

повреждений на низкой ступени блока, которое вызвано кинетикой остаточных напряжений у концентратора при программном нагружении. Если для образцов с концентратором напряжений при вычислении значений a по линейной гипотезе учитывать кинетику остаточных напряжений у концентратора при программном нагружении, то полученные значения практически совпадают с таковыми для гладких образцов.

Литература

1. Драган В.И., Семенюк С.М. Влияние концентрации напряжений на долговечность алюминиевых сплавов при программном нагружении: сб. трудов XI международного коллоквиума. "Механическая усталость металла", Т.1. Киев, 1992. -с. 216 - 221.

2. Труфяков В.И., Гуца О.И., Троценко В.П. Изменение остаточных напряжений в зонах концентрации при циклическом нагружении// Пробл. прочности. -1976. -№ 12. -с 14-17.

НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ С ДЕФЕКТАМИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ КРУЧЕНИИ

С. М. Ляликов

При изготовлении и эксплуатации элементов конструкции может произойти повреждение поверхностного слоя в виде рисок (следов от обрабатывающего инструмента), прижогов (при шлифовании поверхности), забоин (результат соударения изделия с посторонним предметом), коррозионных язв, эрозионных повреждений и т.п. Эти дефекты способствуют концентрации напряжений и изменению состояния поверхностного слоя элемента, поэтому они часто служат инициаторами усталостного разрушения. В связи с этим в настоящей работе исследовали закономерности зарождения и развития усталостных трещин на ранних стадиях возле различных поверхностных дефектов.

Многообразие дефектов, встречающихся на поверхности элементов можно классифицировать по ряду признаков, одним из которых могут быть величина и знак остаточных напряжений, находящихся в окрестности дефекта при его возникновении. В связи с этим для исследования были приняты три типа поверхностных дефектов: отпечаток пирамидального индентора, язва травления и элемент островкового покрытия, представляющий собой включение из сплава ВК6. Первый дефект, имитирующий забоину, наносили на поверхность образца вдавливанием индентора в виде четырехгранной пирамиды с углом в вершине $\sim 90^\circ$. Нагрузка на индентор составляла $F=300, 600, 700$ Н. Возле такого дефекта появляются сжимающие остаточные напряжения [1].

Противоположные по знаку остаточные напряжения наводятся в окрестности включения из сплава ВК6, нанесенного электроискровым способом [2] с использованием серийного прибора ЭФИ-46А.

Язвы травления, в окрестности которой остаточные макронапряжения отсутствуют, получали сверлением глухого отверстия (диаметр сверла 0,6 мм) с последующим химическим растравливанием дефекта для снятия наклепанного слоя материала.

В качестве завершающей механической обработки поверхности рабочей части образцов приняты: механическое полирование, упрочнение обкаткой роликом (ППД) и шлифование абразивным кругом.

Исследование напряженного состояния поверхностного слоя рабочей части образцов методом послойного стравливания [3] показало, что после механического полирования наводятся остаточные напряжения сжатия в очень тонком слое (0,05...0,1) мм. Механическое упрочнение обкаткой роликом создает сжимающие остаточные напряжения на значительной глубине. Максимальные значения осевых напряжений для обоих материалов находятся у поверхности. Далее напряжения уменьшаются и на глубине 0,3...0,4 мм меняют знак на противоположный. Окружные остаточные напряжения примерно на глубине 0,02...0,04 мм имеют локальный минимум сжимающих напряжений. Далее они увеличиваются, достигая максимального значения 550 МПа у сплава ВТ3-1 на глубине ~ 0,2 мм и 800 МПа - у стали 14Х17Н2 на глубине ~ 0,3 мм.

Шлифование образцов абразивным кругом наводит в поверхностном слое растягивающие, осевые и окружные, остаточные напряжения до глубины 0,07...0,15 мм. Далее они переходят в сжимающие.

Испытания на усталость при кручении проводили в мягком режиме нагружения при $t=293\text{K}$ на сплошных цилиндрических образцах $\varnothing 14$ мм из титанового сплава ВТ3-1 (отжиг при 1173 К 2 ч., при 923 К 2 ч. в воздухе) и мартенситной стали 14Х17Н2 (закалка с 1273 К 2 ч. в масле, отпуск при 853К 8 ч. в воздухе).

Для исследования кинетики роста трещин в начальный период важно знать расположение очага зарождения этих трещин. Приведенные в работе [4] результаты, полученные на отожженных образцах, при круговом изгибе, показывают, что усталостная трещина развивается со дна неглубоких глухих микроотверстий или зарождается на поверхности образца у края глубоких отверстий. Исследования показали, что аналогичные закономерности имеют место и при циклическом кручении образцов с дефектами на полированной поверхности, когда роль технологических остаточных напряжений незначительная. Однако не всегда местоположение очага зарождения усталостной трещины определяется только геометрией дефекта. Так в упрочненных образцах

независимо от формы дефекта трещина начинала свое развитие в глубине на его внутренней поверхности.

Технологические остаточные напряжения оказывают влияние и на продолжительность стадии зарождения трещин. На рис.1 представлены кривые усталости по зарождению трещин нормального отрыва длиной $l=0,1$ мм в сплаве ВТЗ-1 при кручении, которые показывают, что при одних и тех же значениях относительных амплитуд рабочих напряжений τ_a/τ_{-10} (τ_{-10} - предел выносливости образцов с дефектом) сжимающие остаточные напряжения сжимают продолжительность стадии зарождения трещин. Это проявляется в меньшей степени у гладких образцов, в большей - в образцах с дефектами. Так при $\tau_a/\tau_{-10} = 1,05 \dots 1,10$ она составила для отпечатка индентора $\sim 20\%$, для язвы травления - $2 \dots 3\%$, для включения из сплава ВК6 - $5 \dots 10\%$ от соответствующих значений продолжительности стадии зарождения трещин возле дефектов на полированной поверхности.

Исследования кинетики начального роста трещин из дефектов показали, что и здесь технологические остаточные напряжения играют важную роль. На рис.3 представлены данные скорости роста трещин нормального отрыва из дефектов при циклическом кручении образцов из сплава ВТЗ-1 в зависимости от относительной длины трещин l/a (l - длина трещины поверхности образца; a - диагональ отпечатка, радиус язвы травления или включения) и относительной амплитуды номинальных рабочих напряжений τ_a/τ_{-10} . Наблюдения за трещинами вели начиная с длины $l=0,1$ мм. Они показали, что в полированных образцах, где влияние технологических остаточных напряжений незначительно, зародившиеся возле любого из дефектов трещины длиной $l=0,1$ мм беспрепятственно росли и дальше приводя к полному разрушению образцов. При наличии же в поверхностном слое образцов, упрочненных ППД сжимающих остаточных напряжений трещины той же длины и при тех же относительных значениях амплитуд номинальных рабочих напряжений прекращали рост достигнув длины $1,0 \dots 2,0 l/a$ - возле отпечатка индентора, $0,5 \dots 0,7 l/a$ - возле язвы травления, $0,5 \dots 1,7 l/a$ - возле включения из сплава ВК6. Разрушение образцов при τ_a/τ_{-10} в этом случае происходило по сечениям вне дефектов.

В настоящей работе проводили также исследования изменения формы усталостной трещины на начальной стадии. Ранее [5] было показано, что независимо от соотношения первоначальных размеров полуосей l_0 и c_0 трещина растет при циклическом изгибе таким образом, чтобы принять энергетически устойчивую форму, характеризующуюся постоянством значения коэффициента интенсивности напряжений вдоль ее фронта. Аналогичные результаты получены и при циклическом кручении, которые представлены на рис.2 в виде зависимостей соотношения размеров полуэллиптической трещины от ее относительной длины по поверхности. Как при изгибе [5], так и при кручении графики,

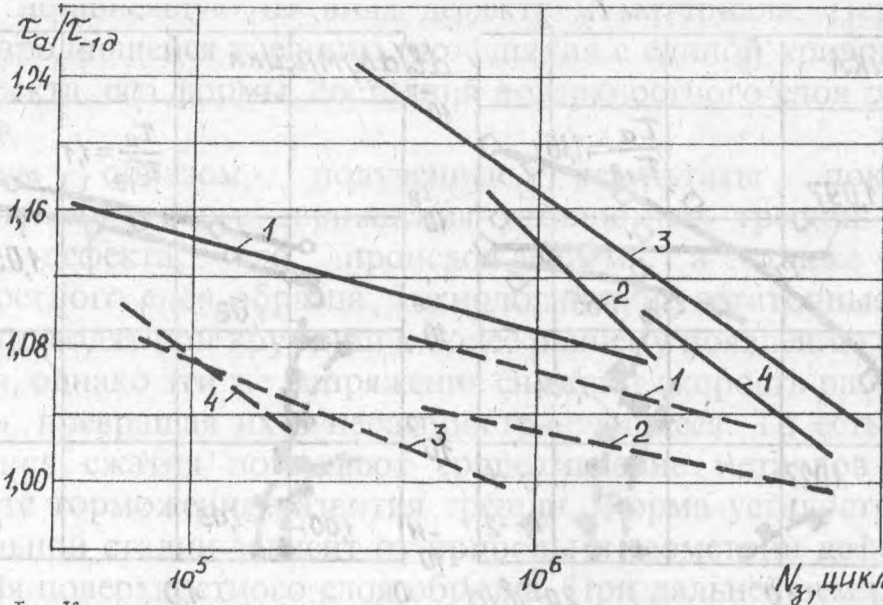


Рис. 1. Кривые усталости по зарождению трещин нормального отрыва длиной $l = 0,1$ мм в сплаве ВТЗ-1 при кручении, выходящих из дефектов: 1 - гладкие образцы; 2 - отпечаток индентора; 3 - язва травления; 4 - включение из сплава ВК6; сплошные линии - дефекты на полированной поверхности, штриховые - после ППД.

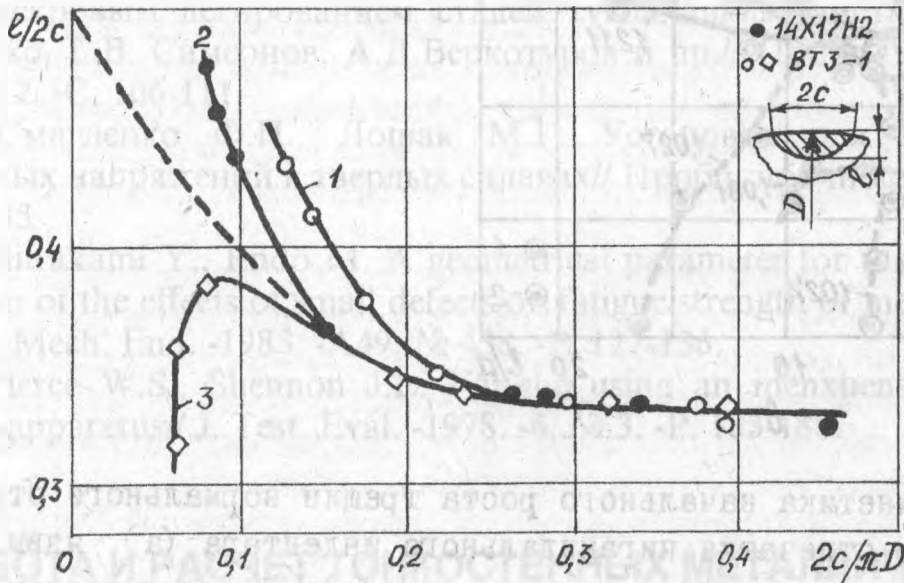


Рис. 2. Зависимость формы усталостной трещины нормального отрыва от ее относительных размеров при кручении: трещина развивалась из отпечатка индентора (1), язвы травления (2), находящихся на полированной поверхности; из язвы травления на шлифованной поверхности (3).

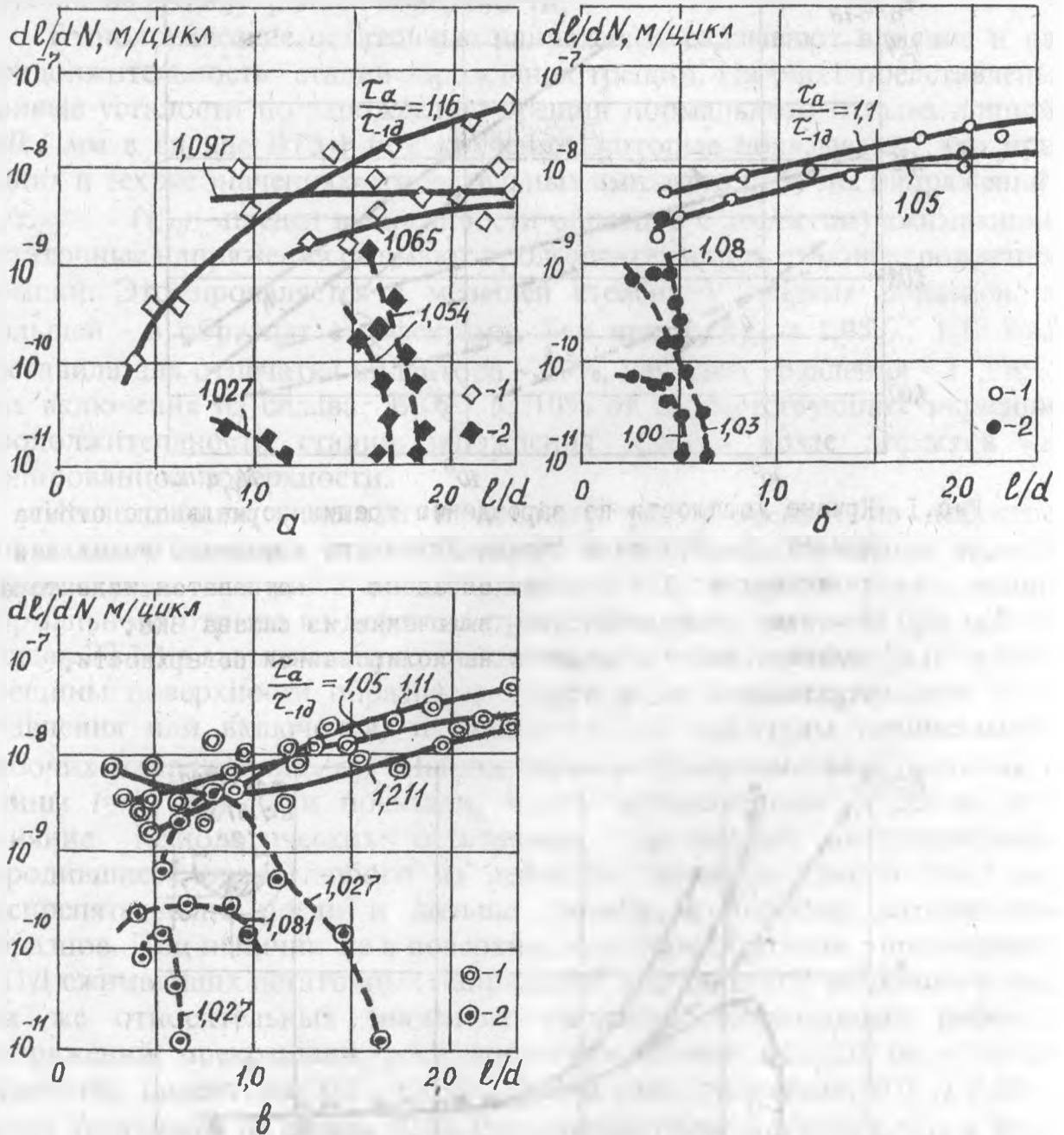


Рис.3. Кинетика начального роста трещин нормального отрыва из отпечатка пирамидального индентора (а), язвы травления (б) и включения (в) при циклическом кручении образцов из сплава ВТЗ-1: 1 (сплошные линии) - дефекты на полированной поверхности, 2 (штриховые линии) - дефекты на поверхности, упрочненной ПЦД.

характеризующие изменение формы трещины, выходят на единую кривую, независимую от вида дефекта и материала. Первоначальная форма зародившейся трещины (до слияния с единой кривой) зависит от вида дефекта, его формы, состояния поверхностного слоя рабочей части образцов.

Таким образом, полученные результаты показали, что местоположение очага зарождения усталостных трещин определяется формой дефекта, его происхождением, а также состоянием поверхностного слоя образца. Технологические остаточные напряжения сжатия приводят при кручении к более раннему появлению трещин возле дефектов, однако эти же напряжения снижают скорость распространения трещины, превращая их в нераспространяющиеся. То есть, остаточные напряжения сжатия повышают сопротивление металлов усталости в результате торможения развития трещин. Форма усталостной трещины на начальной стадии зависит от природы и геометрии дефекта, а также состояния поверхностного слоя образца. При дальнейшем росте как при изгибе, так и при кручении все графики, характеризующие изменение формы трещины ложатся на единую кривую.

Литература

1. Hills D.A. Some aspects of post - yield contact problems// Wear. - 1983. -85, № 1. -P. 107-119.
2. Прочностные характеристики слоев, полученных электроискровым легированием сталей тугоплавкими металлами/ Г.С. Писаренко, Г.В. Самсонов, А.Д.Веркотуров и др.// Пробл. прочности. - 1973. -№ 2. -С. 106-111.
3. Смагленко Ф.П., Лошак М.Г. Установка для определения остаточных напряжений в твердых сплавах// Пробл. прочности. -1974. -№ 3. -с. 32-35.
4. Murakami Y., Endo M. A geometrical parameter for the quantitative estimation of the effects of small defects on fatigue strength of metals // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. -1983. -A49, № 438. -P. 127-136.
5. Pierce W.S., Shennon J.L. Fatigue using an inexpensive resonant fatiguins apparatus// J. Test. Eval. -1978. -6. № 3. -P. 183-188.

РАБОТА И РАСЧЕТ ТОНКОСТЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПИРАЛЬНОНАВИВНЫХ СИЛОСОВ

Н. Н. Мурашко

1. Особенности конструктивного решения

Хотя наиболее простыми при изготовлении и монтаже являются бескаркасные силосы из-за их гладких стенок, спиральнонавивные силосы, навиваемые по системе "Lipp", получили широкое