

УДК 620.22(075.8): 615.462

*Г.И. Горяйнов, Д.Д. Каров, Ю.И. Поликарпов,
А.И. Слуцкер, А.Б. Степанов*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗРЫВНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛАСТОМЕРОВ

*G.I. Goryainov¹, D.D. Karov²,
Yu.I. Polykarпов³, A.I. Slutsker⁴, A.B. Stepanov⁵*

¹ Tekhnologii polimernikh materialov, LLC,
5/7 Dvinskaya St., St. Petersburg, 198035, Russia.
^{2, 3, 4, 5} St. Petersburg State Polytechnical University,
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

BREAKING DURABILITY PARAMETERS ESTIMATION FOR ELASTOMERS

Разрывная долговечность характеризует работоспособность объекта (имплантата), изготовленного из определенного материала. В работе предложен метод определения параметров: энергии диссоциации межатомных связей U_0 и коэффициента γ_0 , характеризующего снижение энергии разрыва связей приложенным напряжением для полиэфируретансилоксанового сополимера на основе измерения диаграмм растяжения до разрыва при вариации скорости растяжения образцов. Оценена работоспособность данного эластомера.

ЭЛАСТОМЕРЫ. РАЗРЫВНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ. ПОЛИЭФИРУРЕТАНСИЛОКСАН. ДИАГРАММА РАСТЯЖЕНИЯ.

Breaking durability characterizes the operability of an object (an implant) made of certain material. Method is suggested to estimate poly(esterurethansiloxane) elastomer parameters such as interatomic bonds dissociation energy U_0 and coefficient γ_0 characterizing bond energy dissociation decrease by stress on basis of tension diagrams under tension rate variation.

ELASTOMERS. BREAKING DURABILITY. POLY(ESTERURETHANSILOXANE). TENSION DIAGRAM.

Долговечность изделий (конструкций) определяется в общем виде как время, в течение которого изделие способно выполнять предназначенные ему функции. Иными словами, долговечность – это время работоспособности изделия.

В тех случаях, когда время работоспособности изделия (конструкции) определяется

временем сохранения свойств материала (из которого изготовлено изделие), обеспечивающих его должное функционирование, появляется термин «долговечность материала» [1].

Для изделий, функционирующих в условиях действия на них механической нагрузки, важной является достаточная устойчивость материала таких изделий к сохранению целостности.

Соответственно, долговечностью материала будет такой период времени, на протяжении которого материал останется неразрушенным (разрывная долговечность).

Разумеется, что такая характеристика не считается константой материала, а зависит от условий, в которых находится изделие и его материал: прежде всего, — от величины и характера механической нагрузки, а также от температуры, от возможных химического и радиационного воздействий и т. п.

В связи с этим становится важным установление такой характеристики материала, которая бы определяла разрывную долговечность: время наступления разрушения в зависимости от условий действия нагрузки.

В настоящей статье предлагается способ определения основных функциональных характеристик — параметров разрывной долговечности для эластомеров, т. е. полимерных материалов, отличающихся большими предразрывными деформациями (до сотен процентов).

Физические основы разрывной долговечности эластомеров

Бытовавшее долгое время представление о критерии прочности материалов как «пределе прочности» — растягивающем напряжении, при котором тело разрывается, а ниже которого сохраняется целым, в настоящее время уступили место новому, «кинетическому пониманию» явления разрушения. Фундаментальными физическими исследованиями было показано, что приложение к твердому телу нагрузки запускает в нем процесс разрушения (накопление разрывов межатомных связей), который и при малом (даже ниже «предела прочности») напряжении приводит нагруженное тело к разрушению, т. е. разрыву и распаду тела на части. При этом период времени до наступления разрыва сильно (экспоненциально) зависит от величины приложенного напряжения. Таким образом, в науку о прочности твердых тел вошло понятие о долговечности — времени между моментами приложения нагрузки и разрыва тела [2 – 4].

Было установлено также, что долговечность сильно зависит не только от приложенного напряжения σ , но и от температуры тела T .

В итоге для всех твердых тел, а для полимеров — особенно, было установлено фундаментальное выражение для долговечности τ [4, 5]:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (1)$$

где $\tau_0 \approx 10^{-12} - 10^{-13}$ с — период колебаний атомов в твердых телах; U_0 — энергия диссоциации межатомных связей (энергия активации в элементарном акте процесса разрушения); γ — коэффициент, характеризующий снижение исходной энергии диссоциации приложенным напряжением σ . Величина γ имеет размерность объема и включает «активационный объем» в элементарном акте процесса разрушения и коэффициент локальных перенапряжений; k — постоянная Больцмана.

Выражение (1) отражает общий механизм кинетики разрушения материалов: последовательный разрыв напряженных межатомных связей тепловыми флуктуациями энергии. Из выражения видно, что долговечность не является константой материала, а зависит от напряжения σ и температуры T . В приведенной зависимости фигурируют свойства (характеристики) данного тела: U_0 и γ .

Таким образом, чтобы описывать долговечность конкретного материала, требуется определить свойственные ему значения параметров U_0 и γ .

Методика определения параметров разрывной долговечности для эластомеров

Наиболее простой способ нахождения величин U_0 и γ — это прямое измерение долговечности τ при задаваемых значениях σ и T . Но такой способ показывает соответствие зависимости (1) и тем самым ведет к нахождению величин U_0 и γ для случая небольших деформаций образцов за время τ , а главное — в образцах за это время не происходит значительных структурных изменений.

Эластомеры — как полимеры, находящиеся в расстеклованном (высокоэластическом) состоянии, названным условиям измерения долговечности не отвечают. Предразрывные деформации эластомеров, как правило, весьма велики (сотни процентов). При этом в нагруженном эластомере при его сильном растяжении происходят интенсивные ориентационные изменения: формируется фибриллярная структура с ее свойствами, резко

отличными от исходного неориентированного состояния.

Таким образом, если к эластомеру приложена постоянная растягивающая сила, то растягивающее напряжение с течением времени меняется: оно нарастает и к моменту разрыва может значительно превысить начальное напряжение. С течением времени ввиду изменения структуры эластомера изменяется и величина коэффициента γ (при сохранении постоянным параметра U_0 [5]).

Поэтому для получения значений параметров U_0 и γ , характеризующих долговечность эластомеров, требуется применить другой способ изучения разрушения.

Если к эластомеру приложить не постоянное напряжение, а переменное, т. е. нарастающее во времени со скоростью $\dot{\sigma} = d\sigma/dt$, то образец разрушится через некоторое время t_p при некотором напряжении $\sigma_p = \dot{\sigma} \cdot t_p$.

Поскольку для долговечности τ при постоянном значении напряжения σ имеет место фундаментальное выражение (1), а процесс разрушения состоит из накопления элементарных актов разрывов напряженных межатомных связей, то действует закон суммирования порций разорванных связей при каждом значении меняющегося напряжения $\sigma(t)$ и параметра $\gamma(t)$ – принцип Бейли [6]:

$$\int_0^{t_p} \frac{dt}{\tau[\gamma(t)\sigma(t)]} = \int_0^{t_p} \frac{dt}{\tau_0 \exp\left[\frac{U_0 - \gamma(t)\sigma(t)}{kT}\right]} = 1. \quad (3)$$

Чтобы использовать соотношение (3), требуется задать зависимости $\sigma(t)$ и $\gamma(t)$. Подчеркнем, что здесь $\sigma(t)$ – текущее напряжение на образце.

Для выяснения параметров долговечности эластомеров в методе нарастающего со временем напряжения $\sigma(t)$ используем диаграммы растяжения образцов эластомеров.

Вид таких диаграмм показан на рис. 1, где ε – относительное растяжение образца (удлинение образца, отнесенное к исходной длине его рабочей части); S_0 – исходная площадь поперечного сечения образца; F – растягивающая сила.

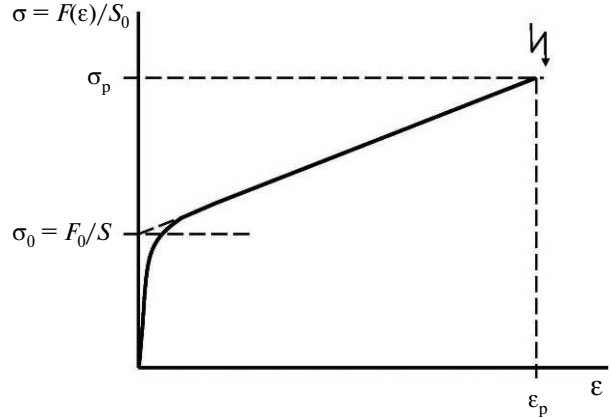


Рис. 1. Диаграмма растяжения эластомера (схема)

Диаграммы измеряются при задаваемой постоянной скорости растяжения $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$, отсюда

$$\varepsilon = \dot{\varepsilon} \cdot t, \quad (4)$$

и доводятся до разрыва образца при значениях ε_p и σ_p .

Растягивающее напряжение σ отсчитывается на основе площади исходного поперечного сечения образца S_0 . Таким образом, форма зависимости $\sigma(\varepsilon)$ на рис. 1 отвечает форме зависимости растягивающей силы $F(\varepsilon)$ от времени (в силу соотношения (4)).

На основе графика $\sigma(\varepsilon)$ (рис. 1) и его линейной экстраполяции к значению $\varepsilon = 0$ указанную зависимость можно представить в форме

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_0 + \varepsilon(\Delta\sigma/\Delta\varepsilon),$$

где σ_0 – результат экстраполяции $\sigma(\varepsilon)$ к $\varepsilon = 0$.

Тогда зависимость $F(\varepsilon)$ для растягивающей силы имеет вид

$$F(\varepsilon) = F_0 + \varepsilon(\Delta F/\Delta\varepsilon).$$

При растяжении образца эластомера площадь его поперечного сечения уменьшается:

$$S(\varepsilon) = \frac{S_0}{1 + \varepsilon}$$

(известно, что при одноосном растяжении образца полимера его объем изменяется весьма слабо: не более, чем на 1 – 2 % [7], так что при значениях растяжения в сотни процентов объем можно считать неизменным).

Тогда текущее напряжение $\sigma^*(\varepsilon)$ на растягиваемом эластомере имеет следующий вид:

$$\sigma^*(\varepsilon) = \frac{F(\varepsilon)}{S(\varepsilon)} = \frac{F_0}{S_0}(1+\varepsilon) + \frac{\Delta F}{\Delta\varepsilon} \cdot \frac{1}{S_0}(1+\varepsilon)\varepsilon.$$

Для оперирования выражением (3) требуется раскрытие функции произведения $\gamma(t) \cdot \sigma^*(t)$.

Установлено, что при растягивающем ориентирующем растяжении полимеров коэффициент γ уменьшается обратно пропорционально растяжению [8]:

$$\gamma(\varepsilon) = \gamma_0 \frac{1}{1+\varepsilon}.$$

Тогда приходим к следующей зависимости от растяжения:

$$\gamma(\varepsilon) \cdot \sigma^*(\varepsilon) = \gamma_0 \frac{F_0}{S_0} + \gamma_0 \frac{1}{S_0} \left(\frac{\Delta F}{\Delta\varepsilon} \right) \varepsilon.$$

От деформационной зависимости (через соотношение (4)) переходим к зависимости от времени:

$$\gamma(t) \cdot \sigma^*(t) = \gamma_0 \sigma_0 + \gamma_0 \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \right) \cdot \dot{\varepsilon} \cdot t.$$

Отметим, что величина $\dot{\varepsilon}$ задается, а наклон $(\Delta\sigma/\Delta\varepsilon)$ определяется из измеряемых диаграмм растяжения $\sigma(\varepsilon)$.

Теперь, подставляя произведение $\gamma(t) \cdot \sigma^*(t)$ в равенство (3), можно проинтегрировать это выражение, в результате чего приходим к следующей формуле:

$$\frac{kT}{\tau_0 \gamma_0 \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \right) \dot{\varepsilon}} \exp\left(-\frac{U_0 - \gamma_0 \sigma_p}{kT}\right) = 1. \quad (5)$$

При выводе формулы (5) использовалось очевидное соотношение

$$\sigma_0 + \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \right) \cdot \dot{\varepsilon} \cdot t_p = \sigma_p,$$

где σ_p – разрывное напряжение, т. е. «обрыв» диаграммы растяжения (см. рис. 1); при этом сделано допущение

$$\frac{\gamma_0 \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \right) \cdot \dot{\varepsilon} \cdot t_p}{kT} \gg 1,$$

справедливость которого будет подтверждена ниже.

Из выражения (5) получаем соотношение

$$U(\sigma_p) = U_0 - \gamma_0 \sigma_p = 2,3kT \lg\left(\frac{kT}{\gamma_0 \tau_0}\right) - 2,3kT \lg\left[\left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}\right) \cdot \dot{\varepsilon}\right]. \quad (6)$$

Полученное выражение (6) позволяет произвести оценку параметров U_0 и γ_0 на основе экспериментальных диаграмм растяжения эластомера, по которым определяется также величина σ_p .

Видно, что в правую часть уравнения (6) включена скорость растяжения $\dot{\varepsilon}$ образца эластомера. Поэтому, задавая вариацию этой величины в достаточно широком диапазоне, мы можем находить зависимость энергии активации U от измеряемого разрывного напряжения σ_p , по которой и можно оценивать значения U_0 и γ_0 .

Определение параметров U_0 и γ для полиуретансилоксанового эластомера

Приведем пример использования экспериментальных диаграмм растяжения при вариации его скорости для оценки параметров долговечности U_0 и γ_0 конкретного эластомера.

Произведем количественные оценки с использованием выражения (6). Положим, что температура, при которой измерялись диаграммы растяжения, составляла $T = 293$ К, а фундаментальная величина $\tau_0 = 10^{-13}$ с [9].

Определение конкретных значений параметров U_0 и γ_0 для исследуемых эластомеров является задачей данного рассмотрения.

Видно, что в выражении (6), на котором и строится определение γ_0 из экспериментальных данных, параметр γ_0 присутствует в левой и правой частях уравнения (6).

В левую часть γ_0 входит в прямом, а в правую – в логарифмическом виде. Логарифмическая зависимость относится к слабым, поэтому для определения γ_0 из левой части уравнения (6) в правой можно принять некоторые характерные значения γ_0 , известные из литературных данных по полимерам, согласно которым значения γ лежат в диапазоне $10^{-28} - 10^{-27}$ м³ [4].

Подчеркнем, что использование в правой части значения γ в таком диапазоне весьма слабо влияет на значение γ_0 , определяемое из левой части.

Допустим, что $\gamma_0 = 10^{-27} \text{ м}^3$.

Тогда приходим к следующим значениям сомножителей в выражении (6):

$$2,3kT = 9,3 \cdot 10^{-21} \text{ Дж},$$

$$\lg\left(\frac{kT}{\gamma_0 \tau_0}\right) = 19,6.$$

В итоге выражение (6) переходит к виду

$$U(\sigma_p) = U_0 - \gamma_0 \sigma_p \approx 1,82 \cdot 10^{-19} \left\{ 1 - 0,051 \cdot \lg\left[\left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}\right) \cdot \dot{\varepsilon}\right] \right\}. \quad (7)$$

Обратимся к экспериментальным данным. Были измерены диаграммы растяжения до разрыва на образцах полиуретансилоксанового сополимера (эластомера) при трех скоростях растяжения: 500, 100 и 0,5 мм/мин. Измерения проводились при комнатной температуре.

При каждой скорости испытывалось пять образцов для определения средних значений. Пример диаграмм растяжения для одной из скоростей (100 мм/мин) представлен на рис. 2. Характеристики образцов даны в таблице.

Видно, что полученные нами диаграммы растяжения эластомера имеют такой же вид, как схематичная диаграмма, приведенная на рис. 1.

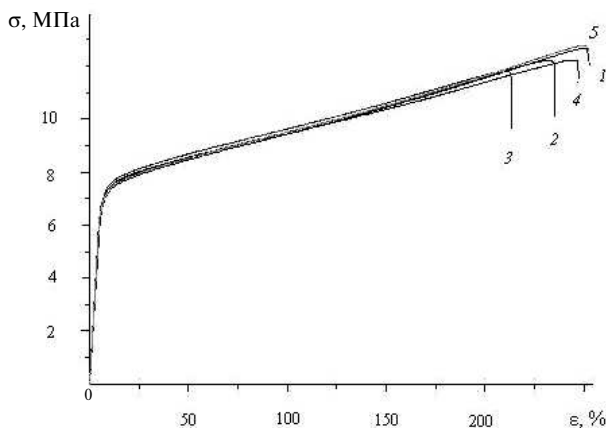


Рис. 2. Диаграммы растяжения пяти образцов эластомера (полиуретансилоксанового сополимера) со скоростью 100 мм/мин

Из экспериментальных данных на рис. 2 находим величины, входящие в уравнение (7): σ_p , $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$, которые требуются в соответствии с (7) для нахождения значения $U(\sigma_p)$:

$$\sigma_p = (12,3 \pm 0,3) \text{ МПа}; \Delta\sigma/\Delta\varepsilon = 2,1 \text{ МПа}.$$

Длина рабочей части образцов составляла 33 мм. Отсюда при абсолютной скорости растяжения 100 мм/мин следовала относительная скорость растяжения: $5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Пользуясь выражением (7) для значения $\sigma_p = 12,3 \text{ МПа}$, мы нашли $U(\sigma_p) = 1,36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

Диаграммы растяжения эластомера при других скоростях растяжения, а именно при 0,5 мм/мин ($\dot{\varepsilon} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$) и 500 мм/мин ($\dot{\varepsilon} = 2,5 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$) имели форму, аналогичную приведенной на рис. 2. Полученные из этих диаграмм значения σ_p и $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ приведены в таблице. Значения $U(\sigma_p)$, найденные с помощью выражения (7), а также значения $\dot{\varepsilon}$ и $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ представлены в таблице.

Условия и результаты экспериментов по растяжению эластомера

Скорость растяжения		σ_p	$\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$	$U(\sigma_p)$
мм/мин	$\dot{\varepsilon}, 10^{-3} \text{ с}^{-1}$	МПа		10^{-19} Дж
0,5	0,25	$10,9 \pm 0,2$	1,8	1,58
100	50	$12,3 \pm 0,3$	2,1	1,36
500	250	$13,2 \pm 0,3$	2,5	1,29

П р и м е ч а н и е. Проведено усреднение по данным диаграмм растяжения (см. пример на рис. 2); $T = 293 \text{ К}$, $\tau_0 = 10^{-13} \text{ с}$, $\gamma_0 = 10^{-27} \text{ м}^3$.

Видно, что разрывное напряжение σ_p (разрывная прочность) закономерно возрастает при увеличении скорости растяжения (и соответственно – скорости роста напряжения σ^*), что отвечает условию накопления элементов разрушения полимеров (накопления разрывов полимерных молекул) при термофлуктуационном механизме элементарных актов процесса разрушения [5]. Полученная связь потенциального барьера U и разрывного напряжения σ_p позволяет найти значения исходного потенциального барьера U_0 и коэффициента γ_0 . Это следует из графика зависимости $U(\sigma_p)$ на рис. 3, построенного по значениям $U(\sigma_p)$ и σ_p , представленных в таблице.

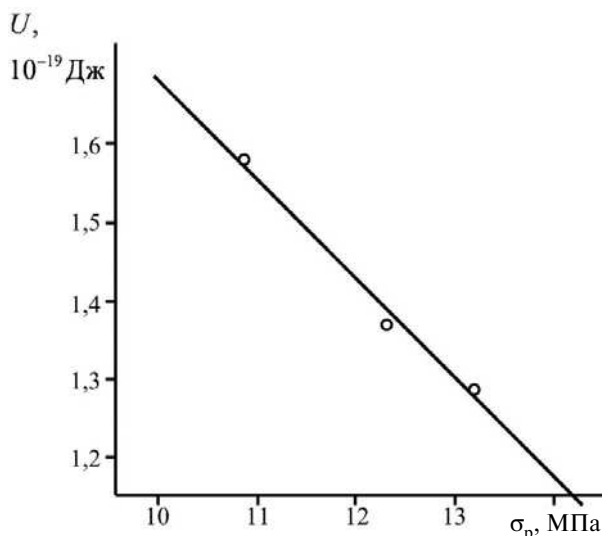


Рис. 3. Зависимость энергии активации разрушения эластомера – полиуретансилоксанового сополимера от разрывного напряжения

Уравнение (7) предсказывает линейную зависимость:

$$U(\sigma_p) = U_0 - \gamma_0 \sigma_p.$$

Как видно из рис. 3, линейная зависимость $U(\sigma_p)$ удовлетворительно выполняется. Это дает возможность оценки величины U_0 (значения $U(\sigma_p)$ при линейной экстраполяции к $\sigma_p = 0$) и γ_0 – по углу наклона $\Delta U / \Delta \sigma_p$:

$$U_0 \approx 3,0 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \approx 1,9 \text{ эВ};$$

$$\gamma_0 \approx 1,3 \cdot 10^{-26} \text{ м}^3.$$

Полученное значение энергии активации процесса разрушения эластомера $U_0 \approx 2,0$ эВ является характерным для полимеров, так как лежит в области энергий диссоциации межатомных связей в полимерах. Энергия диссоциации скелетных ковалентных связей составляет около 4 эВ, а простых межмолекулярных связей – приблизительно 1 эВ. Полиуретансилоксановый эластомер имеет сеточную структуру (трехмерную сетку из межмолекулярных связей), в условиях которой разрушение происходит при сложной комбинации разрывов как скелетных, так и различных межмолекулярных связей, что приводит к некоторой кооперативности элементарных актов деструкции эластомера.

С сеточным строением эластомера связано, очевидно, сравнительно большие значе-

ния параметра γ_0 . Этот параметр включает в виде произведения активационный объем и коэффициент локальных перенапряжений. Оба этих фактора в сеточной структуре имеют более высокие значения, чем в несшитых полимерах.

Найденное значение $\gamma_0 = 10^{-26} \text{ м}^3$ подтверждает справедливость допущения, сделанного при выводе формулы (5).

Подчеркнем, что полученное значение параметра γ_0 отвечает исходному (до нагружения) состоянию эластомера. Фундаментальное выражение для разрывной долговечности (1) дает значение этой величины при постоянном значении действующего напряжения σ и сохранении постоянным во времени коэффициента γ , т. е. при условиях $\sigma(t) = \text{const}$ и $\gamma(t) = \text{const}$.

Приложение к эластомеру растягивающей силы заданной величины F вызовет разрушение (разрыв) по истечении некоторого времени t в иных условиях. Действительно, сила F обусловит растяжение (и достаточно большое) эластомера и тем самым – изменение (уменьшение) его поперечного сечения, приводящее к изменению (возрастанию) действующего напряжения (т. е. $\sigma(t) \neq \text{const}$). Это же растяжение приведет к ориентационному изменению структуры эластомера (его фибриллизации), что вызовет изменение (уменьшение) коэффициента γ (т. е. $\gamma(t) \neq \text{const}$).

Отметим еще раз, что при изменении структуры эластомера значение параметра U_0 – энергии диссоциации межатомных связей не изменяется, поскольку разрушение эластомера связано с накоплением разрывов одних и тех же связей при различной структуре. Структура влияет на условия разрыва связей, что и отражается в величине параметра γ .

Казалось бы, что при условиях непостоянства во времени σ и γ формула (1) не позволяет описывать долговечность. Однако свойства эластомера таковы, что формула (1) дает значение долговечности при заданном начальном напряжении σ_0 ($\sigma_0 = F_0/S_0$, где S_0 – исходное поперечное сечение) и известном начальном (исходном) значении коэффициента γ_0 . Такая возможность связана с закономерностями изменения σ (при $F = \text{const}$) и γ .

Выше уже отмечалось, что



$$\sigma(t) = \frac{F}{S(t)} = \frac{F}{S_0(1+\varepsilon)^{-1}} = \sigma_0(1+\varepsilon);$$
$$\gamma(t) = \gamma_0(1+\varepsilon)^{-1}.$$

В результате фигурирующее в формуле (1) произведение $\gamma\sigma$ остается постоянным при изменении величин σ и γ :

$$\gamma(t) \cdot \sigma(t) = \gamma_0 \cdot \sigma_0,$$

поэтому формула (1) позволяет найти разрывную долговечность эластомера при задаваемом значении σ_0 и известных значениях U_0 и γ_0 (и при задаваемом значении температуры T).

В заключение следует отметить, что одним из важных направлений использования эластомеров является изготовление из них имплантатов – эндопротезов для различных участков человеческого тела. Для имплантатов требуется оценивать какую-либо из следующих величин:

время τ функционирования имплантата без его разрушения (долговечность) при действии нагрузки σ ;

величину нагрузки σ , при которой имплантат будет функционировать без разрушения в течение требуемого времени τ .

В первом случае расчет следует вести прямо по формуле (1), используя найденные значения: $U_0 \approx 1,9$ эВ, $\gamma_0 \approx 1,3 \cdot 10^{-26}$ м³. Для имплантата, естественно, принимается температура человеческого тела: $T = 37^\circ\text{C} = 310$ К.

Если задать напряжение $\sigma_0 = 8$ МПа, тогда получается $\tau \approx 2,5 \cdot 10^6$ с ≈ 1 мес.

Во втором случае задается время функционирования имплантата (долговечность): $\tau \approx 10$ лет $\approx 3 \cdot 10^8$ с. Тогда разрешаемая величина нагрузки $\sigma_0 \approx 6,5$ МПа.

Таким образом, определение величины параметров U_0 и γ_0 , характеризующих исходное (до нагружения) состояние эластомера, позволяет прогнозировать разрывную долговечность эластомеров и тем самым – работоспособность изделий, материалом которых являются эластомеры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Государственный контракт от 12 апреля 2011 г. № 16.513.11.3049).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ратнер, С.Б. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? [Текст] / С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев – М.: Химия, – 1992. – 320 с.
2. Журков, С.Н. Проблема прочности твердых тел [Текст] / С.Н. Журков // Вестник АН СССР. – 1957. – № 11. – С. 78 – 82.
3. Журков, С.Н. К вопросу о физической основе прочности [Текст] / С.Н. Журков // Физика твердого тела. – 1980. – Т. 22. – № 11. – С. 3343 – 3349.
4. Энциклопедия полимеров [Текст]: В 3 тт. Т. 1. А – К (Долговечность полимеров) / Гл. ред. В.А. Каргин. Ред. кол. М.С. Акутин, Е.В. Вонский, В.Ф. Евстратов [и др.]. – М.: Сов. энциклопедия, 1972. – С. 754.
5. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел [Текст] / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
6. Bailey, J. Attempt to correlate some strength measurements of glass [Текст] / J. Bailey // Glass Industry. – 1939. – Vol. 20. – № 1. – P. 21 – 25.
7. Энциклопедия полимеров [Текст]: В 3 тт. Т. 2. Л – ПОЛИН (Механические свойства полимеров) / Гл. ред. В.А. Кабанов. Ред. кол. М.С. Акутин, Н.Ф. Бакеев, Е.В. Вонский, [и др.]. – М.: Сов. энциклопедия, 1974. – С. 230.
8. Энциклопедия полимеров [Текст]: В 3 тт. Т. 2. Л – ПОЛИО (Прочность химических волокон) / Гл. ред. В.А. Кабанов. Ред. кол. М.С. Акутин, Е.В. Вонский, В.Ф. Евстратов [и др.]. – М.: Сов. энциклопедия, 1977. – С. 234.
9. Физическая энциклопедия [Текст]: В 5 тт. Т. 2. Добротность – Магнитооптика / Гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Сов. энциклопедия, 1990. – С. 403.

ГОРЯЙНОВ Георгий Иванович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ОАО «Технологии полимерных материалов».

198035, г. Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7
ggcomposite@mail.ru

КАРОВ Дмитрий Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры интегральной электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

ПОЛИКАРПОВ Юрий Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры интегральной электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

СЛУЦКЕР Александр Ильич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры интегральной электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

СТЕПАНОВ Андрей Борисович – инженер кафедры интегральной электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29