

12. Ахмадеев Н. Х., Нигматулин Р. И. Моделирование откольного разрушения при ударном деформировании. Анализ схемы мгновенного откола // ПМТФ.— 1981.— № 3.

г. Воронеж

Поступила 5/I 1990 г.

УДК 539.4 : 678.067

А. Г. Иванов, М. А. Сырунин, В. И. Лучинин

## УДАРНО-ВОЛНОВОЕ РАЗРУШЕНИЕ НАМОТОЧНОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА В РАЗЛИЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ

В настоящее время ведутся интенсивные разработки и исследования стеклопластиков, значительно расширяются области применения этих композитных материалов [1, 2]. Стеклопластики обладают рядом ценных свойств, в частности высокими удельными механическими характеристиками, а возможность изменения их волокнистой структуры позволяетварьировать свойствами композита в достаточно широком диапазоне. В [2, 3] показана перспективность применения этих материалов в конструкциях, подвергающихся импульсным (взрывным) нагрузкам. Однако экспериментальных данных по динамической прочности стеклопластиков при кратковременном воздействии нагрузок ( $10^{-3}$ — $10^{-7}$  с) явно недостаточно [2—5]. Следует также отметить, что существует большое количество различных видов стеклопластиков, нередко значительно отличающихся по своим статическим и динамическим характеристикам [1, 2, 6]. В данной работе изучались прочность и разрушение отколом в различных направлениях широко используемого намоточного стеклопластика на основе высоко-модульных магнезиально-алюмосиликатных волокон и эпоксидного связующего при ударно-волновом нагружении (время нагружения  $10^{-6}$  с).

В анизотропном материале определялись предельные растягивающие напряжения в направлениях, перпендикулярном  $\sigma_{pz}$  и одном из параллельных  $\sigma_{px}$  к его армирующим плоскостям (рис. 1).

Исследуемые образцы и ударники вырезались из цилиндрической оболочки радиусом 1 м, которая формировалась комбинированной намоткой лент на основе стеклянных волокон с чередованием двойных спиральных ( $\varphi = 40 \pm 5^\circ$ ) и кольцевых ( $\varphi = 90^\circ$ ) при соотношении их толщин 1 : 1. В процессе намотки оболочка пропитывалась связующим ЭДТ-10 с последующей термической сушкой. Образцы из стеклопластика (мишени) имели форму диска диаметром 30 мм и толщиной 10 мм, ударники выполнялись из того же материала толщиной 5 мм. Плотность стеклопластика определялась методом гидростатического взвешивания ( $\rho = (1850 \pm 25)$  кг/м<sup>3</sup>). Ориентация плоскостей армирования в образцах параллельна (тип 1 — рис. 1, а) и перпендикулярна (тип 2 — рис. 1, б) направлению действия растягивающих напряжений, в ударниках перпендикулярна (подобно образцам типа 2). Плоское соударение ударника и мишени осуществлялось на пневматической метательной установке калибром 76 мм. В опытах с помощью электроконтактных датчиков регистрировалась скорость ударника  $W$  при его подлете к мишени.

Определение скорости ударной волны в материале для двух направлений ( $D_x$ ,  $D_z$ ) было проведено в специальных экспериментах с помощью временных пьезоизмерителей. При соударении ударника с образцом по последнему распространяется ударная волна \*, которая сжимает материал. Для определения скорости ударной волны два отметчика располагали на противоположных торцах образца и по сдвигу сигналов во времени при известном расстоянии между датчиками производили расчет  $D_x$ ,  $D_z$ .

Разрушение при ударно-волновом нагружении (откольные явления) развивается при достижении критических растягивающих напряжений  $\sigma_p$  в плоскости соприкосновения волн разрежения. В настоящее время отсутствуют прямые методы регистрации этих напряжений при отколе.

\* При малых скоростях соударений реализуется волна сжатия. В работе не проводится разграничений между ударной волной и волной сжатия.

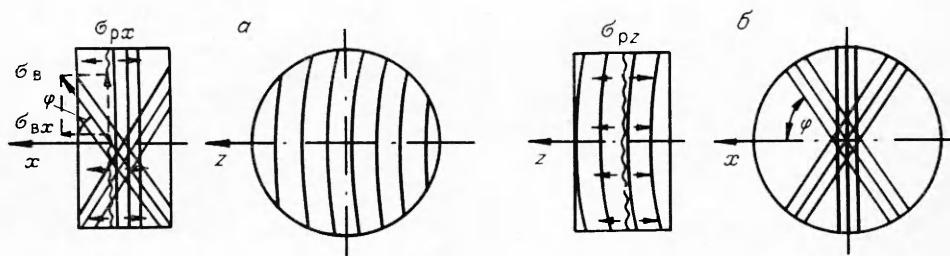


Рис. 1

Наиболее простым приближенным способом определения порогового значения нагружающего давления, соответствующего  $\sigma_p$ , возникающему в материале при соударении двух тел, является метод акустического приближения. Акустическое приближение может быть применено для расчетных оценок лишь при относительно малых скоростях соударения ( $W \ll D$ ), что и реализовалось в случае соударения двух тел из стеклопластика. Оценки величин растягивающих напряжений  $\sigma_p$  в плоскости откола (разрыва материала) и полного времени их действия проводились по формулам

$$\sigma_p = \rho D_1 u, \quad u = W/(1 + D_1/D_2), \quad t_p = 2\delta/D_1,$$

где  $D_1, D_2$  — скорости ударных волн в образце и ударнике;  $\delta$  — толщина отколившейся пластины;  $u$  — массовая скорость. Эти соотношения получены для случая, когда ударник и мишень выполнены из материала с одинаковой плотностью.

В предварительных опытах экспериментально определены скорости волн сжатия в стеклопластике:  $D_z = (2790 \pm 55)$  м/с,  $D_x = (4230 \pm 105)$  м/с, причем изменением  $D_x(u)$  и  $D_z(u)$  в исследованном диапазоне скоростей соударений пренебрегалось [4]. Расчетные оценки скоростей звука  $c_z, c_x$  по упругим постоянным стеклопластика данной структуры [3, 5] с учетом характеристик волокна и связующего [1, 3, 6] близки к измеренным величинам  $D_z, D_x$  и составили соответственно 2835 и 3870 м/с. Результаты испытаний стеклопластика при ударно-волновом нагружении и отрыве в двух направлениях  $z$  и  $x$  приведены в таблице ( $t_p = 3,58 \cdot 10^{-6}$  с).

Величины предельных растягивающих напряжений, отвечающих откольному макроразрушению намоточного стеклопластика вдоль и попереck плоскости армирующих слоев, имеют вид  $\sigma_{pz} = 0,2 - 0,24$  ГПа и  $\sigma_{px} = 1,0 - 1,14$  ГПа. Значит, отличие в прочности стеклопластика в направлениях  $z$  и  $x$  составляет 4,5—5 раз. Средние значения  $\delta$  (см. таблицу) для образцов с продольным и поперечным расположением волокнистых слоев отличаются примерно до 1,5 раза, что согласуется с обнаруженным различием скоростей  $D_z, D_x$ .

Из сопоставления  $\sigma_{pz}$  с данными [4, 5], где исследовались аналогичные параметры для прессованного стеклопластика с другой силовой основой, видно, что пороговые значения нагружающего давления, отвечающего откольному межслойному макроразрушению различных видов стеклопластиков, совпадают. Таким образом, межслойная прочность стеклопластика при ударно-волновом нагружении определяется в основном прочностью связующего. Для оценочного сопоставления межслойной динамической и статической прочности стеклопластика проведем сравнение величины  $\sigma_{pz}$  при отколе с прочностью связующего на растяжение  $\sigma_p$ . Статическая прочность эпоксидной смолы имеет значение  $\sigma_p = 40 - 55$  МПа [6]. Следовательно, если принять гипотезу, что прочность материала в этом направлении определяется прочностью связующего, возможно возрастание динамической межслойной прочности стеклопластика по сравнению со статической в 4—6 раз или с учетом приведения к одному и тому же напряженному состоянию в 1,3—2 раза.

Тип образца	Номер опыта	$W$ , м/с	$\sigma_p$ , ГПа	$\delta$ , мм	Состояние отколившейся пластины
2 (z)	1	72,2	0,186	—	Не отделилась
	2	76,7	0,198	—	» »
	3	93,8	0,242	5,0	Неполное отделение
	4	108,4	0,277	3,2	» »
	5	113,5	0,293	4,8	Отделилась
	6	115,0	0,297	4,4	»
	7	126,2	0,326	5,1	»
	8	134,1	0,346	5,0	»
	9	136,9	0,353	5,1	»
	10	156,5	4,04	5,1	»
1 (x)	1	179,5	0,558	—	Не отделилась
	2	253,4	0,788	—	» »
	3	326,5	1,016	—	» »
	4	366,0	1,138	7,5	Неполное отделение
	5	370,0	1,151	7,5	» »
	6	387,5	1,205	7,4	Отделилась
	7	405,6	1,262	7,4	»
	8	410,0	1,275	7,4	»

Если межслойная прочность стеклопластика определяется в основном прочностью связующего, то его продольная прочность в направлении  $x$  уже в большей мере связана с прочностью волокнистой силовой основы. Для оценки напряжений в силовых волокнистых слоях, составляющих только  $\sim 35\%$  площади в плоскости разрушения образца, которые в основном воспринимают нагружающее давление, воспользуемся экспериментальными значениями критических напряжений  $\sigma_{px}$ . Остальную часть поверхности образца занимает полимерное связующее ( $\sim 30\%$ ) и слои такой ориентации к поверхности разрушения, что их прочность в направлении  $z$  соизмерима с межслойной прочностью стеклопластика. Выражение для вычисления этих напряжений  $\sigma_{bx}$ , используя правило смесей, запишем в виде  $\sigma_{px} = 0,35\sigma_{bx} + 0,65\sigma_{pz}$ , откуда  $\sigma_{bx} = 2,8$  ГПа.

Из рис. 1, а при условии, что разрушение волокон в плоскости отрыва происходит без их смещения (угол  $\varphi = \text{const}$ ), следует соотношение  $\sigma_b = \sigma_{bx}/\cos^2\varphi = 4,8$  ГПа, что соответствует предельной деформации волокна  $\sim 5\%$ . Предел прочности элементарных стеклянных волокон при статическом растяжении  $\sigma_b = 3 - 4,2$  ГПа [1, 6], т. е. в  $\sim 1,3$  раза меньше их прочности при высокоскоростном растяжении.

Значит, прочностные характеристики анизотропного материала зависят не только от прочности и структуры армирования его компонентов, а также от условий нагружения [3]. Найденные выше значения  $\sigma_{pz}$  и  $\sigma_{px}$  для стеклопластика позволяют определить удельную (на единицу поверхности) работу отрыва материала  $\lambda$  в двух направлениях ( $x, z$ ) согласно выражению [7, 8]

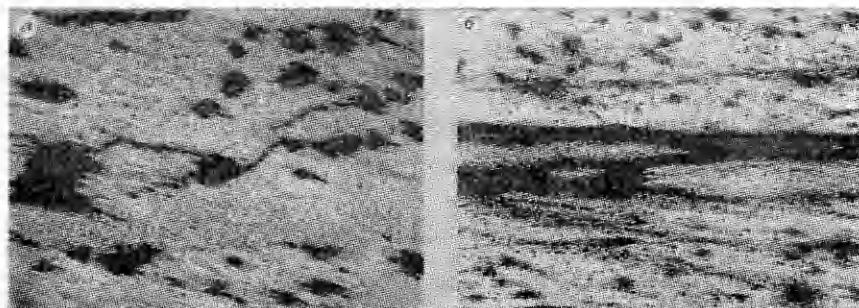


Рис. 2



Рис. 3

чина  $\lambda_z$  близка к значениям для плексигласа [9], а  $\lambda_x$  сравнима с  $\lambda$  для ряда металлов, например закаленной стали [8]. Найденная удельная работа  $\lambda_x = 142 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{м}^2$  для стеклопластика практически совпадает с аналогичной известной из литературы величиной  $2\gamma$  [7],  $\gamma = 60,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{м}^2$  — поверхностная энергия разрушения для однородного стеклопластика с трещиной, перпендикулярной волокнам [10].

Строго говоря, найденное значение  $\lambda_x$  следует рассматривать как эффективное. Действительно, формула (1) получена для гомогенного материала в предположении, что его протяженность в направлении, перпендикулярном фронту ударной волны, безгранична. В случае направления  $x$  это условие не удовлетворяется. Здесь определяющую роль прочности несут волокна стекла, при разрушении которых масштабные эффекты отсутствуют ( $\sigma_p$  не зависит от  $\delta$ ) [2]. Разрывы стеклянных волокон, как показано выше, наступают при  $\sigma_{px}$ , отвечающем  $\varepsilon_p = 5\%$ , а значение  $\lambda$  для стекла составляет всего  $92 \text{ Дж}/\text{м}^2$  [11]. С учетом этого  $\lambda_x = 5,56 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{м}^2$ , что даже меньше  $\lambda_z$ .

Весьма интересным и практически важным является изучение в стеклопластике стадии так называемого «предоткола», когда в материале только начинают появляться первые микротрещины [4, 5]. Проведено сопоставление макроструктурных изображений шлифов из образцов, подвергнутых различным уровням нагружения. На рис. 2, а, б ( $W = 72,2$  и  $93,8 \text{ м}/\text{с}$ ) и 3 ( $W = 366 \text{ м}/\text{с}$ ) показан вид продольных сечений образцов (увеличение  $\times 50$ ), нагружавшихся ударом с разными скоростями. Как видно из рис. 2, а, центрами разрушения становятся дефекты, присущие в структуре материала. Преимущественное направление трещин перпендикулярно направлению удара. Однако эти мелкие трещины еще не соединяются между собой, и поэтому макроразрушение (расщепление) образца не происходит. Уровень нагружения (напряжений), вызывающий появление зародышевых трещин, можно считать критическим для материала. При увеличении нагрузки трещины растут в размерах и сливаются в магистральную (рис. 2, б, 3). Происходит макроразрушение (расщепление) образца, т. е. полный откол.

Приведенные результаты экспериментов представляют интерес при проектировании конструкций из стеклопластиков, подверженных воздействию интенсивных и кратковременных (ударных) нагрузок.

Авторы выражают благодарность И. А. Юкиной за полученные изображения микроструктуры образцов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Альперин В. И. Конструкционные стеклопластики.— М.: Химия, 1979.
2. Иванов А. Г., Цыпкин В. И. Деформация и разрушение стеклопластиковых оболочек при экстремальных импульсных нагрузках // Механика композит. материалов.—1987.— № 3.
3. Сырунин М. А., Федоренко А. Г., Шитов А. Т. Прочность цилиндрических оболочек из стеклопластика различной структуры при нагружении взрывом // ФГВ.— 1989.— № 4.

4. Астанин В. В., Романченко В. И. Прочность и сжимаемость стеклопластика при ударе // Механика композит. материалов.— 1984.— № 4.
5. Голубев В. К., Новиков С. А., Соболев Ю. С. и др. О влиянии нагрева на откольное разрушение некоторых полимерных композитов // ПМТФ.— 1987.— № 6.
6. Гуняев Г. М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов.— М.: Химия, 1981.
7. Иванов А. Г. О возможных причинах хрупких разрушений // ПМТФ.— 1988.— № 3.
8. Иванов А. Г., Минеев В. И. О масштабных эффектах при разрушении // ФГВ.— 1979.— № 5.
9. Голубев В. К., Новиков А. С., Синицына Л. М. О разрушении материалов при нагружении взрывом листового заряда ВВ // ПМТФ.— 1981.— № 2.
10. Серенсен С. В., Зайцев Г. П. Несущая способность тонкостенных конструкций из армированных пластиков с дефектами.— Клев: Наук. думка, 1982.
11. Иванов А. Г. О возможности построения единой теории разрушения // ПМТФ.— 1990.— № 1.

г. Арзамас-16  
Нижегородской области

Поступила 20/II 1990 г.

УДК 539.3

Б. С. Резников

## АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТОВ С УЧЕТОМ КОНЕЧНЫХ ПОВОРОТОВ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В настоящее время разрабатываются и находят широкое применение новые высокомодульные нетканые синтетические материалы. Эти композиты имеют волокнистосетчатую структуру (близкую к ромбовидной), пропитанную полимерным связующим, которое, как показывают микротографии, в основном находится в узлах сетки. Поэтому определенный объем занимает поры, расположенные достаточно регулярно. Данные композиты по сравнению с «жесткими» (типа стекло-, угле-, баропластиков и т. д.) будут называть «мягкими» композитами, так как они обладают большей деформативностью, эластичностью и при малых нагрузках проявляют существенно нелинейные свойства, что связано с изменением структуры материала. В частности, субструктурные элементы поворачиваются относительно друг друга на конечную величину, и существенно меняется пористость материала. Учет указанных эффектов позволяет определять поперечные деформации при одноосном нагружении. Поэтому при построении физических соотношений рассматриваемого композита использовался структурный подход [1], который позволяет учитывать: удельное объемное содержание волокон и связующего, пористость, характер армирования, нелинейные свойства субструктурных элементов, а для связующего и анизотропию этих свойств.

Описание поведения различных материалов с помощью механических моделей применяется очень широко [2—5]. Так, в [2, 4] используются различные реологические модели, элементы которых простираются лишь в одном направлении. В [3] проведено исследование предельного состояния «жестких» композитов, армированных в двух направлениях, на основе стержневой модели. Анализ влияния угла между структурными реологическими элементами модели был дан в [4] при исследовании только спектра времен релаксации полимеров. Кроме того, предложенный подход в [4] не позволяет учитывать структуру композита, а также поперечные деформации в процессе одноосного нагружения, которые являются значительными при деформировании «мягких» композитов.

Для построения уравнений состояния рассматриваемых материалов будем использовать следующую модель. Примем, что волокнистый композит состоит из повторяющихся ромбовидных элементов толщиной  $h$  по направлению оси  $Oz$  (рис. 1). При этом волокна композита разориентированы на угол  $2\alpha$  и образуют элементарные ячейки-ромбы, в углах которых находится связующее (либо возникают силы трения между переплетающимися волокнами). В этом переплетении волокна находятся в равновесном состоянии и материал способен сохранять свою форму и размеры при отсутствии внешнего воздействия. При нагружении такой модели элементарные ячейки-ромбы деформируются как вследствие изменения угла  $2\alpha$  между волокнами, так и в результате деформации самих волокон и связующего.

Механическое поведение связующего в углах ячейки-ромба будем моделировать с помощью элементов  $AC$  и  $BD$  (см. рис. 1), которые харак-