

фиг. 1, *е* представлена типичная фоторазвертка процесса столкновения, на которой отчетливо видны отраженные ударные волны.

На продольных фоторазвертках процесса свечения (фиг. 1, *а, б*) наблюдаются четко выраженные вертикальные полосы, которые указывают на дополнительный разогрев плазмы, образующейся при воздействии предыдущих импульсов излучения, последующими импульсами; в результате происходит частичная экранировка поверхности мишени от воздействия лазерного излучения. С развитием процесса происходит накопление плазменных сгустков, и экранировка поверхности усиливается. На фоторазвертках это наблюдается как периодическое «вспыхивание» плазменных сгустков (фиг. 1, *б*). В некоторых случаях вследствие поглощения излучения во фронте движущейся ударной волны от этой зоны в сторону мишени распространяется фронт свечения, представляющий собой, по-видимому, ударную волну (фиг. 1, *а*), которая взаимодействует со встречными ударными волнами и плазменными сгустками.

Авторы благодарят М. А. Ельяшевича за интерес к работе.

Поступила 2 XI 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Ю. В., Басов Н. Г., Крохин О. Н., Морачевский Н. В., Склизков Г. В. Исследование газодинамических процессов, возникающих при испарении твердого вещества под действием излучения лазера. Ж. техн. физ., 1969, т. 39, вып. 5.
2. Баканович Г. И., Гречихин Л. И., Минько Л. Я. Возбуждение спектров испускания с помощью оптического квантового генератора. В кн. «Прикладная спектроскопия», т. 1, М., «Наука», 1969, стр. 95.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛНЫ НАПРЯЖЕНИЙ СО СТАЦИОНАРНОЙ МАКРОТРЕЩИНОЙ В УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ И КВАЗИХРУПКИХ МАТЕРИАЛАХ

*Ш. Г. Володарская, И. С. Гузь, И. А. Буткин,
В. М. Финкель*

(Новокузнецк)

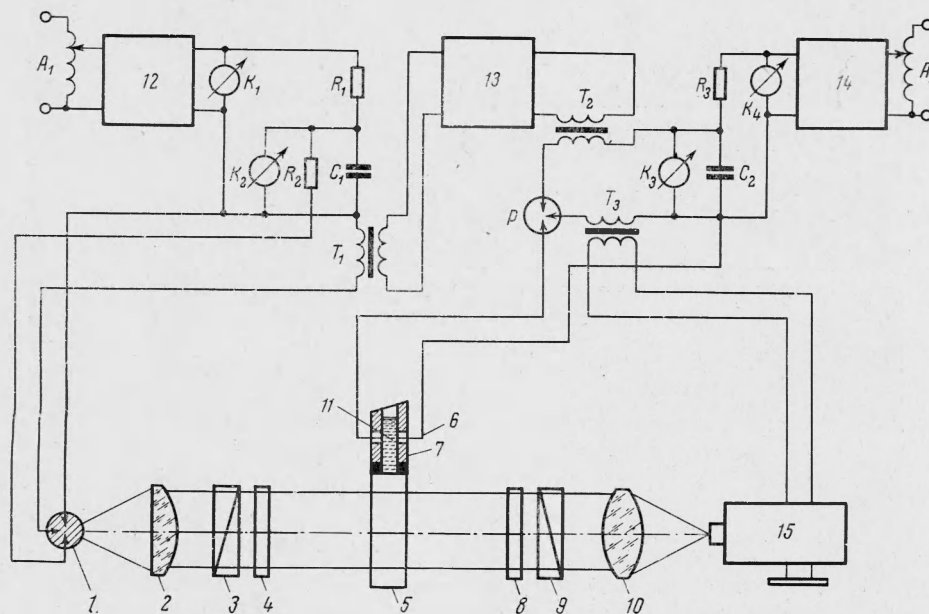
Поведению материала при динамических нагрузках посвящается большое число публикаций, например, исследованы влияния скорости деформации на механические свойства металлов [1, 2], запаздывание текучести при кратковременных нагрузках [3], зависимость напряжений от скорости деформации [4, 5], а также влияние динамического нагружения на статистические свойства металлов.

В данной работе приводятся некоторые результаты исследования поляризационно-оптическим методом в сочетании со скоростной киносъемкой поля напряжений в окрестности стационарной макротрещины при воздействии на нее волны напряжений.

Исследование проводится на полимерах. Экспериментально установлено явление дифракции волны сжатия у вершины стационарной макротрещины. Дифрагировавшая волна распространяется навстречу основной по противоположному берегу трещины. Концентрация напряжений определяется углом ввода волны на плоскость трещины. Наибольшая концентрация напряжений возникает при минимальных углах падения волны; это означает, что основную роль в формировании поля напряжений в вершине трещины играют смещения частиц среды, направленные вдоль трещины.

1. Описание экспериментов. Схема установки, на которой проводились эксперименты, показана на фиг. 1. На этой схеме 1 — импульсный источник света, 2 — конденсорная линза, 3 — поляризатор, 4 — четвертьволновая пластинка, 5 — образец, 6 — подводящие электроды, 7 — труба с водой, 8 — четвертьволновая пластинка, 9 — анализатор, 10 — объектив кинокамеры, 11 — взрывающаяся проволока, 12 — высоковольтный выпрямитель, 13 — линия задержки, 14 — высоковольтный выпрямитель, 15 — кинокамера СФР-1. При помощи двух высоковольтных выпрямителей конденсаторы заряжаются через зарядные сопротивления R_1, R_2 . Величина зарядного напряжения регулируется при помощи автотрансформаторов по приборам K_1, K_4 . После зарядки конденсаторов C_1, C_2 до напряжения источника (контроль осуществляется при помощи киловольтметров K_2, K_3) включается скоростная кинокамера СФР-1. Подачей высоковольтного импульса с пульта управления пробивается разрядник P .

При этом происходит разряд конденсатора C_2 через проволочку диаметром 0.02 мм, в результате чего последняя взрывается и ударная волна через столб жидкости передается на образец. При помощи трансформатора T_2 , первичной обмоткой которого служит провод питания взрывающейся проволочки, одновременно со взрывом поступает импульс через линию задержки на высоковольтный трансформатор T_1 , который инициирует работу мощного источника света. Линией задержки осуществляется синхронизация работы лампы L_1 с моментом выхода волны в кинематографируемую область



Фиг. 1

образца. В качестве импульсного источника света используется лампа ИСШ-100-3, расположенная в фокусе конденсорной линзы. Малые размеры ее светящегося тела позволяют получать практически параллельный пучок лучей. Энергия вспышки более 3000 дж, длительность 200—250 мксек.

Образцы изготовлялись из органического стекла в виде круглых дисков диаметром 180 мм и толщиной 18 мм, затем в образцах делались надрезы, в вершине которых легким ударом ножа зарождалась трещина. Для снятия внутренних напряжений образцы отжигались в течение 5—6 суток при температуре 120° С с последующим медленным охлаждением со скоростью 5° в час.

2. Анализ экспериментов. Подготовленные образцы подвергались импульсному нагружению волной сжатия. Возможность ориентации трещины относительно направления движения волны позволила экспериментально исследовать поле напряжений в ее вершине при различных углах атаки волной. Кадры кинограмм взаимодействия волны с трещиной, полученные при скорости съемки 480 тысяч кадров в секунду, приведены на фиг. 2. Анализ их показывает, что с момента выхода волны на берег трещины, в ее вершине постепенно формируется поле динамических напряжений, величина которых зависит от угла падения волны. Величина энергии W , запасенная в окрестности вершины трещины в зависимости от угла падения волны, показана на фиг. 3. Величина в постоянном объеме вычислялась по формуле

$$W = \frac{(\tau_0^{1,0})^2}{2lE} \sum_{i=0}^{i=n} n_i^2 s_i \quad (2.1)$$

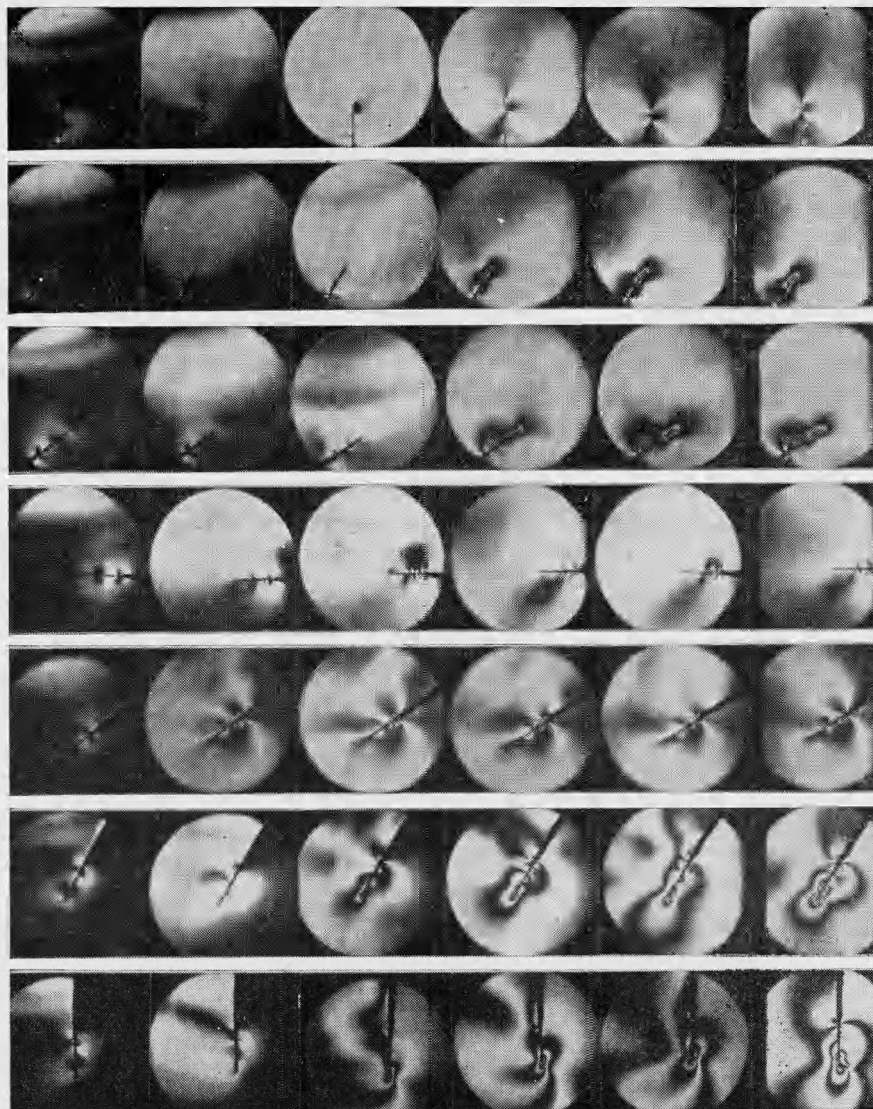
где l — толщина образца, n — номер полосы, $\tau_0^{1,0}$ — цена полосы при динамическом нагружении, E — модуль упругости, s — площадь полосы.

(Вычисления приводились для времени 75 мксек, считая с момента выхода волны на вершину трещины; этому времени соответствуют кадры перед разрушением.)

Из графика видно, что максимальная величина энергии и максимальная концентрация напряжений возникают при распространении волны лишь по одному из бере-

гов трещины ($\beta = 0$). В этом случае концентрация напряжений достигает значения, превышающего предел прочности, в результате чего происходит рост трещины под углом $80-85^\circ$ к ее первоначальному направлению.

При падении волны под углом к плоскости трещины напряжения в ее вершине уменьшаются, достигая минимального значения при $\beta = 90^\circ$. Следует заметить, что



Фиг. 2

при падении волны вдоль трещины, но навстречу ее направлению ($\beta = 180^\circ$) не возникает такой концентрации, как в случае, когда направления их движения совпадают, т. е. когда $\beta = 0$. По-видимому, это объясняется равномерным распределением энергии между берегами трещины, и поэтому розетка напряжений оказывается симметричной и слабой.

Если волна направлена под углом 30° или 120° , независимо от направления трещины в ее вершине возникает значительная концентрация напряжений.

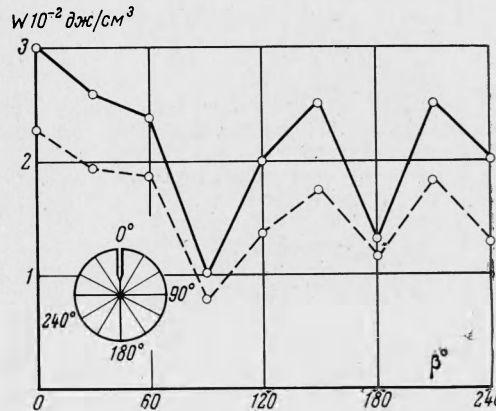
Таким образом, наиболее важным и опасным в отношении разрушения будет случай распространения волны вдоль одного из берегов трещины. Для этого случая были

выполнены эксперименты на стали и произведена расшифровка распределения наибольших касательных напряжений, полученных на плексигласе.

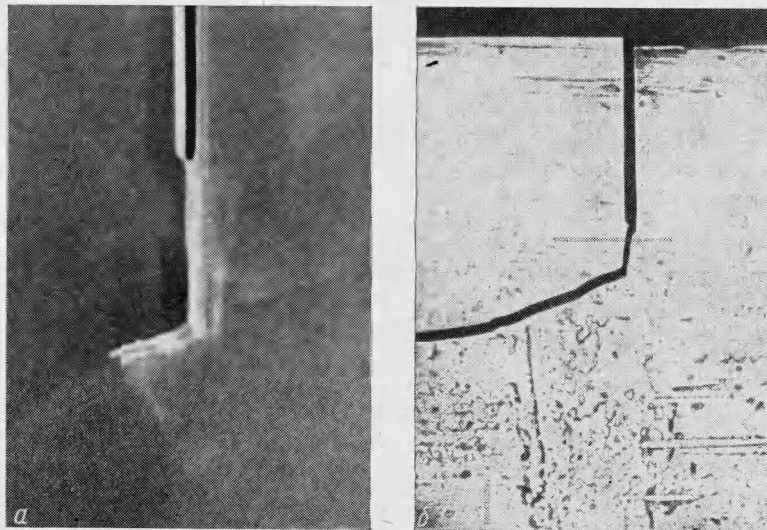
Исследовались марки стали 65Г и ШХ-15 стандартного состава. С целью получения хрупкого состояния образцы в виде пластины $300 \times 300 \times 10 \text{ мм}^3$ с надрезом подвергались закалке ($850-860^\circ \text{C}$) в горячем масле (температура масла 70°C) с последующим отпуском при $T = 180^\circ \text{C}$ в течение трех часов. В результате термических напряжений в вершине надреза образовались закалочные трещины ($l = 7-10 \text{ мм}$). При нанесении удара по одному из ее берегов зародышевые трещины меняли направления распространения (на фиг. 4 приведены образцы разрушения плексигласа (а) и стали (б)). Характерно, что угол роста трещины в стали изменялся так же, как в плексигласе (т. е. составлял $80-85^\circ$ к первоначальному направлению).

Из приведенных данных следует, что при дифракции волны на трещине в ее окрестности создаются динамические напряжения, которые могут инициировать ее рост, при этом независимо от материала и его структуры разрушение происходит в строго определенном направлении.

Для объяснения изменения направления распространения трещины при взаимодействии ее с волной напряжения, решалась плоская задача динамической теории упругости о волнах напряжений, возникающих в бесконечной пластине с вырезанным углом (подобно трещине;



Фиг. 3



Фиг. 4

фиг. 5) при падении на острие угла в момент $t = 0$ элементарной плоской продольной волны вида

$$\begin{aligned} \varphi &= s^\circ(t - \theta_0 x + \sqrt{a^2 - \theta_0^2} y) \quad (a\theta_0 = \text{arc cos } \beta) \\ s^\circ(\xi) &= 1 \text{ при } \xi > 0, \quad s^\circ(\xi) = 0 \text{ при } \xi = 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Здесь a — скорость продольной волны, θ_0 — постоянная, определяющая направление падения волны.

Волна вызывает дифракционное возмущение, которое к моменту времени t заполняет сектор радиуса at , раствора $2\pi - \alpha$ и описывается продольным φ и поперечным ψ потенциалами. При решении этой задачи предполагалось, что плоская волна при малых углах падения не вызывает на границе смещения частиц в направлении, перпендикулярном поверхности трещины, т. е. что при падении продольной волны отсутствует отраженная поперечная волна. Поэтому были приняты следующие граничные условия:

$$\tau_{xy} = 0, v = 0 \text{ при } y = 0 \quad \tau_{x'y'} = 0, v' = 0 \text{ при } y' = 0$$

Естественно предположить, что дифракционное возмущение внутри сектора $OABCO$ (фиг. 5) будет только продольным, т. е. считать $\psi = 0$. Тогда задача сводится к отысканию внутри сектора $OABCO$ продольного потенциала φ , удовлетворяющего внутри рассматриваемой области волновому уравнению

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{d^2y}{dy^2} = \frac{1}{a} \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad (2.3)$$

на сторонах угла AOD — уравнению

$$v = \frac{d\varphi}{dy} = 0 \quad (2.4)$$

и на участках окружности сектора $OABCO$ — условию $\varphi = \text{const}$.

Граничные условия $\tau_{xy} = 0$ при $y = 0$ выполняются автоматически при выполнении условия (2.4). Действительно

$$\tau_{xy} = 2\mu \frac{d^2\varphi}{dx dy} = 2\mu \frac{dv}{dx}$$

Поэтому $\tau_{xy} = 0$ при $v = 0$.

Решение этой задачи в элементарных функциях было получено в работе [7]. И следующее выражение приведено авторами [8] для функций

$$\varphi(x, y, t) = \text{Re} \frac{1}{\pi i} \ln \frac{(e^{-\gamma_1 i} - z)(e^{-\gamma_2 i} - z)}{(e^{\gamma_1 i} - z)(e^{\gamma_2 i} - z)} + \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{\pi}$$

$$z = (e^{-xij})^n, \quad j = \frac{at}{r} - \left(\frac{a^2 t^2}{r^2} - 1\right)^{1/2} e^{2i}$$

Здесь r, θ — полярные координаты точек внутри сектора $OABCO$

$$\gamma_1 = \frac{\pi(\beta - \alpha)}{2\pi - \alpha}, \quad \gamma_2 = \pi - \frac{\pi\beta}{2\pi - \alpha}, \quad n = \frac{\pi}{2\pi - \alpha}$$

Для исследования распределения напряжений внутри рассматриваемой области были найдены компоненты напряженного состояния по формулам

$$\sigma_x = 2\mu \frac{d^2\varphi}{dx^2} + \lambda \left(\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{d^2\varphi}{dy^2} \right)$$

$$\sigma_y = 2\mu \frac{d^2\varphi}{dy^2} + \lambda \left(\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{d^2\varphi}{dy^2} \right)$$

$$\tau_{xy} = 2\mu \frac{d^2\varphi}{dx dy}$$

Главные напряжения, максимальные касательные напряжения и углы наклона главных напряжений к осям координат находились по формулам

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

$$\theta_{1,2} = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

Величины σ_1 , σ_2 , τ_{\max} , $\theta_{1,2}$ были подсчитаны при помощи электронно-вычислительной машины М-20 для следующих значений:

$$\alpha = 1^\circ, \quad \beta = 0, 2, 3, 5^\circ$$

Для констант Ламе приняты следующие значения (органическое стекло):

$$\mu = 1.96 \cdot 10^{10}, \quad \lambda = 4.54 \cdot 10^{10}$$

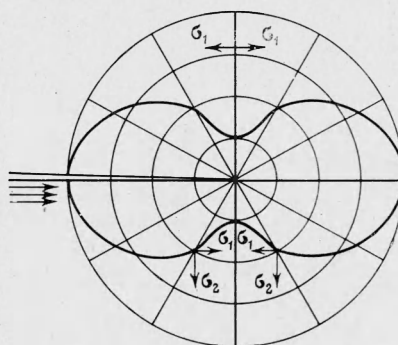
При вычислении главных и максимальных касательных напряжений значение r изменялось от 1 до 30 мм через 5 мм. Угол θ изменялся от 0 до $2\pi - \alpha$ через 10° и от 0 до 240° через каждые 20 мксек. По результатам вычислений были построены кривые равных касательных напряжений (фиг. 6).

Сопоставление расчетных данных с экспериментальными показало, что при малых углах падения волны $\beta \leq 30^\circ$ картины изохром, полученные при помощи киносъемки, совпадают с построенными кривыми равных касательных напряжений. Это позволяет считать, что эпюры напряжений, построенные по результатам вычислений, соответствуют действительным напряжениям, возникающим на сторонах трещины.

Вычисления угла θ , характеризующего наклоны главных напряжений к осям координат, показывают, что он составляет несколько градусов. Следовательно, одно из главных напряжений совпадает с осью AO , которая параллельна поверхности магистральной трещины.

Как видно из фиг. 4—6, в вершине трещины наблюдается концентрация растягивающих напряжений, причем наибольшие напряжения возникают в площадке, перпендикулярной к поверхности трещины. Этот результат хорошо подтверждался картиной образования трещины при экспериментах (фиг. 4).

Анализируя теоретические и экспериментальные данные, можно сделать вывод, что в формировании напряжений в вершине трещины определяющее значение имеют смещения частиц среды, направленные вдоль трещины. С ростом угла ввода волны уменьшается компонента продольных смещений, соответственно уменьшается концентрация напряжений в вершине трещины.



Фиг. 6

Поступила 19 X 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. T a y l o r G. J. The testing of materials at high rates of loading. J. Just Civil Engrs, 1946, vol. 26, No. 8.
2. C l a r k P. S., D u w e P. E. The influence of strain rate on some tensile properties of steel. Proc. Amer. Soc. Testing Materials, 1950, vol. 50, pp. 560—575.
3. J o h n s o n J. E., W o o d P. S., C l a r k D. S. Delayed yielding in annealed low-carbon steel under compression impact. Proc. Amer. Soc. Testing Materials, 1953, vol. 53, pp. 755—764.
4. J o h n s o n J. E., W o o d P. S., C l a r k D. S. Dynamic stress-strain revolutions for annealed 2 S aluminium under compression impact. J. Appl. Mech., 1953, vol. 20, pp. 523—529.
5. К о е с к у Н., Д о у ч Л. S. Experimental studies in plastic wave propagation. J. Mech. and Phys. Solids, 1962, vol. 10, No. 3, pp. 195—223.
6. C a m p b e l l J. D., M a i d e n G. J. The effect of impact loading on the static yield strength of a medium-carbon steel. J. Mech. and Phys. Solids, 1957, vol. 6, No. 1, pp. 53—62.
7. С о б о л е в С. Л. Теория дифракции плоских волн. Тр. Сейсмологического ин-та АН СССР, 1934, т. 41.
8. С в е к л о В. А., С ю к и я й н е н В. А. Дифракция плоской упругой волны относительно угла. Докл. АН СССР, 1958, т. 119, № 6.