

# ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Том VI

1964

№ 3

УДК 678.02:5

## МЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЛИМЕРОВ, ВКЛЮЧАЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ РАЗРУШЕНИЯ

B. P. Регель

Известно, что для описания деформационных свойств полимеров и других твердых тел часто используются реологические модели, включающие комбинации из упругих и вязких элементов [1]. Подобный метод описания деформационных свойств твердых тел игнорирует тот факт, что в теле наряду с деформированием развивается также и разрушение. Между тем имеется достаточное количество экспериментальных фактов, указывающих на то, что в полимерах при приложении нагрузки развиваются не только деформационные процессы, но также и процессы разрушения [2—8]. Возникает вопрос, имеется ли между процессами течения и разрушения взаимосвязь и следует ли при описании закономерностей деформирования учитывать влияние на них процессов разрушения. В работе [9] экспериментально показано, что такую взаимосвязь следует учитывать, по крайней мере, для случая ориентированных полимеров. Ясно, что и для других материалов вопрос о взаимосвязи между течением и разрушением должен решаться прежде всего экспериментально. Однако наряду с этим полезно разработать и соответствующие модельные представления, вначале хотя бы даже весьма грубые. Правильные механические модели полимеров, отражающие наряду с их деформационными характеристиками также и прочностные, позволяют пояснить существующие взгляды о взаимосвязи между течением и разрушением и уточнить модельные методы описания деформационных свойств.

Первая попытка ввести в формальную модель полимера, помимо обычных упругих и вязких элементов, некоторый новый элемент (элемент разрушения), который отражал бы тот факт, что наряду с деформацией в теле развиваются и процессы разрушения, была сделана в работе [9]. В настоящей работе более подробно рассмотрена возможность введения в реологические модели твердых тел элементов разрушения для пояснения и количественного учета связи между процессами течения и разрушения.

Рассмотрим примеры наиболее простых моделей, включающих элементы разрушения, и определим, какими свойствами должны обладать тела, моделируемые таким образом.

Пусть элемент разрушения представляет собой набор гибких нерастяжимых нитей различной длины, закрепленных между двумя параллельными пластинками (рис. 1). Деформирование такого элемента не требует усилий до тех пор, пока не натягнется какая-либо из нитей. Дальнейшее деформирование элемента невозможно, пока не разорвется натянутая нить. Распределение нитей в элементе по длинам и по прочностям может быть самым различным. Прочность нитей можно характеризовать либо

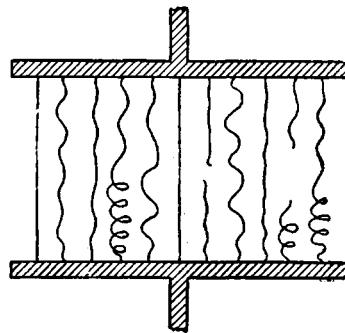


Рис. 1. Модель элемента разрушения, состоящего из набора гибких нерастяжимых нитей различной длины

разрывным напряжением, не зависящим от времени действия, либо учесть временную зависимость прочности [5].

Примем условно, что разрыв всех нитей в элементе разрушения соответствует разрыву моделируемого тела. Если в модели включено параллельно несколько элементов разрушения, то разрыву моделируемого тела соответствует разрыв нитей во всех элементах.

На рис. 2 приведены примеры включения элементов разрушения в известные реологические модели. Качественное рассмотрение показывает, что свойства моделей существенно изменяются от включения в них элементов разрушения. Легко видеть, например, как изменяются свойства

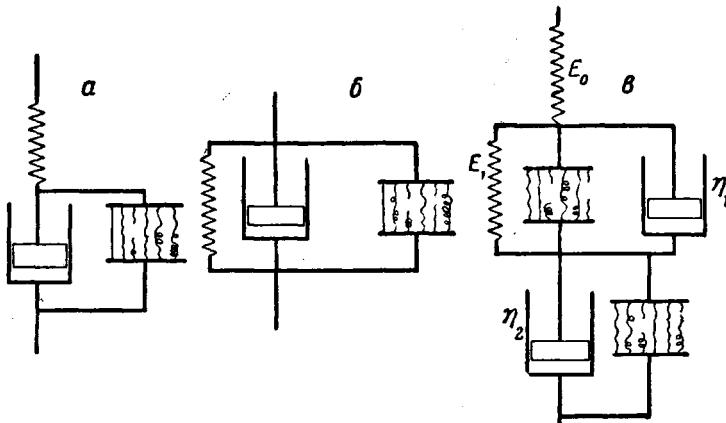


Рис. 2. Известные реологические модели с включенными в них элементами разрушения

максвелловской модели (рис. 2, а) при включении в нее элемента разрушения параллельно вязкому элементу. При наличии элемента разрушения максвелловская модель может описывать такое явление, как упрочнение, а также позволяет объяснить появление пределов текучести. При этом, если прочностные свойства нитей элемента разрушения характеризуются критическим напряжением, то зависимость предела текучести от скорости деформирования будет существенно отличаться от случая, когда для нитей принимается временная зависимость прочности.

Конкретные свойства модели зависят от вида функции распределения нитей в элементе по длинам и напряжениям. Если эта функция задана, то свойства модели оказываются вполне определенными, поддающимися количественным расчетам. Для примера можно привести уравнение для максвелловской модели с включенным в нее элементом разрушения. Введем для этого в рассмотрение функцию  $\theta(x)$ , которая обладает свойством:  $\theta(x) = 1$  при  $x > 0$ ;  $\theta(x) = 0$  при  $x < 0$ . Уравнение, описывающее деформационные и прочностные свойства модели, можно написать в виде:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \left[ \theta(\varepsilon_1 - \varepsilon) + \sum_{i=1}^N \theta(\varepsilon - \varepsilon_i) \cdot \theta(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon) \cdot \theta(\sigma - \sigma_i) \right] \quad (1)$$

для случая, когда после разрыва  $i$ -й нити  $\sigma$  не спадает ниже значения  $\sigma_i$  в интервале деформаций от  $\varepsilon_i$  до  $\varepsilon_{i+1}$ .

В приведенном уравнении  $\varepsilon$  и  $\sigma$  — деформация и напряжение,  $t$  — время,  $E$  — модуль упругости,  $\eta$  — вязкость,  $\sigma_i$  — прочность  $i$ -й нити,  $\varepsilon_i$  — деформация, при которой  $i$ -ая нить оказывается натянутой,  $N$  — общее число нитей в элементе разрушения.

В случае, если после разрыва нити в интервале деформаций от  $\varepsilon_i$  до  $\varepsilon_{i+1}$  напряжение  $\sigma$  спадает ниже  $\sigma_i$ , уравнение (1) несколько усложняется.

В общем случае функция распределения нитей в элементе разрушения  $\sigma_i(\varepsilon_i)$  должна быть прерывной. Однако при достаточно большом  $N$  и монотонном изменении  $\varepsilon_i$  и  $\sigma_i$  функция  $\sigma_i(\varepsilon_i)$  может быть аппроксимирована некоторой непрерывной функцией. В этом случае суммирование в уравнении может быть заменено интегрированием, что в конечном счете может его существенно упростить.

В данной заметке поставлена цель пока только качественного рассмотрения свойств моделей, включающих элементы разрушения. Поэтому ограничимся примером приведенного уравнения, не рассматривая его более подробно и не занимаясь выводом уравнений для других вариантов моделей. Приведенного примера достаточно, чтобы показать, что свойства моделей с элементами разрушения могут быть в общем случае описаны и математически.

Качественное рассмотрение показывает, что уже максвелловская модель с включенным в нее элементом разрушения позволяет характеризовать различные точки зрения по вопросу о взаимосвязи между процессами течения и разрушения. Так, вопрос о том, при каких условиях процессы разрушения могут лимитировать процессы деформирования, сводится в модельном представлении к вопросу о виде функции распределения  $\sigma_i(\varepsilon_i)$ . Если в исходном состоянии все нити в элементе свернуты в клубки, то процессы разрушения не оказывают никакого влияния на деформирования в начальной стадии. Только после того как нити натянутся, т. е. в конечной стадии, условия их разрушения будут определять собой условия дальнейшего деформирования. Если же часть нитей натянута еще в исходном состоянии, то процессы разрушения оказывают влияние на закономерности деформирования сразу с момента нагружения.

Пользуясь подобной моделью, можно пояснить также сущность различий по вопросу о том, что является определяющим во взаимосвязи между процессами деформирования и разрушения.

Можно утверждать, что во взаимосвязи между течением и разрушением ведущим является процесс течения, так как пластическое деформирование ведет к натяжению нитей и этим подготавливает их разрушение. Однако такое утверждение, вообще говоря, не является единствено правильным, так как можно с одинаковым успехом поддерживать и обратную точку зрения. Можно утверждать, что во взаимосвязи между течением и разрушением ведущим является процесс разрушения, так как в натянутом состоянии нити препятствуют деформированию системы. Пока не произойдет разрыв, дальнейшее деформирование невозможно. На основании данной модели видно, что в общем случае нельзя отдать предпочтение какому-либо из указанных утверждений. Правильнее говорить о взаимной зависимости процессов течения и разрушения, не ставя вопрос о том, какой из процессов является ведущим. Это общее свойство модели не исключает возможности существования частных случаев, когда роль вязких элементов будет фактически определяющей и, наоборот, когда условия разрыва нитей в элементе разрушения практически определяют свойства модели.

Из сказанного следует, что несмотря на грубость рассматриваемой модели она позволяет достаточно четко отразить возможные точки зрения на вопрос о взаимосвязи между разрушением и течением.

Рассмотрим теперь в качестве дополнения формальные модели, в которых элементы разрушения состоят из набора таких же, как ранее, гибких нерастяжимых нитей, но включенных между двумя параллельными пластинами не жестко, как ранее, а через соответствующие вязкие элементы (рис. 3). При помощи подобных комбинированных элементов разрушения легко моделировать явление упрочнения при деформировании, например, при ориентации полимеров. Легко объяснить также увеличение хрупкости при понижении температуры или при увеличении скорости деформирования.

Действительно, если деформирование подобных элементов производить медленно, то напряжения на вязких элементах будут ниже соответствующих прочностей нитей. Натянутые нити будут вызывать деформирование вязких элементов, вследствие чего постепенно будут натягиваться и другие нити, которые раньше имели «слабину». В результате будет входить в строй все большее число параллельно включенных вязких элементов, что соответствует упрочнению системы. Понижение температуры или

увеличение скорости деформирования для такой модели должно вести к преимущественному разрушению нитей, т. е. к «охрупчиванию» моделируемого тела.

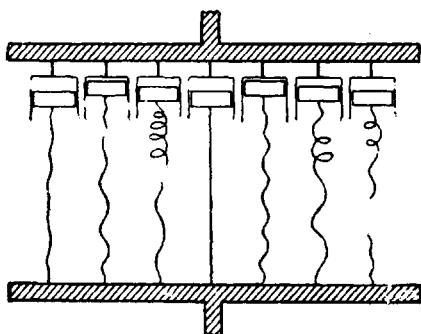


Рис. 3. Модель комбинированного элемента разрушения, в котором гибкие нерастяжимые нити включены последовательно с вязкими элементами

воздействовать на вязкие элементы (рис. 3). В этом случае после определенной деформации поршни будут выходить из цилиндров, что может моделировать единичные акты вязкого разрушения. Можно предложить другие пути сближения свойств реальных тел и моделей; однако в данной заметке мы ограничимся приведенными примерами.

Применимость предлагаемых в настоящей заметке моделей для описания свойств реальных тел удобнее всего проверить на примере сопоставления свойств моделей со свойствами полимерных материалов. Известно, что при помощи формальных моделей удается отразить наличие трех типов деформации в полимерах: упругой, высокоэластической и пластической. При этом упругим и вязким элементам, включенным в модель, придается определенный физический смысл. Так, пружина с модулем  $E_0$  в модели, изображенной на рис. 2, *в*, моделирует упругость полимера, связанную с изменениями взаимных расстояний между атомами или с изменениями валентных углов в макромолекулах. Вторая пружина с модулем  $E_1$  моделирует энтропийную упругость, а включенный параллельно с ней вязкий элемент  $\eta_1$  — микровязкость, определяющую сопротивление среды вращениям и перемещениям сегментов молекул. Наконец, второй вязкий элемент  $\eta_2$  моделирует возможность пластического проскальзывания макромолекул относительно друг друга. Аналогично этому, элементу разрушения в модели, описывающей свойства полимера, также можно приписать определенный физический смысл. Разрыв отдельных нитей в элементе разрушения может в случае полимеров моделировать разрыв химических связей в отдельных макромолекулах или «в пачке» молекул. Вытягивание поршней из цилиндров в комбинированном элементе разрушения может моделировать процесс вытягивания макромолекул или взаимного перемещения пачек. Разрыв всех нитей в элементе разрушения, как уже говорилось, моделирует окончательное разрушение образца. Включение комбинированного элемента разрушения в модель Алфрея (рис. 2, *в*), вместо вязкого элемента  $\eta_2$ , означает, что необратимая деформация в полимерах возможна практически только в комбинации с разрушением отдельных химических связей, т. е. возможно только так называемое «химическое», а не обычное течение полимеров [10].

Таким образом, модель с элементами разрушения более полно отражает механические свойства полимеров, чем простые реологические модели. При этом элементам разрушения, как и другим элементам модели, можно приписать определенный физический смысл. Введение элементов разрушения особенно необходимо для более правильного описания деформационных свойств ориентированных полимеров, а также армированных пластиков. Попытки описать деформационные свойства таких ориентированных полимеров, как текстильные волокна, без учета влияния процесса разрушения, т. е. без включения в реологические модели элементов разрушения, вероятнее всего, обречены на неудачу. Об этом свидетельствуют результаты работы [9].

Приведенные в настоящей работе примеры показывают, что модели с элементами разрушения позволяют моделировать многие свойства твердых тел, которые не описываются реологическими моделями. Подбор соответствующих моделей, аппроксимирующих свойства твердых тел с различной структурой, может способствовать дальнейшему развитию представлений о взаимодействии процессов разрушения и деформирования в твердых телах.

Сближение свойств реальных тел и моделей необходимо для разработки современных методов количественного описания деформационных и прочностных свойств твердых тел, которые можно было бы положить в основу практических расчетов при решении инженерных задач механики. Практические расчеты, основанные на современных представлениях о физике процессов разрушения и деформирования, должны дать несомненные преимущества по сравнению с расчетами, которые в настоящее время зачастую ведутся на основе неверных исходных предположений о закономерностях процессов деформирования и разрушения.

### Выводы

Предлагается для модельного описания механических свойств твердых тел, в особенности полимеров, включать в обычные реологические модели дополнительно некоторые новые элементы, отражающие тот факт, что в теле под действием напряжения наряду с деформированием развивается также и процесс разрушения. Обсуждаются преимущества моделей, включающих элементы разрушения по сравнению с простыми реологическими моделями.

Физико-технический  
институт АН СССР

Поступила в редакцию  
21 I 1963

### ЛИТЕРАТУРА

1. Т. Алфрей, Механические свойства высокополимеров. Изд. ИНИ, М., 1957.
2. В. Р. Регель, Ж. техн. физики, 21, 287, 1951.
3. В. Р. Регель, Ю. Н. Недошивин, Ж. техн. физики, 23, 1333, 1953.
4. С. Н. Журков, Б. Н. Нарзуллаев, Ж. техн. физики, 23, 1677, 1953.
5. С. Н. Журков, Вестн. АН СССР, 1957, № 11, 78.
6. С. Н. Журков, С. А. Абасов, Высокомолек. соед., 3, 441, 1961.
7. С. Н. Журков, С. А. Абасов, Высокомолек. соед., 3, 450, 1961.
8. С. Н. Журков, С. А. Абасов, Высокомолек. соед., 4, 1703, 1962.
9. В. Р. Регель, Н. Н. Черный, Высокомолек. соед., 5, 925, 1963.
10. В. А. Каргин, Т. И. Соголова, Ж. физ. химии, 31, 1328, 1957.

### MECHANICAL MODELS OF POLYMERS CONTAINING BREAKDOWN ELEMENTS

*V. R. Regel*

Summary

For describing the mechanical properties of solids particularly polymers by means of models it is suggested that the ordinary rheological models be supplied with new supplementary elements reflecting the circumstance that under the action of stresses, besides deformation, breakdown processes also occur. The advantages of such models that include the breakdown elements over the simple rheological models are discussed.