

ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Том V

1963

№ 9

УДК 678.01:53

ТЕЧЕНИЕ И СЦЕПЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

C. B. Айнбinder, Э. Ф. Растрогина

Обычно считается, что пространственно-структурные полимеры неспособны к течению при деформации. Однако в работах Картина и его сотрудников [1] было показано, что при воздействии больших напряжений, в частности, мощного удара, имеет место «химическое течение» таких полимеров. Высокая интенсивность напряжений реально может быть достигнута в условиях сложного напряженного состояния всестороннего неравномерного сжатия.

В большинстве случаев детали машин работают в таких условиях. Поэтому изучение механических свойств полимерных материалов при этих видах напряженного состояния представляет существенный практический интерес.

Ниже приводятся результаты исследования течения и сцепления некоторых материалов в условиях неравномерного всестороннего сжатия.

Всестороннее неравномерное сжатие осуществляли с помощью металлических обойм (метод Грозина) [2]. Из исследуемого материала вытаскивали цилиндрические образцы, которые вставляли в металлические обоймы, имеющие форму цилиндра с внутренним диаметром, равным диаметру образца. Затем образцы вместе с обоймами сдавливали на гидравлическом прессе в 100 тонн. Снимали кривые зависимости силы сжатия от относительной деформации и определяли деформацию (относительное сжатие по высоте), при которой на образцах выявлялись первые трещины, заметные на поперечных разрезах. Опыты проводили при комнатной и при повышенных температурах.

Определяли также деформацию, при которой появляются трещины на образцах того же размера и формы, но деформированных без обойм.

Для и после сжатия проводили измерения микротвердости образцов при помощи прибора ПМТ-3 у торцов и по центральному поперечному сечению.

Опыты проводили с пластмассой АГ-4, карболитом К-17-2, монолитом М-1, полистиролом и аминопластом и др. Мы приводим для иллюстрации результаты, полученные для карболита и монолита. С остальными материалами получалась качественно аналогичная картина *.

В дальнейшем используются следующие обозначения: h_0 — исходная высота обоймы; h — высота обоймы после сжатия; h_1 — высота образца в обойме после сжатия; h_2 — высота образца после сжатия обоймы; d_0 — исходный диаметр образца; D_0 — исходный внешний диаметр обоймы; $\varepsilon\%$ — деформация обоймы (относительное сжатия по высоте); $\varepsilon_1\%$ — деформация образца, вычисленная по h_1 ; $\varepsilon_2\%$ — деформация образца, вычисленная по h_2 ; $\varepsilon_3\%$ — деформация образца, вычисленная по h_3 .

Из кривых рис. 1 видно, что образцы из карболита при сжатии без обойм разрушаются при деформациях порядка 9—10% без нагревания и порядка 14—15% с нагревом. При этом образцы разрушаются хрупко, сразу рассыпаясь на мелкие кусочки.

* В опытах принимала участие К. И. Алксне.

Из рис. 2 видно, что доля остаточной деформации при этом весьма незначительна (не более 3%).

На рис. 3 приведены кривые для образцов, деформированных в латунных обоймах. Опыты проводили при комнатных и повышенных температурах.

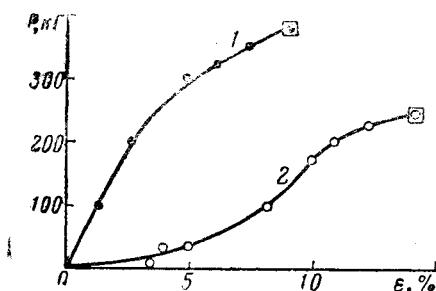


Рис. 1. Зависимость нагрузки (P) от деформации ($\varepsilon, \%$) для образцов из К-17-2 без обойм

$h_0 = 10 \text{ мм}$, $d_0 = 5 \text{ мм}$. 1— 20° , 2— 200° . В точке \square — разрушение образцов

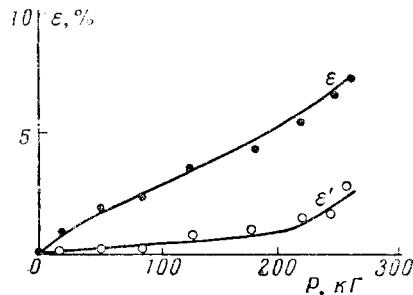


Рис. 2. Зависимость деформации от нагрузки (P) для образцов из М=1 без обойм

$h_0 = 8 \text{ мм}$, $d_0 = 4 \text{ мм}$, $t = 20^\circ$, ε — общая деформация, ε' — остаточная деформация

Как видно из рисунков, пластичность образцов при сжатии в обоймах резко возрастает. Удается деформировать карболит до 50% при комнатной температуре и до 70% при 200° . Монолит же был продеформирован без нагревания до 60% без каких-либо признаков начала разрушения. Нам не удалось провести исследований с обоймами различных диаметров и материалов ввиду того, что из имевшихся в нашем распоряжении материалов пригодной оказалась только латунь Л-62. Бронзовые обоймы разрушились при сжатии, а алюминиевые деформировались очень неравномерно.

В опытах были использованы обоймы максимального диаметра, при котором на прессе можно было получить необходимые деформации.

Ниже приведены результаты измерения микротвердости образцов из карболита до и после сжатия:

До деформирования . . .	—	—	среднее*	39 кГ/мм^2
После деформирования:				
вблизи торца . . .	37**	35		
	32	40	среднее	36 кГ/мм^2
	35	—		
в центре сечения . .	32	30		
	35	29	среднее	31 кГ/мм^2
	31	—		

* Среднее из 30—40 измерений. Каждая из цифр относится к одному образцу. Эти цифры — средние из 10—20 измерений.

Вид образцов после сжатия и снятия обоймы представлен на рис. 4.

После снятия нагрузки происходит частичное упругое восстановление образцов и поэтому высота обоймы и образца после снятия нагрузки значительно различаются.

$$\begin{array}{llllllllll} h_1 & \dots & 8,3 & 7,4 & 6,4 & 6,2 & 5,6 & 5,5 & 5,0 & 4,9 \\ h_2 & \dots & 9,2 & 9,0 & 8,1 & 7,5 & 6,8 & 6,7 & 6,3 & 6,2 \end{array}$$

Приложение. После того как образцы вынимают из обоймы, их длина еще увеличивается примерно на 0,1 мм.

Для того чтобы выяснить какова доля течения в общей деформации (без нагревания), были проведены следующие опыты: образцы высотой 20 мм и диаметром 5 мм сжимали в обоймах на 35%. После снятия обойм, измеряли высоту образцов (h_2). Затем их прогревали в течение 6—8 час.

при температуре 100° и снова измеряли высоту h_3 . Результаты приведены ниже ($h_0 = 20 \text{ мм}$, $h = 13 \text{ мм}$, $d_0 = 5 \text{ мм}$, $D = 20 \text{ мм}$):

№	...	1	2	3	4	5	6	7	Среднее
h_2	...	15,42	15,02	15,03	14,73	14,51	15,05	15,05	14,93
h_3	...	15,42	15,50	15,36	15,21	15,15	15,61	15,55	15,40

В наиболее деформированной части образцов появляются трещины, расположенные примерно по направлению максимальных касательных напряжений в условиях простого сжатия. Причиной появления этих трещин, по-видимому, является неодинаковая величина упругого возврата в различных сечениях образца.

Из приведенных экспериментальных данных следует, что механизм

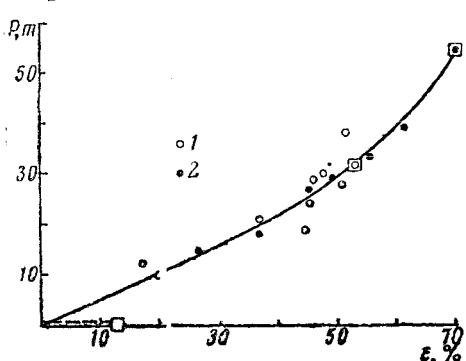


Рис. 3. Зависимость нагрузки (P) от деформации ($\varepsilon, \%$) для образцов из К-17-2 в латунной обойме (сплошная кривая)

$h_0 = 20 \text{ мм}$, $d_0 = 5 \text{ мм}$, $D_0 = 15 \text{ мм}$, 1 — 20° , 2 — 200° . Пунктир — образцы, деформированные без обоймы. В точке \square — разрушение образцов

деформации пространственно-структурных полимеров существенно зависит от характера напряженного состояния.

В условиях простого растяжения после некоторой упругой и вынужденной эластичной деформации появляются хрупкие трещины, которые, быстро развиваясь, ведут к разрушению образца.

При напряженном состоянии простого сжатия развитие трещин более затруднено и величина возможной деформации увеличивается по сравнению с растяжением. Картина существенно изменяется при наличии всестороннего неравномерного сжатия при близких значениях σ_1 и σ_2 . В этом случае силы, препятствующие раскрытию и распространению трещин, велики и можно добиться большего течения.

Процесс течения при этом можно представить себе следующим образом.

В процессе деформации происходит разрушение химических связей, что, вообще говоря, должно повести к ослаблению прочности образца. Однако наличие всестороннего сжатия создает обстоятельства, благоприятные для возникновения новых связей в процессе дальнейшего скольжения, тем более, что в плоскости скольжения имеется большое количество химических активных концов оборванных цепей, образовавшихся в результате разрушения связей.

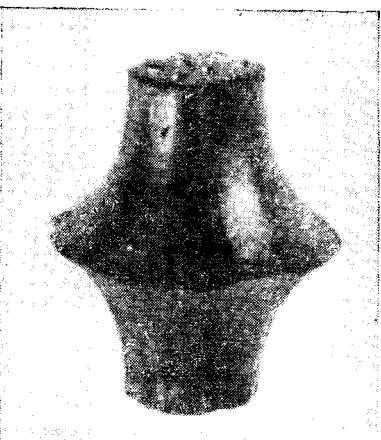


Рис. 4. Вид образцов после сжатия и снятия обоймы

Таким образом, процесс течения можно представить как процесс возникновения некоторых зародышевых трещин и их залечивания в результате действия сжимающих сил. При пластическом течении металлов имеет место аналогичная картина. Однако там (для случая пластичных металлов) залечивание облегчается отсутствием направленности связей. По-

видимому, всякий процесс течения можно представить как борьбу двух тенденций. Одна тенденция — это возникновение трещин микро- и макроскопического масштаба вследствие то ли вида напряженного состояния (растяжения), то ли каких-либо неоднородностей структуры, ведущих к появлению перенапряжений в данных точках и образованию микротрещин. Другая тенденция — это тенденция к залечиванию трещин под действием внешних сил, сжимающих тело, а при достаточном сближении поверхностей трещин — и внутренних сил взаимодействия между поверхностями.

Из сказанного следует, что, если тело при сложно-напряженном состоянии становится пластичным и может существенно деформироваться без разрушения, то следовательно, отдельные куски тела при совместном течении должны сцепляться.

Действительно, границу между этими телами можно рассматривать как некоторую внутреннюю границу, по которой происходит скольжение, и если в сплошном теле не происходит разрушения, то между отдельными кусками должно возникать сцепление.

Для проверки этого положения были проведены следующие эксперименты: 2 образца из карбонита К-17-2 ($\sigma_{B,сж} \sim 1600 \text{ кГ/см}^2$, $\sigma_B \sim 300-450 \text{ кГ/см}^2$ и монолита М-1 $\sigma_{B,сж} \sim 1500 \text{ кГ/см}^2$, $\sigma_B = 300 \text{ кГ/см}^2$), выточенных в виде цилиндриков высотой, равной половине высоты обоймы, закладывали в латунную обойму. Торцы образцов тщательно шабрили обезжирен-

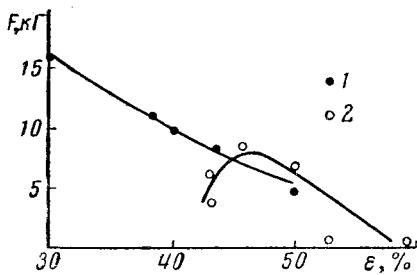


Рис. 5

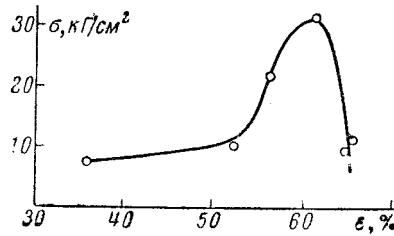


Рис. 6

Рис. 5. Зависимость сопротивления разрушению (F , кг) образцов из К-17-2 от деформации (ϵ , %)

1 — целые образцы; 2 — сваренные; $h_0 = 20 \text{ мм}$, $D_0 = 20 \text{ мм}$, $d_0 = 5 \text{ мм}$, $t = 20^\circ$

Рис. 6. Зависимость прочности сваренных образцов из М-1 от деформации

ным шабром, затем производили сжатие образцов вместе с обоймой на гидравлическом прессе в 100 тонн. После сжатия обоймы распиливали, образцы освобождали, определяли прочность возникшего соединения и изучали поперечные разрезы образцов. Прочность сцепления определяли следующим образом.

В образцах вблизи торцов просверливали отверстия в направлении, перпендикулярном их общей оси. В эти отверстия вставляли стальные проволочки, при помощи которых растягивали образцы.

Для сравнения была снята кривая зависимости прочности целых образцов (имеющих диаметр, равный диаметру свариваемых образцов, а высоту, равную высоте обоймы), деформированных по аналогичной схеме. Результаты опытов приведены на рис. 5 и 6; $h_0 = 20 \text{ мм}$, $d_0 = 5 \text{ мм}$, $D_0 = 20 \text{ мм}$. Как следует из этих кривых, между образцами возникает значительное сцепление. Удельная прочность при этом оказывается значительно меньше прочности в исходном состоянии, но ненамного меньше прочности целого образца, деформированного до той же величины.

Следовательно, меньшее значение прочности по сравнению с недеформированным образцом обусловлено не малостью сил сцепления, а общим ослаблением образца в результате деформации.

Обсуждение результатов

Механизм возникновения сцепления при контакте металлов [4] или термоупругих материалов [5] в силу отсутствия направленности связей физически довольно ясен.

Если на поверхности нет загрязняющих пленок, препятствующих проявлению междуатомных сил сцепления, то оно, по-видимому, возникает спонтанно при любой взаимной ориентации поверхностей. Сохранение сцепления после снятия прижимающей нагрузки определяется механическими свойствами контактирующих тел и геометрией поверхности [3, 6].

Иная картина имеет место при сцеплении тел с валентными связями, где прочные связи в отдельных точках контактирующих поверхностей могут возникать лишь при определенном пространственном расположении и ориентации активных участков цепей. В условиях простого напряженного состояния, например, простого сжатия двух тел, нарушение связей неизбежно должно повести при дальнейшем деформировании к немедленному разрушению тела, ибо как только в какой-либо точке разрывается сильная химическая связь и остаются лишь слабые ван-дер-ваальсовские силы, образовавшаяся «микрополость» увеличивается в результате действия неизбежно появляющихся внутренних напряжений. При совместном деформировании в условиях неравномерного всестороннего сжатия восстановление связей (или образование их) становится возможным в силу того, что внешние силы препятствуют развитию «микрополости» и при деформировании возможно возникновение новых связей.

Таким образом, при создании соответствующих условий возможно возникновение сцепления не только между телами с неподвижными связями, но и между телами с существенно направленными связями.

Этот результат имеет принципиальное значение для объяснения явлений, имеющих место при сухом трении тел с направленными связями, в том числе и структурированных полимеров. Действительно, в процессе сухого трения твердых полимеров имеет место совместная эластическая и пластическая деформации контактирующих неровностей поверхностей и, следовательно, также возникает адгезия между поверхностями в зонах контакта. Таким образом, при сухом трении полимеров, так же как и при сухом трении металлов в определенных условиях силы адгезии могутнести серьезный вклад в величину силы трения. Вместе с тем явление сцепления пространственно-структурных полимеров показывает, что направленность связей не имеет принципиального значения для возникновения сцепления между телами при их достаточном сближении. Возможность деформирования пространственно-структурных полимеров при сложном напряженном состоянии может быть использована в технологических процессах изготовления деталей из этих материалов. При этом следует, однако, учесть существенный упругий возврат, а также некоторое разупрочнение в процессе деформации. Возможно, что в дальнейшем будут установлены пути повышения прочности соединения давлением пространственно-структурных материалов.

Выводы

1. Пластичность пространственно-структурных полимерных материалов в условиях сложно-напряженного состояния неравномерного всестороннего сжатия резко возрастает. При этом прочность материала падает в силу появления внутренних дефектов в процессе деформирования. Увеличение температуры, при которой производится деформирование, ведет к повышению пластичности.

2. В условиях сложно-напряженного состояния неравномерного всестороннего сжатия возможно сцепление между двумя совместно деформируемыми кусками пространственно-структурированных полимерных материалов. При этом прочность сцепления порядка прочности целого образца, деформированного до такой же величины.

3. Предлагается гипотеза, которая объясняет явление химического течения пространственно-структурированных материалов возможностью залечивания большинства дефектов, возникающих в процессе течения, в результате наличия всестороннего сжатия.

4. Из проведенных опытов следует, что в процессе трения пространственно-структурированных материалов также возможно возникновение сцепления, схватывания, и, следовательно, и в этом случае трение может быть в значительной степени обусловлено процессами адгезии.

Институт автоматики
и механики АН Латвийской ССР

Поступила в редакцию
12 III 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Каргин, Т. И. Соголова, Г. Л. Слонимский, Е. В. Резцова, Ж. физ. химии 30, 1903, 1956.
2. Б. Д. Грозин, Механические свойства закаленной стали, Машгиз, 1951.
3. С. Б. Айбиндер, Э. Ф. Клокова, Ж. техн. физики, 25, 2356, 1955.
4. Э. Ф. Клокова, Диссертация. Рига, 1960.
5. С. С. Вуюцкий, Аутогезия и адгезия высокополимеров, М., 1960.
6. С. Б. Айбиндер, Холодная сварка металлов, Рига, 1957.

FLOW AND COHESION OF SPATIALLY STRUCTURIZED POLYMERIC MATERIALS

S. B. Ainbinder, E. F. Rastrigina

Summary

The results of a study of the flow and cohesion of spatially structurized polymers under composite stress conditions due to non-uniform all-sided compression have been presented. It has been shown that under such conditions a sharp increase in plasticity takes place and cohesion occurs between separate mutually compressed pieces.