

2/1

M.M. Reznikovskij;

Über die Dauerfestigkeit hochelastischer Polymere.

(Eingereicht vom Mitglied der Akademie V.A.Kargin am 10.X.1964)

Die Grundbeziehung der Festigkeitstheorie von S.N. Zurkov ⁽¹⁾:

(1)

setzt eine exponentielle Abhängigkeit zwischen der Lebensdauer τ und der Bruchspannung bei einfacher Dehnung σ voraus. In Wirklichkeit jedoch ist z.B. für Gummi diese Abhängigkeit komplizierter, wie später gezeigt werden wird, ist sie nicht einmal monoton.

In der Beziehung (1) ist T - die absolute Temperatur, k - die Boltzmannkonstante, τ_0 - die Konstante zeitlicher Dimension, die der Größenordnung nach der Periode der Eigenschwingungen der Atome nahekommt, U_0 - die Ausgangsenergie der Aktivierung des Bruchprozesses, die für hochorientierte polymere Stoffe ähnliche Werte hat wie die Energie der entsprechenden chemischen Bindungen.

Der Koeffizient γ , der die Abhängigkeit des effektiven Wertes der Aktivierungsenergie des Prozesses von der angewandten Spannung charakterisiert, hängt im wesentlichen von der Struktur des Materials ab. Insbesondere wurde gezeigt, daß die sogenannte Verfestigung, die durch Dehnung orientierter Polymere erreicht wird, in Beziehung zur Verkleinerung von γ ⁽²⁾ steht.

In den Arbeiten von S.N. Zurkov wird dem Wert γ die physikalische Bedeutung eines Überspannungskoeffizienten bei Fehlern an realen Festkörpern gegeben.

Nach ⁽³⁾ kann der Koeffizient γ als Ableitung

(2)

dargestellt werden, wobei V - das Fluktationsvolumen und β - der dimensionslose Koeffizient der Spannungskonzentration in der Nähe der größten Bruchgefahr ist.

Da es das Ziel dieser Arbeit ist, die Möglichkeit der Anwendung dieser Theorie auf den hochelastischen Bruch zu klären, gewinnt die Frage der Abhängigkeit des Koeffizienten γ von der Formänderung wesentliche Bedeutung. Man muß fernerhin offensichtlich folgendes berücksichtigen: 1) den rein geometrischen Einfluß der Formänderung auf den Überspannungskoeffizienten in der Nähe der Bruchzone und 2) den Orientierungseffekt, der zur Strukturänderung des Stoffes führt. ⁽⁴⁾.

Für eine annähernde Prüfung benutzen wir die bekannte Beziehung der Elastizitätstheorie für den Koeffizienten der Spannungskonzentra-

tion nahe der Ellipsenöffnung, deren eine Achse richtungsmäßig mit der Zugkraft zusammenfällt.

Die entsprechende Formel lautet folgendermaßen ⁽⁵⁾:

(3)

wobei a und b die Öffnungsgrößen entlang den Ellipsenachsen charakterisieren, längs und quer zur Wirkungsrichtung der Zugkraft.

Bei der Dehnungsprobe verändert sich die Form der Öffnung in der Weise, daß der Quotient b/a kleiner wird.

Aus der Unveränderlichkeit des Volumens bei der Formänderung ergibt sich für β' folgende Abhängigkeit vom Dehnungsgrad ():

(4)

Wenn man berücksichtigt, daß es bei Realstoffen eine große Anzahl von Fehlern verschiedener Art gibt und daß der effektive Wert des Koeffizienten der Belastungskonzentration mit der Formänderung durch die Orientierungsverfestigung des überbeanspruchten Materials kleiner wird, ist es zweckmäßig, die Abhängigkeit von der Formänderung in allgemeinerer Form auszudrücken:

(5)

die indirekt sowohl den geometrischen Einfluß als auch die Orientierungsverfestigung des Materials berücksichtigt. Bei (5) hängt der Koeffizient c von der Heterogenität des Materials ab, und die Größe n charakterisiert den Grad des Formänderungseinflusses auf die durch diese Heterogenität hervorgerufene Spannungskonzentration.

Aus (1), (2) und (5) erhalten wir:

(6)

Bei Prüfungen auf Dauerfestigkeit ist der Zeitraum bis zum Bruch gewöhnlich wesentlich größer als die Zeit, die zur praktischen Vollen- dung des Relaxationsprozesses und der Herstellung des elastischen Gleich- gewichts notwendig ist.

Daher ergibt sich die Möglichkeit, eine einfache lineare Beziehung zwischen Spannung und Formänderung zu benutzen (6):

(7)

woraus wir schließlich

(8)

erhalten.

Wird die Prüfung bei gegebener Formänderung durchgeführt, ist es zweck- mäßig, die gleiche Beziehung in etwas anderer Form auszudrücken:

(9)

Nach dem Logarithmieren und der Einführung zusätzlicher Bezeichnun- gen: $A =$ und $B =$

kann die Beziehung* in der Form:

$$\lg \sigma =$$

(10)

* = (9)

dargestellt werden.

Die Beziehung (10), in der man die Koeffizienten A, B, C und den Wert n als von der Formänderung unabhängige Konstante betrachten kann, unterscheidet sich von der analogen Formel, die man aus (1) erhalten kann durch den Faktor $(1 + \dots)$. Es ist leicht zu sehen, daß bei genügend hohen Werten für λ (hochorientierte Polymere), wenn $\lambda^n \gg c$, dieser Faktor auf 1 zustrebt und die Beziehung (10) in die Gleichung S.N. Zurkova übergeht.

Aus dem Gesagten folgt auch, daß bei der Prüfung der Anwendung der Beziehung (10) auf die Beschreibung der Dauerfestigkeit von hochelastischen Stoffen (Gummi) die Untersuchung im Bereich kleiner Formänderungswerte - dort, wo der Einfluß des Faktors \dots sich am wesentlichsten bemerkbar macht - von größtem Interesse ist.

Bei relativ kleinen Formänderungen (weniger als 100%) geht bei normalen Bedingungen der Bruch von Gummi jedoch so langsam vor sich, daß die Dauerfestigkeit auf diesem Gebiet nur bei einigen spezifischen Voraussetzungen, die auf die eine oder andere Weise zur Beschleunigung des Prozesses beitragen, erforscht worden ist. Eine derartige Beschleunigung kann erreicht werden: durch Versuchskörper mit künstlich geschaffenen Spannungskonzentrationsbereichen (Versuchskörper mit Einkerbung); durch dynamische Vibrationsbelastung des statisch gespannten Versuchskörpers in einem Luftmedium mit im Vergleich zum Normalfall erhöhter Ozonenkonzentration (10^{-5} - 10^{-4} anstelle der üblichen 10^{-6} %).

Es ist zu berücksichtigen, daß der Ozoneneinfluß vor allem in Beziehung zu dem beschleunigten Wachsen der Bruchspalten steht, und in diesem Sinne ist diese Erscheinung absolut der Wirkung vieler oberflächenaktiver oder chemisch aggressiver Substanzen, die die Zerstörung der verschiedensten Stoffe, u.a. auch der nicht polymeren, beschleunigen (7).

Zur Prüfung dieser Ausführungen werden unten Ergebnisse einiger Versuchsserien mit Gummi im ozonisierten Luftmedium aufgeführt. Als zusätzlicher Beweis der Richtigkeit des gewählten Verfahrens können die Ergebnisse einer eingehenden Untersuchung von Ju.S. Zuev (7) gelten, die gezeigt haben, daß Ozon den Bruch beschleunigt, ohne daß dabei die generelle Abhängigkeit zwischen Spannung und Lebensdauer verändert wird.

In der erwähnten Arbeit (7) wurde auch gezeigt, daß die Beziehung zwischen der Lebensdauer von Gummi und der Formänderung nicht monoton ist und durch zwei Extremwerte charakterisiert wird: durch ein Minimum im Formänderungsbereich von 10-50% und ein Maximum bei Formänderungen über 100%.

Die auf Zeichnung 1 dargestellten Abhängigkeiten erhielt man im Institut für Textilindustrie bei einer Spezialanlage, bei der die Gummi-

* analog

versuchskörper sich in einem gegebenen Dehnungszustand in einem Luftmedium von 0,00013 - 0,00016% Ozongehalt befanden.

Aus der Beziehung (10) folgt, daß $A = l_g$.Andererseits soll die Abhängigkeit von l_g und im Bereich hoher Werte für durch die Beziehung

(11)

beschrieben werden.

So kann man die Konstante A aus der Versuchskurve als Ordinate im Punkt -1 der Geraden bestimmen, die sich durch Extrapolation der linearen (im Bereich genügend hoher Werte für liegenden) Strecke ergibt.

Aus (11) folgt weiter, daß die Konstante B als Tangens des Neigungswinkels der gleichen Geraden bestimmt werden kann.

Zur Bestimmung der Konstanten c und n und zur Prüfung der Anwendbarkeit der Beziehung (10) ist es zweckmäßig, die letztere folgendermaßen auszudrücken:

(12)

Aus 12 folgt, daß bei Richtigkeit der Beziehung (10) die Abhängigkeit $l_g Z$ von l_g linear sein muß, wobei man die Konstante n nach der Neigung der entsprechenden Geraden bestimmen kann; das durch diese Gerade an der Ordinatenachse abgetrennte Segment ist $l_g c$.

Die entsprechenden Geraden, die man auf Grund ^{der} experimentellen Angaben von Zeichnung 1 erhalten hat, sind auf Zeichnung 2 dargestellt, und auf Tabelle 1 sind die Zahlenwerte der Konstanten A, B, c und n für alle untersuchten Gummiarten aufgeführt.

Aus Zeichnung 2 ist ersichtlich, daß sich die Abhängigkeit (12) in vollkommen befriedigendem Maße den Versuchsangaben annähert.

Auf Zeichnung 3 wird die gute Übereinstimmung von Versuchsdaten und berechneten Angaben am Beispiel von Gummi aus SKS-30 ARKM auch im Koordinatensystem Lebensdauer - Formänderung illustriert.

So kann man annehmen, daß bei Berücksichtigung der Abhängigkeit der Konstanten von der Formänderung sich die Theorie der fluktuierenden Festigkeit von S.N. Zurkov auf den hochelastischen Bruch anwenden läßt. Die komplizierte, nichtmonotone Abhängigkeit zwischen Lebensdauer und Bruchformänderung (oder Spannung) kann in diesem Falle gut mit Hilfe der Gleichung (10) beschrieben werden, die 4 Konstante hat, von denen jede eine genügend klare physikalische Bedeutung hat.

Der Autor drückt dem Mitglied der Akademie V.A. Kargin für nützliche Bemerkungen bei der Erörterung dieser Arbeit seine Dankbarkeit aus.

Zeichnung 1. Abhängigkeit der Lebensdauer (Zeit bis zum Auftreten sichtbarer Spalten) vom gegebenen Spannungsgrad für verschiedene Gummiarten. Untersuchungen bei einer Temperatur von $\sim 20^{\circ}$.

Zeichnung 2. Abhängigkeit der Funktion $Z =$ vom gegebenen Spannungsgrad für Gummi auf verschiedener Grundlage.

Zeichnung 3. Gegenüberstellung der berechneten Werte und Versuchsangaben in Bez. auf die Abhängigkeit der Lebensdauer von der Dehnungsverformung für Gummi aus SKS-30 ARKM ($0,3 \cdot 1,5 \cdot 10^{-40}/0$). Die durchgehende Kurve stellt die berechneten Werte dar.

Tabelle 1. Gummiarten

auf NK-Basis	(Naturkautschuk)
auf SKI-Basis	(synthet. Isopren-K.)
auf SKB-Basis	(synthet. Natrium-Butadien-K.)
auf SKS-30 ARKM - Basis	(synthet. Butadien-Styrol-K.)

Zitierte Literatur

- 1 S.N. Zurkov, Vortr. auf der XIV Konf. üb. hochmolek. Verb., L., 1964.
- 2 B.Ja. Levin, A.V. Savickij, V.P. Demičeva, Mitt. auf der XIV Konf. über hochmolek. Verb., L., 1964; I.I. Novak, S.N. Zurkov u.a.; ebenda.
- 3 I.V. Razumovskaja, G.M. Bartenev, Mitt. auf der XIV Konf. über hochmolek. Verb., L., 1964; G.M. Bartenev, I.V. Razumovskaja, Phys. fester Körper, 6, Nr 3, 657 (1964).
- 4 V.A. Kargin, Vortr. u. Ber. auf der XIV Konf. üb. hochmolek. Verb., L., 1964; V. Kalasnikova, Z.Ja. Berestnevs, ebenda.
- 5 Y.Y. Bikerman, The Science of Adhesive Joints, N.Y. - London, 1961.
- 6 G.M. Bartenev, Koll. Žurnal, 11, 2, 57 (1949); ŽTF, 20, 461 (1950).
- 7 Ju.S. Zuev, Bruch von gespanntem Gummi unter dem Einfluß aggressiver Gase und Säuren, M., 1963.

Zitierte Literatur (Transkription):

- 1 S.N. Žurkov, Dokl. na XIV konfer. po vysokomolek. soed., L., 1964.
- 2 B.Ja. Levin, A.V. Savickij, V.P. Demičeva, Soobšč. na XIV konfer. po vysokomolek. soed., L., 1964; I.I. Novak, S.N. Žurkov i dr.; tam že.
- 3 I.B. Razumovskaja, G.M. Bartenev, Soobšč. na XIV konfer. po vysokomolek. soed., L., 1964; G.M. Bartenev, I.V. Razumovskaja, Fiz. tverd. tela, 6, N^o 3, 657 (1964).
- 4 V.A. Kargin, Dokl. i soobšč. na XIV konfer. po vysokomolek. soed., L., 1964; V. Kalasnikova, Z.Ja. Berestneva, tam že.
- 5 Y.Y. Bikerma, The Science of Adhesive Joints, N.Y. - London, 1961.
- 6 G.M. Bartenev, Koll. žurn., 11, 2, 57 (1949); ŽTF, 20, 461 (1950).
- 7 Ju.S. Zuev, Razrušenie naprjazennyh pezin pod vlijaniem agresivnyh atmosferynych vozdejstvij i kislot, M., 1963.

М. М. РЕЗНИКОВСКИЙ

О ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ПРОЧНОСТИ
ВЫСОКОЭЛАСТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ *

(Представлено академиком В. А. Каргиным 10 X 1964)

Основное соотношение теории прочности С. Н. Журкова (1):

$$\tau = \tau_0 e^{(U_0 - \gamma\sigma)/kT}, \quad (1)$$

предполагает экспоненциальную зависимость между долговечностью τ и разрушающим напряжением при простом растяжении σ . В действительности же, например, для резин эта зависимость оказывается более сложной и, как будет показано ниже, даже немонотонной.

В соотношении (1): T — абсолютная температура; k — постоянная Больцмана; τ_0 — постоянная, имеющая размерность времени и по порядку величины близкая к периоду собственных колебаний атомов; U_0 — начальная энергия активации процесса разрушения, имеющая для высокоориентированных полимерных материалов значения, близкие к энергии соответствующих химических связей.

Коэффициент γ , характеризующий зависимость эффективного значения энергии активации процесса от величины приложенного напряжения, существенным образом зависит от структуры материала. В частности, было показано, что так называемое упрочнение, достигаемое вытяжкой ориентированных полимеров, связано с уменьшением γ (2).

В работах С. Н. Журкова показателю γ приписывается физический смысл коэффициента перенапряжения на дефектах, имеющих в реальных твердых телах.

Согласно (3), коэффициент γ может быть представлен как произведение:

$$\gamma = \omega\beta, \quad (2)$$

где ω — флуктуационный объем, а β — безразмерный коэффициент концентрации напряжения вблизи наиболее опасного дефекта.

Поскольку целью настоящей работы является выяснение возможности распространения теории на высокоэластический разрыв, наиболее существенным представляется вопрос о зависимости коэффициента γ от деформации. В дальнейшем надо, по-видимому, иметь в виду: 1) чисто геометрическое влияние деформации на коэффициент перенапряжения вблизи дефектов и 2) ориентационный эффект, приводящий к изменению структуры материала (4).

Для приближенного рассмотрения воспользуемся известным соотношением теории упругости для коэффициента концентрации напряжения вблизи эллиптического отверстия, одна из осей которого совпадает по направлению с растягивающим усилием.

Соответствующее выражение имеет вид (5):

$$\beta' = 1 + 2b/a, \quad (3)$$

где a и b характеризуют размеры отверстия по осям эллипса, вдоль и поперек направления действия растягивающего усилия.

* В работе принимала участие К. Н. Лазарева.

При растяжении образца отверстие деформируется таким образом, что отношение b/a уменьшается.

Из условия постоянства объема при деформации вытекает следующая зависимость β' от степени растяжения (λ):

$$\beta' = 1 + 2b/a\lambda^{3/2}. \quad (4)$$

Учитывая, что в реальном материале имеется большое число дефектов различной формы, а также, что эффективное значение коэффициента концентрации напряжения уменьшается с деформацией из-за ориентационного упрочнения перенапряженного материала, выражение для зависимости β' от деформации целесообразно записать в более общем виде:

$$\beta' = 1 + c\lambda^{-n}, \quad (5)$$

косвенно учитывающем как геометрическое влияние, так и ориентационное упрочнение материала. В (5) коэффициент c зависит от неоднородности материала, а показатель n характеризует степень влияния деформации на вызываемую этой неоднородностью концентрацию напряжений.

Из (1), (2) и (5) получаем:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \omega(1 + c\lambda^{-n})\sigma}{kT}. \quad (6)$$

При испытаниях на длительную прочность время до разрушения τ обычно существенно превышает время, необходимое для практического завершения релаксационного процесса и установления упругого равновесия.

Отсюда следует возможность использования простого линейного соотношения между напряжением и деформацией (6):

$$\sigma = E_\infty \varepsilon = E_\infty (\lambda - 1), \quad (7)$$

с учетом которого получим окончательно:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \omega [1 + c(\sigma/E_\infty + 1)^{-n}] \sigma}{kT}. \quad (8)$$

Если испытания ведутся в условиях заданной деформации, это же соотношение целесообразно представить в несколько ином виде:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \omega E_\infty (\lambda - 1) (1 + c\lambda^{-n})}{kT}. \quad (9)$$

После логарифмирования и введения дополнительных обозначений: $A = 0,43 (\ln \tau_0 + U_0/kT)$ и $B = 0,43 (\omega E_\infty / kT)$, соотношение (9) может быть представлено в форме:

$$\lg \tau = A - B(\lambda - 1) (1 + c\lambda^{-n}). \quad (10)$$

Соотношение (10), в котором коэффициенты A , B , C и показатель n можно считать постоянными, не зависящими от деформации, отличается от аналогичного выражения, которое может быть получено из (1), множителем $(1 + c\lambda^{-n})$. Легко видеть, что при достаточно больших значениях λ (высокоориентированный полимерный материал), когда $\lambda^n \gg c$, этот множитель стремится к единице и соотношение (10) переходит в уравнение С. Н. Журкова.

Из сказанного следует также, что при рассмотрении вопроса о применимости соотношения (10) к описанию долговременной прочности высокоэластических материалов (резины) наибольший интерес представляет исследование в области малых значений деформации там, где влияние множителя $1 + c\lambda^{-n}$ наиболее существенно.

При относительно малых деформациях (менее 100%), в обычных условиях, разрушение резины происходит, однако, так медленно, что длитель-

ная прочность в этой области изучена лишь в некоторых специфических условиях, так или иначе способствующих ускорению процесса. Такого рода ускорение может быть достигнуто: испытанием образцов с искусственно созданными участками концентрации напряжений (образцов с надрезом); наложением динамической вибрационной нагрузки на статически напряженный образец; испытанием образцов в воздухе с несколько повышенной по сравнению с обычной концентрацией озона (10^{-5} — 10^{-4} вместо обычной $\sim 10^{-6}$ %).

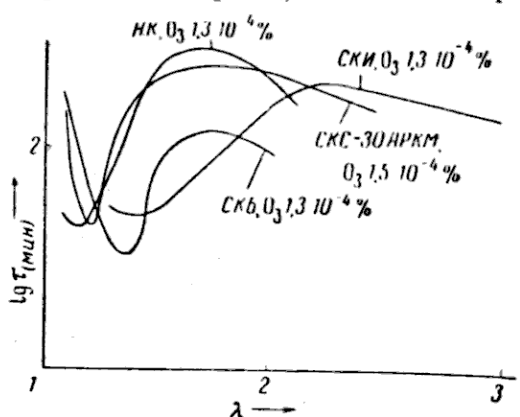


Рис. 1. Зависимость долговечности (времени до появления видимых трещин) от степени задаваемого растяжения для резины на различной основе. Испытания при температуре $\sim 20^\circ$

мерности выбранного способа могут служить результаты обстоятельного исследования Ю. С. Зуева (7), показавшего, что озон ускоряет разрушение, не изменяя при этом общего характера зависимости между напряжением и долговечностью.

В упомянутой работе (7) было также показано, что связь между долговечностью резины и деформацией немонокотонна и характеризуется двумя экстремумами: минимумом в области деформаций 10—50% и максимумом при деформациях, превышающих 100%.

Представленные на рис. 1 зависимости получены в Институте шинной промышленности на специальной установке, в которой испытываемые образцы резины находились в состоянии заданного растяжения в воздушной среде, содержащей озон в количестве 0,00013—0,00016%.

Из соотношения (10) следует, что $A = \lg \tau_{\lambda=1}$. С другой стороны, зависимость между $\lg \tau$ и λ в области больших значений λ должна описываться соотношением:

$$\lg \tau = A - B(\lambda - 1) \quad (\lambda^n \gg c). \quad (11)$$

Таким образом, постоянная A может быть определена из опытной кривой как ордината в точке $\lambda = 1$ прямой, получаемой экстраполяцией линейного участка (расположенного в области достаточно больших значений λ).

Из (11) следует далее, что постоянная B может быть определена как тангенс угла наклона этой же прямой.

Для определения постоянных c и n и проверки применимости соотношения (10), последнее целесообразно представить в виде:

$$\frac{A - \lg \tau}{B(\lambda - 1)} - 1 = Z = c\lambda^{-n}. \quad (12)$$

Из 12 следует, что если соотношение (10) справедливо, то зависимость $\lg Z$ от $\lg \lambda$ должна быть линейной, причем постоянную n можно определить по наклону соответствующей прямой, а отрезок, отсекаемый этой прямой на оси ординат, есть $\lg c$.

Соответствующие прямые, полученные на основе экспериментальных данных рис. 1, представлены на рис. 2, а в табл. 1 приведены численные значения постоянных A , B , c и n для всех обследованных резин.

Таблица 1

Резины	A	B	c	n
На основе НК	3,0	0,68	40,0	8,35
> > СКИ	3,0	0,36	39,8	4,55
> > СКБ	2,9	0,77	17,8	5,5
> > СКС-30 АРКМ	3,3	0,78	31,5	7,0

Из рис. 2 видно, что опытные данные аппроксимируются зависимостью (12) вполне удовлетворительно.

На рис. 3 хорошее согласие между опытными и расчетными данными на примере резины из СКС-30 АРКМ иллюстрируется также в системе координат долговечность — деформация.

Таким образом, можно считать, что учет зависимости постоянной γ от деформации позволяет распространить флуктуационную теорию прочности С. Н. Журкова на высокоэластический разрыв. Сложная, немонотонная

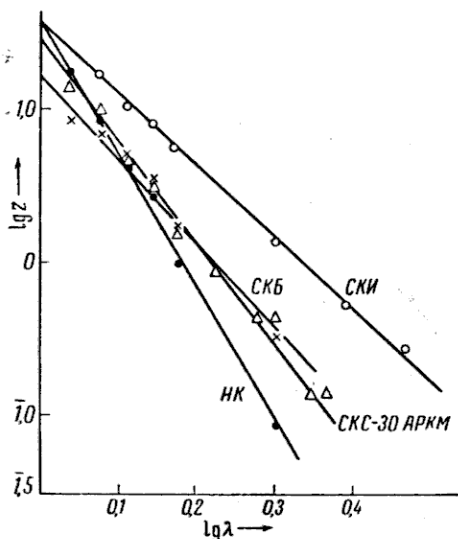


Рис. 2. Зависимость функции $Z = (A - \lg \tau) / B(\lambda - 1) - 1$, от степени задаваемого растяжения для резин на различной основе

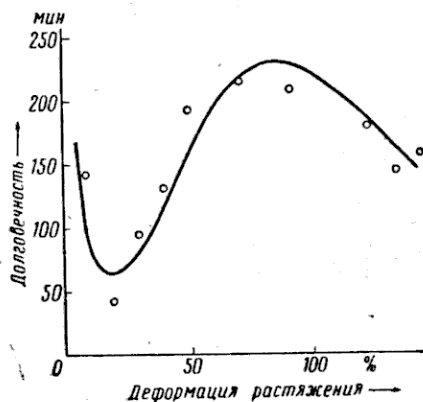


Рис. 3. Сопоставление расчетных и опытных данных по зависимости долговечности от деформации растяжения для резины из СКС-30 АРКМ ($O_3 1,5 \cdot 10^{-4} \%$). Сплошная кривая — расчетные значения

зависимость между долговечностью и разрушающей деформацией (или напряжением) может быть в этом случае хорошо описана с помощью уравнения (10), содержащего 4 постоянных, каждая из которых имеет достаточно ясный физический смысл.

Автор выражает благодарность акад. В. А. Каргину за полезные замечания при обсуждении работы.

Научно-исследовательский институт
шинной промышленности

Поступило
8 X 1964

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ С. Н. Журков, Докл. на XIV конфер. по высокомолек. соед., Л., 1964. ² Б. Я. Левин, А. В. Савицкий, В. П. Демичева, Сообщ. на XIV конфер. по высокомолек. соед., Л., 1964; И. И. Новак, С. Н. Журков и др.; там же. ³ И. В. Разумовская, Г. М. Бартенева, Сообщ. на XIV конфер. по высокомолек. соед., Л., 1964; Г. М. Бартенева, И. В. Разумовская, Физ. тверд. тела, 6, № 3, 657 (1964). ⁴ В. А. Каргин, Докл. и сообщ. на XIV конфер. по высокомолек. соед., Л., 1964; В. Калашникова, З. Я. Берестнева, там же. ⁵ Y. Y. Vikerma, The Science of Adhesive Joints, N. Y.—London, 1961. ⁶ Г. М. Бартенева, Колл. журн., 11, 2, 57 (1949); ЖТФ, 20, 461 (1950). ⁷ Ю. С. Зуев, Разрушение напряженных резин под влиянием агрессивных атмосферных воздействий и кислот, М., 1963.