

ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ МЕТОДОМ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ПРИ ЭЛЕКТРОНАГРЕВЕ

*Уфимский государственный авиационный технический университет,
ул. К.Маркса,12,Уфа-центр,450000, г. Башкортостан, Россия

**Башкирский государственный педагогический университет,
ул. Октябрьской революции,3, Уфа-центр,450000, г. Башкортостан, Россия

Композиционные материалы все шире внедряются в современное производство. Часть из них изготавливается в установках автоматического ведения технологического процесса (АВТП) методом полимеризации [1]. Они обладают уникальными упругими и прочностными свойствами, легки и надежны в эксплуатации. Тем не менее пользователей интересует надежность изделий из композиционных материалов на период их эксплуатации. Для лонжеронов лопастей вертолета – это три тысячи часов.

Испытание на растяжение является наиболее универсальным по сравнению с другими видами, так как оно позволяет определять механические свойства материала (пределы упругости и текучести, модуль упругости, временное сопротивление, относительное равномерное удлинение, относительное удлинение и сужение поперечного сечения после разрыва) на всех стадиях его деформации (от упругой деформации до разрушения). В связи с этим в работе приводятся результаты механических испытаний лонжеронов лопастей вертолетов на растяжение и расчет показателей надежности на период их эксплуатации.

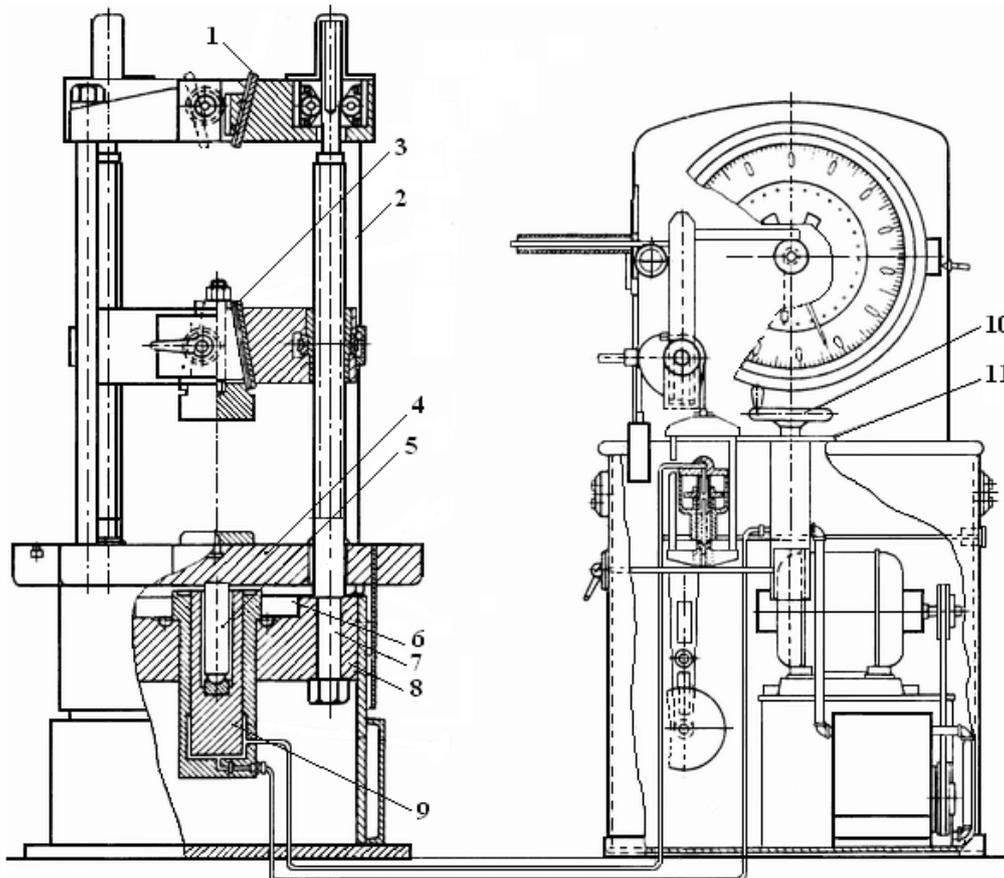


Рис. 1. Испытательная машина модели Р-2 с гидравлическим приводом

Оборудование для испытаний на растяжение. Испытания на растяжение материалов проводят на испытательной машине согласно [2]. Использовалась универсальная машина модели Р-2 фирмы «Риле» (США) (рис.1). Она 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. Рабочий стол (стол для сжатия образцов) 4 и верхняя тяговая головка 1 соединены четырьмя тягами 2, образующими клеть. Нижняя часть этой клетки (стол для сжатия образцов) 4 прикреплена к верхней части стойки 6 со сферическим нижним концом, установленной в шарообразном углублении в центре главного плунжера 5. Верхний конец клетки (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 вместе стол и 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).

Методика испытаний на растяжение. При растяжении образцов определяют следующие механические характеристики материала:

- предел прочности;
- предел упругости;
- модуль упругости;
- предел текучести;
- временное сопротивление;
- относительное равномерное удлинение;
- относительное удлинение после разрыва;
- относительное сужение поперечного сечения после разрыва.

Испытания проводят на образцах с рабочей частью в виде цилиндра, стержня с прямоугольным сечением или в виде «рыбки» (рис. 2).

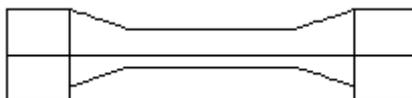


Рис. 2. Образец для испытаний

Подготовка образцов к испытанию начинается с их контроля. Образцы с механическими повреждениями, заусенцами, неправильной маркировкой, с нарушением требований к шероховатости поверхности, а также с размерами, превышающими допустимые, к испытанию не допускаются.

Испытание на растяжение проводят следующим образом. Сначала устанавливаются 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 поперечной 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, то есть зависимость удлинения образца от прилагаемой нагрузки, записывается на миллиметровой бумаге.

Скорость нагружения образца машиной может быть изменена в пределах 0–10 м/мин. Погрешность показаний нагрузки составляет $\pm 1\%$. При этом в процессе нагружения образца ускорение движу-

щихся частей испытательной машины настолько мало, что возникающими в них силами инерции пренебрегают. Испытание на растяжение проводят при температуре $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Методика обработки результатов механических испытаний.

При статических испытаниях на растяжение образец деформируется при плавно возрастающей нагрузке вплоть до разрыва. При этом на диаграммном приборе, которым оборудованы испытательные машины, как указано выше, автоматически вычерчивается кривая, показывающая зависимость между силой, действующей на образец, и вызываемой ею деформацией. Такая кривая растяжения образца показана на рис. 3.

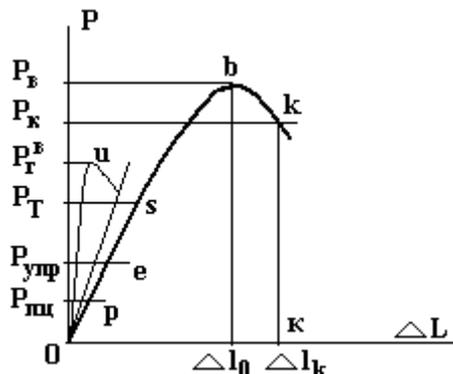


Рис. 3. Кривая растяжения материала

Первая характерная точка на диаграмме растяжения – точка p . Усилие $P_{пл}$ определяет величину предела пропорциональности – напряжения, которое материал образца выдерживают без отклонения от закона Гука. Для определения величины предела пропорциональности графически необходимо продолжить прямолинейный участок до пересечения с осью деформаций в точке O , которую и принимают за новое начало координат, исключая таким образом искаженный из-за недостаточной жесткости машины начальный участок диаграммы (рис. 4). Далее на произвольной высоте в пределах упругой области восстанавливают перпендикуляр AB к оси нагрузок, откладывают вдоль него отрезок $BC = \frac{1}{2} AB$ и проводят линию OC . При этом $\text{tg}\alpha' = (\text{tg}\alpha)/1,5$, затем если провести касательную к кривой растяжения параллельно OC , то точка касания p определит искомую нагрузку $P_{пл}$ (рис. 4). Условный предел пропорциональности определяем по формуле $\sigma_{пл} = P_{пл}/F_0$, где F_0 – начальная площадь поперечного сечения образца.

Следующая характерная точка на первичной диаграмме растяжения – точка e (рис. 3). Ей отвечает нагрузка, по которой рассчитывают условный предел упругости $P_{упр}$ – напряжение, при котором остаточное удлинение достигает заданной величины. Таким образом, предел упругости характеризует напряжение, при котором появляются первые признаки макропластической деформации. В связи с малым допуском по остаточному удлинению даже $\sigma_{0,05}$ трудно с достаточной точностью определить по диаграмме растяжения. Поэтому в тех случаях, когда высокой точности не требуется, предел упругости принимают равным пределу пропорциональности (рис. 4).

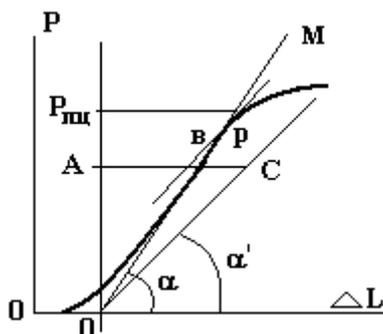


Рис. 4. Кривая растяжения для определения предела упругости материала

Характеристику предела текучести P_T подсчитывают по формуле $\sigma_{0,2} = P_{0,2}/F_0$, величину нагрузки при $P_{0,2}$ определяют следующим образом. На диаграмме растяжения (рис. 5) проводят прямую OA , совпадающую с прямолинейным участком кривой, отбрасывая начальную криволинейную часть. От точки пересечения прямой OA с осью деформации откладывают в масштабе с диаграммы на оси абс-

цисс вправо от точки О отрезок ОЕ, равный 0,2 % первоначальной рабочей длины образца. От точки Е проводят прямую ЕД, параллельную ОА, до пересечения с кривой растяжения в точке Д. Ордината этой точки Р определяет величину нагрузки $P_{0,2}$ на условном пределе текучести.

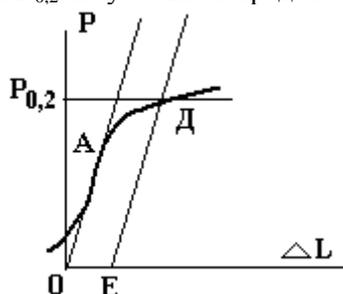


Рис.5. Кривая растяжения для определения предела текучести материала

Временное сопротивление разрыву (предел прочности) определяют по формуле

$$\sigma_{вр} = P_{\max} / F_0.$$

Для определения расчетной длины образца после разрыва l_k обе его части прикладывают одну к другой как можно плотнее. Длины l_k определяют следующим образом. Если разрыв произошел на расстоянии не менее $1/3 l_0$ от края расчетной длины, то за l_k принимают расстояние между рисками, определяющими границы расчетной длины. Если разрыв произошел на расстоянии менее $1/3 l_0$ от края расчетной длины, то конечную длину расчетной части образца l_k определяют с отнесением места разрыва посередине для определения относительного сужения, после разрыва образца измеряют диаметр в месте разрыва в двух взаимно перпендикулярных направлениях и берут среднее из полученных значений. Относительное сужение (%) определяют по формуле $\Psi = (F_0 - F_k / F_0) \cdot 100 = (d_0^2 - d_k^2 / d_0^2) \cdot 100$, где d_0 – диаметр образца до испытания в мм; d_k – диаметр (средний) образца в месте разрыва в мм.

Настоящая методика распространяется на слоистые композиционные материалы на полимерной матрице типа угле-, боро-, стеклопластиков.

Результаты испытаний.

На рис. 6 показана зависимость предела прочности композиционного материала от относительной длины растяжения, соответствующая скорости нагрева $2^\circ\text{C}/\text{мин}$. Из представленного рисунка, используя описанную методику, определены такие параметры композиционного материала, как предел пропорциональности, равный 640 МПа, предел текучести – 750 МПа, предел прочности – 760 МПа.

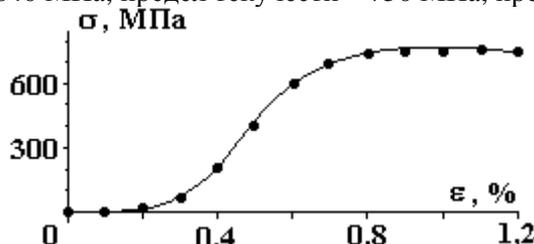


Рис. 6. Зависимость предела прочности композиционного материала от относительной длины растяжения

Аналогичные исследования проведены при различных комбинациях скорости нагрева и охлаждения композиционного материала. В частности, скорости нагрева и охлаждения изменялись от 1 до $5^\circ\text{C}/\text{мин}$. На рис. 7 показана зависимость предела прочности материала от этих параметров. Как видно из рисунка, предел прочности материала наибольший при скоростях нагрева и охлаждения, равных $2^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Основы расчета показателей надежности.

В процессе эксплуатации технические объекты подвергаются внешним воздействиям со стороны среды и обслуживающего персонала. Это приводит к тому, что со временем начальные параметры, заложенные при проектировании объекта, начинают изменяться (ухудшаться) и к некоторому моменту времени объект становится либо функционально непригодным, либо аварийно опасным. Общие признаки различных объектов, по которым можно судить о возможности или целесообразности эксплуатировать объект по истечении определенного срока, позволяют сформулировать определение надежности. Под надежностью понимают свойство системы (объекта) выполнять заданные функции на определенном интервале времени и при этом поддерживать значение установленных производственных характеристик в заданных границах при соответствующих условиях эксплуатации, ремонта, хранения и транспортировки.

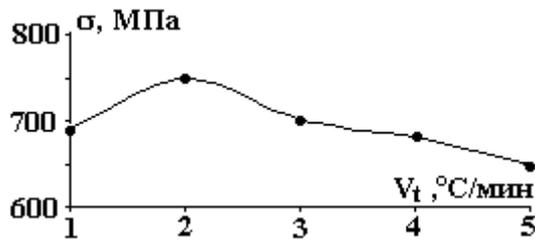


Рис. 7. Зависимость предела прочности композиционного материала от скорости нагрева

Основными характеристиками надежности изделий являются вероятность безотказной работы и интенсивность отказов. Вероятность безотказной работы определяется в предположении, что в начальный момент времени объект находился в работоспособном состоянии. Обозначим через t время или суммарную наработку объекта (в дальнейшем для краткости назовем t просто наработкой). Возникновение первого отказа – случайное событие, а наработка τ от начального момента до возникновения этого события – случайная величина. Вероятность безотказной работы $P(t)$ объекта в интервале от 0 до t включительно определяют как

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

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:

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

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

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = - \frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}. \quad (3)$$

Для высоконадежных систем $P(t) \approx 1$, так что интенсивность отказов приближенно равна плотности распределения наработки на отказ.

Из формулы (3) следует, что вероятность безотказной работы (надежность) за период $(0, t)$ определяется по формуле

$$P(t) = 1 - F(t) = \exp(-\lambda(t) \cdot t). \quad (4)$$

При $\lambda(t) = \text{const} = \lambda$

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

Статистическая обработка результатов механических испытаний на растяжение лонжерона лопастей вертолетов и расчет показателей надежности.

1. По результатам механических испытаний на растяжение определим изменение длины образца, расположим полученные данные изменения длины образца x_n в порядке их возрастания, то есть в вариационный ряд:

$$x_{\min} = 54,4, 56,2, 58,1, 58,4, 59,4, 59,9, 60,7, 61,0, 61,3, 61,9, 62, 963,5, 63,7, 64,5, 65,2, 66,0, 66,1, 66,4, 66,4, 67,0, 67,2, 70,0, 70,4, 71,0, 71,0, 71,3, 76,3, 77,3, 77,8, 78,6, 87,6, 87,6, 90,8, 93,7, 94,2, 94,4, 95,1, 95,6, 96,4, = x_{\max} (\text{в мм}).$$

2. Находим размах (широту) распределения:

$$R = x_{\max} - x_{\min} = 96,4 - 54,4 = 43 \text{ мм.}$$

3. Разбиваем весь диапазон на определенное число интервалов:

$$S = 1 + \ln_2 40 \approx 8.$$

4. Отмечаем крайние точки каждого интервала и их середины:

$$h = 48 : 8 = 5,375, \\ (53,4, 58,775), (58,775, 64,15), (64,15, 69,525), (69,525, 74,9), \\ (74,9, 80,275), (80,275, 85,65), (85,65, 91,025), (91,025, 96,4), \\ c_1 = 56,0875, c_2 = 61,4625, c_3 = 66,8375, c_4 = 72,2125, c_5 = 77,5875, \\ c_6 = 82,9625, c_7 = 88,3375, c_8 = 93,7125.$$

5. Подсчитываем число экспериментальных данных, попавших в каждую из полученных интервалов, и находим относительные частоты. Составим таблицу (статистический ряд):

$$m_1=4, m_2=9, m_3=8, m_4=6, m_5=4, m_6=0, m_7=3, m_8=6, \\ w_1=0,1, w_2=0,225, w_3=0,2, w_4=0,15, w_5=0,1, w_6=0, w_7=0,075, w_8=0,15.$$

№ интервала	Интервалы	m_i	w_i
1	53,4—58,775	4	0,1
2	58,775—64,15	9	0,225
3	64,15—69,525	8	0,2
4	69,525—74,9	6	0,15
5	74,9—80,275	4	0,1
6	80,275—85,65	0	0
7	85,65—91,025	3	0,075
8	91,025—96,4	6	0,15

6. Находим эмпирическую функцию распределения:

$$F^*(x) = \begin{cases} 0, & x < 53,4 \\ 0,1 & x < 58,775 \\ 0,325 & x < 64,15 \\ 0,525 & x < 69,525 \\ 0,675 & x < 74,9 \\ 0,775 & x < 80,275 \\ 0,775 & x < 85,65 \\ 0,85 & x < 91,025 \\ 1, & x > 96,4 \end{cases}$$

Находим числовые характеристики:

$$\text{среднюю длину образца } \bar{x} = \frac{1}{40} \sum_{i=1}^{40} x_i \approx 71,96 \text{ мм,}$$

$$\text{дисперсию } D^* = \frac{1}{40} \sum_{i=1}^{40} x_i^2 - (71,96)^2 \approx 159,73 \text{ мм}^2,$$

$$\delta^*(x) \approx 12,6.$$

По результатам статистической обработки механических испытаний на растяжение по длине и статистическим данным эксплуатации изделий рассчитана интенсивность отказов, которая составила $\lambda = 25 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

Тогда, в соответствии с формулой (5), вероятность безотказной работы (надежность) за период времени (0–3000) часов определяется по формуле

$$P(3000) = 1 - F(3000) = \exp(-25 \cdot 10^{-6} \cdot 3000) \approx 0,923, \text{ то есть составляет } 92,3\%.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов А.И., Акимов А.И., Фатыхов М.А. Экспериментальное исследование тепломассообмена в установке автоматического ведения технологического процесса и сопоставление теории эксперимента // Электронная обработка материалов. 2003. № 2. С. 22–26.
2. ГОСТ 28840-90.

Поступила 27.04.04

Summary

The experimental installation which allows to investigate composition materials, polymerizations, produced the method of polymerization in a low-frequency electric field, on extension, is presented. The technique of the experimental results treating is given. The high reliability of composition materials is shown.