

ветствии расчетных и экспериментальных данных. И, наконец, поскольку при растяжении химическая реакция ускоряется [10], эффект влияния напряженно-деформируемого состояния на скорость горения также учитывается через выражение (1), в котором энергии активации гетерогенных реакций и теплота испарения должны быть уменьшены пропорционально величине наибольшей из компонент тензора напряжений на границе $\Gamma - K$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альес М. Ю., Булгаков В. К., Липанов А. М. Об одном алгоритме решения геометрически нелинейной задачи о напряженно-деформированном состоянии полых цилиндров сложной формы на основе метода конечных элементов // Изв. АН СССР. МТТ. — 1985. — № 2. — С. 106—112.
2. Зверев И. Н., Смирнов Н. Н. Газодинамика горения. — М.: Изд-во МГУ, 1987. — С. 310.
3. Исаков Г. Н. Моделирование нестационарных процессов теплопереноса и воспламенения в реакционноспособных средах. — Томск: Изд-во ТГУ, 1988. — С. 233.
4. Соркин Р. Е. Газодинамика ракетных двигателей на твердом топливе. — М.: Наука, 1967. — С. 366.
5. Lipanov A. M., Rusjak I. G. Phenomenological model of ignition and burning of solid fuel. Book of states. III Int. Seminar on flame structure. — Novosibirsk, 1990.
6. Новожилов Б. В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. — М.: Наука, 1973.
7. Калинин В. В., Ковалев Ю. Н., Липанов А. М. Нестационарные процессы и методы проектирования узлов РДТТ. — М.: Машиностроение, 1986. — С. 215.
8. Булгаков В. К., Липанов А. М., Камалетдинов А. Ш. // ЖХФ. — 1986. — 5, № 6. — С. 831.
9. Булгаков В. К., Липанов А. М., Вилунов В. Н. и др. О механизме отрицательной эрозии при горении твердых топлив // ФГВ. — 1989. — 25, № 4. — С. 32—35.
10. Регель В. Р. // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. — 1977. — 19. — № 9. — С. 1915—1923.

426000, г. Ижевск,
УдНЦ УрО РАН

Поступила в редакцию 27/IV 1992

УДК 532.598:678.01

А. З. Жук, А. В. Иванов, Г. И. Канель, О. К. Розанов

СЖИМАЕМОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

Методом манганиновых датчиков давления измерены ударная сжимаемость и скорость звука в стеклотекстолите марки КАСТ-В в интервале давлений до 22 ГПа. С помощью лазерного доплеровского измерителя скорости измерены волновые профили скорости свободной поверхности образцов при давлении ~ 1 ГПа. Оценены вязкость и откольная прочность материала.

В литературе имеется крайне ограниченное количество данных об ударной сжимаемости и реологических свойствах композитных материалов на полимерной основе. В работе [1] представлены результаты измерений ударной сжимаемости и исследована устойчивость ударных волн (УВ) в области давлений $p = 20 \div 40$ ГПа для трех композитных материалов на основе эпоксидного связующего с равномерно распределенными по объему алюминиевыми нитями диаметром 3 мм. Объемное содержание Al в образцах составляло 25, 40 и 65 %. Направление движения УВ совпадало с направлением волокон. Скорость звука в Al значительно больше, чем в эпоксидном связующем, поэтому участки УВ вблизи волокон в проведенных экспериментах опережали волну в связующем. В результате плоскостность ударного фронта нарушалась, он приобретал «волнистую» периодическую структуру. Измеренная ударная сжимаемость близка к расчетным значениям, полученным на основе принципа аддитивности с использованием известных ударных адиабат компонентов.

В [2, 3] приведены данные по ударной сжимаемости и откольной прочности стеклопластика АГ-4, стеклотекстолита, асботекстолита и текстолита. Нагружение осуществлялось в направлении, перпендикулярном

слоям наполнителя. Разрушение происходило в результате расслоения материала. Полученные значения откольной прочности композитных материалов находятся в пределах 0,1—0,3 ГПа, что близко к откольной прочности полимерных связующих [4]. С увеличением начальной температуры образцов от 0 до 130 °С откольная прочность материала несколько возрастает, что объясняется снижением хрупкости связующего. Установлено, что центрами разрушения являются поры, присутствующие в исходной структуре материала. Композитный материал на основе кевлара с эпоксидным связующим исследовался в [5]. Здесь откольная прочность материала оценивается величиной 0,05 ГПа. Предполагается, что центры разрушения — цилиндрические поры, образованные в результате разрывов нитей наполнителя.

В экспериментах [6] наряду с ударной адиабатой определена адиабата расширения ударно-сжатого текстолита. Установлено наличие гистерезиса цикла сжатие — разгрузка, подобного наблюдавшемуся для оргстекла [7, 8]. Гистерезис указывает на наличие значительных девиаторных напряжений, т. е. поведение материала существенно отличается от гидродинамического. В работе [9] приведены результаты исследований ударной сжимаемости углепластика до $p = 44$ ГПа. По известным ударным адиабатам компонентов с использованием правила аддитивности [10] построены уравнение состояния и ударная адиабата композита. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Таким образом, анализ известной литературы позволяет говорить о том, что по крайней мере в области высоких давлений (порядка десятков гигапаскалей) расчет ударных адиабат композиционных материалов с полимерными наполнителями может быть проведен на основе правила аддитивности. Информация об условиях разрушения данного класса материалов крайне скудна и носит противоречивый характер.

Цель данной работы — исследование ударной сжимаемости стеклотекстолита КАСТ-В. Измерены также скорости звука за фронтом УВ и оценена откольная прочность материала.

Стеклотекстолит КАСТ-В (ГОСТ 102-92-74) представляет собой слоистый материал, изготовленный на основе связующего ВФБ-1 (модифицированная фенольная смола резольного типа) со стабилизирующей добавкой. В качестве наполнителя используется стеклоткань ГОСТ 19170-73. Максимальная плотность стеклотекстолита КАСТ-В в соответствии с ГОСТом не должна превышать 1,85 г/см³. Опыты проводились с материалом плотностью 1,78—1,80 г/см³.

Ударная сжимаемость и скорость звука при $p = 5 \div 22$ ГПа измерялись манганиновыми датчиками давления [11]. Образцы нагружались через экран из дюралюминия Д16Т ударом алюминиевых пластин. Для ускорения пластин-ударников использовались взрывные устройства. Первый датчик устанавливался на границе между экраном и образцом, второй — внутри составного образца (рис. 1). Для уменьшения влияния неоднородности ма-

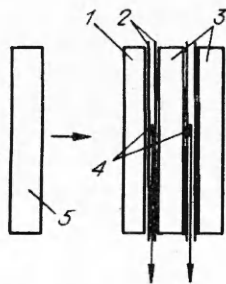


Рис. 1. Схема опытов.
1 — экран; 2 — изолирующие прокладки; 3 — образец; 4 — датчики; 5 — ударник.

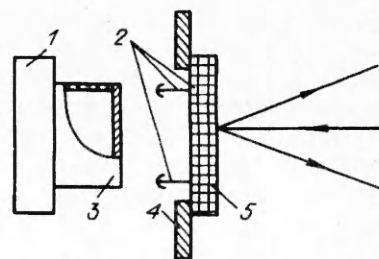


Рис. 2. Схема опытов с использованием доплеровского измерителя скорости.

1 — ствол пушки; 2 — датчики для измерения скорости ударника и запуска регистрирующей аппаратуры; 3 — снаряд с ударником; 4 — держатель сборки; 5 — образец.

Таблица 1

Δ_y , мм	u_y , км/с	Δ_z , мм	l , мм
4,0	0,222	—	—
6,8	0,317	—	—
4,0	1,5	3,95	4,75
10,0	2,5	3,95	8,28
3,9	3,8	3,95	4,75

Примечание. Δ_y , Δ_z — толщина ударника и экрана, u_y — скорость ударника, l — расстояние между датчиками.

Таблица 2

u_y , км/с	p , ГПа	D , км/с	u , км/с	v , см ³ /г	c , км/с
0,222	0,88	3,07	0,16	0,532	—
0,317	1,32	3,22	0,23	0,522	—
1,5	7,6	4,00	1,06	0,411	4,65
2,5	13,5	4,57	1,66	0,357	5,73
3,8	21,6	5,67	2,13	0,349	6,96

Примечание. D — скорость ударной волны, u — массовая скорость, v — удельный объем, c — скорость звука.

материала на измерения датчики отделялись от образца фторопластовыми прокладками, суммарная толщина которых для каждого датчика не превышала 0,17 мм.

Профили скорости свободной поверхности стеклотекстолита при $p = 0,8 \div 1,3$ ГПа измерялись методом лазерного доплеровского интерферометра [11]. Образцы нагружались с помощью пороховой ствольной установки (рис. 2) при скорости алюминиевых снарядов 200—400 м/с. Для отражения зондирующего измерителя скорости на поверхность образца наклеивалась алюминиевая фольга толщиной 40 мкм. Расчет массовой скорости по измеренной скорости свободной поверхности проводился в предположении выполнения правила удвоения [12]. В опытах с давлением УВ 0,8—7,6 ГПа образцы сохранялись. Разрушение имело послойный характер и локализовалось в связующем.

В опытах с давлением ударного сжатия до 1,3 ГПа стеклотканевые прослойки оставались практически неповрежденными. Откольная пластина не образовывалась, материал как бы распухал в большом объеме, но окончательно не развязывался на несвязанные между собой слои.

В табл. 1 приведены геометрические характеристики экспериментальных сборок, в табл. 2 — условия нагружения, а также результаты измерения ударной сжимаемости стеклотекстолита и скорости звука. Полученные данные об ударной адиабате стеклотекстолита КАСТ-В аппроксимируются уравнением $D = 2,73 \div 1,27 u$ (км/с).

На рис. 3 приведены типичные волновые профили давления, измеренные в условиях нагружения образцов стеклотекстолита. Волновые профили не обнаруживают явного выделения упругих предвестников в волнах сжатия и разрежения. Подъем, видимый на верхних участках профилей, наблюдается одновременно на осциллограммах обоих датчиков и связан скорее с состоянием ударника или деформацией датчика в неоднородном материале, а не с релаксационными процессами в образце.

Результаты измерения ударной сжимаемости материала показаны на рис. 4 в виде зависимостей скорости ударной волны D и скорости звука c от массовой скорости u , а также ударная адиабата стеклотекстолита из [3].

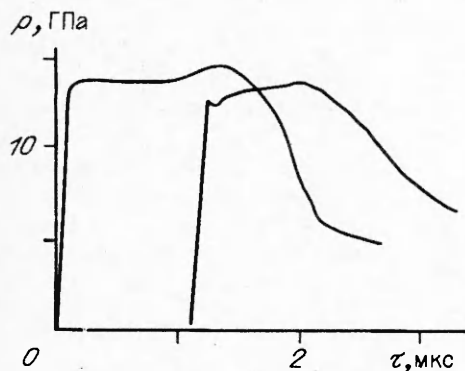


Рис. 3. Профили давления при 13,5 ГПа.

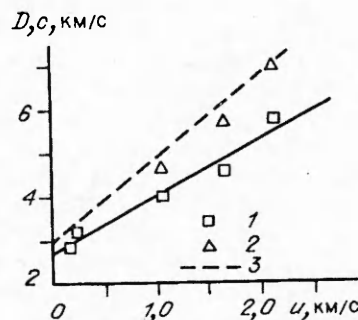


Рис. 4. Зависимость скорости ударной волны и скорости звука от массовой скорости.

1 — ударная адиабата стеклотекстолита КАСТ-В; 2 — скорость звука; 3 — ударная адиабата стеклотекстолита [3].

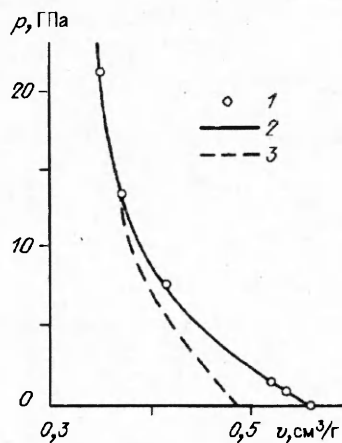


Рис. 5. Ударная адиабата и траектория разгрузки стеклотекстолита КАСГ-В.

1 — эксперимент; 2 — сглаженные значения ударной сжимаемости; 3 — траектория разгрузки.

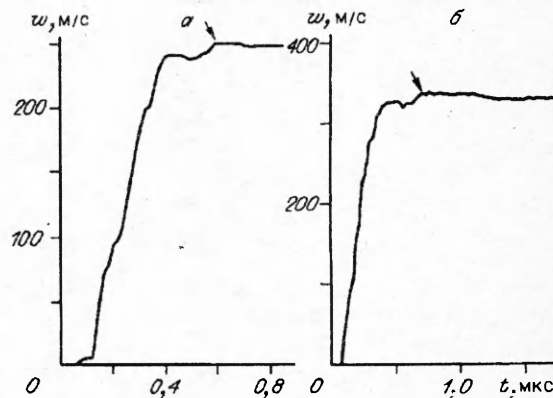


Рис. 6. Профили скорости свободной поверхности при $p = 0,88$ ГПа; толщина ударника 1,3 (a) и 4 мм (б).

Ударная адиабата исследовавшегося материала в координатах p, v представлена на рис. 5. Там же приведена траектория изменения состояния при разгрузке, которая была рассчитана по профилям $p(t)$, полученным в опыте с ударником толщиной 10 мм. Изменение удельного объема рассчитывалось по измеренным давлению и скорости звука в приближении простой волны по формуле

$$\Delta v = -\Delta p / \rho_0^2 a^2,$$

где $\Delta v, \Delta p$ — приращения давления и объема; ρ_0 — начальная плотность; a — фазовая скорость распространения возмущений между датчиками в волне разгрузки при разных уровнях давлений. Расчет проводился в координатах Лагранжа $h = \rho_0 x / \rho$ (ρ — текущая плотность; x и h — координаты Эйлера и Лагранжа).

Из рис. 5 видно, что как и в случаях текстолита [6] и плексигласа [7, 8], траектория изменения состояния при разгрузке проходит заметно ниже ударной адиабаты материала. Причиной гистерезиса является, очевидно, вклад девиаторных напряжений материала в условиях высокоскоростного одномерного деформирования.

Профили скорости свободной поверхности (рис. 6) регистрировались при разных толщинах ударников δ . При малых δ УВ в образце затухает. В диапазоне $\delta = 2,5 \div 6,8$ мм скорость свободной поверхности при заданных условиях нагружения не изменялась.

Откольный импульс на профилях скорости поверхности не заметен. Время нарастания параметров во фронте УВ с интенсивностью 0,8 ГПа в стеклотекстолите составляет ~ 250 нс. Вслед за передним фронтом волнового профиля наблюдается небольшой подъем скорости (обозначен стрелками) и далее значение w практически постоянно.

Зная время нарастания параметров во фронте УВ, можно оценить сдвиговую вязкость исследуемого материала η . Сдвиговое напряжение в стационарной УВ определяется отклонением прямой Михельсона от ударной адиабаты [11]. Сдвиговое напряжение τ связано со скоростью деформации $\dot{\epsilon}$ соотношением $\tau = \eta \dot{\epsilon}$. Взяв в качестве ударной адиабаты кривую, аппроксимирующую опытные данные по ударной сжимаемости стеклотекстолита, и рассчитав скорость деформации по формуле $\dot{\epsilon} = -[\ln(v/v_0)]/t$, где t — время нарастания скорости, получим $\eta \approx 100$ Па·с при скорости деформирования $0,24 \cdot 10^6$ с $^{-1}$. Вязкость стеклотекстолита находится в промежутке между значениями, характерными в данном интервале давлений для металлов и полимеров [11, 13].

Стеклотекстолит представляет собой набор слоев стеклоткани, пропитанных полимерным связующим. Толщина каждого слоя стеклоткани $\sim 0,3$ мм. Толщина прослоек сопоставима с характерными размерами неровностей стеклоткани, определяемыми типом плетения и толщиной нитей и не превышает толщину стеклоткани. Таким образом, материал представляет собой набор чередующихся параллельных пластин с различными динамическими жесткостями [14]. Многократные отражения волн на границах между слоями должны вызывать размытие фронта волны сжатия в материале в целом. С другой стороны, вследствие затухания возмущений увеличение ширины волны сжатия не может быть очень большим и в какой-то момент времени ее профиль должен стабилизироваться. Соотношение между шириной волны сжатия и размером неоднородностей в настоящее время не ясно, однако вполне естественно предположить, что возмущения затухают на расстояниях, существенно превышающих размер неоднородностей, что и определяет ширину установившейся волны сжатия.

Отсутствие на профилях скорости откольного импульса заставляет предположить, что величина скачка скорости в нем была меньше разрешающей способности измерений. Можно, однако, оценить верхний предел откольной прочности, подставив в формулу для ее расчета $\alpha^* = 1/2c_0\rho_0\Delta v$ вместо скачка скорости в откольном импульсе Δv величину разрешающей способности. В наших опытах она была не хуже 10 м/с. Расчет показывает, что величина откольной прочности исследованного материала не превышает 0,02 ГПа.

Оценка откольной прочности, полученная в данной работе, согласуясь с результатами [8], а также с результатами статических испытаний [15], оказывается на порядок меньше значений, полученных в [3]. Неточность оценки минимальных разрушающих напряжений для полимерных композитов, исследованных в [3], может быть вызвана двумя причинами; регистрация начала разрушения проводилась визуально по наличию в образце макроповреждений, т. е. фиксировалось состояние развитого разрушения. Очевидно, что образование откольной пластинки соответствует финальной стадии разрушения, для развития которой необходимы большие напряжения или большее время действия нагрузки. С другой стороны, нельзя исключить, что при повышенных давлениях ударного сжатия откольная прочность материала снижается в результате его повреждения УВ. Известно, что откольная прочность полимеров составляет $\sim 0,1$ ГПа [4, 16]. Снижение прочности связующего в композитном материале объясняется наличием большого количества пор, поверхностных трещин и других дефектов, которые ослабляют материал прослойки и служат центрами разрушения.

Авторы благодарят А. Н. Ясонова за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Holmes B. S., Tsou F. K. // J. Appl. Phys. — 1972. — 43, N 3. — P. 957.
2. Астанин В. В., Романченко В. И. // Механика композиционных материалов. — 1984. — 4. — С. 731.
3. Голубев В. К., Новиков С. А., Соболев Ю. С. и др. // ПМТФ. — 1987. — № 6. — С. 140.
4. Голубев В. К., Новиков С. А., Соболев Ю. С. // Там же. — 1982. — № 1. — С. 143.
5. Tokhem R. E., Erlich D. C., Kobayashi T. // Shock compression of condensed matter, 1989. — P. 473.
6. Батьков Ю. Б., Новиков С. А., Сеницына Л. М. // Механика композит. материалов. — 1979. — 2. — С. 97.
7. Barker L. M., Hollenbach R. E. // J. Appl. Phys. — 1970. — 41. — P. 4208.
8. Молодец А. М., Канель Г. И. Динамическая характеристика плексигласа в волнах разгрузки // ФГВ. — 1976. — 11, № 4. — С. 628.
9. Бушман А. В., Ефремов В. П., Ломоносов И. В. и др. // ТВТ. — 1990. — 28, № 6. — С. 1232.
10. Алексеев Ю. Ф., Альтшулер Л. В., Крупникова В. П. // ПМТФ. — 1971. — № 4. — С. 152.
11. Бушман А. В., Канель Г. И., Ни А. Л. и др. Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий. — Черноголовка, 1988.

12. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.— М.: Наука, 1966.
13. Schuler K. W. // J. Mech. Phys. Solids.— 1970.— 18, N 4.— P. 277.
14. Гузь А. Н. Механика разрушения композиционных материалов при сжатии.— Киев: Наук. думка, 1989.
15. Справочник по пластическим массам/Под ред. В. М. Катаева и др.— М.: Химия, 1975.— Т. 2.
16. Пархоменко И. П., Уткин А. В. // Исследование свойств вещества в экстремальных условиях.— М.: ИВТАН, 1990.— С. 126.

127412, г. Москва,
Институт высоких температур
РАН

Поступила в редакцию 25/XII 1992

УДК 536.46

С. Ф. Евланов

МАКСИМАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ ВЗРЫВА БОГАТЫХ МЕТАНОКИСЛОРОДНЫХ СМЕСЕЙ

Измерено максимальное давление, развиваемое при самовоспламенении смеси $2\text{CH}_4 + \text{O}_2$ в закрытом нагретом сосуде при начальном давлении 11, 16, 21, 26 и 31 атм. Полученные в эксперименте величины сопоставлены с термодинамически рассчитанными на основании принципа сохранения плотности газовой среды до и после горения.

Горение богатых метанокислородных смесей лежит в основе современной технологии получения ацетилена и синтез газа и водорода в производствах метанола и аммиака [1, 2]. Экономически выгодно проводить процесс при повышенном (превышающем атмосферное) давлении, так как при этом существенно снижаются затраты на сжатие получаемого газа, необходимое для его дальнейшей переработки. Однако повышенное давление горючей смеси значительно увеличивает степень взрывоопасности процесса, одним из основных критериев которого является максимальное давление p_{max} , развиваемое при сгорании горючей смеси в закрытом сосуде [3]. Вероятность возникновения аварийной ситуации возрастает, если для лучшего обеспечения процесса теплом применяется предварительный подогрев метанокислородной смеси.

Цель настоящей работы — экспериментальное и расчетное определение p_{max} в условиях повышенного давления и предварительного подогрева метанокислородной смеси.

Эксперименты проводили методом перепуска исходной горючей смеси состава $2\text{CH}_4 + \text{O}_2$ в предварительно вакуумированную и нагретую до 420 °С камеру сгорания емкостью 1,2 л. Внутреннее пространство камеры представляло собою цилиндрической (диаметр 7 см) формы полость с закругленными концами. Камера сгорания имела наружный регулируемый электрообогрев, температура нагрева измерялась расположенной внутри камеры хромель-алюмелевой термопарой. Смесь в камеру сгорания перепускалась быстродействующим клапаном в течение 0,02—0,06 с. Установлен также обратный клапан, предотвращающий проскок пламени и переток газов из камеры в перепускную емкость при самовоспламенении смеси. Состав готовили по парциальным давлениям компонентов в смесителе цилиндрической формы с внутренним диаметром 7 см.

Достаточно полное смешение компонентов за счет их взаимной диффузии при давлении в смесителе около 150 атм не происходит по истечении даже нескольких суток из-за малого коэффициента диффузии при повышенном давлении. Поэтому применялись методы принудительного перемешивания. Смеситель устанавливали вертикально, а свободноконвективное движение газовой среды создавали подогревом до 40—80 °С у нижнего и охлаждением у верхнего конца смесителя. Однако в большинстве эксперимен-