

# Проектирование, производство и эксплуатация авиационных и аэрокосмических систем

УДК 539.4

Бакмаев С.М., Демский Д.А., Воронцов И.С., Макаров А.Ф.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ULTEM 9085 ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИ СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ АЭРОСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Аддитивные технологии получают все большее распространение не только в сфере макетирования и прототипирования, но и в области реального производства [1, 2]. Отличительным свойством материала напечатанных деталей является анизотропия прочности в зависимости от направления укладки нити. В данной работе приведены результаты исследования влияния способа укладки нити на механические характеристики образцов, изготовленных 3D печатью из материала ULTEM 9085.

Актуальность работы обусловлена необходимостью изготовления методом 3D печати элементов конструкции разработанного ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ» экспериментального образца аэродинамически стабилизированной аэростатической системы (АСАС) [3-6]. Данный летательный аппарат представляет собой малоразмерный привязной аэростат для проведения метеорологических измерений на высотах до 1000 м. Носовой обтекатель АСАС (рисунок 1) представляет собой изготавливаемую в единичном экземпляре деталь сложной формы, к которой предъявляются жесткие требования по массе конструкции, что делает 3D печать оптимальной технологией производства данной детали.

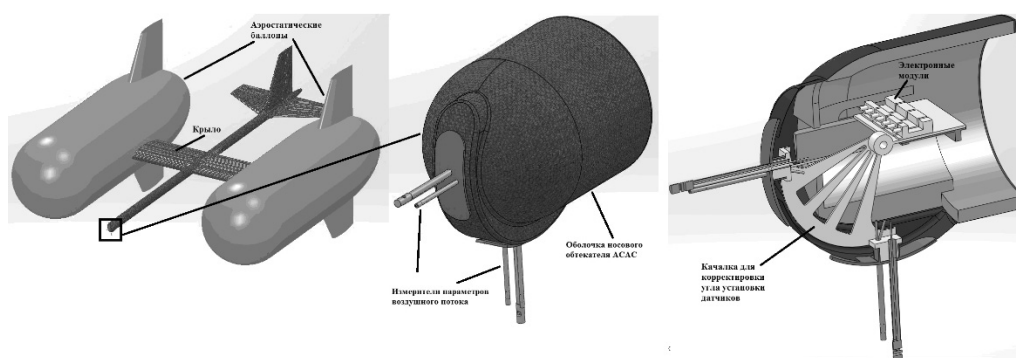


Рисунок 1 – Вид АСАС и носового обтекателя, изготавливаемого 3D печатью

Фирма-изготовитель сообщает [7] следующие механические характеристики пластика ULTEM 9085 без указания направления: предел прочности на разрыв 71,6 МПа, модуль растяжения 2200 МПа, удлинение растяжения до разрыва 6%, прочность на изгиб 115,1 МПа, модуль изгиба 2500 МПа.

Для экспериментального определения предела прочности и модуля упругости материала были изготовлены образцы, отличающиеся направлением укладки нити: нить укладывалась вдоль длины образца ( $\varphi = 0^\circ$ ), по ширине образца ( $\varphi = 90^\circ$ ) и под углом  $\varphi = 45^\circ$  к длине образца. При испытаниях проушины определялась прочность материала при нагружении через болт, установленный в отверстие. На образцах с футоркой определялся предел прочности на сдвиг при вырывании стальной футорки.

Экспериментальные значения механических характеристик материала ULTEM 9085 представлены в таблице 1.

Таблица 1

Тип нагружения	Укладка нити, $\varphi$	Предел прочности на растяжение или изгиб, $\sigma_b$ , МПа, (среднее/минимальное)	Предел прочности на сдвиг, $\tau$ , МПа	Модуль упругости при изгибе, E, МПа
Растяжение	$0^\circ$	91/89		
	$90^\circ$	39/31		
Изгиб	$0^\circ$	128/115		2500
	$45^\circ$	110/108		2150
	$90^\circ$	84/73		2150
Проушина	$0^\circ$	43	35	
	$\pm 45^\circ$	47	38	
	$90^\circ$	21/20		

При испытаниях на вырыв футорки получены значения предела прочности на сдвиг: для гладкой футорки с клеем ВК-9  $\tau_{мин} = 5,0$  МПа,  $\tau_{средн} = 7,5$  МПа, для футорки с резьбой без клея  $\tau_{мин} = 20,0$  МПа,  $\tau_{средн} = 27,0$  МПа.

При испытании на растяжение образца с продольной укладкой ( $\varphi = 0^\circ$ ) образуется шейка со значительной пластической деформацией. Образец расслаивается, что характерно для слоистого материала со слабой связью между слоями (рисунок 2).

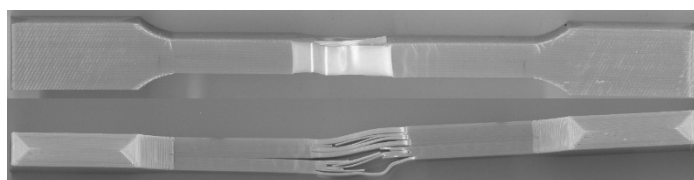


Рисунок 2 – Разрушение образца с укладкой слоев  $\varphi = 0^\circ$  при растяжении

У образцов с поперечным расположением нитей разрушение хрупкое, без пластической деформации, следовательно, прочность сцепления нитей между собой значительно ниже прочности основного материала.

Полученные при испытаниях проушин значения предела прочности  $\sigma_g$  в минимальном сечении значительно ниже, чем у гладких образцов, даже при продольной укладке нити. Материал чувствителен к концентрации напряжений даже при статическом нагружении. Прочность минимальна при поперечной укладке. При продольной укладке ( $\varphi = 0^\circ$ ) и укладке под углом  $\varphi = \pm 45^\circ$  прочность примерно одинакова. Но при продольной укладке разрушается перемычка до края образца, не смотря на ее значительную толщину (рисунок 3).

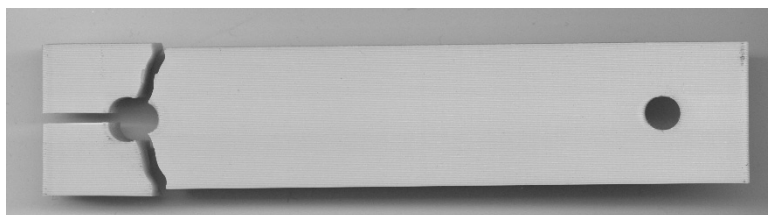


Рисунок 3 – Разрушение проушины с укладкой слоев  $\varphi = 0^\circ$

### Выводы

1. Материал ULTEM 9085 при укладке на 3D принтере получает значительную анизотропию прочности, что необходимо учитывать при проектировании деталей, изготавливаемых методом 3D печати. Анизотропия связана с пониженной прочностью сцепления нитей и пониженной прочностью границ областей с разной укладкой нити.

2. Получены следующие средние значения пределов прочности:

- растяжение гладкого образца с продольной укладкой нитей  $\sigma_g = 91$  МПа, с поперечной укладкой  $\sigma_g = 39$  МПа;

- на изгиб с продольной укладкой нитей  $\sigma_g = 128$  МПа, с поперечной укладкой  $\sigma_g = 84$  МПа.

Модуль упругости  $E=2150...2500$  МПа мало зависит от направления укладки нити. Разрушение при растяжении вдоль волокон происходит с пластическими деформациями, поперек волокон (на отрыв) – без остаточной деформации. При разрушении проушин предел прочности в минимальном сечении значительно меньше, чем у гладких образцов. Влияние концентрации напряжений проявляется даже при статическом нагружении. Минимальная прочность имеет место при поперечной укладке нитей ( $\sigma_g \approx 84$  МПа). В соединении со стальными футорками максимальная прочность  $\tau = 27$  МПа соответствует установке футорок на резьбе.

3. Полученные в результате исследования характеристики пластика ULTEM 9085 будут использованы при расчёте на прочность и разработке оптимальной по

весу конструкции носовой части экспериментального образца аэродинамически стабилизированной аэростатической системы.

Работа выполнена в рамках прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) по соглашению о предоставлении субсидии №14.579.21.0082 при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57914X0082.

#### **Библиографический список**

1. Карасев С. Напечатанный на 3D-принтере самолёт принят на службу в Антарктиде // 3DNews - интернет-издание. URL: <http://www.3dnews.ru/931573> (дата обращения 23.04.2016).

2. Васильков А. В NASA напечатали детали ракетного насоса на 3D-принтере // Компьютера - интернет-издание. URL: [http://www.computerra.ru/131350/nasa\\_3d-printed-rocket-fuel-pump/](http://www.computerra.ru/131350/nasa_3d-printed-rocket-fuel-pump/) (дата обращения 23.04.2016).

3. Аэродинамически стабилизированная аэростатическая система: патент на полезную модель 159572, Рос. федерация; заявл. 30.09.2015, опубл. 10.02.2016.

4. S.M.K. Bakmaev, G. V. Tsepilov, I. S. Vorontsov and V. V. Ivanov, Some Problems of Designing Tethered Low-Volume Aerostat Systems // BIOSCIENCES BIOTECHNOLOGY RESEARCH ASIA, August 2015. Vol. 12(2), 1367-1372.

5. S.M.K. Bakmaev, G. V. Tsepilov, I. S. Vorontsov, V. V. Ivanov, A Research On The Aerodynamics And Dynamics Of A Low-Sized Tethered Aerostat Of A Hybrid Design // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562, Vol. 10, Number 15 (2015) pp. 35918-35926.

6. Бакмаев С.М., Цепилов Г.В., Иванов В.В. Проектирование гибридного аэростатного комплекса малого объёма // Сборник трудов XVIII Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов (Самара, 15-17 июня 2015 г.)

7. Официальный сайт компании 3D Format URL: [http://www.3d-format.ru/materials/ultem\\_9085/](http://www.3d-format.ru/materials/ultem_9085/) (дата обращения 8.04.2016).