

Б. Цилиндрическая оболочка, сжимаемая в осевом направлении силой p . Уравнение частот имеет вид

$$\frac{\rho R^2}{a^3} \omega^2 \left(1 + \frac{1}{a^2}\right) = -p + \frac{E}{a^2} + \frac{E}{12(1-\sigma^2)} a^2 \left(\frac{h}{R}\right)^2,$$

где $a = n\pi \frac{R}{l}$ ($n = 1, 2, \dots$); l — длина оболочки.

Аналогично предыдущему примеру находим

$$p_* = E \left[\frac{3}{16(1-\sigma^2)^2} \right]^{1/3} \left(\frac{h}{R}\right)^{4/3}, \quad \frac{p_*}{p_b} = \frac{3}{2} \left[\frac{1}{12(1-\sigma^2)} \right]^{1/6} \left(\frac{h}{R}\right)^{1/3}.$$

На фиг. 2 представлены p_b , p_* и область экспериментальных критических нагрузок p_0 [5, 6].

В заключение заметим, что найденная нагрузка p_* зависит от толщины оболочки и в широком интервале изменения h совпадает с нижней границей области полученных в экспериментах критических нагрузок. В рамках предложенного механизма нарушения устойчивости находят объяснение и другие экспериментальные факты. В частности, большой разброс экспериментальных данных может быть объяснен различием в начальных условиях, характере нагружения и случайных динамических воздействиях, а уменьшение этого разброса при малых толщинах связано с увеличением вместе с ростом $1/h$ числа резонансных соотношений.

Автор выражает благодарность Г. Г. Денисову за помощь в работе.

Поступила 8 VIII 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Болотин В. В. Теория распределения собственных частот упругих тел и ее применение к задачам случайных колебаний. — ИМ, 1972, № 4.
2. Бендич Н. Н., Корнев В. М. О плотности собственных значений в задачах устойчивости тонких упругих оболочек. — ПММ, 1971, № 2.
3. Корнев В. М. Об аппроксимации в задачах устойчивости и колебаний упругих оболочек при сгущении собственных значений. — Изв. АН СССР. МТТ, 1972, № 2.
4. Вибрация в технике. Справочник. Т. 1. М., Машиностроение, 1978.
5. Вольмир А. С. Устойчивость упругих систем. М., Физматгиз, 1973.
6. Григолюк Э. И., Кабанов В. В. Устойчивость оболочек. М., Наука, 1978.

УДК 539.374

ПОЛЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ЗОНЕ УСТЬЯ ТРЕЩИНЫ

В. И. Архипов

(Хабаровск)

При установлении критерия разрушения большое значение имеет знание деформационных и силовых условий в зоне устья трещины. В зависимости от принятой модели упругопластического деформирования этой зоны предложены различные концепции в выборе критерия разрушения [1]. При этом необходимо учитывать, что реальный процесс разрушения в макромасштабе носит в большинстве случаев смешанный характер [2]. Отсюда большое значение имеет экспериментальное и теоретическое исследование поля упругопластического деформирования (УПД) в зоне устья трещины [3]. В работах [4—6] проведен эк-

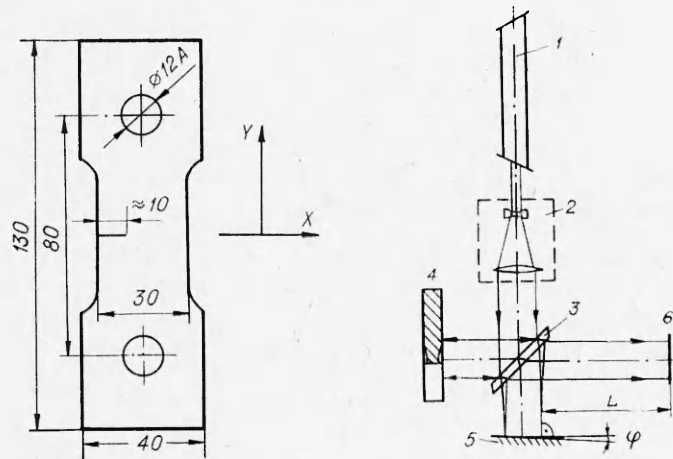
спериментальный анализ полей УПД в зоне устья трещины методами фотоупругости, муара и голографической интерферометрии. В работах [7—9] численными методами проведен анализ поля УПД при плосконапряженном и плоскодеформированном состояниях. Следует указать на работу [10], в которой методом голографической интерферометрии определяется поле упругих и остаточных составляющих деформаций пластинки, нагруженной внутренним давлением.

1. Методика исследования. Исследование проводилось при нормальных внешних условиях на плоских образцах из легированной стали марки 38ХНВА. Образцы термообрабатывались по типовому режиму. Твердость $HRC = 50$.

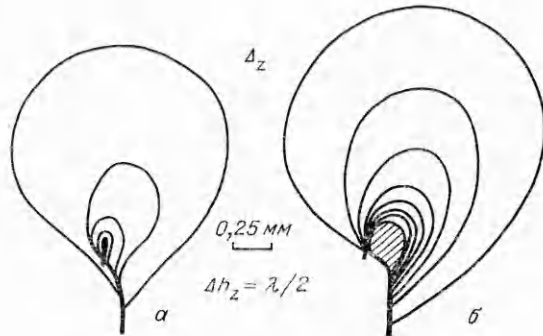
На фиг. 1 показана геометрия образцов. Начало системы координат связано с вершиной трещины. Рабочая зона образцов механически шлифовалась, а затем притиралась под нагрузкой $P_0 \sim 2\text{ кН}$ для получения минимальной неплоскостности и удовлетворительного коэффициента отражения света. Образцы имели иницированную усталостную трещину. Толщина образцов $t = 2,0\text{ мм}$. Нагружение производилось на испытательной машине, оснащенной лазерной голографической установкой. Режим нагружения — ступенчатое монотонное растяжение с шагом по нагрузке $\Delta p = 981\text{ Н}$.

На фиг. 2 показана оптическая схема голографического интерферометра. Она состоит из He — Ne-лазера 1 типа ЛГ 75, коллиматора 2, делительного зеркала 3, исследуемого образца 4, опорного зеркала 5 и экрана 6 для наблюдения голограмм. Данная схема в некоторой степени подобна схеме, предложенной в работе [11]. Она позволяет измерять поля смещений как по нормали к поверхности Δ_z , так и в плоскости объекта Δ_{xy} . Шаг h_z , h_{xy} между эквипотенциальными линиями смещений равен приблизительно $\lambda/2$. Основная инструментальная погрешность (за счет угла φ , фиг. 2) реальной установки оценивается величиной, менее или равной 5%. Измерение смещений Δ_z основано на принципах классической интерферометрии. Теория способа измерения смещений Δ_{xy} изложена в работе [12]. В основу способа положено явление диффузного отражения света от поверхности металла и его интерференция с опорным лучом.

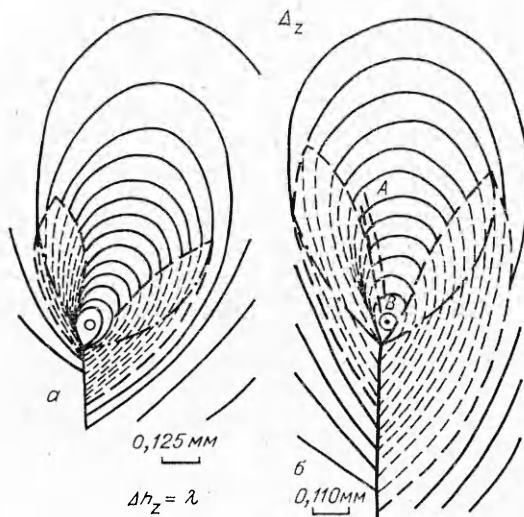
При исследовании узел измерительной головки, состоящей из деталей 3, 5 (фиг. 2), юстировался относительно поверхности образца таким образом, чтобы получить однородное поле освещенности на экране. За-



Фиг. 1



Ф и г. 3



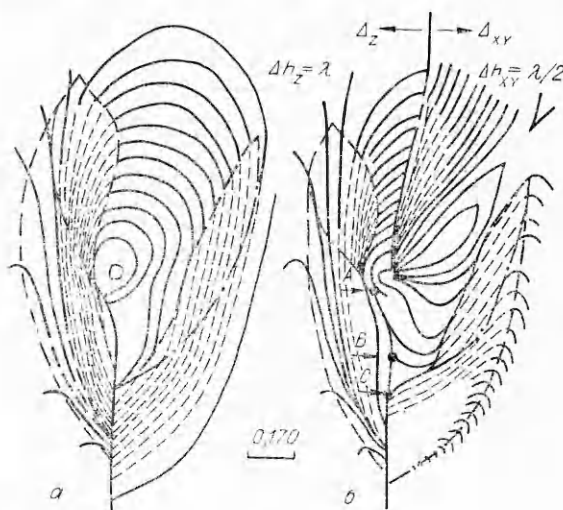
Ф и г. 4

12,74 кН показаны соответственно на фиг. 4, а, б. Штриховыми линиями выделены области зоны УПД максимальной интенсивности пластической деформации. Штрихпунктирная линия выделяет в этой области контур, внутри которого происходит основная диссипация упругой энергии зоной пластического деформирования при данной нагрузке. Для определения границ указанного контура использована особенность изменения кривизны эквипотенциальных линий Δ_{xy} (фиг. 5, б) при переходе из зоны пластического деформирования в упругую. Экспериментально определено, что для данной марки стали при $h_z = \lambda/2$ для поля смещений Δ_z расстояние между соседними эквипотенциальными линиями равно ≈ 17 мкм. Поле смещений при нагрузке $p=12,74$ кН связано с предкритическим состоянием, так как при $p = 13,33$ кН произошел второй скачок трещины, $\Delta l_{T2} = 0,360$ мм. Сравнительный анализ голограмм (фиг. 4) показывает, что, кроме абсолютного увеличения размеров (площади) контура максимальной интенсивности пластической деформации, происходит его поворот относительно вершины трещины. Это в основном связано с тем, что скачок трещины происходит в условиях плоскодеформированного состояния, а рост зоны пластического деформирования — плосконапряженного

тем производилось растяжение образца и фотографирование голограмм на каждой ступени нагружения.

2. Эксперимент. Результаты эксперимента представлены в виде обработанных с фотографий голограмм. На фиг. 3 показаны голограммы, связанные с полем смещений Δ_z . Фиг. 3, а соответствует квазистатическому росту зоны УПД при нагрузке $p = 3,92$ кН в условиях, близких к плосконапряженному состоянию. В силу малости геометрических размеров указанной зоны не удалось полностью исследовать ее тонкую структуру. Следует отметить, что внешний контур зоны согласуется с гипотезой ее формы по [13]. При нагрузке $p = 7,84$ кН произошло первое дискретное подрастание трещины на величину (для данного образца) $\Delta l_{T1} = 0,125$ мм. Фиг. 3, б показывает поле УПД непосредственно после скачка трещины (заштрихована область с большими градиентами смещений). Шаг между эквипотенциальными линиями $h_z = \lambda/2$. Голограммы полей смещений УПД Δ_z после достижения нагрузок $p = 10,78$ и

состояния. Известно, что для плоскодеформированного состояния характерна именно такая ориентация поля пластических деформаций [9]. Линией AB (фиг. 4, б) показано место выхода плоскости сдвига на поверхность образца (хотя в макромасштабе не наблюдается разрыв поля смещений). На голограмме линия AB выделяется по контрастности освещенности по сравнению с окружающей картиной поля. На фиг. 5 показаны голограммы остаточного поля смещений в зоне пластических деформаций после разгрузки образца до $p=1.86$ кП. Слева (фиг. 5, б) показано поле смещений Δ_z ,

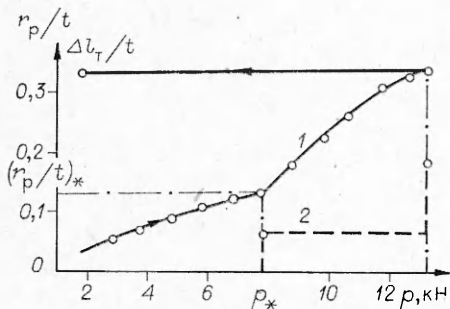


Фиг. 5

а справа — Δ_{xy} . Здесь же точками C , B и A обозначены соответственно начальное положение вершины трещины, после скачков трещины Δl_{T1} и Δl_{T2} . По полученным результатам измерений построены графики (фиг. 6) зависимостей $r_p/t = f(p)$, $\Delta l_T/t = f(p)$ (1 и 2 соответственно), где r_p — модуль радиуса вектора, численно равного величине отрезка, соединяющего вершину трещины с наиболее удаленной точкой контура с максимальной интенсивностью пластических деформаций.

Анализ полей смещений в зоне интенсивных пластических деформаций показывает, что при смешанном характере процесса разрушения можно выделить три характерные фазы его развития. Первая фаза — это квазистатический рост зоны интенсивных пластических деформаций, который в первом приближении линейно зависит от величины приложенной внешней нагрузки. Особенность второй фазы заключается в том, что при нагрузках, близких к критическим p_* , происходит локализация пластических деформаций в виде узкой зоны по направлению продолжения трещины, что связано с образованием и ростом плоскости сдвига в глубь материала. Основным механизмом образования локализованного сдвига является исчерпание способности к пластическому деформированию в зоне с максимальной интенсивностью деформаций. При этом диссипация упругой энергии определяется в основном не ростом объема пластически деформируемой зоны, а величиной локализованного сдвига (нелинейный характер кривой 1 фиг. 6). Развитие локализованного сдвига приводит к увеличению концентрации напряжений в центральных участках контура трещины, и при $p = p_*$ происходит скачок докритической трещины, который выделен в третью фазу развития процесса разрушения при его смешанном виде.

Автор выражает благодарность В. П. Троценко за помощь в работе.



Фиг. 6

ЛИТЕРАТУРА

1. Партон В. З., Седов Л. Н., Черепанов Г. П. Моделирование явлений разрушения в твердых телах. Избранные проблемы прикладной механики. М., ВИНТИ, 1974.
2. Бернштейн М. Л., Займовский В. А. Механические свойства металлов. М., Металлургия, 1979.
3. Витвицкий П. М., Панасюк В. В., Ярема С. Я. Пластические деформации в окрестности трещин и критерии разрушения (обзор).— Проблемы прочности, 1973, № 2.
4. Wells A. A., Post D. The dynamic stress distribution surround a running crack.— Proc. Soc. for Exper. Stress Analysis, 1958, vol. 15, N 2.
5. Шнейдерович Р. М., Левин О. А. Измерение полей пластических деформаций методом муара. М., Машиностроение, 1972.
6. Duderar T. D., O'Regan. Measurement of the strain field near a crack tip in polymethylmethacrylate by holographic interferometry.— Exper. Mech., (February, 1974).
7. Swedlow J. L. Elasto-plastic cracked plates in plane strain.— Intern. J. Fracture Mech., 1969, vol. 5, N 1.
8. Кудрявцев Б. А., Партон В. З., Песков Ю. А., Черепанов Г. П. О локальной зоне вблизи конца щели (плоская деформация).— Изв. АН СССР. МТТ, 1970, № 5.
9. Кудрявцев Б. А., Партон В. З., Песков Ю. А., Черепанов Г. П. О локальной зоне вблизи конца щели.— Изв. АН СССР. МТТ, 1970, № 1.
10. Шеничев В. П., Яковлев В. В. Определение составляющих упругопластической деформации методом голографической интерферометрии.— ЖТФ, 1979, т. 49, вып. 5.
11. Батерс Дж. Голография и ее применение. М., Энергия, 1977.
12. Leendertz J. A. Interferometric displacement measurement of scattering surfaces utilising speckle effect.— J. Sci. Instrum., 1970, vol. 3, p. 214.
13. Dugdale D. S. — J. Mech. Phys. Solids, 1960, vol. 8, p. 100.