

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, доцента Ильина А.В. на диссертационную работу Бадикова Кирилла Андреевича "Оценка и прогнозирование роста усталостной трещины в алюминиевом сплаве и конструкционных сталях при нерегулярном нагружении", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 "Механика деформируемого твердого тела".

Диссертационная работа Бадикова К.А. направлена на решение теоретически сложной, но практически крайне важной задачи прогнозирования циклического ресурса конструкций при существенно нестационарных режимах нагружения – режимов, наиболее типичных для тяжело нагруженных конструкций. Эта задача решается уже не одно десятилетие с применением моделей различного уровня сложности, и в настоящее время существуют уже несколько коммерческих программ для выполнения практических оценок. Однако существуют и обширные «белые пятна» - в первую очередь, к ним относится методология прогнозов для нагрузок, характеризующихся резко выраженной нестационарностью не только по амплитуде, но и по асимметрии цикла. Много внимания в литературе уделяется описанию эффекта торможения трещины при перегрузках, но практически отсутствует анализ ускоряющего действия т.н. «недогрузок» (как этот вариант особого цикла нагрузки называет автор). Противоречивы данные по влиянию коррозионной среды на основные параметры процесса. Все это делает постановку задачи диссертационной работы актуальной и имеющей практическую направленность.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованных источников и приложения, содержащего таблицу сопоставления экспериментальных и расчетных долговечностей, определенных по различным моделям, включая модели, предложенные автором. Во *введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и конкретные задачи исследований, формулировка научной новизны и практической значимости, приведено краткое содержание работы.

В первой главе выполнен обзор существующих представлений об отдельных стадиях процесса усталости, рассмотрены особенности распространения трещины, описываемые кинетической диаграммой усталостного разрушения (КДУР). Рассмотрено влияние на скорость трещины особенностей структуры, водородного охрупчивания. Подробно описаны существующие модели (Пэриса, Уолкера, Формана, Чанга и др.) для оценок долговечности при стационарном цикле и описывающие эффект частичного закрытия трещины в цикле нагрузки, модели Уиллера, Уилленборга, Барсома, описывающие торможение трещины при перегрузках. Подчеркнуто, что эти эффекты могут на порядок и более менять ресурс конструкций.

Описываются возможности коммерческих программ по оценке циклического ресурса: NASGRO, FASTRAN, AFGRO и др., используемых в аэрокосмической отрасли США. По результатам обзора обосновывается актуальность основной задачи: разработка моделей, позволяющих прогнозировать кинетику роста усталостной трещины с возможностью оценки характера нерегулярного нагружения, а также порядка и взаимодействия последовательности нагружения.

В качестве *замечаний по этому разделу* можно отметить следующее: мало внимания в обзоре уделено стадиям развития микро- и «физически коротких» трещин. Значимость этих стадий проявляется при попытке корректно поставить задачу прогнозирования полного ресурса конструкции: подход, основанный лишь на базе классической линейной механики разрушения, ограничен корректностью исходной постановки задачи – необходимо из каких-то соображений определить размер начальной трещины. Спорно утверждение автора о том, что влияние коррозионной среды на «Пэрисовском» и ускоренном участках КДУР несущественно.

Неясно, что понимается автором под «более хрупким» состоянием материала, с чем связывается значение параметра степени в формуле Пэриса.

Во второй главе представлены сводные данные по используемым материалам, образцам и методикам экспериментальных исследований, примененных в работе. В качестве материалов были использованы:

- термоупрочняемый сплав системы легирования Al-Cu-Mg, использующийся в аэрокосмической технике;
- стали марок 09Г2, 40, 40Х и AISI4030 (отечественный аналог последней -34ХН1М).

Использовались стандартные и нестандартные (с уменьшенной до 5 мм толщиной) образцы типа СТ. Регистрация длины трещины осуществлялась методом измерения податливости, для чего применительно к образцу уменьшенной толщины автору пришлось определять калибровочные зависимости. Испытания проводились на

испытательном оборудовании кафедры “Сопротивление материалов” ВолгГТУ, использовалась сервогидравлическая машина BISS Nano 25 kN. Для решения поставленных задач автором было модернизировано стандартное программное обеспечение этой испытательной машины, содержащей библиотеки стандартизованных спектров нагрузки.

Так как корректное определение порогового значения коэффициента интенсивности напряжений ΔK_{th} имеет принципиальное значение, описывается алгоритм его экспериментального нахождения программируемым режимом нагружения с постоянным значением K_{max} и монотонно повышающейся величиной K_{min} .

По разделу имеются следующие замечания:

- На стр. 62 – явная опечатка (температура эксплуатации до 4300°C).
- Таблица 2.1 - неясно, что автор называет «коэффициентом наклона» m для рассматриваемых сталей - пояснений в тексте нет. Сообщаемые значения (если это показатель степени) крайне велики.
- Весьма спорна трактовка автора величины ΔK_{th} как соответствующей «затруднению процессов скольжения и сдвига». Обычно ее связывают с условием, когда зона пластической деформации в вершине трещины не достигает ближайшего структурного барьера для распространения дислокаций.

По мнению оппонента, неудачен термин «недогрузка» - из текста диссертации ясно, что речь идет фактически об увеличении размаха напряжений цикла (ΔK) за счет снижения минимальной нагрузки. Так как величина ΔK является параметром нагрузки, то фактически это тоже «перегрузка» - но не за счет увеличения K_{max} , а за счет увеличения ΔK .

В главе 3 представлены результаты экспериментальных исследований скорости роста усталостной трещины при стационарном, блочном с перегрузками и недогрузками, и квазислучайном режимах нагружения.

Применительно к стационарному по размаху напряжений циклу определено влияние коэффициента асимметрии цикла R для Al- сплава; для исследуемых сталей 40, 40Х исследован только отнулевой цикл. Рассмотрено влияние максимумов цикла и количества перегрузок и недогрузок на долговечность. Сделан вывод о незначительном влиянии количества перегрузок – существенным является лишь максимальное их значение. Исследовалось влияние различных комбинаций по последовательности приложения «перегрузок» и «недогрузок», их количеству, получен значительный фактический материал для дальнейшего анализа.

Доказывается, что на кинетику процесса при различных его вариантах в алюминиевом сплаве оказывает возможное влияние окисление металла в зоне процесса. При этом предполагается, что трещина развивается по хрупкому механизму. Выполнено сопоставление скорости роста трещины по замеру латчика раскрытия трещины и измерению усталостных полос скольжения, показавшее для алюминиевого сплава близость этих оценок. Для низколегированных сталей такого соответствия не наблюдается.

Экспериментально изучено влияние вида квазислучайного нагружения на кинетику роста трещины. Представлены характеристики стандартных спектров – для Al-сплава это Saetrans, MFS и MTW), при варьировании максимальной нагрузки и коэффициента асимметрии цикла. Исследовано влияние интегральной характеристики случайного нагружения – коэффициента его полноты I , на количество циклов до разрушения. Предложена процедура определения эффективного КИН с учетом коэффициента полноты спектра и коэффициента асимметрии цикла нагрузки.

По этому разделу имеются следующие замечания:

1. По мнению оппонента, автор недостаточно четко описывает влияние асимметрии цикла на скорость роста трещины. Естественно, что при повышении R скорость роста трещины выше, если сопоставлять варианты нагрузок при $\Delta K = \text{const}$, и ниже, если рассматривать ее как функцию K_{\max} . Автор все время говорит о снижении скорости трещины с возрастанием R , что соответствует ситуации: $K_{\max} = \text{const}$, $\Delta K = \text{var}$, но при этом использует графики зависимости ее от ΔK , что затрудняет понимание результатов.
2. Нигде не указывается, каким образом определяется ΔK для нестационарных режимов нагрузки, если эти результаты представляются в виде КДУР. Приходится догадываться, что в этом случае эта величина определяется по максимальной нагрузке P_{\max} .
3. Значения показателя степени m , приведенные в таблице 3.2: во-первых, неясно, откуда они взяты, и, во-вторых, они никак не могут рассматриваться в формулах, описывающих кинетику трещины.
4. Не указывается методика, по которой определялось содержание кислорода на поверхности изломов. Тем более, возникает вопрос о погрешности таких измерений – сведения о точности оценок, сообщаемые автором, явно базируются на каких-то не описанных в диссертации исследованиях.
5. Указывается, что прочность стали марки 40Х в два раза выше, чем у стали марки 40. Это противоречит данным главы 2.

По результатам исследования влияния интегральной характеристики случайного нагружения – коэффициента полноты спектра V , на количество циклов до разрушения, хотелось бы отметить следующее. По мнению оппонента, использование этого параметра фактически эквивалентно использованию принципа линейного суммирования повреждений: параметр повреждаемости Π по смыслу связан с вводимым автором параметром V соотношением: $V \sim \Pi^m$. Хотелось бы иметь комментарии автора к такой трактовке его предложений.

В главе 4 рассматриваются возможности интегрального прогнозирования долговечности на стадии роста трещины при нестационарных режимах нагружения. При анализе существующих модельных представлений, реализованных в виде коммерческих программ, получено, что из-за неучета ими эффектов недогрузок и перегрузок расхождения расчета с экспериментом могут достигать почти порядка. За основу подхода автора принят «принцип эквивалентности»: предлагается оценивать продолжительность роста трещины при переменном нагружении N_{VAL} на основе определения числа циклов при росте трещины при регулярном нагружении N_{CAL} с учетом характера переменного нагружения введением коэффициента нерегулярности V при одинаковых силовых параметрах P_{max} и R . Предложена формула для такой оценки (формула (4.1)), содержащая один калибровочный коэффициент A , зависящий от рассматриваемого материала, показатель угла наклона па линейном участке КДУР n и меру нерегулярности блока нагружения V . Экспериментальные результаты подтверждают высокую коррелированность экспериментальных и расчетных данных при реализации такого метода.

Первый вариант такого прогноза распространяется только на Пэрисовский участок КДУР. Для распространения этого подхода на I и III участки КДУР в качестве базовой модели использована формула Формана – Мэтту. Принималось, что при этом значения параметров материала K_{th} и K_{lc} остаются неизменными. Показано, что использование формулы Формана-Мэтту дает более приемлемые результаты. Вместе с тем отмечено, что наибольшие расхождения имеют место в припороговой области, что требует более детального анализа кинетики трещины с уточнением вклада истории нагружения в подрост трещины на каждом ее шаге.

Для дальнейшего уточнения расчетных оценок, предложена процедура пошагового расчета долговечности (называемой автором «продолжительностью роста трещины»), блок-схема и алгоритм программы. Для этого использована модель, учитывающая изменение напряженного состояния в вершине трещины в зависимости от последовательности приложения нагрузок. По мнению автора, должен учитываться тот

факт, что сдвиговой механизм роста трещины определяет лишь зависимость скорости трещины от величины ΔK , а влияние асимметрии и «перегрузок/недогрузок» определяется изменением местных напряжений в вершине трещины. Стимулом для этих рассуждений является отмеченное различие морфологии излома алюминиевого сплава на Пэрисовском участке и в припороговой области – в первом случае наблюдается бороздчатый рельеф, во втором – рельеф, близкий к хрупкому. В этом направлении автор развивает идеи Р.Сундера о связи величины K_{th} с «местным остаточным напряжением» в вершине трещины, а механизм этой связи – с диффузионным насыщением зоны вершины трещины атомарным водородом или кислородом.

Для вычисления этих напряжений ΔK автор предложил оригинальное развитие модели Р.Сундера, названное им «моделью пластичности». Модель учитывает трансформацию диаграмм деформирования материала при циклическом нагружении при заданной последовательности нагрузок. Итогом расчета является определение локальных напряжений в некоторой точке впереди трещины, соответствующей достижению разрушающих напряжений. Предложена последовательность экспериментов для определения вводимых в модель параметров материала.

По данному разделу может быть сделано *следующее замечание*: общепринято считать, что величина ΔK_{th} существенно зависит от асимметрии цикла нагрузки (что неоднократно учитывалось и автором в предшествующих разделах), а эта зависимость, в первую очередь, определяется эффектом закрытия трещины в определенной части цикла. Каким образом этот факт отражается в предложенной процедуре определения ΔK_{th} ? Требуются ли дополнительные эксперименты для его учета?

Несмотря на ряд сделанных замечаний, количество которых во многом связано с оригинальностью проведенных автором исследований, в итоге следует заключить, что **диссертационная работа Бадикова К.А. является законченным научным исследованием**, направленным на решение теоретических проблем механики и физики разрушения, имеющих практически важное значение – прогнозирование ресурса конструкций при нестационарных нагрузках. Результаты работ в виде модельных представлений, полученных экспериментальных данных, алгоритмов и программ расчетной оценки имеют несомненный практический интерес.

Автореферат достаточно хорошо отражает содержание работы. Автору принадлежат публикации, полностью включающие в себя объем выполненных исследований, в количестве, существенно превышающем обычный для кандидатских

диссертаций уровень – 15 статей в журналах по перечню ВАК, 8 в перечне публикаций Scopus, 6 – в перечне Web of Science.

Диссертация изложена ясным языком, содержит минимум ошибок и опечаток.

Работа полностью соответствует специальности «Механика деформируемого твердого тела», удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, специальность
05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии»,
доцент, заместитель генерального директора
НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей»
имени акад. И.В. Горынина,
191015, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, 49
телефон (812) 274-18-22, email: npk3@crism.ru

Оппонент не возражает против обработки его персональных данных.

Ильин А.В.

Подпись Ильина А.В. удостоверяю:

Ученый секретарь Научно-технического совета
НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей»
имени акад. И.В. Горынина,
кандидат технических наук



Фармаковский Б.В.

11.06.2020