

КВАЗИХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ОБРАЗЦОВ С ВЫРЕЗОМ В ВИДЕ ЛУНКИ

БУГАКОВ И. И.

Все более широкое применение в технике находят высокопрочные хрупкие материалы, чувствительные к надрезам и острым концентраторам. Для гладких концентраторов и надрезов в виде трещин имеется большое количество экспериментальных исследований и хорошо отработана методика проведения эксперимента. В части же исследования острых концентраторов, имеющих угловые точки, но отличных от трещин, сделано еще очень мало [1], хотя образцы с V-образным надрезом применяют в испытаниях на усталость и на ударную вязкость [2]. Между тем здесь возникают специфические трудности, связанные, например, с созданием образцов с достаточно острыми концентраторами определенной формы. Изготовить концентратор с совершенно острым углом не удастся, в вершине всегда имеется закругление, радиус которого влияет на концентрацию напряжений и прочность [3–5].

В публикуемой работе сделана попытка заполнить в некоторой степени пробел в исследованиях разрушения образцов с острыми концентраторами. В качестве объекта испытания были выбраны плоские образцы из стеклообразного полимера с центральным сквозным вырезом в виде лунки. Такой вырез по своей форме занимает промежуточное положение между круглым отверстием и трещиной. В результате опытов были получены данные о квазихрупком разрушении образцов с лункой, а также с круговым вырезом и с начальной трещиной.

Материалом для образцов служил эпоксидный полимер на основе смолы ЭД-20 (модуль упругости 3 ГПа, коэффициент Пуассона 0,35). Образцы изготавливали из одной и той же отливки, длина рабочей части образцов (мм) – 210, ширина 75, толщина 2,7–3,6. Контур лунки совпадал с дугами двух пересекающихся окружностей радиуса R (фиг. 1), его длина для всех образцов была одинаковой: $2a=10$ мм. Угол γ варьировали в пределах от 100° до 150° за счет изменения значений R .

Лунки изготавливали по шаблонам; каждый комплект состоял из четырех одинаковых стальных пластин с круговым вырезом того же радиуса R , что и лунка. Пластины попарно сдвигали друг относительно друга так, чтобы образовался просвет заданного размера. Геометрию выреза контролировали при помощи инструментального микроскопа УИМ-23 при 15-кратном увеличении. Измерения показали, что перпендикулярность вырезов по отношению к продольной оси образцов была не больше 1° , а радиус кривизны в угловых точках не превышал 0,1 мм.

Кроме того, были изготовлены образцы с начальной трещиной и с круговым вырезом. Для получения начальной трещины ($\gamma=180^\circ$) сначала в образцах сверлили отверстие диаметром 3 мм, затем внедряли в край отверстия клин. Длина $2d$ созданной таким путем трещины была равна 17–23 мм.

Диаметр кругового выреза ($\gamma=90^\circ$) был равен длине лунок, а именно 10 мм; образцы имели боковые выкружки (радиус 300 мм), сделанные для того, чтобы разрушение происходило в зоне выреза; наименьшая ширина этих образцов была равна 60 мм.

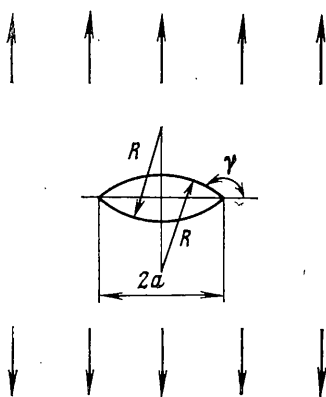
Всего было испытано 27 образцов. Испытания проводили на разрывной машине Р-0,5 при постоянной скорости деформирования 3% в мин. Опыты при значениях $\gamma < 110^\circ$ проводили при установленных на маятнике силоизмерителя дополнительных грузах, что позволило увеличить наибольшую нагрузку с 5000 до 9000 Н. В процессе испытаний контролировали симметричность приложения нагрузки по интерференционной картине на экране полярископа ППУ-7, а на ленте двухкоординатного регистратора записывали диаграмму нагружения. Масштаб скорости перемещения диаграммной ленты был равен 10:1 и 50:1, погрешность записи нагрузки не превышала $\pm 2\%$ от измеряемой величины.

Диаграммы нагружения образцов с круговым вырезом, которые разрушались при большой нагрузке, отличались от прямой линии не более чем на 3%. Такая форма диаграмм, а также рельеф поверхностей разрушения свидетельствуют о квазихрупком характере разрушения.

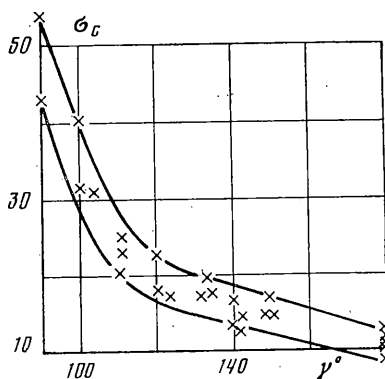
Зависимость номинального критического напряжения σ_c нетто в мегапаскалях от угла γ представлена на фиг. 2; сплошные линии ограничивают полосу, в которой находятся экспериментальные точки. Напряжения σ_c , полученные на образцах с начальной трещиной, умножали на коэффициент, равный $(d/a)^{1/2}$, для того, чтобы получить сопоставимые результаты (наибольшее фактическое напряжение σ_c в этих образцах было равно 8,55 МПа).

Из данных, приведенных на фиг. 2, видно, что по мере уменьшения угла γ напряжение σ_c растет по линейному закону при $\gamma \geq 120^\circ$, а при $\gamma < 120^\circ$ увеличивается более резко. В связи с этим, если производная $d\sigma_c/d\gamma = -0,15$ МПа/град при $\gamma \geq 120^\circ$, то $d\sigma_c/d\gamma = -1,3$ МПа/град при $\gamma < 100^\circ$. Полученные данные иллюстрируют степень опасности угловой точки на контуре выреза, близкого к круговому.

Известно, что траектория трещины и рельеф ее поверхности зависят от скорости движения трещины [6–10]: при малых скоростях поверхность разрушения зеркальная, при средних – шероховатая; при больших скоростях (для органических стекол 500–700 м/с) ее рельеф грубый, трещина ветвится.



Фиг. 1



Фиг. 2

На фиг. 3 представлены фотографии траекторий трещин ($a - \gamma = 150^\circ$, $\sigma_c = 14,46$ МПа; $b - \gamma = 111^\circ$, $\sigma_c = 23,00$ МПа; $c - \gamma = 100^\circ$, $\sigma_c = 40,72$ МПа), а на фиг. 4 — фотография стопы разрушения образцов, расположенных сверху вниз в порядке возрастания σ_c (два нижних образца имели круговой вырез). Зеркальные поверхности разрушенных на фиг. 4 выглядят как однородные темные участки; хорошо видно, что по мере приближения формы выреза к круговой длина зеркальной зоны уменьшается.

Из данных, приведенных на фиг. 3, 4, видно, что по мере перехода от узкой лунки к круговому вырезу изменяются траектория трещины и макрорельеф поверхности разрушения. Это связано с тем, что возрастает критическое напряжение, а с ним и энергия, запасенная образцом перед разрушением. При этом чем больше запасенная энергия, тем больше начальная скорость движения трещины; по мере распространения трещины скорость ее быстро нарастает. Нестационарность и уровень скорости движения трещины и определили вид ее траектории и поверхности.

Для образцов с лункой и круговым вырезом вид поверхности разрушения и, при повышенных напряжениях, траектории трещины слева и справа от выреза не одинаковы. Из этого был сделан вывод, что трещина распространялась в обе стороны от выреза неодновременно. Сначала она проскакивала от выреза до одного края образца, при этом на другой стороне почти мгновенно создавалось перенапряжение и трещина пересекала эту сторону с большими скоростями, чем первую. Следует отметить, имея в виду рассматриваемую задачу о центральном вырезе, что, прежде всего, представляет интерес именно разрушение первой стороны (на фиг. 3, 4 она расположена справа от выреза). Что касается образцов с начальной трещиной, то нет оснований считать, что разрушение происходило несимметрично: для всех образцов поверхность разрушения справа и слева от начальной трещины зеркальная, трещина не ветвится.

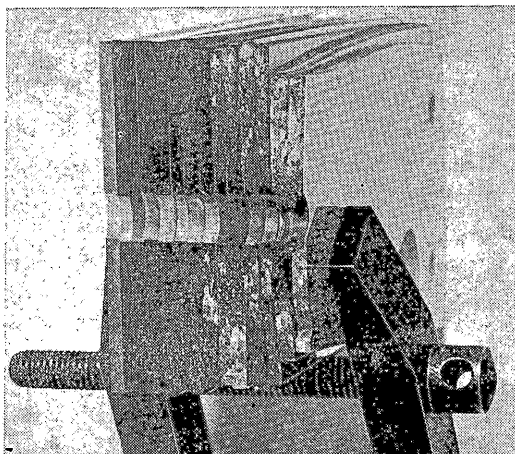
Сравнение между собой разрушенных образцов с близкими углами γ , но различными значениями σ_c , а также образцов с различными σ_c , но близкими γ , показало, что вид траектории трещины и поверхности разрушения зависит скорее от σ_c , чем от γ . Так, при $\sigma_c < 20$ МПа трещины с обеих сторон образцов прямолинейные (см. фиг. 3, а). При $20 < \sigma_c < 25$ МПа трещина на одной стороне прямолинейная, на другой извилистая, слабо разветвленная (см. фиг. 3, б). При $\sigma_c \approx 31$ МПа трещина, на одной стороне извилистая, на другой ветвление настолько развитое, что отделилось по крупному осколку клиновидной формы.

При $\sigma_c > 40$ МПа осколки отделились с обеих сторон (см. фиг. 3, в), их размеры и количество увеличиваются с ростом σ_c . Далее, в случае низких значений σ_c поверхность разрушения образцов с лункой зеркальная около выреза, где скорость распространения трещины была невелика, а дальше шероховатая. По мере увеличения σ_c длина зеркальной зоны уменьшается, макрорельеф шероховатой зоны становится все более грубым. С одной стороны от выреза зеркальная зона длиннее, чем с другой (см. фиг. 4).

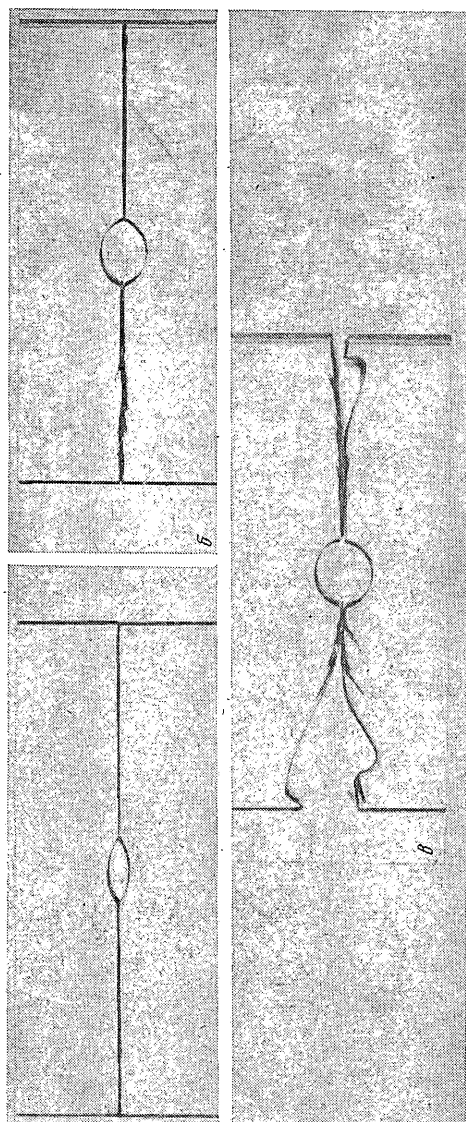
Автор признателен В. В. Новожилову, по инициативе которого были проведены эксперименты, а также О. Д. Иванову и А. А. Уткину за практическую помощь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gross B., Mendelson A. Plane elastostatic analysis of V-notched plates.— Internat. J. Fract. Mech, 1972, v. 8, No. 3, p. 267—276.
2. Нотт Дж. Ф. Основы механики разрушения. М.: Металлургия, 1978. 256 с.
3. Рош М., Эйлингер А. О сопротивлении усталости сталей.— В кн.: Вопросы усталостного разрушения сталей. М.—Л.: Машгиз, 1957, с. 7—90.



Фиг. 4



Фиг. 3

4. Вейс В. Анализ разрушения в условиях концентрации напряжений.— В кн.: Разрушение. Т. 3. М.: Мир, 1976, с. 263—302.
5. Ковалев В. В. Влияние некоторых конструктивных факторов на коэффициент концентрации напряжений в области острых выточек.— Проблемы прочности, 1978, № 3, с. 74—78.
6. Гуль В. Е. Прочность полимеров. М.— Л.: Химия, 1964. 228 с.
7. Уолок И., Ньюман С. Топография разрушения.— В кн.: Разрушение твердых полимеров. М.: Химия, 1971, с. 188—234.
8. Петч Н. Металлографические аспекты разрушения.— В кн.: Разрушение. Т. 1. М.: Мир, 1973, с. 376—420.
9. Солнцев С. С., Морозов Е. М. Разрушение стекла. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
10. Shinkai N, Sakata H. Fracture mirror in Columbia Resin CR-39.— J. Mater. Sci., 1978, v. 13, No. 2, p. 415—420.

Ленинград

Поступила в редакцию
25.XI.1980