

Г. М. БАРТЕНЕВ

О МЕХАНИЗМЕ РАЗРЫВА РЕЗИНЫ

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 27 III 1952)

1. Как показывает опыт, необходимо различать два вида разрыва резины: хрупкий и высокоэластический. При низких температурах, в застеклованном состоянии, разрыв резины принципиально ничем не отличается от разрыва хрупких аморфных тел и, в частности, пластиков (¹, ²). В отличие от пластиков, изучение хрупкого разрыва резины не представляет практического интереса. Основным техническим свойством резины является ее высокоэластичность. Переход резины в хрупкое состояние делает ее при низких температурах в большинстве случаев технически непригодным материалом.

Высокоэластический разрыв резины уже по внешним признакам отличается от хрупкого тем, что разрыву предшествует большая деформация, связанная с ориентацией и выпрямлением цепных молекул. Но вместе с тем разрыв резины во многом сходен с хрупким разрывом. Например, сечение образца до и после разрыва в обоих случаях остается неизменным. Установлено (³), что прочность резины носит статистический характер, аналогичный хрупким телам, что прочность ее, подобно хрупким телам, зависит от размеров образца и времени действия нагрузки. Однако механизм высокоэластического разрыва резины, как будет показано ниже, отличается от механизма хрупкого разрыва. До настоящего времени изучению влияния кристаллизации и наполнения на прочность уделялось больше внимания, нежели самому явлению разрыва резины. В данной работе для изучения механизма разрыва резины применена некристаллизующаяся и ненаполненная резина по следующим соображениям: 1) изучение более сложных систем затрудняет выяснение принципиальной стороны явления; 2) применение материала, представляющего собой почти чистый полимер, позволит в известной мере обобщить результаты на ряд некристаллизующихся полимеров.

2. Исследуемая резина* приготовлялась в виде пластин толщиной 6—8 мм, из которых штанцевым ножом вырубались образцы и подвергались испытанию на разрыв при различных статических нагрузениях. Продолжительность действия разрывной нагрузки зависела как от величины нагрузки, так и от индивидуальных свойств образца и варьировалось от долей секунды (быстрый разрыв) до часов, дней и недель (медленный разрыв).

На рис. 1 показан образец перед разрывом и после разрыва. В растянутом состоянии перед разрывом поверхность образца окрашивается в молочный цвет, исчезающий после разрыва и сокращения образца до первоначальных размеров. Поверхность разрыва, как правило, расположена нормально к растягивающим усилиям.

На рис. 2 (см. вклейку) приведены фотографии поверхностей разрыва образцов с указанием продолжительности действия нагрузки и разрыв-

* Состав: каучук бутадиенстирольный (СКС-30) 100, сера 3, окись цинка 5, стеариновая кислота 2, меркаптобензотиазол 1 вес. ч.; вулканизация в прессе при 143°.

ного напряжения, рассчитанного на начальное сечение. Быстрый разрыв (обр. 1) дает гладкую, зеркальную поверхность разрыва*, хорошо отражающую свет и напоминающую внешним видом шлиф металла с мелкозернистой структурой. Разрывы 5-минутный и более длительные образуют рельефную, покрытую линиями сколов зеркальную зону и обнаруживают существование шероховатой зоны разрыва, плохо отражающей свет.



Рис. 1. Фотографии образца перед разрывом и после разрыва

Чем длительнее происходит разрыв, тем четче вырисовывается и дальше распространяется шероховатая зона разрыва. Фронт распространения этой зоны представляет собой полуокружность, если ее начало лежит на поверхности, и окружность, если ее начало лежит внутри образца.

Нами установлено, что шероховатая зона является медленной, а зеркальная — быстрой стадией разрыва. Начальной стадией разрыва является медленная, а конечной — быстрая стадия разрыва. Это непосредственно следует из опыта с образцом, имевшим надрез (обр. 13). Любопытно, что характер чередования стадий для высокоэластического разрыва резины противоположен тому, что наблюдается при хрупком разрыве. При хрупком разрыве начальной, медленной стадией является зеркальная, а конечной, быстрой — шероховатая зона разрыва.

Медленная стадия разрыва всегда возникает и распространяется из некоторого центра. Вопрос о том, возникают ли центры разрыва из имеющихся в резине микроскопических надрывов (трещин) или каким-либо другим путем, разъясняют следующие два факта: 1) значительная доля центров разрыва (примерно 40% из массовых наблюдений) приходится на внутреннюю часть образца; 2) вырубка образцов хорошо заточенным штанцевым ножом не снижает прочности по сравнению с образцами той же конфигурации и размеров, полученными непосредственно в прессформе. Следовательно, в противоположность хрупким телам и, в том числе, пластикам, механическая обработка резины не создает на ее поверхности заметных дефектов, снижающих прочность.

Все это указывает на то, что готовых надрывов или трещинок в высокоэластическом материале нет, и центры разрыва возникают другим путем, всего вероятнее, путем появления в нагруженном образце надрывов в механически наиболее слабых местах (неоднородности, включения, пустоты, местные перенапряжения и т. д.).

Таким образом, разрыв резины происходит последовательно, начиная с образования центра разрыва, затем постепенного развития медленной стадии, завершаясь стадией быстрого разрыва.

3. Стадия быстрого разрыва характеризуется большой скоростью распространения фронта разрыва. Вероятно, эта скорость близка к скоро-

* Серые размытые блики на этой фотографии объясняются наличием светотени в тех местах, где имеет место плавное отклонение от идеальной плоской поверхности разрыва.

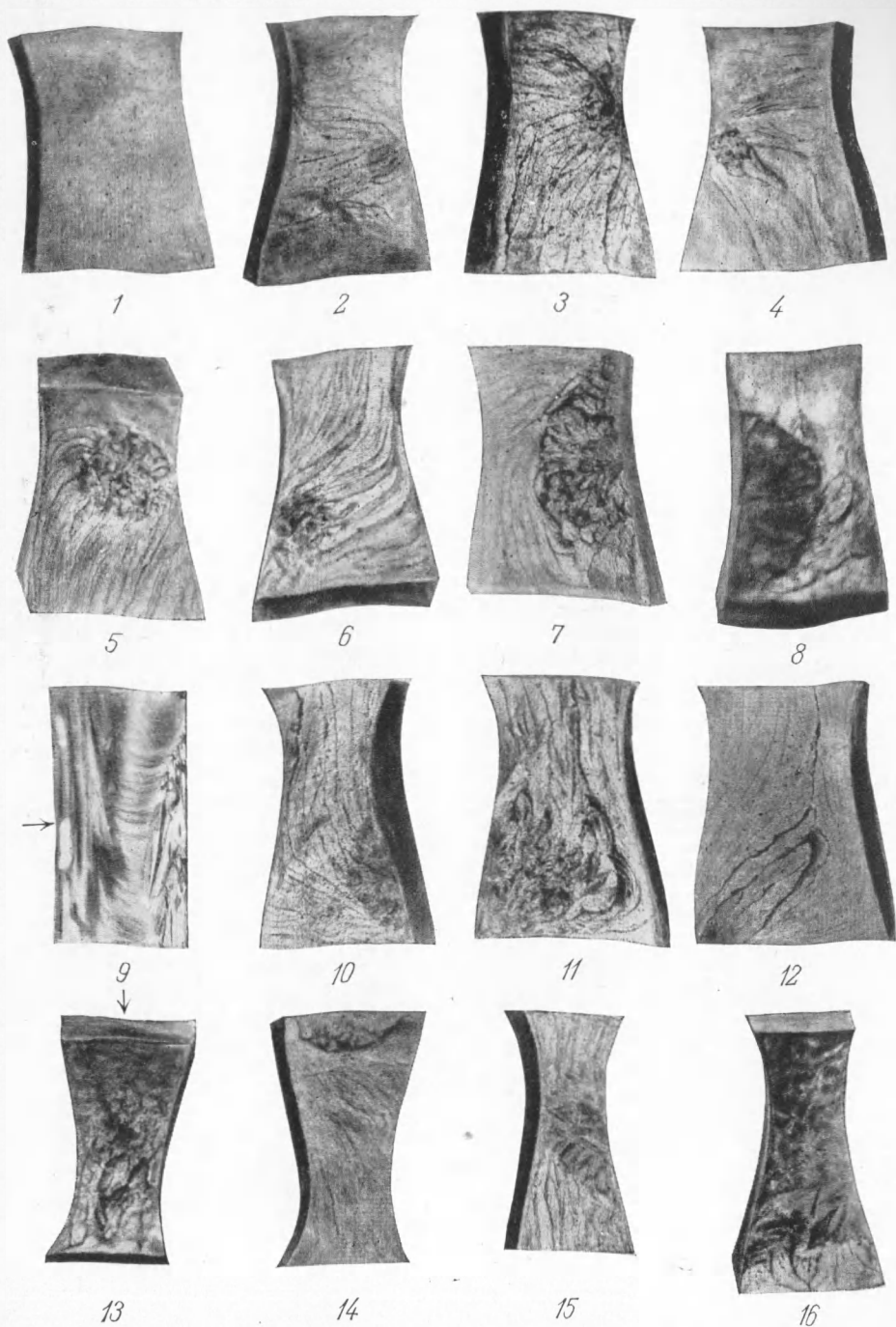


Рис. 2. Фотографии поверхностей разрыва резины. 1 — быстрый разрыв; 2 — продолжительность действия нагрузки 5 мин., нагрузка, отнесенная к начальному сечению; 14 кг/см²; 3—6 мин., 13,5 кг/см²; 4—10 мин., 13,0 кг/см²; 5—1 час, 16,5 кг/см²; 6—1,5 часа, 16,0 кг/см²; 7—22 часа, 9,5 кг/см²; 8—144 часа, 8,8 кг/см²; 9 — поверхность разрыва кварцевого стекла (шероховатая зона справа); 10—93 часа, 8,2 кг/см²; 11—94 часа, 12 кг/см²; 12—70 час., 9,5 кг/см²; 13 — образец с надрезом (вверху); 14—30 мин., 17,0 кг/см²; 15—26 час., 16 кг/см²; 16—920 час., 9,5 кг/см². Образцы №№ 1—4, 7, 8, 10, 12 из резины состава, указанного в сноске. Остальные образцы изготавливались из резины, в которой окись цинка и стеариновая кислота были заменены 2 вес. частями стеарата цинка

сти звука в резине (~ 30 м/сек). Эта стадия разрыва дает зеркальную зону, покрытую многочисленными линиями сколов, подобно поверхностям разрыва пластиков (^{1, 2}). Линии сколов похожи на кривые второго порядка, но, в отличие от пластиков, вершины гипербол, парабол и дуг не обращены в сторону центра разрыва. Для объяснения этого необходимо дальнейшее более глубокое изучение явления.

Наличие зеркальной поверхности и линий сколов у второй зоны говорит о том, что распространение фронта разрыва в этой зоне происходит путем прямого разрыва химических связей. Поэтому быстрая стадия разрыва в резине принципиально не отличается от медленной стадии разрыва хрупких тел. Различие в скоростях разрыва, повидимому, несущественно: во-первых, сравнительно большая скорость распространения фронта разрыва у резины компенсируется большой, по сравнению с хрупкими телами, скоростью релаксации напряжений в ней; во-вторых, скорость распространения упругого импульса в резине примерно в 100 раз меньше, чем в хрупких телах.

Специфическим для высокоэластического разрыва является наличие шероховатой зоны, соответствующей медленной (а не быстрой, как в случае хрупких тел) стадии разрыва. Механизм образования шероховатой зоны у резины совершенно иной, нежели у хрупких тел. Фотографии (рис. 3 а и б) показывают вид сверху и сбоку на медленно растущий надрыв в образце резины под действием разрывных усилий. Совершенно отчетливо видна волокнистая структура медленной стадии разрыва. Можно наблюдать, как отдельные «волокна» растягиваются и рвутся. Несомненно, что это те самые молекулярные пучки, которые наблюдаются при хрупком разрушении растянутого и замороженного каучука (⁵) или при разрыве предварительно растянутых в нагретом состоянии пластиков (²). Разрыв каждого отдельного «волокна» происходит в самых различных местах его. Это приводит к образованию после разрыва и сокращения «волокон» бугорков и впадинок, которые в совокупности образуют шероховатую поверхность. Растущий надрыв в растянутой резине по внешнему виду напоминает вмятину (рис. 3 б). Вершина надрыва в растянутой резине, в отличие от вершины трещины в хрупком теле, имеет плавное закругление, что было предсказано в работе А. В. Степанова (⁴). Поэтому концентрации напряжений у вершины надрыва в резине гораздо меньше, чем у вершины трещины в хрупком теле. На рис. 3 в приведена фотография поляризационной картины вокруг растущего надрыва в образце из прозрачной резины. Фотография показывает наличие концентраций напряжения у вершины надрыва. Когда концентрации напряжений достигают величины, равной прочности химических связей, разрыв переходит в свою быструю стадию.

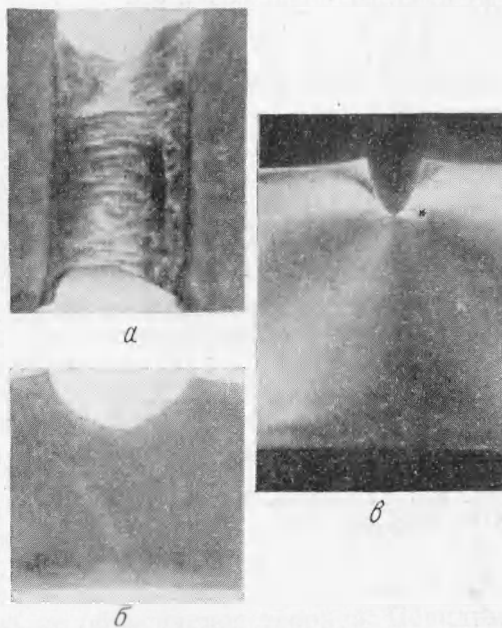


Рис. 3. Фотографии медленно растущего надрыва в первой стадии разрыва резины. а — вид сверху, б — вид сбоку, в — поляризационная картина вокруг растущего надрыва

4. Высокоэластический разрыв резины начинается, таким образом, с образования центра разрыва, из которого распространяется зона медленной стадии разрыва, перерастающая при достижении критического напряжения в зону быстрого разрыва. Чем меньше нагрузка, тем длительнее процесс разрыва и тем большую площадь поверхности разрыва занимает первая зона. При быстром разрыве она может исчезнуть совсем. В отличие от хрупкого разрыва, первая зона у высокоэластического разрыва имеет шероховатую поверхность, а вторая — зеркальную. Медленная стадия разрыва в резине характеризуется своеобразным «волоконистым» механизмом разрыва, специфичным только для линейных высокополимеров.

Указанные особенности высокоэластического разрыва резины, повидимому, могут быть перенесены на другие некристаллизующиеся вплоть до разрыва полимеры в тех случаях, когда пластическим течением за время разрыва можно пренебречь.

Установленный механизм разрыва резины имеет значение для правильного понимания разрушения резины в эксплуатации. Изделия и детали из резины подвергаются в эксплуатации длительным постоянным или переменным нагрузкам до тех пор, пока не наступает разрушение. При этом разрушение начинается с образования медленной стадии разрыва, определяющей частично или полностью весь процесс разрушения. В этом смысле обычные испытания резины на разрыв не отражают истинной картины разрушения изделия в эксплуатации.

Научно-исследовательский институт
резиновой промышленности

Поступило
20 III 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. П. Александров, Вестн. АН СССР, № 7/8, 51 (1944). ² В. Р. Регель, ЖТФ, 21, 287 (1951). ³ Г. М. Бартнев, ДАН, 82, 49 (1952).
⁴ А. В. Степанов, ЖЭТФ, 19, 973 (1949). ⁵ Б. А. Догадкин, Учение о каучуке, 1938, стр. 219.