

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА  
AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

**Цуй Суй, Гусева Р. И., Чжан Линюни, Гао Юй**  
**Cui Xu, R.I.Guseva, Zhang Lingyun, Gao Yu**

**ВЛИЯНИЕ ВАКУУМ-ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**EFFECT OF VACUUM THERMO-CYCLING ON MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES**



**Цуй Суй\*** – доцент, магистр технических наук, зам. декана факультета аэрокосмической техники Шэньянского авиакосмического университета, член важной лаборатории провинции Ляо Нин по разработанной технике КМ с передовыми полимерными матрицами (Китай). E-mail: cuixug@163.com.

**Mr. Cui Xu\*** – Master of Engineering, Associate Professor, Deputy Dean of the Air-space Craft Department at Shenyang Aircraft Technical Institute, Liaoning Province, Member of the Advanced Polymer Matrix Composite Material Technology Laboratory, China. E-mail: cuixug@163.com.



**Гусева Роза Ивановна** – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология самолетостроения», зам. декана самолетостроительного факультета Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: r\_guseva@knastu.ru.

**Ms. R.I. Guseva** – PhD in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of Aircraft Engineering Technology, Deputy Dean of the Aircraft Engineering at Komsomolsk-on-Amure State Technical University, Russia. E-mail: r\_guseva@knastu.ru

**Чжан Линюни** – профессор Шэньянского авиационного технического института (Китай). E-mail: zhangly79@163.com.

**Mr. Zhang Lingyun** - Professor, Shenyang Aircraft Technical Institute, China. E-mail: zhangly79@163.com

**Гао Юй** – доцент Шэньянского авиационного технического института (Китай). E-mail: gaoyu1971@163.com.

**Gao Yu** - Associate Professor, Shenyang Aircraft Technical Institute, China. E-mail: gaoyu1971@163.com.

**Аннотация.** В статье исследуется влияние числа циклов вакуум-термоциклирования на прочность углеродного композиционного полимерного материала М40J/5228А (УКМ) при его растяжении, изгибе и сдвиге в условиях, имитирующих многократные полеты ЛА в космическом пространстве.

**Summary.** The vacuum thermo-cycling was performed on unidirectional M40J/5228A composites, and tensile strengths, bend strength and interlayer strength were examined after vacuum thermo-cycling for various cycles, thus emulating multiple flights of a spacecraft to the outer cosmic space.

**Ключевые слова:** эпоксидные композиционные материалы, вакуум-термоциклирование, механические характеристики.

**Key words:** epoxy composites, vacuum thermo-cycling, mechanical properties

УДК 629.735

\* Статья новаторского ряда отдела образования провинции Ляо Нин Китая (2008Т149)  
The Project is sponsored by "Liaoning BaiQianWan Talents Program" (2008921102)

При использовании углеродного волокна как наполнителя в эпоксидных композиционных материалах получают малую плотность композиционного материала, при этом повышаются удельная прочность и жесткость, улучшается качество материала и изделия. Если применить при формовании низкий вакуум, то стабилизируется коэффициент теплового расширения. Все эти явления обеспечивают УКМ широкое применение в космосе.

Углерод-эпоксидные композиционные материалы (УКМ) применяют в космических аппаратах в основном в качестве различных структурных частей, таких как части антенны, подложки массивов солнечных батарей, в трущихся деталях и подшипниках [1]. Космический аппарат, находясь на околоземной орбите и в затененных областях космоса, находится в нестабильных температурных режимах, повторяющихся неоднократно (диапазон изменения температур на поверхности аппарата лежит в пределах 113 – 393 К) [2].

В результате изделия из УКМ, применяемые на космическом аппарате, испытывают в полете многократные температурные перепады, т.е. нагрузки от циклического переменного температурного поля. Из-за разницы между коэффициентом теплового линейного расширения углеродного волокна и матрицы на порядок и более композит будет испытывать переменные тепловые удары и напряжения, что в результате приводит к разрушению УКМ и изменению его механических характеристик.

Кроме того, на космических орбитах давление газа менее  $10^{-5}$  Па. Такой вакуум и многократные полеты приводят к потере массы полимерных композитов [3; 4; 5]. В научно-технической литературе имеются сведения, что вакуум-термоциклирование влияет на потерю массы и межслойные сдвиги для традиционных ПКМ и их компонентов [6; 7; 8; 9].

Исследования поведения полимерных композиционных материалов (ПКМ) при вакуум-термоциклировании имеют важное значение для обеспечения безопасного движения космических летательных аппаратов (КЛА) и увеличения их надежности и ресурса.

### Эксперимент

Эпоксидная смола 5228А рассматривается как новый матричный материал в ПКМ, она имеет уникальные свойства по влагостойкости и жаростойкости [10], имеет хорошие перспективы применения в антеннах КЛА.

В настоящей работе реальные циклические космические полеты КЛА приравнены к условиям многократного вакуум-термоциклирования. Организации NASA, ESA и Китайская народная республика нормировали параметры вакуум-термоциклирования для космических аппаратов и их компонентов.

Для изготовления образцов выбраны углеродные волокна M40J и эпоксидные смолы 5228А.

Образцы изготавливались однонаправленными: одна партия с углом армирования  $0^\circ$ , вторая – с углом армирования  $90^\circ$ .

Кроме того, использовали углеродные волокна двух типов: без нанесения аппрета на поверхность волокна и с нанесенным аппретом. Размеры однонаправленного образца с углом армирования  $0^\circ$  и шириной 9 мм в рабочей части (для испытаний на растяжение) показаны на рис. 1.

Формование образца идет по ступенчатому циклу в автоклаве: полуфабрикаты образцов нагревали до температуры  $130^\circ\text{C}$  со скоростью  $1,5 - 2,0^\circ/\text{мин}$ , при достижении температуры  $80^\circ\text{C}$  включали давление  $0,6 - 0,7$  МПа, выдерживали при этих параметрах  $40 - 60$  мин, затем продолжали нагрев со скоростью  $1,5 - 2,0^\circ/\text{мин}$ . При температуре  $180^\circ\text{C}$  выдерживали образцы  $120$  мин. Затем полученные образцы вынимали из автоклава и охлаждали до комнатной температуры. Часть образцов передавалась на статические испытания для определения исходной прочности на изгиб, растяжение и сдвиг.

Затем образцы проходили испытания на вакуум-термоциклирование, которое проводили в машине вакуум-термоциклирования GZKD-01. На рис. 2 в качестве примера представлена кривая изменения циклов вакуум-термоциклирования в зависимости от температуры и времени. Вакуум при испытаниях доведен до  $10^{-5}$  Па.

Затем образцы испытывались на прочность для определения механических свойств образца. Испытания проводили в испытательной машине MTS810.

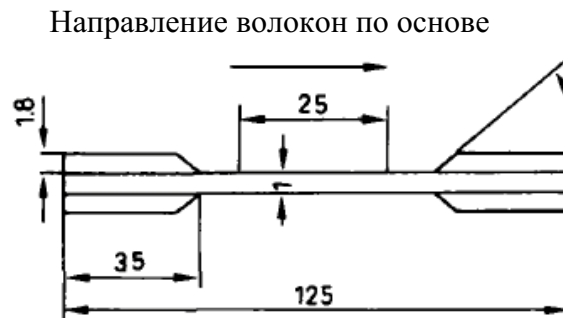


Рис. 1. Размеры образца на растяжение

Образцы на растяжение с углом армирования  $90^\circ$  в соответствии со стандартами выбраны длиной 125 мм, шириной 9 мм, толщиной 1 мм, длина рабочей зоны составляет 25 мм.

Испытания на растяжение проведены в соответствии с национальным стандартом КНР GB3354-82, испытание на изгиб – в соответствии с национальным стандартом КНР GB3356-82 и испытания на сдвиг – в соответствии с национальным стандартом КНР GB3357-82.

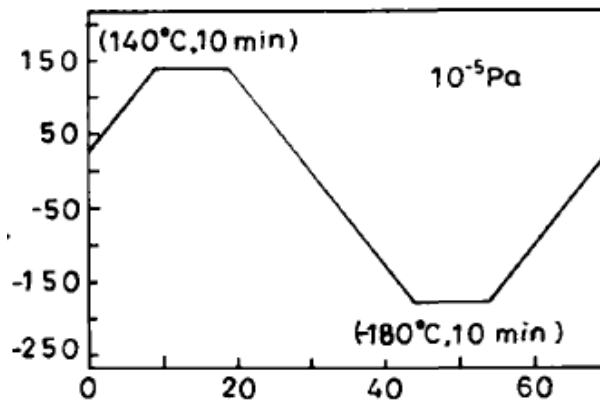


Рис. 2. Кривая изменения цикла вакуум-термоциклирования в зависимости от времени и температуры

Сечения образцов после разрушения на растяжение наблюдались на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-570.

### Результаты эксперимента на растяжение

При испытании образцов, изготовленных с углом армирования  $90^\circ$ , выяснилось, что с увеличением числа циклов вакуум-термоциклирования прочность на разрыв уменьшается и при достижении 70 – 75 циклов и далее становится стабильной. Из рис. 3 следует, что снижение прочности  $\sigma_b$  находится в пределах 10 – 13 %.

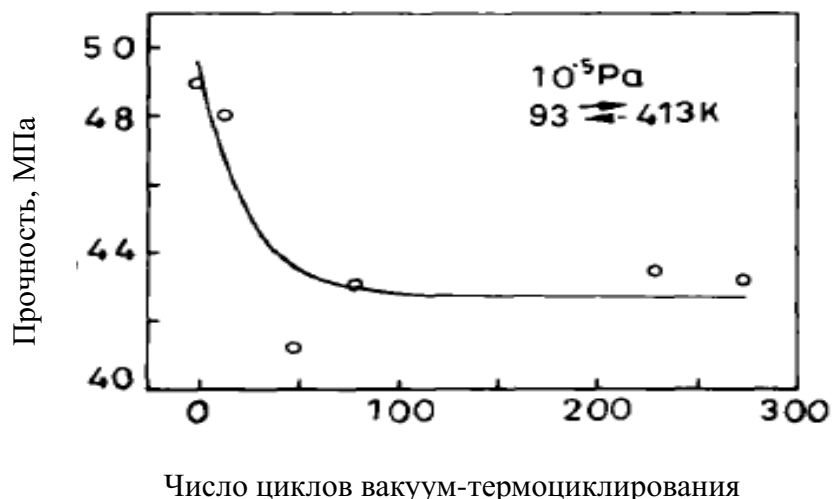


Рис. 3. Влияние циклов вакуум-термоциклирования на прочность композитных материалов M40J/5228A при растяжении с углом армирования  $90^\circ$

Сканирование сечений (см. рис. 4) при разрушении композитных образцов M40J/5228A с углом армирования  $\varphi = 90^\circ$  выявило, что разрушение проходит по двум формам – отслоения матрицы вдоль границы волокно-смола и разрывы самой смоляной композиции.

На рис. 4, а в части А можно наблюдать оголенную волокнистую поверхность; в части В можно наблюдать четкие продольные линии, которые являются следом от другого волокна; на части С видно, что волокно вообще обнажилось, на нем нет смоляной композиции; на части D можно наблюдать классические изломы при растяжении для матричных смол.

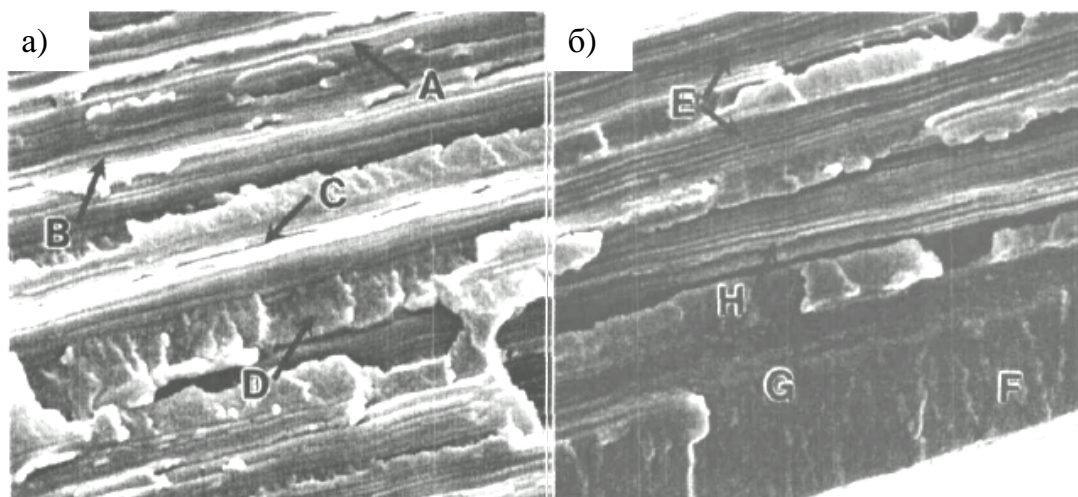


Рис. 4. Сканирующие электронные микрофотографии образцов M40J/5228A с углом армирования  $90^\circ$ , доведенных до разрушения

При сканировании неразрушенного образца на растяжение с углом армирования  $\varphi = 90^\circ$  видно, что продольные углубления плавно распределены вдоль граничных слоев волокон, также наблюдаются продольные углубления и в матрице. При нагружении образцов через 48 циклов вакуум-термоциклирования произошли изломы волокна, некоторые волокна полностью обнажились (см. рис. 4, б, часть Е), на поверхности некоторых волокон нет смолы и вдоль рифтов также смола не наблюдается (см. рис. 4, б, часть H); на поверхности образцов

(см. рис. 4, б, части F, G) наблюдается концентрация смоляной композиции, появились изломы гладкой поверхности матрицы.

Анализ результатов эксперимента образцов с нулевым углом армирования  $\varphi = 0^\circ$  при растяжении (см. рис. 5) показывает, что предел прочности таких образцов с увеличением числа циклов вакуум-термоциклирования уменьшается и при достижении 40 – 45 циклов, далее становится стабильным. Из рис. 5 следует, что снижение прочности  $\sigma_b$  находится в пределах 15 %.



Рис. 5. Изменение прочности образцов из М40J/5228А на разрыв при вакуум-термоциклировании

На рис. 6, а – б представлены микрофотографии сечения разрушенного образца на растяжение с углом армирования  $\varphi = 0^\circ$ , показывающие, что между волокнами практически нет смоляной композиции после испытаний, сцепление идет за счет плотности упаковки волокон и аппретов, нанесенных на поверхность волокон [11; 12; 13].

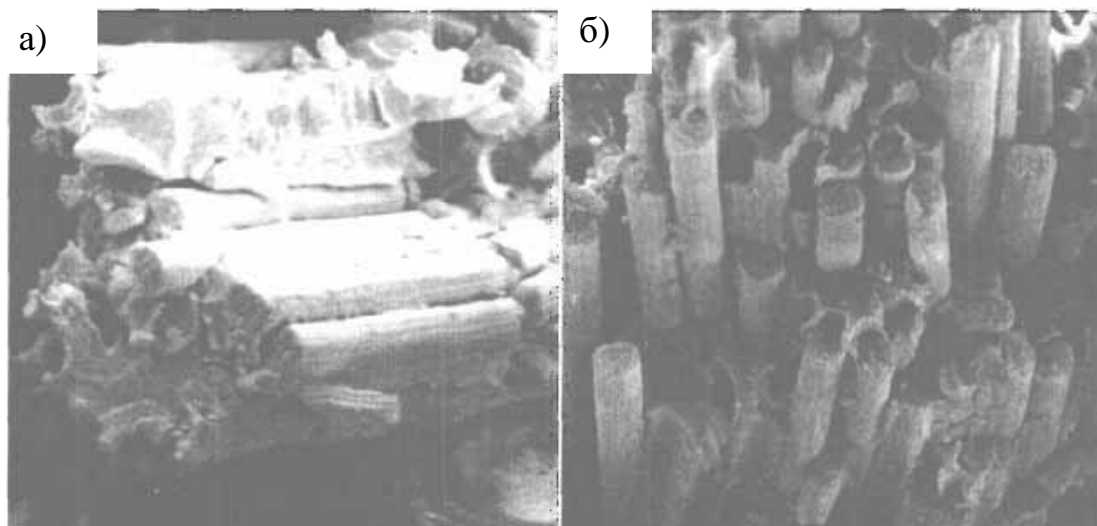


Рис. 6. Сканирующие электронные микрофотографии разрушенных образцов М40J/5228А на растяжение с  $\varphi = 0^\circ$

**Результаты эксперимента на изгиб**

Обработка результатов испытаний образцов на изгиб после вакуум-термоциклирования представлена на рис. 7. С увеличением числа циклов вакуум-термоциклирования прочность на изгиб резко возрастает (через 40 – 50 циклов), затем при дальнейшем увеличении числа циклов прочность резко уменьшается, но при 97 и более циклов прочность практически стабилизируется и становится примерно в два раза выше исходной.

При испытаниях на изгиб напряженное состояние материала отличается от испытания на растяжение. При изгибе появляется недеформированный нейтральный слой, над нейтральным слоем – зона сжатия, под нейтральным слоем – зона растяжения (см. рис. 8).

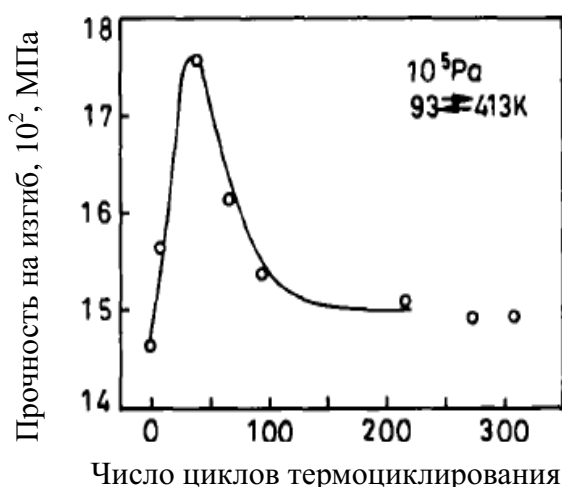


Рис. 7. Влияние числа циклов вакуум-термоциклирования на изгибные характеристики материала М40J/5228А

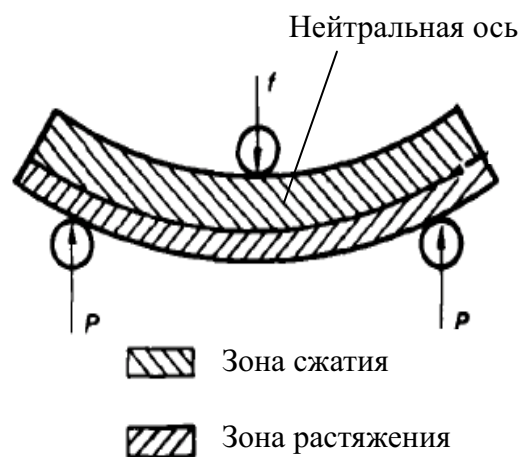


Рис. 8. Иллюстрация напряженного состояния при изгибе образцов

На рис. 9 представлены оптические микрофотографии образцов при испытаниях на изгиб.

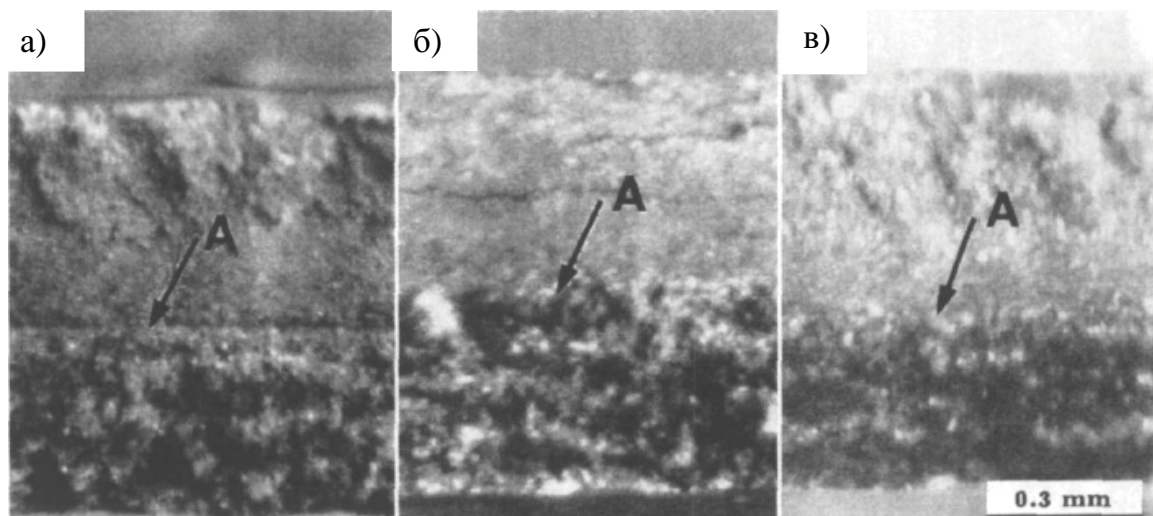


Рис. 9. Оптическая микрофотография образцов на изгиб при разрушении УКМ М40J/5228А: а – исходное состояние; б – состояние при 40 циклах

вакуум-термоциклирования; в – состояние при 95 циклах вакуум-термоциклирования

Из анализа фотографий следует, что нейтральный слой уже при 40 циклах вакуум-термоциклирования начинает разрушаться, а при 95 циклах – разрушен до 70 % от всей площади нейтральной поверхности. Причем зона сжатия разрастается по высоте.

Анализ испытаний образцов на изгибную прочность после вакуум-термоциклирования показывает, что нейтральный слой можно принять за интерфазу [14].

### Результаты эксперимента на сдвиг

При испытании образцов на сдвиг, прошедших вакуум-термоциклирование, выявлено, что с возрастанием числа циклов прочность увеличивается, причем чем больше циклов, тем больше прочность: при увеличении числа циклов вакуум-термоциклирования до 9 прочность резко возрастает (примерно на 7 – 10 %). При дальнейшем увеличении числа циклов вакуум-термоциклирования до 95 прочность на сдвиг начинает возрастать постепенно (примерно на 5 – 7 %) и после 95 – 100 циклов становится стабильной и выше исходной (см. рис. 10).

Анализируя рис. 10, можно сделать вывод, что вакуум-термоциклирование повышает прочность межслоевого сдвига примерно на 10 %.

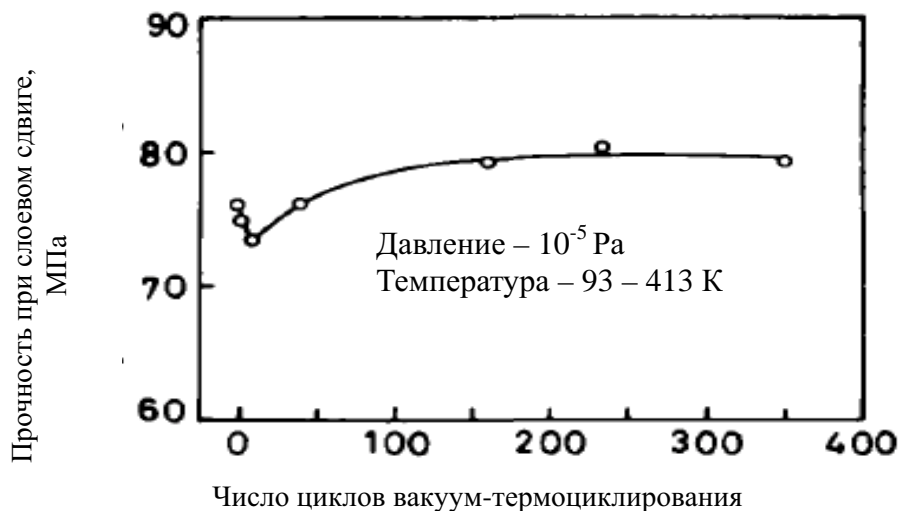


Рис. 10. Зависимость прочности межслоевого сдвига УКМ М40J/5228А от числа циклов вакуум-термоциклирования

Кроме того, были сделаны выводы, что прочность на сдвиг композитного полимерного материала УКМ М40J/5228А в основном определяют нанесенные аппреты (образуя интерфейсные, межфазовые поверхности).

### Выводы по работе

Испытания образцов из композитного полимерного материала УКМ М40J/5228А на прочность при растяжении, изгибе и сдвиге после вакуум-термоциклирования, параметры которого реализуют условия космической среды, показали, что:

1. С увеличением числа циклов вакуум-термоциклирования прочность на разрыв у об-

**Цуй Сюй, Гусева Р. И., Чжан Линюни, Гао Юй**

**ВЛИЯНИЕ ВАКУУМ-ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

разцов с углами армирования  $90^\circ$  и  $0^\circ$  уменьшилась незначительно (примерно на 12 – 13 %), при дальнейшем увеличении числа циклов до 40 – 48 и далее – становится стабильной и меньшей на 12 – 13 %, чем исходная прочность. Дальнейшее увеличение числа циклов вакуум-термоциклирования не оказывает влияния на прочность при растяжении.

2. При испытаниях на изгиб после первых циклов вакуум-термоциклирования прочность на изгиб образцов вначале резко возрастает (примерно на 20 %); затем при числе циклов 48 – 50 прочность на изгиб резко падает, при дальнейшем увеличении числа циклов до 97 – 100 прочность продолжает уменьшаться, но не становится меньше исходной прочности (возрастает на 3 – 5 %).

3. При испытаниях образцов на сдвиг, прошедших вакуум-термоциклирование, выявлено, что при начальном увеличении числа циклов прочность на сдвиг резко возрастает примерно на 7 – 10 %.

При дальнейшем увеличении числа циклов до 100 и более прочность на сдвиг продолжает возрастать (примерно на 5 – 7 % по сравнению с исходной прочностью на сдвиг) и после 150 циклов становится стабильной и выше, чем исходная прочность.

4. Механические характеристики материала УКМ М40J/5228А практически не изменяют своих значений, а в некоторых случаях (при изгибе и сдвиге) даже становятся выше.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. XIAO Shaobo, LIU Zhixiong. *Aerospace Materials and Technology*, 1993 (4):95-98.
2. LI Chundong, YANG Dezhuang, HE Shiyu. *Chinese Journal of Materials Research*, 2003(4):112-116.
3. JIANG Lixiang, HE Shiyu, YANG Dezhuang. *Chinese Journal of Materials Research*, 2003 (4):56-61.
4. R.S.Sperber, AIAA-90-0781, (1990).
5. J.Dauphin, *Vacuum*, 32(10/11), 669(1982).
6. Toshiyuki Shimokawa, Hisaya Katoh, Yasumasa Hamaguchi, Shigeo Sanbongi, Hiroshi Mizuno, *Journal of Composite Materials*, 7, 885(2002).
7. Hancox L. *Thermal Cycling Materials & Design*, 19, 85(1998).
8. Satoshi Kobayashi, Kazuhiro Terada, Shinji Ogihara, Nobuo Takeda, *Composites Science and Technology*, 61, 1735(2001).
9. Kwang-Bok Shin, Chun-Gon Kim, Chang-Sun Hong, Ho-Hyung Lee, *Composites Part B: Engineering*, 31,223(2000).
10. LI Zhijun, LI Xuecheng, BAO Jianwen, CHENG Xiangbao, *Journal of Materials Engineering*, 1999 (10):78-95.
11. Miller A. G., Wingert A. L. Fracture Surface characterization of Commercial Graphite/Epoxy Systems, in: *Fractography of Modern Engineering Materials*, STP 948(ASTM, PA, 1987). – P. 154.
12. Purslow D. *Composites*, 241, 10(1981).
13. Grove R. A., Smith B. W. *Compendium of Post-Failure Analysis Techniques for Composite Materials*.AFWAL-TR-86-4137 (Boeing Military Aircraft Co. Seattle, WA, 1986). – P. 137.
14. XI Niansheng, *Journal of Aviation Materials*, 2, 56(2000).