

РАЗРУШЕНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ МОЩНЫМИ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

© 1995 г. А. Г. Мусатов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
199899 Москва, Воробьевы горы, МГУ

Поступила в редакцию 22.02.94 г.

Проведено экспериментальное исследование механизмов разрушения твердотельных образцов мощными ультразвуковыми импульсами. В условиях, когда кавитация мала либо подавлена, основной причиной деструкции твердотельных образцов является тыльный откол. На примере канифоли продемонстрирована динамика процесса разрушения. Область повреждений возникала на тыльной стороне образцов. Сила разрушений определялась соотношением импедансов материала и окружающей среды. Использовались акустические пучки с пиковым давлением до 1200 атм и длительностью импульсов 0.5 мкс.

Одним из приложений мощного ультразвука является возможность разрушения твердых тел. В настоящее время данная возможность реализуется в разрушении почечных и желчных камней в теле человека с помощью фокусированных мощных акустических импульсов. В 1980 г. был впервые введен в клиническую практику выполняющих указанные функции прибор – литотриптер. Начиная с этого момента обсуждению механизмов разрушения уделяется много внимания на международных акустических симпозиумах [1, 2], однако до сих пор так и нет окончательной ясности относительно причин разрушения камней [2, 3]. Исследование механизмов разрушения материалов является перспективным направлением современной нелинейной акустики и чрезвычайно актуально, поскольку их понимание позволило бы оптимизировать режим работы литотриптеров, уменьшить вредные побочные эффекты и может быть положено в основу поиска принципиально новых способов удаления конкрементов из организма человека. К настоящему времени различают два основных механизма – разрушение под прямым воздействием ударной волны и разрушение, обусловленное наведенной этой волной кавитацией.

Первый механизм вызывает откол фрагментов камня с его тыльной стороны. Этот эффект связан с изменением полярности волны при ее отражении от тыльной поверхности камня. Кроме того, важную роль может сыграть структура камня, наличие в нем “слабых” мест: слоев, пор, трещин. При этом разрушение может произойти и внутри камня, и на его передней поверхности. В данном случае термодеструктивное воздейст-

вие на конкременты оказывается несущественным даже при достаточно долгом и частом воздействии мощными импульсами [4].

В настоящей работе проведено исследование откольного механизма разрушения твердотельных образцов. В качестве материала образцов было предложено использовать канифоль, имеющую ряд преимуществ перед другими материалами. Во-первых, канифоль является хрупким веществом, что свидетельствует о низком пороге разрушения. Во-вторых, канифоль прозрачна, а это позволяет наблюдать в динамике процесс разрушения образцов. И в-третьих, канифоль легко плавится, что дает возможность простого изготовления образцов заданной формы. Условия, в которых проводился эксперимент (дегазированная дистиллированная вода, практически идеальная поверхность выплавленных образцов, одиночные ударные импульсы сжатия с известными параметрами), позволили свести к минимуму возможность проявления кавитационных механизмов разрушения и исследовать прямое воздействие ударных волн.

Рассмотрим подробнее процесс, происходящий в образце под действием мощного монополярного импульса. Пусть из среды 1 на плоскопараллельную твердотельную пластинку 2 падает треугольный импульс сжатия с ударным фронтом и пиковым давлением P_s . За пластиной находится среда 3. На границе раздела первой и второй сред будет происходить частичное отражение и прохождение внутрь пластинки акустического возмущения. Прошедший импульс имеет ту же форму и длительность, что и падающий, а пиковое давление $P_s^{пр}$ определяется импедансами граничных

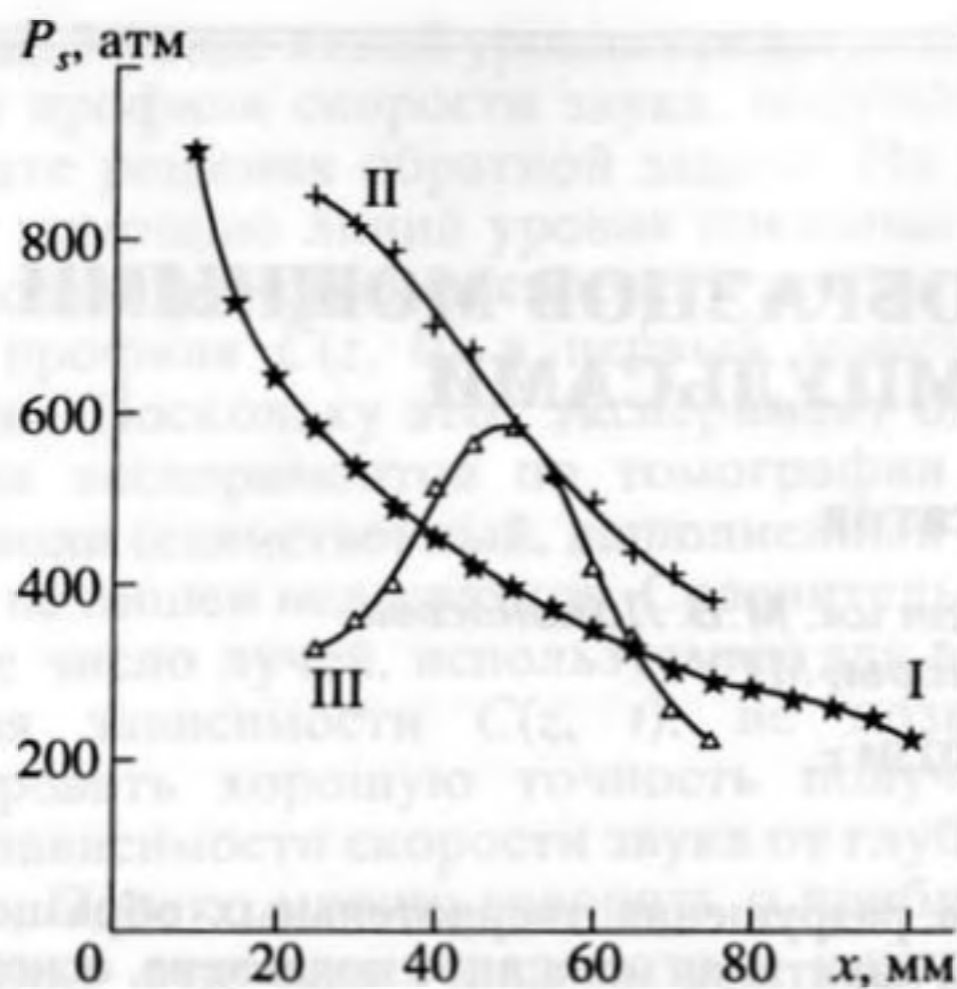


Рис. 1. Экспериментальная зависимость пикового давления P_s вдоль оси от расстояния до излучателя x для режимов I - III генерации.

сред и выражается через коэффициент прохождения T [5] формулами

$$P_s^{np} = P_s T, \quad T = 2Z_2 / (Z_2 + Z_1),$$

где Z_1 и Z_2 – импедансы первой и второй сред.

Прошедший импульс есть импульс сжатия. Если он настолько велик, что его амплитуда превосходит порог разрушения твердого тела, то его распространение по образцу сразу приведет к разрушению последнего и быстрой потере энергии импульса. Это вызовет появление областей разрушения на поверхности пластины, обращенной к падающему импульсу. Если же амплитуда прошедшей волны меньше порога разрушения на сжатие и если акустическое затухание для характерной частоты импульса невелико на расстоянии порядка толщины пластины, то можно считать, что прошедший импульс дойдет до второй границы пластины, практически не изменившись.

Аналогичный процесс повторится на тыльной поверхности (границе второй и третьей сред). Нас интересует переотраженный (P'_s) от границы импульс, идущий обратно в среду 2. Его пиковое давление выражается следующим образом [5]:

$$P'_s = P_s^{np} R,$$

где $R = (Z_3 - Z_2) / (Z_3 + Z_2)$ – коэффициент отражения от второй границы. Можно видеть, что полярность отраженного импульса определяется соотношением импедансов третьей среды Z_3 и второй среды Z_2 . Если $Z_3 > Z_2$, то $P'_s > 0$ и мы имеем импульс сжатия. При $Z_3 \approx Z_2$ $|P'_s| \ll P_s^{np}$. Для $Z_3 < Z_2$ отражаться будет импульс разрежения, обладающий меньшей амплитудой, но сравнимой с пиковым давлением падающего сигнала. Данная

амплитуда разрежения может оказаться достаточной, чтобы превысить порог разрушения твердого тела на растяжение. Именно эта ситуация реализуется в откольном механизме разрушения.

Отраженный импульс двигается навстречу падающему и интерферирует с ним. Наложение импульсов происходит в тонком приграничном слое толщиной порядка длины импульса в твердом теле λ . Следовательно, отраженный импульс проявит свое разрушающее воздействие не на самой граничной поверхности, а на удалении от нее вглубь на расстояние порядка λ . Иначе говоря, при толщине пластины, много большей длины импульса, область разрушения должна наблюдаться на тыльной стороне. Кроме того, сила разрушения должна зависеть от импеданса граничной с тыльной стороны среды: чем меньше Z_3 , тем значительнее будет разрушение.

С целью оптимального подбора граничных сред и для уверенности в возможности использования достаточно толстых пластин предварительно были проведены измерения импеданса и затухания в канифоли. Определенные величины составили: плотность 1070 кг/м^3 , что очень близко к плотности воды; скорость звука 2340 м/с ; импеданс $Z = 2.5 \times 10^6 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$; спектральная зависимость коэффициента затухания α в диапазоне $1 - 5 \text{ МГц}$ менялась плавно от 0.6 до 1.0 см^{-1} .

Следовательно, при прохождении пластинки толщиной в несколько миллиметров ослабление импульса будет не очень большим.

Техника изготовления образцов заключалась в следующем. Обычная канифоль подвергалась двойной переплавке в тигле, но не доводилась до кипения, так как оно приводит к ухудшению прозрачности канифоли. Повторение переплавки необходимо для удаления пузырьков воздуха, изначально присутствующих в канифоли. Затем жидкая канифоль разливалась в специальные формочки из алюминия и охлаждалась. Таким образом производились три типа образцов. Первые два – круглые пластинки толщиной 5 мм с диаметрами 15 и 25 мм , а третий – прямоугольные параллелепипеды размером $20 \times 15 \times 10 \text{ мм}$.

В работе использовали три режима генерации импульсов: I – соответствует нефокусированному пучку с диаметром 20 мм , исходной длительностью импульса 0.5 мкс и пиковым давлением 1200 атм ; II – фокусированный пучок (радиус фокусировки $R = 50 \text{ мм}$) с теми же параметрами; III – фокусированный пучок ($R = 50 \text{ мм}$) с исходными диаметром 40 мм и пиковым давлением 250 атм .

Экспериментально определенная зависимость пикового давления от расстояния от излучателя x вдоль оси для I - III режимов приведена на рис. 1. Как видно, режимы I и II имеют монотонно спадающую зависимость, в то время как режим III характеризуется усилением в фокальной области.

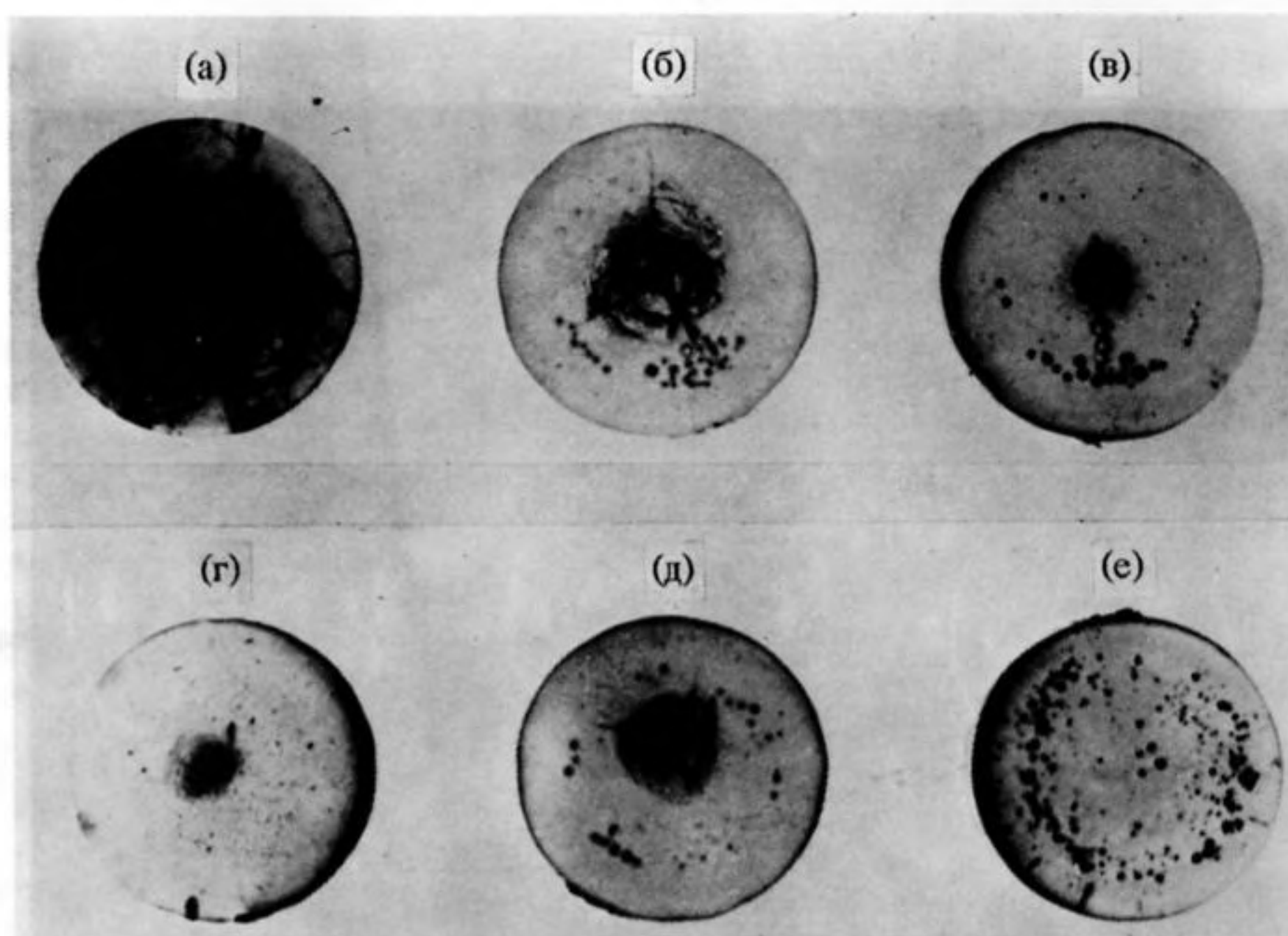


Рис. 2. Визуализация силового воздействия импульсных пучков ($N = 6$) для режимов II (а, б, в) и III (г, д, е) при значениях x , равных 25 (а, г), 50 (б, д) и 75 мм (в, е).

В фокальной точке $x = R = 50$ мм величины пиковых давлений режимов II и III совпадают, хотя исходные амплитуды давлений отличаются почти в 5 раз, что достигнуто лишь за счет удвоения начальной апертуры пучка. Такое поведение акустических пучков формируется под воздействием нелинейных эффектов – саморефракции и нелинейного поглощения. Подробно влияние этих эффектов на распространение и фокусировку мощных импульсных пучков было исследовано теоретически и экспериментально в [6, 7]. Схема экспериментальной установки описана в [8]. Для оценок поперечных границ пучков были определены диаметры пучков I - III режимов по уровню пикового давления $1/e$ в сечениях $x = 25, 50$ и 75 мм. Количественные результаты составили соответственно: 25, 30 и 36 мм для режима I; 18, 16 и 22 мм для режима II и 16, 5 и 13 мм для режима III.

Продemonстрируем возможности канифоли как материала для исследования и визуализации силового воздействия пучков ультразвуковых импульсов. Фиксируем в пучке три плоскости с координатами $x = 25, 50$ и 75 мм, в которые поместим образцы из канифоли. Состояние образцов после воздействия шести импульсов представлено на рис. 2. Канифольные пластинки сняты на фотопленке МИКРАТ-300, обладающей повышенной чувствительностью в красной области спектра, в которой канифоль прозрачна. Пластинки подсвечивались снизу, т.е. фотографирование велось на просвет. Зоны разрушения видны как темные пятна и трещины в центре образцов.

Чем мощнее падающий импульс, тем большие разрушения в образце он вызывает. Образец а эффективно разбит практически по всему объему, б – деструкция охватывает значительную область пластинки, в – разрушена лишь небольшая зона около центра. Количество разрушений монотонно спадает от а к в, что соответствует монотонному поведению зависимости пикового давления режима II вдоль оси (рис. 1).

Количество импульсов N выбирается так, чтобы сравнение образцов друг с другом было наиболее показательным. Визуализация режима III представлена пластинками г - е. Разрушение образца г меньше, чем образца д, а пластинка е осталась целой. Этот факт отражает кривая III (рис. 1) этого режима.

Следует отметить, что амплитуды P_s для пластинок б и д равны, но область разрушений в последней несколько меньше. Это объясняется тем, что в режиме III акустический пучок эффективно фокусируется и обладает узкой перетяжкой в фокусе, которая обеспечивает высокую локальность силового воздействия на образец.

Как можно видеть, некоторые образцы содержат пузырьки воздуха, попавшие туда в процессе изготовления. Экспериментально было установлено, что присутствие пузырьков в канифоли лишь незначительно уменьшает порог разрушения образцов и практически не влияет на размер области разрушения. Поэтому, наряду с исследованием свободных от пузырьков пластинок, было решено использовать и эти образцы тоже.

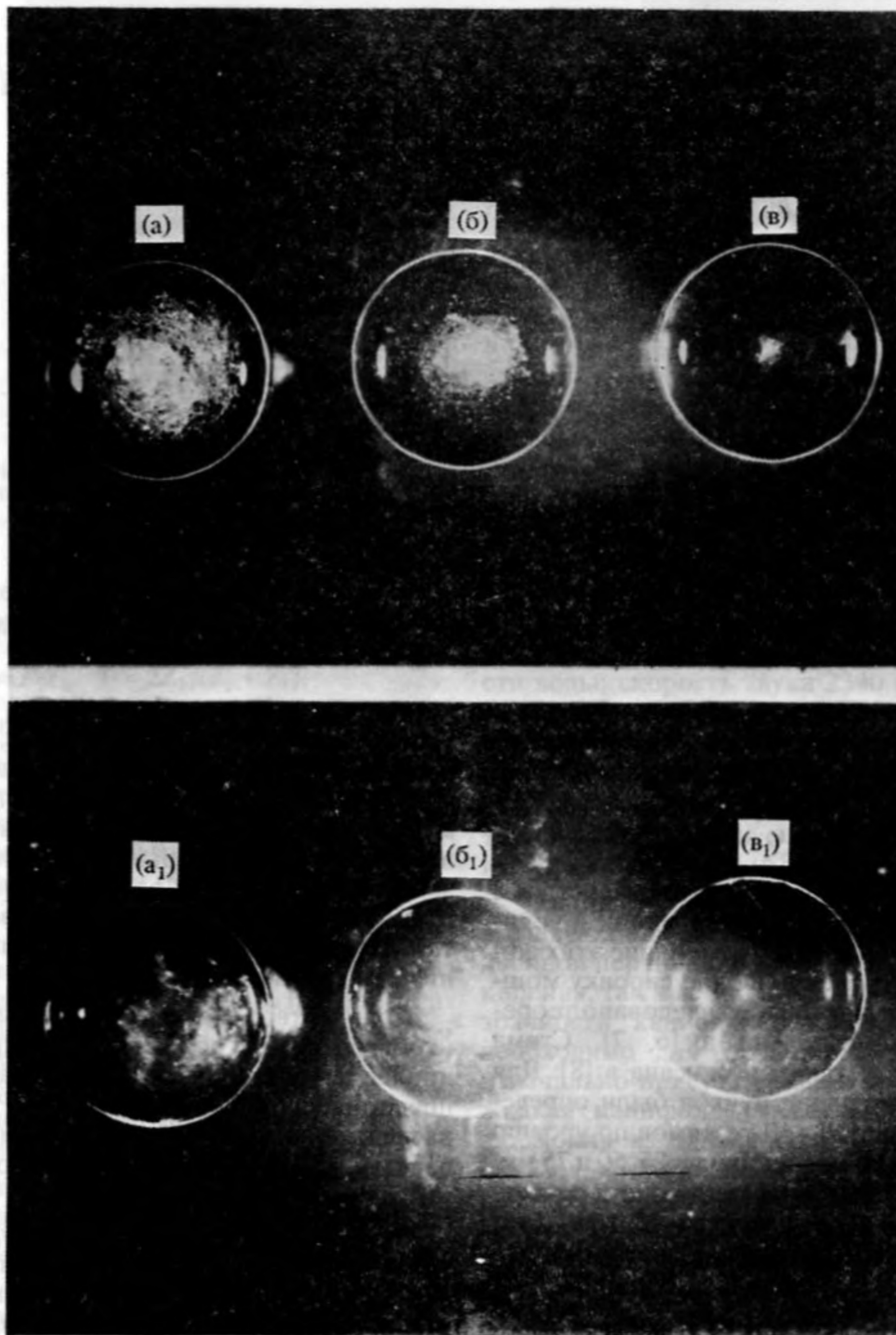


Рис. 3. Образцы канифоли в отраженном свете. а - в - вид с передней стороны, a_1 - v_1 - те же образцы с тыльной стороны. Режим I, $x = 50$ мм, $N = 3$ (а, a_1), 6 (б, b_1) и 10 (в, v_1).

Теперь рассмотрим процесс появления и роста области разрушения. В режиме I на расстоянии $x = 50$ мм помещались последовательно три образца и производилось $N = 3, 6$ и 10 импульсных запусков соответственно. Рис. 3 показывает эти образцы с передней (а - в) и тыльной (a_1 - v_1) сторон по отношению к падающему импульсу. Данная серия сфотографирована в отраженном све-

те, поэтому зоны разрушений видны как четкие белые пятна. Принципиально важным является тот факт, что передние поверхности всех трех образцов абсолютно целые, в то время как разрушение тыльной поверхности очень эффективно. Светлые нечеткие области в образцах а - в есть расположенные у тыльной поверхности зоны разрушения, видимые сквозь толщину образцов.

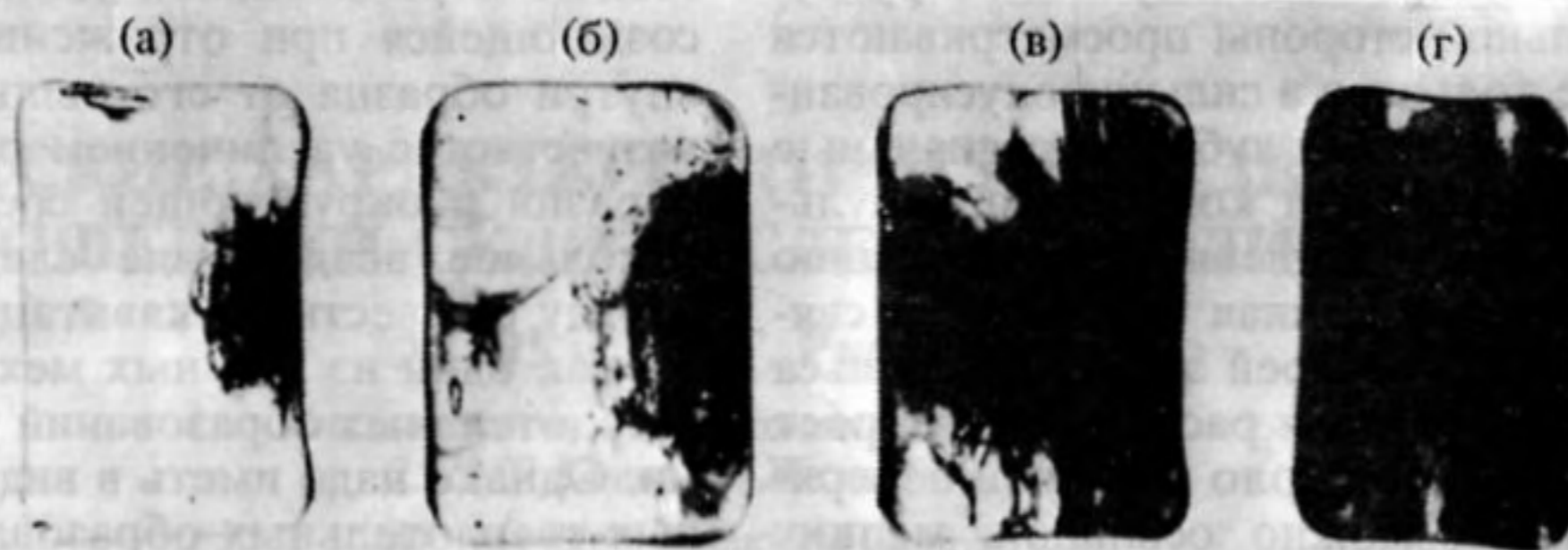


Рис. 4. Рост зоны разрушения. Вид сбоку, импульсы падали слева. Режим I, $x = 10$ мм; $N = 2$ (а), 3 (б), 6 (в), 10 (г).



Рис. 5. Влияние граничных сред на разрушение образцов: воздух (а), вода (б), глицерин (в). Режим I, $x = 50$ мм, $N = 3$.

Локализация разрушения на начальном этапе около тыльной поверхности пластинок характерна для всех исследованных образцов и режимов и свидетельствует о проявлении в первую очередь откольного механизма разрушения. Кроме этого, рис. 3 демонстрирует рост области разрушения при увеличении числа импульсов.

Эволюция зоны разрушения наглядно иллюстрируется прямоугольными образцами (рис. 4), сфотографированными сбоку, так что импульсы проходили их слева направо. Количество импульсов растет от а к г. Вначале появляется небольшая зона разрушений около тыльной грани, напоминающая диск (а). Далее эта зона растет как в диаметре, так и в толщю образца (б), общее количество трещин быстро увеличивается. Продолжая рост, зона доходит до передней грани и охватывает ее (в). Последующие импульсы приводят к преимущественному росту трещин на передней грани, хотя их появление в объеме образца полностью не прекращается. После 10 импульсов (г) трещины покрыли почти весь образец. Такое воздействие лишает образец прочности — он легко ломается в руках, а зона интенсивного разрушения при слабом надавливании рассыпается в песок.

В целом процесс разрушения образца выглядит следующим образом. Первый - третий импульсы вызывают появление еле заметных коротких трещин в форме плоского пятна, параллельного тыльной поверхности пластины. Это происходит на расстоянии около 0.5 мм вглубь от поверхности, которое примерно равно характерной длине импульса в канифоли. Последующие два - три импульса приводят к быстрому росту диаметра этого пятна, а продвижение разрушения в глубь образца выглядит как появление нового дискообразного пятна того же диаметра, располагающегося параллельно тыльной поверхности пластины на том же расстоянии, но уже от предыдущего пятна. Таким образом, вид сбоку напоминает образование параллельных эквидистантных слоев, продвигающихся в глубь образца. Можно предположить, что импульс претерпевает частичное отражение от последнего слоя, и в основе образования нового слоя лежит все тот же откольный механизм. Такой процесс имеет место только на начальном этапе эволюции зоны разрушения, так как последующие импульсы рожают множество трещин между слоями и на границе области, увеличивая ее диаметр. Зона становится матово-белой, совершенно непрозрачной и

продвигается к передней поверхности. При использовании нефокусированных пучков в структуре трещин с тыльной стороны просматриваются концентрические кольца, а в сильнофокусированных режимах образуются глубокие радиальные трещины. Дальнейший рост количества импульсов приводит к преимущественному разрушению передней поверхности. Данная особенность связана со значительной потерей энергии импульса на входе в образец, которая расходуется на рост образовавшихся трещин около передней поверхности. При этом возможно осыпание мелких фрагментов образца именно с передней поверхности, хотя в этом состоянии уже весь образец теряет прочность и может быть легко размят в пальцах на более мелкие фрагменты и песок.

Описанные выше серии испытаний проводились с прямоугольными образцами и пластинками диаметром 15 мм. Пластинки диаметром 25 мм использовались для исследования влияния граничных сред на силу разрушения образцов. В соответствии с описанием откольного механизма сила разрушения тыльной поверхности должна зависеть от соотношения импедансов граничной среды и материала пластинки: чем меньше импеданс среды, тем больше разрушение.

В эксперименте использовались три среды – воздух, вода и глицерин с импедансами (0.00, 1.50 и 2.43) $\times 10^6$ кг/(м² с) соответственно. Был выбран режим I генерации. Образцы представлены на рис. 5. Средой, из которой падали импульсы, для всех образцов была вода. Образец а изображает пластинку, имевшую с тыльной стороны воздушную границу. Обширная зона сильных разрушений занимает почти весь образец. Пластинка б, граничившая с водой, получила значительно меньшие разрушения. Помещение с обратной стороны пластинки в глицерин позволило сохранить ее совершенно целой, и она оставалась целой при увеличении количества импульсов до 10.

Таким образом, для исследования деструктивного воздействия мощных импульсов на твердотельные образцы в настоящей работе реализованы условия эксперимента, в которых влияние кавитационного механизма разрушения существенно ослаблено. Обнаружено, что в этих условиях механизмом разрушения образцов является

тыльный откол. Разрушение происходит под действием отрицательной динамической нагрузки, создающейся при отражении импульса сжатия внутри образца от его тыльной грани, которая возрастает с увеличением разности импедансов образца и окружающей среды. Следовательно, откольное воздействие следует рассматривать наряду с известным кавитационным воздействием как один из главных механизмов деструкции твердотельных образований ударными импульсами. Однако надо иметь в виду, что в более сложных твердотельных образованиях (таких как реальные конкременты, которые сильно анизотропны, имеют неровную шероховатую поверхность и твердостью значительно превосходят канифоль) проявление откольного механизма может быть ослаблено либо не столь явно выражено на фоне действия других механизмов разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cathignol D., Chapelon J.Y. High energy ultrasound therapy. Part I, II - Proc. XIII International Symposium on Nonlinear Acoustics. Bergen, Norway, 1993. P. 21 - 35.
2. Delius M. Effect of lithotripter shock waves on tissues and materials - Proc. XII International Symposium on Nonlinear Acoustics. Bergen, Norway, 1990. P. 31 - 46.
3. Андреев В.Г., Вероман В.Ю., Денисов Г.А., Руденко О.В., Сапожников О.А. Нелинейно-акустические аспекты экстракорпоральной литотрипсии // Акуст. журн. № 4. 1992. Т. 38. С. 588 - 593.
4. Filipczynski L. Estimation of the temperature increase in the focus of a lithotripter for case of high rate administration // Ultrasound Med. Biol. 1990. V. 16. № 2. P. 149 - 156.
5. Лепендин Л.Ф. Акустика. М.: Высш. школа, 1978.
6. Мусатов А.Г., Руденко О.В., Сапожников О.А. Учет нелинейной рефракции и нелинейного поглощения при фокусировке мощных импульсов // Акуст. журн. 1992. Т. 38. № 3. С. 502 - 510.
7. Мусатов А.Г., Сапожников О.А. Нелинейные эффекты при фокусировке акустических импульсов с ударным фронтом // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 3. С. 510 - 516.
8. Мусатов А.Г., Сапожников О.А. Фокусировка мощных акустических импульсов при различных углах раскрытия волнового фронта // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 2. С. 315 - 320.

Destruction of Solids by Powerful Ultrasonic Pulses

A. G. Musatov

An experimental investigation of the mechanism of destruction of solid samples by powerful ultrasonic pulses was performed. Under the conditions when the cavitation is weak or suppressed, the main cause of destruction of solid samples is rear fragmentation. The dynamics of the destruction process was displayed using rosin as an example. A destruction region appeared on the rear side of the samples. The degree of destruction was determined by the relation of impedances of the material and the surrounding medium. The acoustic beams had a peak pressure as high as 1200 atm and a pulse duration of 0.5 μ .