

УДК 678.01:53

## ИЗУЧЕНИЕ РАЗРУШЕНИЯ АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИКОВ

## I. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

*Ю. М. Малинский, Б. Ю. Трифель, В. А. Каргин*

Большое техническое значение стеклопластиков обуславливает то внимание, которое уделяется исследованию механического поведения этого материала. Значительное число работ посвящено вопросам прочности стеклопластиков и характеру связи стекло — полимер [1—6]. В ряде исследований для изучения распределения напряжений в армированных пластиках был применен поляризационно-оптический метод [7—9]. Все эти работы проводились на материалах с высокой степенью наполнения.

Для изучения элементарных актов, происходящих при разрушении стеклопластиков, мы исследовали модельные образцы, содержащие один или несколько армирующих элементов.

Работу проводили с полиэфирами марок ПН-1, ПН-3 и ПН-4. В качестве ускорителя отверждения применяли нафтенат кобальта, в качестве инициатора — гидроперекись изопропилбензола [10].

Образцы имели форму двойной лопатки с рабочей частью длиной 40 мм и сечением 2,5—3 × 8 мм. Смесь полимера с добавками, способствующими отверждению, заливали в углубления стальной разъемной формы, в которые предварительно закладывали армирующие элементы. Конфигурация углублений соответствовала образцу. В качестве армирующих элементов применяли стерженьки диаметром от 50 мк до 1 мм, изготовленные из бесцелочного или молибденового стекла. Для облегчения выемки образцов форму смазывали спирто-водным раствором поливинилового спирта [10]. Поверхность армирующих элементов тщательно обезжиривали протиранием спиртом.

Отверждение полимера производили в течение 20—24 час. при комнатной температуре с последующим четырехчасовым нагревом при 80°. Образцы растягивали на динамометре FMPw-250 со скоростью движения нижнего зажима 30 мм/мин.

Для выявления картины распределения напряжения при растяжении образца производили его киносъемку в проходящем поляризационном свете [11]. С целью фиксирования малых значений двупреломления между анализатором и образцом помечали кварцевую пластину «красный 1-го порядка».

При растяжении образцов, армированных расположенным вдоль направления деформации одиночными стеклянными прутками, наблюдалось постепенное растрескивание стеклянной армировки с нарастанием числа разрывов стекла в ходе испытаний и концентрацией напряжений вблизи нарушений сплошности армирующего элемента (рис. 1). В подавляющем большинстве случаев (было испытано 550 образцов) образцы разрушались таким образом, что над поверхностью разрушения одной из половинок образца выступал небольшой участок армирующего элемента, извлеченной из второй половины образца. Длина этого выступающего участка сильно зависела от диаметра стеклянного прутка и от типа применяемого полимера (см. рис. 2).

Рабинович [12] показал, что при деформации сравнительно жестких армирующих элементов, связанных адгезионными силами со слоем поли-

мера, на границе раздела возникают неравномерно распределенные напряжения сдвига ( $\tau$ ), причем вблизи конца элемента появляется область резкой концентрации напряжения, ограниченная длиной  $l$  (рис. 3). Величина отношения длины  $l$  к диаметру армирующего элемента  $l/d_b$  оказывается линейной функцией параметра  $\xi$

$$\xi = c\sqrt{\delta / d_b}, \quad (1)$$

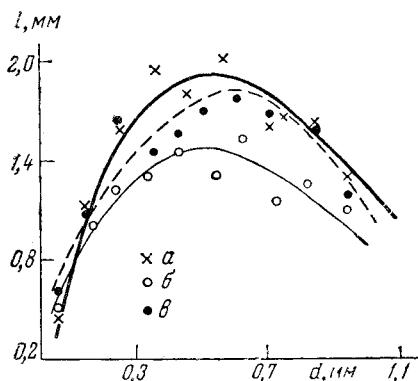


Рис. 2. Зависимость длины участка армирующего элемента, выступающего после разрушения ( $l$ ), от его диаметра ( $d$ )

$a$  — ПН-1;  $b$  — ПН-3;  $v$  — ПН-4

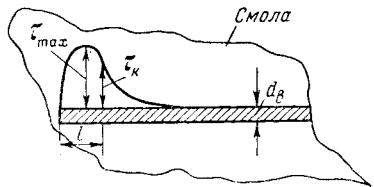


Рис. 3. Эпюра тангенциальных напряжений, возникающих на границе стекло — полимер вблизи места нарушения целостности армировки

где

$$c = \ln k(1 + G_3 / G_{\infty,3})(E_2 / G_3)(1 - \beta)^{1/2}, \quad k = \tau_{\max} / \tau_k,$$

$G_3$  и  $G_{\infty,3}$  — модули сдвига и эластичности при сдвиге полимера соответственно;  $\beta$  — параметр, зависящий от упругих констант и соотношения объемов компонентов системы;  $\delta$  — толщина полимерного слоя  $E_2$  — модуль упругости армирующего элемента,  $\tau_{\max}$  — максимальное напряжение сдвига,  $\tau_k$  — параметр, имеющий размерность напряжения, зависящий от адгезионных и когезионных свойств полимера,  $d_b$  — диаметр армирующего волокна.

В [12] показано, что концентрация напряжений сдвига имеет резко выраженный локальный характер и практически не зависит от граничных условий, т. е. от места приложения усилий на границах рассматриваемой системы. По этой причине теоретический результат [12] можно использовать и для исследуемого случая.

Если принять, что разрушение образцов происходит по сечению, положение которого определяется границей области резкой концентрации касательных напряжений вблизи поверхности стекло — полимер, то линейная зависимость (1) должна описывать соотношение между длиной участка армирующего элемента, выступающего после разрушения образца, и диаметром этого элемента. Рис. 4 показывает, что наши данные хорошо демонстрируются прямой в координатах  $(l/d_b) — \sqrt{\delta/d_b}$ . Следовательно, разрушение исследуемых образцов определяется тем перенапряжением, которое создается на границе раздела стекло — полимер вблизи нарушения сплошности армирующего элемента. Если в результате растяжения армирующий элемент разорвался в нескольких местах, то разрушение всего образца произойдет в том из перенапряженных сечений, в котором вследствие случайных причин прочность полимерного компонента снижена. Если при изготовлении образца в качестве

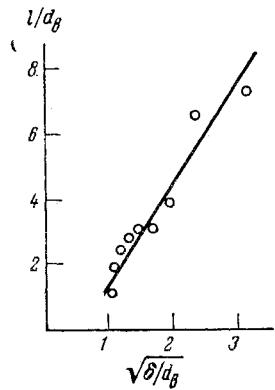


Рис. 4. Зависимость  $l/d$  от  $\sqrt{\delta/d}$  для полимера ПН-1

местах, то разрушение всего образца произойдет в том из перенапряженных сечений, в котором вследствие случайных причин прочность полимерного компонента снижена. Если при изготовлении образца в качестве

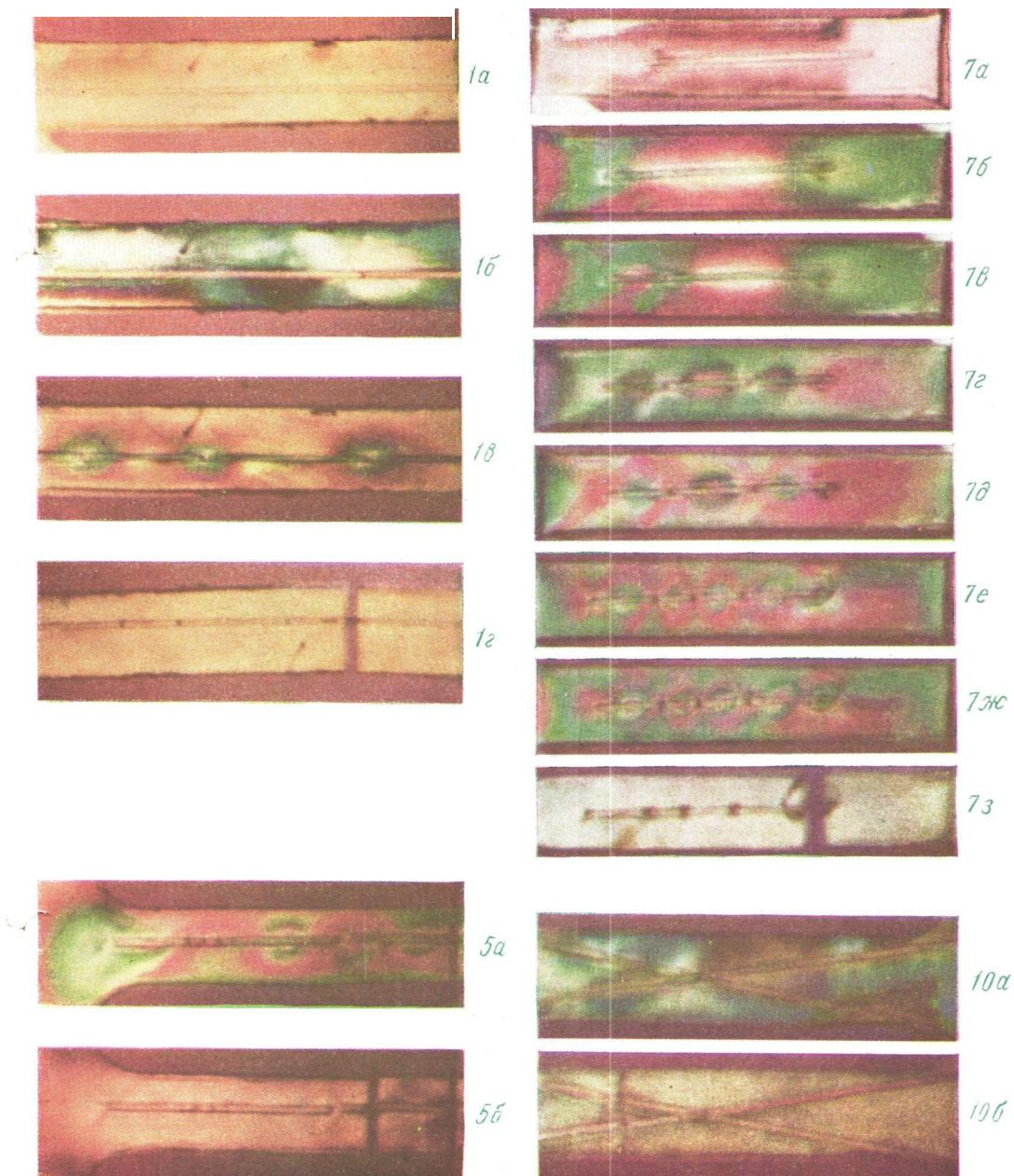


Рис. 1. Концентрация напряжений вблизи разрывов армирующего элемента:  
а — образец до приложения нагрузки; б — разрушение армировки и концентрация напряжений вблизи места разрыва прутка; в — дальнейшее развитие перенапряжения вдоль армировки и вблизи разрушений прутка; г — разрыв образца. Виден участок армирующего элемента, выступающий за поверхность разрушения

Рис. 5. Разрушение образца с армирующим элементом, в котором заранее был создан дефект  
Рис. 7. Кинограмма развития напряжений в образце с армирующим элементом, длина которого меньше длины рабочей части:

а, б — развитие перенапряжения вдоль прутка; в — первый разрыв; г, д — второй разрыв и последующая концентрация напряжений вблизи мест нарушения целостности армировки; е, ж — третий разрыв и последующая концентрация напряжений вблизи мест нарушения целостности армировки; з — разрыв образца

Рис. 10. Распределение напряжений в образце, армированном прутками, расположенными под углом  $20^\circ$  друг к другу, в момент, предшествующий его разрушению (а) и после разрушения образца (б); смежные кадры кинограммы (скорость съемки 32 кадра в секунду)

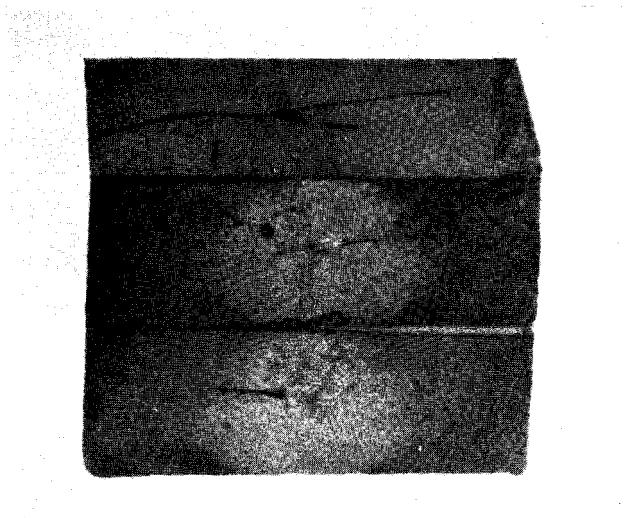


Рис. 6. Торцевые поверхности обеих половинок разрушенного образца

армирующего элемента укладывали по одной прямой линии несколько коротких стеклянных прутков, то не наблюдалось различия во влиянии на разрушение образца искусственно созданных дефектов и дефектов, возникших в армировке при растяжении (рис. 5).

Характер поверхности разрыва образцов подтверждает, что трещина, приводящая к разрушению, возникает на границе стекло — полимер. В центральной части образца наблюдается участок с глянцевой поверхностью (рис. 6), границы которого близки к окружности; ближе к краям образца поверхность разрыва становится матовой, шероховатой. Как показал Бартенев [13, 14], при хрупком разрыве начальная, медленная стадия разрыва создает глянцевую поверхность разрушения, конечная стадия — матовую.

Возникновение перенапряжений вблизи конца армирующего элемента и зарождение трещины в толще образца приводят к тому, что прочность образцов с одним армирующим элементом или с небольшим их числом — ниже прочности не армированных образцов (см. таблицу).

Если образец содержит армирующий элемент, занимающий не всю длину образца, а только некоторую часть ее, меньшую, чем длина рабочего участка, то в случае

достаточной протяженности армирующего элемента при растяжении образца в стеклянном прутке возникает несколько разрывов (рис. 7); по прочности такие образцы не отличаются от образцов с армировкой по всей длине. При уменьшении длины армирующего элемента, начиная с некоторого ее значения, прочность возрастает, приближаясь к прочности не армированного образца (рис. 8). Это явление может быть результатом совместного действия двух факторов.

Во-первых, уменьшение длины армирующего элемента приводит к повышению его жесткости, а это в свою очередь обязательно приводит к сни-

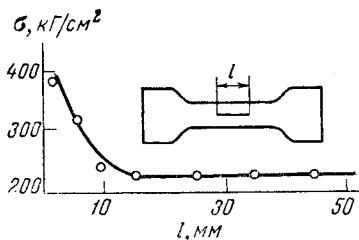


Рис. 8. Зависимость предела прочности при растяжении образца от длины армирующего элемента

#### Прочность образцов с одиночным армирующим элементом

Диаметр стеклянного прутка, мм	Предел прочности при растяжении, кг/см²	
	ПН-1	ПН-3
Без армировки	422	300
0,08*	—	215
0,15*	155	131
0,25*	108	159
0,35*	—	125
0,45*	114	106
0,55*	147	122
0,65*	132	116
0,75*	125	123
0,85*	113	146
0,95*	—	139

\*  $\pm 0,05$  мм.

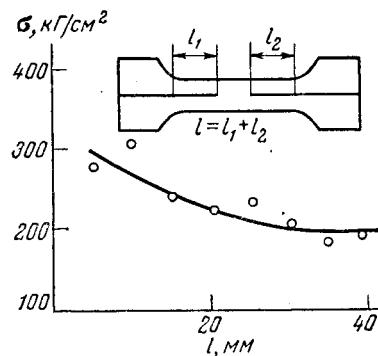


Рис. 9. Зависимость предела прочности при растяжении от суммарной длины армирующих элементов, расположенных вдоль оси образца

жению перенапряжений в полимере [12]. Во-вторых, поскольку разрушение образца всегда происходит на участке, занятом армирующим элементом, его укорочение эквивалентно уменьшению длины испытуемого образца, которое в результате влияния масштабного фактора должно повышать прочность образца [15].

Аналогичные результаты дают испытания образцов, армировка которых состоит из двух укороченных прутков, расположенных вдоль оси образца, причем один конец каждого из прутков, проходящий сквозь расширенную часть образца, закреплен в зажиме (рис. 9). Эти результаты,

конечно, нельзя механически переносить на материалы с высокой степенью наполнения.

Представляет интерес тот случай, когда армирующие элементы находятся в разных плоскостях и под малыми углами к оси образца, так что их проекции пересекаются. При растяжении таких образцов также происходит разрушение каждого армирующего элемента в нескольких местах, а разрушение всего образца всегда происходит по сечению, находящемуся на некотором расстоянии от точки «пересечения» армирующих элементов (рис. 10). По прочности такие образцы не отличаются от образцов с параллельным расположением армировки.

Приносим искреннюю благодарность А. Л. Рабиновичу за участие в обсуждении результатов работы.

### Выводы

1. Проведено исследование механизма разрушения армированных пластиков с использованием модельных образцов и киносъемки в поляризованном свете.

2. Показано, что при использовании полизифиров марок ПН-1, ПН-3 и ПН-4 в качестве связующего, разрушению образца предшествует разрыв стеклянных армирующих элементов.

3. Разрушение связующего, находящегося вокруг единичных армирующих элементов, происходит по сечению, находящемуся на некотором расстоянии от места разрыва стекла; это расстояние определяется неравномерностью распределения тангенциальных напряжений на поверхности раздела стекло — полимер.

4. Установлено, что трещина, приводящая к разрушению образца, начинается у поверхности раздела стекло — полимер.

Физико-химический институт  
им. Л. Я. Карпова

Поступила в редакцию  
13 V 1963

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Щербаков, С. В. Мазур, М. Н. Гинзбург, Пласт. массы, 1962, № 4, 33.
2. В. Е. Гуль, Е. Э. Заборовская и др., Высокомолек. соед., 2, 269, 1963.
3. Г. В. Ширяева, Г. Д. Апдриевская, Пласт. массы, 1962, № 4, 43.
4. F. J. McGagge, ASTM Bull., 1959, N 1, 63.
5. J. O. Outwater, D. E. West, Mod. Plast., 39, 154, 1961.
6. В. Е. Гуль, И. М. Чернин, Докл. АН СССР, 123, 713, 1958.
7. В. Е. Гуль, И. М. Чернин и др., Высокомолек. соед., 2, 274, 1963.
8. G. A. Hoggidge, Brit. J. Appl. Phys., 6, 314, 1955.
9. В. Е. Гуль, И. М. Чернин, Высокомолек. соед., 2, 1613, 1960.
10. П. З. Ли, З. В. Михайлова и др., Пласт. массы, 1960, № 2, 29.
11. И. М. Чернин, В. Е. Гуль, Заводск. лаб., 26, 484, 1960.
12. В. А. Каргин, Ю. М. Малинский, А. Л. Рабинович, Докл. АН СССР, 157, № 3, 1964.
13. Г. М. Бартенев, Успехи химии, 24, 815, 1955.
14. Г. М. Бартенев, Пласт. массы, 1960, № 9, 48.
15. Г. М. Бартенев, Пласт. массы, 1960, № 1, 21.

### STUDIES OF BREAKING OF REINFORCED PLASTICS

I. INVESTIGATION OF MODELS OF UNI-ORIENTED GLASS-REINFORCED PLASTICS  
*Yu. M. Malinckii, B. Yu. Trifel, V. A. Kargin*

#### S u m m a r y

A study has been made of the breaking mechanism of models of glass-reinforced plastics by cinematography in polarized light. It was found that on stretching of specimens made with use of polyester binders of type PN-1, PN-3, and PN-4 and reinforcement in the form of 0.05–1.0 mm. diameter glass rods, the reinforcement cracks first and then lateral breakdown of the binder takes place, at some distance from the place of rupture of the glass. The distance is connected with the non-uniform distribution of tangential stresses at the glass-polymer interface. The experimental data are confirmed by calculations carried out by A. L. Rabinovich. If the reinforcing element is ruptured in several places, breakdown of the entire specimen occurs at the site where by accident the strength of the polymer is the lowest. It has been found that the crack leading to breakdown of the specimen begins at the glass-polymer interfacial boundary.