

Академия наук Украины
Институт проблем прочности

На правах рукописи

ТКАЧ ЮРИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ С УЧЕТОМ
ИСТОРИИ МЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев 1993

№ 26.919

Работа выполнена в Институте проблем прочности АН Украины

ЛННБ України ім. В. Стефаніка



00814557 (U)

Ученый руководитель -

доктор технических наук
В. В. Покровский

Специальные оппоненты -

доктор технических наук
В. П. Голуб

кандидат технических наук
В. Н. Красико

Руководящая организация -

АНТК им. О. К. Антонова

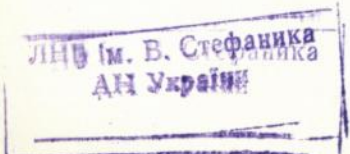
Защита состоится "29" апреля 1993 г. в 9 30 часов
на заседании специализированного совета Д 016.33.01
при Институте проблем прочности АН Украины
по адресу: 252014, Киев-14, ул. Тимирязевская, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института

Автореферат разослан "29" МАРТА " 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук

Ф. Ф. Гягиняк



Актуальность работы. Во многих элементах конструкций уже на стадии изготовления появляются трещиноподобные дефекты, которые в процессе эксплуатации под действием циклического нагружения увеличиваются и в результате могут служить причиной хрупкого разрушения. Кроме того, наличие резкой концентрации напряжений может привести к возникновению усталостной трещины уже на самой ранней стадии эксплуатации. В связи с этим, большое значение имеет проблема оценки долговечности элементов конструкций на стадии развития в них усталостных трещин.

Известно, что скорость роста усталостной трещины (РУТ) зависит от большого числа эксплуатационных, технологических и конструктивных факторов. Как показывает практика, очень важным фактором, оказывающим влияние на общие закономерности РУТ, и без учета которого невозможно достоверное прогнозирование долговечности элементов конструкций на этапе развития трещины, является история механического нагружения, которая включает в себя как предварительное пластическое деформирование материала до зарождения усталостной трещины, так и нерегулярность эксплуатационного спектра нагруженности элементов конструкций при наличии в них трещин.

Анализ литературных данных говорит о том, в настоящее время проблема прогнозирования развития усталостной трещины с учетом истории механического нагружения весьма далека от своего решения. В частности, отсутствуют методы количественного прогнозирования влияния предварительного однократного пластического деформирования материала без трещины на скорость РУТ. Кроме того, для достоверной оценки долговечности элементов конструкции с трещиной при эксплуатационных спектрах нагруженности необходимо располагать методом учета влияния нерегулярности нагружения на скорость РУТ; предложенные же к настоящему времени модели РУТ при нерегулярном нагружении часто не выдерживают экспериментальной проверки или работают удовлетворительно только в узких диапазонах скоростей РУТ.

Цель настоящей работы заключается в решении следующих основных задач:

1. Исследование влияния предварительной однократной пластической деформации на скорость РУТ в различных конструкционных материалах.
2. Разработка метода количественного прогнозирования влияния предварительной однократной пластической деформации на скорость РУТ.
3. Комплексное исследование влияния нерегулярности нагружения (вклю-

чая однократные перегрузки, блочное и программное нагружение) на закономерности РУТ; определение и исследование факторов, управляющих развитием трещины при нерегулярном нагружении.

4. Разработка модели развития усталостной трещины при нерегулярном нагружении, которая могла бы служить основой метода прогнозирования долговечности элементов конструкций с трещинами.

Научная новизна работы. Показано, что предварительное однократное пластическое деформирование оказывает полярное воздействие на сопротивление росту усталостных трещин циклически разупрочняющихся и циклически упрочняющихся в исходном состоянии конструкционных сплавов. Разработан метод прогнозирования влияния предварительной однократной пластической деформации на скорость РУТ, в основе которого лежит модель развития трещины усталости, базирующаяся на определении удельной энергии неупругой деформации, накапливаемой на расстоянии λ^* от вершины трещины с учетом энергии, необратимо рассеиваемой в пределах зоны повреждения R_m .

На основе экспериментальных исследований закономерностей РУТ при нерегулярном нагружении показано, что основными факторами, обуславливающими торможение развития трещины после приложения растягивающей перегрузки, являются: 1) наведение системы остаточных сжимающих напряжений у вершины усталостной трещины; 2) пластическим затупление вершины трещины.

Разработана модель РУТ при нерегулярном нагружении, учитывающая кинетические эффекты взаимодействия прикладываемых нагрузок различной амплитуды, которая основывается на учете конкретного вклада указанных выше факторов в процесс развития трещины.

Практическая ценность. Разработан комплекс экспериментальных методов исследования влияния предварительной однократной пластической деформации на закономерности неупругого циклического деформирования и циклическую прочность, а также на характеристики трещиностойкости конструкционных сплавов. Разработаны методы исследования развития усталостной трещины при нерегулярном нагружении.

Получены экспериментальные данные о влиянии предварительного однократного пластического деформирования на циклическую прочность и закономерности неупругого циклического деформирования, а также на характеристики трещиностойкости сталей 15Х2МФА(1) - материала корпуса атомного реактора типа ВВЭР и алюминиевого сплава АМг6, широко применяющегося в авиационной технике. На основе проведенных исследований разработан метод количественного прогнозирования влияния предварительной однократной пластической деформации на скорость РУТ.

Проведено широкое экспериментальное исследование закономерностей РУТ при различных видах нерегулярности нагружения. Разработана модель развития трещины усталости при нерегулярном нагружении, учитывающая кинетические эффекты взаимодействия прилагаемых нагрузок различной амплитуды. Данная модель может составить основу метода прогнозирования долговечности элементов конструкций с трещинами, которые работают при нерегулярных режимах нагруженности.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на Всесоюзной научно-технической конференции по тепловой микроскопии "Структура и прочность материалов в широком диапазоне температур" (г.Каунас, 1989г.); 25 Научном совещании по проблемам прочности двигателей (г.Москва, 1992г.), а также на тематическом научном семинаре Института проблем прочности АН Украины (г.Киев, 1992г.).

Публикации. По теме диссертации имеется 5 публикаций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка основной использованной литературы. Работа изложена на 255 страницах машинописного текста, содержит 4 таблицы, 76 иллюстраций, 234 наименования литературных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулирована цель работы и приведена краткая аннотация.

В первой главе выполнен анализ литературных данных по проблеме влияния истории механического нагружения (включая как предварительное однократное пластическое деформирование материала без трещин, так и нерегулярность режима нагружения на этапе развития усталостной трещины). Рассмотрены основные модели и критерии развития усталостных трещин при циклическом нагружении. Проанализированы литературные данные, посвященные проблеме влияния предварительного однократного пластического деформирования на циклическую прочность и трещиностойкость конструкционных сплавов. Отмечено, что имеющиеся по этому вопросу литературные данные представляют фактический, экспериментальный материал; методы количественного прогнозирования влияния предварительного однократного пластического деформирования на скорость РУТ отсутствуют.

На основе анализа литературных данных показано, что природа РУТ при нерегулярном нагружении изучена недостаточно; не полностью установлены и изучены механизмы, определяющие поведение усталостной

трещины в этом случае. Проведен анализ предложенных к настоящему времени подходов к прогнозированию РУТ при нерегулярном нагружении. Отмечено, что существующие подходы не учитывают комплексное взаимодействие факторов, управляющих развитием трещины в случае нерегулярности прилагаемой нагрузки; часть же подходов не выдерживает экспериментальной проверки или работают удовлетворительно только в весьма ограниченной области скоростей РУТ.

На основании проведенного литературного обзора сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе приведены методы исследований механических характеристик материалов, влияния предварительного однократного пластического деформирования на закономерности неупругого циклического деформирования, циклическую прочность и характеристики трещиностойкости. Изложены также методики исследования закономерностей РУТ при нерегулярном нагружении.

Описаны основные управляющие и прикладные программы, которые делают возможным автоматизирование исследования механических свойств, циклической прочности, характеристик трещиностойкости, а также позволяет повысить достоверность получаемых результатов.

В третьей главе приведены результаты исследования влияния предварительного однократного пластического деформирования на циклическую прочность, закономерности неупругого циклического деформирования и характеристики трещиностойкости стали 15Х2МФА(I) и алюминиевого сплава АМг6. На основе анализа и обобщения экспериментальных данных предложен подход к количественному прогнозированию влияния предварительной однократной пластической деформации на скорость РУТ.

Приведены результаты исследования механических свойств сталей 15Х2МФА(I), 15Х2МФА(II), 15Х2МФА(III), алюминиевого сплава АМг6 и литейной стали 20Л при кратковременном растяжении в широком диапазоне температур.

Проведено детальное исследование закономерностей развития усталостной трещины на правой части перисовского участка кинетической диаграммы усталостного разрушения (на примере корпусной теплоустойчивой стали 15Х2МФА(III)). Показано, что развитие усталостной трещины происходит неравномерно: стабильный рост трещины представляет собой чередование инкубационного периода, в течение которого усталостная трещина не развивается, и периода непрерывного роста, когда продвижение трещины осуществляется в каждом цикле нагружения. Сделан важный и принципиальный вывод о том, что стабильное развитие

трещины происходит за счет накопления усталостных повреждений. Показано, что у вершины усталостной трещины реализуется жесткое упруго-пластическое деформирование материала (о чем свидетельствует постоянство размаха раскрытия трещины как на протяжении инкубационного периода, так и периода непрерывного роста трещины).

Прогнозирование влияния предварительной однократной пластической деформации на скорость РУТ предлагается осуществлять на основе модели развития трещины усталости, построенной на определении удельной энергии неупругой деформации, накапливаемой на расстоянии X^* от вершины трещины, с учетом энергии, необратимо рассеиваемой в пределах зоны повреждения R_m (рис.1). Согласно данной модели, подрастание трещины на величину X^* происходит тогда, когда на расстоянии X^* от вершины трещины удельная энергия неупругой деформации с учетом ее рассеяния в пределах зоны повреждения достигает величины W_y - критического значения энергии неупругого гистерезиса

$$W_y = \sum_{i=1}^{N_T} \left[\Delta W_i - \Delta W \left(\frac{\Delta W_i}{\Delta W} \right)^\beta \right] = \text{const} \quad (1)$$

где ΔW_i - энергия неупругой деформации в i -том цикле; β - параметр, определяющий интенсивность нарастания опасной части рассеиваемой энергии с увеличением ΔW_i .

Удельная энергия неупругой деформации за цикл

$$\Delta W = \int_0^{\Delta \epsilon} \Delta \sigma \cdot d(\Delta \epsilon) \quad (2)$$

Напряженно-деформированное состояние у вершины трещины при циклическом нагружении описывается следующими соотношениями (при $\theta = 0$):

$$\Delta \sigma = 2\sigma_{Ty} \left[\frac{(1-\nu^2)\Delta K^2}{\alpha' I \sigma_{Ty}^2 \Gamma} \right]^{\frac{1}{n'+1}} \cdot \tilde{\sigma}(n', \theta) \quad (3)$$

$$\Delta \epsilon = \frac{2\alpha' \sigma_{Ty}}{E} \left[\frac{(1-\nu^2)\Delta K^2}{\alpha' I \sigma_{Ty}^2 \Gamma} \right]^{\frac{n'}{n'+1}} \cdot \tilde{\epsilon}(n', \theta) \quad (4)$$

где σ_{Ty} - циклический предел текучести; α' , n' - соответственно коэффициент и показатель деформационного упрочнения диаграммы циклического деформирования; I - безразмерная функция от n' ; Γ - расстояние от вершины трещины; $\tilde{\sigma}_j(n', \theta)$, $\tilde{\epsilon}_j(n', \theta)$ - нормированные функции от угла θ и n' ; θ - угол между продолжением трещины и рассматриваемой точкой у ее вершины.

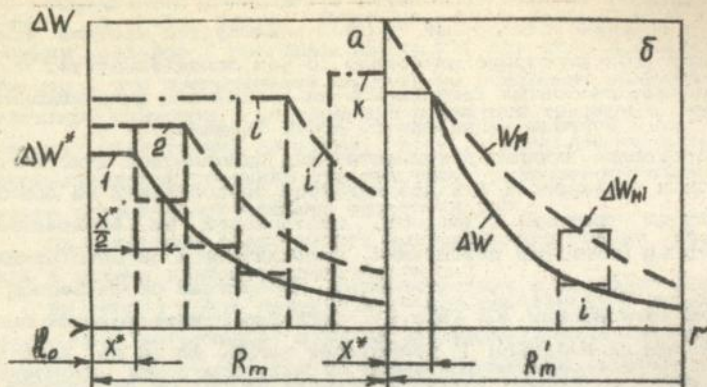


Рис. 1 Расчетная схема накопления удельной энергии неупругой деформации в пределах зоны повреждения: а - $l = l_0$; б - $l = l_0 + l_m$

$d\epsilon / dN, \%$ / цикл

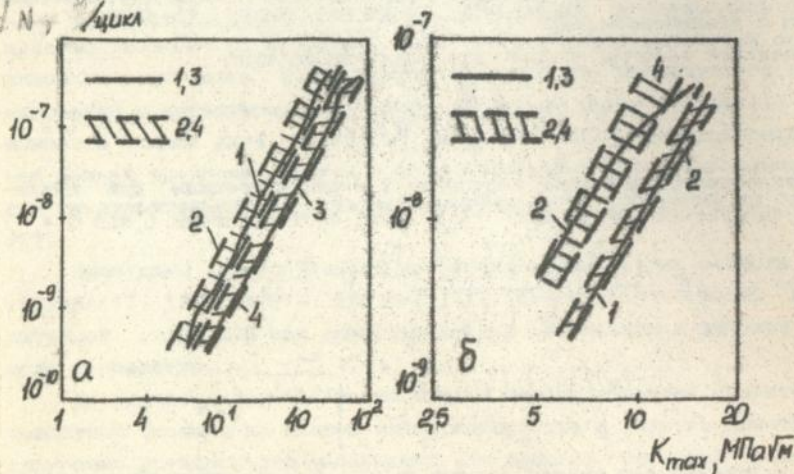


Рис. 2 Прогнозирование влияния предварительного однократного пластического деформирования на скорость РУТ в стали 15X2MFA(1) (а) и алюминиевом сплаве АМ6 (б). 1, 3 - расчет; 2, 4 - эксперимент; 1, 2 - $\epsilon_{np} = 0$; 3, 4 - $\epsilon_{np} = 0,019$ (а) и 0,1 (б).

Интегрируя уравнения (2) с учетом (3) и (4), получаем

$$\Delta W = \frac{4(1-\nu^2)n' \Delta K^2}{1E(n'+1)\Gamma} \widetilde{\sigma}(n') \widetilde{E}(n') \quad (5)$$

Тогда условие прироста трещины (согласно расчетной схемы на рис.1) для 1-го элемента будет иметь вид:

$$\sum_{j=1}^i \Delta W_{ij} N_j = W_y \quad (6)$$

Скорость роста усталостной трещины вычисляется следующим образом

$$V_i = X^*/N_i \quad (7)$$

Согласно изложенной модели, скорость РУТ определяется характеристиками циклической пластичности и циклической прочности конструкционных сплавов, поэтому в работе проведено детальное исследование влияния предварительного однократного пластического деформирования на закономерности неупругого циклического деформирования и циклическую прочность (на примере теплоустойчивой стали 15Х2МФА(1) и алюминиевого сплава АМг6).

Установлено, что предварительное деформирование циклически разупрочняющейся в исходном состоянии стали 15Х2МФА(1) приводит к увеличению ее способности к циклическому разупрочнению; предварительное же деформирование циклически упрочняющегося в исходном состоянии алюминиевого сплава АМг6 вызывает увеличение степени его циклического упрочнения.

Показана применимость энергетического критерия усталостного разрушения в форме (1) в области малоциклового усталости (в условиях жесткого нагружения); установлено также, что величина W_y не изменяется после предварительного однократного пластического деформирования.

Используя полученные экспериментальные данные, на основе изложенной выше модели выполнены расчеты скорости РУТ в стали 15Х2МФА(1) и алюминиевом сплаве АМг6 в исходном состоянии и после предварительной однократной пластической деформации. Расчетным путем установлено некоторое снижение скорости РУТ после предварительного деформирования стали 15Х2МФА(1) (рис.2.а) и существенное увеличение скорости РУТ после предварительного деформирования алюми-

вого сплава АМг6 (рис.2б). Анализ хода расчетов и его результатов говорят о том, что определяющую роль в изменении скорости РУТ после предварительной однократной пластической деформации играет поведение диаграммы циклического деформирования: увеличение степени циклического разупрочнения после предварительного деформирования приводит к снижению скорости РУТ, увеличению же степени циклического упрочнения - к росту скорости РУТ.

Осуществлена экспериментальная проверка предлагаемого в работе метода количественного прогнозирования влияния предварительного однократного пластического деформирования на скорость РУТ. В результате прямого эксперимента установлено, что предварительное пластическое деформирование оказывает полярное воздействие на сопротивление росту усталостной трещины циклически разупрочняющихся и циклически упрочняющихся в исходном состоянии сталей и сплавов: скорость РУТ в стали 15Х2МФА(I) после предварительного деформирования снижается, в алюминиевом сплаве АМг6 - возрастает. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает хорошее соответствие между ними (рис.2а,б).

Таким образом, доказана возможность применения предлагаемого в диссертационной работе метода прогнозирования влияния предварительного однократного пластического деформирования на скорость РУТ.

В четвертой главе приведены результаты исследования закономерностей РУТ при нерегулярном нагружении. На основе анализа и обобщения полученных экспериментальных данных разработана модель РУТ при нерегулярном нагружении, которая учитывает кинетические эффекты взаимодействия нагрузок различной амплитуды.

С целью изучения закономерностей РУТ при нерегулярном нагружении, определения вклада различных физических механизмов в кинетические эффекты развития трещины, имеющие место в случае нерегулярности прилагаемой нагрузки, проведены экспериментальные исследования на корпусных теплоустойчивых сталях 15Х2МФА(I) и 15Х2МФА(II). Исследовались закономерности РУТ при следующих видах нерегулярности прилагаемой нагрузки: а) пиковая перегрузка растяжением; б) двухступенчатое нагружение с последовательностью амплитуд циклической нагрузки "высокая-низкая"; в) программное нагружение, где реализовывались последовательности амплитуд циклической нагрузки как "низкая-высокая", так и "высокая-низкая".

Установлено, что приложение пиковой растягивающей перегрузки вызывает резкое снижение скорости РУТ (рис.3). Только после приложения некоторого числа циклов нагружения (определяемого часто как

$d\ell/dN, \text{ м/цикл}$

9

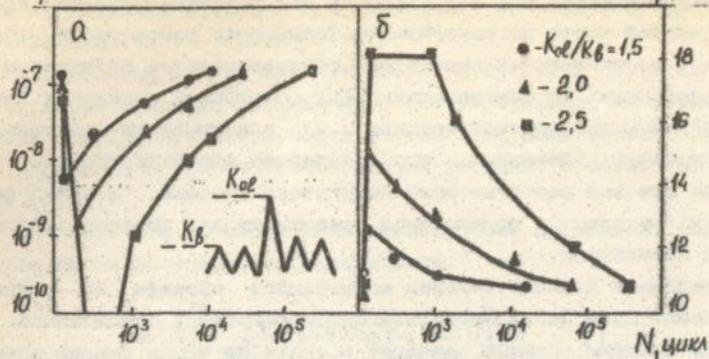
 $K_{op}, \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ 

Рис. 3 Влияние пиковой перегрузки на скорость РУТ в стали 15Х2МФА(1) (а) и величину КИН открытия трещины K_{op} (б),

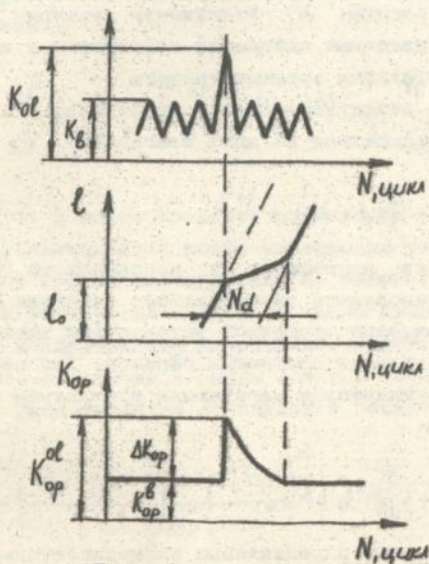


Рис. 4 Влияние растягивающей перегрузки на развитие усталостной трещины.

число циклов задержки РУТ N_d) скорость РУТ восстанавливается до величины, имевшей место до перегрузки. Торможение роста трещины после приложения растягивающей перегрузки обуславливается следующими основными факторами: 1) образованием поля остаточных сжимающих напряжений у вершины усталостной трещины; 2) пластическим затуплением вершины трещины. Показано, что дальнейшее развитие трещины после приложения пиковой растягивающей перегрузки возможно только после зарождения вторичной усталостной трещины из дна трещины, затупившейся при перегрузке.

Исследовано влияние толщины испытываемого образца на развитие трещины после приложения растягивающей перегрузки. Установлено, что увеличение толщины образца приводит к снижению числа циклов задержки РУТ N_d после перегрузки за счет увеличения предела текучести материала в зоне деформирования у вершины трещины.

На основании и обобщении полученных экспериментальных данных предложена модель РУТ при нерегулярном нагружении, учитывающая эффект торможения РУТ после приложения растягивающих перегрузок. Прогнозирование РУТ основано на учете вкладов следующих факторов в торможение роста трещины: а) Увеличения величины K_{op} вследствие наведения системы остаточных сжимающих напряжений у вершины трещины; б) пластического затупления вершины трещины.

Полагается, что общее количество циклов задержки РУТ N_d после перегрузки будет складываться из двух слагаемых:

$$N_d = N_d^1 + N_d^2 \quad (8)$$

где N_d^1 - число циклов нагружения с максимальным КИН цикла K_b (см. рис. 4) до восстановления стационарного значения K_{op} ; N_d^2 - число циклов до зарождения вторичной усталостной трещины.

Величина N_d^1 находится следующим образом. Для расчета скорости РУТ при регулярном циклическом нагружении используем модифицированное уравнение Париса:

$$\frac{dL}{dN} = C (K_{max} - K_{op})^m \quad (9)$$

где C и m - коэффициенты, определяемые экспериментально. Известно, что величина K_{op} тесно связана с величиной K_{max} ; эта зависимость легко устанавливается в процессе испытаний на скорость РУТ при регулярном циклическом нагружении. В данной работе такого рода зависимости получены для сталей 15Х2МФА(I), 15Х2МФА(II) и 15Х2МФА(III).

Тогда по заданной величине K_{max} определяется величина K_{op} и, далее, по уравнению (9) - скорость РУТ.

В начальный момент времени после перегрузки устанавливается величина КИН открытия трещины K_{op}^{oe} , соответствующая нагрузке K_{oe} . Замедление РУТ будет иметь место до тех пор, пока текущий КИН открытия трещины не выйдет на стационарный уровень, соответствующей нагрузке K_b .

Величина K_{op} в переходный период после приложения перегрузки рассчитывается по следующей зависимости:

$$K_{op} = K_{op}^{oe} - \Delta K_{op} \alpha \pi \sigma_{0,2} (l_i - l_0) / (K_{oe}^2 - K_b^2) \quad (10)$$

где l_0 - длина трещины, при которой имела место перегрузка K_{oe} ; l_i - текущая длина усталостной трещины; $\sigma_{0,2}$ - предел текучести материала; α - коэффициент, учитывающий степень стеснения пластических деформаций у вершины трещины;

Подставляя (10) в (9), получаем следующее уравнение для расчета скорости РУТ в переходный период после приложения растягивающей перегрузки:

$$\frac{dl}{dN} = C \left(K_b - \left(K_{op}^{oe} - \Delta K_{op} \alpha \pi \sigma_{0,2} \frac{l_i - l_0}{K_{oe}^2 - K_b^2} \right)^m \right) \quad (11)$$

По уравнению (11) можно провести поцикловой расчет РУТ; период задержки РУТ N_d^1 заканчивается после выполнения условия $K_{op} = K_{op}^b$.

Определение второй составляющей N_d^2 общего числа циклов задержки РУТ сводится фактически к расчету числа циклов до зарождения трещины у вершины концентратора напряжений, радиуса ρ , равного половине остаточного раскрытия вершины трещины после перегрузки $\delta_{ост}$. Величина $\delta_{ост}$ рассчитывается по следующей зависимости:

$$\delta_{ост} = \frac{0,6 K^2}{\sigma_{0,2} E} \left(\frac{(2/\sqrt{3})(1+\nu)(1+n) \sigma_{0,2}}{n E} \right)^n + \alpha \epsilon_{0,2} \ell h(\ell/\rho, n) \cdot (\rho/\rho_0)^n \quad (12)$$

где $\epsilon_{0,2}$ - деформация на пределе текучести $\sigma_{0,2}$ материала; n - коэффициент деформационного упрочнения материала; E - модуль Юнга; ν - коэффициент Пуассона; ℓ - длина трещины; h - функция, зависящая от длины трещины, ширины компактного образца и коэффициента деформаци-

онного упрочнения материала; P - текущая нагрузка; P_0 - нагрузка, соответствующая началу момента полномасштабной текучести в компактном образце

Первое слагаемое уравнения (12) определяет раскрытие вершины трещины на участке мелкомасштабной текучести; второе слагаемое - на участке полномасштабной текучести. Раскрытие вершины трещины на участке полномасштабной текучести записано применительно к компактному образцу внецентренного растяжения.

Проведено сравнение полученных расчетным и экспериментальным путем величин δ_{001} для различных уровней пиковых растягивающих перегрузок показало хорошее соответствие между ними.

Уравнение, описывающее распределение пластических деформаций у вершины затупившейся трещины, имеет следующий вид:

$$\epsilon_p = \epsilon_{pr} \exp(-Q \lambda / \rho) \quad (13)$$

где λ - расстояние от вершины концентратора до рассматриваемой точки; ϵ_{pr} , Q - коэффициенты, определяемые из следующих зависимостей:

$$\ln \epsilon_{pr} = -4,0 + (2,45n^2 - 2,698n + 2,625n) - \ln((P/P_0) / (-0,025n^2 + 0,3775n + 0,3805)) \quad (14)$$

$$\ln Q = (20,2n^2 - 3,531n + 0,7872) - (11,68n^2 - 2,142n + 0,7728) \cdot \ln((P/P_0) + (23,85n^2 - 4,985n + 0,359)) \quad (15)$$

Зная распределение пластических деформаций у вершины затупившейся трещины, число циклов до зарождения вторичной усталостной трещины находим из уравнения кривой циклической прочности Коффина - Мэнсона (кривые циклической прочности исследованных материалов представлены в главе 3).

Проведена экспериментальная проверка предложенной модели РУТ при различных видах нерегулярности нагружения. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает хорошее соответствие между ними (рис. 5, 6). Таким образом, разработанная модель РУТ может служить основой метода прогнозирования долговечности элементов конструкций, работающих в условиях нерегулярности режимов нагруженности, на этапе развития усталостной трещины.

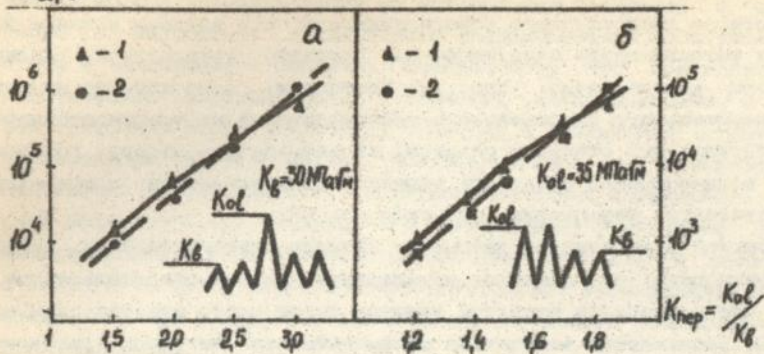
N_d , циклы

Рис.5 Прогнозирование числа циклов задержки РУТ N_d в стали 15X2MФА(I) - а и 15X2MФА(II) - б; 1 - расчет, 2 - эксперимент.

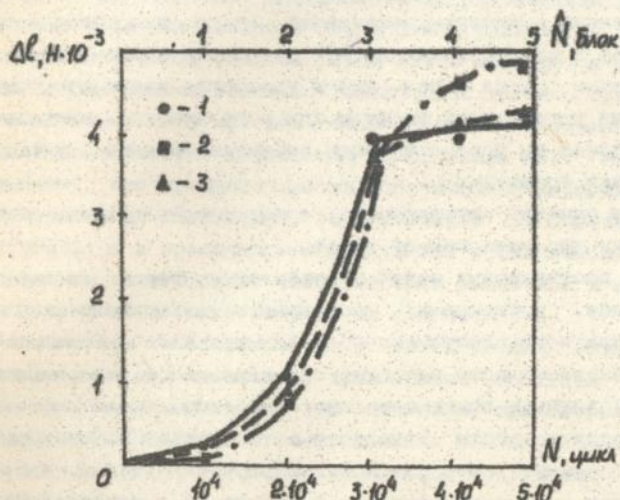


Рис.6 Прогнозирование РУТ в ста.и 15X2MФА(I) при программном нагружении. Блоки 1,5 - $K_{\sigma \text{ max}} = 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$; 2,4 - $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$; 3 - $45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$; 1 - эксперимент, 2 - расчет по гипотезе линейного суммирования повреждений, 3 - расчет по модели.

ВЫВОДЫ

1. На основе литературного обзора показано, что вопросы влияния истории механического нагружения на развитие усталостной трещины изучены недостаточно. Так, в частности, мало изучено влияние предварительного пластического деформирования на трещиностойкость конструкционных сталей и сплавов; не разработаны методы, позволяющие количественно оценивать влияние предварительной однократной пластической деформации на скорость РУТ.

Имеющиеся в литературе данные по влиянию нерегулярности режима нагруженности на развитие усталостной трещины свидетельствуют о том, что в процессе развития трещины имеют место кинетические эффекты, возникающие вследствие взаимодействия нагрузок различной амплитуды. Так, на пример, пиковые перегрузки растяжением, переход от большей амплитуды циклического нагружения к меньшей приводят к временному замедлению развития трещины. Не смотря на определенное количество работ, посвященных изучению влияния нерегулярности нагружения на закономерности развития усталостной трещины, остаются неизученными вопросы конкретного вклада различных механизмов в процесс развития трещины усталости в переходный период после перемены амплитуды нагружения. Анализ имеющихся в литературе подходов к прогнозированию РУТ при нерегулярном нагружении позволил сделать вывод о том, что в настоящее время отсутствует модель развития усталостной трещины при нерегулярном нагружении, которая позволяла бы прогнозировать развитие трещины с необходимой для практики точностью.

На основании анализа литературных данных сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы.

2. Для решения поставленных задач разработан комплекс экспериментальных методик, позволяющих исследовать: а) влияние предварительного однократного пластического деформирования на циклическую прочность и закономерности неупругого циклического деформирования материалов; б) влияние предварительного пластического деформирования на скорость роста усталостных трещин; в) закономерности развития усталостных трещин при нерегулярном нагружении. Разработан и реализован оригинальный пакет управляющих и обрабатывающих программ, позволяющих автоматизировать процесс управления экспериментом, а также обработки и систематизации получаемых экспериментальных данных, что делает возможным снижение трудоемкости экспериментальных исследований и значительно повышает достоверность определяемых в эксперименте параметров.
3. Проведено исследование влияния предварительного однократного

пластического деформирования на циклическую прочность и закономерности неупругого циклического деформирования теплоустойчивой стали и алюминиевого сплава. Установлено, что предварительное пластическое деформирование циклически разупрочняющейся в исходном состоянии стали 15Х2МФА(1) приводит к увеличению степени ее циклического разупрочнения, предварительное же деформирование циклически упрочняющегося в исходном состоянии алюминиевого сплава АМг6 приводит к еще большему его циклическому упрочнению. Показана применимость энергетического критерия усталостного разрушения в области жесткого малоциклового нагружения. Установлено, что величина W_y не изменяется после предварительного пластического деформирования.

4. Исследовано влияние предварительного однократного пластического деформирования на скорость роста усталостных трещин в полярных по своим циклическим свойствам материалах. Установлено, что предварительное пластическое деформирование оказывает противоположное воздействие на сопротивление росту усталостных трещин разупрочняющихся и упрочняющихся конструкционных сталей и сплавов: предварительное пластическое деформирование растяжением приводит к некоторому снижению скорости РУТ в стали 15Х2МФА(1) и существенному (на порядок) увеличению скорости РУТ в алюминиевом сплаве АМг6.
5. На основе модели развития усталостной трещины предложен подход к количественному прогнозированию влияния предварительной однократной пластической деформации на скорость РУТ. Расчетным путем показано, что предварительное пластическое деформирование приводит к снижению скорости РУТ в циклически разупрочняющейся стали 15Х2МФА(1) и к увеличению скорости РУТ в циклически упрочняющемся алюминиевом сплаве АМг6. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает хорошее их соответствие.
6. Исследованы закономерности развития трещины усталости при различных видах нерегулярности прилагаемой нагрузки. Установлено, что торможение развития трещины после приложения растягивающей перегрузки обуславливается следующими основными факторами: а) образованием поля остаточных сжимающих напряжений у вершины усталостной трещины; б) пластическим затуплением вершины трещины. Показано, что дальнейшее развитие трещины возможно только после зарождения вторичной усталостной трещины из дна трещины, затупившейся при перегрузке.
7. Исследовано влияние толщины образца на развитие трещины после приложения перегрузки растяжением. Установлено, что увеличение

толщины испытуемого образца приводит к снижению числа циклов задержки РУТ после приложения перегрузки, что связано с увеличением жесткости напряженно-деформированного состояния (и, следовательно, ростом предела текучести материала) у вершины трещины.

8. Предложена модель развития усталостной трещины при нерегулярном нагружении, учитывающая кинетические эффекты взаимодействия прилагаемых нагрузок различной амплитуды. Прогнозирование РУТ основано на учете вкладов следующих механизмов в торможение роста трещины: а) наведения системы остаточных сжимающих напряжений у вершины трещины; б) пластического затупления вершины трещины.

Осуществлена экспериментальная проверка предлагаемой модели РУТ при различных видах нерегулярности режима нагружения. Показано, что предлагаемая модель может служить основой для прогнозирования долговечности элементов конструкций, работающих в условиях нерегулярных режимов нагруженности, при наличии в них трещин.

Основные результаты выполненных исследований нашли отражение в следующих работах:

1. Анализ влияния эксплуатационного нагружения на трещиностойкость стали 20Л - материала литых деталей грузового вагона - при низких температурах / В.Т.Трошенко, В.В.Покровский, П.В.Ясний, Ю.В.Ткач и др. // Прочность материалов конструкций при низких температурах. - Киев: Наук. думка, 1986. - с.49 - 50.
2. В.В.Покровский, П.В.Ясний, Н.А.Костенко, Ю.В.Ткач, С.Л.Мишаков Влияние эксплуатационной наработки на трещиностойкость материала корпуса автосцепки грузового вагона подвижного состава // Пробл. прочности. - 1988. - N.2. - с.28 - 32.
3. Трошенко В.Т., Ясний П.В., Покровский В.В., Ткач Ю.В. Развитие усталостной трещины. Сообщ.1. Закономерности нестабильного развития // Пробл. прочности. - 1988. -N10. - с.11 - 15.
4. Прогнозирование влияния предварительного однократного пластического деформирования на скорость роста усталостных трещин / В. Т. Трошенко, В.В.Покровский, Ю.В.Ткач, П.В.Ясний // Всесоюзная научно-техническая конференция по тепловой микроскопии "Структура и прочность материалов в широком диапазоне температур", 24-26 октября, 1989. Тез. докладов, т.1. - с17.
5. К вопросу прогнозирования живучести дисков авиационных газотурбинных двигателей с учетом влияния различных технологических и эксплуатационных факторов / В.Л.Ахременко, С.М.Болотин, В.И.Быков, В.В.Покровский, В.Г.Сидяченко, Ю.В.Ткач, В.Т.Трошенко, В.Л.Ярусев

ЛНБ им. В. Стефаника

АН України

вич // Научное совещание по проблемам прочности двигателей, Москва, 1992, 28-30 апреля. Тез. докладов - с.3-4.

ЖК

Подп. к печ. 19.03.93. формат 60x84/16

Бум. офс. Офс. печ. Усл. печ. л. 0,93. Усл. кр.-отт. 105.

Уч.-изд. л. 1,0 Тираж 100 экз. Заказ 334 Бесплатно.

Участок ротационной печати ОНТИ ИПШ АН Украины

252014 Киев 14, ул. Тимирязевская, 2.

470985

AB 26.919

AB 26.919