформации. В момент разрыва образца среднее обратимое относительное удлинение достигает $\approx 12 \%$. При 373 К этот эффект более выражен, и среднее обратимое относительное удлинение достигает $\approx 25 \%$. Разрушение поперечных образцов при растяжении для всех температур происходит по матричному компоненту между углеродными волокнами.

На рис. 3 приведены результаты влияния температуры и ориентации образца относительно оси растяжения на статические и усталостные характеристики углепластика ЭЛУР-П-0,08 + ЭДТ-69Н. Результаты испытаний на усталость при переменном растяжении приведены в виде

зависимостей циклической долговечности N от максимального напряжения в цикле σ_{max} при трех температурах для продольной (см. рис. 3,а) и поперечной ориентаций (см. рис. 3,б). На этих же рисунках нанесены средние значения предела прочности $\sigma_{вр}$ для всех температур и полосы рассеяния его значений.

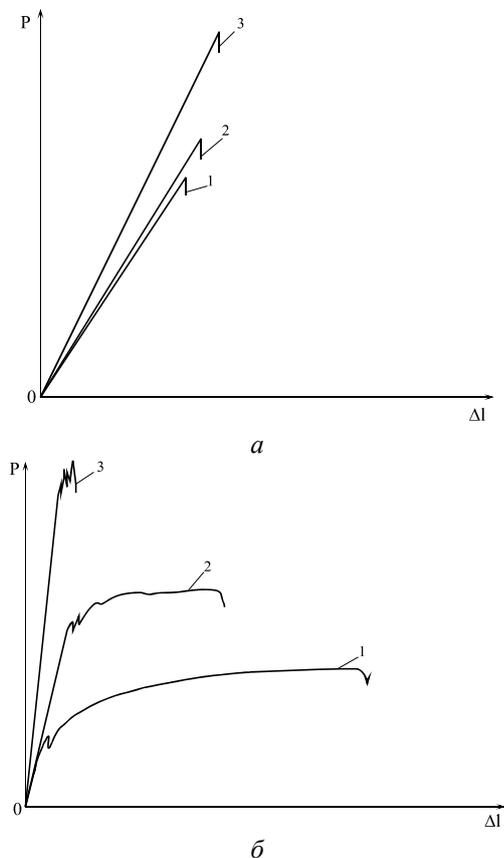


Рис. 2. Характерные диаграммы растяжения углепластика ЭЛУР-П-0,08 + ЭДТ-69Н в продольном (а) и поперечном (б) направлениях при температурах: 1 – 373 К, 2 – 293 К, 3(а) – 77 К; 3 (б) – 150 К

Из полученных результатов следует, что:

- статическая и циклическая прочности продольных образцов при всех температурах более чем на порядок превышают аналогичные характеристики поперечных образцов;

- с понижением температуры независимо от ориентации прочностные характеристики возрастают как в статическом, так и в динамическом режимах нагружения;

- усталостные кривые продольных образцов при всех температурах исследования лежат в довольно узком интервале напряжений. Достижение числа циклов $5 \cdot 10^5$ происходит при значениях максимального напряжения в цикле $\sigma_{р. max}$ около 80 % среднего значения $\sigma_{вр}$, в то время как в поперечных образцах – около 50 % среднего значения $\sigma_{вр}$.

При визуальных наблюдениях образцов в процессе усталостного нагружения при комнатной температуре было обнаружено, что зарождение усталостной трещины как в поперечных, так и в

продольных образцах происходит в эпоксидной матрице, что согласуется с результатами [5].

Учитывая этот факт, при исследовании влияния ФКП наибольший интерес представляло изучение циклической долговечности поперечных образцов, механические свойства которых в первую очередь определяются свойствами матричного компонента.

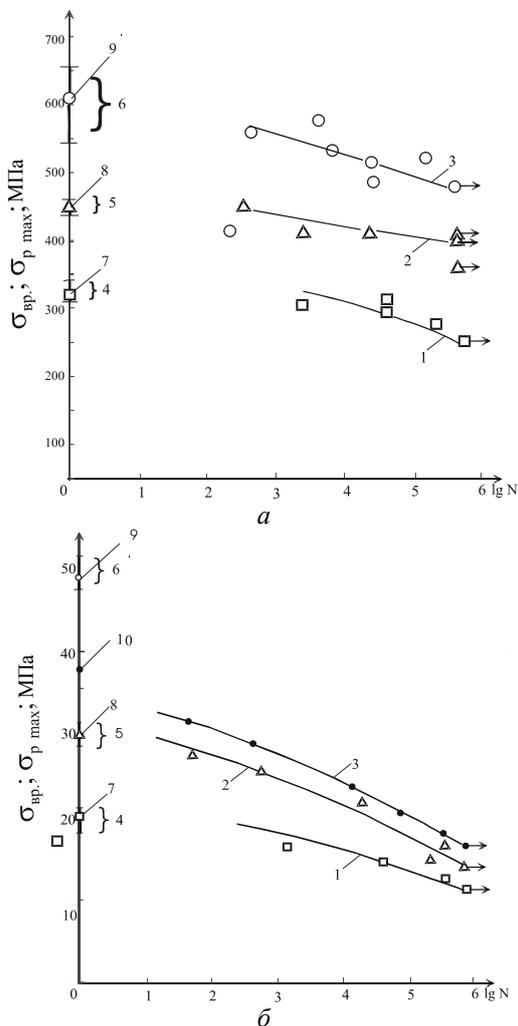


Рис. 3. Кривые усталости углепластика ЭЛУР-П-0,08 + ЭДТ-69Н в продольном (а) и поперечном (б) направлениях при температурах: 1 – 373 К; 2 – 293 К; 3(а) – 77 К; 3 (б) – 150 К. Полосы рассеяния (4, 5, 6) и средние значения $\sigma_{вр}$ (7, 8, 9, 10) при температурах: 4, 7 – 373 К; 5, 8 – 293 К; 9, 6 – 77 К; 10 (б) – 150 К

Влияние воздействия ФКП. На рис. 4 показаны кривые усталости при нормальных условиях поперечных образцов исходного углепластика (ЭЛУР-П-0,1 + ЭДТ-69Н) без покрытия (а) и ламинированного (б) пленкой ППМ и терморегулирующей эмалью. Кривые усталости обоих материалов характеризуются переходом от малоциклового к многоциклового усталости в достаточно широком интервале изменения максимального напряжения цикла.

Значения циклической долговечности, определенные в «реперной точке», на кривых усталости выделены другими значками.

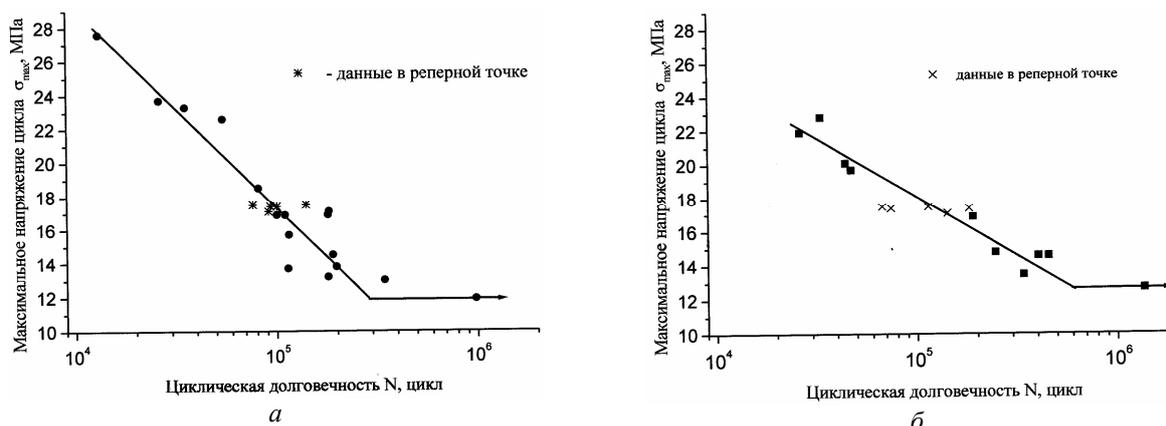


Рис. 4. Кривые усталости в нормальных условиях однослойного однонаправленного углепластика ЭЛУР-П-0,1 + ЭДТ-69Н без покрытия (а) и с покрытием (б)

В таблице приведена статистическая обработка результатов испытания на усталость пяти образцов обоих материалов в «реперной точке» в исходном состоянии и после воздействия ФКП. Сравнение полученных экспериментальных значений

циклической долговечности до и после воздействия ФКП показало, что циклическая долговечность в «реперной точке» углепластика с покрытием под влиянием ФКП увеличивается более чем в 5 раз, а без покрытия – уменьшается более чем в 4 раза.

Материал	Обработка	Циклическая долговечность в «реперной точке» N , цикл	Среднее значение циклической долговечности в «реперной точке» \bar{N} , цикл	Границы доверительного интервала для значений циклической долговечности в «реперной точке», цикл*
Однослойный однонаправленный эпоксиглепластик ЭЛУР-П-0,1+ ЭДТ-69Н без покрытия	Исходное состояние	$7,6 \cdot 10^4$	$9,8 \cdot 10^4$	$7,6 \cdot 10^4 \dots 1,27 \cdot 10^5$
		$9,1 \cdot 10^4$		
		$9,3 \cdot 10^4$		
		$1,0 \cdot 10^5$		
		$1,4 \cdot 10^5$		
	ТЦ+ 100...-100°C, 100 цикл, облучение p+e	$1,4 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4 \dots 2,9 \cdot 10^4$
		$2,0 \cdot 10^4$		
		$2,4 \cdot 10^4$		
		$3,4 \cdot 10^4$		
		$3,7 \cdot 10^4$		
Однослойный однонаправленный эпоксиглепластик ЭЛУР-П-0,1+ ЭДТ-69Н, ламинированный пленкой ППМ и терморегулирующей эмалью	Исходное состояние	$6,7 \cdot 10^4$	$1,08 \cdot 10^5$	$6,3 \cdot 10^4 \dots 1,8 \cdot 10^5$
		$7,4 \cdot 10^4$		
		$1,14 \cdot 10^5$		
		$1,42 \cdot 10^5$		
		$1,82 \cdot 10^5$		
	ТЦ+ 100...-100°C, 100 цикл, облучение p+e	$2,1 \cdot 10^5$	-	-

*Доверительная вероятность $\alpha=0,95$.

Уменьшение усталостной прочности полимерного композита под воздействием ФКП – ожидаемый результат. Усталостная прочность углепластиков с терморезистивными матрицами определяется суммой накапливаемых структурных изменений при длительном воздействии механических нагрузок и ФКП. Ключевую роль играют необратимые деструктивные процессы зарождения радиационно-индуцированных дефектов на поверхности полимерной матрицы и на поверхности раздела волокно–матрица.

В случае ламинированного углепластика комбинированное защитное покрытие толщиной 0,065 мм полностью поглощает протоны с энергией 160 кэВ (глубина их проникновения согласно [6] не превышает 2 мкм) и значительно тормозит проникновение электронов в углепластик (глубина проникновения порядка 100 мкм [6]), снижая тем самым количество возникающих в полимерной матрице радиационно-индуцированных дефектов. Однако протекторная роль покрытия не может объяснить увеличения усталостной прочности

ламинированного углепластика под воздействием ФКП.

Известно [7], что под действием радиации в полимерных материалах реализуются процессы сшивания и деструкции полимерных цепочек. При этом в области малых доз могут доминировать процессы сшивки, а при больших дозах – процессы деструкции. В таком аморфно-кристаллическом полимере, как полиимид, кристаллиты выполняют двойную роль: выступают в виде узлов физической сшивки и одновременно в виде эффективных центров диссипации, которые повышают прочностные свойства полимеров. В зависимости от дозы облучения изменяется в ту или другую сторону соотношение количества и плотности упаковки кристаллической и аморфной фаз, от чего и зависит критическое напряжение. В [8] предложен способ упрочнения пленочных полимерных материалов типа полиимида путем его облучения в вакууме совместными пучками протонов и электронов с флюенсом до $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. В нашем случае величины флюенсов облучения $F_n = 8,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и $F_e = 1,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ лежат в диапазоне упрочняющих доз, что приводит к увеличению прочности полиимидной составляющей покрытия и, в конечном итоге, к увеличению циклической долговечности ламинированного углепластика в целом.

ВЫВОДЫ

Получены температурные зависимости характеристик прочности при статическом и циклическом растяжениях однослойного однонаправленного углепластика ЭЛУР-П-0,08+ЭДТ-69Н с ориентацией углеродных волокон вдоль и поперек оси растяжения. При обоих видах ориентации волокон и типах нагружения прочность материала с понижением температуры возрастает.

При деформации вдоль направления волокон статическая и циклическая прочности на порядок выше, чем в поперечном направлении. Кривые усталости продольных однонаправленных образцов лежат в более узком интервале напряжений, чем поперечных.

Определены кривые усталости в нормальных условиях однослойного однонаправленного углепластика ЭЛУР-П-0,1+ЭДТ-69Н в поперечном направлении без покрытия и с комбинированным покрытием в виде терморегулирующей эмали и полиимидной пленки. Для точки на кривой усталости в многоциклового области $N=1 \cdot 10^5$ установлены средние значения \bar{N} в исходном состоянии и после воздействия ФКП.

Обнаружено, что циклическая долговечность углепластика с покрытием под влиянием ФКП

увеличивается в 5 раз и уменьшается почти в 4 раза при отсутствии покрытия. Эффект связан с защитной ролью покрытия относительно зарождения радиационно-индуцированных дефектов на поверхности полимерной матрицы и упрочнением полиимидной составляющей покрытия вследствие поглощения дозы протонов и электронов, которая находится в пределах диапазона упрочняющих доз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л.В. Воликова, В.К. Чернецкий. Низкотемпературная приставка к разрывной машине 123Y10 // *Прикладное криогенное и вакуумное материаловедение* / Под ред. Ф.Ф. Лаврентьева. Киев: «Наукова думка», 1991, с.137-143.
2. И.Д. Абушенков, В.К. Чернецкий, В.И. Ильичев. Установка для испытания материалов на усталость при криогенных температурах // *Завод. лаб.* 1986, №12, с.59-63.
3. В.В. Абраимов, А.А. Негода, Л.В. Колыбаев. Комплексная имитация факторов космического пространства // *Космічна наука і технологія.* 1995, т.1, №2-6, с.76-80.
4. Ю.А. Похил, В.В. Абраимов, Г.И. Сальтевский, В.А. Лотоцкая и др. Воздействие наземно имитируемых факторов космического пространства на термооптические и электрофизические характеристики материалов космических аппаратов // *Космічна наука і технологія.* 2009, т.15, № 6, с. 73–83.
5. O. Attia, A.J. Kinloch, F.L. Matthews. Modelling the fatigue life of polymer-matrix fibre-composite components // *Composites Science and Technology.* 2001, v. 61, p. 2273–2283.
6. Я.А. Теплова. Прохождение ионизирующего излучения через вещество // *Модель космического пространства* / Под ред. С.Н. Вернова. А.И. Акиншина. Т. 2: Моделирование воздействия космической среды на материалы и элементы космического оборудования. М.: НИИЯФ МГУ, 1983, с.29-55.
7. С.А. Хатилов, В.М. Цвелев, С.В. Алексеев. Радиационная стойкость полимеров в условиях космического пространства // *Модель космоса* / Под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ, 2007, с.414-436.
8. Патент на корисну модель №50337. *Спосіб підвищення механічних властивостей плівкових полімерних матеріалів* / Ю.О. Похил, В.В. Абраїмов, Г.І. Сальтевський, В.О. Лотоцька та ін. Бюллетень изобретений, 2010, №10.

Статья поступила в редакцию 25.06.2011 г.

ВПЛИВ ФАКТОРІВ КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ, ЩО ІМІТУЮТЬСЯ ЛАБОРАТОРНО, НА ЦИКЛІЧНУ МІЦНІСТЬ ВУГЛЕПЛАСТИКІВ

*В.О. Лотоцька, Л.Ф. Яковенко, Є.М. Алексенко, В.В. Абраїмов,
Г.І. Сальтєвський, І.П. Зарицький*

Наведено результати дослідження впливу температури в інтервалі 373...77 К на статичну та циклічну міцності одношарового односпрямованого вуглепластику, що входить до складу сонячних батарей космічних апаратів. Встановлено характер і величину змінення циклічної довготривалості при кімнатній температурі вуглепластику у поперечному напрямку без покриття та з покриттям після комплексного впливу орбітального термоцикування і потоків сумісних пучків протонів і електронів.

INFLUENCE OF LABORATORY SIMULATED SPACE FACTORS ON CYCLIC DURABILITY OF CARBON PLASTICS

*V.A. Lototskaya, L.F. Yakovenko, E.N. Aleksenko, V.V. Abramov,
G.I. Saltevskiy, I.P. Zaritskiy*

The experimental data on the effect of temperature 373...77 K on static and cyclic durability of single-layered unidirectional carbon plastic, to be employed with solar arrays of space vehicles, are considered. Fatigue life of carbon plastic with and without coating was investigated before and after complex influence of orbital thermal cycling and combined beams of protons and electrons at room temperature and in transverse direction of fibers. The change of character and value of fatigue life are obtained.