

ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Том (A) XXIV

1982

№ 10

УДК 541.64:539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ ПОДАТЛИВОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ В СТЕКЛООБРАЗНОМ СОСТОЯНИИ

Ольховик О. Е., Баранов В. Г.

Экспериментально изучены объемные деформации ряда полимеров в условиях одноосного растяжения, сжатия и гидростатического давления. Показано, что объемная податливость при положительном среднем напряжении почти на порядок превышает аналогичную величину при всестороннем сжатии. Процесс разрушения целиком определяется разрывом основных цепей и происходит, как только увеличение объема достигает некоторой величины. Объемная деформация является основным источником появления физической нелинейности процесса ползучести, и ее введение в наследственные соотношения вязкоупругости позволяет описать нестационарные режимы деформирования (нагружения) при сложном напряженном состоянии.

Взаимосвязь между давлением P , температурой T и объемом V полимера — важный источник информации о свойствах и структурных изменениях, происходящих в полимерах. Эти данные представляют также интерес с точки зрения оптимизации технологических процессов в связи с существующей тенденцией увеличения давления при синтезе и переработке полимеров в изделия. Особый интерес представляет установление взаимосвязи между P , V и T во времени при одновременном воздействии на полимер сдвиговых и объемных деформаций. Кинетические закономерности изменения объема в таких условиях могут быть использованы для изучения физико-химических аспектов разрушения. Необходимо отметить, что измерения объема полимера в процессе синтеза высокомолекулярных соединений используются [1] в качестве меры глубины превращения (конверсии) прямых реакций.

Уменьшение объема полимеров при гидростатическом сжатии и наблюдаемое изменение свойств, например повышение прочности [2] или уменьшение ползучести [3], можно рассматривать как продолжение прямой реакции, инициируемой гидростатическим давлением. При этом реакция после снятия давления может быть как обратимой, так и необратимой. С другой стороны, увеличение объема при положительном среднем напряжении [4, 5] можно рассматривать как обратную реакцию, протекание которой приводит к обратному эффекту, т. е. снижению прочности или увеличению ползучести. Таким образом, имеются основания полагать, что такие важные свойства высокомолекулярных соединений, как прочность и деформативность, могут быть проанализированы в функции степени завершения реакции, контролируемой по объему, с учетом различных факторов, влияющих на ее кинетику, в число которых следует отнести и механическое поле напряжений, инициирующее прямую или обратную реакции. Практическая ценность изучения объемной деформации кроется в открывающейся возможности прямого измерения степени поврежденности материала, находящегося под нагрузкой, посредством измерения его плотности, которая находится в функциональной связи со свойствами полимера.

Тем не менее имеющиеся в литературе данные [4–7] недостаточно полны, и, в частности, практически отсутствуют результаты, относящиеся к изучению кинетических закономерностей изменения объема во времени, особенно при положительном среднем напряжении.

Цель настоящей работы — изучение неравновесных значений объема ряда полимеров (ПВХ, ПММА, эпоксидное связующее стеклопластиков на основе смолы ЭД-13, отверженной триэтаноламинтитанатом, и некоторые

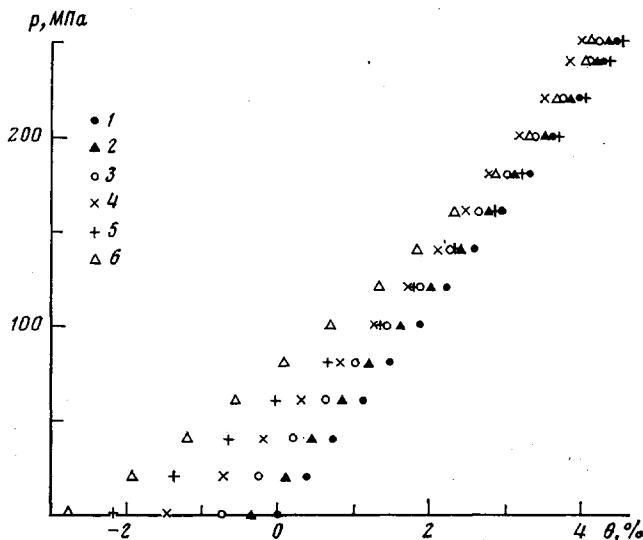


Рис. 1. Изотермы сжатия ПВХ при 293 (1), 313 (2), 339 (3), 355 (4), 372 (5) и 383 К (6)

композиты) при простых деформациях (растяжение и сжатие). Методика проведения исследований, аппаратура и образцы описаны в работах [5, 7].

На рис. 1 приведены неравновесные величины объемной деформации ПВХ в функции давления при различных температурах, полученные в режиме нагружения со скоростью 10 МПа в минуту. В диапазоне температур 293–355 К изотермы с увеличением давления располагаются ближе друг к другу, не пересекаясь. Наиболее существенное сближение изотерм происходит до давления, равного 100 МПа. При этом величина эффективного коэффициента теплового расширения уменьшается при 100 МПа в 2,5 раза по сравнению с атмосферным давлением. Выше 100 МПа величина объемного коэффициента теплового расширения убывает в указанном температурном интервале с ростом давления до 250 МПа в 1,7 раза. Начиная с температуры в 355 К происходит пересечение изотерм сжатия, которое наблюдали при давлениях в 100 и 180 МПа. Пересечение изотерм сжатия показывает, что в некоторой области температур и давлений (выше точки пересечения) эффективная величина коэффициента теплового расширения принимает отрицательное значение, т. е. при нагревании происходит уменьшение объема. Эта аномалия носит релаксационный характер и вызвана увеличением объемной ползучести при достижении некоторой температуры, поскольку время, необходимое для установления равновесного состояния при более низкой температуре, слишком велико. Не исключено, что первое пересечение, происходящее при 355 К, обусловлено α -переходом, температура которого для ПВХ составляет 357 К [8].

Данные рис. 2 иллюстрируют увеличение объема ПВХ в условиях одностороннего растяжения, когда в образце возникает положительное среднее напряжение σ_m (гидростатическое давление), при различных температурах. Закономерности увеличения объема при положительном среднем напряжении, равном одной трети величины растягивающего напряжения [9, 10], существенно отличаются от всестороннего сжатия (рис. 1). Так, в этом случае объемная деформация значительно больше при одинаковых величи-

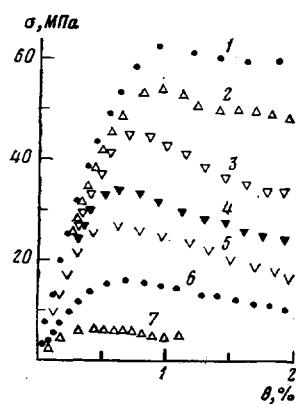


Рис. 2. Изотермы растяжения ПВХ при 293 (1), 303 (2), 313 (3), 323 (4), 333 (5), 343 (6) и 355 К (7)

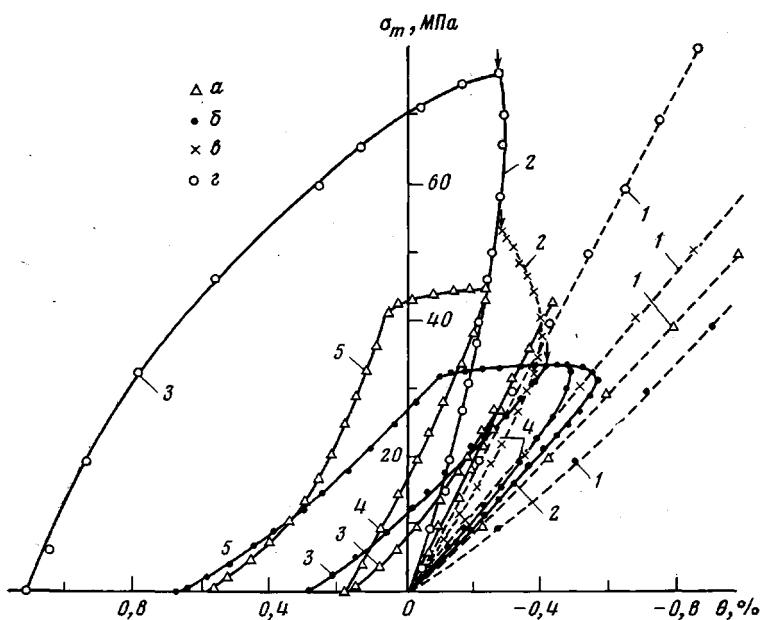


Рис. 3. Изотермы сжатия ПВХ (а), ПММА (б), эпоксидного связующего стеклопластиков (в), и тканевого композита на полиэфирной смоле (г) при 303 К. 1 – гидростатическое сжатие, 2 – первый цикл одноосного сжатия, 3 – первый цикл разгрузки, 4 – второй цикл одноосного сжатия и 5 – второй цикл разгрузки

нах гидростатического давления, особенно при увеличении температуры. Испытание ПВХ в условиях одноосного растяжения при всех температурах заканчивалось разрушением, которое происходило при относительном увеличении объема в 1,8–1,9% (за исключением температуры 355 К). Очевидно, постоянство объемной деформации в момент разрушения справедливо для одного физического подсостояния.

Увеличение объема полимерных материалов под действием механических нагрузок происходит вследствие возрастания свободного объема, с другой стороны, аналогичная картина происходит и при нагревании. Для второго случая известно [9], что размягчение (α -переход) происходит, как только доля свободного объема достигает 2,3%. Количественная оценка теплового и механического размягчения на примере ПВХ (рис. 2) и ПММА [7] показывает, что механическое размягчение наблюдается при величине свободного объема, приближающегося к 2,3% (за вычетом свободного объема в стеклообразном состоянии). Так, для ПВХ в стеклообразном состоянии механическое размягчение происходит при увеличении

Таблица 1

Изотермическая скимаемость ПВХ $\beta \cdot 10^6 \text{ Па}^{-1}$

р, МПа	$\beta \cdot 10^6 (\text{Па}^{-1})$ при температуре, К					
	293	313	336	355	372	383
20	3,5	—	—	—	—	—
15	3,2	4,7	—	—	—	—
10	2,9	3,8	—	—	—	—
7,5	2,8	3,5	6,7	—	—	—
5,0	2,7	3,2	3,8	—	—	—
2,0	2,5	2,8	3,4	15,0	—	—
-2,5	2,3	2,4	3,0	4,5	5,0	5,3
-10	2,2	2,3	2,7	4,1	4,5	4,6
-20	1,9	2,2	2,6	3,7	4,1	4,2
-100	1,9	2,0	2,2	2,8	3,5	3,4
-200	1,9	1,9	2,1	2,4	2,9	3,1
-300	1,8	1,9	2,0	2,2	2,7	2,8

свободного объема на 2%, т. е. доля свободного объема при отсутствии механических нагрузок для стеклообразного состояния составляет 0,3%. В области температур вблизи α -перехода и выше доля увеличения свободного объема, достигаемого механическим путем, начинает уменьшаться до нуля в высокоэластическом состоянии, что подтверждается данными рис. 2 (кривая 7) и исследованиями, выполненными на ненаполненных полиуретанах.

Влияние знака среднего напряжения и температуры на величину объемной деформации иллюстрируется данными по сжимаемости, приведенными в табл. 1. Видно, что при $\sigma_m > 0$ объемная сжимаемость существенно выше, чем при всестороннем сжатии, что особенно проявляется вблизи α -перехода. Полученные данные показывают, что при всестороннем сжатии объемный модуль много выше модуля сдвига, и, следовательно, в этой области давлений вполне приемлемой является гипотеза о несжимаемости, используемая при технических расчетах. Совсем иную картину наблюдали при положительном среднем напряжении. Так, в условиях одноосного растяжения ПВХ отношение объемной податливости к податливости при растяжении меняется с увеличением напряжения в режиме ползучести с 15 до 35 МПа в пределах 0,69–1,63 соответственно. Таким образом, сопротивление изменению объема при $\sigma_m > 0$ существенно уменьшается и по порядку величин может несколько превышать сопротивление формоизменению.

Обратимся теперь к опытам по изменению объема в условиях одноосного сжатия, результаты которых в координатах среднее напряжение – объемная деформация для четырех материалов представлены на рис. 3. Подробный анализ проведем на примере ПВХ. При первом цикле одноосного сжатия (до $\epsilon = 6,5\%$) величина объемной деформации (кривая 2) несколько меньше, чем при всестороннем сжатии (кривая 1). В режиме разгрузки изотерма одноосного сжатия отличается от первоначального пути деформирования, что особенно заметно в области малых величин среднего напряжения. Величина остаточной деформации (объемной) после первого цикла составила +0,20%. При втором цикле одноосного сжатия полимер деформировали до $\epsilon = 10\%$. До линейной деформации в 6% объем ПВХ при одноосном сжатии уменьшается, затем, с увеличением линейной деформации, практически при постоянном среднем напряжении, происходит увеличение объема. Остаточное увеличение объема ПВХ за два цикла одноосного сжатия составило 0,62%. Качественно аналогичную картину при сжатии наблюдали и для ПММА.

Эпоксидное связующее стеклопластиков и тканевый композит на полиэфирной основе разрушались при первом цикле сжатия. Разрушение связующего и композита при одноосном растяжении происходит при увеличении объема на 0,62 и 0,53% соответственно. Эти два материала при одноосном сжатии разрушались при таком же увеличении объема, как и при растяжении (если отсчет вести от изотерм всестороннего сжатия (кривые 1), т. е. от безопасного состояния).

Причина расхождения изотерм всестороннего и одноосного сжатия кроется в разрыхлении материала вследствие воздействия касательных (сдвиговых) напряжений. Отметим, что при одноосном сжатии по площадкам, расположенным под 45° к оси образца, наблюдали наибольшие касательные напряжения, величина которых по указанному направлению равна половине сжимающих напряжений. Покажем, что в условиях чистого сдвига, эквивалентного растяжению элементарного кубика в одном и сжатию в перпендикулярном направлениях, происходит изменение объема. Применяя к упругому элементу, находящемуся в условиях чистого сдвига, обобщенный закон Гука [11] и принимая во внимание известный факт неравенства модулей упругости [9, 11], при растяжении E_p и сжатии E_c можно получить

$$\theta = (1 - 2\mu) \left(\frac{1}{E_p} - \frac{1}{E_c} \right) \tau, \quad (1)$$

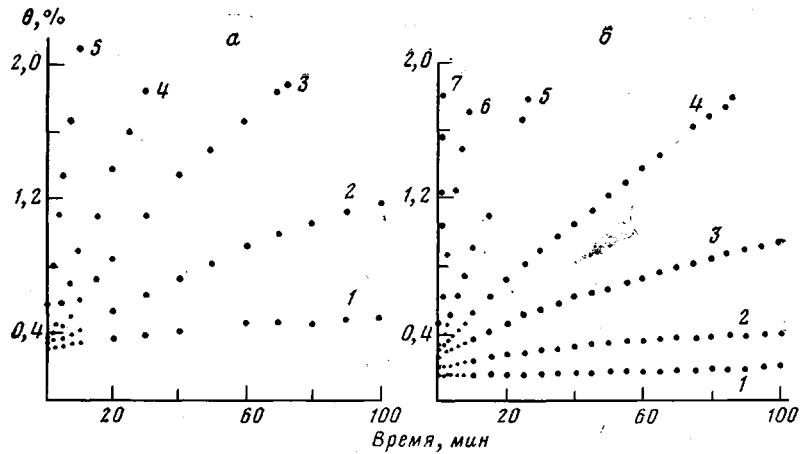


Рис. 4

Рис. 4. Объемная ползучесть ПВХ при растягивающем напряжении 30 МПа (а) и температуре 323 К (б).
а: 1 – 303, 2 – 313, 3 – 318, 4 – 323,
5 – 328 К; б: 1 – 15, 2 – 20, 3 – 25,
4 – 27,5; 5 – 30, 6 – 32,5; 7 – 35 МПа

Рис. 5. Объемная податливость ПВХ при 303 К и среднем напряжении
–250 (1), –50 (2), –10 (3), –5 (4),
6,6 (5), 8,3 (6), 9,2 (7), 10 (8), 10,8
(9) и 11,7 МПа (10)

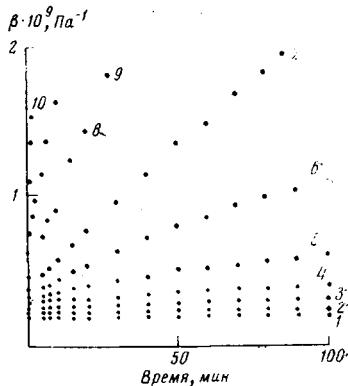


Рис. 5

где μ – коэффициент Пуассона, τ – касательное напряжение, θ – относительное изменение объема.

Для вязкоупругих сред в соотношении (1) модули упругости следует заменить интегральными операторами. Прямые испытания, выполненные на приборе, описанном в работе [6], подтвердили соотношение (1) при кручении образцов из ПММА и ПТФЭ. Количественные закономерности объемных деформаций при сдвиге требуют самостоятельных исследований и выходят за рамки настоящей работы.

Была предпринята попытка изучения объемных деформаций на эластомерах (полиуретанах). Оказалось, что объемный модуль упругости при всестороннем сжатии полиуретанов имеет величину $(3\text{--}4) \cdot 10^3$ Па. В опытах по одноосному растяжению и сжатию при относительной линейной деформации до 20% установить величину объемной деформации не удалось вследствие их малости, поскольку здесь объемные деформации находятся за пределом чувствительности прибора [6]. Очевидно, эластомеры имеют достаточный свободный объем, необходимый для согласования молекулярных движений с перемещениями, тогда как для полимеров, находящихся в стеклообразном состоянии, молекулярные движения затруднены.

Для рассмотрения вопроса о взаимосвязи процессов разрушения и деформирования были выполнены исследования по ползучести ПВХ при растяжении с измерением объемной деформации. Результаты представлены на рис. 4. По этим данным были вычислены эффективные значения энергии активации ΔU и активационного объема ΔV^* , соответственно равные 168 кДж/моль и 2800 см³/моль. Столь высокое значение ΔU свидетельствует о том, что увеличение объема происходит с разрывом химических связей. Найденная величина активационного объема показывает, что при

мольном объеме повторяющегося звена ПВХ, равном $62,5 \text{ см}^3/\text{моль}$, объем кинетической единицы составляет ~ 50 мономерных звеньев. По данным рис. 4, б, а также опытов по ползучести при гидростатическом сжатии были рассчитаны величины объемной податливости ПВХ на временной базе в 100 мин и широком диапазоне средних напряжений (рис. 5). Видно, что при отрицательном среднем напряжении объемная податливость β составляет $(2-3) \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$ и весьма незначительно изменяется во времени. В области положительного среднего напряжения (кривые 4-10) объемная податливость на порядок выше, чем при сжатии, и весьма сильно меняется во времени.

Анализируя рис. 4, необходимо отметить, что разрушение ПВХ в режиме ползучести, как и в режиме деформирования (рис. 2), происходит в мо-

Таблица 2

**Объемные деформации ПТФЭ в процессе релаксации напряжений
при растяжении и сжатии**

Время, мин	σ , МПа	θ , %	$K \cdot 10^{-4}$, Па	σ , МПа	θ , %	$K \cdot 10^{-5}$, Па
	растяжение			сжатие		
0	0	0	—	0	0	—
0,5	8,0	1,06	2,52	18,6	-0,102	6,0
1	7,70	1,07	2,41	15,6	-0,072	7,3
2	7,54	1,06	2,37	14,5	-0,065	7,4
3	7,37	1,04	2,36	14,3	-0,061	7,6
5	7,20	1,02	2,35	13,4	-0,059	7,6
7	6,98	1,02	2,28	12,8	-0,056	7,7
10	6,64	1,01	2,19	12,3	-0,053	7,8
20	6,15	1,00	2,05	11,9	-0,051	7,8
30	5,80	1,00	1,93	11,7	-0,049	7,9
40	5,65	0,99	1,90	11,6	-0,048	8,0
60	5,60	1,00	1,87	11,3	-0,047	8,1

мент увеличения объема до 1,8-2,0%, причем постоянство объемной деформации в момент разрушения выполняется и при изменении температуры.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования в качестве фактора, ответственного за разрушение материала, величины объемной деформации. Физическая основа такого подхода наиболее полно отражает процессы, происходящие в материале, находящемся в поле механических напряжений. Процесс диффузионного разрушения — это разрыв внутренних связей, причем каждый акт разрыва физической или химической связи сигнализирует о случившемся увеличением объема. Использование объемной деформации в качестве измеряемой меры поврежденности материала, ответственной за разрушение и деформирование, имеет преимущества (несмотря на сложность измерения объемных деформаций) перед другими параметрами, например напряжением или деформацией, поскольку существуют ситуации, в которых, оперируя напряжением или деформацией (сдвиговой), мы не в состоянии дать физическую трактовку и объяснить причину разрушения в ряде случаев. Так, хорошо известно, что полимеры в процессе активного деформирования удлиняются на сотни процентов и в то же время в режиме ползучести разрушаются при удлинении в несколько процентов, т. е. постоянство ϵ_0 нарушается при изменении ϵ в широких пределах, а также при смене напряженного состояния (переход от растяжения к сжатию или кручению). Другой пример, наглядно иллюстрирующий второстепенную роль напряжения,— релаксационное разрушение материалов. В этом случае деформация образца остается постоянной, а напряжение непрерывно убывает во времени. Тем не менее по истечении некоторого отрезка времени происходит разрушение. Прямые измерения объемной деформации ПТФЭ в режиме релаксации напряжения при одноосном растяжении и сжатии (табл. 2) показали, что и в этом режиме испытаний происходит разрыхление материала во времени.

Количественная оценка степени разрыхления иллюстрируется временной зависимостью модулей объемной упругости.

Данные табл. 2 не подтверждают распространенной точки зрения о роли начальных напряжений, например в композитах, когда доказывается (в том числе и экспериментально), что эти напряжения убывают почти до нуля и, следовательно, об их существовании можно забыть. В действительности, убывающие во времени напряжения могут быть еще более опасными, поскольку они, релаксируя, совершают разрыхление материала.

Анализ полученных экспериментальных данных по объемной ползучести показал, что уравнение состояния, связывающее объемную деформацию в функции среднего напряжения может быть представлено в виде трех интегральных уравнений для подобластей L_1 , L_2 и L_3 . В области положительного среднего напряжения L_1 объемная ползучесть существенно нелинейна и отвечает уравнению наследственной вязкоупругости типа кубической теории [12]

$$\theta(\sigma_m, t) = \frac{1}{K} \left[\sigma_m(t) + \int_0^t \Pi_1(t-\tau) \sigma_m(\tau) d\tau \right] + b \int_0^t \Pi_3(t-\tau) \sigma_m^3(\tau) d\tau$$

Подобласть L_2 включает в себя область малых отрицательных напряжений (до 10–20 МПа). Здесь объемные деформации линейны в функции давления и по величине на порядок меньше, чем в подобласти L_1 . В подобласти L_2 изменение объема следует этому уравнению с удержанием только линейного слагаемого.

Подобласть L_3 находится в диапазоне высоких гидростатических давлений (от 20 до 250 МПа) и характерна как нелинейным поведением, так и тем, что здесь скорость объемной ползучести и величина неупругой деформации — убывающие функции среднего напряжения. Выше давления 250 МПа для ряда полимеров (ПТФЭ, ПММА, ПВХ, ПЭ высокой и низкой плотности, капролон, эпоксидные и полиэфирные смолы) объемная ползучесть ничтожно мала и находится за пределами существующих методов ее измерения [7]. Аналитическое представление объемной деформации в L_3 отвечает уравнению вязкоупругости, предложенному в работе [13]

$$K\theta = f_1(\sigma_m) \sigma_m + \int_0^t \Pi(t-\tau) f_2(\sigma_m) \sigma_m(\tau) d\tau$$

Полученные в настоящей работе результаты по объемной ползучести позволяют объяснить некоторые особенности ползучести при сдвиге. Так, хорошо известно, что экспериментальные точки на кривых ползучести в координатах интенсивность напряжений – время, полученные в опыте на кручение, располагаются ниже точек, полученных при растяжении, и выше, чем в опыте на одноосное сжатие. Причина указанного расхождения кривых ползучести не имеет в настоящее время объяснений с физических позиций. На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что такая причина кроется в неучете параллельно протекающих объемных деформаций. Увеличение объема полимера при растяжении ускоряет ползучесть при растяжении в сравнении с одноосным сжатием; наоборот, при сжатии (одноосном) объем полимера уменьшается и, как следствие, процесс ползучести в этом случае протекает менее интенсивно. Таким образом, результаты изучения роли объемной деформации в сдвиговой ползучести свидетельствуют о необходимости введения в традиционные уравнения наследственной вязкоупругости [13] первого инварианта тензора деформаций. Поскольку изменение объема непосредственно влияет на скорость ползучести, его следует ввести в ядро наследственного уравнения, которое применительно к нашему случаю запишется в виде

$$2G\varTheta_{ij} = S_{ij} + \int_0^t \Pi[(t-\tau), f_1(\theta)] f_2(\sigma_u, \sigma_m) S_{ij}(\tau) d\tau \quad (2)$$

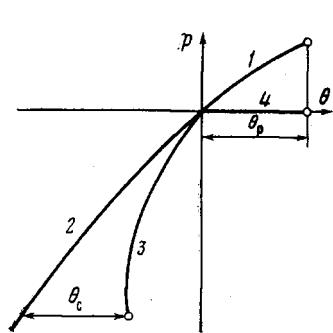


Рис. 6

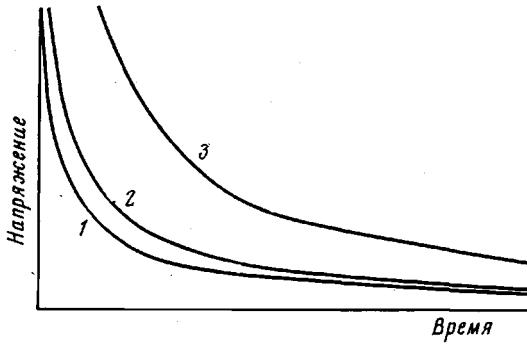


Рис. 7

Рис. 6. Влияние объемной деформации на разрушение полимеров: 1 – одноосное растяжение, 2 – гидростатическое сжатие, 3 – одноосное сжатие, 4 – сдвиг

Рис. 7. Кривые долговечности, рассчитанные по уравнению (5), при растяжении (1), сдвиге (2) и одноосном сжатии (3)

Наличие в ядре первого инварианта тензора деформаций $f_1=f(\theta)$ позволяет описать ползучесть при произвольном напряженном состоянии с учетом предыстории, определяемой объемной деформацией на текущий момент времени. Соотношение (2) будет описывать различные режимы деформирования материалов при любом виде напряженного состояния.

Представляя функцию f_1 в форме $f_1=A^{\alpha\theta}$ (A , α – коэффициенты, определяемые опытным путем), оказалось возможным описать ползучесть ряда полимеров при растяжении, сжатии и сдвиге (в том числе и под давлением) с помощью одного уравнения. Важное преимущество соотношения (2) – возможность его использования для предсказания ползучести на третьем участке, где ускоренный рост деформаций обусловлен разрывлением материала.

Переходя к рассмотрению роли объемной деформации на процесс разрушения, отметим, что устойчивое состояние полимера (отсутствие разрушения или проявление больших деформаций) под действием механических нагрузок находится в определенном соотношении с величиной удельного объема, т. е. устойчивое состояние первоначально изотропной полимерной среды нарушается, как только увеличение объема достигает некоторой величины по отношению к безопасному состоянию. Сказанное выполняется при трех простых деформациях, а именно: растяжении, сжатии и сдвиге. Схема проявления установленной закономерности показана на рис. 6 в координатах среднее напряжение – объемная деформация. При одноосном растяжении устойчивое состояние нарушается, как только увеличение объема достигнет величины θ_{kp} (кривая 1). В условиях одноосного сжатия критическая ситуация проявляется при кажущемся увеличении объема (см. рис. 3, кривые 2), однако постоянство увеличения объема в момент разрушения или течения выполняется и при сжатии, если отсчет увеличения объема вести от безопасного состояния, т. е. от изотермы сжатия, полученной при гидростатическом давлении.

В условиях сдвига разрушение происходит при нулевом среднем напряжении при увеличении объема до величины θ_{kp} (рис. 6, кривая 4).

Полученные результаты по изучению объемной деформации в функции среднего напряжения и интенсивности напряжений и их временные зависимости позволяют сформулировать условие длительной прочности при произвольном напряженном состоянии в следующем виде:

$$\theta_1(\sigma_m, T, t) + \theta_2(\sigma_u, T, t) = \theta_{kp} = \text{const} \quad (3)$$

Заменяя объемные деформации наследственными уравнениями, можно определить долговечность материала при произвольном напряженном состоянии, включая нестационарные режимы нагружения или деформирования. Рассмотрим условие длительной прочности (3) в предположении,

что изменение объема во времени отвечает простейшим зависимостям вида

$$\theta_1 = \sigma_m \left[B_1 + C_1 \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \right] \quad \theta_2 = \sigma_u \left[B_2 + C_2 \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \right] \quad (4)$$

Теперь, учитывая уравнения (3) и (4), получим выражение для времени до разрушения

$$\tau_p = t_0 \exp \left[\frac{\theta_{kp} - (B_1 \sigma_m + B_2 \sigma_u)}{C_1 \sigma_m + C_2 \sigma_u} \right] \quad (5)$$

Проведем качественное сопоставление долговечности при растяжении, сжатии и сдвиге, используя соотношение (5). При этом примем, что постоянные $B_1=B_2=C_1=C_2=1$. Связь между нормальным и касательным напряжениями примем в таком виде $\sigma=2\tau$. Основанием такой взаимосвязи служат экспериментальные данные по кратковременной прочности. При принятых допущениях кривые долговечности при растяжении и сдвиге, рассчитанные по уравнению (5), практически совпадают (рис. 7), что и наблюдали на опыте [14, 15]. Что касается одноосного сжатия, то здесь уровень напряжений по уравнению (5) должен быть в ~ 4 раза выше, чем при растяжении. Однако экспериментальных данных по длительной прочности при одноосном сжатии нет, известно только, что при одинаковых уровнях напряжений при растяжении и сжатии в последнем случае разрушения не наблюдали [14].

Таким образом, выполненные исследования позволяют сделать однозначный вывод о существенном влиянии объемной деформации на прочность и деформативность полимерных материалов. Путем измерения плотности материала, находящегося под нагрузкой, представляется возможным определить остаточный ресурс изделий.

Литература

1. Берлин А. А., Кефели Т. Я., Королев Г. В. Полиэфиракрилаты. М.: Наука, 1967, с. 276.
2. Айнбандер С. Б., Алксне К. И., Тюнина Э. Л., Лака М. Г. Свойства полимеров при высоких давлениях. М.: Химия, 1973, с. 190.
3. Ольховик О. Е. Высокомолек. соед. А, 1977, т. 19, № 1, с. 129.
4. Ольховик О. Е. Механика композитных материалов, 1979, № 4, с. 712.
5. Осипова Е. С., Михайлова З. В., Быкова Л. В., Коврига В. В. Механика полимеров, 1978, № 2, с. 236.
6. Ольховик О. Е. Высокомолек. соед. А, 1980, т. 22, № 3, с. 611.
7. Ольховик О. Е. Высокомолек. соед. А, 1976, т. 18, № 5, с. 1012.
8. Перепечко И. И. Акустические методы исследования полимеров. М.: Химия, 1973, с. 296.
9. Аскадский А. А. Деформация полимеров. М.: Химия, 1973, с. 448.
10. Виноградов Г. В., Малкин А. Я. Реология полимеров. М.: Химия, 1977, с. 440.
11. Маллейстер А. К., Тамуж В. П., Тетерс Г. А. Сопротивление жестких полимерных материалов. Рига: Зиннатне, 1972, с. 500.
12. Ильюшин А. А., Победря Б. Е. Основы математической теории вязкоупругости. М.: Наука, 1970, с. 280.
13. Москвитин В. В. Механика полимеров, 1969, № 6, с. 994.
14. Степанов В. А. Механика полимеров, 1975, № 1, с. 95.
15. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974, с. 560.

Институт высокомолекулярных
соединений АН СССР

Поступила в редакцию
14.VI.1981

EXPERIMENTAL STUDY OF VOLUME COMPLIANCE OF POLYMERIC SYSTEMS IN GLASSY STATE *Ov'khovik O. Ye., Baranov V. G.*

Summary

The volume strains of the range of polymers in conditions of uniaxial stretching, compression and hydrostatic pressure have been experimentally studied. The volume compliance at the positive average stress is shown to be almost one order higher than the analogous value at the all-directional compression. The fracture process depends only on the rupture of main chains and proceeds when the volume increase attains some definite value. The volume strain is the main source of the physical non-linearity of the creep process, and its introducing into hereditary equations of viscoelasticity permits to describe the non-stationary regimes of deformation (loading) in complicated stressed state.