

2. Михеев Р.С. Перспективные покрытия с повышенными триботехническими свойствами из композиционных материалов на основе цветных металлов: дис. д-ра техн. наук: 05.16.06. Москва: РГБ, 2018. - 442 с.

3. Михеев, Р.С. Разработка износостойких дисперсно-наполненных композиционных материалов и покрытий из них: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06: защищена 31.03.2010: утв. 09.07.2010 / Михеев Роман Сергеевич. - М., 2010. - 194 с.

4. Григорьянц, А.Г. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 3. Методы поверхностной лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов, под ред. А.Г. Григорьянца. - М.: Высш. шк., 1987. - 191 с.

5. Слива, А.П. Основы технологии электронно-тучевой сварки: учеб. пособие / А.П. Слива, Р.В. Родякина, Е.В. Терентьев. - М.: Издательство МЭИ, 2019. - 84 с

УДК 620.178.152

**А.Н. Демидов, А.Е. Жукарев**  
НИУ «МЭИ»  
Москва Россия

## **ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРА «АЭРОТЕКС» ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ЭЛЕМЕНТОВ БПЛА**

*Аннотация.* Статья посвящена определению физико-механических свойств, композита «Aerotex» (SAN+CF), методами растяжения и инструментального индентирования, выявлена оптимальная температура 3D-печати по FDM-технологии, проведено сравнение с данными производителя. Установлена возможность безобразцового определения физико-механических свойств.

*Ключевые слова:* полимеры, композиты, углеволокно, инструментальное индентирование, испытание на растяжение.

**A.N. Demidov, A.E. Zhukarev**  
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»  
Moscow, Russia

## **PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE «AEROTEX» POLYMER FOR 3D-PRINTING OF THE UAV ELEMENTS**

**Abstract.** The article is devoted to the determination of the physico-mechanical properties of the Aerotex composite (SAN+CF) by stretching and instrumental indentation methods, the optimal temperature of 3D printing using FDM technology was revealed, and a comparison with the manufacturer's data was carried out. The possibility of an ugly determination of physical and mechanical properties has been established.

**Keywords:** polymers, composites, carbon fiber, instrumental indentation, tensile testing.

## Введение

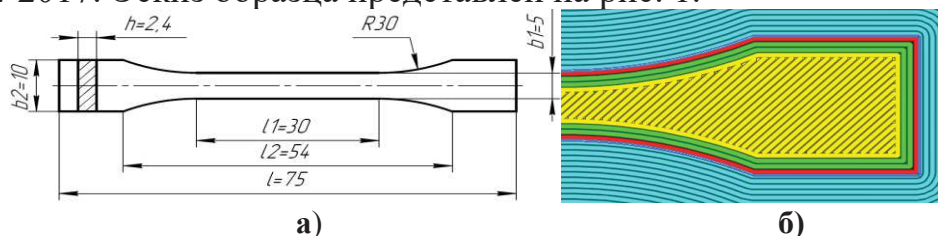
В настоящее время наблюдается стремительный рост производства полимеров и композитов на их основе, их использование в самых разных областях, рынок FDM (Fused Deposition Modeling) 3D-печати чувствует потребность в новых конструкционных материалах, которые расширяют возможности аддитивных технологий. Поэтому компанией “Filamentarno” был создан новый вспенивающийся при печати композит на основе полимера SAN (стиролакрилонитрил), наполненный углеволокном (CF – Carbon Fiber) под названием «Aerotex» [1].

Для исследования термопластичных полимеров используются аддитивные технологии (AF – Additive Fabrication, AM – Additive Manufacturing). Одним из таких методов является процесс послойного наложения расплавленной полимерной нити – FDM. FDM-технология позволяет преобразовать виртуальную 3D – модель в реальную [2].

Целью данной статьи является определение физико-механических свойств композита «Aerotex» методами растяжения и инструментального индентирования, выявление оптимальной температуры печати, сравнение полученных данных с данными производителя. Помимо этого, необходимо найти зависимость между методом растяжения и кинетическим индентированием для безобразцовой оценки временного сопротивления.

## Подготовка образцов к испытаниям

Экспериментальное исследование физико-механических свойств выполняется с использованием плоских образцов типа 1ВА по ГОСТ 11262-2017. Эскиз образца представлен на рис. 1.



**Рис. 1 – Образец для испытаний:**

**а – образец типа 1ВА по ГОСТ 11262-2017;**

**б – зигзагообразное заполнение в виртуальной САД-модели**

Образцы для испытаний получали при помощи 3D-принтера по FDM-технологии, композита «Aerotex». Образцы для испытаний печатаются по трем группам, по пять образцов в каждой, при температурах: 230°C, 240°C и 250°C. Параметры настройки печати 3D-принтера приведены в таблице 1:

**Таблица 1 – Параметры настройки печати**

Температура стола, °C	105 – первый слой, 80 – следующие слои
Заполнение, %	100
Высота слоя, мм	0,2
Ширина линии, мм	0,6
Скорость печати, мм/с	60
Расположение образца при печати	Горизонтальное
Количество линий в контуре	3

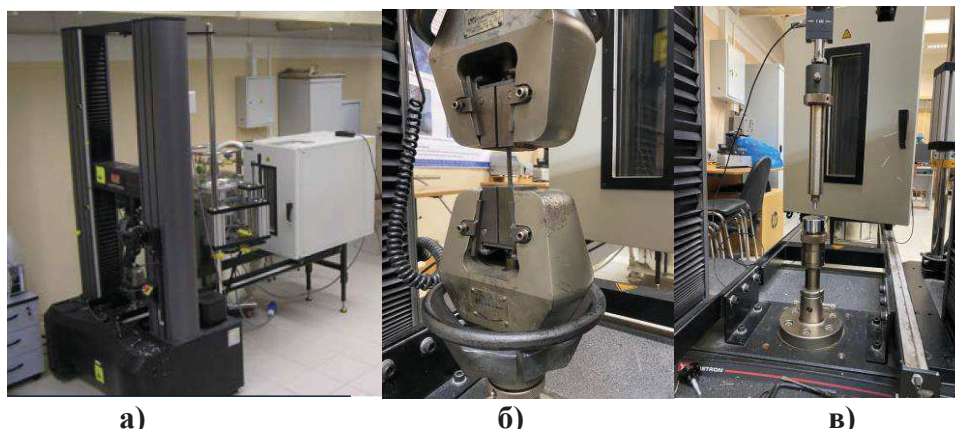
Прежде чем испытать образцы измеряют их рабочую длину ( $l_1$ ), ширину ( $b$ ) и толщину ( $h$ ), полученные усредненные данные для каждой группы приведены в таблице 2, по полученным данным рассчитывается площадь поперечного сечения ( $F_0$ ).

**Таблица 2 – Геометрические размеры образцов**

№ группы образцов	$h$ , мм	$b$ , мм	$l_1$ , мм	$F_0$ , мм <sup>2</sup>
I (230°C)	2,1	5,1	30	10,7
II (240°C)	2,3	5,2	30	11,9
III (250°C)	2,5	5,1	30	12,7

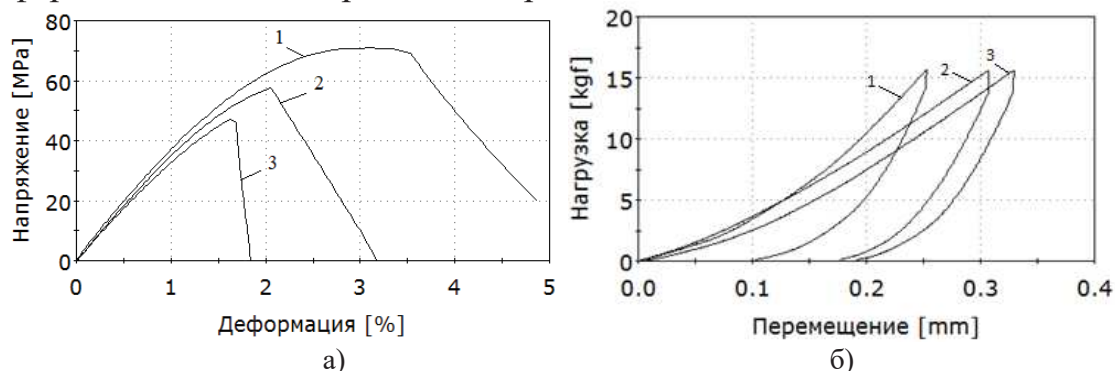
### Проведение испытаний

Испытания для определения физико-механических свойств композита проводились на универсальной разрывной машине Instron 5982 – рис. 2.



**Рис. 2 – Общий вид электромеханической испытательной машины Instron 5982 (а); крепление образца в зажимах при испытаниях на растяжение (б); приспособление для испытаний инструментальным индентированием (в)**

В процессе испытаний образцов растяжением регистрировались диаграммы в координатах напряжение – деформация ( $\sigma - \delta$ ) и диаграммы инструментального индентирования в координатах нагрузка – перемещение ( $F - h$ ) – рис.3, вдавливание выполнялось сферическим индентором диаметром  $D = 2.5$  мм.



**Рис. 3 – Диаграммы, полученные после испытаний: а – диаграммы растяжения образцов; б – диаграммы инструментального индентирования образцов ( $D=2,5$  мм)  
1 – 230°C; 2 – 240°C; 3 – 250°C**

### **Анализ результатов физико-механических испытаний**

Были определены механические характеристики пятнадцати образцов при разных температурах печати материала «Aerotex», полученных методом 3D – печати по FDM – технологии.

По диаграммам растяжения определяли: условный предел текучести ( $\sigma_{0.2}$ ), временное сопротивление ( $\sigma_B$ ), модуль упругости ( $E$ ), относительное конечное удлинение ( $\delta_K$ ).

По диаграммам инструментального индентирования определялись следующие свойства: показатель упрочнения ( $q$ ), твердость на пределе текучести ( $HB_T$ ), твердость при максимуме нагрузки ( $HB_{IT}$ ) и модуль упругости ( $E_{IT}$ ). Расчет проводился, учитывая, что модуль упругости материала  $E_s$  сильно меньше, модуля упругости индентора  $E_i$  ( $E_i = 210915$  МПа), а значит  $E_s$  можно пренебречь. Во время расчета твердости  $HB_{IT}$  учитывалась упругая податливость испытательной машины [3].

**Таблица 3 – Механические свойства образцов**

Растяжение				Инструментальное индентирование			
$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$E$ , МПа	$\delta_K$ , %	$q$ , МПа	$HB_T$ , МПа	$HB_{IT}$ , МПа	$E_{IT}$ , МПа
T=230°C							
56	71	4000	3,5	1223	-	97	3712
T=240°C							
52	58	3849	2,1	687	54	77	3154
T=250°C							
42	48	3779	1,7	632	50	70	2970

Для оценки временного сопротивления  $\sigma_B$  по  $HV$  существует статистическая обработка большого числа экспериментальных данных для металлических материалов [4]. Что касается неметаллических материалов, полимеров и композитов на их основе, то такая корреляционная связь на данный момент не известна, поэтому, были определены соотношения  $\sigma_B/HV_{IT}$  для каждой группы образцов – таблица 4.

**Таблица 4 – Значения коэффициентов  $\sigma_B/HV_{IT}$**

Коэффициенты	T = 230°C	T = 240°C	T = 250°C	Среднее значение
$\sigma_B/HV_{IT}$	0,720	0,755	0,686	0,721

### **Заключение**

Были проведены физико-механические испытания трех групп образцов, напечатанных при помощи 3D-принтера при разных температурах печати по FDM-технологии. Образцы были подвергнуты испытанию на растяжение и инструментальное индентирование с регистрацией диаграмм вдавливания и растяжения. Найдена возможность определения временного сопротивления инструментальным индентированием, отношение временного сопротивления  $\sigma_B$  к твердости  $HV_{IT}$  оказались примерно одинаковыми для всех групп, что дает возможность разработать методику определения временного сопротивления по показателям твердости для полимеров и армированных композитов на их основе.

### **Список использованных источников**

1. PRO AEROTEX 1.75 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.filamentarno.eu/ru/glavnaya/24-pro-aerotex-175-0369918465005.html>
2. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. –М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.
3. Матюнин В.М., Марченков А.Ю., Нуха А., Стасенко Н.А. Оценка упругой податливости твердометра при кинетическом индентировании материалов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Том 85. №4. С 57-63.
4. Матюнин В.М., Марченков А.Ю., Каримбеков М.А. Механические и технологические испытания конструкционных материалов: учебное пособие для вузов / под ред. Матюнина В.М. – М.: Издательский дом МЭИ, 2018. – 192 с.