

связки она может лишь подвергаться пластической деформации, которая за счет, по-видимому, локализации в конечном счете приводит к образованию множественных микротрещин.

Таким образом, проведенные исследования показали, что в результате использования структурнонеустойчивого состояния матрицы в композите удастся значительно понизить масштаб структурного уровня пластической деформации и разрушения подобных композитов не только в условиях квазистатического, но и высокоскоростного динамического нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Данилов В. И. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. — Новосибирск: Наука, 1990.
2. Super G. Micromechanic and fracture // Fracture and fatigue/Ed. by L. Broutman. — 1974. — Vol. 5.

г. Томск

Поступила в редакцию 3/XII 1991

УДК 629.198.624

Н. Н. Горшков, А. В. Пластинин, В. В. Сильвестров

СКВОЗНОЕ ПРОБИВАНИЕ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

Определена предельная толщина преграды из стеклотекстолита при высокоскоростном ударе стальными и стеклянными частицами диаметром 0,8—2 мм при скорости удара 3—7,3 км/с. Показано, что прочность преграды значительно влияет на предельную толщину пробития, а площадь областей вторичных разрушений более чем на два порядка превосходит площадь сквозного отверстия. Разрушение однонаправленного стеклопластика характеризуется значительным различием поперечных размеров областей повреждений, что обусловлено анизотропией механических свойств материала.

Использование композитных материалов в изделиях аэрокосмической техники объясняет интерес, проявляемый в последнее время к результатам высокоскоростного взаимодействия частиц с конструкциями из слоистых органо- и углепластика [1—3].

В настоящей работе приведены данные по зависимости предельно пробиваемой толщины плоской преграды δ из стеклопластика от размера и материала компактной частицы (шарик диаметром d), движущейся со скоростью v . Под предельной толщиной, согласно [4], понимается максимальная толщина преграды, при которой наступает сквозное разрушение при ударе, выражающееся хотя бы в появлении системы разгерметизирующих трещин. Стальные и стеклянные частицы с $d \sim 1 \div 2$ мм ускорялись при помощи трубчатого заряда ВВ до $v = 3 \div 7,3$ км/с [5, 6]. Во всех случаях рассматривается удар по нормали к поверхности преграды.

Материал преграды. Мишени, плоские пластинки размером 80×80 мм и толщиной t вырезались из листа электротехнического слоистого стеклотекстолита марок СТ-1 и СТЭФ с одинаковой структурой армирования (основа — жгутовая стеклоткань полотняного переплетения), но различающихся материалом связующего: фенолформальдегидная смола резольного типа для СТ-1 и эпоксидная смола, отвержденная фенолформальдегидной, для СТЭФ.

Согласно справочным данным, прочностные характеристики СТ-1 в 2—3 раза ниже, чем СТЭФ. Измеренная твердость для материалов по Бринеллю в направлении, перпендикулярном слоям армирующей стеклоткани, составила 36 ± 8 кг/мм² для СТ-1 и 63 ± 8 кг/мм² для СТЭФ (удельная плотность 1,71 и 1,85 г/см³ соответственно).

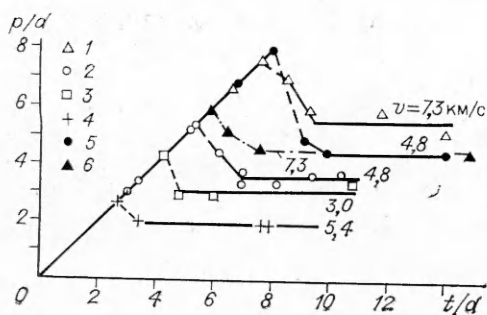


Рис. 1. Глубина проникновения высокоскоростных частиц в мишени из стеклотекстолита.

d , мм: 1 — 0,83, 2, 5 — 1,1, 3 — 1,95, 4 — 1,45; материал преграды: 1—4 — СТЭФ, 5 — СТ-1, 6 — Д16 [4]; материал частицы: 1—3, 5, 6 — сталь, 4 — стекло.

Исходные экспериментальные данные приведены на рис. 1: по горизонтали отложена относительная толщина мишени t/d , по вертикали — относительная

глубина внедрения. Если мишень пробита насквозь или разгерметизирована за счет возникающих сквозных трещин, то полагалось $p/d = t/d$, так что все точки, соответствующие пробитию, ложатся на прямую $p = t$, правее которой расположены кривые для различных скоростей удара и материалов преграды и ударника. Данное представление результатов позволяет ввести количественное понятие о полубесконечной преграде, когда параметры каверны, прежде всего ее глубина p , не зависят от толщины мишени. В случае стеклотекстолита эта толщина должна быть не менее $(6 \div 10)d$ при скорости стальной частицы $3 \div 7,3$ км/с. При меньших толщинах за счет влияния эффекта отражения ударной волны (УВ) от тыльной поверхности мишени величина p/d может возрастать, как и для упругопластических материалов (см. рис. 1, 6).

На рис. 2 приведены фотографии разрезов мишеней при ударе стальной частицей по преградам из СТЭФ и СТ-1. Видно, что при уменьшении толщины наступает момент, когда реализуется сквозное разрушение мишени. При увеличении t на 0,7—1,2 мм сквозного разрушения нет (центральные снимки). В качестве предельной толщины δ принималось среднее между этими толщинами.

Качественная картина разрушения. При $t \leq \delta$ на тыльной поверхности мишени реализуется характерное расслоение материала. Это явление обусловлено действием волны разгрузки, образующейся за счет отражения волны сжатия, стимулированной ударом, от тыльной свободной поверхности. Если амплитуда возникших растягивающих напряжений в направлении, перпендикулярном слоям (направление удара), и вдоль слоя стеклоткани при его изгибе достаточно велика, происходит расслоение материала, а также разрываются армирующие волокна. В отличие от пластичных преград область между доннышком каверны и тыльной поверхностью является скорее «разломом» материала, чем полостью, образующейся за счет откола, как для металлов [4]. Для менее прочного стеклопластика СТ-1 откол выражен в большей степени вблизи предельной толщины.

При $t > \delta$ величина растягивающих напряжений уже недостаточна для разрушения материала во всей области под доннышком каверны даже при превышении значения предельной толщины на 0,5—1,0 мм. Упругохрупкий характер деформирования стеклопластика приводит к тому, что процесс пробития на пределе носит в определенном смысле

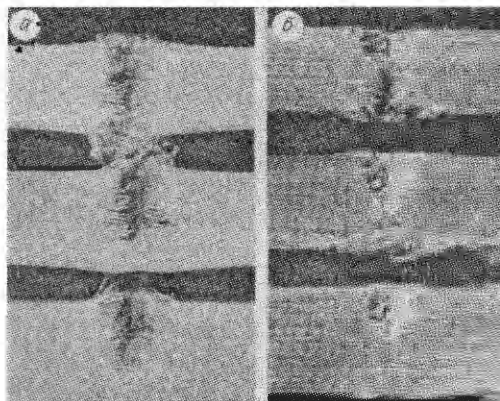


Рис. 2. Фотографии разрезов мишеней из СТЭФ (а) и СТ-1 (б) ($v = 3$ (а) и 4,8 км/с (б), $d = 1,95$ (а) и 1,1 мм (б)).

t , мм (сверху вниз): а — 8,4, 9,4, 21,1, б — 8,8, 10,0, 11,0.

Рис. 3. Зависимость относительной предельной толщины от скорости удара.

1 — СТ-1, 2, 3 — СТЭФ, 4, 5 — Д16; материал частицы: 1, 2, 4 — сталь, 3, 5 — стекло.

пороговый характер. Откол относительно слабо влияет на предельную толщину, особенно для более прочного СТЭФ.

На фотографиях достаточно хорошо просматриваются отдельные слои стеклоткани, первоначально параллельные поверхности мишени. После удара их направление вблизи стенок каверны изменяется: вблизи поверхности удара они поворачиваются в сторону, противоположную направлению удара, за счет действия волны разгрузки со стороны поверхности удара; вблизи тыльной поверхности слои поворачиваются в направлении удара. Таким образом, отдельные слои выполняют роль своеобразных внутренних меток, фиксирующих картину течения материала при деформировании.

Форма боковой поверхности каверны в деталях практически не повторяется, что связано, по-видимому, с локальной неоднородностью материала как по плотности, так и по прочности. Любопытно многообразие форм разрушения вблизи доннышка каверны и изменение диаметра каверны по ее глубине. По этой причине не удается аккуратно измерить диаметр каверны или ее входной диаметр. Единственное, что можно сказать, что он не превышает $\sim (1,5-2)d$. Однако при этом такие величины, как глубина каверны и предельная толщина, определяются с достаточной точностью, чтобы можно было говорить об их корреляции с параметрами ударника и характеристиками мишени.

Количественные зависимости. На рис. 3 приведена зависимость предельной толщины от скорости удара. Обратим внимание на значительное влияние прочности стеклопластика: при переходе от СТЭФ к СТ-1 при $v = 4,8$ км/с предельная толщина увеличивается в 1,5 раза для преграды, твердость которой по Бринеллю примерно на 70 % ниже. Это обусловлено, по-видимому, сменой характера разрушения вблизи δ (см. рис. 2): для СТ-1 образуется откольная полость, смыкающаяся с каверной, для СТЭФ откольные явления, как уже отмечалось выше, выражены очень слабо.

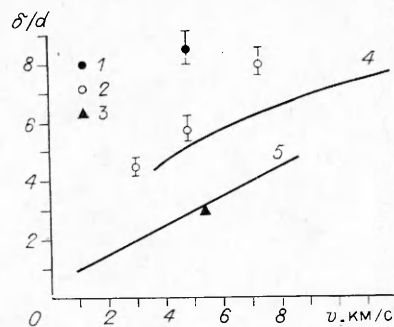
При ударе стеклянной частицей ($v = 5,4$ км/с, $d = 1,45$ мм) величина δ уменьшается почти в 2 раза по сравнению с ударом стальной частицей. На рис. 3 для сравнения приведены аналогичные данные для преград из дюралюминия [4, 5]. Видно, что предельные толщины для стеклопластиков выше, причем с ростом скорости удара стальной частицы это различие увеличивается.

Отношение δ/p составляет 1,5 для СТЭФ, как и для преград из алюминия, когда роль откола при предельном пробивании мала [5, 6]. В случае развитого откола для металлов это отношение увеличивается до 2—3 [4, 6]. Аналогичная тенденция наблюдается и у СТ-1, для которого $\delta/p \approx 1,8$.

На рис. 4 результаты для стеклопластика сопоставляются с двумя эмпирическими зависимостями, описывающими экспериментальные данные для металлов по предельной толщине пробития (обозначения те же, что и на рис. 3). В первом случае зависимость имеет вид [4]

$$\delta/d = 1,15 [(\rho v^2/\rho_0)^{1/3} - 0,7]. \quad (1)$$

На рис. 4, а соотношение (1) представлено сплошной прямой, заштрихована область разброса данных, по которым прямая и была построена; эта область включает и результаты удара стеклянными частицами из [5]. Данные для стеклотекстолита лежат выше прямой, а результаты



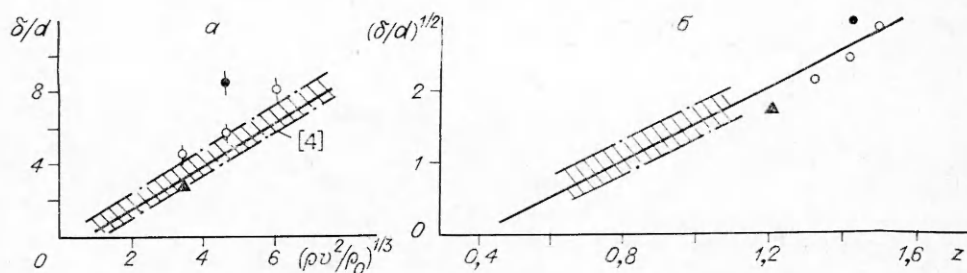


Рис. 4. Зависимость относительной предельной толщины от параметров $(\rho v^2/\rho_0)^{1/3}$ (а) и $(\rho v^2/p_s)^{1/3}$ (б).

для СТ-1 — вне пределов разброса исходных данных, по которым определялась зависимость (1).

Существенно лучше результаты обобщаются зависимостью

$$(\delta/d)^{1/2} = -1 + 2,5z, \quad (2)$$

где $z = (\rho v^2/p_s)^{1/3}$, предложенной в [7]. Здесь в качестве параметра, определяющего предельное пробивание, выбрано отношение удельной кинетической энергии частицы к начальному давлению в преграде p_s , вычисляемому по ударным адиабатам материала ударника и мишени. Для оценки параметра z использовалась ударная адиабата стеклопластика из [8]. На рис. 4, б прямая построена по (2), заштрихованная область — результаты для металлических преград по [4—7]. За счет более низкого уровня давлений в стеклопластике (300—1200 кбар) параметр z увеличивается примерно на 40 % относительно максимально реализованного для металлических преград. Таким образом, область применения (2) расширяется, так как его экстраполяция позволяет достаточно хорошо описать результаты для стеклопластиков в пределах точности построения формулы (2).

«Белки» на поверхности мишени из СТЭФ. При высокоскоростном ударе кроме собственно пробойны и разрушений вблизи ее окрестности на обеих поверхностях преграды наблюдаются четко выраженные области побеления («белки»). Их появление связано с нарушением сплошности материала связующего за счет малой межслойной прочности и действия растягивающих и сдвиговых напряжений, вызванных совместным действием интенсивной, расходящейся от точки удара волны сжатия и волн разгрузки со стороны свободных поверхностей.

Как правило, «белки» имеют эллиптическую форму, вытянутую вдоль направления основы стеклоткань, и характерную площадь s от 2 до 22 см², что значительно больше площади каверны, составляющей $\leq 0,1$ см². Для «белков» на тыльной поверхности $s = 5 \div 22$ см², на лицевой $s = 2 \div 4$ см² при $t < \delta$. Наблюдается четкая корреляция между энергией ударника (60—140 Дж) и средней площадью «белка» (полусумма s на лицевой и тыльной поверхностях): чем больше энергия удара, тем больше «белок», причем коэффициент пропорциональности увеличивается по мере роста t . При $t \approx \delta$ размер «белков» достигает максимума и затем уменьшается. Рост связан с увеличением доли энергии частицы, поглощаемой в преграде, а уменьшение объясняется снижением интенсивности ударной волны, выходящей на тыльную поверхность. Для достаточно толстых пластин с $t > 2\delta$ присутствует «белок» только на лицевой поверхности.

Увеличение размеров аналогичных нарушений структуры материала с энергией удара в диапазоне 40—120 Дж отмечалось и для пластин и трубок из углеродистого пластика при высокоскоростном ударе [1—3], но область толщин при $t \approx \delta$ не исследована.

На непрозрачном материале типа СТ-1 «белки» не видны, и необходимы методы типа ультразвукового сканирования для определения максимальных размеров остаточных повреждений мишени при ударе. Количественные оценки размеров этих областей важны, если элементы

из слоистых композитов используются в качестве несущих в конструкциях, так как их частичное разрушение на достаточно большой площади может снизить воспринимаемые ими предельные нагрузки.

Удар по однонаправленному стеклопластику. Был поставлен эксперимент с ударом стальной частицей ($v = 4,8$ км/с, $d = 1,1$ мм) по однонаправленному стеклопластику, представляющему мотанный стеклопоксидный материал в виде кольца шириной 50, с внутренним диаметром 100 и толщиной стенки 4,2 мм ($\rho_0 = 2$ г/см³). Для такой преграды значение $t/d \approx 3,8$ существенно меньше предельного (см. рис. 1), и соответственно происходит сквозной пробой с диаметром отверстия ~ 2 мм. Цель эксперимента — показать, что имеется существенное различие в характере разрушений на поверхности мишени, обусловленное сильной анизотропией свойств материала в направлении армирования (в окружном направлении) и по образующей кольца.

Со стороны удара наблюдается характерный «белок», вытянутый в направлении армирования, размером $\sim 22 \times 9$ мм² и расслоение части материала с резко отличающимися поперечными размерами ($\sim 40 \times 2$ мм²). Толщина отслоенной части $\sim 0,5$ мм. Характер разрушения явно указывает на то, что волны сжатия, стимулированные ударом, распространяются в основном вдоль армирующихся элементов. Стеклые нити выполняют роль своеобразных проводников волн напряжений. В поперечном направлении интенсивность волн значительно уменьшается при удалении от точки удара, что и находит отражение в характере разрушений.

На внутренней поверхности кольца материал разрушается, что обусловлено действием отраженной волны разгрузки. Размеры области разрушения составляют $\sim 52 \times 7$ мм² и превышают таковые на поверхности со стороны удара. Глубина зоны повреждения, толщина отслоившейся части материала достигала ~ 1 мм на двух-трех диаметрах отверстия в азимутальном направлении, т. е. существует область значительного уменьшения толщины оболочки, существенно большая площади каверны.

Таким образом, специфика однонаправленного композита проявляется прежде всего в значительной асимметрии размеров вторичных зон разрушения, обусловленных действием волн разгрузки со стороны свободных поверхностей. Размеры областей разрушения в направлении армирования более чем на порядок могут превышать размеры в поперечном направлении.

Выводы. На примере слоистого стеклопластика полотняного переплетения показано, что понятие предельной толщины пробития при высокоскоростном ударе можно распространить и на композиционные стеклопластики, и ее можно определить с достаточной точностью.

При скоростях удара стальной частицы 3—7,3 км/с предельная толщина для СТЭФ составляет $(4,5-8)d$ и примерно в 1,5 раза больше глубины кратера в полубесконечной мишени. На примере стеклотекстолита СТЭФ и СТ-1 показано существенное влияние прочности преграды при $v \approx 5$ км/с на предельную толщину. Показана возможность использования эмпирических зависимостей, установленных ранее при анализе результатов удара для металлов, для предсказания с удовлетворительной точностью предельных толщин для стеклопластиков, армированных стеклотканью.

Установлено, что размеры вторичных зон разрушения (отколы, отслоения, «белки») по площади могут более чем на 2 порядка превышать собственно площадь отверстия, образующегося при сквозном пробитии. Это может приводить к значительному снижению несущей способности конструкций, использующих слоистые композиционные материалы. При высокоскоростном ударе по однонаправленному стеклопластику наблюдается более значительное разрушение материала в направлении армирования по сравнению с материалом, армированным стеклотканью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yew C. H., Kendrick R. B. A study of damage in composite panels produced by hypervelocity impact // *Int. J. Impact Engng.*— 1987.— 5, N 4.— P. 729—738.
2. Schouberg W. P. Hypervelocity impact response of spaced composite materials structures // *Ibid.*— 1990.— 10, N 4.— P. 509—523.
3. Christiansen E. L. Investigation of hypervelocity impact damage to space station truss tubes // *Ibid.*— P. 125—133.
4. Титов В. М., Фадеев Ю. И. Сквозное пробивание при метеоритном ударе // *Космические исследования.*— 1972.— 10, вып. 4.— С. 589—595.
5. Титов В. М., Фадеев Ю. И., Титова Н. С. Разгон твердых частиц кумулятивным взрывом // *Докл. АН.*— 1968.— 180, вып. 5.— С. 1051.
6. Урушкин В. П., Горшков Н. П., Титов В. М. Методика имитации в лабораторных условиях удара каменных метеоритов // *ФГВ.*— 1977.— 13, № 3.— С. 439—442.
7. Мерзиевский Л. А., Титов В. М. Разрушение тонкостенного трубопровода, заполненного жидкостью, при ударах метеоритов // *Космические исследования.*— 1973.— 11, вып. 6.— С. 944.
8. Астанин В. В., Романченко В. И. Прочность и сжимаемость стеклотекстолита при ударе // *Механика композитных материалов.*— 1984.— № 4.— С. 731—734.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 26/XII 1991

УДК 539.3

А. Д. Реснянский, Е. И. Роменский

МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВОЛОКНИСТОГО ТЕРМОВЯЗКОУПРУГОГО КОМПОЗИТА

С помощью феноменологической процедуры осреднения и использованием только свойств фаз получена модель волокнистого гомогенного термовязкоупругого композита. Система уравнений динамики композита замыкается уравнением состояния (упругим потенциалом), по которому вычисляются напряжения и температура. Полученные уравнения удовлетворяют принципу симметрии Онзагера и являются термодинамически корректными. При выводе уравнений не использовалось предположение о регулярности расположения волокон и о постоянстве времен релаксации, так что кинетические коэффициенты могут зависеть от состояния среды.

Настоящая работа представляет собой дальнейшее развитие модели, рассмотренной в [1, 2], где предложена процедура феноменологического усреднения для вывода уравнений динамического поведения вязкоупругого композита в случае малых упругих деформаций. При этом вводятся новые макроскопические внутренние переменные, характеризующие неоднородность поля напряжений вдоль линий укладки компонентов композита. Наличие ненулевого поля этих переменных, определяющих неравновесные микронапряжения, может существенно менять динамику макроскопического поведения композита.

В данной работе проведена процедура феноменологического усреднения и вывода уравнений для связанных термических и деформационных процессов в волокнистом однонаправленном композите.

Рассмотрим двухфазный волокнистый композит, образованный параллельными вязкоупругими волокнами, помещенными в вязкоупругую матрицу. Относительно взаимного расположения волокон не делается никаких предположений, известными считаются только объемные концентрации и все необходимые свойства фаз.

Предположим, что каждая фаза композита описывается релаксационными уравнениями Максвелла для малых упругих деформаций [3]:

$$\rho \alpha \frac{\partial u_i^\alpha}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_{ij}^\alpha}{\partial x_j} = 0,$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}^\alpha}{\partial t} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i^\alpha}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^\alpha}{\partial x_i} \right) = - \Phi_{ij}^\alpha, \quad \frac{\partial s^\alpha}{\partial t} = \kappa^\alpha,$$