

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕРШИНЕ РАСТУЩЕЙ ТРЕЩИНЫ

Л. В. Зув, И. А. Куткин, В. М. Финкель

(Новокузнецк)

Высокоскоростной киносъемкой в сочетании с поляризационно-оптическим методом исследования напряжений изучено распределение поля упругих напряжений в вершине трещины, растущей с большой скоростью. Установлено существование ряда особенностей поля, характерных только для быстрых трещин. Полученные результаты привлечены для объяснения ветвления.

Одним из наиболее важных направлений, способствующих развитию представлений о природе разрушения, является изучение завершающего этапа нагружения — распространения разрушающей трещины. Исследование кинетики роста трещины встречается со значительными трудностями, обусловленными прежде всего весьма большой скоростью распространения ее. Указанное обстоятельство привело к относительно малому количеству исследований в этой области, совершенно несоизмеримому с числом работ по прочности вообще и с требованиями, предъявляемыми со стороны высококоразвитой теории этого вопроса к эксперименту.

Основные параметры распространения трещины — скорость и ускорение, энергоемкость разрушения, траектория движения и пр. — определяются распределением напряжений в ее вершине. Последние для случая статической трещины неоднократно рассматривались в ряде теоретических и экспериментальных работ [1–3]. Итогом их является заключение об обратной зависимости напряжений в окрестности трещины от корня квадратного из расстояния от вершины. Кроме того, установлено, что максимальные напряжения ориентированы под углом 45–60° по отношению к оси трещины.

Для проблемы разрушения несравненно более важным является распределение напряжений вокруг быстрых трещин. Исследования такого рода велись ранее на металлах и полимерных материалах. Весьма интересной представляется в этом отношении работа Уэлса и Поста [4], показавшая идентичность напряжений в поле трещины для статического и динамического случаев. Эти результаты явно не согласуются с теоретическими результатами Иоффе [5], требующими изменения упругого поля при увеличении скорости трещины, и представлениями Грэггса [6] и Броберга [7] о возможном переходе при достижении достаточно больших скоростей к ускоренному режиму роста трещины при прежних напряжениях. Укажем также на работу Акита и Икеда [8], где показано некоторое различие полей быстрой и медленной трещин.

По нашему мнению, режим распространения трещины должен фундаментально влиять на структуру упругого поля в ее вершине. Это должно проявляться как при скоростях, далеких от порога ветвления, так и в момент его наступления. Последнее представляется вполне реальным хотя бы потому, что сам процесс ветвления не может не быть результатом определенной перестройки упругого поля в вершине трещины. До настоящего времени, несмотря на существование серии работ по наблюдению ветвления [9–11], исследование и идентификация поля в вершине ветвящейся трещины не проводились. Г. И. Баренблаттом теоретически показано, что еще до наступления ветвления в вершине следует ожидать появления особенности упругого поля в форме протяженного ножа, расположенного перед трещиной по ее оси.

Целью настоящей работы является исследование поля напряжений вблизи быстро растущей трещины и выяснение причин ее ветвления.

Методика эксперимента. Исследование особенностей поля напряжений в вершине быстрой трещины было проведено при помощи поляризационно-оптического метода. В качестве фотоактивного материала был использован листовой целлулоид толщиной 3 мм. Цена полосы модели составляла $\sigma_0 = 100 \text{ кг/см}^2$.

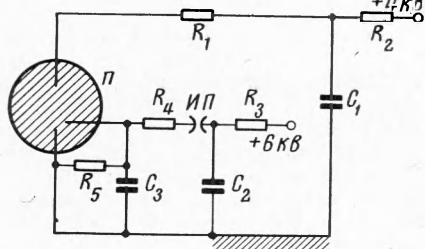
Из листов целлулоида вырезались образцы шириной 50 мм и разрывались на испытательной машине при напряжениях порядка 500 кг/см². Для повышения предела пропорциональности материала испытания проводились при 0 — —5° С.

Напряжения определялись методом полос [12] в поле зрения кругового полярископа. Фиксирование изохром осуществлялось методами скоростной фото- и киносъемки. К сожалению, этот способ не позволяет разделять величины главных напряжений σ_1 и σ_2 , а дает лишь максимальные касательные напряжения $\tau_{\max} = 1/2 (\sigma_1 - \sigma_2)$.

Были проведены две серии опытов. В первой из них получены фотоснимки поля напряжений в вершине трещины в момент ее роста. Было применено фотографирование с источником света малой длительности. Использовалась импульсная лампа ИСП-100-3 с длительностью свечения $4 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$ и энергией вспышки 0,8 дж. Поджиг лампы осуществлялся специальной схемой (фиг. 1), работавшей следующим образом: ножи искрового промежутка ИП укреплялись на образце рядом с полукруглым концентратором, от которого начиналась трещина. В тот момент, когда трещина проходила под ножами ИП, происходил электрический пробой через полость трещины.

Электрический импульс высокого напряжения по звену задержки R_4C_3 подавался на лампу L и поджигал ее. Меняя величину R_4 , можно регулировать время задержки зажигания лампы. В момент вспышки картина изохром фотографировалась.

Во второй серии опытов производилась киносъемка процесса разрушения целлулоида в поляризованном свете камерой СФР-2м с частотой 120 и 60 000 кадр/сек. Освещение при съемке создавалось 20 лампами ИФК-120, собранными в специальную батарею, дающую равномерный поток света. Энергия вспышки в этом случае была 1800 дж.

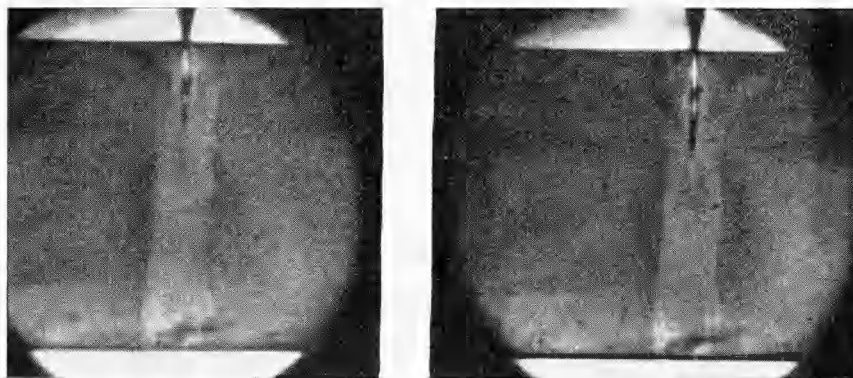


Фиг. 1

Камера СФР-2м не работает в «ждущей» схеме, поэтому явление разрушения должно быть инициировано самой камерой. При достижении напряжений около 500 кг/см^2 (предел текучести материала) импульсом, выданным камерой, взрывался электродетонатор, который наносил удар по краю образца ножом длиной 200 мм. От места удара распространялась трещина. Вспышка света синхронизировалась с моментом начала разрушения либо путем непосредственного включения контактным устройством, укрепленным на ноже, либо электронной схемой задержки первоначального импульса на время развития взрыва в детонаторе ($200 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$).

Оправа входного объектива камеры СФР-2м была несколько переоборудована, что позволяло производить киносъемку с расстояния 70 см при удовлетворительном качестве изображения.

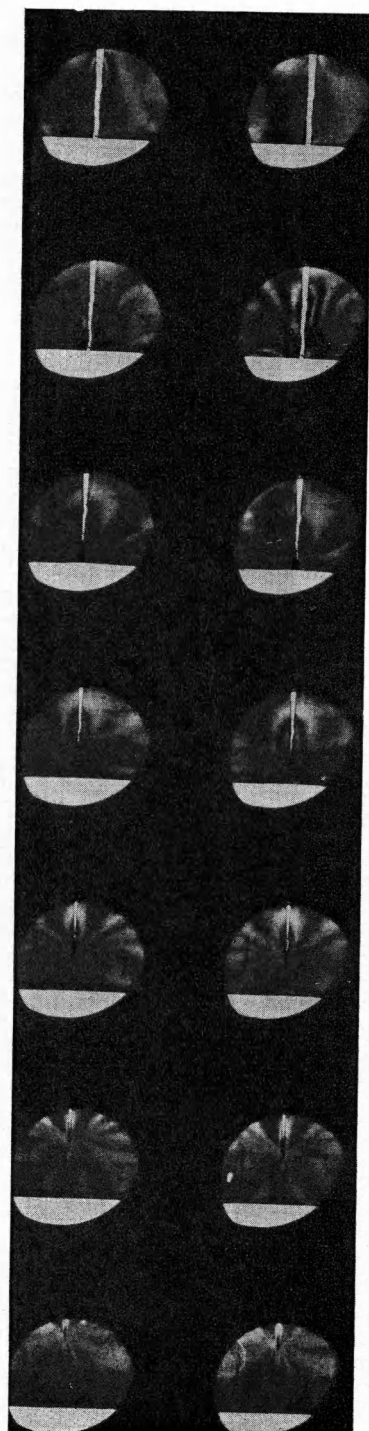
Результаты экспериментов и их обсуждение. 1. Как известно, явление хрупкого разрушения во всех без исключения случаях сопровождается пластической деформацией материала в зоне, непосредственно прилегающей к трещине. Эту особенность необходимо учитывать при рассмотрении любого процесса разрушения. С этой точки зрения, материал, примененный в настоящем исследовании, близок к металлам, по-



Фиг. 2

скольку рост трещин в нем связан с существованием зоны пластичности, хорошо видной на ряде фотографий (фиг. 2). Черная непрозрачная кайма, окружающая трещину, представляет собой деформированный целлулоид. Длина зоны пластичности перед трещиной, по нашим данным, может составлять до 8 мм. Согласно [13], в случае квазихрупкого разрушения эффективный размер трещины больше действительного на величину деформированной зоны, а поверхностью трещины следует считать границу этой зоны. За пределами эффективной трещины материал находится в упруго-напряженном состоянии. Этим можно объяснить тот факт, что кольцевые изохромы, определяющие упругое поле образца, в нашем случае начинаются впереди пластического участка. Такие кольца, отходящие вперед и в стороны от линии трещины, достаточно подробно изучены, например в [4], и нами более не рассматриваются. Основное внимание обращено на распределение напряжений на продолжении растущей трещины, так как ход процесса разрушения, его скорость, монолитность или разветвленность трещины определяются поведением материала именно в этой зоне.

Применив метод фотографирования при освещении образца однократной световой вспышкой малой длительности, удалось получить снимки поля напряжений у вершины растущей трещины. Их можно видеть на фиг. 3, а, б. Обращает на себя внимание, что впереди трещины располагается узкая светлая полоса длиной до 15 мм и шири-

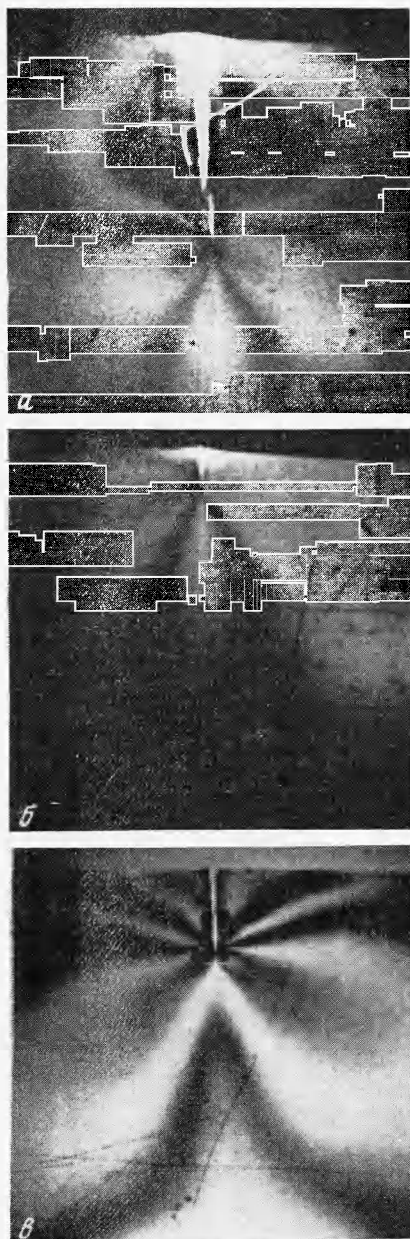


Фиг. 5

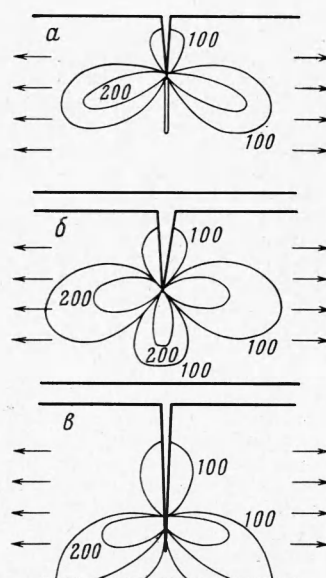
риной около 2 мм. Для объяснения природы такой полосы можно привлечь три различные гипотезы: (1) полоса возникла в результате пластической деформации материала; (2) полоса — зона трещин «серебра» [14]; (3) полоса — это изохрома с дробным номером. Первое предположение необходимо отбросить в связи с тем, что, как было показано выше, зона пластичности легко выделяется на снимках благодаря своей непрозрачности. Нами неоднократно наблюдалось, что при любой пластической деформации целлулоид становится менее прозрачным. Относительно второй гипотезы нужно сказать, что трещины «серебра» в проходящем свете также должны выглядеть черными (см., например, [14]).

Таким образом, полоса представляет собой изохромную «нож» напряжений (фиг. 4, а). Касательные напряжения в нем достигают 150 кг/см^2 (по методу полос). Такая форма упругого поля характерна только для быстрого процесса разрушения. Киносъемкой ($60\,000 \text{ кадр/сек}$) было установлено, что «нож» появляется при скорости роста трещины около 300 м/сек . Фиг. 3, в, представляет собой фотографию поля напряжений возле статической трещины, полученную в тех же условиях. Как справедливо отмечено в [4], распределение напряжений в статическом и динамическом случаях отличается мало, но «ножевидной» изохромы у растущей трещины нет¹.

Таким образом, полоса представляет собой изохромную «нож» напряжений (фиг. 4, а). Касательные напряжения в нем достигают 150 кг/см^2 (по методу полос). Такая форма упругого поля характерна только для быстрого процесса разрушения. Киносъемкой ($60\,000 \text{ кадр/сек}$) было установлено, что «нож» появляется при скорости роста трещины около 300 м/сек . Фиг. 3, в, представляет собой фотографию поля напряжений возле статической трещины, полученную в тех же условиях. Как справедливо отмечено в [4], распределение напряжений в статическом и динамическом случаях отличается мало, но «ножевидной» изохромы у растущей трещины нет¹.



Фиг. 3

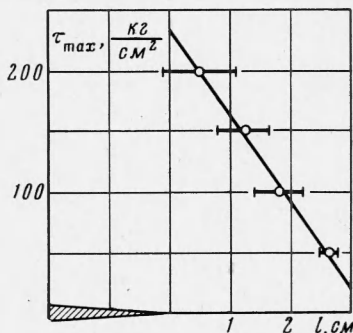


Фиг. 4

Можно думать, что эта особенность поля упругих напряжений вблизи быстро распространяющейся трещины играет в процессе разрушения значительную роль. В узкой зоне, какой является «нож», происходит концентрация энергии деформации, раньше достигается предел текучести, чем облегчается образование микротрещин.

¹ Следует отметить, что подобный описываемому «нож» можно видеть на фотографиях в работах [4, 15].

2. Иной характер носит поле напряжений у трещины, растущей со скоростью, близкой к предельно возможной¹. Киносъемка (120 000 кадр/сек) позволила определить распределение напряжений в случае развития разрушения со скоростью 500 м/сек. Кинограмма этого процесса представлена на фиг. 5. При такой большой скорости не образуется «ножа», рассмотренного выше. В этом случае перед концом эффективной трещины возникает зона кольцевых изохром, движущаяся вместе с ним. Внешние границы этой области наклонены на угол 45° к линии продолжения трещины. Линейные размеры ее достигают 30 мм. Фиг. 4, б, представляет расположение изохром у конца быстрой трещины. Оказалось возможным определить напряжения и в кольцевой зоне. По мере удаления от конца трещины они линейно падают (фиг. 6).



Фиг. 6

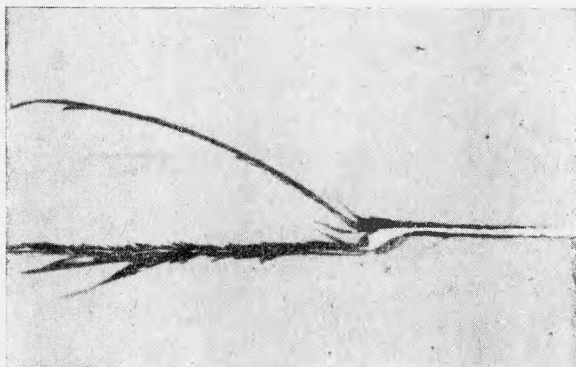
Характерно, что во всех случаях, когда наблюдались кольцевые изохромы, происходило интенсивное ветвление трещины, начинавшееся обычно в момент пересечения трещиной $1/5$ поперечника образца. Типичный вид разрушенной целлулоидной пластины представлен на фиг. 7.

Можно связать указанные особенности поля упругих напряжений вблизи быстро растущей трещины с ее ветвлением. Кольцевые изохромы очерчивают впереди зоны разрушения участок, где распределение напряжений одинаково как на продолжении трещины, так и в направлениях, отклоненных от него на угол до 45°. Такое распределение напряжений делает равновероятным и прямолинейный рост трещины, и боковые повороты ее. Аналогичный результат для быстрой трещины аналитически получила Иоффе [5], но экспериментально существование зоны равных напряжений ранее не наблюдалось.

Таким образом, причина ветвления быстрой трещины кроется в самом характере ее роста, в форме поля упругих напряжений, окружающего зону разрушения.

Существует и другой взгляд на природу ветвления. Ветвление трещины считается результатом взаимодействия поля напряжений у ее конца и отраженных от краев образца упругих импульсов [9]. Безусловно, такое взаимодействие может искривить траекторию трещины и вызвать ее разветвление, но нельзя объяснить все наблюдаемые закономерности только этим. На фиг. 5 видно, что влияние края образца на упругое поле сказывается лишь при малых (порядка 1 см) расстояниях конца трещины от этого края (см. схему фиг. 4, а). Это влияние сводится к следующему: при достижении внешней кольцевой изохромой края внутренняя изохрома сужается и превращается в «нож», подобный описанному выше. Трещина начинает ветвиться задолго до того, как возникает указанное искажение.

Кроме того, если отраженные импульсы являлись бы единственной причиной ветвления, то в этом случае положение точки первого ветвления зависело бы от ширины образца. Нами были проведены контрольные опыты по разрыву образцов разной ширины из полиметилметакрилата (этот материал хорошо ветвится). Зависимости от ширины образца не было обнаружено.



Фиг. 7

¹ Увеличение скорости роста трещины достигалось понижением температуры испытания до -5°C .

Изложенное выше позволяет сделать следующее заключение:

1. Поле напряжений вблизи трещины, растущей с большой скоростью, существенно отличается от поля вблизи статической трещины. Впереди быстрой трещины возникает узкая зона повышенных касательных напряжений — «нож».

2. При дальнейшем увеличении скорости развития разрушения перед трещиной возникает зона кольцевых изохром, в которой распределение касательных напряжений одинаково в разных направлениях от конца трещин. По мере удаления от конца напряжение в этой зоне линейно убывает.

3. В момент формирования зоны равных напряжений начинается ветвление. Причина ветвления кроется в самом характере роста трещины, в преобразовании поля напряжений при большой скорости.

Авторы благодарят Г. И. Баренблатта за предложенную тему.

Поступила 2 VIII 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Inglis G. E. Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. Trans. Inst. Naval Archit., 1913, vol. 55, p. 219.
2. Andrews E. H. Stress at a crack in an elastomer. Proc. Phys. Soc., 1961, vol. 77, p. 483.
3. Fessler H., Mansell D. O. Photoelastic study of stresses near crack in thick plates. J. Mech. Engng. Sci., 1962, vol. 4, No. 3, p. 213.
4. Wells A. A., Post D. The dynamic stress distribution surrounding a running crack a photoelastic analysis Exp. Stress. Analysis. Proc., 1958, vol. 16, No. 1, p. 69.
5. Yoffe E. The moving Griffith crack. Philos. Mag., 1951, vol. 42, No. 330, p. 739.
6. Griggs J. W. On the propagation of a crack in an elastic — brittle material. J. Mech. Phys. Soc., 1960, vol. 8, No. 1, p. 66.
7. Broberg K. B. The propagation of a brittle crack. Arkiv fys., 1960, vol. 18, p. 159.
8. Akita Y., Ikeda K. Theoretical research on the propagation of brittle fracture. Rep. Trans. Techn. Inst., 1958, vol. 32, p. 33.
9. Karlsson J. Experimental studies of brittle fracture propagation. Kgl. Tekn. högskol. handl., 1962, No. 189, p. 56.
10. Шардин Г. Исследование скорости разрушения. В кн.: Атомный механизм разрушения. М., Металлургиздат, 1963.
11. Финкель В. М., Куткин И. А., Белоруков В. Ф. Ветвление трещин в стали. Физ. металлов и металловедение, 1963, т. 15, вып. 5, стр. 754; Некоторые особенности ветвления трещин в стали. Изв. высш. учебн. завед., Черная металлургия, 1965, т. 2, стр. 106.
12. Фрохт М. Фотоупругость. т. I, М.—Л., Гостехиздат, 1948.
13. Баренблатт Г. И., Салганик Р. Л., Черепанов Г. П. О неустановившемся движении трещин. ПММ, 1962, т. 26, в. 2, стр. 328.
14. Бессонов М. И. Механическое разрушение твердых полимеров. Успехи физ. наук, 1964, т. 83, стр. 107.
15. Van Elst H. C. The intermittent propagation of brittle fracture. Trans. Met. Soc. AJME, 1964, vol. 230, p. 460.
16. Бэкер Б. Р. Динамические напряжения, вызываемые распространением трещины. Прикладная механика (переводы). 1962, т. 29, № 3, стр. 3—12.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ПРОБИВАНИИ ОДИНОЧНОЙ ПРЕГРАДЫ

Ю. С. Степанов (Москва)

Излагаются результаты экспериментальных работ по определению некоторых параметров, характеризующих сквозное пробивание преград из ряда исследуемых материалов. К ним относятся импульс, приобретаемый преградой при ее пробивании, диаметры сквозных отверстий, углы тыльного и лицевого разлета и ряд других.

1. Рассмотрим случай заведомого пробивания частицей преграды толщиной l . Введем некоторые коэффициенты

$$k = \frac{m_2}{m_0 + \Delta P}, \quad \beta = \frac{J_1}{J_0}, \quad v = \frac{\varepsilon_1}{E_0} \quad (1.1)$$

Здесь m_2 — масса, пролетевшая за преграду со скоростью v_2 , m_0 — масса частицы, ΔP — потеря массы преградой при сквозном пробивании, J_1 — импульс, полученный преградой при пробивании, J_0 , E_0 — первоначальные импульс и энергия частицы, ε_1 — часть энергии, пошедшая на нагрев и необратимые объемные деформации за пластической волной. Таким образом, коэффициент k определяет часть массы, имеющую запреградную скорость v_2 , коэффициент β — часть импульса, воспринимае-