

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕЗИН ПРИ БОЛЬШИХ СКОРОСТЯХ РАСТЯЖЕНИЯ

*С. Н. Журков, Т. П. Санфирова, Э. Е. Томашевский*

В настоящей статье сообщаются результаты исследования механических свойств эластичных материалов, полученные на специально созданной установке [1], позволяющей производить осциллографическую регистрацию диаграмм растяжения при быстром деформировании. Были проведены испытания ряда резин из натурального и синтетических каучуков. Растяжение образцов осуществляли при помощи вращающегося маховика. Усилия измеряли малоинерционным емкостным динамометром, датчиком деформации служил реохорд со скользящим контактом. Электрические сигналы от датчиков подавались на усилители вертикального и горизонтального отклонения осциллографа. Полученное на экране изображение, представлявшее диаграмму растяжения в координатах: растягивающее усилие — удлинение, фотографировали на пленку.

Образцы для испытаний имели форму двойной лопатки с длиной однородной части в 24 мм при площади поперечного сечения около 3  $\text{мм}^2$ . Опыты проводили при комнатной температуре в широком интервале скоростей растяжения от 0,2 см/сек до 31 м/сек, чему соответствуют скорости относительного удлинения от 7% в секунду до  $1,3 \cdot 10^6$  % в секунду. Были испытаны как наполненные, так и незагруженные резины на основе следующих каучуков: натурального (н. к.), кок-сагыза, бутадиенстирольного, хлорбутадиенового и нитрильного. Кроме того, были проведены опыты с пластифицированным поливинилхлоридом.

Диаграммы растяжения резин для ряда скоростей растяжения, полученные в результате обработки осцилограмм, представлены на рис. 1, а — е. На рис. 2 для сравнения показана диаграмма напряжений пластифицированного поливинилхлорида. На графиках по оси ординат отложено условное напряжение, рассчитанное на начальное сечение, по оси абсцисс — истинная деформация однородной части образца. Конечные значения удлинения при разрыве и прочности даны усредненными из 3—4 испытаний. Как видно из приведенных графиков, с изменением скорости растяжения механические характеристики резин претерпевают существенные изменения, зависящие от наполнителя и природы каучука.

Диаграммы растяжения при изменении скорости деформирования сохраняют свою форму. С повышением скорости увеличивается модуль резин и одновременно наблюдается изменение разрывного напряжения и прочности.

Зависимость предельной деформации (деформация в момент разрыва) от скорости растяжения представлена на рис. 3, а и б. В случае резин, наполненных сажей (рис. 3, а), наблюдается общая тенденция к уменьшению предельной деформации с увеличением скорости растяжения. Предельная деформация незагруженных резин зависит от скорости более сложным образом (рис. 3, б). Скорость деформирования оказывает значительное влияние на прочность материала. Изменение прочности, выраженной как в условных  $\sigma$ , так и истинных значениях  $S$  разрывного напряжения, показано графически на рис. 4, а, б, в.

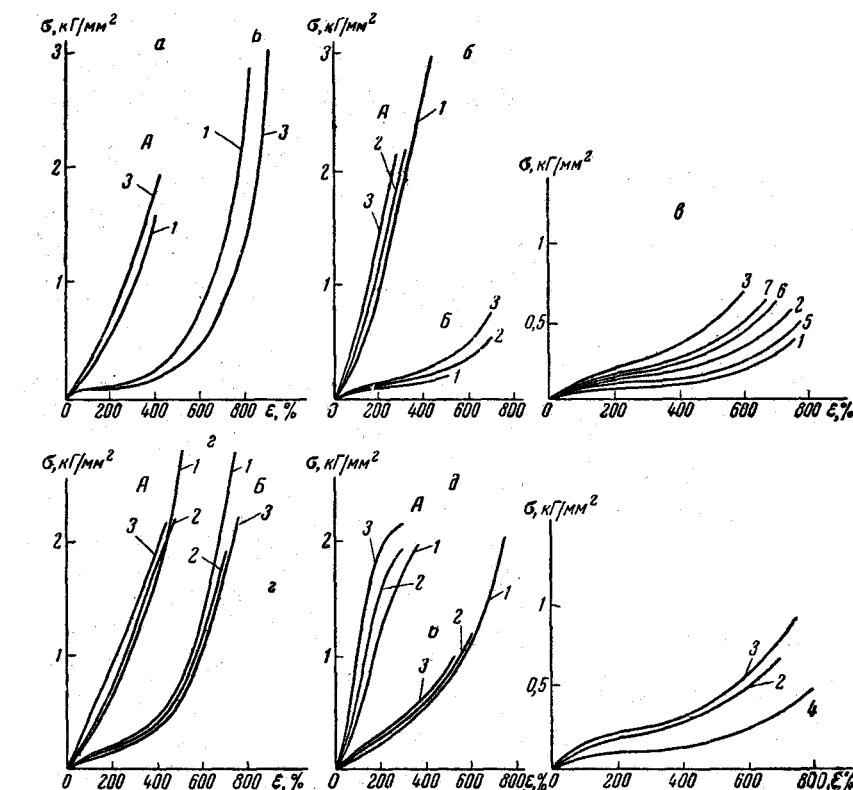


Рис. 1

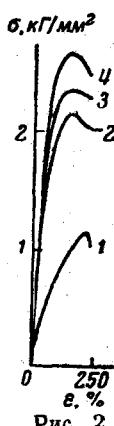


Рис. 2

Рис. 1. Диаграммы напряжений при разных скоростях растяжения для резин: а — НК; б — СКС-30; в — СКС-30 АК; г — резина из кок-сажы; д — резина из хлоропренового каучука; е — резина из нитрильного каучука. А — с сажей; Б — без сажи.

Скорости растяжения: 1 — 7; 2 —  $1 \cdot 10^4$ ; 3 —  $1.3 \cdot 10^5$ ; 4 — 70; 5 —  $7 \cdot 10^4$ ; 6 —  $2.5 \cdot 10^5$ ; 7 —  $6 \cdot 10^4$  %/сек.

Рис. 2. Диаграммы напряжений при разных скоростях растяжения для поливинилхлорида.

Скорости растяжения: 1 — 7; 2 —  $2.5 \cdot 10^4$ ; 3 —  $6 \cdot 10^4$ ; 4 —  $1 \cdot 10^5$  %/сек.

Рис. 3. Зависимость предельной деформации от скорости растяжения для резин, наполненных сажей (а) и ненаполненных (б).

а: 1 — СКС-30; 2 — НК; 3 — кок-сажы; 4 — хлоропрен. б: 1 — НК; 2 — хлоропрен; 3 — нитрильный; 4 — кок-сажы; 5 — СКС-30; 6 — СКС-30 АК

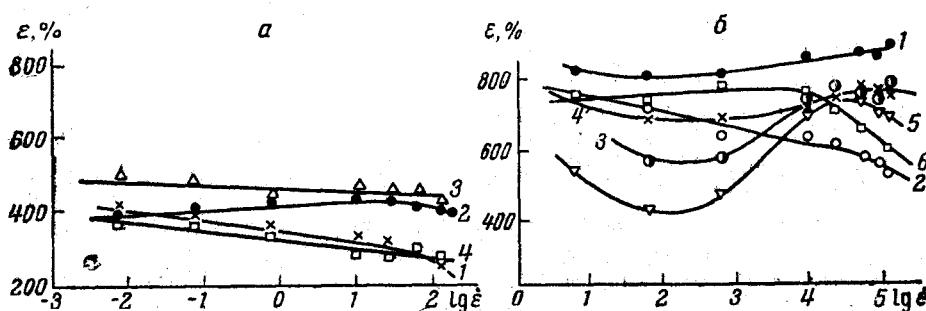


Рис. 3

Для незагруженных резин из некристаллизующихся каучуков прочность закономерно возрастает с увеличением скорости растяжения (рис. 4, а). Прочность кристаллизующихся незагруженных резин вначале падает при повышении скорости растяжения, проходит через широкий минимум, а затем начинает увеличиваться (рис. 4, б). Аналогичный характер изменения прочности резин наблюдался в работе [2]. Введение активных наполнителей влияет на значение прочности и характер ее изменения от скорости (рис. 4, в).

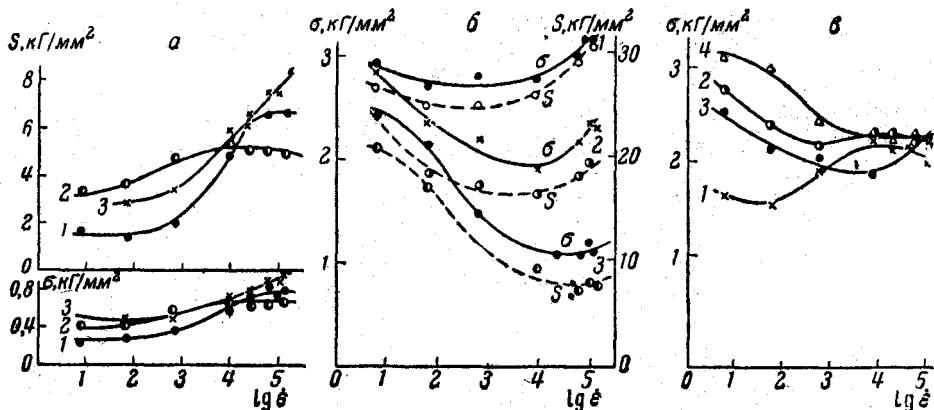


Рис. 4. Зависимость прочности от скорости растяжения некристаллизующихся незагруженных резин (а), кристаллизующихся незагруженных резин (б), резин, наполненных сажей (в).

а: 1 — СКС-30; 2 — СКС-30 АК; 3 — нитрильный.  
б: 1 — НК; 2 — кок-сагаз; 3 — хлоропрен. в: 1 — НК; 2 — кок-сагаз; 3 — хлоропрен; 4 — СКС-30

При трактовке результатов измерения прочности в скоростном режиме следует иметь в виду временной характер процесса разрушения. Хорошо известно из исследований временной зависимости прочности твердых тел, в том числе и резин [3, 4, 5], что время разрыва (долговечность) материала уменьшается с увеличением напряжения. При испытании на разрывной машине локальные нарушения сплошности, непрерывно происходящие под действием возрастающего напряжения, постепенно накапливаются и образец разрывается при таком значении напряжения, которому соответствует долговечность, сравнимая с длительностью опыта. Изменение скорости растяжения приводит к изменению длительности действия напряжений, в связи с чем соответственно изменяется и наблюдаемое значение прочности. Учет временного характера разрушения [6] показывает, что при испытании в скоростном режиме прочность должна возрастать с увеличением скорости нагружения.

Обнаруженное в работе падение прочности ряда резин при увеличении скорости является с этой точки зрения неожиданным и может быть объяснено изменениями структуры материалов в процессе деформирования, в частности кристаллизацией резин. Известно, что для кристаллизации резины при растяжении требуется определенное время порядка 1–2 сек. [7]. При быстром деформировании вследствие недостатка времени процесс кристаллизации не успевает развиться и материал обладает меньшей прочностью по сравнению с образцами, растяжение которых производится медленно.

В связи с этим представлялось интересным провести измерения в области весьма малых скоростей деформирования, где предполагалось, что прочность кристаллизующихся резин пройдет через максимум. Такой эффект можно было ожидать благодаря одновременному повышению прочности за счет кристаллизации и падению ее в результате действия временного фактора при длительном испытании. Опыты были проделаны

на резине из хлорбутадиенового каучука. Медленное нагружение осуществлялось струей воды, протекавшей через капилляр. Таким путем были получены скорости растяжения от 10 до  $10^{-4}$  % в секунду. Результаты этих опытов показаны на рис. 5. При малых скоростях растяжения прочность резины действительно растет с увеличением скорости. При скорости 10% в секунду прочность достигает максимума, затем падает, и при скоростях выше  $10^4$  %/сек. начинает снова возрастать.

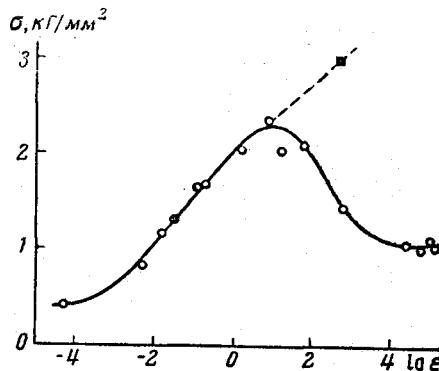


Рис. 5

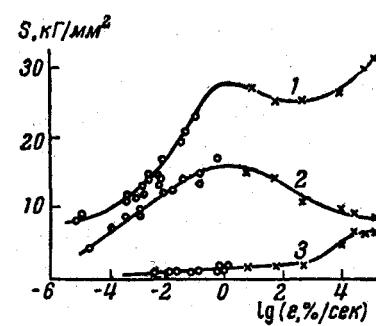


Рис. 6

Рис. 5. Прочность резины из хлоропренового каучука в широком интервале скоростей растяжения.

■ — для предварительно вытянутых образцов

Рис. 6. Прочность резин в широком интервале скоростей растяжения:

1 — НК; 2 — СКС-30 с сажей; 3 — СКС-30 без сажи

Характер изменения прочности со скоростью деформирования соответствует предсказанию временной зависимости прочности материала с непостоянной структурой. Всю кривую можно разделить на три области: 1) область медленного растяжения, в которой изменение прочности обусловливается временной зависимостью закристаллизованной резины; 2) переходную область, в которой наблюдается аномальный характер изменения прочности вследствие недостатка времени для кристаллизации, и 3) область высоких скоростей, где прочностные характеристики определяются временной зависимостью некристаллизующейся резины.

На рис. 5 помещены также данные, полученные при испытании в усложненном режиме. Несколько образцов вначале растягивались медленно вплоть до значения напряжения в  $2 \text{ кг/мм}^2$ , а затем скорость деформации была увеличена на 3 порядка. Оказалось, что прочность предварительно вытянутой резины почти в 2 раза выше, чем обычно при данной скорости растяжения. Этот опыт подчеркивает, что причиной отступления от нормального хода временной зависимости прочности резин являются структурные изменения материала, вызванные кристаллизацией.

Результаты измерения прочности на скоростной установке были также сопоставлены (см. рис. 6) с данными по временной зависимости тех же резин [3], пересчитанными согласно [6] на режим нагружения с постоянной скоростью растяжения. Опытным значениям долговечности ( $10 - 10^6$  сек.) соответствуют по прочности медленные скорости растяжения ( $\tau \approx 1/\alpha \cdot \dot{\epsilon}$ ), лежащие в диапазоне от 1 до  $10^{-5}$  сек. Объединение результатов измерений в различных режимах нагружения дает, таким образом, представление о характере изменения прочности резин в широком временном диапазоне, охватывающем 10 порядков величины.

Как видно из рис. 6, прочность незагруженной резины из натурального каучука в широком интервале скоростей растяжения меняется так-

же, как для резины из хлорбутадиенового каучука (рис. 5), что связано с кристаллизацией. Прочность некристаллизующейся незагруженной резины СКС-30 во всем диапазоне скоростей постепенно возрастает, причем в области больших скоростей этот рост идет быстрее. Загруженная резина СКС-30 значительно прочнее незагруженной при медленном растяжении, тогда как в области больших скоростей ее прочность мало отличается от прочности незагруженной резины. Интересно отметить, что в случае резины СКС-30, загруженной сажей, наблюдается такой же максимум прочности, как и для кристаллизующихся резин. Это показывает, что взаимодействие наполнителя с каучуком является сложным процессом, существенно зависящим от скорости деформирования.

Данные, приведенные на рис. 5 и 6, демонстрируют временной характер разрушения резин в широком диапазоне скоростей растяжения и то влияние, которое могут оказывать на прочностные характеристики процессы межмолекулярной перестройки, требующие определенного времени для своего завершения. Полученные в работе результаты показывают также, насколько необходимо и важно с инженерной точки зрения проведение механических испытаний в большом временном диапазоне.

### Выводы

1. Механические свойства резин в диапазоне больших скоростей растяжения претерпевают существенные изменения, зависящие от природы каучука.

2. Показано, что различие в характере зависимости прочности от скорости некристаллизующихся, кристаллизующихся и загруженных резин вызвано изменениями структуры материалов в процессе растяжения.

Физико-технический институт  
АН СССР

Поступила в редакцию  
7 II 1961

### ЛИТЕРАТУРА

1. С. Н. Журков, Э. Е. Томашевский, Т. П. Санфирова, Ж. техн. физики, 23, 933, 1953.
2. D. S. Villars, J. Appl. Phys., 21, 565, 1950.
3. С. Н. Журков, Б. Н. Нарзуллаев, Ж. техн. физики, 23, 1677, 1953.
4. Г. М. Бартенев, С. В. Бурков, Ж. техн. физики, 26, 2558, 1956.
5. Г. М. Бартенев, Л. С. Брюханова, Ж. техн. физики, 28, 287, 1958
6. С. Н. Журков, Э. Е. Томашевский, Некоторые проблемы прочности твердого тела. Сб. статей, стр. 68, Изд. АН СССР, 1959.
7. M. E. Acken, W. E. Singer, W. P. Davey, Industr. and Engng Chem. 24, 54, 1932.

### MECHANICAL PROPERTIES OF RUBBER AT HIGH STRETCHING VELOCITIES

S. N. Zhurkov, T. P. Sanfirova, E. E. Tomashevskii

#### Summary

The results of an investigation on the mechanical properties of natural and synthetic rubbers over a large range of stretching rates (from 1 to  $10^5$  and in a number of cases from  $10^{-5}$  to  $10^6$  %/sec) have been presented. The change in strength with change in stretching rate due to the time factor is determined by the ability of rubber to undergo crystallization and upon the addition of fillers. Unfilled, non-crystallizing rubbers increase their strength with increase in stretching rate; the strength of crystallizing and of filled rubbers increases at low stretching rates, but then falls, increasing again at high rates. The change in character of the strength relation of the rubbers is associated with change in structure of the material during the stretching process.