

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРЫВА ТКАНЕВЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

*В. Е. Гуль, И. М. Чернин, Е. Э. Заборовская,  
Э. П. Донцова, В. Ю. Гвильдис*

В предыдущих сообщениях [1] было показано, что при одинаковых условиях деформации процессы разрушения полимеров, отличающихся химическим строением и интенсивностью межмолекулярного взаимодействия, протекают отлично друг от друга. Было показано также [2], что один и тот же полимер в зависимости от условий испытания (температура, скорость деформации) может разрушаться с предварительным образованием поверхности повышенных значений напряжения, расположенной перпендикулярно направлению растяжения, или с предварительной деформацией цепных молекул и образованием высокоориентированного материала с тяжами, направленными вдоль оси растяжения. Возможны также переходы от этих крайне отличных процессов разрыва. В области перехода от одного вида разрушения к другому имеют место аномальные скоростные и температурные зависимости прочности [3]. В случае стеклопластиков, представляющих собой гетерогенные системы, которые состоят из полимерного связующего и стекловолокнистого наполнителя, прочность и характер разрыва будет зависеть от строения и свойств обеих фаз, т. е. стеклонаполнителя и связующего, и от характера взаимодействия этих фаз друг с другом на границе их раздела.

Целью настоящей работы было выяснение влияния свойств связующего вещества на прочность и характер разрыва тканевых стеклопластиков.

Испытания проводили на разрывной машине ИМ-12А; скорость деформации образцов была равна 16 мм/мин. Образцы вырезали из больших кусков стеклопластика вдоль утка с соблюдением стандартных размеров и формы (двусторонняя лопатка).

В качестве объектов исследования были выбраны многослойные стеклопластики, состоящие из стеклотканей сатинового или полотняного плетения и связующих: эпоксифенольного, эпоксифенольно-каучукового, эпоксикремнийорганического, эпоксидного, эпоксиполиэфирмалеиннатного, эпокси полиэфиракрилатного и полиэфирмалеиннатного. Плоские образцы стеклопластиков на основе эпоксифенольного, эпокси-фенольно-каучукового и эпоксикремнийорганического связующих были изготовлены прессованием под давлением. Образцы на всех остальных связующих изготавливали методом контактного формования.

Для более полного описания процесса разрыва образцов определяли не только зависимость напряжение — деформация  $\sigma = f(\varepsilon)$ , но и сам процесс разрушения фотографировали на пленку скоростной кинокамерой СКС-1 со скоростью 1500 кадров/сек. Освещение образцов осуществляли двумя трехкиловаттными кинопроекторами. Кроме того, образцы после разрушения фотографировали с увеличением в двух проекциях.

Для фиксирования места разрушения при киносъемке прямолинейную часть разрываемого образца ослабляли неглубоким надрезом. Разрывную прочность определяли с учетом этого надреза, т. е. по ослабленному сечению.

Характер разрушения стеклопластиков с эпоксифенольным и эпокси-фенольно-каучуковым связующими (рис. 1 и 2) напоминает характер

разрушения однородного хрупкого материала [1, 2]. Слои стеклоткани работают одновременно. Перед разрушением расслаивания не происходит (рис. 1, а и в и рис. 2, а и в). Эти стеклопластики показали наибольшую прочность  $\sigma = 1600 \pm 50 \text{ кГ/см}^2$ .

Иначе происходит разрушение стеклопластиков с эпоксицремнийорганическим связующим (рис. 3). Отдельные слои стеклоткани работают у этих стеклопластиков неодновременно. При рассмотрении скоростной кинограммы (рис. 3, а) не видно разделенного на две части образца, хотя приведена та часть кинограммы, которой соответствует полное падение нагрузки. Эти стеклопластики обладают большим разбросом прочности:  $\sigma = 1250 \pm 100 \text{ кГ/см}^2$ .

Характер разрушения стеклопластиков с эпоксидным связующим (рис. 4) несколько отличается от характера разрушения стеклопластиков со связующими эпоксифенольным и эпоксифенольно-каучуковым. При разрыве образцов с эпоксидным связующим происходит незначительное расслаивание образцов (рис. 4, а, б, в), что может быть объяснено менее совершенной технологией изготовления этих стеклопластиков (метод контактного формования). Прочность этих образцов не уступает прочности эпоксифенольных стеклопластиков  $\sigma = 1550 \pm 50 \text{ кГ/см}^2$ . Стеклопластики на основе всех остальных связующих, изготовленные методом контактного формования, имеют меньшую разрывную прочность, чем стеклопластики на основе эпоксидного связующего. Чем ниже механическая прочность стеклопластиков на разрыв, тем в большей степени характер разрушения этих стеклопластиков отличается от характера разрушения стеклопластиков на основе эпоксидного связующего. Стеклопластики на основе эпоксиполиэфирмалеинатного связующего разрушаются с неодновременной работой отдельных слоев стеклоткани.

Наибольшую неодновременность работы отдельных слоев стеклоткани показали стеклопластики с полиэфирмалеинатным и эпоксиполиэфир-акрилатным связующими (рис. 5). На скоростной кинограмме (рис. 5, а) хорошо виден процесс расслаивания, который сопровождается увеличением толщины образца. После того как образцы практически переставали сопротивляться деформирующей нагрузке, они все еще не были разделены на две части. Проходило довольно много времени работы машины (до 1 мин. и более), пока образцы разделялись на две части. В это время происходило растаскивание двух половинок образцов, отдельные слои которых были разрушены в разных местах, несмотря на то, что образец был ослаблен надрезом в одном месте. Разброс прочности стеклопластиков с эпоксиполиэфиракрилатным связующим также значителен:  $\sigma = 650 \pm 100 \text{ кГ/см}^2$ ; прочность этих образцов мала.

Из рассмотрения фотографий широких сторон разорванных образцов (рис. 1—5) можно сделать следующий вывод: чем меньше прочность стеклопластика и чем больше неодновременность работы отдельных слоев, тем большую роль в разрушении стеклопластиков играют касательные напряжения.

При растяжении небольшие касательные напряжения  $\tau_{\max}$  действуют под углом  $45^\circ$  к направлению растяжения. Они, как известно, равны половине нормальных напряжений  $\sigma$  (рис. 6).

Если стеклопластик работает как монолит, то касательные напряжения не являются причиной разрушения. При расслоении стеклопластика касательные напряжения разрушают отдельные слои. Многослойный стеклопластик, работающий как монолит, дает хрупкое разрушение (рис. 1). Разрыв прорастает под углом  $90^\circ$  к направлению растяжения. Стеклопластик с нарушенной связью между слоями не дает хрупкого разрушения (рис. 5).

Направление разрушения отдельных слоев составляет угол  $\sim 45^\circ$  к оси растяжения. Таким образом, в зависимости от химического строения полимерного связующего процесс разрушения стеклопластика мо-

жет проходить, по-видимому, или при согласованном противодействии обоих компонентов (связующего и стеклоткани) разрушению, или же по стадийному разрушению компонентов. В первом случае достаточно большое значение адгезии компонентов друг к другу должно обеспечить большую прочность образца.

Действительно, несмотря на то, что плоские образцы стеклопластиков на основе эпоксидного связующего были изготовлены по менее совершен-

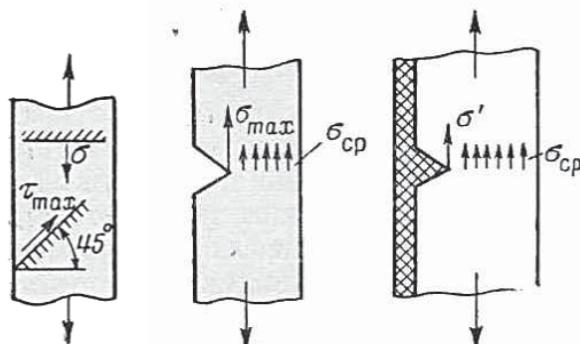


Рис. 6

Рис. 7

Рис. 6. Схема действия нормальных и наибольших касательных напряжений при растяжении  $\tau_{\max} = \sigma/2$

Рис. 7. Схема «заличивания» микродефектов стекла связующим

ному методу (контактное формование), прочность их примерно одинакова с прочностью стеклопластиков на основе эпоксиленольного связующего из-за большей адгезии эпоксидных смол к стеклу.

При изучении деформируемости и прочности образцов стеклопластиков и различных связующих было замечено, что стеклопластики с различными связующими имеют различную прочность и различные относительные удлинения в момент разрыва.

Величины прочности стеклоткани и отверждённого связующего не суммируются в изделии; прочность изделия выше, чем сумма прочностей стеклоткани и связующего. Происходит это, по-видимому, потому, что связующее, проникая в микродефекты поверхности стекла, уменьшает их ослабляющее действие, способствуя выравниванию напряжений (рис. 7):  $(\sigma' - \sigma_{\text{средн}}) < (\sigma_{\max} - \sigma_{\text{средн}})$ , в результате чего происходит более одновременное разрушение слоев стеклоткани.

Недавно было обнаружено [4], что процесс адгезии полимеров к стеклу связан с диффузией или затеканием макромолекул полимера в микротрешины или в микропоры поверхности стекла.

В некоторых случаях связь между полимером и стеклом в такого рода дефектах устанавливается столь прочная, что при отслаивании полимера от стекла полимер частично остается в стекле так, что даже в случаях типичного адгезионного разрушения можно обнаружить с помощью электронного микроскопа частично когезионный характер разрушения. В таких случаях должно иметь место «заличение» микродефектов.

Характеристики прочности стеклопластиков связаны со способностью стеклопластиков и связующих к деформированию. Чем меньше разница

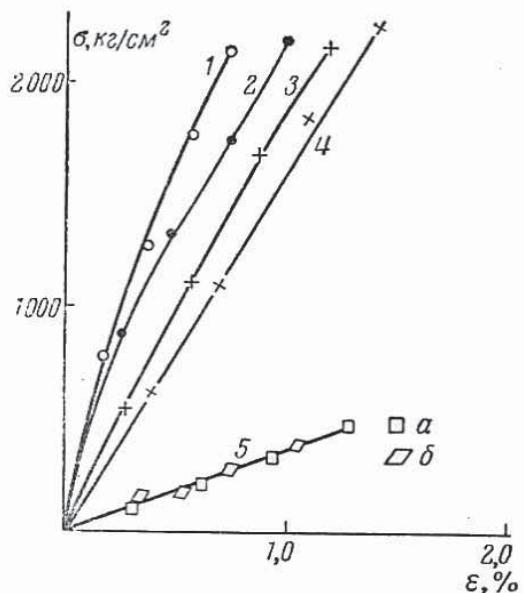


Рис. 8. Зависимости напряжение — деформация для стеклопластиков на эпоксидачукуловом связующем и для самого связующего:

1—4 — стеклотекстолит; 5 а, б — смола

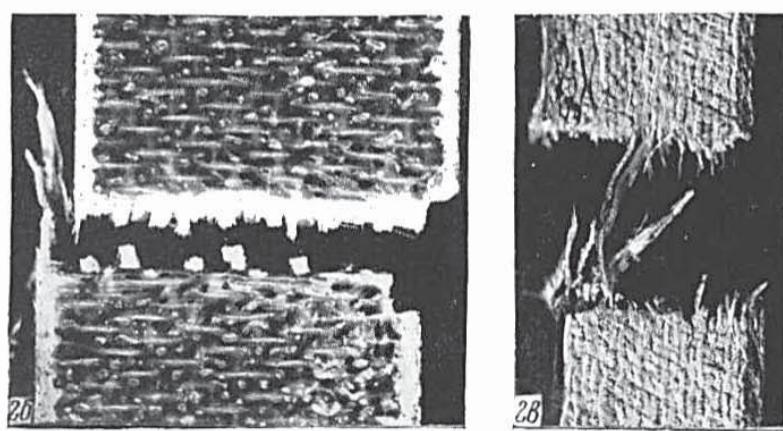
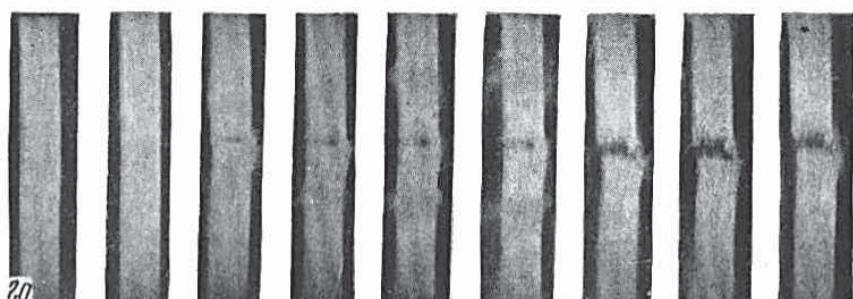
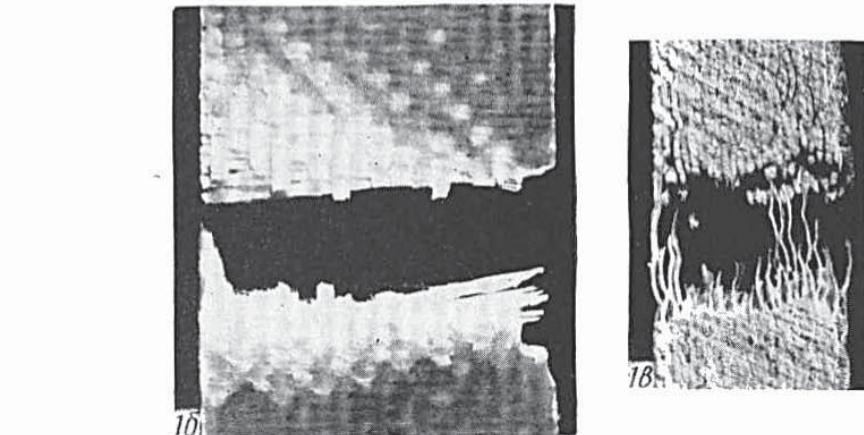
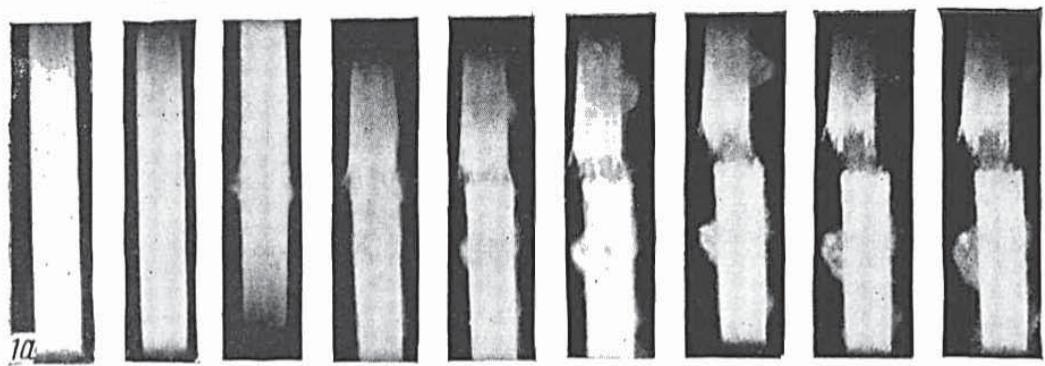
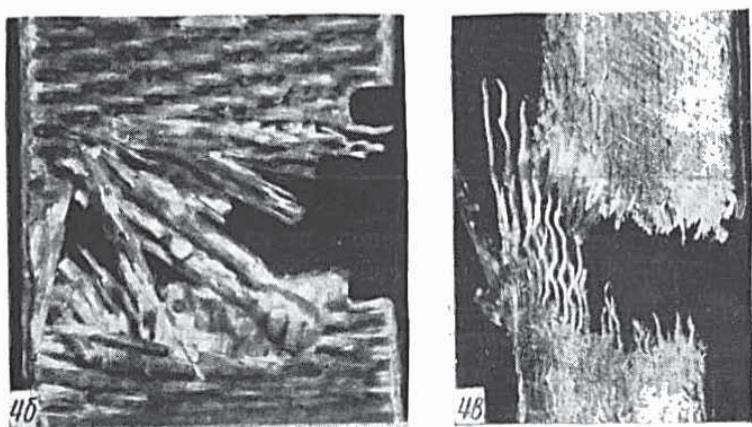
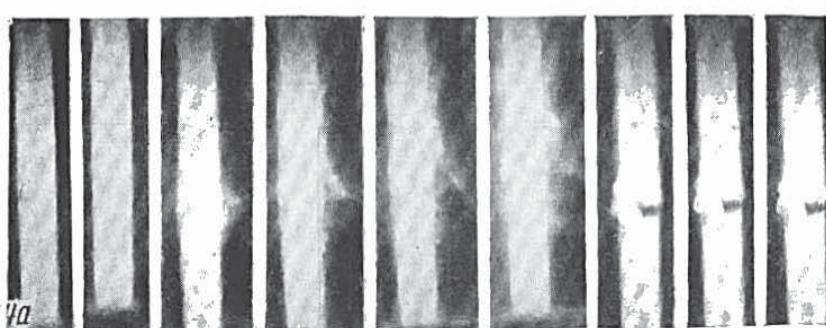
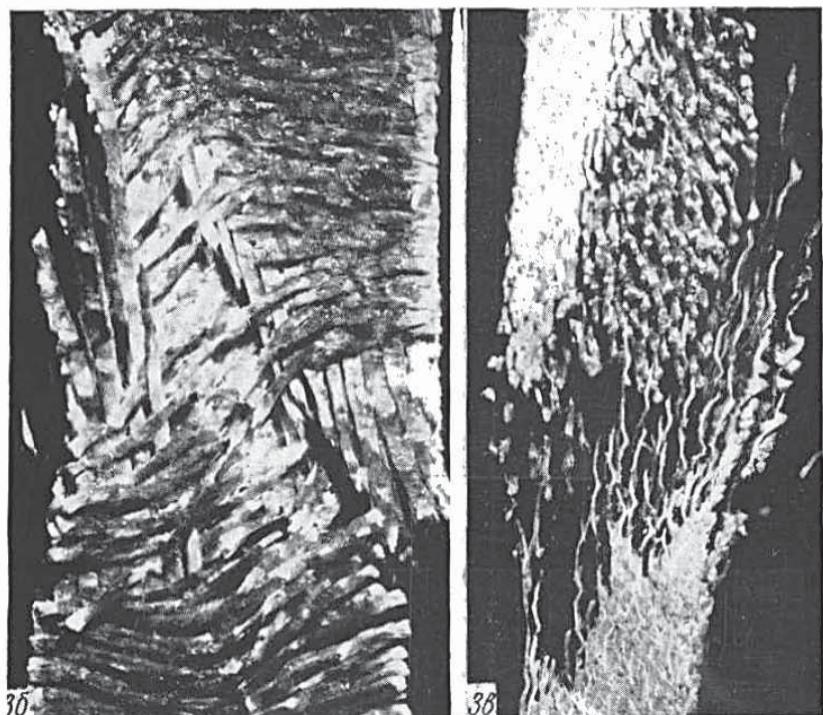
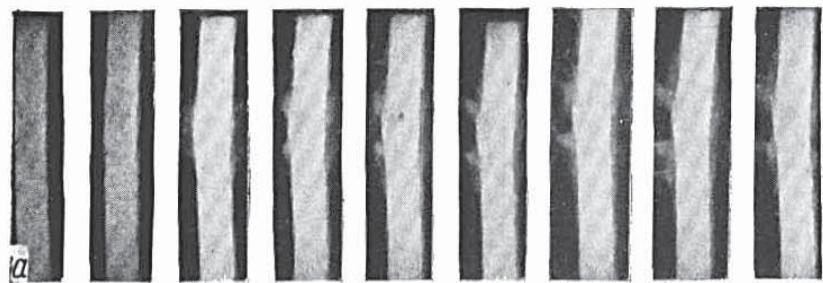


Рис. 1. Характер разрушения образцов стеклопластиков на эпоксифенольном связующем:

*а* — кадры из скоростной кинограммы разрыва; *б* — фотография места разрушения (вид спереди); *в* — фотография места разрушения (вид сбоку)

Рис. 2. То же на эпоксифенольно-каучуковом связующем.

Пояснение кадров см. рис. 1



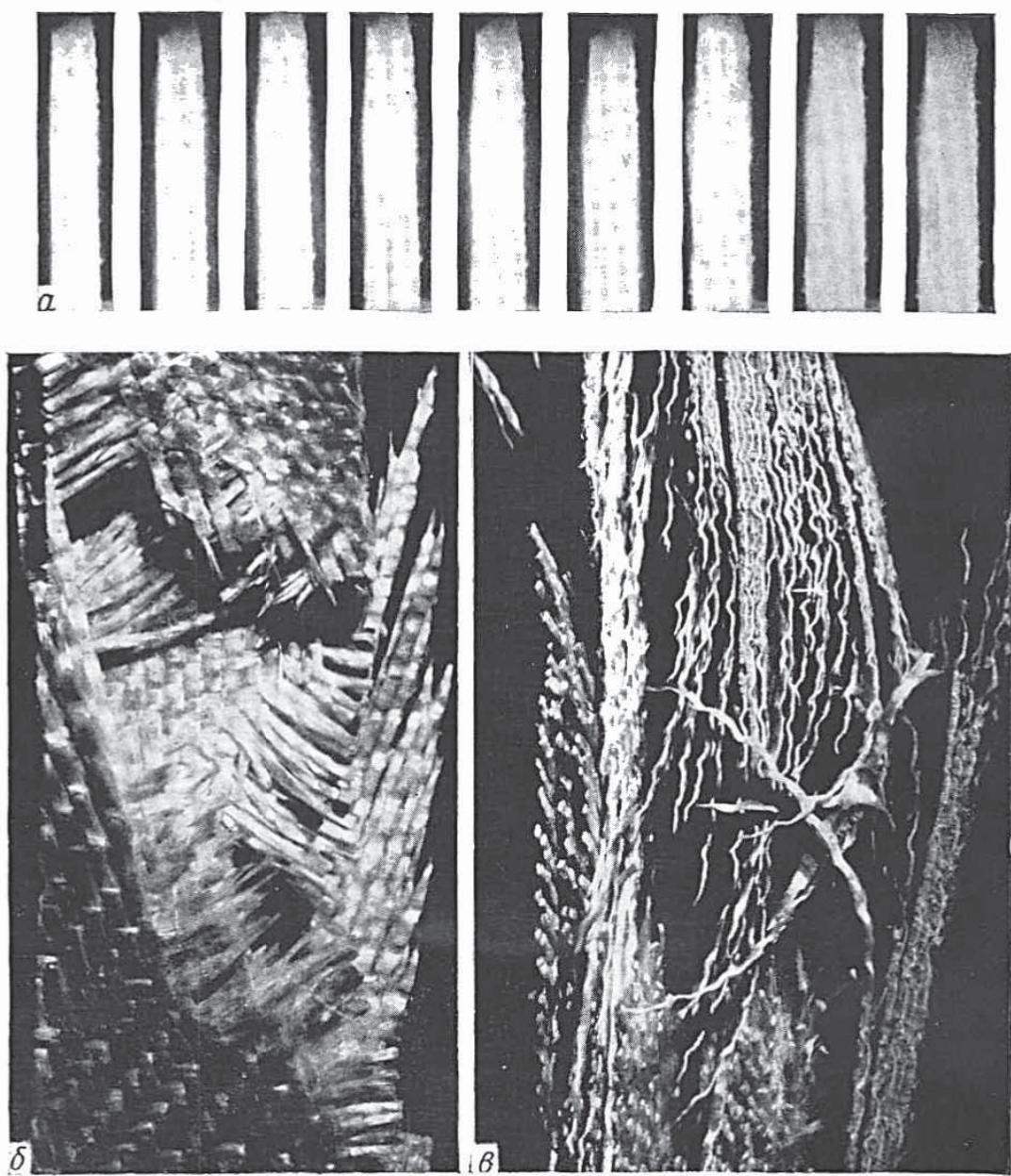


Рис. 5. Характер разрушения образцов стеклопластиков на эпоксиполиэфир-акрилатном связующем:

*а* — кадры из скоростной кинограммы разрыва; *б* — фотография места разрушения (вид спереди); *в* — фотография места разрушения (вид сбоку)

Рис. 3. Характер разрушения образцов стеклопластиков на эпоксикремнийорганическом связующем:

*а* — кадры из скоростной кинограммы разрыва; *б* — фотография места разрушения (вид спереди); *в* — фотография места разрушения (вид сбоку)

Рис. 4. То же на эпоксидном связующем.

Пояснение кадров см. рис. 3

между значениями относительных удлинений связующего и стеклопластика, тем прочнее стеклопластик. Так, например, для прочного стеклопластика на основе эпоксикаучукового связующего характерна малая разница в значениях относительного удлинения при разрыве связующего и стеклопластика в целом (рис. 8).

Прочность стеклопластика понижается, если между относительными удлинениями связующего и пластика существует значительный разрыв (рис. 9).

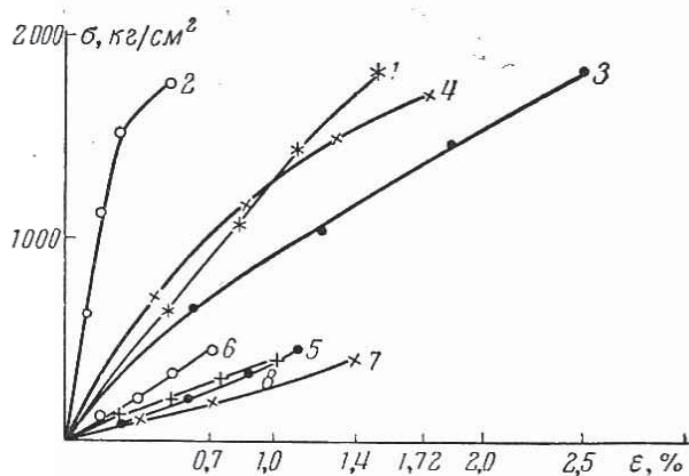


Рис. 9. Зависимости напряжение — деформация для стеклопластиков на эпоксиполиэфирном связующем и для самого связующего:

1—4 — стеклотекстолит; 5—8 — смола

Таким образом, при прочих равных условиях (прочность связующего, способность связующего к адгезии к стеклу и прочее) для повышения прочности стеклопластика следует применять связующие, имеющие близкие к стеклопластику значения относительных удлинений в момент разрыва.

### Выводы

1. Прочность и характер разрыва стеклопластика в значительной степени зависят от свойств примененного связующего.
2. Прочность стеклопластика с одним и тем же стеклонаполнителем будет определяться когезионной прочностью связующего и адгезионной прочностью стекло — полимер, возрастаю с увеличением последних.
3. Обнаружено, что при прочих равных условиях наибольшая прочность стеклопластиков соответствует наименьшему различию значений относительного удлинения при разрыве стеклопластика и связующего.
4. Вследствие сглаживания пика перенапряжений в вершине микротрешин при проникновении в них связующего прочность стеклопластика может превышать суммарную прочность стеклоткани и связующего.

Московский институт тонкой химической технологии им. М. В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
8 IX 1961

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Гуль, И. М. Чернин, Докл. АН СССР, **123**, 713, 1958.
2. В. Е. Гуль, И. М. Чернин, Высокомолек. соед., **2**, 1613, 1960.
3. В. Е. Гуль, Л. Н. Царский, С. А. Вильниц, Коллоидн. ж., **20**, 318, 1958.
4. С. С. Вояцкий, В. Е. Гуль, Чжан Ин-си, В. Л. Вакула, Высокомолек. соед., **4**, 285, 1962.

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF RUPTURE OF GLASS FABRIC  
REINFORCED RESINS

*V. E. Gul, I. M. Chernin, E. E. Zaborovskaya, E. P. Dontsova,  
V. Yu. Gvildis*

S u m m a r y

As a result of the comparison of the deformation isotherms for similar specimens of glass-reinforced resin and the binder, and of an analysis of the cinegrams of the rupture process for the reinforced resins a number of general laws has been established correlating the cohesive strength of the binder, the breakdown mechanisms of the glass fabric and binder, the adhesive strength of the fiber to binder bond and the strength of the reinforced resins.

---