

**Фатыхов М.А., Еникеев Т.И.\*\*, Акимов И.А.\***

Башкирский государственный педагогический университет,

\*Кумертауский филиал Уфимского государственного авиационного технического университета,

\*\*Уфимский филиал Оренбургского государственного университета

## **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

**Приведены результаты экспериментальных исследований композиционных материалов на растяжение, изгиб, сдвиг и кручение. Определены зависимости механических свойств от содержания связующего материала, скорости нагрева и охлаждения. Методами статистической обработки результатов исследований определены интенсивности отказов и вероятности безотказной работы композиционных материалов.**

Надежность эксплуатации изделий авиастроения, изготавливаемых из композиционных материалов, во многом зависит от их прочностных и упругих свойств. В связи с этим проблема оптимизации процесса полимеризации специальных связующих материалов в особых температурных условиях представляет несомненный научный и практический интерес.

Характеристиками надежности изделий являются вероятность безотказной работы и интенсивность отказов, средняя частота отказов.

Вероятность безотказной работы определяется в предположении, что в начальный момент времени (момент начала исчисления наработки) объект находился в работоспособном состоянии. Обозначим через  $t$  – время или суммарную наработку объекта (в дальнейшем для краткости называем  $t$  просто наработкой). Возникновение первого отказа – случайное событие, а наработка  $t$  от начального момента до возникновения этого события – случайная величина. Вероятность безотказной работы  $P(t)$  объекта в интервале от 0 до  $t$  включительно определяют как [1]

$$P(t) = P\{\tau > t\}. \quad (1)$$

Здесь  $P\{\dots\}$  – вероятность события, заключенного в скобках. Вероятность безотказной работы  $P(t)$  является функцией наработки  $t$ . Обычно эту функцию предполагают непрерывной и дифференцируемой.

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  связана с функцией распределения  $F(t)$  и плотностью распределения  $f(t)$  наработки до отказа:

$$P(t) = 1 - F(t); f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{dP(t)}{dt}. \quad (2)$$

Наряду с понятием «вероятность безотказной работы» часто используют понятие «вероятность отказа», которое определяется следующим образом: это вероятность того, что объект откажет хотя бы один раз в течение заданной наработки, будучи работоспособным в

начальный момент времени. Вероятность отказа на отрезке от 0 до  $t$  определяется по формуле

$$Q(t) = 1 - P(t) = F(t) \quad (3)$$

Интенсивность отказов  $\lambda(t)$  определяется по формуле

$$\lambda(t) = \frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}. \quad (4)$$

Решая (4) при  $\lambda(t) = \text{const} = \lambda$ , имеем

$$P(t) = \exp(-\lambda \cdot t). \quad (5)$$

Рассмотрим особенности изменения этих характеристик надежности и долговечности изделий из композиционных материалов, полученных методом полимеризации, при растяжении, сдвиге, изгибе и кручении.

### **1. Исследования композиционных материалов на растяжение**

Испытание на растяжение является наиболее универсальным по сравнению с другими видами испытаний, так как оно позволяет определять механические свойства материала на всех стадиях его деформации (от упругой деформации до разрушения).

Для испытания на растяжение использовалась универсальная машина модели Р-2 фирмы «Риле» (США). Эта машина мощностью 294 кН предназначена для растяжения, сжатия, изгиба. Машина состоит из маятникового индикатора и насосного агрегата с устройством для нагружения образца. Устройство для нагружения снабжено двумя головками: верхней 1 и нижней 3 с клиновыми зажимами для испытания на растяжение (рис. 1).

Рабочий стол (стол для сжатия образцов) 4 и верхняя тяговая головка 1 соединены четырьмя тягами 2, образующими клеть. Нижняя часть этой клети (стол для сжатия образцов) 4 прикреплена к верхней части стойки 6 со сферическим нижним концом, установленной в шарообраз-

ном углублении в центре главного плунжера 5. Верхний конец клети (верхняя тяговая головка 1) направляется роликовыми подшипниками на двух неподвижных винтах 7. Нижняя тяговая головка поддерживается двумя винтами 7, представляющими одно целое с фундаментной плитой 8. Главный цилиндр 9 с изоляцией от пыли и грязи установлен внутри плиты 8. Под действием гидравлического давления поршень поднимает стол и вместе с ним верхнюю тяговую головку 1. Так как нижняя головка неподвижна, образец, закрепленный в верхней 1 и нижней 3 головках, подвергается действию растягивающей нагрузки, а образец, установленный между столом 4 и нижней головкой, – действию сжимающей нагрузки. Конечные выключатели исключают перегрузку при любом диапазоне нагрузок и превышение заданного хода плунжера. Маховик для регулирования скорости 10 и градуированный диск 11 установлены на большом столе впереди индикаторного агрегата. Маховик 10 приводит в действие специальный трехходовой вентиль, который служит для соединения главного цилиндра с системой, подающей масло под высоким давлением для создания нагрузки, или с реверсом для снятия нагрузки с образца и обратного хода. Этот вентиль необходим для управления потоком масла в обоих направлениях. Число скоростей для испытаний неограниченное, так как регулировка бесступенчатая. Скорости нагружения указаны на диске 11, градуированном в миллиметрах в минуту. Один поворот маховика 10 охватывает весь диапазон управления гидравлической системой (регулировка скорости, скорость приложения нагрузки, нуль, разгрузка и обратный ход).

Испытание на растяжение проводились на образцах с плоскими зажимными головками, на внутренней стороне захватов приспособления имеется насечка, которая прочно удерживает головку образца приложении к нему нагрузки. Образец для испытания на растяжение был в виде «рыбки» (рис. 2)

Методика испытаний на растяжение заключалась в следующем. Сначала устанавливают необходимые зажимы для крепления образца. Назначают нагрузку и устанавливают стрелку на шкале индикаторного агрегата на эту нагрузку. Затем на маятнике машины устанавливают груз, соответствующий этой нагрузке. Стол по перечной подачи опускается для обеспечения достаточного хода при окончании испытания образца. Нижнюю тяговую головку регулируют

для закрепления образца. Образец вставляют в зажим головок машины, при этом нулевая точка установлена на индикаторном диске. Затем диск поворачивают на необходимую скорость испытания. Производится растяжение образца. Диаграмма растяжения записывается на миллиметровой бумаге, установленной на специальном барабане, который закреплен на левой верхней стороне панели индикаторного агрегата.

Настоящая методика исследований и результаты их распространяются на слоистые композиционные материалы на полимерной матрице, типа угле-, боро-, стеклопластиков.

На рис. 3 показана зависимость предела прочности композиционного материала от относительной длины растяжения, соответствующая скорости нагрева 2<sup>0</sup> С/мин.

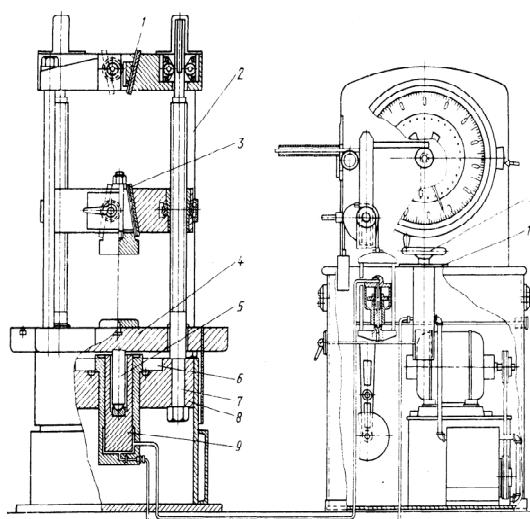


Рисунок 1. Испытательная машина мод. Р-2 с гидравлическим приводом.

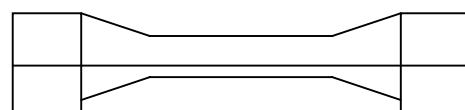


Рисунок 2.

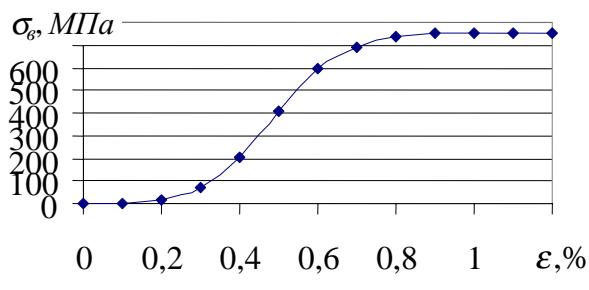


Рисунок 3.

Из представленного рисунка, используя методику [2], были определены такие параметры композиционного материала, как предел пропорциональности, равный 640 МПа, предел текучести – 750 МПа, предел прочности – 760 МПа.

Аналогичные исследования были проведены при различных комбинациях скорости нагрева и охлаждения композиционного материала. В частности, скорости нагрева и охлаждения изменялись от 1 до 5<sup>0</sup> С/мин. Для создания вокруг образца необходимой температуры испытательная машина была оборудована съемной камерой.

На рис. 4 показана зависимость предела прочности материала от этих параметров.

Как видно из рисунка, предел прочности материала наибольший при скоростях нагрева и охлаждения, равных 2<sup>0</sup> С/мин.

Кроме того, вероятность безотказной работы максимальна при условии, что скорости нагрева и охлаждения равны 2<sup>0</sup> С/мин. Это следует из рис. 5.

## 2. Исследования межслоевого сдвига композиционного материала

Прочность при сдвиге путем испытания на изгиб композиционного материала определяли на испытательной машине, позволяющей проводить испытание на сжатие или растяжение (в последнем случае требуется реверсор) (рис. 1). С этой целью она была оборудована приспособлением для испытаний на статический изгиб, позволяющим менять расстояние между опорами от 25-50 мм. Края опор приспособления были закруглены радиусом R2 = 3±0,1 мм, нагружающий нож имел радиус R1 = 5±0,1мм.

Холодильная или нагревательная камера обеспечили равномерное охлаждение образца до заданной температуры и сохранение этой температуры на протяжении испытания. При этом допускается отклонение температуры образца от заданной ±2<sup>0</sup> С при температуре испытаний от -196<sup>0</sup> С до 200<sup>0</sup> С; ±3<sup>0</sup> С при температуре испытаний выше 200– 400<sup>0</sup> С.

Образец для испытания представляет собой брусок прямоугольного сечения с размерами: ширина b = 6 мм, толщина h = 6,5±0,5 мм, длину L определяют из уравнения L = l + 2h, где l – расстояние между опорами, равное 5h мм.

Подсчет результатов испытаний проводился по следующей методике. Прочность композиционного материала при сдвиге, характеризующаяся величиной разрушающего напряже-

ния при межслоевом сдвиге ( $\tau_{\text{межсл.}}$ ), вычисляли по следующей формуле:

$$\tau_{\text{межсл.}} = 3P / 4b h, \text{ где } P \text{ – величина разрушающей силы в ньютонах};$$

b – ширина образца в метрах; h – высота образца в метрах.

Предел прочности при изгибе определяли по формуле:

$$\sigma_{\text{изг.}} = M_{\text{изг.}} / W, \text{ где } M_{\text{изг.}} \text{ – изгибающий момент};$$

W – момент сопротивления изгибу  $W = bh^3 / 6$ . Отсюда  $\sigma_{\text{изг.}} = 3Pl / 2bh^2$ .

Предел упругости при изгибе образца вычисляли по формуле:

$$\sigma_{0,05} = M_{0,05} / W,$$

где  $M_{0,05}$  – изгибающий момент при остаточном прогибе образца 0,05 мм.

По этим представленным данным исследовались зависимости пределов прочности и текучести материалов от режима нагрева и охлаждения, которые приведены на рис. 6 и 7.

Как видно из этих рисунков, благоприятными режимами технологического процесса изготовления композиционного материала являются скорости нагрева и охлаждения, равные 2<sup>0</sup> С/мин.

## 3. Исследования на ударную вязкость

Важное значение имеет определение механических характеристик в условиях, близких к реальным, когда под действием определенных факторов материалы переходят в хрупкое состояние. Малое сопротивление материалов быстroredействующим динамическим (ударным) нагрузкам опасно для работы оборудования и механизмов. В связи с этим во многих технических условиях на изготовление различных изделий предусмотрены динамические испытания материалов – испытания на ударный изгиб (определение ударной вязкости).

Метод основан на разрушении образца ударом маятникового копра. Образец имеет надрез, расположенный в зоне нормальных максимальных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . Под ударной вязкостью понимают работу удара, отнесенную к начальной площади поперечного сечения образца в месте надреза. Ударная нагрузка и надрез в образце являются условиями, которые вызывают изменение свойств материалов по сравнению с их свойствами при статических испытаниях гладких образцов. Результаты испытаний на ударный изгиб не дают конструктору необходимых сведений для расчетов на

прочность. Однако значение ударной вязкости важно для технологов. По результатам испытания на ударный изгиб можно установить такие свойства материалов, как хладноломкость, синеломкость, тепловая хрупкость и другие, которые при статических испытаниях не всегда можно обнаружить.

Необходимо обратить внимание на правильность надреза образца, отсутствие рисок, перпендикулярных оси образца. Перпендикулярность оси надреза продольной оси образца должна быть  $90 \pm 2^\circ$ . Поперечное сечение образца должно быть прямоугольным с отклонением, не превышающим  $\pm 0,5^\circ$ .

Для проведения ударных испытаний применяли специальную машину – копер маятниковый КМ-30 (рис. 9). Испытание на маятниковом копре основано на принципе измерения работы, затраченной на разрушение образца, путем сопоставления энергии физического маятника в момент удара с энергией, которой он обладает после удара. Копер состоит из корпуса 27, стоек 18 и 26, опор 14 для установки испытуемых образцов, маятника 8, механизма 9 подъема и фиксации маятника, шкалы 7 для измерения затраченной на разрушение образца работы, тормоза 16, ограждений 1, 10, 11, 15. Корпус копра состоит из чугунной плиты 17, на которой закреплены основания опор и стойки. В верхней части стоек на шарикоподшипниках установлен маятник 8 с молотом 12, постоянный запас энергии которого равен 300 Дж. Движение маятнику передается от электродвигателя 25 через редуктор 24 с электромагнитной муфтой, шестерню 23 и стрелку 5, которая соединена с маятником с помощью двух штырей и жестко связана с храповым колесом 22. Колесо стопорится двумя собачками (одна из них аварийная), зацепление собачки с храповым колесом надежно фиксирует угол подъема маятника 8. При подъеме стрелки с маятником на заданный угол собачки удерживаются в поднятом положении электромагнитом 20, установленным на диске 21, а упоры на храповике воздействуют на микропереключатели 2, обесточивая сначала электромагнит 20, а затем и электродвигатель 26. Стрелка с маятником под действием собственной массы несколько опускается вниз. Спуск маятника проводится нажатием кнопки 3 на панели 4. При этом маятник отсоединяется от стрелки 5, падает и разрушает образец 13, свободно лежащий на опорах 14. Работа, затраченная на разрушение образца, от-

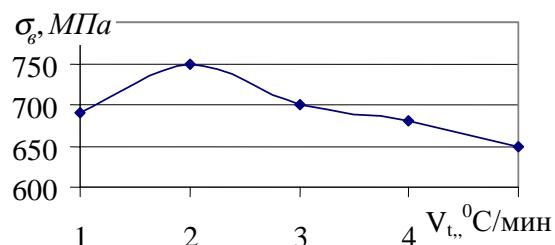


Рисунок 4.

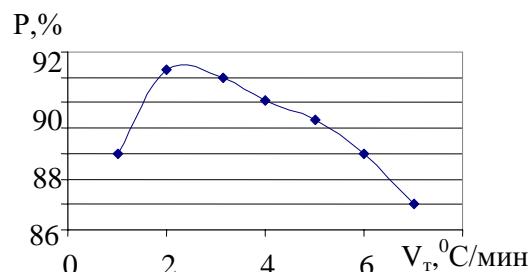


Рисунок 5. Зависимость вероятности безотказной работы от скорости нагрева и охлаждения композиционного материала

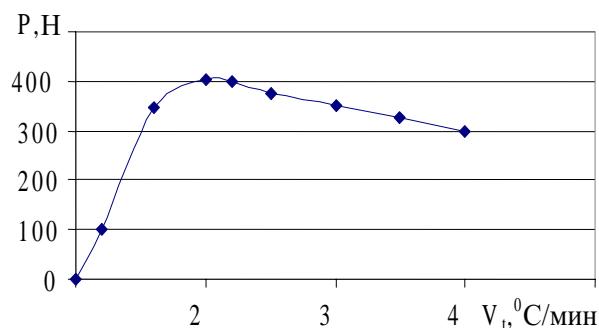


Рисунок 6. Зависимость предела прочности композиционного материала от скорости нагрева и охлаждения

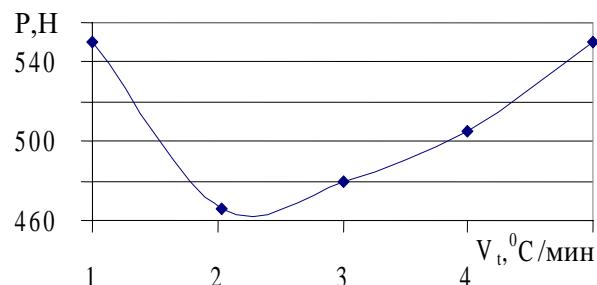


Рисунок 7. Зависимость предела текучести композиционного материала от скорости нагрева и охлаждения



Рисунок 8. Образцы для испытаний

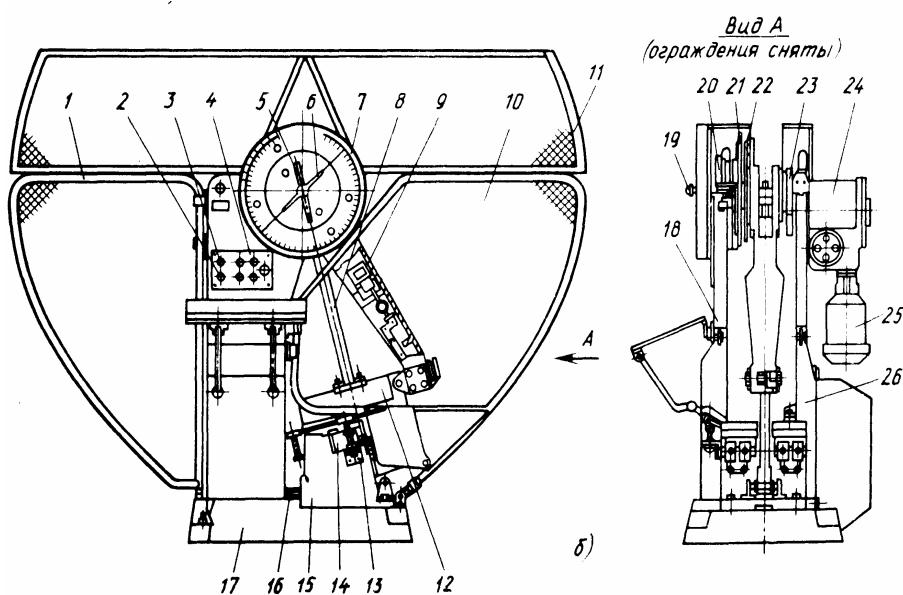


Рисунок 9. Копер модели КМ – 30

считывается по шкале 7, которая отградуирована на все запасы энергии и имеет две стрелки: рабочую 5 и контрольную 6.

Рабочая стрелка жестко связана с маятником и движется вместе с ним. Рабочая стрелка позволяет проверить угол подъема маятника. Контрольная стрелка приводится в движение от стрелки 5 и показывает работу, затраченную на разрушение образца 13. Перед испытанием каждого последующего образца контрольную стрелку 6 устанавливают в исходное положение вращением головки 19. Для сокращения свободных колебаний маятника после разрушения образца копер снабжен ленточным тормозом 16, работающим автоматически от нажатия кнопки. Для улавливания осколков при разрушении образца 13 предусмотрены ограждения 1, 10, 11 зоны перемещения маятника, сблокированные с механизмами копра.

Ударная вязкость – это сложная, комплексная характеристика, зависящая от целого ряда более простых механических свойств, прочностных и пластических. Работа, затрачиваемая на пластическую деформацию и разрушение, определяется площадью под диаграммой динамического изгиба. Ее величина, следовательно, будет тем больше, чем выше пластичность и уровень напряжений течения на всем протяжении испытания. При ударных испытаниях на изгиб образцов с надрезом напряжения и пластическая деформация концентрируются в ограниченной части объема об-

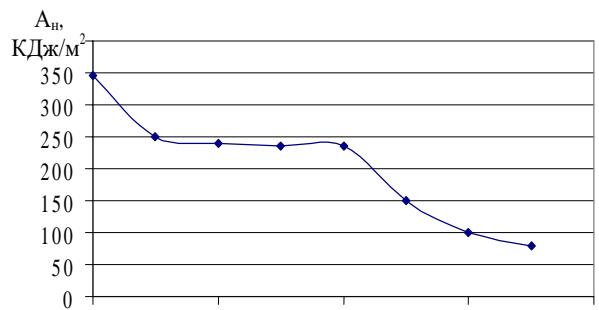


Рисунок 10.

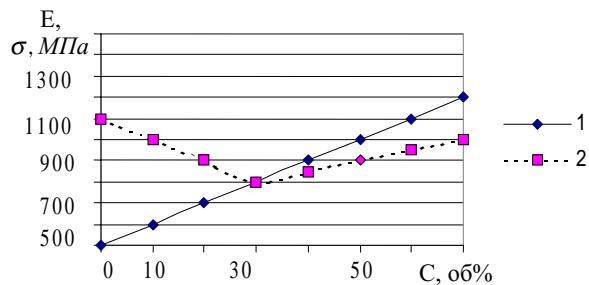


Рисунок 11. Зависимости модуля упругости (1) и предела прочности (2) композиционного материала от наполнителя

Таблица. Зависимости параметров надежности от видов испытаний композиционных материалов

Вид испытания	Интенсивность отказов, $10^6 \cdot \text{час}^{-1}$	Вероятность безотказной работы, %
Растяжение	25	92,3
Межслоевой сдвиг	33	90,4
Ударная вязкость	40	88,7
Крутка	45,7	86,9

разца вокруг надреза. Именно здесь поглощается практически вся работа удара. Количественно величину деформируемого объема при ударном испытании определить весьма трудно. Поэтому при расчете ударной вязкости полную работу деформации разрушения относят не к объему, а к площади  $F$  поперечного сечения в надрезе, что, строго говоря, не имеет физического смысла. При испытании стандартных образцов величина  $F$  постоянна и, следовательно, ударная вязкость прямо пропорциональна полной работе  $A_h$ . Таким образом, ударная вязкость – работа  $A_h$ , расходуемая для ударного излома образца, отнесенная к рабочей площади его поперечного сечения  $F_0$ , то есть  $A_h = A_h / F_0$ .

На рис. 10 показана зависимость ударной вязкости от содержания наполнителей в композиционном материале.

Аналогичные зависимости были получены для модуля упругости и предела прочности композиционного материала.

В таблице представлены расчеты параметров надежности композиционных материалов по формулам, приведенным в начале настоящей работы.

Результаты обработки статистических и экспериментальных данных по механическим испытаниям на растяжение лонжерона по длине, на межслоевой сдвиг, на ударную вязкость и на крутку лонжерона показывают, что существующая технология изготовления композиционных материалов по рассмотренным параметрам недостаточно надежна. Поэтому следует совершенствовать технологию изготовления лонжеронов лопастей вертолетов. От технологии изготовления композиционных материалов зависят эксплуатационные характеристики изделий.

**Список использованной литературы:**

1. Зорин В.А., Бочаров В.С. Надежность машин: Учебник для вузов. – Орел: ОрелГТУ, 2003. – 549 с.
2. Тюков Н.И., Акимов И.А., Акимов А.И. Теоретические и экспериментальные исследования теплофизических процессов изготовления изделий из композиционных материалов. Уфа, 2003. – 216 с.