

## ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОУПРУГИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАННИХ СТАДИЙ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ

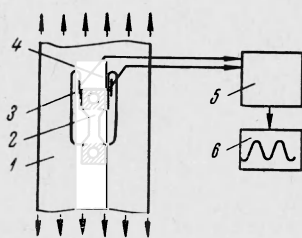
А. Я. Александров, Л. А. Краснов, В. А. Кушнеров

(Новосибирск)

Фотоупругие покрытия толщиной в несколько десятков микрон оказались достаточно эффективными для исследования деформаций в зернах металлов [1-3]. Выбор толщины покрытия на основе анализа его разрешающей способности и использование компенсационного способа измерений с фотографической регистрацией величины оптической разности хода позволяют получить надежные числовые результаты при весьма сложном распределении деформаций в зернах на различных стадиях нагружения [2,3].

В данной работе метод фотоупругих покрытий применен для исследования ранних стадий усталостного разрушения стальных и чугуновых образцов при номинальных (средних по сечению образца) напряжениях как больших, так и меньших предела пропорциональности. Применение покрытий толщиной до 50 мк дало возможность получить картины распределения деформаций на исследуемой поверхности образца и определить их локальные значения в зонах концентрации как до появления микротрещин так и при их зарождении и развитии. Отметим, что покрытия существенно большей толщины (например, порядка миллиметра), применявшиеся в других работах [4,5], не позволяют обнаружить эффекты накопления деформаций и образования трещин в микрообластях.

**1. Схема и техника эксперимента.** Устройство для циклического нагружения образцов включало в себя стальную нагрузочную рамку 1, к которой образец 2 приклеивался эпоксидной смолой и прижимался болтами (фиг. 1). Рамка укреплялась в захватах пульсатора и, деформируясь (в пределах пропорциональности), вызывала деформацию образца, величина которой могла существенно превышать предел пропорциональности материала последнего. Такое нагрузочное устройство позволяло регулировать либо номинальное напряжение («мягкое» нагружение), либо номинальную (среднюю по объему) деформацию («жесткое» нагружение). Номинальная деформация при испытании контролировалась по манометру пульсатора, а усиление — с помощью датчиков омического сопротивления 3, наклеенных на хвостовик 4 рамки 1. Датчики использовались в комплекте с усилителем 5 и осциллографом 6.



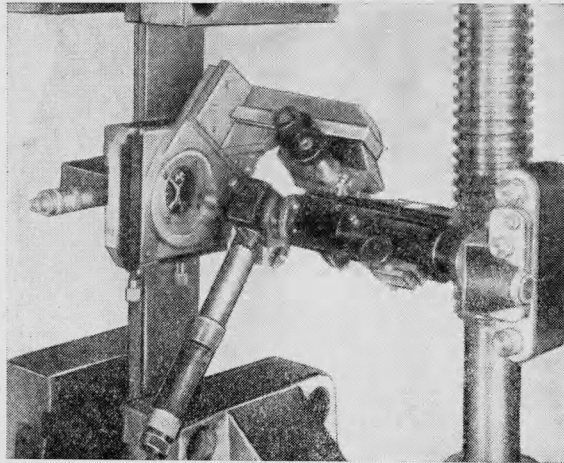
Фиг. 1

Для регистрации картин полос интерференции в покрытии, соответствующих линиям  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \text{const}$ , использовалась поляриметрическая установка [2,3] на базе микроскопа МП-6 с иммерсионным компенсатором и фотоаппаратом (фиг. 2). В процессе испытания непрерывно просматривалось все рабочее поле образца. Фотографирование производилось после 1, 10, 10<sup>2</sup>, . . . , 10<sup>6</sup> циклов нагружения, а в необходимых случаях и чаще. В момент съемки пульсатор останавливался, а номинальное напряжение (при мягком нагружении) поддерживалось на уровне максимального напряжения цикла. Аналогично при жестком нагружении в момент съемки фиксировалась наибольшая номинальная деформация цикла.

Исследовались плоские образцы с размерами поперечного сечения  $3 \times 2$  мм и длиной рабочей зоны 6—8 мм. На каждый образец по методике, изложенной в работе [3], наносилось покрытие толщиной 0.04—0.05 мм из материала ЭД-6М. Прочность такого покрытия была, как правило, значительно выше прочности самого материала ЭД-6М, найденной при испытании стандартных (не нанесенных на металл) образцов. Так, хотя для материала ЭД-6М предел пропорциональности по деформациям  $\varepsilon_* = 2\%$ , а предел выносливости  $\sigma_{-1} = 2$  кг/мм<sup>2</sup> (что соответствует деформации  $\varepsilon_{-1} = 0,7\%$ ), с помощью покрытия из такого материала, нанесенного на образец, уверенно измерялись деформации до 4—6% без накопления неупругих деформаций и без появления трещин в самом покрытии. Остаточные деформации, замеренные в покрытиях, отделенных от разрушенных образцов путем сдвигания последних, оказались незначительными.

**2. Результаты эксперимента.** Исследование образцов из серого чугуна ( $\sigma_b = 14,8$  кг/мм<sup>2</sup>). Нагружение образцов осуществлялось пульсирующей растягивающей нагрузкой (наименьшее номинальное напряжение цикла  $\sigma_{\min} \approx 0$ , наибольшее  $\sigma_{\max}$  для различных образцов изменялось от 5 до 9,5 кг/мм<sup>2</sup>). Уже после первого цикла нагру-

жения была отмечена концентрация деформаций по поверхности образцов. Если наибольшее номинальное напряжение цикла не превышало  $6 \text{ кг/мм}^2$  количество зон концентрации в рабочей части образца обычно было небольшим. Области концентрации располагались в основном в местах, расположения пластинок графита. Дальнейшее циклическое нагружение образцов сопровождалось ростом величин максимальных деформаций в местах концентрации. Одновременно происходило увеличение размеров зон концентрации, а также появление новых зон, которые не были заметны ранее. На фиг. 3,а изображены поля деформаций для части образца в момент действия максимальной нагрузки после первого (сплошные линии) и  $10^4$  (штриховые линии) циклов нагружения ( $\sigma_{\max} = 6 \text{ кг/мм}^2$ ). Значения разности главных деформаций на линиях  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \text{const}$  приведены в процентах (стрелкой показано направление растяжения образца). Некоторые из фотографий картин полос, по которым построены эти линии, приведены на фиг. 3,б, в. Из них фиг. 3,б снята после первого, а фиг. 3,в после  $10^4$  цикла. Видимой на этих снимках полосе интерференции соответствует разность главных деформаций на поверхности образца  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 0,7\%$ . Напомним, что полоса здесь получена при одновременном просвечивании покрытия и компенсатора [2,3].



Фиг. 2

Разрушение таких образцов происходило путем постепенного развития одной или нескольких микротрещин. Микротрещины на поверхности образцов часто появлялись в местах, где измеренная в начале нагружения концентрация деформаций была сравнительно невелика. Однако зоны концентрации, расположенные вблизи развивающейся трещины, оказывали заметное влияние как на направление, так и на скорость ее развития. Скорость распространения трещины в ряде случаев даже при мягком нагружении была невелика и продолжительность испытания образца с момента обнаружения трещины колебалась от нескольких десятков до  $3 \cdot 10^4$  циклов нагружения.

Результаты испытания одного из образцов при  $\sigma_{\max} = 5,2 \text{ кг/мм}^2$  представлены на фиг. 4 и 5. Поскольку место возникновения трещин заранее было неизвестно, последовательно фотографировалась вся рабочая поверхность образца. Фотографии картин полос (фиг. 4,а — в) для участка поверхности, где впоследствии развивались трещины, были отобраны после испытания. Полосам интерференции на этих снимках соответствует локальная деформация на поверхности образца  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 0,3\%$ .

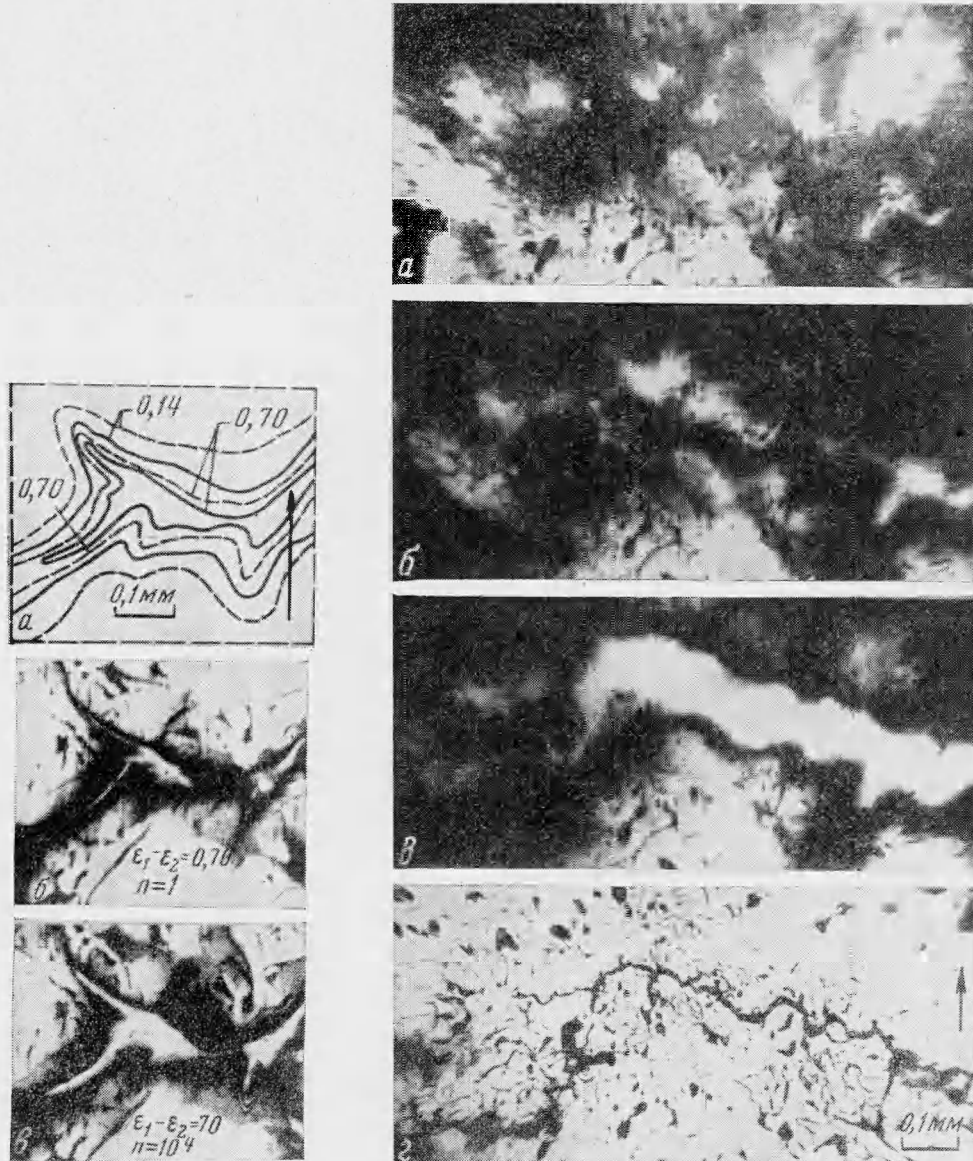
На ранних стадиях нагружения, примерно до  $10^4$  циклов, концентрация в месте будущей трещины (фиг. 4,а, б) была относительно мала. Для сравнения на фиг. 5 дана картина полос после первого цикла нагружения для другого участка этого же образца, где концентрация была наибольшей. Полосе интерференции здесь соответствует местная деформация на поверхности  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 0,45\%$ .

После  $6 \cdot 10^4$  циклов нагружения (фиг. 4,в) концентрация в месте, где впоследствии возникла трещина, стала соизмеримой с концентрацией на других участках. После  $7 \cdot 10^4$  циклов в образце образовались поперечные микротрещины, разделенные небольшими перемычками. Длина трещины при дальнейшем нагружении увеличивалась.

После  $8 \cdot 10^4$  циклов этот образец испытывался в условиях жесткого нагружения, при котором номинальная деформация цикла, достигнутая к этому моменту, поддерживалась постоянной. Нагрузка на образец при этом падала с ростом числа циклов. Такое испытание приближенно имитировало условия работы микрообъема с трещинами, ограниченного массивом, в котором трещин еще нет. Развитая трещина ( $9 \cdot 10^4$  циклов), сфотографированная перед разрушением образца, показана на фиг. 4,г. Последний снимок получен для образца без покрытия, которое было удалено.

Процесс развития одиночной трещины при мягком нагружении ( $\sigma_{\max} = 5,5 \text{ кг/мм}^2$ ) другого чугунного образца характеризуется фиг. 6,а — в. Здесь приведены характерные картины полей деформаций для части рабочей поверхности образца после  $3,53 \cdot 10^4$  (а),  $3,86 \cdot 10^4$  (б),  $4,66 \cdot 10^4$  (в) циклов нагружения. Эти поля были получены путем обработки картин полос, сфотографированных при различных отсчетах по компенса-

тору [2,3]. Край образца здесь показан сплошной линией, направление растяжения — стрелкой, трещина — жирной линией. Сначала с ростом числа циклов нагружения трещина распространялась преимущественно влево до тех пор, пока не достигала края образца. Затем началось более интенсивное развитие ее в другом направлении. Такой характер развития трещины связан, по-видимому, с наличием зоны концентрации де-



Фиг. 3

Фиг. 4

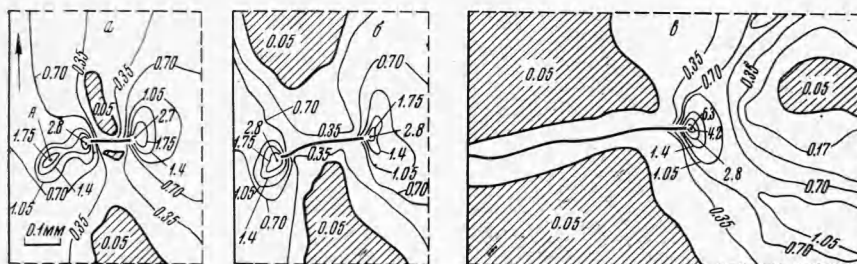
формаций вблизи ее левого конца (точка А на фиг. 6,а). Длина трещины  $l$  непрерывно и равномерно возрастала с увеличением числа циклов нагрузки (фиг. 7). Скорость роста трещины резко увеличивалась лишь непосредственно перед разрушением ( $5,02 \cdot 10^4$  циклов).

В процессе циклического нагружения образца одновременно с увеличением длины трещины наблюдалось возрастание деформаций вблизи ее концов. До  $3,8 \cdot 10^4$  циклов величина деформации у концов трещины изменялась мало (вместе с концом трещины

происходило только «смещение» поля деформаций). Затем, особенно в период интенсивного продвижения правого конца трещины, здесь наблюдалось значительное увеличение деформаций. Величины максимальных разностей главных деформаций у конца трещины после  $3.53 \cdot 10^4$  и  $4.66 \cdot 10^4$  циклов нагружения отличаются примерно в 2.3 раза. Увеличение деформаций здесь невозможно объяснить только уменьшением эффективной площади поперечного сечения образца за счет роста длины трещины. Отметим, что для нескольких наблюдавшихся в таких образцах трещин приблизительно одинаковой длины характер распределения деформаций и их максимальные значения вблизи концов трещины совпадают.



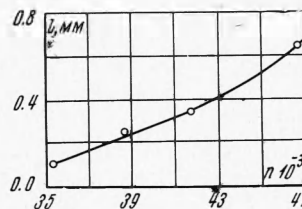
Фиг. 5



Фиг. 6

При наибольшем напряжении цикла  $\sigma_{\max} \gg 6 \text{ кг/мм}^2$  после первого цикла нагружения на поверхности образца обычно наблюдалось большое число зон концентрации, расстояния между которыми были невелики. При последующем циклическом нагружении размеры зон со значительной концентрацией деформаций увеличивались, зоны сливались друг с другом и занимали большую часть образца по ширине. Видимых трещин в этот период не обнаруживалось. Затем вдоль линии, соединявшей наиболее деформированные зоны, возникла и развивалась трещина. Скорость роста такой трещины была велика и распространение ее на всю ширину сечения происходило в течение одного цикла нагружения.

*Распределение деформаций в образцах из стали Э3А* (предел пропорциональности  $\sigma_* = 35 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\sigma_b = 53 \text{ кг/мм}^2$ , предел выносливости  $\sigma_{-1} = 25.5 \text{ кг/мм}^2$ ). Стальные образцы, как и чугунные, испытывались в условиях нагружения пульсирующей растягивающей нагрузкой при номинальных напряжениях  $\sigma_{\max} \approx 0, \sigma_{\min} = 20-35 \text{ кг/мм}^2$ . Уже при первом цикле, что

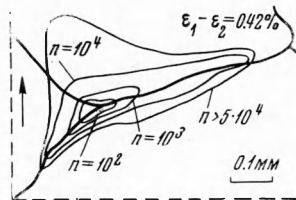


Фиг. 7

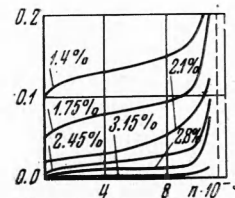
соответствовало статическому нагружению, была отмечена концентрация деформаций в микробластях (см. также [2,3]). Области концентрации, как правило, размещались вблизи тройных стыков границ зерен преимущественно на границах, составлявших угол  $\sim 45^\circ$  с направлением растяжения. Величины наибольших деформаций в зависимости от максимального напряжения цикла изменялись от 0.4 до 3%.

При циклическом нагружении было отмечено два вида изменения деформаций по поверхности образцов. В первом случае (при максимальном напряжении цикла менее

30 кг/мм<sup>2</sup>) в начальный период нагружения (до  $n = 10^4 - 10^5$  циклов в зависимости от величины  $\sigma_{\max}$ ) деформации в зонах концентрации по мере увеличения количества циклов возрастали и одновременно происходило увеличение размеров этих зон. На фиг. 8 показано положение линии  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \text{const}$ , в точках которой разность главных деформаций равна 0.42%, после  $10^2, 10^3, 10^4, 5 \cdot 10^4$  циклов нагружения ( $\sigma_{\max} = 23.4$  кг/мм<sup>2</sup>, жирными линиями показаны границы зерен). Внутри областей, ограниченных этими линиями,  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 > 0.42\%$ . Как видно, до  $10^2$  циклов размеры области  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 \geq 0.42\%$  менялись мало, а затем наблюдалось их значительное развитие. После  $5 \cdot 10^4$  циклов картина стабилизировалась и дальнейшее нагружение образца до  $10^6$  циклов не приводило к изменению деформаций и образованию трещин.



Фиг. 8



Фиг. 9

В некоторых случаях зоны с концентрацией деформаций располагались и во внутренних областях зерен. Изменение размеров этих зон с увеличением числа циклов нагружения происходило аналогично описанному выше.

В отдельных образцах до  $10^5$  циклов кроме увеличения деформаций в зонах концентрации, возникших после однократного нагружения, наблюдалось появление новых зон. Как и в предыдущем случае, эти зоны обычно располагались у границ зерен, ориентированных под углом  $\sim 45^\circ$  к направлению растяжения, и значительно реже во внутренних областях зерен. Изменение деформаций и размеров вновь появившихся зон концентрации происходило так же, как и в областях, возникших в начале нагружения. Стабилизация размеров этих зон наступала после  $2 \cdot 10^4 - 10^5$  циклов с момента их появления (в зависимости от величины  $\sigma_{\max}$ ).

В том случае, когда максимальное напряжение цикла было больше 30 кг/мм<sup>2</sup>, характер изменения деформаций на поверхности образцов обычно отличался от ранее описанного. По мере увеличения числа циклов нагружения максимальные деформации в зонах концентрации непрерывно возрастали. Одновременно деформирование распространялось и на соседние участки, охватывая все большую часть рабочей поверхности образца. Такое развитие особенно интенсивно шло в начале испытания и непосредственно перед разрушением. Для одного из образцов на фиг. 9 показан рост суммарной площади поверхности образца, где деформация превышает определенную величину ( $\sigma_{\max} = 30$  кг/мм<sup>2</sup>). По вертикальной оси здесь отложено отношение площади, ограниченной линиями  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \text{const}$ , ко всей площади поверхности рабочего участка образца. Пунктирная линия соответствует числу циклов, приведших к разрушению. В случае мягкого нагружения разрушение таких образцов происходило в течение одного цикла.

Приведенные данные свидетельствуют о возможности исследования ранних стадий процесса усталостного разрушения металлов при помощи тонких фотоупругих покрытий.

Поступила 17 VIII 1969

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Б. А. О начальной стадии пластической деформации поликристаллов. Докл. АН СССР, 1964, т. 159, № 1.
2. Александров А. Я., Краснов Л. А., Кушнеров В. А. Исследование деформаций в микрорегионах поликристаллов при помощи фотоупругих покрытий. ПМТФ, 1967, № 3.
3. Александров А. Я., Краснов Л. А., Кушнеров В. А. Применение метода фотоупругих покрытий к исследованию деформаций в зернах металла. Тр. Новосиб. ин-та инж. ж.-д. трансп. 1967, вып. 62.
4. Богдыль П. Т., Ларионов В. В., Пригоровский Н. И. Метод исследования упруго-пластических деформаций при повторно переменных нагрузках. Заводск. лаборатория 1965, т. 31, № 9.
5. Ларионов В. В. Кинетика напряженного состояния и разрушение в зонах концентрации при циклическом упрочнении. В сб.: «Сопротивление деформированию и разрушению при малом числе циклов нагружения», М., «Наука», 1967.