

УДК 621.317.084.2

## ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*д-р техн. наук В.И. ЗУБЦОВ, канд. техн. наук, доц. В.В. БОЗЫЛЕВ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Предложены и обоснованы характеристики прочности конструкционных материалов, у которых напряженное состояние близко к однородному. Стандартная методика определения прочности материалов по результатам испытаний разрушающей нагрузкой основана на упрощенном представлении о характере работы материала под нагрузкой и не удовлетворяет требованиям современной инженерной практики. Предложено использовать в качестве базовых прочностных характеристик предел упругости, модуль упругости, вязкость и гигроскопичность вместо предела прочности, относительной деформации, времени от начала деформации до разрушения и удельной работы деформации разрушения, что позволяет проще, более оперативно, достоверно, без разрушения и во время эксплуатации объектов получать информацию для оценки прочности конструкционных материалов.*

Общепринятая стандартная методика определения прочности материалов по результатам испытаний разрушающей нагрузкой [1], основанная на упрощении представлений о характере работы материала под нагрузкой, не удовлетворяет требованиям современной инженерной практики. Необходимость получения достоверной информации о прочности материалов в изделиях является стимулом разработки новых методов её определения, в частности неразрушающих.

Известно, что *прочность* – это свойство твердых тел сопротивляться разрушению, а также пластической деформации под действием внешних нагрузок – очень широкое понятие даже в сфере материаловедческих наук; её оценка производится на основе анализа напряженно-деформированного состояния. Опорными точками классических теорий прочности являются характеристики пределов прочности при простом статическом механическом напряжении: пределы прочности при одноосном растяжении, сжатии; предел прочности при сдвиге.

Зависимость предела прочности от условий деформации приводит к тому, что следует учитывать значение деформации, развивающейся к моменту разрушения (разрыва) материала  $\epsilon_p$ . Значение  $\epsilon_p$  зависит от материала, величины деформирующей силы и скорости ее нарастания. При заранее заданном условиями эксплуатации значении предела прочности при растяжении  $\sigma_p$  (или  $\epsilon_p$ ) время воздействия деформирующей силы, при котором происходит разрушение материала, не может быть произвольным. Тогда прочность может характеризоваться также долговечностью  $\tau_p$  – временем с начала действия деформирующей силы до разделения образца материала на части.

Множество материалов сочетают в себе свойства упругости и вязкости. Причем проявление в большей степени упругости или вязкости зависит от скорости нагружения. В связи с этим важное значение приобретает определение удельной работы деформации до разрыва, которое можно определить по формуле:

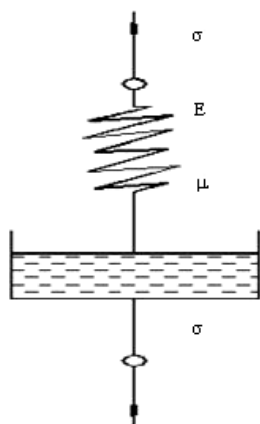
$$A_p = \int_0^{\epsilon_p} \sigma(\epsilon) d\epsilon. \quad (1)$$

Анализируя возможности данной оценки прочности, можно отметить следующие недостатки: точное определение  $\epsilon_p$ ,  $\tau_p$  и  $A_p$  является непростой и трудоёмкой задачей; сами характеристики условны, дают упрощенное представление о характере работы материала под нагрузкой; невозможность применения к эксплуатируемым изделиям, так как метод разрушающий.

Несовершенство (необъективность) вышеописанной оценки прочности можно объяснить тем, что большинство материалов сочетают в себе как упругие свойства, так и вязкие, имеют нелинейную и неоднозначную связь между напряжениями и деформациями (к таким материалам относятся, например, полимеры). Представленная оценка прочности основана на критериях, которые, как отмечено выше, условны и дают упрощенное представление о характере работы материала под нагрузкой. Применение такой оценки может быть оправдано в широком диапазоне материалов, где нужно учитывать особенности хрупкого и пластического разрушений, большую неоднородность полей напряжений или сингулярные особенности (вблизи острых пор, трещин, включений и т.п.).

В современной инженерной практике необходимо получение более достоверной информации о прочности, пусть даже в определенном классе материалов, где напряженно-деформированное состояние близко к однородному. Поэтому оценка прочности должна быть основана на более исчерпывающих критериях, а в связи с практической целесообразностью неразрушающего контроля желательны их иметь еще и неразрушающими. Для этого в качестве основного показателя прочности материалов и изделий

вместо предела прочности следует использовать то значение механических напряжений  $T$ , которое лишь предшествует пластической деформации  $S$  – пределу упругости.



Модель Максвелла

Факт сочетания упругих и вязких свойств материалами известен ещё со времен Максвелла, который предложил наиболее простую модель (рисунок) такого сочетания, которое описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\mu}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – механическое напряжение;  $\mu$  – вязкость;  $E$  – модуль упругости;  $\varepsilon$  – деформация.

Выражение  $1/E \cdot d\sigma/dt$  уравнения (2) описывает упругие свойства, а  $\sigma/\mu$  – вязкие.

Анализируя данную модель напряжённо-деформированного состояния тела, отметим следующее. Упругая деформация  $\varepsilon$  возникает мгновенно при каждом данном значении напряжения  $\sigma$ , поэтому скорость изменения деформации определяется скоростью изменения напряжения:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt}. \quad (3)$$

При постоянном действующем напряжении ( $\sigma = \text{const}$ )  $d\sigma/dt = 0$ , уравнение (1) принимает вид:

$$d\varepsilon/dt = \sigma/\mu.$$

Пусть мы имеем дело с процессом релаксации напряжения при сохранении постоянного удлинения (растяжения) образца материала  $d\sigma/dt = 0$ . По понятным причинам, напряжение в конце концов упадет до нуля. При этом уравнение (1) примет вид:

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dt} = -\frac{E}{\mu}. \quad (4)$$

Откуда следует, что напряжение и скорость изменения напряжения определяются модулем упругости и коэффициентом вязкости. Эти характеристики являются отображением соответственно упругих и пластических свойств материалов и не зависят от характера деформаций, в свою очередь зависящих от условий эксплуатации.

Поскольку модули упругости и вязкости являются константами, их можно рассматривать в качестве физических характеристик материала. Следовательно, эти характеристики являются не условными, а исчерпывающими, когда речь не идет о разрушении материала при оценке прочности. Кроме того, использование модуля упругости и вязкости в качестве показателей оценки прочности согласуется с законом термодинамики, так как их отношение ( $\mu/E$ ) определяет время релаксации.

Наличие пор, трещин, микротрещин и других дефектов снижает прочность материалов. Определение гигроскопичности позволяет оценить связанную с этим потерю прочности [2; 3].

Модуль упругости, вязкость и гигроскопичность являются характеристиками, учитывающими особенности применения материалов электронной техники в зависимости от условий их эксплуатации. Использование в качестве базовых прочностных характеристик предела упругости, модуля упругости, вязкости и гигроскопичности вместо предела прочности, относительной деформации, времени от начала деформации до разрушения и удельной работы деформации разрушения позволяет проще, более оперативно, достоверно, без разрушения и во время эксплуатации объектов получать информацию для оценки прочности конструкционных материалов, удовлетворяющую требованиям современной инженерной практики.

Разработанные нами ранее *методы и устройства исследований и контроля прочностных характеристик материалов и изделий* (вязкости, модуля упругости, гигроскопичности) [4] учитывают условия эксплуатации, а также условия переработки полимерных материалов в изделия, методики их применения.

На основе анализа теории асинхронных электродвигателей и собственных исследований получена закономерность (формула), позволяющая использовать с учетом паспортных данных серийно выпускаемые отечественной промышленностью электродвигатели в качестве первичных преобразователей вязкости  $\eta_b$ :

$$\eta_b = f(KI), \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий паспортные данные электродвигателя.

Формула (5) отражает зависимость  $\eta_b$  исследуемых материалов от электрического тока  $I$ , потребляемого электроприводом смесителя, в котором смешиваются расплавы (растворы) этих материалов.

Метод контроля и исследования модуля упругости основан на зависимости его от квадрата резонансной частоты колебаний упругой волны, возбуждаемой в материале, а гигроскопичности – на использовании эффекта Доплера.

Также разработан метод контроля напряженного состояния для инженерной оценки прочности твердых конструкционных материалов с использованием пьезопреобразователей, которые обладают избирательностью к полезному сигналу, возможностью регулирования жесткости и управления электроупругостью, а также работоспособностью в широком диапазоне температур. Кроме того, разработанные пьезопреобразователи отличаются между собой по диапазону измерения механических напряжений, по чувствительности, по модулю упругости. Значение модуля упругости разработанных пьезопреобразователей находятся в широком диапазоне  $(0,7...2) \cdot 10^5$  МПа. Это дает возможность использовать тот или иной тип пьезопреобразователей в зависимости от контролируемой среды. Как известно, чем ближе совпадают значения модулей упругости среды и размещенного в ней преобразователя, тем точнее измерение.

Для измерения механических напряжений в средах, у которых модуль упругости изменяется под действием нагрузки, разработано устройство, модуль упругости которого все время стремится к сравнению с модулем упругости среды. Это происходит в автоматическом режиме благодаря использованию системы автоматического регулирования, которая «следит» за изменением модуля упругости контролируемой среды [4].

**Заключение.** Существующие методы определения механических напряжений (основного критерия предлагаемой оценки прочности) дают обобщенную информацию о величине и характере механических напряжений, а это является недостаточной точностью для практических целей. В то же время у многих материалов (стеклопластики, пластмассы, керамики, смолы, бетоны, многие металлы и др.) связь между напряжениями и деформациями характеризуется неоднозначностью, неоднородностью по сечению объекта и ползучестью. Особенно это свойственно полимерам, спецификой использования которых является разработка их для каждого конкретного случая эксплуатации. Поэтому разработчикам полимеров необходимо иметь методики, оборудование, а также критерии оценки прочности для получения этих материалов с определёнными свойствами. Кроме того, общепринятая стандартная методика определения прочностных, упругих, деформационных и других физико-механических свойств материалов по результатам испытаний разрушающей нагрузкой, основанная на упрощении представлений о характере работы материала под этой нагрузкой, не удовлетворяет требованиям современной инженерной практики. Поэтому необходима разработка новых методов, в частности неразрушающих.

В связи с практической целесообразностью неразрушающего контроля и предложен *новый метод оценки прочности*, в котором основным критерием является предел упругости, а дополнительными, учитывающими условия эксплуатации материалов, – модуль упругости, вязкость и гигроскопичность. Достоинства этого метода – простота, оперативность, достоверность и возможность применения к эксплуатируемым объектам, так как метод не является разрушающим, в отличие от известного, основанного на разрушающих и условных критериях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Немец, Я. Прочность пластмасс / Я. Немец, С.В. Серенсен, В.С. Стреляев. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.
2. Зубцов, В.И. Оценка прочности гигроскопичных материалов с использованием эффекта Доплера / В.И. Зубцов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2000. – № 1. – С. 51 – 53.
3. Способ контроля кинетики пропитки жидкостью пористого материала: а. с. 1486910, СССР / В.И. Зубцов [и др.] // Открытия. Изобретения. – 1989. – № 22. – С. 240.
4. Зубцов, В.И. Пьезоэлектрический контроль прочности / В.И. Зубцов. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 147 с.

Поступила 24.05.2011

#### STRENGTH ASSESSMENT OF STRUCTURAL MATERIALS

V. ZUBCZOV, V. BOZYLEV

*Characteristics of strength of structural materials with the stress condition close to homogeneous are offered and proved. The standard technique for definition of strength of materials by test results under breaking load is based on the simplified representation about performance of a material under load and does not satisfy the requirements of modern engineering practice. It is offered to use as base strength characteristics an elastic strength, modulus of elasticity, viscosity and hygrosopicity instead of an ultimate strength, relative deformation, a time from the beginning of deformation before destruction and ultimate resilience that allows easier, more operatively, reliable, without destruction and during object exploitation to gain the information for strength assessment of structural materials.*