

На правах рукописи

КОЛЬЦУН Юрий Иванович

**КИНЕТИКА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ПОЛЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Специальность: 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург
2007г.

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева»

Научный консультант: Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор

Иванов Станислав Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Мельников Борис Евгеньевич

Заслуженный работник высшей школы
Российской Федерации,
доктор технических наук, профессор
Васильев Виталий Захарович

доктор технических наук, профессор
Вафин Рашит Каримович

Ведущая организация: Государственный центр «Безопасность полетов
на воздушном транспорте» Государственной
службы гражданской авиации Министерства
транспорта Российской Федерации

Защита состоится «14 » февраля 2007г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д.212.229.08 В Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г.Санкт-Петербург, ул.Политехническая, д.29, ауд.265 II-го учебного Корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке «Санкт-Петербургского государственного политехнического университета»

Автореферат разослан «___» _____ 200__ г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук, доцент

Воробьева Т.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современное развитие авиационной и космической техники достигло больших успехов благодаря созданию новых материалов и уникальных технологических процессов, обеспечивающих высокую степень надежности отдельных деталей и конструкций в целом. Так, поверхностное пластическое деформирование (ППД) повышает сопротивление усталости деталей в среднем на 30% при сохранении их низких весовых параметров.

Улучшение качества поверхностного слоя и увеличение его несущей способности является актуальной задачей, т.к. даже небольшие нагрузки при высокой интенсивности эксплуатации деталей нередко приводят к возникновению усталостных трещин в зонах концентрации напряжений. Возникает вопрос, какова может быть длительность безаварийной эксплуатации детали с трещинами до истечения назначенного ресурса конструкции? Ответ на этот вопрос на сегодняшний день остается открытым.

Решение поставленной задачи возможно в том случае, если ее рассмотрение осуществлять с точки зрения синтеза различных специальностей прочности, в частности: механики деформируемого твердого тела, материаловедения, а также механики разрушения. В последнее время все большее внимание уделяется вопросам залечивания усталостных трещин. И здесь невозможно обойтись без механики остаточных напряжений. Кинетика усталостной трещины в существенной степени зависит от величины и характера распределения остаточных макро напряжений в поверхностном слое детали. Данная проблема в настоящее время на практике изучена недостаточно. В этом случае наиболее перспективными направлениями научных исследований являются:

- разработка расчетных методов оценки развития и остановки трещины путем регулирования и управления полем благоприятных остаточных напряжений в поверхностном слое детали и создание критерия качества упрочнения;
- создание удобного для инженерной практики критериального параметра безопасного повреждения детали;
- разработка методик определения диапазонов безопасного нагружения детали с трещиной с точки зрения напряженного деформированного состояния в опасном сечении концентратора напряжений.

Научные исследования выполнялись по программам: «Авиационные технологии», «Конверсия научно-технического потенциала ВУЗов Поволжья» и «Машиностроительные технологии».

Цель работы - развитие теоретических основ связи параметров трещинообразования детали с параметрами разрушения и создание инженерных методов расчета работоспособности поверхностно-упрочненных деталей с усталостными трещинами, работающих при простом и сложном нагружении на основе анализа кинетики медленно растущих усталостных трещин в поле технологических остаточных напряжений.

Задачи исследования:

1. Выполнить испытания на усталость объектов исследования с целью определения пределов выносливости по разрушению с наличием остаточных напряжений в поверхностном слое и без них в условиях концентрации напряжений, а также с целью определения предела выносливости по первой макротрещине по типу I нормального отрыва;
2. Разработать критерий качества технологического поверхностного упрочнения деталей;
3. Выполнить микроструктурный анализ усталостных изломов с целью выявления механизмов зарождения усталостных микротрещин, приводящих к дальнейшему разрушению детали;
4. Установить аналитическую функциональную зависимость между пределом выносливости по первой макротрещине на отрыв и пределом выносливости детали по разрушению при простых, а также сложных, деформациях;
5. Вывести критериальный параметр безопасного повреждения детали на базе аналитической функциональной связи безопасной глубины усталостной трещины и её максимальной глубины, определяемой критической величиной при переходе трещины по типу I как результата высокой концентрации к трещине как результат отсутствия концентрации в условиях предельных амплитуд напряжений;
6. Разработать методику определения эксплуатационных диапазонов безопасного нагружения детали с трещиной при простом и сложном переменном нагружении;
7. Развить теоретические основы для оценки связи остаточных напряжений на момент возникновения первой (медленнорастущей или, иначе - нераспространяющейся) усталостной макротрещины и коэффициента интенсивности напряжений по типу I;
8. Разработать теоретические основы для создания метода прогнозирования поверхности усталостного излома

Методы исследований. Общий методологический подход к решению проблемы базируется на системном анализе морфологии усталостных изломов исследуемых образцов и деталей с остаточными напряжениями и без них, а также математическом моделировании усталостной трещины по типу I. Для решения задач применялся метод конечных элементов теории упругости, программный комплекс ANSYS, механика разрушения и механика деформируемого твердого тела с представлением зависимостей в безразмерном (критериальном виде).

Достоверность принятых допущений и полученных результатов подтверждена экспериментами на разработанных в Институте Механики НАН Украины опытных усталостных машинах, а также сравнением с экспериментальными данными других исследователей. Кроме того, разработанные положения микроструктурного анализа подтверждены анализом микроструктуры усталостных изломов.

Объекты исследования – цилиндрические детали с кольцевым надрезом полукруглого и V-образного профиля с остаточными напряжениями в поверхностном слое, сформированными в результате ППД и без них из углеродистой стали 45, легированной стали ЭИ961Ш и алюминиевого сплава Д16Т, а также лопатки компрессоров ГТД.

Научная новизна. На основании реальных усталостных изломов исследуемых образцов с остаточными напряжениями в поверхностном слое и без них разработана методика расчета эффективной глубины усталостной трещины, представляющей критериальный параметр безопасной трещины при изгибе детали. Выведена аналитическая зависимость между пределом выносливости по первой макротрещине по типу I при изгибе детали и пределом выносливости по разрушению, для которой впервые теоретический коэффициент концентрации напряжений рассматривается дифференциально для локальных сечений, параллельных силовой плоскости, совпадающей с главной плоскостью жесткости. Представлен аналитический способ вычисления локального теоретического коэффициента концентрации напряжений для цилиндрической детали с кольцевым конструктивным концентратором в случае движения фронта серповидной усталостной трещины по поверхности дна надреза опасного сечения. Впервые высказана идея об аналитической связи предела выносливости по первой макротрещине при изгибе и предела выносливости по первой макротрещине при кручении на основании эллиптической зависимости С.В.Серенсена для сложного двухкомпонентного нагружения детали, что позволяет прогнозировать предел выносливости по первой макротрещине по типу III.

Рассматривая линейные и физические параметры, относящиеся к медленнорастущей усталостной трещине в цилиндрической детали, работающей при изгибе, установлены две фундаментальные зависимости для действительных напряжений на дне конструктивного кольцевого надреза и окрестности фронта усталостной трещины, а также обратно пропорциональную связь отношения жесткости между двумя серповидными симметрично расположенными трещинами в главной (силовой) плоскости и в параллельных сечениях с отношением соответствующих локальных теоретических коэффициентов концентрации напряжений. На базе второй фундаментальной зависимости выведено аналитическое выражение для максимальной безопасной глубины усталостной трещины, превышение которой ведет к развитию трещины как в гладкой рабочей зоне детали.

Установлена связь между остаточными напряжениями и коэффициентом интенсивности напряжений.

На основании выявленных закономерностей и обобщения результатов исследований создана методика макроструктурного анализа усталостных изломов деталей и практических способов инженерных расчетов безопасных диапазонов эксплуатационных напряжений детали с трещиной при сложном нагружении в поле остаточных напряжений после поверхностного пластического деформирования (ППД).

Практическая ценность. Установленная связь между остаточными напряжениями и сопротивлением усталости при кручении с изгибом и кручении с растяжением–сжатием позволяет учитывать остаточные напряжения в расчетах на прочность деталей с концентраторами напряжений. Разработанный метод определения остаточных напряжений обобщен на большую группу концентраторов по ГОСТ 25.502-79 с целью включения в новую редакцию ГОСТа ограничений на величину остаточных напряжений, необходимых для выделения фактора концентрации напряжений. Разработана методика учета остаточных напряжений в расчетах на сопротивление усталости в условиях концентрации напряжений.

Использование в инженерной практике полученного путем вывода аналитического выражения для эффективной глубины усталостной трещины, представляющей собой критериальный параметр безопасного повреждения детали, в совокупности с пределом выносливости по первой макротрещине позволяет рассчитывать диапазоны безопасного нагружения деталей, работающих в условиях простого и сложного сопротивления, что позволяет формулировать условие прочности по трещинообразованию и по безопасной эксплуатации деталей с макротрещиной.

На основании двух закономерных аналитических зависимостей получена возможность вычисления критической глубины медленнорастущей усталостной трещины для деталей из пластичных металлов и сплавов. Разработаны практические рекомендации по профилактике и предупреждению нарушения работоспособности детали с трещиной путем управления величиной благоприятных остаточных напряжений после ППД.

Основополагающие материалы диссертации используются в учебном процессе СГАУ по теме «Переменные напряжения» курса сопротивления материалов.

Реализация работы на практике. Результаты диссертации внедрены в ОАО «Моторостроитель», г.Самара и в Государственном центре безопасности полетов на воздушном транспорте, г.Москва.

Апробация работы. Результаты диссертации доложены и обсуждены и одобрены на 18 научно-технических конференциях (НТК) и симпозиумах: Всесоюзных НТК (ВНТК) «Конструкционная прочность двигателей» (Куйбышев, 1984, 1988г.г.), 2 ВНТК «Современные проблемы строительной механики и прочности» (Куйбышев, 1986г.), НТК «Интенсификация производства и повышение качества изделий ППД» (Тольятти, 1989г.), ВНТК «Остаточные напряжения – резерв прочности в машиностроении» (Ростов-на-Дону, 1991г.), 26 Международный научно-технический симпозиум (НТС) по динамике и прочности двигателей (Самара, 1996г.), Международная НТК (МНТК) памяти Н.Д.Кузнецова (Самара, 2001г.), МНТК (Украина, Киев2001г.), МНТК «Высокие технологии в машиностроении» (Самара, 2002г. МНТК «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2003г.), XXII НТК ученых Украины, Белоруси, России «Прикладные задачи математики и механики» (Севастополь, 2003г.), VI МНТК «Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте» (Санкт-Петербург,

2004г.), VI МНТК «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения» (Санкт-Петербург, 2005г.), ВНТК «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 2004г.), XXII, XXIII Межвузовская конференция «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 2002-2003г.г.), 2 Всесоюзный симпозиум «Технологические остаточные напряжения» (Москва, 1985г.), 2 Российско-Китайский симпозиум (Самара, 1992г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 рукописей, 29 статей, 7 тезисов докладов, 6 изобретений. Подготовлена к печати 1 монография. Суммарный объем принадлежащего автору опубликованного материала 14,85 п.л.

Личное участие автора. Автору принадлежит выбор методов и методик исследования, математическая разработка и вывод аналитических зависимостей трещинообразования от разрушения деталей для инженерных расчетов, основанных на теории упругости, механики твердого деформируемого тела и механики разрушения. Вклад автора в Работы, выполненные в соавторстве, состоял в непосредственном участии во всех стадиях работы, начиная от постановки задач, выполнения теоретических и экспериментальных исследований и внедрения полученных результатов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и приложения. Работа изложена на 373 страницах, включает 191 рисунок, 24 таблицы. Список литературы содержит 347 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, дается краткая характеристика диссертационной работы, сформулированы основные положения, вынесенные на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы по теме диссертации. Выполнен анализ научной литературы в таких областях, как мезомеханика, механика остаточных напряжений, сопротивление материалов усталости и разрушению, теория упругости, механика твердого деформируемого тела, механика разрушения а также сформулированы задачи исследования. Дан анализ Российских научных школ и методов исследований В.З.Партона, Н.Ф.Морозова, В.С. Ивановой, Н.А.Махутова, С.В.Серенсена И.А.Биргера, В.П.Когаева, И.В.Кудрявцева, Е.М.Морозова, С.И.Иванова, Б.Е.Мельникова, А.А.Шанявского, В.З.Васильева, Г.П.Черепанова, а также зарубежных ученых: А.А.Griffith, G.R.Irwin, I.R.Rice, Paris P.C., McEvil A.J.Jr., Phillips K.E. и других исследователей.

Во второй главе описаны объекты исследования с обоснованием их выбора, технологические способы формирования остаточных напряжений в поверхностном слое детали и методики их экспериментального определения, оригинальное оборудование и опытные машины для испытаний на усталость деталей при простых и сложных деформациях.

Для решения задач исследований применялись цилиндрические образцы из среднеуглеродистой стали 45, легированной стали ЭИ961Ш и

алюминиевого сплава Д16Т с двумя типами кольцевых надрезов в соответствии с ГОСТ 25.502-79: 1). тип V – надрез V-образного профиля; 2). тип VIII – надрез полукруглого профиля. Образцы для исследований подготавливались в равном количестве как без остаточных напряжений, так и с остаточными напряжениями. Остаточные напряжения после формирования надрезов в исследуемой зоне снимались путем полирования на электроэрозионном станке до размеров концентраторов, соответствующих ГОСТ. Типы надрезов определяли способы формирования остаточных напряжений в поверхностном слое рабочей зоны образцов. В первом случае рабочая зона с V-образным надрезом полностью подвергалась поверхностному пластическому деформированию (ППД), во втором случае - полукруглый надрез выполнялся безнаклепным способом по предварительно упрочненной поверхности гладкой рабочей зоны на глубину, превышающую толщину упрочненного слоя. Формирование технологических остаточных напряжений в поверхностном слое исследуемых образцов осуществлялось тремя методами ППД: 1). гидродробеструйной обработкой (ГДО); 2). обработкой микрошариками (ОМ); 3). обкаткой роликом (ОР). Гидродробеструйная обработка и обработка микрошариками осуществлялись на оптимальных заводских режимах. Обкатка роликом выполнялась в лабораторных условиях после опытных исследований на предмет минимизации касательных остаточных напряжений. В цилиндрических образцах с надрезом полукруглого профиля осевые остаточные напряжения в опасном сечении формировались путем перераспределения из упрочненной зоны в область дна надреза. Это позволило исключить из рассмотрения в полукруглых надрезах эффект наклепа, который, как известно, определяется глубиной, степенью наклепа и характером его распределения по глубине, сопровождающийся повышением микротвердости на рабочей поверхности и изменением ее по глубине (РТМ – 1306 «Поверхностное упрочнение деталей при виброобработке», НИАТ, 1973г.). Таким образом, объекты исследования представляют собой элементы деталей машин с мелким (полукруглые надрезы) и глубоким (V-образный надрез) конструктивным концентратором.

Влияние остаточных напряжений на сопротивление многоциклового усталости элементов деталей машин, а также испытания для определения предела выносливости по первой макротрещине на отрыв (тип I) выполнялись на универсальных усталостных машинах МИ-11 и Мир-П, созданных на Опытном Производстве Института Механики НАН Украины. Образцы испытывались при простых деформациях - изгибе, кручении, растяжении-сжатии; при сложных – синфазном изгибе с кручением, и синфазном растяжении-сжатии с кручением. Усталостные испытания проводились по симметричному циклу с частотой 19,5Гц (МИ-11) и 38,0Гц (Мир-П) на базе $N = 3$ млн. циклов и 10 млн.циклов. Измерение нагрузок осуществлялось визуально с помощью окулярных микрометров типа МОВ-1-15^x, соответствующих ГОСТ 7865-56.

Учитывая то, что испытательные машины представляют собой опытные образцы, одна из которых – МИ11 – в единственном экземпляре в Российской Федерации, были выполнены соответствующие конструктивные разработки с целью повышения точности эксперимента, которые защищены шестью авторскими свидетельствами на изобретение.

В третьей главе рассматриваются математические модели измерения остаточных напряжений в элементах деталей машин. Для полукруглых кольцевых надрезов, нанесенных на предварительно упрочненную рабочую часть исследуемых образцов, предложено использовать расчетно-экспериментальный метод определения осевых остаточных напряжений, так как они являются ответственными за сопротивление усталости, в кольцевых надрезах полукруглого профиля. В этом случае остаточные напряжения в опасном сечении определяются по формуле

$$\sigma_{z\text{ОСТ}} = \sigma_{z\partial} + \sigma_z, \quad (1)$$

где $\sigma_{z\partial}$ - дополнительные остаточные напряжения, образующиеся вследствие перераспределения остаточных напряжений гладкой детали после нанесения надреза; σ_z - остаточные напряжения гладкой детали.

Остаточные напряжения σ_z определялись известным методом колец и полосок. Дополнительные остаточные напряжения $\sigma_{z\partial}$ определялись аналитическим и численным методами, базируясь на результатах, полученных в рамках школы С.И.Иванова. Так как аналитический метод справедлив для мелких надрезов, численное определение $\sigma_{z\partial}$, выполненное методом конечных элементов с помощью четырехугольных восьмиузловых элементов, позволило определить отношение радиуса полукруглого надреза R к наружному диаметру D , при котором справедлив аналитический метод:

$$\frac{R}{D} \leq 0.02 \quad (2)$$

Остаточные напряжения в цилиндрических образцах с кольцевым надрезом V—образного профиля создавались упрочнением самого концентратора и

определялись методом послойного удаления половины поверхности дна V—образного концентратора. С этой целью изготавливались образцы с несколькими надрезами для увеличения разрешающей способности (см. рис. 1).

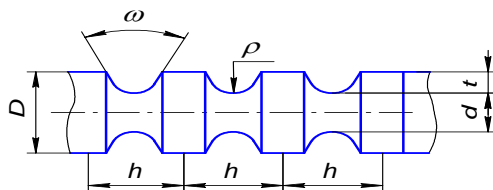


Рис.1. Рабочая часть образца для измерения остаточных напряжений

Применявшийся метод основан на решении трехмерной задачи теории упругости о связи остаточных напряжений и перемещений $f(a)$ образца с удлинителем (рис.2), возникающих при удалении слоев материала в пределах половины криволинейной поверхности дна надрезов. С этой целью рассматривалось эквивалентное нагружение, представленное на рис.3.

При удалении слоя толщиной a с половины поверхности дна концентратора прикладываются эквивалентные меридиональные σ_φ , радиальные σ_ρ и окружные σ_θ остаточные напряжения, взятые с обратным знаком.

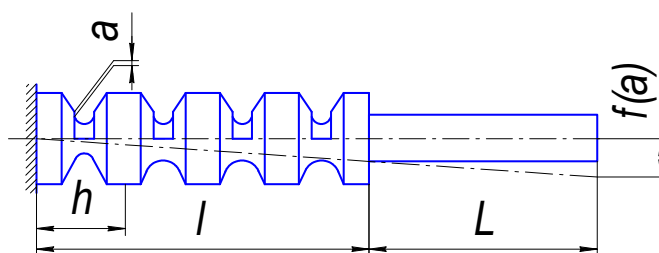


Рис. 2. Схема замера перемещений

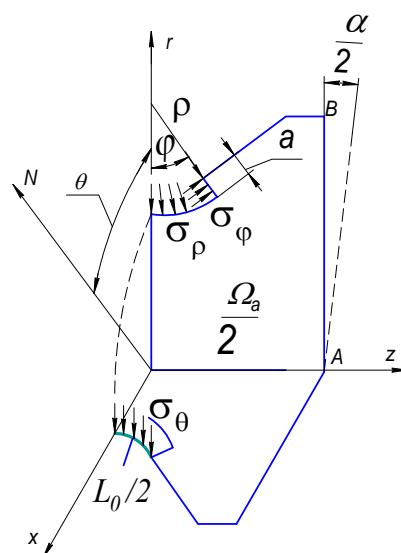


Рис.3. Нагружение расчетной области $\Omega_a/2$, эквивалентное удалению слоя толщиной a

В силу периодичности надрезов торцевые сечения АВ (рис.3) остаются плоскими и поворачиваются одно относительно другого на угол α . Полное перемещение $f(a)$ можно выразить через α с помощью выражения

$$f(a) = \alpha \left(L + \frac{l}{2} \right) \cdot \frac{l}{h} \quad (3)$$

где h - шаг надрезов, L - длина удлинителя, $l=nh$ - длина образца, n — число концентраторов.

Задача об эквивалентном нагружении решалась методом конечных элементов на языке FORTRAN-IV. При $h \geq D$ взаимное влияние концентраторов практически отсутствует. В дальнейших расчетах было принято $h=D$.

Искомая зависимость остаточных напряжений от перемещений имеет следующий вид:

$$\sigma_{\varphi}(a) = \frac{E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu) \left(L - \frac{l}{2} \right)^n} \cdot \frac{d}{da} \left[\frac{f(a)}{XP(a)} \right] \quad (4)$$

где E — модуль упругости, μ — коэффициент Пуассона материала.

С целью регламентации (ограничения) остаточных напряжений при испытаниях на усталость образцов с V—образным надрезом были также вычислены коэффициенты $XP(a)$ для всех вариантов геометрических параметров концентраторов по типу V ГОСТ 25.502-79.

Эпюры остаточных напряжений σ_z в упрочненных гладких цилиндрических образцах свидетельствуют о том, что после обкатки роликом стали 45 наибольшая величина остаточных напряжений, равная 560 МПа, находится на глубине примерно 150 мкм. Эпюра наиболее полная и распространена в пределах 750 мкм (0,75мм). К поверхности наблюдается падение остаточных напряжений до 530 МПа. Аналогичная картина возникает и после ГДО с той лишь разницей, что уровень и глубина залегания остаточных напряжений меньше. Обработка стали 45 микрошариками дает достаточно высокие сжимающие остаточные напряжения (-400...-500МПа) с максимумом на поверхности, но глубина их залегания очень мала – до 50 мкм. В легированной стали ЭИ961Ш после ГДО распределение остаточных напряжений соответствует закономерностям данного типа ППД, при этом глубина залегания ОН существенно ниже, чем в стали 45.

На дне конструктивных концентраторов остаточные технологические напряжения после ППД имеют максимальные значения и реагируют на концентрацию напряжений увеличением своих абсолютных значений по сравнению с гладкой упрочненной поверхностью по соответствующим технологиям.

Математическая структура оценки повышения сопротивления усталости исследуемых элементов деталей машин за счет остаточных напряжений основана на использовании двух критериальных параметров. Первый - предложенный И.А.Биргером - остаточные напряжения на поверхности дна надреза $\sigma_{ост}^{нов}$. Второй критериальный параметр – остаточные напряжения как средневзвешенная интегральная величина $\overline{\sigma_{ост}}$, определяемая либо глубиной усталостной трещины t в пределах малой толщины a упрочненного слоя, или в пределах безопасной глубины усталостной трещины $t_{безоп}$ для эпюр осевых остаточных напряжений, распределенных в пределах толщины $a > t_{безоп}$. Формула второго критерия $\overline{\sigma_{ост}}$ выведена для полуэллиптического надреза М.П.Шатуновым в рамках школы С.И.Иванова в Куйбышевском авиационном институте им. С.П.Королева в середине восьмидесятых годов прошлого столетия и имеет следующий вид:

$$\overline{\sigma_{осм}}(\xi) = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_{осм}(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (5)$$

где $\sigma_{осм}(\xi)$ - осевые остаточные технологические напряжения,

$$\xi = \frac{y}{t} = \cos \vartheta, \quad y - \text{текущая координата,}$$

ϑ - угол, отсчитываемый от оси ОУ в точке нулевой глубины дна надреза, определяющий положение лучей .

Использование критериального параметра $\overline{\sigma_{осм}}$ позволяет учесть полноту эпюры остаточных напряжений по толщине упрочненного слоя и упорядочить результаты усталостных испытаний образцов с остаточными напряжениями из разных сплавов и с различными концентраторами напряжений с большей точностью, чем применение критерия $\sigma_{осм}^{нов}$. Кроме того, $\overline{\sigma_{осм}}$ позволяет математически оценить эффективность упрочненного поверхностного слоя, что можно принять за критерий качества технологического упрочнения детали .

Критерий качества поверхностного упрочнения детали имеет следующий вид: $K_T = \overline{\sigma_{осм}} / \sigma_{осм}^{нов}$. Значения K_T находятся в интервале (0-1). Это позволяет оценить степень эффективности технологического процесса ППД в зависимости от стремления K_T либо к нулю, либо к единице, начиная от 0,5.

Таким образом, математический критерий качества поверхностного упрочнения позволяет оптимизировать режимы ППД и повысить характеристики усталости деталей с остаточными напряжениями.

В четвертой главе представлена методика проведения и результаты усталостных испытаний исследуемых образцов без остаточных напряжений (бОН) и с остаточными напряжениями (сОН). С этой целью использовалась методика «Определение предела выносливости при испытании на усталость методом ступенчатого назначения нагрузки» МР 57-37-74 ВИЛС, 1974г.

Результаты испытаний при простых и сложных видах нагружения представлены на рис. 4...9.

Можно видеть, что пределы выносливости при кручении несколько больше или приблизительно равны пределам выносливости при изгибе. В то время как в гладких образцах предел выносливости при изгибе в два раза больше чем при кручении. В нашем случае это объясняется тем, что концентрация напряжений при изгибе больше, чем при кручении.

Для схематизации результатов усталостных испытаний при кручении с изгибом использовали уравнение эллипса Гафа-Полларда.

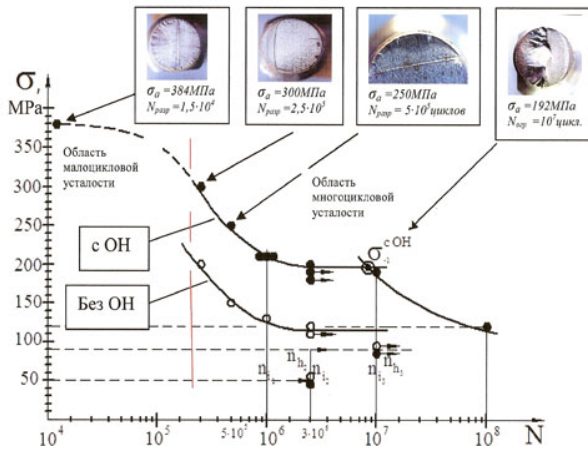


Рис. 4. Диаграммы долговечности для стали 45 надреза с увеличением амплитуды напряжений уменьшается, что особенно выражается при кручении стали 45..

КРУЧЕНИЕ С ИЗГИБОМ, $D = 25$ мм

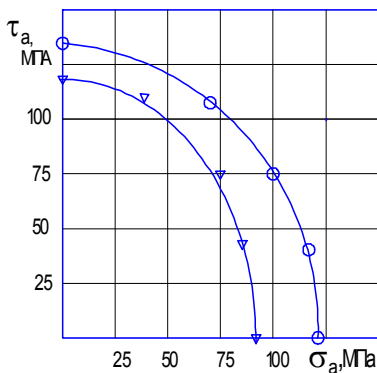


Рис.5. Ст.45 V –обр., ГДО

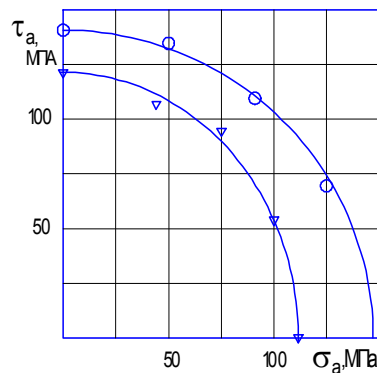


Рис. 6. Ст.45, R=0,3мм, ГДО

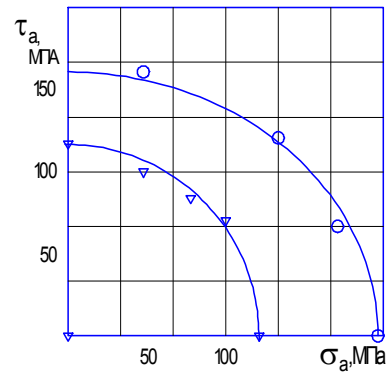


Рис.7. Ст.45, R=1,0 ОР

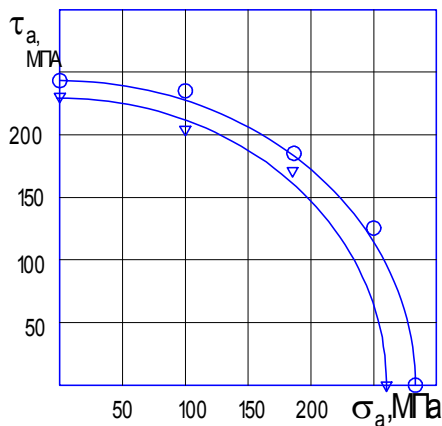


Рис. 8. ЭИ961Ш, R=0,3мм, ГДО

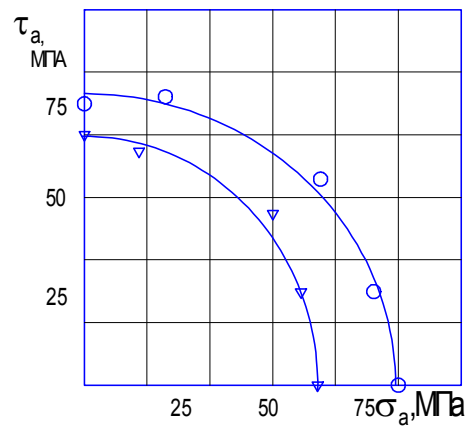


Рис.9. Д16Т, R=0,3мм,

В пятой главе исследована микроструктура изломов, полученных в процессе испытаний на усталость на базе $3 \cdot 10^6$ и $1 \cdot 10^7$ циклов при различных видах деформаций. На рис. 10-12 изображена макро и микроструктура типичных образцов из стали 45 и сплава ЭИ961Ш, испытанных на пределе выносливости при кручении, а также сплава Д16Т после испытаний на изгиб.

Из рис. 10 видно, что в стали 45 при кручении по симметричному циклу на пределе выносливости усталостная макротрещина вопреки ожиданию по типу III сформировалась по типу I на поверхности. В тоже время в центре сечения излома также виден полюс отрыва по типу I, который наблюдается и в сплаве ЭИ961Ш (см. рис.11). При изгибе сплава Д16Т имеет место подповерхностная микротрещина, которая «привязывается», как правило, к дефекту.

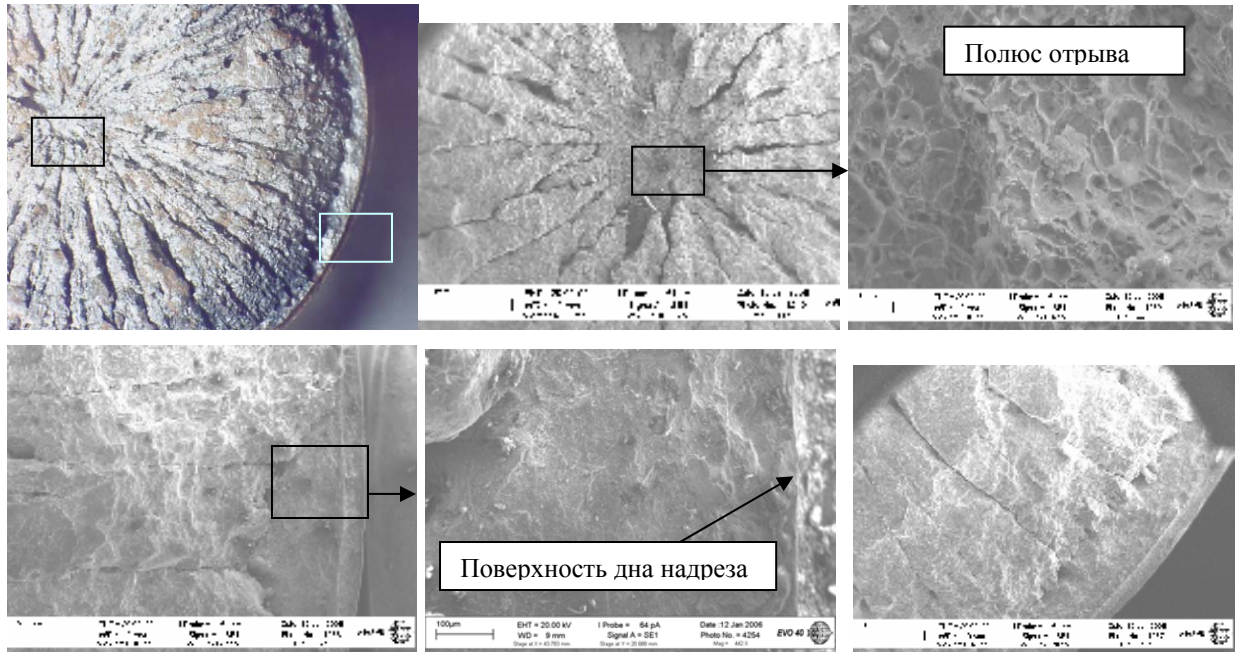


Рис. 10. Сталь 45. Кручение, $D=25\text{mm}$, $R=0,3\text{mm}$, без ОН.

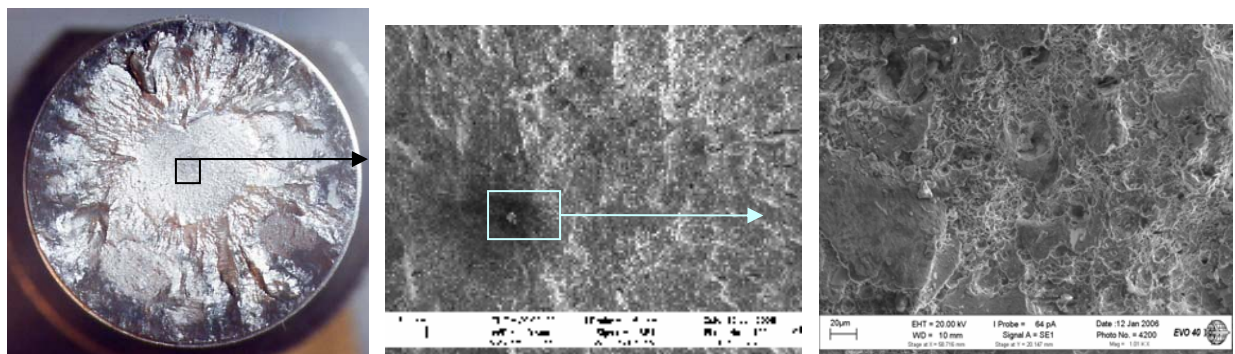


Рис. 11. ЭИ961Ш. Кручение, $D=25\text{mm}$, $R=0,3\text{mm}$, сОН - ГДО.

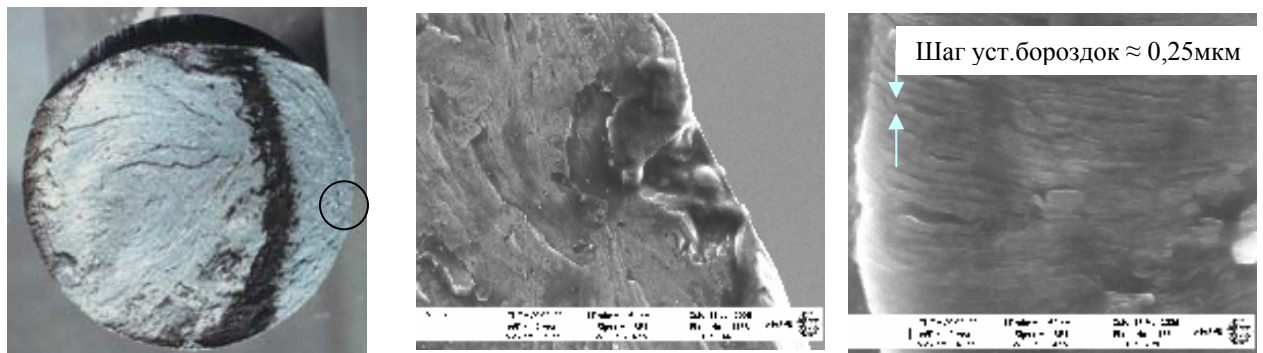


Рис.12. Д16Т. Изгиб, $D=25\text{mm}$, галтель, без ОН.

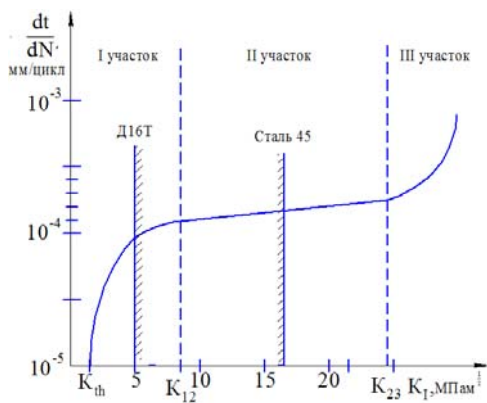


Рис. 13. Кинетическая диаграмма роста усталостной трещины

Исследование микроструктуры показало, что, скорость развития усталостных трещин для алюминиевого сплава Д16Т соответствует середине начальной стадии кинетической диаграммы роста усталостной трещины, а для стали 45 – середине второго участка. Коэффициенты интенсивности напряжений на отрыв соответственно равны $4-6 \text{ МПа м}^{1/2}$ и $16-17 \text{ МПа м}^{1/2}$. При симметричном цикле на-

гружения данные величины увеличиваются вдвое.

В шестой главе рассмотрены основные положения механики разрушения, выполнен инженерный анализ изломов исследуемых образцов (рис.14) при простом и сложном нагружении при наличии остаточных технологических напряжений в поверхностном слое и в случае их отсутствия, представлены результаты компьютерного иллюстрирования усталостной трещины с помощью комплекса ANSYS. Выполнен анализ концентрации напряжений в опасном сечении элементов исследуемых объектов без трещины и с трещиной переменной глубины. Исследовано изменение теоретического коэффициента концентрации напряжений по контуру опасного сечения в плоскости, параллельной главной плоскости жесткости, в которой Действует заданное усилие, при изгибе цилиндрической детали с кольцевым надрезом полукруглого профиля. На основании анализа усталостных изломов исследуемых образцов при изгибе разработан критериальный параметр безопасного повреждения детали. Необходимо отметить, что медленно растущие усталостные трещины наблюдались в образцах с остаточными напряжениями.

При кручении исследуемых образцов наиболее характерные усталостные трещины в условиях концентрации напряжений распределяются в плоскости опасного сечения с кольцевым надрезом. Это наблюдается как в кольцевых надresaх полукруглого профиля, так и V-образного профиля. То есть, при кручении нераспространяющаяся усталостная трещина фактически имеет тип I, а последующее разрушение идет по типу III и определяется характерной для кручения «звездочкой» в сечении излома детали. В этом случае очевидно, что нераспространяющаяся усталостная трещина по типу I при кручении определяется главными напряжениями $\sigma_1 = +\tau$.

Оценка трещиностойкости исследуемых упрочненных образцов с элементами деталей машин при кручении с изгибом (рис.14,д) требует более глубоких исследований, так как полученные результаты испытаний на трещинообразование показали сложный характер инициирования и развития усталостной трещины. Концентрация напряжений в области опасного сечения без остаточных напряжений приводит к тому, что в мелких надresaх при кручении магистральная трещина сначала развивается в плоскости опасного

сечения с кольцевым надрезом по типу I в пределах $2\Theta_{\max}$, т.е. в соответствии с наибольшими главными напряжениями σ_1 , а затем распространяется по

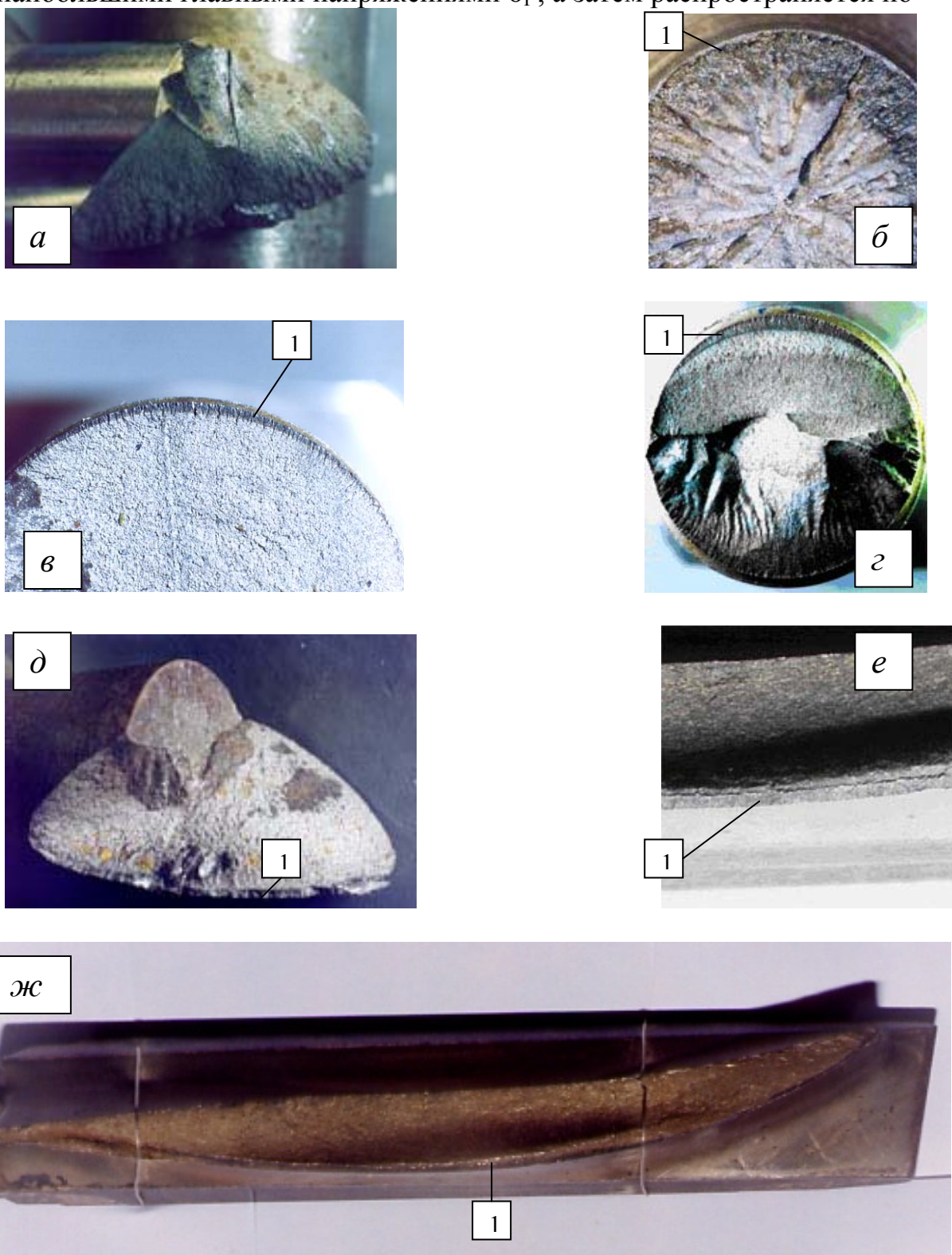


Рис. 14. Характерные изломы исследуемых образцов (а – д) и вентиляторной лопатки I ступени компрессора ГТД из сплава ВТ-3-1 (е – ж).

КРУЧЕНИЕ: а) Ст.45, $R = 1,0$ мм, бОН б) Ст.45, V-обр.надрез, ГДО

ИЗГИБ: фрагмент в) ЭИ961Ш, $R = 0,3$ мм, ГДО; г) Ст.45, $R = 1,0$ мм, ОР

КРУЧЕНИЕ С ИЗГИБОМ: д) Ст.45, $R = 0,3$ мм, ГДО

е) Трещина в лопатке из сплава ВТ-3-1 ж) Излом лопатки компрессора ГТД.

1 - не распространяющаяся усталостная трещина

типу III строго под 45° к продольной оси детали. При наличии остаточных напряжений в образцах из стали 45 ($R=1,0\text{мм}$; ОР), в условиях отношения предельных нормальных и касательных напряжений, близкого к единице, во-первых: имеется серповидная усталостная трещина по типу I, а во-вторых: максимальная глубина её в идентичном образце из стали 45 в два раза меньше, чем только при изгибе. В то же время, в сплаве ЭИ961Ш ($R=0,3\text{мм}$; ГДО) при аналогичном соотношении нагрузок кручения и совместного изгиба излом имеет сложную картину с ярко выраженным доломом в центре похожим на хладноломкий отрыв.

Используя пакет прочностной программы ANSYS, в диссертационной работе представлено компьютерное иллюстрирование усталостной трещины по заданным размерам реального сечения исследуемого образца из стали 45 с полукруглым кольцевым надрезом радиусом 1,0 мм. С этой целью разработан способ фигурных сечений, позволяющий моделировать берега усталостной трещины, у которых совпадают координаты узлов конечно-элементной разбивки в случае отсутствия внешней нагрузки.

На рис. 15 изображено расхождение берегов усталостной трещины с предварительно заданными её реальными размерами и номинальными напряжениями, соответствующими пределу выносливости исследуемого стального образца диаметром 25 мм с кольцевым полукруглым надрезом радиусом 1 мм (ОР) при изгибе в упругой постановке.

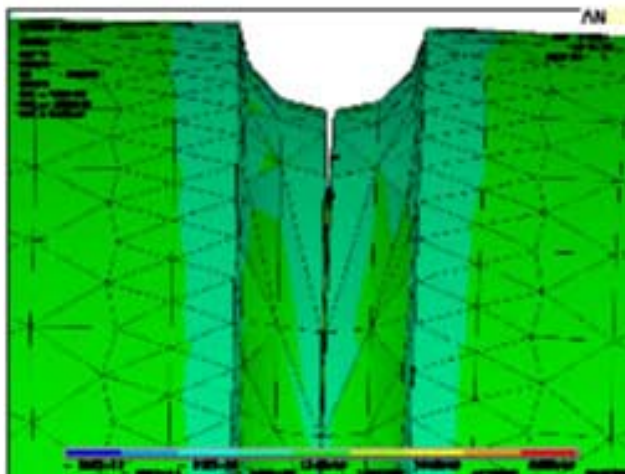


Рис. 15. Расхождение берегов трещины ν предел выносливости по первой макротрещине при изгибе детали с кольцевым надрезом, используя выражения для расхождения берегов трещины ν .

Постановка эксперимента и разработка вышеприведенной методики была выполнена на цилиндрических образцах из стали 45 с полукруглым кольцевым надрезом радиуса 1,0 мм, упрочненных обкаткой роликом при изгибе. Регистрация расхождения берегов трещины осуществлялась визуально с помощью стробоскопа СШ-2 и зеркала со стороны нижней рабочей части исследуемого образца при трех значениях амплитудных напряжений σ_a : 130 МПа, 150 МПа, 190 МПа. Различие результатов экспериментальных и

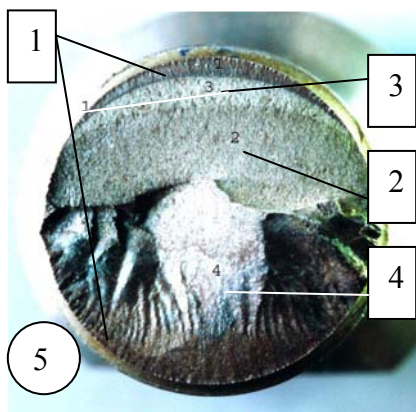
По результатам расчета концентрации напряжений модели в упругой постановке задачи при простых и сложных деформациях рассчитаны значения теоретических коэффициентов концентрации напряжений.

Зная зависимость величины раскрытия берегов трещины ν от амплитудных напряжений σ_a , а также связь раскрытия берегов трещины ν с её глубиной t и, используя формулу для δ , можно прогнозировать

теоретических позволяет определить перспективное направление в решении данной задачи с помощью системы ANSYS.

В седьмой главе на основании результатов пятой главы представлен метод физико-математического анализа усталостных изломов деталей с трещинами с точки зрения сопротивления материалов, на основании которого разработана инженерная методика расчета диапазонов безопасного нагружения деталей с усталостными трещинами при сложном сопротивлении, в частности при кручении с изгибом по симметричному циклу. На уровне макро- и микроструктуры материала усталостных изломов установлены волновые процессы при многоцикловом нагружении, что, на основании введения гипотезы плоских продольных сечений, позволяет создать метод конечных плоскостей (МКП). Посредством МКП впервые станет возможным прогнозирование поверхности усталостного излома, а также решение обратной задачи – определение реальных условий нагружения детали по сканированной поверхности усталостного излома реальной детали. Исходя из морфологии усталостных изломов, построены диаграммы предельных коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) для деталей из стали 45, ЭИ961Ш, Д16Т. Предложена формула КИН, в которой учтены остаточные напряжения.

На рис.16 изображена фотография статического излома образца с полукруглым надрезом из стали 45, выстоявшего 10 млн. циклов при изгибе, где отчетливо видна усталостная трещина 1 серповидной формы, зона долома 2, светлая область охрупчивания 3 и магистральная трещина 4. В нижней части магистральной трещины 4 также видна серповидная трещина, но с выпуклым наплывом 5 вглубь материала. Центральный угол, определяющий положение серповидной трещины в два



раза больше центрального угла, определяющего развитие трещины вглубь материала. Усталостный излом, изображенный на рис.14, свидетельствует о том, что при напряжениях, превышающих предел выносливости детали в полтора раза, еще до разрушения формируется абсолютно аналогичная серповидная зона с наплывом 5 вглубь материала, в которой происходят структурные изменения металла. В качестве примера методики

Рис.16. Статический излом детали из стали 45

физико-математического анализа излома используется излом при изгибе исследуемого образца из стали 45 ($R=1$ мм, ОР). На рис. 17 изображена графическая интерпретация излома с эпюрами действительных напряжений в опасном сечении конструктивного концентратора – кольцевого надреза полукруглого профиля. На рис.17а в верхней и нижней частях сечения изображены серповидные области нераспространяющихся трещин усталости. Анализ напряжений в точке В- выхода фронта трещины на поверхность дна кольцевого надреза – позволяет вывести формулу предела выносливости по первой макротрещине, возникающей в точке А, т.е. в наиболее нагруженной зоне детали.

Представленные на рис. 17 а и б выражения для амплитудных напряжений, предельная величина которых известна из эксперимента, составляют основу для вывода аналитической предела выносливости по первой макротрещине типа I – при отрыве и предела выносливости по разрушению. Окончательное аналитическое выражение имеет следующий вид:

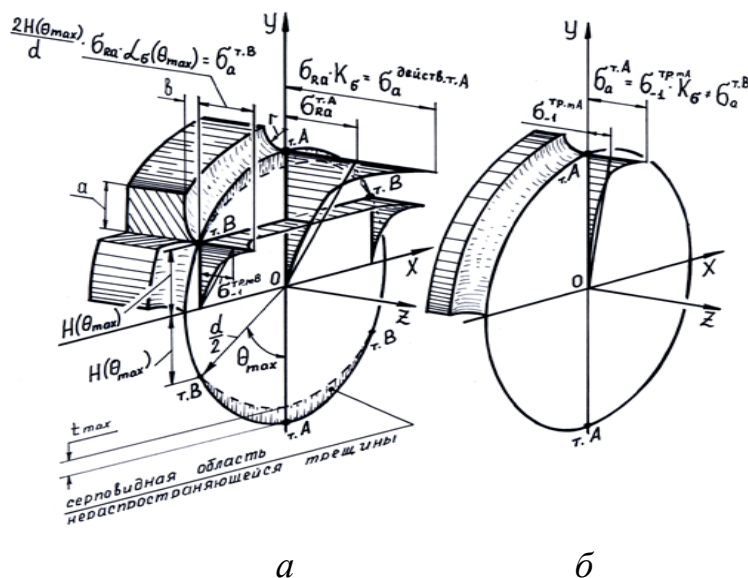


Рис. 17. Распределение действительных напряжений в опасном сечении детали с вероятными трещинами

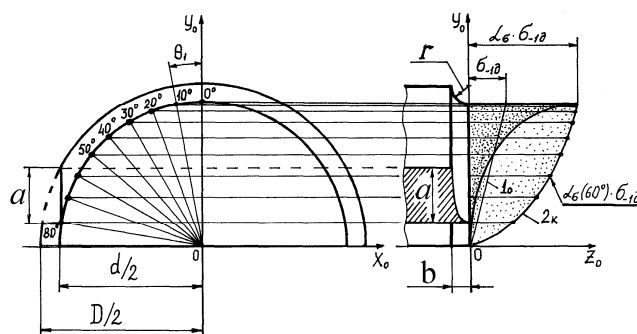
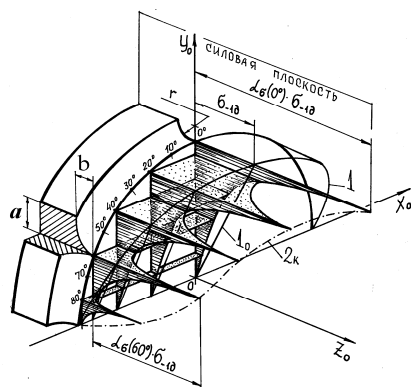
$$\sigma_{-1det}^{Tpm.A} = \frac{2H(\Theta_{max})}{d} \cdot \sigma_{Ra}^{T.A} \cdot \alpha_{\sigma}(\Theta_{max}) \cdot \frac{1}{K_{\sigma}(d) \cdot K_{\sigma}(\Theta_{max})} \cdot \frac{K_d(d)}{K_d(2H(\Theta_{max}))}, \quad (6)$$

где d – диаметр опасного сечения исследуемой детали, σ_{Ra} – предельная амплитуда напряжений, $\alpha_{\sigma}(\Theta_{max})$ – локальный теоретический коэффициент концентрации напряжений, $K_{\sigma}(d)$ – эффективный коэффициент концентрации напряжений исследуемой детали.

Анализ концентрации осевых нормальных напряжений по контуру дна кольцевого надреза полукруглого профиля без трещины в компьютерной модели, позволил установить, что изменение напряжений при изгибе подчиняется линейному закону. В этой связи проведен анализ концентрации напряжений по контуру дна аналогичного кольцевого надреза на базе научных исследований Г.Нейбера.

На рис.18 изображена четвертая часть симметричного сечения с кольцевым надрезом полукруглого профиля и распределением действительных нормальных напряжений в плоскостях, параллельных главной плоскости жесткости, в которой задается изгибающий момент. В секущих плоскостях полукруглый надрез имеет полуэллиптическую форму концентратора с полуосями a и b . На рис. 19 (а,б) изображена половина опасного поперечного сечения и эпюры распределения номинальных нормальных напряжений (1₀) и действия действительных напряжений в главной плоскости и по контуру дна (линия 2к) кольцевого надреза полукруглого профиля.

На основании физико-математического анализа получена новая формула локального теоретического коэффициента концентрации напряжений $\alpha_{\sigma}(\Theta_i)$, которая имеет следующий вид:



а **б**

Рис.18. Распределение номинальных (1-1) и действительных напряжений (линия 2к) по контуру дна кольцевого надреза при изменении центрального угла Θ_i от 0^0 до 80^0

$$\alpha_{\sigma}(\Theta_i) = \alpha_{\sigma}(0^0) \cdot n^{(\Theta_i)} \sqrt{1 + \text{Sin}\Theta_i}, \quad (7)$$

где $\alpha_{\sigma}(0^0)$ - теоретический коэффициент концентрации детали при изгибе,

$$n_i = 51,639 \cdot \Theta_i^4 - 177,9 \cdot \Theta_i^3 + 228,91 \cdot \Theta_i^2 - 135,65 \cdot \Theta_i + 34,539. \quad (8)$$

На основании данных фактов, взяв за основу только серповидную трещину 1 (рис.16), предлагается максимальную глубину (толщину) t_{max} представить как произведение эффективного коэффициента концентрации напряжений

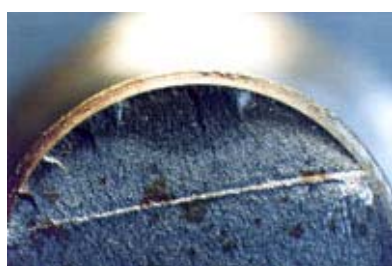


Рис. 20. Усталостный излом детали из стали 45

К и безопасной глубины медленнорастущей усталостной трещины $t_{\text{эф}}$. Исходя из этой предпосылки, разработана методика математического анализа излома с трещиной (рис.21). Данная методика предусматривает построение графической интерпретации копии излома с указанием необходимых угловых и линейных размеров, наблюдаемых зон.

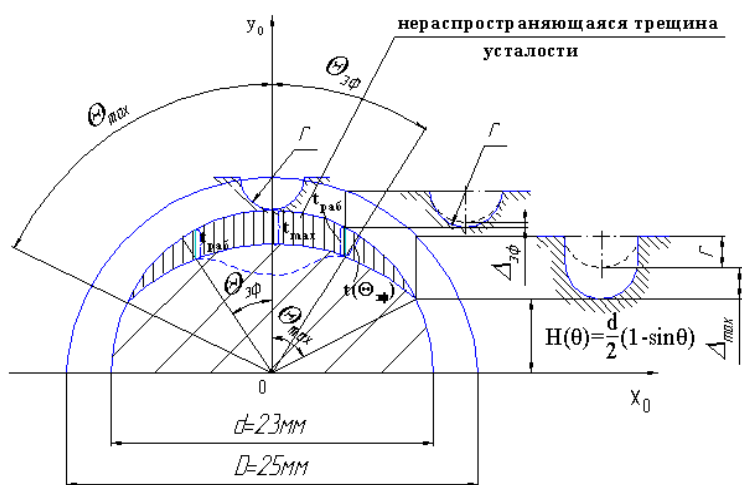


Рис. 21. Математическая интерпретация излома с трещиной

На рис.21 изображена половина симметричной части предполагаемого излома рассматриваемого образца в случае отсутствия магистральной трещины, но при наличии медленнорастущей усталостной трещины в пределах удвоенного центрального угла Θ_{max} и области ее перспективного распространения в пределах удвоенного эффективного угла $\Theta_{\text{эф}}$.

Следует иметь ввиду, что в плоскостях, параллельных силовой, полукруглый надрез имеет форму полуэллипса.

Расстояние от нейтральной оси ОХ до выхода на поверхность фронта нераспространяющейся усталостной трещины определяется величиной $H(\Theta)$. Вышесказанное позволило вывести формулу безопасной глубины медленно растущей усталостной трещины $t_{безоп}$, которая имеет следующий вид (первый вариант):

$$t_{безоп} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_{эф}(\Theta_i) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{t_{max}}{3} \left[1 + 2 \cdot \left(1 - \frac{tg\Theta_i}{tg\Theta_{max}} \right) \right] \frac{K_d(2H(\Theta_i))}{K_\sigma \cdot (1 + \sin \Theta_i)}, \quad (9)$$

где: $t_{эф}$ – расчетная глубина усталостной трещины в пределах угла $2\Theta_{эф}$,

t_{max} – максимальная глубина усталостной трещины,

K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений,

K_d – коэффициент влияния абсолютных размеров детали.

$K_\sigma(\Theta_{max})$ – эффективный коэффициент концентрации напряжений для детали с полуэллиптическим кольцевым надрезом диаметром, соответствующим расстоянию между трещинами $2H(\Theta_{max})$

Безопасную глубину $t_{безоп}$ можно использовать в качестве критерия безопасного повреждения детали, который определяет максимально допустимую эксплуатационную глубину усталостной трещины при изгибе детали, до которой гарантируется безопасная работа детали в течение всего ресурса, заданного производителем.

В настоящее время основным методом исследования разрушения деталей является электронно-микроскопический анализ шлифов, взятых с поверхности излома. Данный метод позволяет выявить структурные изменения металла, предшествующие излому, локальные пластические деформации, а также определить место возникновения усталостной трещины по плотности скопления дислокаций и, в какой-то мере, проследить кинетику трещины. Дальнейшая расчетная оценка трещиностойкости детали проводится с использованием коэффициента интенсивности напряжений (КИН),

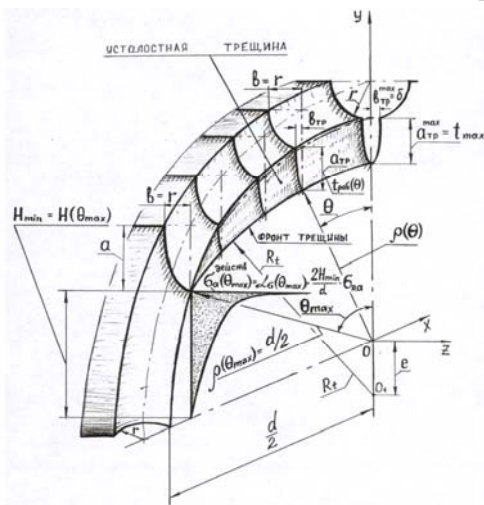


Рис. 22. Геометрическое представление локальных сечений детали с усталостной трещиной при изгибе

исключая из рассмотрения концентрацию макронапряжений в окрестности линии фронта усталостной трещины. Однако, на сегодняшний день, КИН по методу Гриффитса-Ирвина не дает ответа на некоторые физические закономерности трещинообразования. В частности, нет ответа на вопрос: почему КИН при остановке трещины меньше КИН при последующем страгивании, ибо в этот момент длина трещины не изменилась? Физико-математический анализ излома с усталостной трещиной позволяет

найти решение этого вопроса.

Кроме того, он обладает объективной простотой и доступен в инженерной практике. Учитывая то, что эффект влияния конструктивного концентратора при увеличении глубины усталостной трещины уменьшается получена функция теоретического коэффициента концентрации напряжений для окрестности линии фронта (дна) трещины (ф.10). Расчеты показали, что в окрестности фронта медленно растущей усталостной трещины теоретический коэффициент концентрации напряжений ниже локального теоретического коэффициента концентрации напряжений на поверхности дна кольцевого надреза.

$$\alpha_{\sigma}(\Theta_i) = \alpha_{\sigma}^{\text{лок}}(\Theta_{\max}) \cdot \frac{\sigma_{\text{ном}}(\Theta_{\max})}{\sigma_{\text{ном}}(\Theta_i)}, \quad (10)$$

где

$$\sigma_{\text{ном}}(\Theta_{\max}) = \frac{2H_{\min}}{d} \cdot \sigma_{Ra} = \frac{2R \cdot \sin \Theta_{\max}}{d} \cdot \sigma_{Ra}, \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{ном}}(\Theta_i) = \frac{\rho(\Theta_i) \cdot \cos \Theta_i}{(d/2) - t_{\max}} \cdot \left(1 - \frac{2t_{\max}}{d}\right) \sigma_{Ra}. \quad (12)$$

Необходимо заметить, что для детали с конкретным эксплуатационным напряжением, значения $\sigma_{\text{ном}}(\Theta_{\max})$ и $\alpha_{\sigma}^{\text{лок}}(\Theta_{\max})$ при расчетах являются постоянными величинами. Для исследуемых деталей из стали 45 с полукруглым кольцевым надрезом радиусом 1мм, ОР, (рис.23) результаты расчетов по формуле (12) приводят к равенству (13), которое имеет следующий вид:

$$\alpha_{\sigma}^{\text{мп}}(\Theta_0) \cdot H(\Theta_0) = \alpha_{\sigma}^{\text{мп}}(\Theta_i) \cdot H(\Theta_i) \quad (13)$$

где $H(\Theta_0) = \frac{d}{2} - t_{\max}$. (14)

Удвоенная величина $H(\Theta_0)$ - есть расстояние между двумя серповидными усталостными трещинами в главной плоскости жесткости, т.е. в силовой плоскости. Формула (13) определяет связь геометрических параметров трещинообразования и физических параметров опасного сечения с конструктивным концентратором, в частности теоретического коэффициента концентрации напряжений в области дна трещины.

Подставляя (14) в (13) и, выделяя t_{\max} , получаем теоретическую формулу (15) расчета максимальной глубины усталостной трещины в силовой плоскости.

$$t_{\max} = \frac{d}{2} - H(\Theta_i) \cdot \frac{\alpha_{\sigma}^{\text{мп}}(\Theta_i)}{\alpha_{\sigma}^{\text{мп}}(\Theta_0)}. \quad (15)$$

Расчеты t_{\max} по формуле (15) и экспериментальное измерение t_{\max} на инструментальном микроскопе показали результат отклонения менее 1%.

Определение величины действительных напряжений по контуру дна надреза в пределах центрального угла поперечного сечения, соответству-

ющего выходу серповидной трещины на поверхность позволило объяснить поведение усталостной трещины, которое наблюдалось в процессе эксперимента. В частности: при испытаниях установлено, что в пределах центрального угла $2\Theta_{\text{эф}} < 60^{\circ}$ длина трещины развивается быстро, а затем медленно увеличивается до точек на поверхности дна кольцевого надреза, соответствующих центральному углу поперечного сечения $2\Theta_{\text{max}} = 120^{\circ}$. С помощью физико-математического анализа установлено, что в пределах $2\Theta_{\text{эф}} < 60^{\circ}$ действительные напряжения от главной плоскости жесткости (при $\Theta = 0^{\circ}$) до эффективного угла ($\Theta_{\text{эф}} = 30^{\circ}$) изменяются всего на 2%. Дальнейшее движение линии фронта трещины по контуру дна надреза объясняется высокой локальной концентрацией напряжений (формула 10).

Проведенный в рамках классических принципов сопротивления материалов физико-математический анализ излома показывает, что остановка распространения усталостной трещины вглубь материала фактически сопровождается уменьшением концентрации напряжений на линии фронта в главной плоскости жесткости при изгибе цилиндрической детали. Как известно, упругое решение дает противоположный результат. По всей видимости пластические деформации в случае медленного течения способствуют упрочнению линии фронта усталостной трещины и, соответственно, для дальнейшего углубления трещины необходимо дополнительное приращений напряжений. Вглубь материала нераспространяющаяся трещина развивается в основном в пределах удвоенного эффективного угла, а затем удлиняется по контуру дна надреза в пределах центрального угла $2\Theta_{\text{max}}$.

Физико-математический анализ излома позволяет более объективно выполнять прочностной анализ детали. Полученные выражения для глубины безопасного повреждения детали $t_{\text{безоп}}$ и предела выносливости по первой макротрещине при изгибе σ_{-1}^{TP} открывают возможность теоретического расчета диапазонов эксплуатационных напряжений безопасной работы детали в условиях сложного нагружения.

На основании того, что нераспространяющаяся усталостная трещина - всего лишь первая стадия разрушения детали, то диаграмму предельных амплитуд циклов напряжений по трещинообразованию, например при кручении с изгибом, вероятно можно описать уравнением эллипса также, как и диаграмму предельных амплитуд разрушающих напряжений по Серенсену С.В., если в качестве рабочих предельных нормальных и касательных напряжений принять соответствующие пределы выносливости по первой макротрещине:

$$\left(\frac{\sigma_{Ra}^{TP}}{\sigma_{-1}^{TP}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{Ra}^{TP}}{\tau_{-1}^{TP}} \right)^2 = 1 . \quad (16)$$

Из сравнения уравнений (9) и (16) следует выделить вероятность равенства (17), откуда получается выражение (18) для предела выносливости по первой макротрещине по типу III при кручении.

$$\frac{\tau_{-1D}}{\sigma_{-1D}} = \frac{\tau_{-1}^{TP}}{\sigma_{-1}^{TP}}, \quad (17)$$

$$\tau_{-1}^{TP} = \frac{\tau_{-1D}}{\sigma_{-1D}} \cdot \sigma_{-1}^{TP}. \quad (18)$$

Используя формулу предела выносливости по первой макротрещине (6) при изгибе, выражение (18) принимает следующий вид ($\sigma_{-1D} = \sigma_{Ra}$) :

$$\tau_{-1}^{TP} = \tau_{-1D} \cdot \left[\frac{2H(\Theta_{\max})}{d} \cdot \frac{\alpha_{\sigma}(\Theta_{\max})}{K_{\sigma}(d) \cdot K_{\sigma}(\Theta_{\max})} \cdot \frac{K_d(d)}{K_d(2H(\Theta_{\max}))} \right] \quad (19)$$

Для расчета диапазонов безопасного нагружения детали использовался коэффициент размаха трещины по безопасной глубине (20) и по допускаемой глубине (27).

$$n_{TP}^I = \frac{t_{\max}}{t_{\text{беззон}}}. \quad (20); \quad n_{TP}^{II} = \frac{t_{\max}}{[t]}. \quad (21), \text{ где } [t] = t_{\text{беззон}} \cdot \left[1 + (n_{TP}^I)^{-1} \right] \quad (22)$$

На основании формул (20), (21), (22), а также предела выносливости при изгибе по первой макротрещине (ф.6) и экспериментального значения предела выносливости исследуемых образцов по разрушению $\sigma_{-1\text{дем}}$, или σ_{Ra} (здесь образец с кольцевым надрезом вполне допустимо назвать деталью, т.к. надрез является элементом детали), рассчитываются диапазоны эксплуатации детали с трещиной различной степени безопасности.

Первый диапазон амплитудных напряжений σ_{aI} определяется пределом выносливости детали по первой макротрещине σ_{-1}^{TP} , т.е. $\sigma_{aI} = \sigma_{-1}^{TP}$. Он характеризуется гарантированной эксплуатацией детали без возникновения усталостных трещин.

Второй диапазон напряжений σ_{aII} характеризуется гарантированной безопасной эксплуатацией детали с трещиной и определяется по формуле (23).

$$\sigma_{aII} = \sigma_{-1}^{TP} + \frac{\sigma_{-1\text{дем}} - \sigma_{-1}^{TP}}{n_{TP}^I}. \quad (23)$$

Третий диапазон напряжений σ_{aIII} оценивается с помощью допустимой глубины эксплуатационной трещины в n_{TP}^{II} . Он характеризуется работой детали с трещиной на режимах, которые можно назвать экстремальные. Граничное напряжение третьего диапазона можно назвать критическим. Оно определяется следующей формулой:

$$\sigma_{aIII} = \sigma_{-1}^{TP} + \frac{\sigma_{-1\text{дем}} - \sigma_{-1}^{TP}}{n_{TP}^{II}}. \quad (24)$$

Четвертый диапазон амплитудных напряжений ограничивается пределом выносливости детали по разрушению, т.е. $\sigma_{aIV} = \sigma_{Ra} = \sigma_{-1\text{дем}}$. В данном диапазоне эксплуатировать деталь с трещиной нецелесообразно. Работа детали в закритическом, т.е. четвертом диапазоне, может быть только в ситуациях, связанных с вынужденной необходимостью.

На рис. 23 ... 25 изображены теоретические расчетные диапазоны безопасного повреждения деталей для исследованных образцов в соответствии с предлагаемой методикой. Данные результаты имеют практический интерес для специалистов.

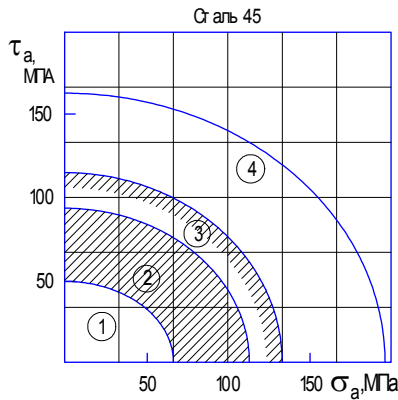


Рис. 23

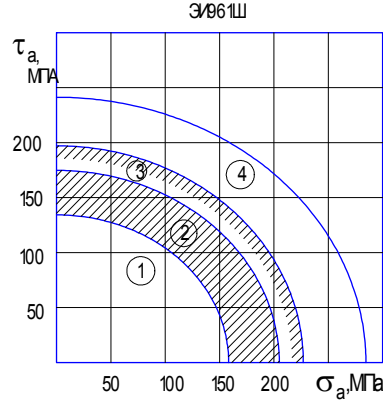


Рис.24

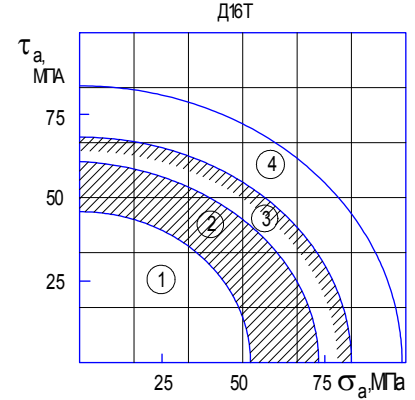


Рис. 25

Примечание: последовательность представления диаграмм на рис. 23...25 соответствует последовательности представления результатов испытаний образцов на рис. 4 ... 6.

Остаточные технологические напряжения после ППД играют большую роль в процессе эксплуатации деталей машин. Проблема связи остаточных напряжений и коэффициента интенсивности напряжений на дне нераспространяющейся усталостной трещины на сегодняшний день является одной из наиболее актуальных. В этой связи в диссертационной работе предлагается еще один путь решения этой проблемы.

При возникновении трещины остаточные напряжения реагируют на нее собственной концентрацией. Сжимающие остаточные напряжения (равно как и растягивающие) увеличиваются на величину дополнительных осевых напряжений $\sigma_{z\partial}$. Данная упруго-пластическая задача для трещины в виде полуэллиптического надреза в упрочненном поверхностном слое детали в условиях статики решена М.П.Шатуновым методом комплексных функций напряжений Мухелишвили. В условиях динамического нагружения при появлении усталостной трещины необходимо учесть коэффициент снижения влияния концентрации остаточных напряжений $\varphi_{ост}$.

После преобразований коэффициент интенсивности напряжений по типу I с учетом остаточных напряжений можно записать в следующем виде:

$$K_{Imax} = \sigma_{Ra} \sqrt{\pi \cdot t_{max}} \cdot f_k(\Theta) = \left(\sigma_{-1}^{\delta OH} - (\alpha_{\sigma}^{ocm} \cdot \sigma_{ocm} \cdot \varphi_{ocm}) \right) \sqrt{\pi \cdot t_{max}} \cdot f_k(\Theta) \quad (25)$$

$$\text{где: } \alpha_{\sigma}^{ocm} = 1 + \frac{2(1+C)}{(1-C)}, \quad (26) \quad C = \frac{t-b^{TP}}{t+b^{TP}}, \quad (27) \quad t = a^{TP} \quad - \text{ большая}$$

полуось полуэллиптической трещины, b^{TP} – малая полуось трещины, $f_k(\Theta)$ – функция, определяющая краевую трещину.

Очевидно, что в выражении (25) произведение $\alpha_{\sigma}^{ост} \cdot \varphi_{ост} = \bar{\psi}_{\sigma}$. Если усталостная трещина отсутствует, то: $\alpha_{\sigma}^{ост}=1$, $\varphi_{ост} = \bar{\psi}_{\sigma}$.

Наличие серповидной трещины при изгибе детали позволяет проследить кинетику трещины. На рис 26 изображены предельные кривые трещиностойкости для границы усталостной серповидной трещины от высокой концентрации напряжений и трещиной с низкой концентрации напряжений.

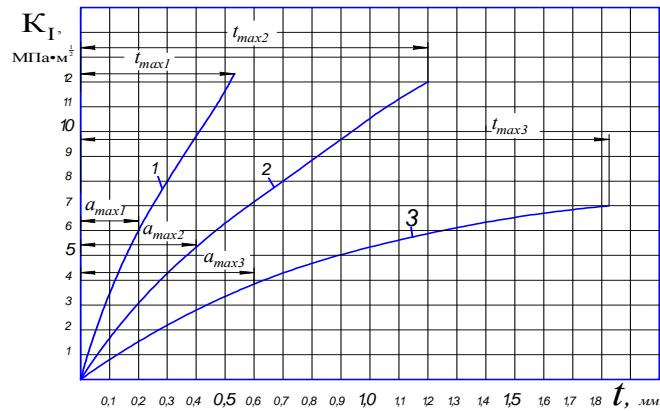


Рис.26. Графики предельных коэффициентов интенсивности напряжений по критической линии фронта нераспространяющейся трещины усталости 1 – ЭИ961Ш, $a_{max1}=0,2$ мм ; 2 – Ст.45, $a_{max2}=0,4$ мм ; 3 – Д16Т, $a_{max3}=0,6$ мм

Из рис.26 следует, что в пределах толщины упрочненного слоя a_{max} приращение коэффициента интенсивности напряжений ΔK активно снижается по мере пробивания трещиной упрочненного слоя, а затем становится практически постоянным. Это характерно для стальных деталей. Однако наиболее существенным фактом является то, что коэффициенты интенсивности напряжений для стали 45 по величине центрального угла θ_{max} и для сплава ЭИ961Ш одинаковы, разница лишь в глубинах усталостной трещины t_{max} . Отсюда следует, что в деталях из стальных сплавов с различным пределом прочности предельные значения критических коэффициентов интенсивности напряжений приблизительно одинаковы, но в углеродистых сталях, по сравнению с легированными, максимальная глубина нераспространяющейся усталостной трещины практически в три раза больше. В то же время, упрочненные детали из алюминиевых сплавов с одной стороны менее чувствительны к концентрации напряжений, т.к. центральные углы распространения трещины Θ_{max} и $\Theta_{эф}$ равны, к тому же максимальная глубина нераспространяющейся усталостной трещины приблизительно на 30% больше по сравнению с углеродистой сталью. Следовательно живучесть алюминиевого сплава очень высока. График 3 позволяет прогнозировать критическое значение K_I для сплава Д16Т около $8 \text{ МПа м}^{0,5}$.

Расчет критического коэффициента интенсивности напряжений $K_{fcl}=17 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ для исследуемых образцов из стали 45 (кривая 1, рис.25) в пределах эффективного центрального угла свидетельствует о соответствии методики с результатами микроструктуры в главе 5, а также других авторов.

Установлено наличие волновых процессов при многоцикловом нагружении деталей. Это позволит создать новые методы прогнозирования поверхности усталостных изломов в области опасного сечения детали при наличии скрытых дефектов и без них. На рис.27,*a* изображена макроструктура нерас-

пространяющейся усталостной трещины (сталь 45, изгиб), а на рис.27.б то же изображение, обработанное в редакторе Adob Fotoshop-6, где берега трещины по типу I имеют, более выраженную волновую поверхность, что свидетельствует о возможности построения амплитудно-частотной характеристики вещества. Однако, этот факт свидетельствует о необходимости корректировки как расчетов коэффициента интенсивности напряжений, так и энергии, необходимой на формирование двух берегов усталостной трещины. Микроструктурный анализ данных образцов выявил волновую природу сдвиговых деформаций, что отображено на рис.28,а (увеличение 50х) и рис.28,б (100х), и обработано в редакторе Adobe Fotoshop 6.0 (рис.28,в).



Рис.27. Волновая поверхность усталостной макротрещины по типу I



Рис.28. Волновая природа сдвиговых деформаций при многоцикловом нагружении

На основании макро- и микроструктуры усталостных изломов, определяющих фрактальную природу волновых деформационных процессов при многоцикловом нагружении, сформулирована гипотеза плоских продольных сечений, являющаяся теоретической базой для создания метода конечных плоскостей, позволяющего прогнозировать вероятную поверхность усталостного излома детали.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

По итогам проделанной работы, можно сделать следующие выводы:

1. Исследование микроструктуры усталостных изломов исследуемых образцов с элементами деталей в виде кольцевых конструктивных мелких и глубоких надрезов с поверхностным слоем в опасном сечении, модифицированным с помощью ППД, и испытанных при простых и сложных деформациях на многоцикловую усталость на различных уровнях амплитуды напряжений позволило установить наличие подповерхностных усталостных микротрещин, приведших к разрушению деталей в диапазоне долговечности

$1 \cdot 10^6 \dots 3 \cdot 10^6$ в стали 45 и сплаве Д16Т. Учитывая тот факт, что на уровнях предельных амплитуд при простых деформациях зарождение медленно-растущих трещин в основном начиналось с поверхности, указанный диапазон долговечности целесообразно считать областью бифуркационного перехода, определяющего смену механизмов зарождения усталостных микротрещин, ответственных за разрушение детали. В таком случае, предел выносливости детали в его классическом понимании подлежит переосмыслению и следует считать условной величиной.

2. Предложенный авторский метод физико-математического макроструктурного анализа морфологии усталостных изломов показал, что в условиях концентрации напряжений в поле технологических остаточных напряжений в поверхностном слое детали при испытаниях на многоцикловую усталость изменяются механические характеристики в направлении снижения пластичности в зоне контактного состояния микротрещин. В этом случае линия фронта медленнорастущей трещины является линией мало пластичного состояния, в окрестности которой концентрация напряжений при увеличении глубины макротрещины уменьшается и, дальнейшее её развитие в детали происходит как в гладком образце.

3. На основании метода физико-математического макроструктурного анализа морфологии усталостных изломов выведены аналитические функциональные зависимости характеристик трещинообразования от характеристик разрушения детали, в частности:

Выведена аналитическая функциональная зависимость предела выносливости детали по образованию макротрещины типа I от предела выносливости по разрушению на базе типичных усталостных изломов, полученных по специально разработанной методике испытаний на усталость при изгибе с мелким кольцевым надрезом полукруглого профиля, имитирующего радиус закругления вершины усталостной трещины;

Выведена аналитическая зависимость глубины безопасной усталостной трещины от её максимальной величины, являющейся критическим состоянием при переходе медленнорастущей макротрещины как результата концентрации напряжений к макротрещине, развивающейся в гладкой детали. Расчетную величину безопасной глубины усталостной трещины по полученной аналитической зависимости предлагается считать **критериальным параметром безопасного повреждения детали**;

Выведена аналитическая зависимость локального теоретического коэффициента концентрации напряжений для расчета местных напряжений на дне опасного кольцевого надреза детали, определяемого сечениями, параллельными силовой плоскости при деформации изгиба от классического теоретического коэффициента концентрации напряжений детали;

Выведена аналитическая функциональная зависимость локального теоретического коэффициента концентрации напряжений в окрестности линии фронта медленнорастущей усталостной трещины от классического теоретического коэффициента концентрации напряжений детали как ин-

тегральной величины для расчета местных напряжений на дне трещины при изгибе.

Выведана аналитическая зависимость максимальной глубины усталостной медленнорастущей трещины, характеризующей критический переход от трещины как результата высокой концентрации напряжений к трещине гладкой детали, от локального теоретического коэффициента концентрации напряжений в окрестности вершины и классического теоретического коэффициента концентрации напряжений детали.

4. На основании вышеперечисленных аналитических зависимостей разработана методика расчета диапазонов безопасного нагружения деталей с усталостной медленнорастущей макротрещиной для двухкомпонентного нагружения деталей.

5. На основании закономерностей в морфологии усталостных изломов, проявляющихся в условиях многоциклового нагружения деталей изгибом или кручением сформулирована математическая гипотеза плоских продольных сечений, являющейся теоретической базой для создания перспективного **метода конечных плоскостей**, позволяющего прогнозировать поверхность рельефа усталостных изломов. Метод конечных плоскостей предусматривает решение как прямой задачи – построение поверхности излома по заданной расчетной схеме, так и обратной задачи – уточнение известной расчетной схемы по результатам сканирования рельефа поверхности реального усталостного излома.

6. Предложен критерий качества технологического упрочнения поверхностного слоя как отношение среднеинтегральной величины остаточных напряжений, учитывающей эпюру распределения остаточных напряжений по толщине упрочненного слоя, к остаточным напряжениям на поверхности, величина которого в диапазоне от 0,50 до 0,65 определяет оптимальное влияние не только на приращение сопротивления усталости в условиях ограниченной долговечности, но и на живучесть деталей с усталостной макротрещиной

7. Результаты исследований нашли практическое применение на различных предприятиях авиационной промышленности и общего Машиностроения, а также в учебном процессе Самарского государственного аэрокосмического университета. Методика физико-математического макроструктурного анализа излома детали с трещиной согласно акта о техническом использовании результатов диссертации применяется на ОАО «Моторостроитель» (г.Самара), методика расчета эксплуатационных диапазонов безопасного повреждения детали с трещиной усталости при сложном сопротивлении внедрена в Государственном центре «Безопасность полётов на воздушном транспорте» (г.Москва).

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Результаты диссертации защищены шестью авторскими свидетельствами СССР: №1146559, №1174821, №1244544, №1245926, №1280350, №1582054 и опубликованы в следующих основных работах:

1. Павлов В. Ф., Шатунов М. П., Минин В. В., Кольцун Ю. И. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы болтов малого диаметра// Известия вузов. Машиностроение.-1985.-№10.- С. 3-7.
2. Павлов В. Ф., Кольцун Ю. И., Кирпичев В. А. Остаточные напряжения в цилиндрических образцах с V-образным надрезом// Известия вузов. Авиационная техника. -1986. №4 -С. 92—95.
3. Павлов В. Ф., Кольцун Ю. И., Кирпичев В. А. Определение остаточных напряжений в плоских образцах с V—образным надрезом// Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов: Материалы II Всесоюзной НТК.- Куйбышев, 1986.— С. 106-107.
4. Павлов В.Ф., Прохоров А.А., Кольцун Ю.И. Оценка эффективности поверхностного деформирования при циклическом кручении. Материалы XI Всесоюзной НТК «Конструкционная прочность двигателей».-Куйбышев, 1988. – С.132-134.
5. Павлов В. Ф., Лапин В. И., Кольцун Ю. И. Влияние размеров поперечного сечения поверхностно упрочненных образцов из сплава Д16Т на сопротивление усталости в условиях концентрации напряжений// Проблемы прочности. -1990. -№ 4. - С. 75-79.
6. Кольцун Ю. И. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости цилиндрических образцов с кольцевым концентратором V-образного профиля при кручении с изгибом// Остаточные напряжения — резерв прочности в машиностроении: Материалы Всесоюзной НТК. – Ростов-на-Дону, 1991. - С. 126-128.
7. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Кольцун Ю.И. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости при кручении с изгибом в условиях концентрации напряжений.// Проблемы прочности.-1992.-№12.-С.37-40.
8. Кольцун Ю.И., Прохоров А.А. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости элементов деталей машин при сложном сопротивлении. Материалы II Российско-Китайского симпозиума.-Самара.-1992.- С.94-95.
9. Кольцун Ю.И., Прохоров А.А. Математическая модель влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости при сложном нагружении в условиях концентрации напряжений. Труды VI НТК «Математическое моделирование и краевые задачи».-Самара: СГАУ.-1996.- Ч.1,-С.49-52.
10. Кольцун Ю.И., Прохоров А.А. Оценка повышения сопротивления усталости за счет остаточных напряжений при кручении с изгибом в условиях концентрации напряжений. Труды 26 Международ. НТК по динамике и прочности двигателей.- Самара: СГАУ.- 1996.- С.83-85.
11. Кольцун Ю.И., Прохоров А.А. Математическая модель влияния остаточных напряжений на сопротивление материалов при сложном нагру-

жении в условиях концентрации напряжений. Труды VIII НТК «Математическое моделирование и краевые задачи».- Самара: СамГТУ.-1998.- С.49-51.

12. Кольцун Ю.И. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных деталей ГТД при сложном нагружении. Труды Межд. научн.-техн. конф.- Самара: СГАУ.- 2001.- Ч.1.- С.27-29.

13. Кольцун Ю.И. Закономерности определения предела выносливости упрочненных деталей ГТД при кручении с изгибом и кручении с растяжением –сжатием. Доклад на Межд. Научн.-техн.конф.- Самара: СГАУ.-2001.- Ч.2.- С. 254-259.

14. Павлов В.Ф., Бордаков С.А., Вакулюк В.С., Кольцун Ю.И. Расчет предела выносливости упрочненной детали с концентратором по остаточным напряжениям. Доклад на Межд. научн.-техн. конф.- Самара: СГАУ.- 2001.- Ч.2.- С.250-253.

15. Павлов В.Ф., Бордаков С.А., Вакулюк В.С., Кольцун Ю.И. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости упрочненной детали. Труды Межд. Научн.-техн. Конф.- Украина, Киев: ИПП НАН Украины.- 2001.- С.95-96.

16. Павлов В.Ф., Бордаков С.А., Вакулюк В.С., Кольцун Ю.И. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости упрочненной детали.// «Вибрация в технике», №5.- 2001.- Украина, Винниц. Обл.: ВДУА.- С. 1-5.

17. Кольцун Ю.И., Денискина Е.А., Хибник Т.А. Математическое моделирование эффективной величины нераспространяющейся усталостной трещины усталости. Труды XXII НТК «Математическое моделирование и краевые задачи».- Самара: СамГТУ.- 2002.- С.87-91.

18. Кольцун Ю.И. Определение предела выносливости материала по образованию трещины в условиях концентрации напряжений. Материалы Межд. Научн.-технич. Конф. «Высокие технологии в машиностроении».- Самара: СамГТУ.- 2002.- С.102-105.

19. Кольцун Ю.И., Денискина Е.А. Математическое описание фронта нераспространяющейся трещины усталости. Труды XXIII НТК «Математическое моделирование и краевые задачи».- Самара: СамГТУ,- 2003.- С.85-88.

20. Кольцун Ю.И., Денискина Е.А., Хибник Т.А. Математическая оценка критерия безопасности при эксплуатации детали с трещинами.- Труды XXIII НТК «Математическое моделирование и краевые задачи».- Самара: СамГТУ.- 2003.- С.88-92.

21. Кольцун Ю.И., Прохоров А.А., Денискина Е.А. Оценка коэффициента запаса прочности по трещинообразованию. Труды Межд. Научн.-техн. Конф.- Самара: СГАУ.- 2003.- С.38-40.

22. Кольцун Ю.И., Прохоров А.А., Хибник Т.А. Определение предела выносливости по образованию первой макротрещины в условиях простого и

сложного нагружения. Труды Межд. Научн.-техн. Конф.- Самара: СГАУ.- 2003.- С.40-42.

23. Кольцун Ю.И. Прогнозирование предела выносливости по образованию первой макротрещины при изгибе. Вестник СГАУ. Спец.вып.- Самара: СГАУ.- 2003.- С. 222-226.

24. Кольцун Ю.И. Влияние остаточных напряжений на образование усталостной трещины при изгибе. Вестник СГАУ. Спец.вып.- Самара: СГАУ.- 2003.- С. 30-34.

25. Кольцун Ю.И., Денискина Е.А. Математическое моделирование движения фронта трещины усталости. XII Научн. Конф. Ученых Украины, Белоруссии, России «Прикладные задачи математики и механики».- Севастополь.- 2003.- С. 20-22.

26. Кольцун Ю.И. Концентрация напряжений по контуру опасного сечения кольцевого надреза при изгибе детали с трещиной. Материалы VI Межд. Конф. «Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте».- Санкт-Петербург: ПГУПС.- 2004.- С. 126-127.

27. Кольцун Ю.И. Локальный теоретический коэффициент концентрации напряжений при прогнозировании предела выносливости по первой макротрещине. Труды VI Межд. Конф. «Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте».- Санкт-Петербург: ПГУПС.- 2004.- С.120-128.

28. Кольцун Ю.И., Лежин С.М., Филатов А.П., Шадрин В.К. Справочные данные к расчетно-проектировочным заданиям и курсовым работам по сопротивлению материалов. Часть 1, Часть 2. Метод. Указания.- Самара: СГАУ.- 1998.- 32с.-1999.- 18с..

29. Кольцун Ю.И. Механика концентрации напряжений в окрестности фронта нераспространяющейся усталостной трещины. Вестник Сам.ГТУ. Вып. 30.- Самара: СамГТУ.-2004.- С.41-54.

30. Кольцун Ю.И., Денискина Е.А. Локальная концентрация напряжений по контуру опасного эллиптического сечения детали при изгибе. Труды Всеросс. Научн. Конф. «Математическое моделирование и краевые задачи».- Самара: СамГТУ.- 2004.- С. 125-129

31. Кольцун Ю.И. Волновые процессы при многоцикловом нагружении детали. Гипотеза плоских продольных сечений. Вестник Сам.ГТУ. Вып. 34.- Самара: СамГТУ.-2005.- С.199-202.

32. Кольцун Ю.И. Прогнозирование поверхности усталостного излома. Гипотеза плоских продольных сечений. Труды VI Междунар. Научн. Конф. «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения». Санкт-Петербург: СПбГПУ.- 2005.- С. 248-252.