

На правах рукописи

Терёшин Денис Анатольевич

**РАЗРУШЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ДВИЖУЩИХСЯ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ**

Специальность 01.02.06 –

“Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры”

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск
2006

Работа выполнена на кафедре “Прикладная механика, динамика и прочность машин” Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор Чернявский А.О.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Жернаков В.С.;

доктор технических наук, профессор Шефер Л. А.

Ведущая организация –

Государственное унитарное предприятие “Инженерный центр прочности, надежности и ресурса оборудования атомной техники” (ИЦП МАЭ), г. Москва.

Защита состоится “ 20 ” декабря 2006 г., в 15 ч, на заседании диссертационного совета Д212.298.02 Южно-Уральского государственного университета: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, Ученый совет. Тел. (351) 267-91-23

Автореферат разослан “ ” _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор

Чернявский А.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Рост трещины при силовом нагружении обычно переходит в неустойчивый, приводящий к катастрофическому разрушению, поэтому чаще всего при однократном силовом нагружении определяют только условия начала неустойчивого роста трещины. В случае теплового нагружения обычно применяются подходы, разработанные для силового, и определяются лишь критические условия. В такой постановке проблема тепловых трещин рассматривается в работах Н.А. Махутова, Е.М. Морозова, В.З. Партона, Г.П. Черепанова, и др.— данный подход нашел отражение и в “Нормах расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок”.

Вопрос о росте тепловых трещин после старта мало исследован и по причине того, что случай теплового нагружения считается менее опасным, чем силового. Действительно, условие начала спонтанного развития тепловой трещины может не отвечать катастрофическому разрушению конструкции — величина приращения трещины в таких случаях часто определяется размером области растягивающих напряжений и оказывается, как правило, невелика. Такой случай исследуется в работах Е.А. Задворного, А. Г. Ланина, А.О. Чернявского, R.P. Skelton и др.

С другой стороны, разрушение ряда теплонапряженных конструкций в металлургии и химическом машиностроении (хранилища фосфорной кислоты, сталеразливочных изложниц, чаш шлаковоза) произошло путем образования длинных тепловых трещин. Достижение трещинами больших длин, сравнимых с размерами конструкций, в полях самоуравновешенных тепловых напряжений, может происходить либо путем динамического (неустойчивого) развития при большом запасе упругой энергии в конструкции, либо путем устойчивого роста в зонах переменных напряжений, связанных с подвижными источниками тепла. Несмотря на большое число конструкций, работающих в условиях движущихся тепловых полей в металлургии, химическом машиностроении и энергетике, этот второй механизм развития трещин ранее не рассматривался; опасность его не анализировалась. В связи с этим, **цель работы** заключается в выявлении механизмов квазистатического и усталостного развития длинных тепловых трещин под действием движущихся тепловых полей. Для описания и анализа этих случаев необходимо создать теоретические модели и расчетные методики, пригодные также для инженерных оценок.

В случае движущихся нагрузок, приводящих к существенно непропорциональному нагружению, расчеты кинетики деформирования на этапе до возникновения трещины весьма трудоемки, а задачи теории упругой и неупругой приспособляемости решены лишь для ряда наиболее простых расчетных схем. Поэтому необходимо также разработать нетрудоемкие методы оценки параметров цикла деформирования конструкций при таком нагружении.

Научная новизна работы. В работе исследован новый класс задач – кинетика развития трещин под действием движущихся тепловых полей. Для этого случая выявлены возможные механизмы квазистатического развития одиночных тепловых трещин большой длины и систем длинных трещин. Показана возможность фрагментации материала (выкрашивания) по всей области движения поля напряжений. Показано, что рост трещин может происходить как в направлении движения поля, так и в противоположном направлении. Определены условия, при которых происходит развитие трещин по указанным механизмам. Показано, что для ряда реальных конструкций эти условия достигаются.

Впервые установлены условия устойчивости и неустойчивости направления распространения – отклонения линии трещины, которое может приводить к ее остановке – под действием движущихся тепловых полей.

Выявлен механизм ускорения развития длинных трещин усталости благодаря общему прогрессирующему формоизменению.

Достоверность результатов работы обосновывается сопоставлением результатов расчетов, выполненных по разным методикам и на различающихся теоретических моделях, и сравнением этих результатов с экспериментальными.

Практическая значимость работы. Разработанные в диссертации методы расчета позволяют определять параметры предельного цикла и цикла неупругого деформирования и возможные скорости развития трещин и их наибольшие приращения при циклическом воздействии подвижных температурных полей и на этой основе оценивать прочность и долговечность ряда элементов металлургического, химического и энергетического оборудования.

Апробация работы. Основные результаты доложены и обсуждены на XVIII Российской школе по проблемам проектирования неоднородных конструкций (Миасс, 1999); на 2-й Всероссийской научно-технической конференции “Прочность и разрушение материалов и конструкций” (Орск, 2000); на 4-й Международной конференции “Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения” (Санкт-Петербург, 2001); на Школе-семинаре “Современные проблемы механики и прикладной математики” (Воронеж, 2002); и на научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (Челябинск, 1999–2002).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 6 работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, включающего 191 наименование, и приложений. Она содержит 190 страниц, 116 рисунков, 2 таблицы, из которых 23 страницы, 16 рисунков и 2 таблицы составляют приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ процессов распространения трещин и существующих методов их расчета при тепловых воздействиях показал, что в механике разрушения традиционно основное внимание уделяется проблеме роста трещин под действием механических нагрузок. Этот рост при увеличении нагрузки обычно переходит в неустойчивый, приводящий к катастрофическому разрушению, поэтому чаще всего при однократном силовом нагружении рассматривают только условия начала неустойчивого роста трещины. Соответственно, бóльшая часть работ, посвященных разрушению трещинами, посвящена разработке критериев разрушения – начала роста трещины – и определению параметров этих критериев для различных тел.

Тепловое нагружение имеет свою специфику: тепловые напряжения являются самоуравновешенными, поэтому в теле имеются области растяжения и сжатия. Для высокотемпературного оборудования, характерно, когда тепловые трещины развиваются квазистатически. Поэтому в данной работе развитие динамических трещин не рассматривается. Как показывают типичные примеры разрушений, квазистатическое развитие трещин обычно приводит лишь к локальному разрушению – без разделения тела на части. Такие трещины имеют размер, ограниченный областью высоких тепловых напряжений, которая, как правило, невелика, и при неподвижных источниках тепла перемещается не слишком сильно. В работах В.С. Егорова, А.Г. Ланина показано, что при наличии лишь теплового нагружения трещины, развивающиеся квазистатически, могут приводить к фрагментации тела лишь при увеличении этой нагрузки на порядок относительно нагрузки появления первых трещин.

Развитие трещин под действием остаточных и других неизменных во времени самоуравновешенных напряжений имеет те же закономерности, что и в случае однократного нагрева (здесь подразумевается, что тепловые источники неподвижны).

В случае циклического теплового нагружения размах коэффициента интенсивности напряжений (КИН) по мере развития трещины после достижения максимального значения уменьшается аналогично тому, как КИН при однократном нагружении, поэтому предельный размер усталостной трещины, как и статической, ограничивается областью, где действуют растягивающие номинальные напряжения.

Развитие сеток трещин при циклическом и однократном действии тепловых полей, вызванных неподвижными источниками тепла, исследуется в работах Е.А. Задворного, А.О. Чернявского, F.I. Barratta, R.P. Skelton, E.A. Jagla, и др. Конечная длина трещин сетки не может превысить длины одиночной трещины. Поэтому сетки тепловых трещин так же, как одиночные трещины, не приводят к полному разрушению тела.

Опыт эксплуатации теплонапряженных конструкций дает, однако, ряд примеров, не укладывающихся в эту схему. В качестве примеров можно привести хранилище фосфорной кислоты Волоховского алюминиевого завода, в котором при заливке горячей кислоты трещина длиной около 3 м развилась вдоль образующей цилиндрического корпуса от основания (что значительно больше размера области растяжения по образующей); разрушения сталеразливочных изложниц, где трещины могут достигать большой длины – близкой к длине изложницы. Рассматривая кинетику изменения теплового поля во времени при фиксированном уровне заливаемого расплава (кислоты), т.е. при неподвижных источниках тепла, нельзя объяснить столь значительный рост трещин по высоте изложницы.

Другим примером циклического подрастания длинных трещин под действием температурных напряжений может служить чаша шлаковоза, тепловые напряжения в которой обусловлены ее периодическим заполнением расплавленным шлаком. Темп циклического роста трещины, протекающего на фоне значительных перемещений, накопленных в результате прогрессирующего формоизменения, весьма высок. Значительное раскрытие трещин, вызванное формоизменением, которое наблюдается во многих случаях, указывает на необходимость исследования этого вопроса, однако в известных работах отсутствует объяснение ускорения роста длинных трещин при движущейся тепловой нагрузке.

В работах Е.А. Задворного, А.Г. Ланина, Н.А. Махутова, Е.М. Морозова, В.З. Партона, Г.П. Черепанова, В.М. Финкеля, А.О. Чернявского, R.P. Skelton, F.I Barratta, E.A. Jagla и др. исследуется рост тепловых трещин. Однако возможность движения полей нагрева не принималась во внимание и обусловленные этим особенности развития трещин не были определены. В инженерной практике, в согласии с существующими представлениями заключение о прочности выносится, как правило, на основе сравнения параметра разрушения для заданной трещины с его критическим значением в наиболее опасный момент времени, то есть проверяется возможность старта начальной трещины, а последующее изменение нагрузки не принимается во внимание. Этот подход обычно оправдан в отношении силового нагружения, однако он не позволяет описать кинетику развития длинных трещин при однократном и циклическом тепловом нагружении в описанных выше случаях разрушений.

Для исследования кинетики развития длинных тепловых трещин, необходимо учесть изменение тепловой нагрузки по мере развития трещины после начала ее роста. Это изменение вызывается, в частности, перемещением тепловых источников. Нагружение движущимися тепловыми полями часто встречается в конструкциях металлургического, атомного, химического оборудования. Кроме случая изменения уровня теплонесущей среды, оно может быть обусловлено и рядом других причин: внутренними источниками тепла, вызванными, например, реакцией при затвердевании бетон-

ных конструкций, протекающей с выделением тепла (где известны случаи развития длинных тепловых трещин); нагревом движущимся индуктором в процессе закалки труб, валков прокатных станов и при изготовлении гибов труб; возникновением волн при воздействии на расплав металла магнитных полей. Движущиеся тепловые поля возникают также при сварке.

Другими факторами, которые могут приводить к дилатационным полям напряжений значительной величины, движущимся в теле, являются фазовые превращения в металлах, и водородные напряжения. Однако расчет напряжений, связанных с фазовыми превращениями материала, как и водородных напряжений, требует построения сложных математических моделей, и в данной работе эффекты действия подвижных дилатационных полей будут исследоваться на примере тепловых напряжений.

Существует ряд задач: износ и разрушение при подвижной контактной нагрузке, обработка материалов резанием и т.д., где на тело воздействует движущееся локальное поле напряжений, вызванное не тепловой, а механической нагрузкой. В них наблюдается разрушение, по характеру схожее с разрушением под действием движущихся тепловых полей, когда трещины большой протяженности под действием локальных полей напряжений развиваются именно благодаря фактору движения этих полей. Однако перенос результатов исследований для этого случая (например, Е.М. Морозова) на случай теплового нагружения невозможен.

В настоящее время имеется лишь малое количество исследований, касающихся разрушения под действием подвижных источников тепла. Ряд исследований был инициирован экспериментом А. Yuse и М. Sano, в котором в зависимости от уровня движущейся тепловой нагрузки (перепада температур и градиентов теплового поля) в пластине развивались системы квазистатических трещин различной морфологии. В этих работах сделаны попытки объяснения и количественного описания явления искривления линии трещины в случае движущейся тепловой нагрузки. Однако в них не содержится выводов, касающихся условий работоспособности конструкций.

Вышеизложенные положения определили общую **цель работы**, которая заключается в выявлении особенностей разрушения, приводящего к длинным трещинам, и в разработке соответствующих методов расчета. Для достижения цели следует решить задачи:

- 1) для случая движущегося теплового нагружения выявить:
 - механизмы развития длинных трещин;
 - влияние циклического формоизменения на усталостное развитие;
 - возможность выкрашивания вследствие развития систем длинных трещин;

- 2) выявить особенности разрушения в общем случае – при совместном действии механических и тепловых нагрузок

3) разработать методики расчета и инженерных оценок для определения возможности такого разрушения (по критической нагрузке) и для оценки основных характеристик роста трещины (приращения трещины за цикл, максимального накапливаемого приращения трещины);

4) определить критерии устойчивости направления распространения трещин и их остановки (под неустойчивостью понимается отклонение линии трещины от линии движения теплового пятна, которое могло бы привести либо к остановке трещины внутри тела, либо к фрагментации тела);

Зарождение трещины может происходить при циклическом деформировании либо из-за исчерпания пластических свойств материала благодаря прогрессирующему формоизменению, либо в результате малоциклового усталости. Для движущихся нагрузок, приводящих к существенно непропорциональному нагружению, расчеты кинетики деформирования весьма трудоемки, а задачи теории упругой и неупругой приспособляемости решены лишь для ряда наиболее простых расчетных схем. Поэтому кроме решения проблемы разрушения трещинами для такого нагружения необходимо:

5) разработать методы определения циклического упругопластического состояния, предшествующего зарождению трещины.

Расчетное определение параметров цикла в условиях упругой приспособляемости и стабильного пластического деформирования под действием движущегося теплового поля выполнено для получения оценок долговечности на этапе до возникновения трещины.

Решение задачи упругой приспособляемости получено для бесконечной пластины под действием движущегося осесимметричного теплового поля на основе статической теоремы приспособляемости (Мелана), и разработан алгоритм расчета для пластины конечной ширины под действием постоянной механической нагрузки и движущегося теплового поля произвольной формы (рис. 1).

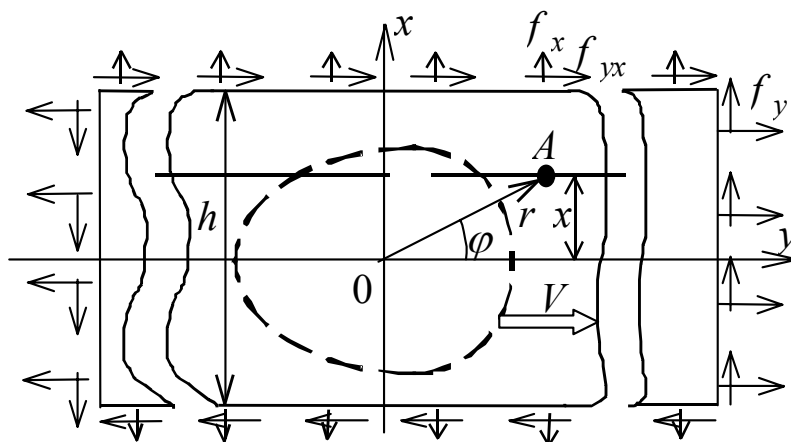


Рис. 1. Пластина под действием постоянной механической и движущейся тепловой нагрузки

Для схемы прямолинейно движущегося поля напряжений в пластине (см. рис. 1), имеет место распределение остаточных напряжений:

$$\rho_x = 0; \rho_{yx} = 0; \int_h \rho_y dx = 0.$$

В фиксированной точке A , принадлежащей произвольной прямой линии, которая проходит на расстоянии x от $0y$ (см. рис. 1), переменные упругие напряжения изменяются по мере перемещения теплового поля. При этом соответствующая точка в векторной девиаторной системе координат (s_1, s_2, s_3) описывает некоторую траекторию – годограф напряжений. Варьируемым параметром поля напряжений, как следует из уравнений равновесия, является лишь остаточное напряжение ρ_y . Изменение ρ_y приводит к сдвигу годографа напряжений вдоль оси 0ρ в пространстве (s_1, s_2, s_3) . В соответствии со статической теоремой ρ_y выбирается таким образом, чтобы тепловая нагрузка ΔT была максимальна (если механическая нагрузка f_{ij} задана). Это приводит к двум критериям:

1) Необходимое условие вписанности годографа в поверхность текучести Мизеса: расстояние от каждой точки j годографа до оси 0ρ – s_{Rj} должно быть меньше радиуса поверхности текучести R_j (который зависит от температуры):

$$s_{Rj} < R_j;$$

2) Второе – необходимое и достаточное условие:

$$\max_j(\rho_j'') - \min_j(\rho_j') < 0,$$

где значения остаточных напряжений ρ_j'' и ρ_j' для каждой точки j годографа напряжений отвечают касанию j -й точкой годографа поверхности текучести (если $\rho_j'' < \rho_j < \rho_j'$, то точка j лежит внутри поверхности текучести) и определяются из уравнения $\sqrt{(s_j + \rho_j \bar{e}_\rho)^2} = R_j$ (\bar{e}_ρ – единичный вектор, определяющий ось 0ρ).

Независимость ρ_y для определенного значения x от остаточных напряжений при других значениях этой координаты позволяет отдельно рассматривать состояние приспособляемости для ряда точек с различными значениями координаты x_i . Минимальное по x значение параметра нагрузки ΔT и является предельной температурной нагрузкой для конструкции.

Разработанные методы позволили провести анализ влияния градиентов теплового поля и величины внешней нагрузки на механизм неупругого деформирования (прогрессирующее формоизменение или знакопеременное течение), реализующийся в предельном состоянии. При этом учитывается температурное изменение предела текучести материала. Анализ показал, что типичным механизмом деформирования в случае движения теплового пятна является обжатие (уменьшение ширины пластины) или вытяжка (увеличение ширины), происходящее на линии движения центра пятна в направлении, перпендикулярном этой линии. Для такого

кинематического механизма получен упрощенный метод построения диаграммы упругой приспособляемости.

Анализ стабильного цикла для задачи с движущимся тепловым пятном, в котором реализуются конечные пластические деформации, не может быть выполнен с использованием упрощений, которые были приняты для предельного цикла, так как в стабильном цикле происходит перераспределение переменной во времени составляющей остаточных напряжений. Для быстрых оценок параметров стабильного цикла деформирования за пределами упругой приспособляемости для данной задачи разработана упрощенная модель, которая позволяет получить качественное представление о процессе неупругого деформирования и оценить размах и приращение пластической деформации в цикле без трудоемкого решения двумерной задачи циклического деформирования для пластины. Применение данной модели позволило экстраполировать диаграмму приспособляемости в область упругопластической работы при небольших превышениях нагрузкой предельной величины.

С использованием разработанных методик решена обратная задача для экспериментально реализованных условий нагружения образцов: из условия, что в цикле отсутствует накопление деформаций, найдена величина постоянной механической нагрузки при экспериментально определенной тепловой нагрузке. Образец (были испытаны три образца) представляет длинную тонкостенную оболочку (рис. 2). Тепловое пятно движется по окружности, при нагреве образца в кольцевом индукторе и охлаждении струями воды, благодаря вращению образца вокруг его оси. Осевая усадка, происходящая в первых циклах нагружения в результате прогрессирующего формоизменения, ограничена распоркой, и в цикле пластического деформирования после периода стабилизации происходит только знакопеременное течение, в результате которого после нескольких сотен циклов нагружения в образцах появились начальные окружные трещины.

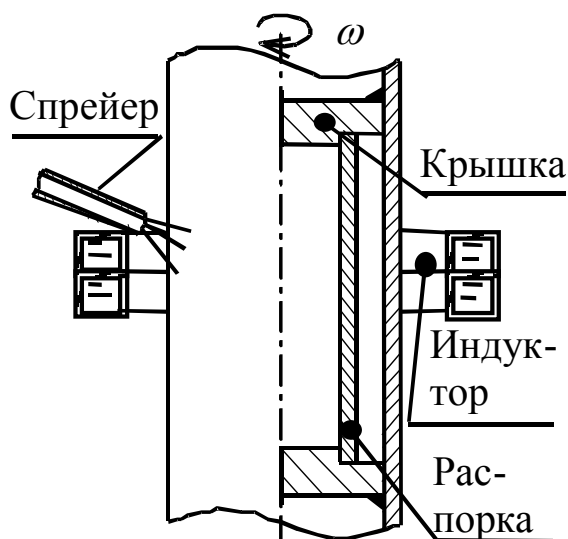


Рис. 2. Схема эксперимента

Впервые определены основные закономерности развития трещин под действием подвижной тепловой нагрузки и разработаны методики расчетных оценок для этапа их роста. Анализ закономерностей выполнен на основе решения для двух модельных задач: первой – о пластине с трещиной под действием движущегося теплового пятна; второй – о цилиндрической оболочке с длинной продольной трещиной под действием движущегося вдоль оси оболочки теплового фронта (в обеих задачах полагалось, что материал – идеально-упругий). Полученные выводы и методики расчетов могут быть распространены на широкий класс расчетных схем пластин и оболочек с трещинами при исследуемом типе нагружения.

Для цилиндрической оболочки при ее заполнении теплонесущей средой (рис. 3,а,б) на основе известного решения тепловой задачи (распределение температур показано на рис. 3,в) получены аналитические выражения для номинальных напряжений (рис. 3,г), которые позволили определить наиболее опасные условия нагружения и получить первую оценку возможности развития трещин. Для уточняющего расчета оболочки с трещиной создана КЭ модель на основе элементов с квадратичными функциями формы, причем окрестность вершины трещины окружена сингулярными элементами. Модель учитывает возможность смыкания берегов трещины. В зависимости от положения вершины полубесконечной трещины относительно тепловой волны определены значения КИН. Показано что влияние изгибного усилия в стенке оболочки по сравнению с нормальным усилием является несущественным для условий развития трещины.

Рассмотренные задачи позволили выявить отличия от случая воздействия неподвижных тепловых источников. Анализ их решений показал,

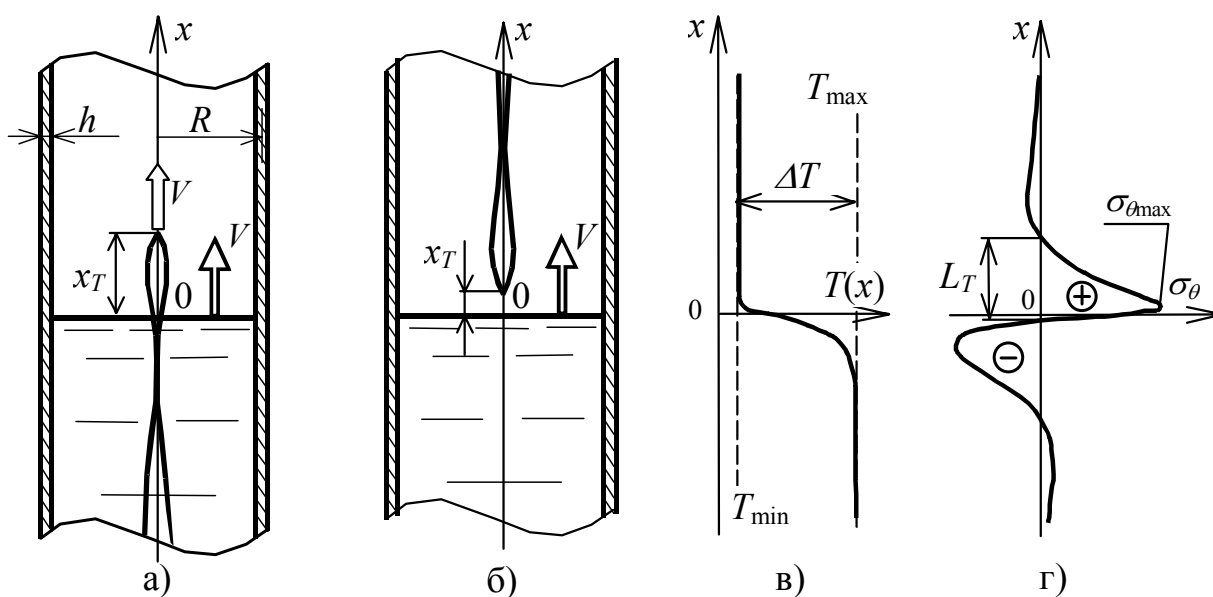


Рис. 3. Схемы роста трещины в направлении движения температурного поля (а) и в противоположном направлении (б); и распределения температур (в) и окружных напряжений (г) вдоль оси оболочки

что приращение квазистатической трещины под действием неподвижного теплового поля – традиционно рассматриваемый в практике расчетов случай – в квазихрупком теле ограничено небольшой величиной, сравнимой с размером теплового пятна в пластине, либо с длиной краевого эффекта в оболочке с продольной трещиной. В случае движущихся тепловых полей длина квазистатически развивающейся трещины может достичь величины области перемещения теплового поля и привести к полному разрушению конструкции. Это может произойти, во-первых, когда вершина трещины растет вместе с перемещающейся областью теплового растяжения (см. рис. 3,а) – *сонаправленный механизм* разрушения, либо в результате скачкообразного подрастания трещины навстречу движущемуся тепловому полю (рис. 3,б) – *противонаправленный механизм*. Величина приращения за один цикл нагружения для противонаправленного роста такая же, как под действием неподвижного теплового поля, но при циклическом нагружении приращения трещины будут накапливаться, что может привести к развитию трещины до размера области перемещения зоны теплового растяжения (как и для сонаправленного механизма). В результате расчетов методами механики разрушения показано, что первую оценку величины приращения трещины за цикл по противонаправленному механизму можно получить как размер полуволны растяжения в оболочке L_T (см. рис. 3,г). Скорость такого циклического квазистатического роста трещины на порядок превышает скорость циклического усталостного роста трещины.

Диаграмма зависимости приращения трещины ΔL от величины перепада температур ΔT показана на рис. 4 для модели цилиндра с трещиной при заполнении его теплоносителем. В этой задаче более нагруженной оказывается вершина длинной трещины противоположно направленная к движению теплового поля. Приращение трещины отсутствует, когда нагруженность этой вершины не достигает порогового уровня при ΔT_{tha} (область I на рис. 4), а при большей нагрузке начинается усталостный рост этой вершины трещины (область II). Усталостный рост второй вершины начинается при величине ΔT , бóльшей ΔT_{thc} . При переходе к противонаправленному росту трещины при ΔT_{ca} величина приращения трещины ΔL возрастает на 2–3 порядка (область III), и увеличивается по мере дальнейшего возрастания ΔT . Трещина будет развиваться на всю длину перемещения теплового поля за один цикл нагружения по сонаправленному механизму, когда перепад превысит ΔT_{cc} . В реальных задачах для каждого механизма должно выполняться условие прочности с соответствующим его опасности запасом.

На основе анализа результатов для пластины с трещиной под действием пятна нагрева получены аналогичные выводы. Показано, что если трещина конечной длины начинает подрастать по одному из описанных механизмов, то увеличение ее длины не может привести к остановке ее роста.

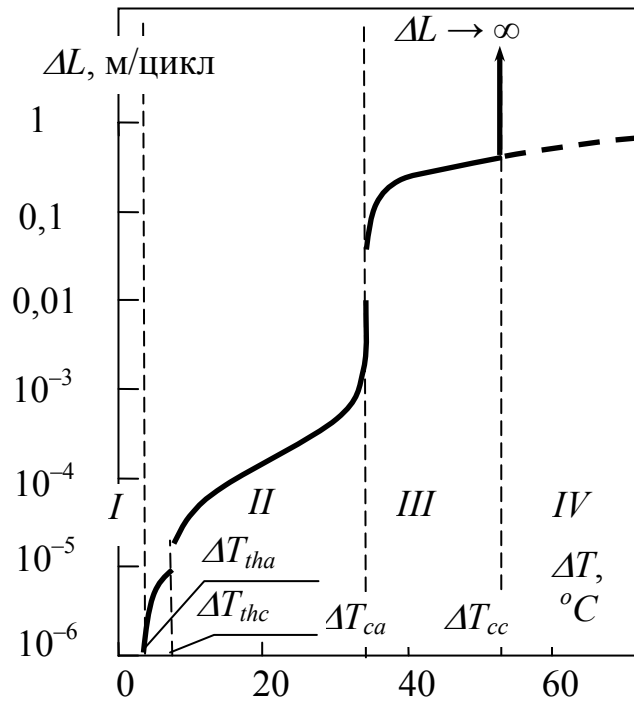


Рис. 4. Скорость роста трещины в зависимости от перепада температур

Один из вариантов решения модели с пластиной основан на модификации метода сечений Морозова Е.М. Выполненная модификация позволяет использовать этот метод и для случая, когда напряженность двух вершин трещины существенно различна. При помощи этой модели можно получать быстрые оценки развития трещин не только в плоских телах, но и в оболочках, и хотя погрешность КИН в некоторых случаях оказывается значительной, вид зависимости КИН от положения трещины и ее длины, как показали КЭ расчеты, оказывается верным.

Методика оценок прочности конструкций при нагружении движущимися тепловыми полями отличается от стандартной методики определения запаса по началу неустойчивого распространения трещины тем, что нужно определять наиболее опасное взаимное положение теплового поля и трещины, то есть для заданного значения длины трещины должен определяться минимальный коэффициент запаса по всем положениям поля. Для определения наиболее опасных трещин рационально проводить нетрудоемкие расчеты, например, по методу сечений, а затем для наиболее опасной конфигурации выполнять уточняющий расчет (например, МКЭ). Этот подход использовался при расчетном решении задач рассматриваемых далее.

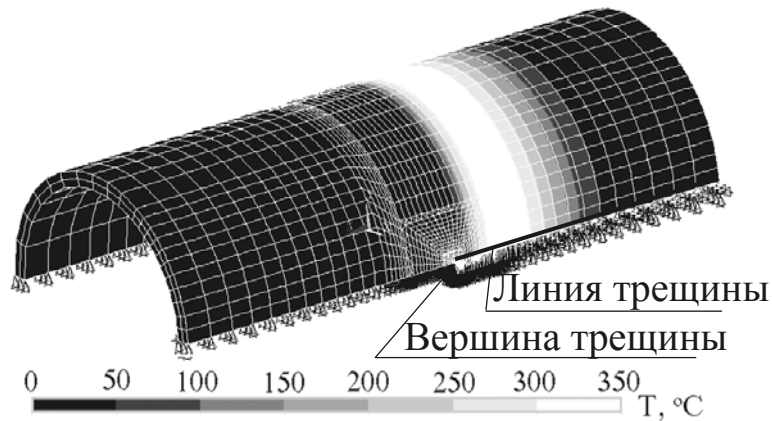
Проведен сравнительный анализ различных методик определения КИН на основе расчетов стальных тонкостенных цилиндрических лабораторных образцов с распределением температур, полученным термометрированием. Коэффициент интенсивности напряжений определялся, во-первых, на основе быстрых оценок по модели пластины с трещиной и, во-вто-

рых, по перемещениям в сингулярной области около вершины трещины, полученным по результатам КЭ расчета. КЭ модель (рис. 5,а), созданная с использованием элементов с линейными функциями формы, учитывает нелинейность диаграммы деформирования материала, температурную зависимость свойств материала и смыкание берегов трещины (рис. 5,б). Третья, наиболее точная оценка K_1^J выполнялась на основе J^{\wedge} - интеграла, учитывающего неоднородность поля температур в окрестности вершины трещины:

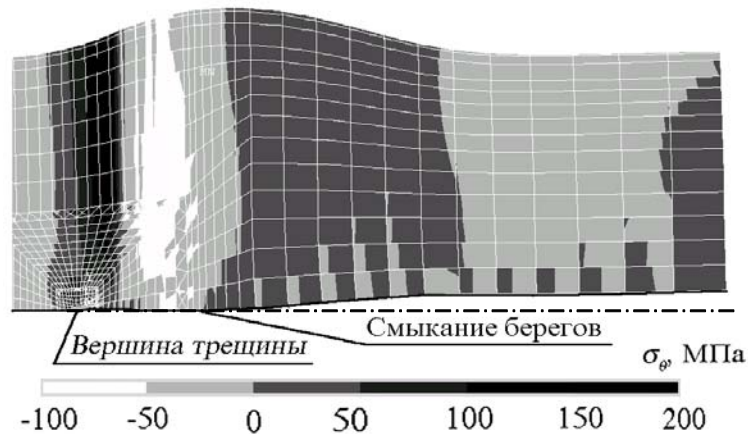
$$J^{\wedge} = \int_{\Gamma} W dX_2 - \int_{\Gamma} \bar{T} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial X_1} d\Gamma + \iint_A \sigma_{ij} \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial X_1} dA,$$

где ось X_1 – направлена по линии трещины в сторону ее роста; а X_2 – перпендикулярно к ней; первое слагаемое отвечает высвобождению энергии W внутри контура Γ ; второе – работе внутренних сил T на контуре Γ ; третье – добавочное слагаемое от тепловой деформации ε_{ij} определяемое интегрированием по поверхности A внутри контура Γ (σ_{ij} – тензор напряжений).

Анализ результатов расчетов КИН позволил определить погрешности двух первых упрощенных подходов и обосновать их пригодность для быстрых оценок.



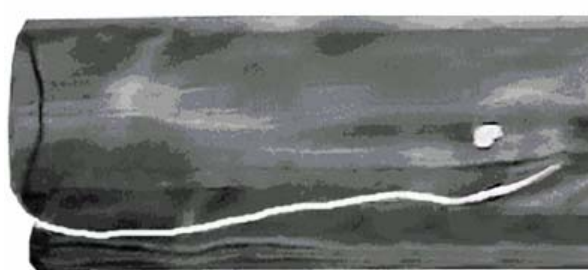
а)



б)

Рис.5. КЭ модель: распределение температур (а) и распределение окружающих напряжений (б) (случай противонаправленного роста трещины)

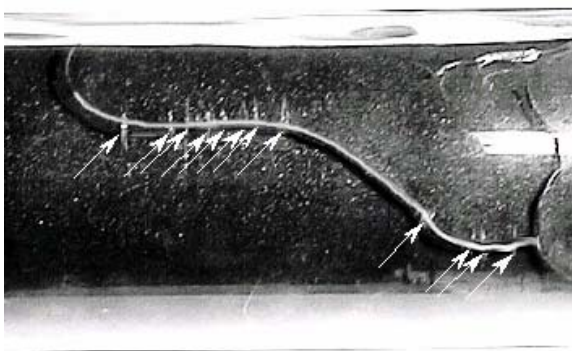
Адекватность разработанных расчетных методик подтверждена экспериментальными исследованиями, проведенными на цилиндрических тонкостенных образцах из силикатного стекла при движении теплового фронта вдоль оси, для сонаправленного (рис. 6,а) и противонаправленного (рис. 6,б) роста продольных трещин (движение теплового фронта на рис. 6 происходит снизу вверх). Расчетные методики дают верные оценки критической нагрузки и величины приращения трещины за цикл нагружения. Кроме того, в отличие от известных работ, в которых рассматривается формирование и развитие сеток трещин под действием лишь неподвижных источников тепла, эксперименты показали возможность формирования структур разрушения с длинными трещинами под действием движущихся источников (рис. 6,в). При определенных условиях теплообмена в образцах возникает вторая система трещин (рис. 6,г), пересечение которой с сеткой продольных трещин приводит к выкрашиванию (фрагментации) материала по всей области перемещения области теплового растяжения.



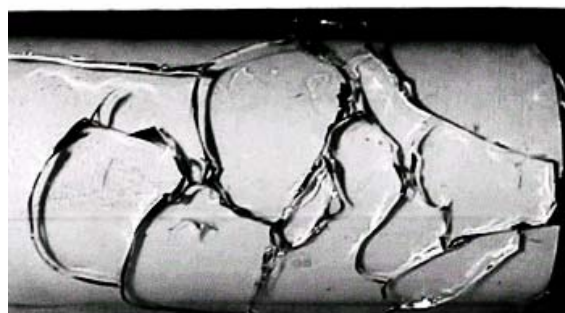
а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Рост одиночной сонаправленной трещины (а), сетка сонаправленных трещин (б), противонаправленная трещина (в), развитие двух систем трещин, приводящее к выкрашиванию (г)

Развитие длинных трещин возможно не только при строго постоянных условиях роста. Если постоянство условий в процессе роста трещины не выполняется, то условие строгой автомодельности сонаправленного

роста трещины нарушается, а приращения трещины в циклах нагружения при противонаправленном росте становятся неодинаковыми, но максимальный размер трещины оказывается ограниченным лишь областью перемещения растягивающих тепловых напряжений так же, как в рассмотренных ранее случаях. Факторами, приводящими к непостоянству условий по мере развития трещины, могут быть невыполнение условия квазистационарности теплового поля, неоднородность геометрии конструкции в направлении растущей трещины и напряжения от механической нагрузки.

Расчетно-экспериментальные исследования для случая смешанного нагружения цилиндрического тонкостенного образца позволили установить указанные закономерности. Образец нагружался движущимся по окружности тепловым полем и осевым механическим усилием от распорки (см. рис. 2) – в эксперименте с развитием трещины использовались образцы, в которых в результате знакопеременного течения при предварительном нагружении, описанном ранее, зародились начальные трещины.

В эксперименте происходил усталостный рост трещины при нагрузках, близких к значениям, отвечающим неустойчивому развитию трещины. Такие условия роста трещины при силовом нагружении реализуются лишь ограниченно, так как на соответствующем этапе этот рост быстро переходит в неустойчивый, тогда как для случая теплового нагружения, когда нагрузка приближается по характеру к кинематической, такой рост трещины достаточно типичен. Проведенные эксперименты и соответствующие расчеты подтвердили, что для материала, обладающего значительной вязкостью разрушения, когда не достигается критическая напряженность трещины, происходит рост усталостной трещины в направлении движения теплового поля и в противоположном направлении (расчеты выполнены на КЭ модели (рис. 7,а) по описанной ранее методике). Хотя скорость этого роста в сравнении с сонаправленным и противонаправленным невелика (см. рис. 4), трещина может достигнуть такого же значительного окончательного размера.

Как показали расчеты, механическая нагрузка, обусловленная действием распорки, установленной внутри образцов, создавала лишь дополнительные (относительно небольшие) напряжения, а рост трещины был обусловлен циклическим нагружением движущимся тепловым полем. В экспериментах в результате разгрузки от механических напряжений при росте трещины до длины, большей половины окружности образца, этот рост прекращался (рис. 7,б), так как нагрузка от распорки была близка по характеру к кинематической. В общем случае развитие трещины может закончиться и окончательным разрушением конструкции в результате долома, если бы механическая составляющая осевых напряжений была вызвана действием постоянного усилия.

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов показало, что разработанные в работе расчетные методы позволяют получать

адекватные оценки для напряженного и деформированного состояния конструкций и верно прогнозировать механизмы и скорость развития трещин.

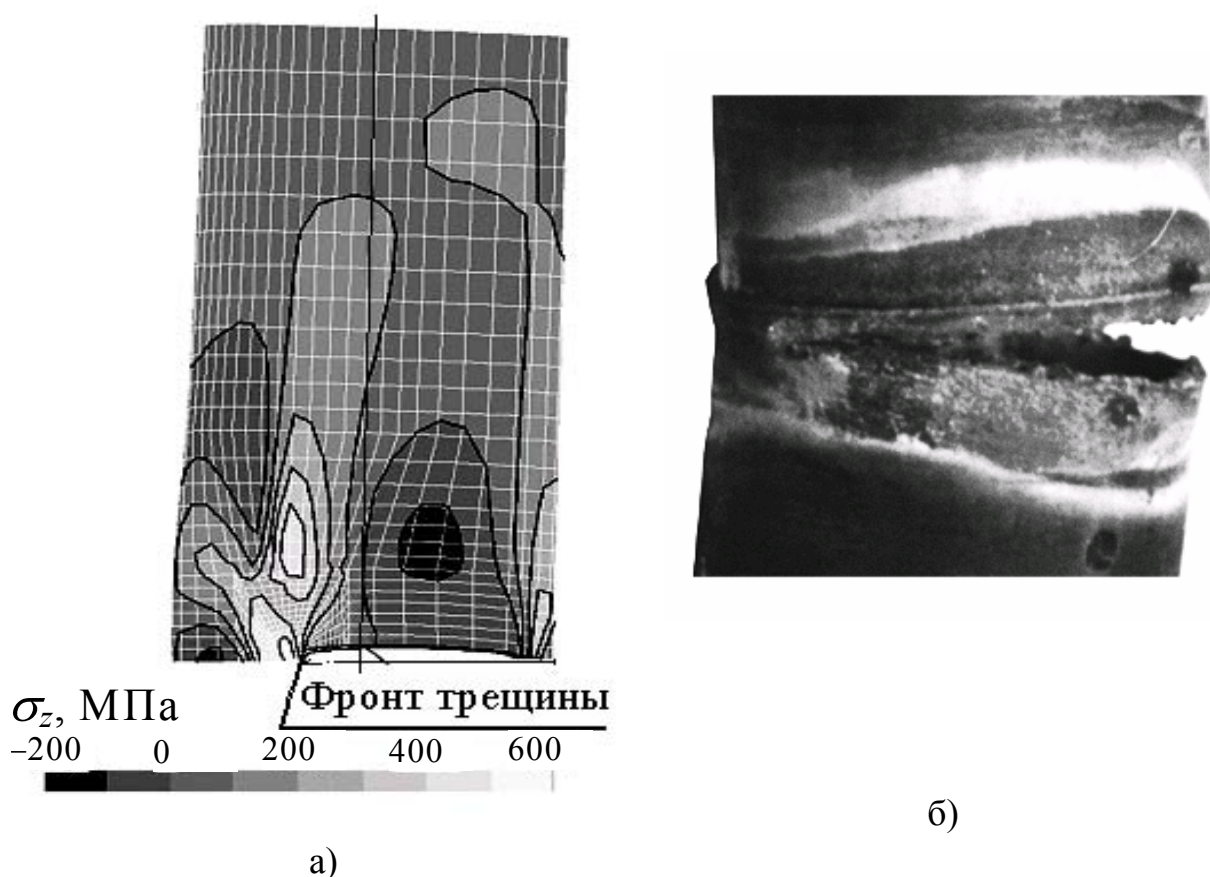


Рис. 7. Окружная трещина в цилиндрическом образце: КЭ расчет (осевые напряжения) для случая сонаправленного роста трещины (а); результат эксперимента (б)

Выявлен механизм ускорения развития длинных трещин усталости благодаря общему прогрессирующему формоизменению на основе экспериментального исследования деформирования стального образца с продольным надрезом, при циклическом нагружении движущимся вдоль образца тепловым полем. Ускорение происходит, благодаря тому, что общее формоизменение приводит к увеличению раскрытия трещины. Это явление позволяет объяснить сравнительно быстрое циклическое развитие длинных тепловых трещин в ряде конструкций (например, в чашах шлаковозов).

При нагружении движущимся тепловым полем впервые определено условие устойчивости направления развития трещины. Эта задача решена на основе качественного анализа уравнений роста трещины нормального отрыва: $d\theta = -2dK_{II}/K_I$; $K_I = K_{Ic}$, где $d\theta$ – приращение угла поворота линии трещины; dK_{II} – приращение КИН, отвечающее плоскому сдвигу; K_I – текущее значение КИН нормального отрыва; K_{Ic} – его критическое значение. В отличие от известных работ, где определяются условия развития извилистой трещины, что не влияет на прочность конструкции, в данной работе

рассматривается возможность отклонения вершины трещины от линии движения теплового поля и ее остановки в результате выхода из области высоких напряжений. Для задач при таком нагружении показано, что если вершина трещины растет в области, где линии наименьшего главного номинального напряжения в плоскости задачи сходятся к линии движения теплового поля, либо параллельны ей, то рост трещины будет устойчивым (непрекращающимся) – первый случай. Если эти линии расходятся от линии движения теплового поля, то трещина по мере развития выйдет из области высоких напряжений и остановится – второй случай. Полученное утверждение в первом случае позволяет обойтись без трудоемкого исследования кинетики развития трещины с учетом возможного искривления ее траектории методами пошагового расчета.

Определены условия развития тепловых трещин под действием квазистационарной движущейся тепловой нагрузки для оболочечных элементов конструкций из относительно вязкой стали. Анализ, выполненный на основе расчетов номинальных напряжений по результатам термометрирования лабораторных образцов при индукционном нагреве, позволил определить наиболее жесткие условия теплового нагружения для трещины при ограниченной из условия отсутствия фазовых превращений в материале наибольшей температуре теплового поля. Расчеты показали, что в малоразмерных лабораторных образцах развитие квазистатических трещин по сонаправленному и противонаправленному механизмам невозможно, и позволили определить минимальные размеры и параметры нагружения конструкции, когда такое развитие трещины может реализоваться. К этому классу конструкций применимы разработанные в диссертации методики.

Показано, что в цилиндрической оболочке из стали с $K_{1c} = 80 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$ радиусом $R = 10 \text{ см}$ и толщиной стенки $h = 20 \text{ мм}$ и более движение теплового фронта с перепадом температур $600 \text{ }^\circ\text{C}$ вдоль оси может вызвать сонаправленное развитие трещины. Движение горячего пятна по окружности оболочки еще более опасно: при том же перепаде температур однократное разрушение может произойти уже в оболочке с размерами менее $R = 5 \text{ см}$, $h = 20 \text{ мм}$.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Практика эксплуатации конструкций металлургического, химического, энергетического оборудования, производство сварки и др. дают ряд примеров образования трещин значительных – по сравнению с размерами элемента конструкции – длин и раскрытий. Описание механизмов развития длинных трещин в самоуравновешенных полях напряжений и оценка опасности возникновения подобного разрушения требуют разработки соответствующих теоретических моделей и методов

расчета. В рамках решения этой проблемы в диссертации получены следующие основные результаты.

1. Выполнен анализ модельных задач со сквозными трещинами: о пластине, нагруженной движущимся тепловым пятном, и о цилиндрической оболочке под действием движущегося вдоль оси осесимметричного фронта температур. Этот анализ позволил впервые выявить возможные механизмы развития тепловых трещин большой длины. Ими являются:

– квазистатический рост трещины вместе с движущимся тепловым полем, когда вершина трещины остается в зоне растяжения, – *сонаправленный механизм*;

– скачкообразный рост трещины навстречу тепловому фронту (пятну) – *противонаправленный рост*. При этом циклические проходы теплового поля по конструкции также способны привести к образованию трещины большой длины, определяемой областью перемещения поля; скорость такого роста трещины существенно зависит от нагрузки и – на порядок – превышает скорость циклического усталостного роста трещины;

– на примере разрушения образца в форме цилиндрической оболочки и соответствующих конечно-элементных расчетов, показано, что если нагрузка недостаточна для реализации описанных механизмов, то может развиваться усталостная трещина в том же направлении, ее длина также ограничена областью перемещения зоны растяжения.

Выявлен механизм, когда общее прогрессирующее формоизменение конструкции существенно увеличивает скорость роста усталостной трещины.

Еще одним возможным механизмом развития длинных трещин является случай динамического разрушения, который в данной работе не рассматривался.

2. Критические нагрузки и величина приращения длины трещины за цикл нагружения при заданной нагрузке для этих механизмов различны и могут быть определены с помощью разработанных в диссертации методик.

3. На основе качественного анализа для начально отклоненной трещины установлены условия устойчивости и неустойчивости направления распространения квазистатической трещины. Рост трещины будет устойчивым (трещина следует за пятном), если ее вершина находится в области, где линии наименьшего номинального главного напряжения в плоскости задачи сходятся к направлению движения пятна, либо параллельны ему. В противном случае рост будет неустойчивым: при наличии случайных отклонений происходит “увод” трещины от

направления движения теплового пятна, в результате трещина может выйти из зоны высоких номинальных напряжений и остановиться.

4. В экспериментах показано, что при воздействии подвижных тепловых полей, так же как и для неподвижных источников возможно развитие как одиночных трещин, так и систем трещин. Если нагрузка оказывается достаточной для возникновения двух и более систем трещин (например, одна вдоль движения поля, другая – поперек), то происходит фрагментация материала (выкрашивание) по всей области движения поля напряжений, а не только в области высоких температурных градиентов в данный момент времени, как в случае неподвижных полей.

5. Экспериментально и теоретически исследован общий случай при смешанном нагружении (механическим и движущимся тепловым полем), когда условие постоянства роста трещины в процессе нагружения не выполняется.

6. Определены условия (тепловые нагрузки и геометрические факторы: размеры конструкций и расположение трещины), при которых происходит развитие трещин по рассмотренным механизмам. Показано, что для ряда реальных конструкций эти условия таковы, что критические условия достигаются.

7. В конструкциях из пластичных материалов зарождение и развитие тепловых трещин может происходить из-за накопления усталостных повреждений при циклическом деформировании. В отличие от традиционно рассматриваемого случая действия неподвижных тепловых источников, когда область повреждений от тепловых напряжений мала по сравнению с размерами конструкции, эта область распространяется по линии перемещения движущегося теплового поля и может приводить к ослабленной зоне большого размера. Разработанные методики расчета (модель для определения параметров предельного цикла в пластине при совместном действии механической нагрузки и движущегося теплового поля и модель для оценки размаха и приращения пластической деформации за цикл) позволяют учесть эти факторы.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах

1. Данилов В.Л., Терешин Д.А., Чернявский О.Ф. Развитие трещин под действием подвижных температурных полей / *Dynamics, strength and wear-resistance of machines*. – 1998. – V.4. – P.68–72.

2. Терешин Д.А. Методика эксперимента моделирования роста трещины под действием подвижной тепловой нагрузки // *Прочность и разрушение материалов и конструкций*. – Орск: Изд-во ОГТИ, – 2000.– С.30–31.

3. Терешин Д.А. Механизмы разрушения цилиндрической оболочки при осесимметричном тепловом нагружении / Dynamics, strength and wear-resistance of machines. – 2001. – V.8 – P.85–72.

4. Терешин Д.А. Особенности кинетики роста трещин под действием подвижной тепловой нагрузки / XVIII Российская школа по проблемам проектирования неоднородных конструкций... Тезисы докладов.– Миасс: 1999. – С.112.

5. Терешин Д.А. Развитие трещин вдоль линии движения теплового поля // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения. Труды 4-й Международной конференции. – СПб.: “Нестор”, – 2001. – С.304-308.

6. Tereshin D.A. Hoop crack growth in cylinder steel specimen under moving temperature field // Berlin, LCF5. – 2003.– 2 p.