



а, б — кадры высокоскоростной съемки; *а* — светящиеся газовые пузыри предшествуют образованию трещин; *б* — выход газа из трещины; *в* — вид отдельной трещины ($\times 6$), рядом часть поверхности трещины ($\times 24$); *г* — вместо трещины в нагретом материале раздувается газовый пузырь ($\times 6$)

О РАЗРУШЕНИИ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ И РАСКЛИНИВАНИЕ МАТЕРИАЛА ГАЗОВЫМ ДАВЛЕНИЕМ

*Г.И.Баренблатт, Н.Н.Всеволодов, Л.И.Миркин,
Н.Ф.Пилипецкий, Ю.П.Райзер*

В большинстве случаев область разрушения прозрачных материалов под действием сфокусированного лазерного излучения представляет собой совокупность трещин [1-3]. Существуют две точки зрения на механизм разрушения. 1. Трещины образуются исключительно под действием гиперзвуковых волн, генерируемых при вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна [4]. 2. Разрушения являются следствием поглощения света, сопровождающегося образованием очагов высокой температуры [5]. Теория и опыт не позволяют пока однозначно определить роли (и характер взаимодействия) этих двух механизмов при разрушении материала.

Ниже приводятся результаты экспериментов с материалами типа органического стекла (полиметилметакрилат, полистирол). Опыты свидетельствуют о возникновении очагов высокой температуры и давления в виде газовых пузырьков, расширение которых приводит к расклиниванию материала и образованию трещин.

Типичные высокоскоростные фотографии процесса разрушения в образце полистирола представлены на рисунке (а, б). Из рисунка (а) видно, что к моменту времени 30 мксек от начала генерации, в области фокуса возникли две светящиеся точки – очаги высокой температуры. Торцы образца вне кадра. Свечение фотографировалось через боковую поверхность образца, под углом 90° к направлению луча. Из двух светящихся точек на кадре рисунка (а), 30 мксек, правая – совпадает с местоположением фокусной точки. К моменту времени 60 мксек эти две светящиеся точки уже дали начало зарождению трещины (по форме напоминающей наконечник копья). К этому же моменту времени чуть сзади фокуса (ближе к линзе) образовались три новые светящиеся точки. На последующих кадрах видно, как на этом месте разрастается темная полость – трещины. Разрушения нарастают навстречу лучу, направление которого показано стрелкой. Линейные размеры трещин перестают расти через время ~ 300 мксек (длительность импульса – 800 мксек). На последнем кадре показан снимок окончательного разрушения.

В том, что трещины расклиниваются нагретым газом, убеждает нас следующая серия фотографий (см. рисунок (б)). В этом опыте точка фокуса

и условия съемки были выбраны таким образом, чтобы трещина в процессе роста вышла на фотографируемую боковую поверхность образца (момент 120 мксек после начала генерации, точка "Т" со стрелкой). Видно, как через образовавшееся отверстие ударил фонтан газа (облако газа указано буквой "О" и стрелкой). Истечение газа (легкий дымок) можно было наблюдать невооруженным глазом. Кроме того, при выходе трещины на поверхность газ, как правило, опалает окружающую часть поверхности образца, что тоже хорошо видно. Начальная скорость газового облака, оцененная по фотографиям, равна ~250 м/сек, спустя 80 мксек облако расширяется со скоростью ~80 м/сек. Начальная скорость роста трещины, оцененная по фотографиям, равна ~65 м/сек. Скорость падает до малой величины к 150 мксек.

В ряде случаев трещины имеют волнообразную поверхность (см. рисунок (в)), которая указывает на то, что они распространяются скачками. Такая волнообразная поверхность разрушения получается и искусственно при медленном вдвигании клина, за счет неустойчивости стационарного распространения трещин и возникновения автоколебаний [6].

Механизм разрушения представляется нам следующим образом: вначале вследствие нагревания и, возможно, действия гиперзвука, в области светового канала возникают динамические напряжения. В плоскостях наибольшего касательного напряжения, наклоненных под углом ~45° к оси возмущения, т.е. оси луча, образуются мельчайшие сдвиговые дефекты. Далее, в имеющихся неоднородностях происходит поглощение света, материал испаряется, частично сгорает и это ведет к образованию газовых пузырьков с высокими давлением и температурой. Под действием давления газа вблизи пузырьков создаются большие напряжения и начинается развитие трещин, которое идет, в основном, за счет расклинивания газом ранее образовавшихся сдвиговых дефектов. В ходе расширения трещины горячий газ обугливает его стенки, что способствует дальнейшему поглощению света и дополнительному нагреву газа. Вследствие поглощения, а также отражения света на образовавшихся трещинах происходит экранирование других трещин, расположенных ближе к фокусу: последние всегда имеют меньшие размеры.

Предполагая, что при распространении трещины давление газа в основной части поверхности трещины постоянно и резко уменьшается за счет вязкости лишь в узкой зоне резкого сужения трещины, вблизи ее края, получим (см. [7]) для радиуса трещины R выражение: $R = k^2 / 2p^2$; где p — текущее давление газа, $k = [\pi E \gamma / (1 - \nu)^2]^{1/2} \sim 3 \cdot 10^6$ дин/см^{3/2} модуль сцепления; γ — поверхностное натяжение материала; $E \sim 2 \cdot 3 \cdot 10^{10}$ дин/см² модуль Юнга; $\nu \sim 0,3$ — коэффициент Пуассона. Текущий объем трещины V — приближенно равен: $V = 4k^3 / E p^2$. Исключая отсюда p , можно связать между собой важные параметры трещины V и R : $V = 8k R / E$.

Изложенные соображения о механизме развития трещин подтверждаются результатами изучения разрушений в нагретых образцах [8]. При возрастании температуры резко возрастает вязкость, и материал теряет хрупкость. Расклинивания материала при этом не происходит, а наблюда-

ется раздувание газовых пузырей (см. рисунок (2)), любезно предоставленный нам Н.П.Новиковым).

Для получения полной информации о механизме разрушения, а также для оценок динамических параметров по вышеприведенным соотношениям необходимо знать текущую массу газа, который заполняет полость и его температуру. Мы надеемся получить часть недостающей информации путем высокоскоростных измерений температуры газовых пузырей. Эти измерения, которые ведутся в настоящее время, позволяют также получить сведения и о поглощении лазерного излучения в веществе.

Институт проблем механики
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
28 октября 1966 г.

Литература

- [1] Д.И.Маш, В.В.Морозов, Б.С.Старунов, Е.В.Тиганов, И.Л.Фабелинский. Письма ЖЭТФ, 2, 5, 1965.
- [2] Т.М.Аверьянов, Л.Н.Миркин, Н.Ф.Пилипецкий. ПМТФ, № 1, 1966; А.И.Акимов, Л.Н.Миркин, Н.Ф.Пилипецкий. Механика полимеров, № 4, 1966.
- [3] Б.М.Ашкинадзе, В.И.Владимиров, В.А.Лихачев, С.М.Рывкин, В.М.Салманов, И.Д.Ярошецкий. ЖЭТФ, 50, 1187, 1966.
- [4] R.Y.Chiao, C.H.Townes, B.P.Stoicheff. Phys.Rev.Lett., 12, 592, 1964.
- [5] D.H.Narper. Brit. J.Appl. Phys., 16, 751, 1965.
- [6] Г.И.Баренблатт, Р.Л.Салганик. ПММ, № 3, 6, 1963.
- [7] Г.И.Баренблатт. ПМТФ, № 4, 1961.
- [8] Н.Н.Всеволодов, Н.П.Новиков, Ю.И.Юдин. ПМТФ, 1967 (в печати).