

В. М. ФИНКЕЛЬ, И. А. ГУЗЬ

УПРАВЛЕНИЕ ТРЕЩИНАМИ С ПОМОЩЬЮ УПРУГИХ ВОЛН

(Представлено академиком Ю. Н. Работновым 16 VII 1971)

Существующие методы торможения трещин немногочисленны, они описаны в (1). В настоящей работе предлагается использовать упругие импульсы, атакующие трещину под различными углами, в качестве инструмента, способного варьировать поле напряжений в вершине трещины и тем самым менять ее траекторию, а также вызывать временные или полные остановки процесса разрушения.

1. Изучалось поле напряжений в вершине статистической трещины при взаимодействии ее с волной напряжений сжатия. Исследования проводились поляризационно-оптическим методом в сочетании со скоростной киносъемкой. Установка собиралась на базе фоторегистора СФР-1. В качестве импульсного источника света использовалась лампа ИСШ-100-3, расположенная в фокусе конденсорной линзы. Малые размеры светящегося тела позволяют получить мощный, практически параллельный пучок лучей. Энергия вспышки более 3000 дж, длительность — 200 ÷ 250 мсек. Рабочее поле съемки 100 мм. Для получения чисто продольной плоской волны сжатия было разработано нагружающее устройство, в котором в результате взрыва проволоочки в воде ударная волна через столб жидкости передается на образец. Плоский фронт волны получен в результате установки взрывающейся проволоочки на расстоянии десяти диаметров от конца трубы. Образцы изготовлялись из полиметилметакрилата (плексигласа) в виде круглых дисков диаметром 180 мм и толщиной 18 мм. В вершине надреза легким ударом ножа зарождалась трещина. Для снятия внутренних напряжений производился отжиг в течение 4—5 суток при температуре 120° с последующим медленным охлаждением со скоростью 5 градусов в час.

Образцы подвергались импульсному нагружению волной сжатия. Варьирование ориентации трещины относительно направления волны позволило экспериментально исследовать поле напряжений в ее устье при различных угла атаки. Анализ кинограмм взаимодействия волны с трещиной, полученных при скоростях съемки до 480 000 кадров в секунду, показывает, что с выходом волны на фронт трещины в ее вершине формируется поле динамических напряжений, определяемое углом встречи. Максимальная концентрация напряжений достигается при распространении волны вдоль трещины по одному из ее берегов (рис. 1). В этом случае, в условиях приложения сдвиговой нагрузки, трещина поворачивает и распространяется под углом 80—85° к первоначальному направлению (рис. 2а). Аналогичным образом ведет себя трещина и в закаленной стали ШХ-15. Трещины в ней образовались термическими напряжениями в вершине надреза и достигали 7—10 мм. При нанесении удара волной сжатия по одному из берегов, трещина меняла направление на тот же угол.

Укажем, что напряжения, возникающие вследствие дифракции волны в условиях ее распространения вдоль одного из берегов трещины достигают максимальных значений через 40—50 мсек. Спустя еще 20—30 мсек. происходит собственно разворот основной трещины.

2. Исследовалось рассеяние упругих волн сжатия на замкнутых трещинах, имитируемых вырезом с соотношением длины и ширины как 8:1.

Нагружение осуществлялось взрывом в.в. на поверхности образца. Типичная кинограмма приведена на рис. 3. Концентрация напряжений в вершине трещины формируется в процессе дифрагирования волны, причем, по-видимому, сток энергии в теневую область происходит как для продольных и поперечных, так и для поверхностных волн.

Концентрация напряжений в вершине трещины определяется, как и в случае открытой трещины, взаимной ориентацией волны и разреза. Особенностью процесса является возникновение концентрации напряжений в дальнем по ходу волны крае надреза. Если в первой вершине происходит естественное формирование розеток напряжений, обусловленное взаимодействием вершины надреза и падающей волны сжатия, то во второй доминирующим является приток энергии вдоль полостей трещины. Речь идет о поверхностных волнах, зарождающихся в первой вершине и «стекающих» ко второй. После релаксации напряжений во второй вершине рэлеевские импульсы возвращаются к первой. Это приводит к поочередному подрастанию трещины на двух краях надреза. Для случаев ориентации в 30° и 60° поочередные пульсации напряжений и скачкообразное подрастание трещины происходит с интервалом примерно в 30 мсек., что соответствует скоростям распространения рэлеевских волн.

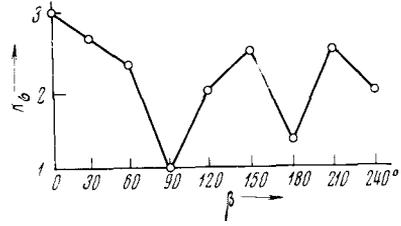


Рис. 1. Зависимость коэффициента концентрации напряжений в вершине трещины от угла падения β волн сжатия

Ранее механизм обмена энергией между краями замкнутой трещины и их поочередное подрастание был предложен одним из авторов (2).

При нормальном и продольном падении волны трещины растут в направлении исходного надреза. При любом другом угле атаки вторичные трещины растут из устья надреза вдоль падающей волны. Это указывает на принципиальную возможность управления трещиной путем сознательного искривления траектории ее распространения.

3. Изучалось взаимодействие поверхностных волн со стационарной макротрещиной. Используемые образцы содержали исходный надрез, конфигурация образца была такой, чтобы исключить попадание в устье трещины иных импульсов, кроме рэлеевского. Последний создавался взрывом заряда в.в., который устанавливался на расстоянии 140 мм от вершины трещины на полированной поверхности, являющейся продолжением трещины. Расстояние выбиралось из условия, что к моменту выхода рэлеевской волны на вершину трещины произойдет полное ее разделение с продольной и поперечной волной, а отраженные от краев образца волны не успеют прийти в кинематографируемую область. Момент съемки синхронизировался с приходом рэлеевской волны в исследуемую зону. В результате приложения

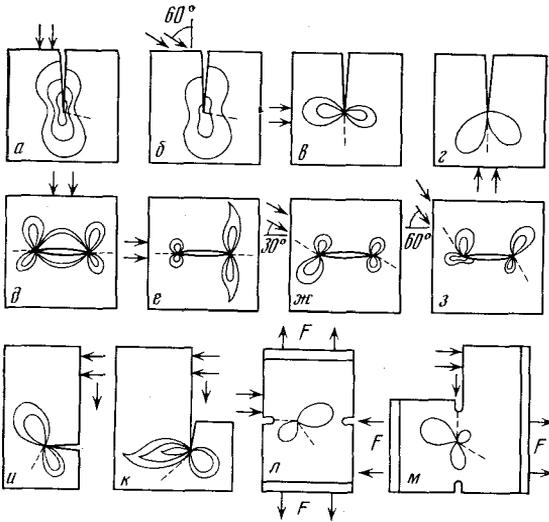


Рис. 2. Схема различных видов взаимодействия волн напряжений с трещиной

в вершине которого создавалась трещина. Конфигурация образца была такой, чтобы исключить попадание в устье трещины иных импульсов, кроме рэлеевского. Последний создавался взрывом заряда в.в., который устанавливался на расстоянии 140 мм от вершины трещины на полированной поверхности, являющейся продолжением трещины. Расстояние выбиралось из условия, что к моменту выхода рэлеевской волны на вершину трещины произойдет полное ее разделение с продольной и поперечной волной, а отраженные от краев образца волны не успеют прийти в кинематографируемую область. Момент съемки синхронизировался с приходом рэлеевской волны в исследуемую зону. В результате приложения

импульсной нагрузки вдоль поверхности полупространства распространяются упругие возмущения со скоростью рэлеевских волн (1190—1200 м/сек). Максимальная деформация импульса оказывается сосредоточенной в приповерхностном слое (до 30 мм) с максимумом на глубине 5 мм.

Рассматривались два варианта взаимодействия поверхностных возмущений с трещиной (рис. 2к, и). В первом направлении трещины совпадало с траекторией волны, во втором оно было нормально к нему. Анализ кинограмм (рис. 3) свидетельствует о том, что при выходе поверхностной волны на вершину трещины в ее окрестности возникает динамическое поле напряжений. Ориентация трещины существенно меняет распределение напряжений. В первом варианте максимальная концентрация напряжений возникает, когда вершины трещины достигает передняя часть розетки напряжений поверхностной волны. Приход основного возмущения особого вклада в распределение напряжений не вносит. При ориентации трещины по нормали к направлению движения волны максимальная концентрация напряжений возникает в момент достижения вершины основным возмущением. Вторичные трещины возникают в обоих случаях под углом в 80—85° и 275—280° к основной трещине.

Изменение упругой энергии за счет концентрации напряжений в вершине трещины свидетельствует о том, что полное время взаимодействия поверхностных волн с трещиной не превышает 25—35 мсек. При этом напряжения превышают динамический предел прочности в течение примерно 5—10 мсек. Скорость развития трещины достигает 300—700 м/сек.

Существенно, что в рассмотренных случаях поле динамических напряжений в вершине трещины при взаимодействии ее с поверхностными волнами оказывается несимметричным. Это означает неизбежность изменения не только скорости, но и траектории движения. Таким образом, асимметрия поля напряжений трещины, обусловленная распространением поверхностных волн лишь по одному из берегов, открывает возможность сознательного управления разрушением, однако лишь при мощностях поверхностного импульса, способных сформировать достаточное поле напряжений в окрестностях вершины трещины.

Представляет интерес управление быстро растущими трещинами. Принципиальная возможность этого проверялась следующим образом. Плексигласовые образцы нагружались статически, после чего взрывом в.в. в них зарождалась трещина и происходило ее распространение по вполне определенной траектории. Скорость трещины в этих условиях была ~300—400 м/сек. К моменту, когда длина ее достигала 30—50 мм и входила в зону кино съемки, повторный взрыв микроряда вводил в образец продольную или рэлеевскую волну. Первая вводилась по схеме рис. 2а, вторая — согласно рис. 2м.

По достижении волнами напряжений фронта трещины происходит следующее. Прежде всего, скорость трещины резко возрастает (ускорение составляет $2 \cdot 10^8$ см/сек²) и достигает 700—800 м/сек. Из симметричного поле напряжений трансформируется в явно асимметричное. Качественно этот процесс аналогичен тому, который наблюдается при взаимодействии волны напряжений со статической трещиной. Спустя 4—5 мсек. после того как волна настигает трещину и выходит на ее вершину, направление распространения разрушения изменяется на 45—60°.

Было также обнаружено, что при воздействии волн напряжений на магистральную трещину иногда наблюдается процесс ветвления, при котором зачастую возникало несколько трещин. В этих случаях скорость распространения образовавшихся трещин резко уменьшалась, а в некоторых опытах наблюдалась их полная остановка. Кажется, что процесс ветвления чрезвычайно эффективен в качестве инструмента, тормозящего трещину. Ранее на основании обнаруженного в (3) уменьшения скорости

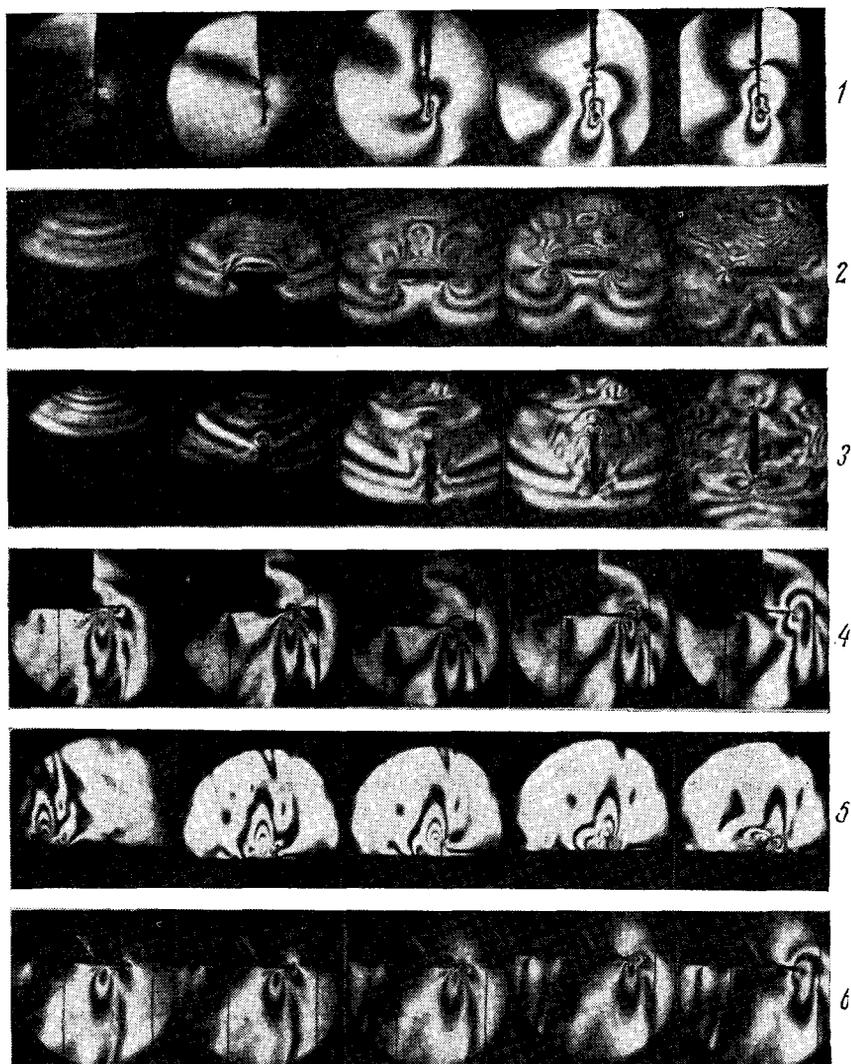


Рис. 3. Взаимодействие волны напряжений с трещиной. Ряды кинокадров отвечают (сверху вниз): рис. 2а, 2е, 2δ, 2ж, 2и, 2к (со сверлением в вершине трещины)

распространения трещины после акта бифуркации возможность использования насильственно образованного ветвления для прерывания разрушения была предсказана в (¹, ⁴).

Таким образом, с помощью упругих импульсов можно управлять движением трещин и, в частности, вызывать их полное торможение. Эта возможность опирается на серьезные изменения поля напряжений в вершине трещины под действием волны напряжений, на асимметричный характер этих изменений и бесспорное превышение скорости волн напряжений по сравнению со скоростями распространения трещин. Последнее обстоятельство позволяет волнам напряжений быстро достигать трещину.

Тамбовский институт
химического машиностроения

Поступило
6 VII 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. М. Финкель, Физика разрушения, 1970. ² В. М. Финкель, Известия вузов, Черная металлургия, № 2, 111 (1962). ³ В. М. Финкель, И. А. Куткин, В. Ф. Белоруков, ФММ, 15, № 5, 754 (1963). ⁴ В. М. Финкель, Экспериментальное исследование кинетики разрушения некоторых твердых тел, Автореф. докторской диссертации, Моск. ин-т стали и сплавов, 1965.