

## О ВЛИЯНИИ НАГРЕВА НА ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

В. К. Голубев, С. А. Новиков, Ю. С. Соболев,  
А. А. Хохлов, Н. А. Юкина

(Москва)

Удачное сочетание высоких удельных механических свойств с высокими теплофизическими и диэлектрическими характеристиками — причина широкого использования полимерных композитов в конструкциях современной техники. Однако данных по прочности и разрушению этих материалов в условиях динамических ударно-волновых нагрузок явно недостаточно для оптимального проектирования соответствующих конструкций. Можно отметить лишь работы [1—5], где приводятся отдельные данные по определению условий откольного разрушения некоторых из них. Что же касается влияния на откольное разрушение повышенной температуры, которая является одним из основных факторов воздействия в условиях технической эксплуатации, то здесь информация для полимерных композитов фактически полностью отсутствует. Из подобных близких работ укажем только [6], где изучалось влияние температуры на откольное разрушение ряда полимерных материалов. В данной работе поставлена задача определения условий и характера откольного разрушения четырех типичных полимерных композитов: текстолита, асботекстолита, стеклотекстолита и стеклопластика АГ-4.

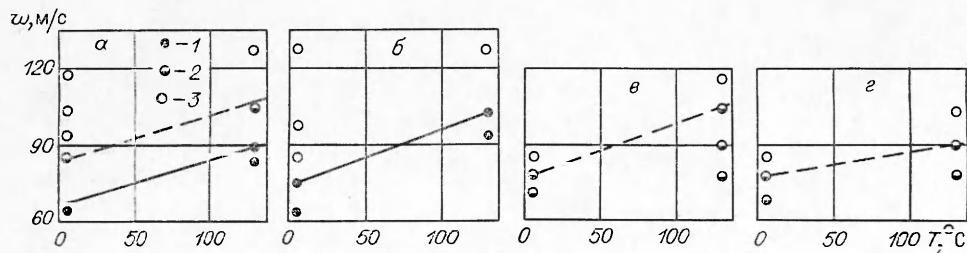
Постановка опытов аналогична [6]. Образцы исследуемых материалов, представляющие собой диски диаметром 40 и толщиной 4 мм, крепились к алюминиевому экрану толщиной 8 мм. Ударно-волновое нагружение образцов осуществлялось ударом по экрану алюминиевой пластины толщиной 4 мм, разгоняемой до необходимой скорости скользящей детонацией тонкого слоя ВВ. Нагрев до температуры 130° С, контролируемой хромель-копелевой термпарой, производился через экран посредством электронагревателя. После ударно-волновых испытаний визуально осматривались образцы и изготовлялись шлифы их продольных осевых сечений. Наблюдение и фотографирование шлифов проводилось оптической аппаратурой, используемой для металлографических исследований.

Методы получения, условия применения и физико-механические свойства рассматриваемых материалов приведены в [7]. Данные по плотности образцов, полученные методом гидростатического взвешивания, указаны в табл. 1.

Результаты опытов представлены на рис. 1 (*a* — текстолит, *b* — стеклопластик, *в* — асботекстолит, *г* — стеклотекстолит). Скорости ударника  $w$  и температуре  $T$  здесь ставится в соответствие состояние образца после испытания, условно подразделяемое на 3 градации: 1 — отсутствие откольного разрушения, соответствие наблюдаемой структуры образца структуре образца-свидетеля; 2 — частичное откольное разрушение — наличие на шлифе наблюдаемых визуально либо при небольшом увеличении откольных повреждений; 3 — полное откольное разрушение — наличие магистральной откольной трещины либо непосредственное отслаивание

Т а б л и ц а 1

Материал	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$p$ , ГПа ( $T=0\dots 20^\circ\text{C}$ )	$p$ , ГПа ( $T=130^\circ\text{C}$ )
Текстолит	1,37	0,20—0,24	0,26—0,30
Асботекстолит	1,53	—0,24	—0,33
Стеклотекстолит	1,63	—0,25	—0,29
Стеклопластик	1,90	0,27—0,30	0,39—0,45



Р и с. 1

вание откольного слоя. Характерное время механического нагружения образцов оценивается, как и в [6], в 1,5 мкс.

Оценки силовых условий нагружения, характеризующихся амплитудой давления в нагружающем импульсе сжатия, основываются на следующих предположениях. В табл. 2 для некоторых подобных материалов даны параметры их ударных адиабат в виде линейных  $D - u$ -соотношений, а также диапазоны изменений массовой скорости, в которых эти соотношения получены. Сопоставление известных ударных адиабат текстолита и связующих позволяет предположить, что введение в смолу низкоплотного наполнителя типа хлопчатобумажной ткани в количестве 50% по массе не приводит к существенному изменению ее  $D - u$ -соотношения. Что касается композитов, наполнителем в которых является стекловолокно, то здесь наблюдается увеличение основного характеризующего ударно-волновую сжимаемость при низких давлениях параметра  $c_0$  до 3,0 км/с. Кроме того, как показывает рассмотрение результатов [1], значения  $c_0$  для полимеров и полимерных композитов находятся, как правило, между значениями их продольных  $c_l$  и объемных  $c_b$  скоростей звука. Оценим значения этих скоростей для содержащего максимальное количество стекловолокна стеклопластика АГ-4, используя приведенные в [7] упругие постоянные для неориентированного материала. Поскольку плотность образцов исследуемого в данной работе стеклопластика имела максимально возможное значение, возьмем для модулей Юнга  $E$  и сдвига  $G$  также их максимальные значения, равные соответственно 14,5 и 5,2 ГПа, а для коэффициента Пуассона  $\mu$  его минимальное значение 0,26. Для скоростей звука получим  $c_b = \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-2\mu)}} = 2,31$  км/с,  $c_l = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = 1,65$  км/с,  $c_t = \sqrt{c_b^2 + (4/3)c_l^2} = 2,99$  км/с. Таким образом,  $c_0$  для рассмотренного стеклопластика будет находиться в диапазоне 2,3... 3,0 км/с. Итак, в связи с недостатком информации по ударно-волновым свойствам конкретных материалов и с целью единообразия используем для рассмотренных композитов  $c_0 = 2,6$  км/с. Это значение будет достаточно корректной нижней оценкой для всех материалов, причем для стеклонаполненных композитов возможное превышение реального значения над ним не будет превосходить 15%.

Учитывая, что  $c_0$  для алюминия составляет 5,3 км/с, можно от используемой на рис. 1 скорости ударника  $w$  перейти к давлению в нагружающем импульсе  $p = \rho_1 c_{01} w / (1 + \rho_1 c_{01} / \rho_2 c_{02})$ , где индексы 1 и 2 относятся соответственно к композиту и алюминию. Полученная таким образом

Т а б л и ц а 2

Материал	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$c_0$ , км/с	$\lambda$	$u$ , км/с	Источник
Текстолит	1,36	2,65	1,49	0—2,1	[4]
Эпоксидная смола	1,19	2,64	1,66	0—2,4	[8]
»	1,19	2,68	1,52	1,2—2,2	[1]
Феноксмола	1,17	2,27	1,70	1,3—2,6	[1]
Фенольный рефрасил	1,66	3,02	1,01	0,7—2,4	[1]
Стеклотекстолит		3,0	1,88	0—0,6	[5]

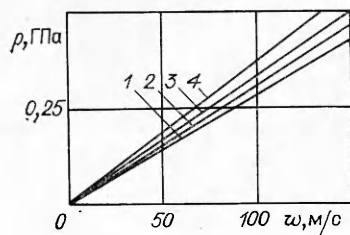


Рис. 2

ориентировочная взаимосвязь между  $w$  и  $p$  для исследуемых полимерных композитов приведена на рис. 2 (1 — текстолит, 2 — асботекстолит, 3 — стеклотекстолит, 4 — стеклопластик). Используя эту взаимосвязь и приведенные на рис. 1 первоначальные экспериментальные результаты, можно оценить критические силовые условия нагружения, отвечающие откольному разрушению композитов. Уровни нагружения, соответствующие зарождению откольных поврежде-

ний и полному откольному разрушению, отмечены на рис. 1 сплошной и штриховой линиями. Оцененные диапазоны нагружающего импульсного давления, отвечающие критическим условиям откольного разрушения исследуемых композитов, приведены в табл. 1.

Отдельные результаты наблюдения характера откольного разрушения испытанных образцов показаны на рис. 3—6. Отметим основные особенности, свойственные каждому из исследуемых композитов.

На рис. 3 представлен вид продольных сечений испытанных при температурах  $\sim 0$  (а, в) и  $130^\circ\text{C}$  (б, г) образцов текстолита, нагружавшихся со скоростями удара 103 и 105 м/с. Сопоставление макроструктурных изображений (а, б,  $\times 10$ ) наглядно указывает на большую динамическую прочность материала в нагретом состоянии. Если при  $\sim 0^\circ\text{C}$  макроскопическая откольная трещина пересекает фактически все сечение образца и выходит на большую часть его боковой поверхности, то при  $130^\circ\text{C}$  начальная стадия макроразрушения наблюдается только в части сечения. Характер откольного разрушения (в, г,  $\times 70$ ) при обеих температурах подобен и обусловлен зарождением и развитием трещин в слоях связующего, параллельных плоскости листа, причем разрушение происходит в нескольких параллельных плоскостях.

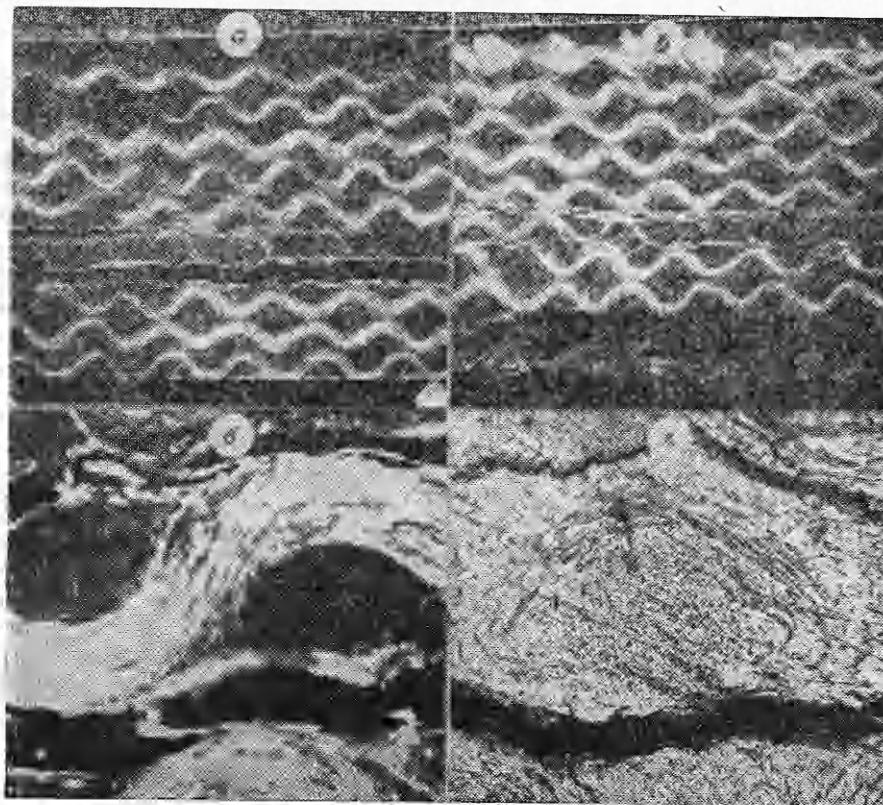
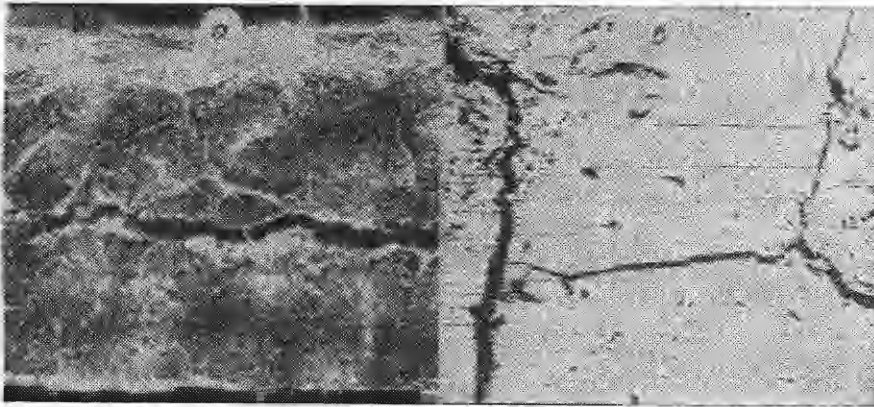


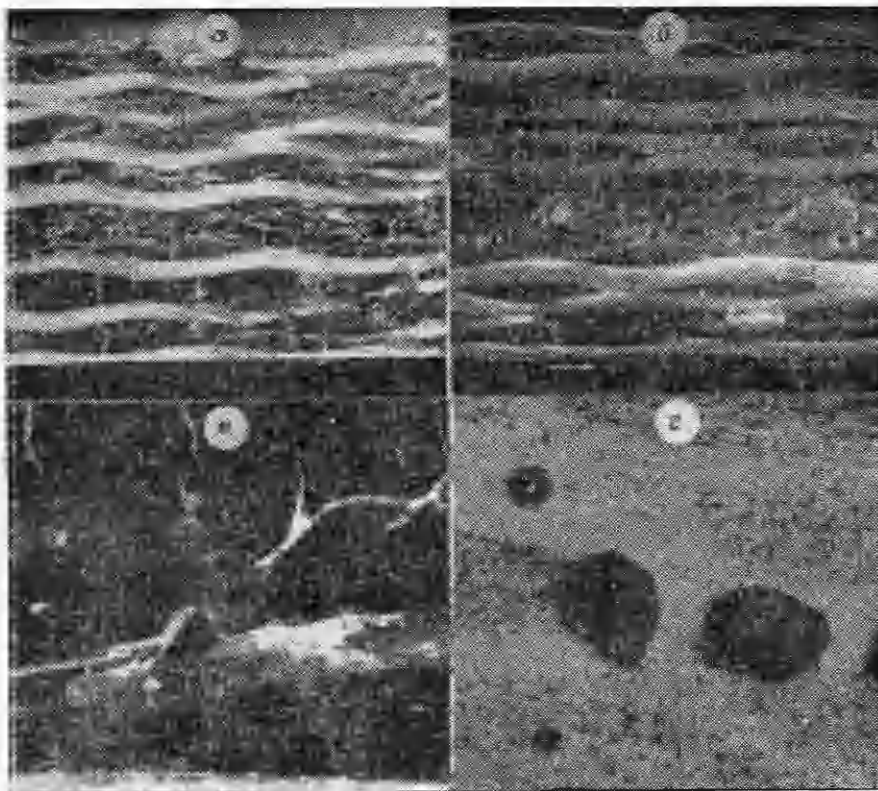
Рис. 3



Р и с. 4

На рис. 4 приведен вид продольного сечения (*а*,  $\times 10$ ) и характера откольного разрушения (*б*,  $\times 70$ ) образцов асботекстолита, нагружавшихся при температуре  $\sim 0^\circ \text{C}$  со скоростями удара 85 и 77 м/с соответственно. Зарождение откольных микротрещин происходит в объеме связующего, а магистральная откольная трещина формируется между слоями асботкани. Нагрев до  $130^\circ \text{C}$  приводит к увеличению динамической прочности, однако в характере разрушения изменений не наблюдается.

На рис. 5 показан вид продольных сечений испытанных при температурах  $\sim 0$  (*а*, *в*) и  $130^\circ \text{C}$  (*б*, *г*) образцов стеклотекстолита, нагружавшихся со скоростями удара 69 и 90 м/с. В исходной структуре материала присутствуют мелкие поры, которые при нагружении становятся центрами разрушения. При нормальной температуре испытания на них зачастую



Р и с. 5



Р и с. 6

начинается растрескивание связующего, а при повышенной они увеличиваются в размерах и сливаются в магистральную трещину. Это можно наблюдать на макро- (*a, б*,  $\times 10$ ) и микроструктурных (*в, г*,  $\times 70$ ) изображениях продольных сечений. Нагрев до температуры  $130^\circ \text{C}$  приводит в данном случае к увеличению динамической прочности и изменению характера откольного разрушения.

На рис. 6 представлен вид продольного сечения (*a*,  $\times 10$ ) и характера откольного разрушения (*б*,  $\times 70$ ) образцов стеклопластика АГ-4, нагружавшихся при температуре  $\sim 0^\circ \text{C}$  со скоростями удара 85 и 128 м/с. Зарождение и распространение откольных трещин происходит в прослойках связующего. При нагреве до температуры  $130^\circ \text{C}$  изменений в характере разрушения стеклопластика нет.

Таким образом, на основании полученных в работе результатов отметим, что при характерном времени нагружения  $\sim 1,5$  мкс критическое значение нагружающего давления, отвечающее откольному макроразрушению слоистых пластинок с содержанием связующего  $\sim 50\%$  по массе, составляет  $\sim 0,24 \dots 0,25$  ГПа. Нагрев до  $130^\circ \text{C}$  приводит к увеличению этого критического давления до  $\sim 0,29 \dots 0,33$  в зависимости от типа материала. Увеличение содержания наполнителя (стекловолокна) и снижение степени ориентированности, что имеем в случае стеклопластика АГ-4, приводят к увеличению динамической прочности как при нормальной, так и при повышенной температуре. Подобие прочностных свойств текстолитов с различным типом основы вполне объяснимо тем, что процесс разрушения происходит в основном в слоях связующего, представляющего собой разные фенолоформальдегидные и эпоксидные смолы с близкими физико-механическими свойствами. Нельзя, однако, не отметить того факта, что зарождение откольных повреждений в клее ВК-3 на основе фенолоформальдегидной смолы происходит при нагружении импульсом давления  $\sim 0,11$  ГПа, причем нагрев до  $130^\circ \text{C}$  не приводит к ощутимому увеличению прочности, что наблюдалось в [6]. Это указывает на определяющую роль армирования в увеличении динамической прочности полимерных композитов, особенно при повышенных температурах.

Сопоставим полученные в работе результаты с известными данными по откольному разрушению полимерных композитов. На основании двух приведенных в [1] регистрограмм изменения скорости свободной поверхности  $w_f$  образцов из кварцфенольного рефрасила может быть сделана оценка его откольной прочности  $\sigma_s = \rho c_0 \Delta w_f / 2$ , которая дает  $\sim 0,13$  ГПа. Подобная оценка для стеклотекстолита [5], сделанная на основании регистрации давления в подложке при торможении на ней откольного слоя, дает для откольной прочности диапазон  $0,14 \dots 0,22$  ГПа. С другой стороны, в [5] определено также пороговое значение нагружающего импульсного давления, отвечающего начальной стадии откольного разрушения, которое составило  $0,20 \dots 0,25$  ГПа. Сделанные в [4] оценки отрицатель-

ных давлений в текстолите, приводящих к его откольному макроразрушению при нагружении взрывом листового заряда ВВ, дают 0,2...0,3 ГПа, что также хорошо согласуется с результатами данной работы. В [2] на примере трехмерного кварцфенольного композита показано, что введение перпендикулярных к плоскости образца прослоек стекловолокна приводит к увеличению сопротивления откольному разрушению за счет предотвращения слияния образующихся трещин. Влияние времени нагружения на откольное разрушение полимерных композитов рассмотрено в [3], где приведены результаты для углепластика, представляющего собой трехмерную структуру из графитового волокна, пропитанного фенольной смолой. Здесь отметим, что если при характерном времени нагружения 1,5 мкс микроразрушение в связующем начиналось при нагружении импульсом давления  $\sim 0,2$  ГПа, то при уменьшении этого времени до 0,5 мкс наблюдалось существенное увеличение критического нагружающего давления до  $\sim 0,6$  ГПа.

При сопоставлении прочностных свойств полимерных композитов при ударно-волновых и статических нагрузках укажем, что разрушающее напряжение для текстолита марки Б при статическом растяжении по утку, т. е. поперек слоев, составляет не менее 45 МПа [7], тогда как при ударно-волновом нагружении его откольная прочность может быть охарактеризована диапазоном 0,20...0,24 ГПа. Таким образом, динамическая прочность текстолита при нормальной температуре более чем в 4 раза превышает статическую.

Значительное превышение динамической прочности полимерных композитов по сравнению со статической (в 3—4 раза) отмечено в [9] при растяжении кольцевых образцов со скоростью деформации  $150 \text{ с}^{-1}$ . Это указывает, что эффект динамического упрочнения уже проявляется для композитов при существенно меньших, чем ударно-волновые, скоростях нагружения. В [7] дано, что нагрев слоистых пластиков до  $120^\circ \text{ С}$  приводит к снижению разрушающего напряжения при растяжении на 25...27%. В условиях ударно-волнового нагружения подобный нагрев приводит к выраженному в такой же степени обратному эффекту — увеличению откольной прочности. На основании изложенного можно сделать вывод о высокой эффективности использования полимерных композитов в конструкциях, подвергающихся совместному воздействию высоких температур и динамических нагрузок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мак-Куин Р., Марш С., Тейлор Дж. и др. Уравнение состояния твердых тел по результатам исследований ударных волн // *Высокоскоростные ударные явления*. — М.: Мир, 1973.
2. Shockley D. A., Seaman L., Curran D. R. The influence of microstructural features on dynamic fracture // *Metallurgical Effects at High Strain Rates*. — N. Y.; L.: Plenum Press, 1973.
3. Goek E. C., McClintock F. A. Fracture of graphite composites under shock loading // *J. Appl. Phys.* — 1975. — V. 46, N 11.
4. Голубев В. К., Новиков С. А., Сеницына Л. М. О разрушении материалов при нагружении взрывом листового заряда ВВ // *ПМТФ*. — 1981. — № 2.
5. Астанин В. В., Романченко В. И. Прочность и сжимаемость стеклопластика при ударе // *Механика композит. материалов*. — 1984. — № 4.
6. Голубев В. К., Новиков С. А., Соболев Ю. С. О влиянии температуры на откольное разрушение полимерных материалов // *ПМТФ*. — 1982. — № 1.
7. *Справочник по пластическим массам: В 2 т.* / Под ред. В. М. Катаева и др. — М.: Химия, 1975. — Т. 2.
8. Munson D. E., May R. P. Dynamically determined high-pressure compressibilities of three epoxy resin systems // *J. Appl. Phys.* — 1972. — V. 43, N 3.
9. Чамис К. К., Смит Г. Т. Влияние воздействия внешней среды и высокой скорости деформации на композиты, применяемые в конструкциях двигателей // *Аэрокосмич. техника*. — 1984. — Т. 2, № 9.

*Поступила 9/IX 1986 г.*