

Ренев Сергей Андреевич

Разработка методов, алгоритмов и промышленного программного обеспечения  
для анализа объектов машиностроения на трещиностойкость

Специальность 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования  
(в технических системах) (технические науки)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: Шелофаст Владимир Васильевич  
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Толоч Алексей Вячеславович  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт проблем  
управления им. В.А. Трапезникова  
Российской академии наук  
главный научный сотрудник

Сакало Алексей Владимирович  
кандидат технических наук  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Брянский государственный  
технический университет», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное  
учреждение науки Институт  
конструкторско-технологической  
информатики Российской академии наук

Защита состоится 23 декабря 2021 г. в 14:00 час. на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.216.02 при МАИ и МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, зал Ученого совета ГУК.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах отправлять по адресу 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 999.216.02 Алфимцеву А.Н.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
д.т.н., доцент

А.Н. Алфимцев

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Несмотря на развитие средств и методов повышения прочности, надежности и предотвращения разрушения деталей машин и узлов, а также средств контроля и стандартов, полностью решить проблему разрушения до сих пор не удалось, она остается актуальной и на сегодняшний день. Разрушение деталей и узлов машин, чревато материальными и, что наиболее важно, людскими потерями. Так, например, в США общие затраты, связанные с разрушением составляют около 4% валового национального продукта. Согласно статистике отказов машиностроительных конструкции, 66% отказов приходится на усталостное разрушение, среди них многоцикловая усталость занимает 58%, а оставшиеся 8% приходятся на малоцикловую усталость. Разрушения по причине статического нагружения занимают 13%. Остальная доля приходится на коррозию, ползучесть и иные виды воздействия.

Часто, время до разрушения от усталостных и статических нагрузок превышает срок эксплуатации самого изделия или время до его планового ремонта или замены. В этом случае, с целью экономии материальных и временных ресурсов, целесообразно вначале методами неразрушающего контроля получить размеры трещины, а затем провести анализ на трещиностойкость, по результатам которого принять решение о работоспособности изделия.

Анализ на трещиностойкость можно провести с использованием аналитических, экспериментальных и численных методов. Наибольшую популярность приобрели численные методы. Также продолжают развиваться и экспериментальные методы, например, метод с применением высокоскоростных оптических камер. Недостатком аналитических методов является их ограниченное практическое применение. Экспериментальные методы требуют дорогостоящего оборудования и высоко квалифицированных специалистов. Поэтому, численные методы получили широкое распространение.

Актуальность работы обусловлена следующими факторами:

1) несовершенство существующих методов и алгоритмов анализа на трещиностойкость деталей машин и узлов;

2) отсутствие программных инструментов для анализа изделий на усталостную и статическую трещиностойкость в отечественных САЕ-системах, что приводит к

- высоким издержкам производства, связанным с проведением натурных испытаний на этапе проектирования;

- высоким экономическим и временным затратам при замене/ремонте детали с трещиной на этапе эксплуатации;

3) зависимость отечественных промышленных предприятий, организаций, научных центров от аналогичных зарубежных САЕ-систем.

Использование зарубежных САЕ-систем имеет ряд недостатков: по организационным вопросам - высокая стоимость, трудности технической поддержки и обслуживания, высокие затраты на обучение и подготовку специалистов; по функциональным возможностям - отсутствует поддержка ЕСКД на территории РФ.

**Объектом исследования** являются методы и алгоритмы анализа объектов машиностроения на трещиностойкость, процессы встраивания и развития трещин с использованием численных методов, используемые в САЕ-системах.

**Предметом исследования** являются оценка точности существующих и разработанных методов для анализа объектов машиностроения на трещиностойкость, эффективность численных методов в операциях встраивания трещин в разработанном промышленном программном модуле.

**Цель исследования** - разработка методов, алгоритмов и средств САПР в виде промышленного программного обеспечения для анализа на трещиностойкость объектов машиностроения.

#### **Задачи исследования**

1. Анализ существующих методов, алгоритмов и промышленного программного обеспечения для решения задач трещиностойкости.
2. Разработка методов и алгоритмов для решения задач трещиностойкости.
3. Разработка средств САПР в виде программного модуля APM Fracture, реализующего разработанные методы и алгоритмы для отечественной САЕ-системы APM Structure3D.
4. Проведение верификационных исследований разработанного программного модуля APM Fracture.

**Методы исследования** в работе основаны на использовании методов математического анализа, аналитической геометрии, механики разрушения твердых тел, методов оптимизации, конечно-элементного анализа.

#### **Область исследований по специальности 05.13.12**

Разработка научных основ построения средств САПР, разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектных решений, включая конструкторские и технологические решения в САПР и АСТПП.

#### **Научная новизна**

1. Предложен метод анализа проектных решений с помощью аналитического вычисления критического значения коэффициента интенсивности напряжений (параметра механики разрушения) материала, отличительной особенностью которого является использование условного или физического пределов текучести материала.
2. Предложен метод конечно-элементного анализа проектных решений путем отыскания числа циклов до разрушения по Парису при повторно-переменном характере нагружения детали, отличительной особенностью которого является отсутствие привязки к геометрии детали и схеме нагружения.
3. Предложен метод конечно-элементного анализа проектных решений на основе вычисления интенсивности выделения энергии для прогнозирования роста трещины в деталях на основе критерия Гриффитса и теории энергии формоизменения, отличительной особенностью которого является независимость от строения конечных элементов вдоль фронта трещины.
4. Предложен метод конечно-элементного анализа проектных решений на основе определения нелинейного инвариантного J-интеграла для прогнозирования роста трещины в деталях, отличительной особенностью

которого является возможность решения задач, напряжения в которых превышают предел прочности.

5. Предложен алгоритм статического, усталостного и нелинейного анализа объектов машиностроения на трещиностойкость.

6. Предложен алгоритм встраивания полуэллипсоидной (Semi-ellipsoid) трещины в конечно-элементную модель объекта любой конфигурации.

7. Предложен алгоритм анализа объектов машиностроения на трещиностойкость с использованием функций «Рождение и Смерть» конечных элементов.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Анализ проектных решений с помощью метода получения критического значения коэффициента интенсивности напряжений (параметра механики разрушения) материала аналитическим путем.

2. Конечно-элементный анализ проектных решений с применением метода отыскания числа циклов до разрушения по Парису без привязки к геометрии и схеме нагружения детали.

3. Конечно-элементный анализ проектных решений с помощью метода вычисления интенсивности выделения энергий для прогнозирования роста трещины в деталях.

4. Конечно-элементный анализ проектных решений с использованием метода вычисления нелинейного инвариантного J-интеграла для прогнозирования роста трещины в деталях.

5. Алгоритм статического, усталостного и нелинейного анализа объектов машиностроения на трещиностойкость.

6. Алгоритм встраивания полуэллипсоидной (Semi-ellipsoid) трещины в конечно-элементную модель объекта любой конфигурации.

7. Алгоритм анализа объектов машиностроения на трещиностойкость с использованием функций «Рождение и Смерть» конечных элементов.

#### **Практическая значимость**

1. Использование программного модуля APM Fracture в промышленных предприятиях, организациях позволит дать оценку безопасности дальнейшей эксплуатации объектов машиностроения;

2. Использование программного модуля APM Fracture в научных центрах позволит проводить научные эксперименты, не прибегая к использованию дорогостоящего оборудования;

3. Использование программного модуля APM Fracture в отечественной CAE-системе APM Structure3D аннулирует зависимость от зарубежных CAE-систем с аналогичными возможностями.

**Достоверность результатов** подтверждается серией проведенных верификационных исследований (аналитических, натурных и численных).

**Апробация работы.** Результаты работы были доложены, обсуждены и получили одобрение специалистов на следующих научных конференциях:

1. XXVI Международная конференция «Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций – МКМ 2015», 28-30.09.2015, г. Санкт – Петербург;

2. 2-я Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг», 19-20.05.2016, г. Челябинск;

3. XVI Международная молодёжная конференция «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2016)», 17-19.10.2016, г. Москва;

4. II Ежегодная Всероссийская научно-практическая конференция «Исследования и разработки - 2015»;

5. III Ежегодная Всероссийская научно-практическая конференция «Исследования и разработки - 2016»;

6. XXVII Международная конференция «Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций – МКМ 2017», 25-27.09.2017, г. Санкт – Петербург.

**Внедрение.** Основные результаты диссертационной работы использовались:

1) в научно-исследовательской работе «Разработка программно-технических решений в области промышленного программного обеспечения для моделирования поведения элементов конструкций из современных материалов в экстремальных условиях при механических и немеханических воздействиях» в рамках гранта по заказу министерства образования РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.574.21.0117 от 24.11.2014 г. в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы»). В результате научно-исследовательской работы был разработан экспериментальный образец программного обеспечения (ЭО ПО) и получены два свидетельства (с именем соискателя в списке авторов);

2) в компании НТЦ «АПМ» в виде промышленного программного модуля АРМ Fracture для анализа объектов машиностроения на трещиностойкость. Компания НТЦ «АПМ» является российским разработчиком в области CAE-систем.

**Публикации.** Основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, опубликованы в 8 печатных работах; из них 3 работы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 работы – в сборниках, индексируемых в Scopus. Получено 2 Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав с выводами, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст содержит 236 страниц, 114 рисунков, 37 таблиц. Список литературы содержит 6 страницы и включает 57 наименований.

## **Основное содержание работы**

**Введение** содержит обоснование актуальности и научную новизну выбранной темы и ее практическую значимость. Кроме того, введение содержит

формулировку научной проблемы, цель работы и перечень задач, которые необходимо выполнить. Представлены выносимые на защиту научные положения и опубликованные работы по тематике диссертации. Приведен список научных конференции, где были представлены результаты работы.

**В первой главе** дана оценка ущерба экономике страны от разрушения машиностроительных объектов и конструкции в денежном эквиваленте. Приведена статистика разрушений от характера приложенной нагрузки. Представлены существующие аналитические, экспериментальные и численные методы решения проблем анализа на трещиностойкость. Выполнен обзор средств неразрушающего контроля для определения размеров трещин.

**Вторая глава** посвящена разработке методов анализа проектных решений на трещиностойкость.

*Первый метод* предназначен для получения критического значения коэффициента интенсивности напряжений и позволяет не прибегать к дорогостоящим экспериментам для получения этой величины, а вычислить ее аналитическим путем с использованием формулы Мураками.

1) За основу метода взята формула Мураками для вычисления КИН трехмерной трещины I типа

$$K_I \cong 0.65\sigma_0\sqrt{\pi\sqrt{area}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – внешнее растягивающее напряжение (МПа);  $area$  – поверхность трещины в плоскости  $x - y$  (мм<sup>2</sup>).

2) Заменяем в (1) номинальное напряжение  $\sigma_0$  на физический  $\sigma_{yield}$  (для квазихрупких материалов) или условный  $\sigma_{0.2}$  (для хрупких материалов) предел текучести.

3) Площадь трещины  $area$  в испытательном образце определяем по ГОСТ 25.506-85.

С целью подтверждения работоспособности метода в диссертационной работе проведены верификационные исследования, которые показали, что для получения достоверных результатов нужно придерживаться следующих ограничений:

- материал должен быть хрупким или квазихрупким;
- предел текучести материала должен находиться в интервале от 232 МПа до 916 МПа (ошибка составляет 8,1%).

*Второй метод* позволяет с использованием конечно-элементной модели детали получить число циклов до разрушения по Парису без привязки к геометрии и схеме нагружения детали.

1) В основу метода положена формула Париса для вычисления числа циклов до разрушения

$$N = \frac{1}{C_0(Y \cdot \Delta\sigma\sqrt{\pi})^n} \left( \frac{1}{\frac{n}{2} - 1} \right) \left( \frac{1}{L_0^{\frac{n}{2}-1}} - \frac{1}{L_c^{\frac{n}{2}-1}} \right), \quad (2)$$

где  $C_0$ ,  $n$  – постоянные Париса;  $Y$  - «К - тарифовочный» коэффициент, зависящий от отношений длины трещины к размерам тела;  $\Delta\sigma$  — размах напряжений, МПа;

$L_0$  - начальная длина трещины, мм;  $L_C$  - конечная длина трещины, мм;  $\Delta\sigma$  - размах напряжений, МПа.

2) Заменяем в (2) коэффициент  $Y$  на величину

$$Y = \frac{\Delta K}{\Delta\sigma\sqrt{\pi\cdot L_0}}, \quad (3)$$

где  $\Delta K$  — размах коэффициента интенсивности напряжений (КИН), МПа  $\sqrt{\text{мм}}$ .

3) Вычисляем размах КИН  $\Delta K$  по формуле

$$\Delta K = K_{I\max} - K_{I\min}, \quad (4)$$

где  $K_{I\max}$  и  $K_{I\min}$  — максимальный и минимальный КИН для трещины 1-го типа, МПа  $\sqrt{\text{мм}}$ .

4) Вычисляем  $K_{I\max}$  и  $K_{I\min}$  по формулам

$$\begin{aligned} K_{I\max} &= K_I \lambda_{\max}, \\ K_{I\min} &= K_I \lambda_{\min}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{\max}$  — коэффициенты минимума и максимума, соответственно.

5) В результате получаем выражение, позволяющее определить число циклов до разрушения по Парису без использования ограничивающего коэффициента  $Y$

$$N = \frac{1}{c_0 \left(\frac{\Delta K}{L_0}\right)^n} \left(\frac{1}{\frac{n}{2}-1}\right) \left(\frac{1}{L_0^{\frac{n}{2}-1}} - \frac{1}{L_C^{\frac{n}{2}-1}}\right). \quad (6)$$

*Третий метод* предназначен для конечно-элементного анализа объектов машиностроения на трещиностойкость с использованием интенсивности выделения энергии у вершины трещины. Данный параметр позволяют получить и другие методы, но их недостатком являются жесткие требования к качеству и структуре конечных элементов вдоль фронта трещины, которые не всегда удается соблюсти.

1) Используем формулу для вычисления энергии формоизменения

$$U_f = \frac{1+v}{6E} ((S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2), \quad (7)$$

где  $v$  - коэффициент Пуассона;  $E$  - модуль упругости Юнга, МПа;  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  - главные напряжения, МПа.

2) Используем критерии Гриффиста для вычисления энергии на разрушение

$$\Delta W_e = 2\pi \cdot \frac{a^2 \sigma^2 (1-v^2)}{2E}, \quad (8)$$

где  $2\pi$  - учет неопределенности формы и размеров затемненной зоны ( $a^2$ ) и неравномерности деформации в ней;  $\sigma^2$  - номинальное напряжение, МПа; величина  $(1 - v^2)$  характеризует плоско-деформированное состояние.

3) Подставляем формулу (7) вместо дробной части критерия (8) и получаем формулу для вычисления энергии деформации на единицу площади

$$U_{Csolve} = \frac{2\pi \left(\frac{1+v}{6E} ((S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2) V_{FE}\right)}{area_{FE}}, \quad (9)$$

где  $V_{FE}$  - объем КЭ,  $\text{м}^3$ ;  $area_{FE}$  - площадь геометрической фигуры (трещины), полученной пересечением ребер КЭ с плоскостью  $\alpha$ ,  $\text{м}^2$ .

Взаимосвязь параметров формулы (9), на примере конечного элемента первого порядка в форме тетраэдра показана на Рисунке 1.



Формула (4) позволяет дать оценку трещиностойкости объектов машиностроения, путем сравнения полученного значения с критическим.

Четвертый метод позволяет на основе конечно-элементной модели исследуемой детали получить значения нелинейного инвариантного J-интеграла при напряжениях вдоль фронта трещины, превышающих предел прочности, заданный диаграммой деформирования материала.

Существующие методы не позволяют получить значения

J-интеграла при напряжениях, превышающих предел прочности, тем самым ограничивается практическая значимость этих методов, поскольку в большинстве случаев при решении задач с физической или общей нелинейностью с применением метода конечных элементов, напряжения в окрестности вершины трещины будут превышать предел прочности материала.

1) Используем формулу для вычисления нелинейного инвариантного J-интеграла

$$J = \int_C \left( W dy - \left( p_x \frac{dU_x}{dx} + p_y \frac{dU_y}{dx} + p_z \frac{dU_z}{dx} \right) \right) ds, \quad (10)$$

где  $W$  - плотность энергий упругих и пластических деформации;  $dy$  - проекция  $ds$  на ось  $Y$  локальной системы координат трещины;  $p_x, p_y, p_z$  - векторы распределенных усилий, действующих на внешнюю область, ограниченную контуром  $C$ ;  $U_x, U_y, U_z$  - векторы перемещении на контуре  $C$ ;  $ds$  - часть контура интегрирования.

2) Конечным элементам вдоль фронта трещины, напряжения в которых превышают предел прочности, ставим в соответствие модель материала с линейной диаграммой деформирования.

Использование данного метода позволяет расширить практическое применение средств САПР при решении задач на трещиностойкость.

**Третья глава** посвящена разработке алгоритмов, реализующих предложенные методы.

Первый алгоритм определяет последовательность действий при статическом, усталостном и нелинейном анализе объектов машиностроения на трещиностойкость.

По результатам статического расчета алгоритм позволяет получить следующие параметры механики разрушения вдоль фронта трещины: коэффициент интенсивности напряжений для трех типов трещин ( $KI, KII, KIII$ ); интенсивность выделения энергии ( $GI, GII, GIII$ ); объемный инвариантный J-интеграл.

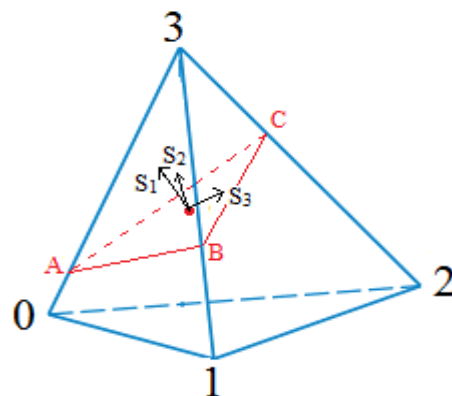


Рисунок 1. Конечный элемент 1-го порядка в форме тетраэдра. Треугольник ABC образует площадь трещины  $area_{FE}$

Описание алгоритма статического расчета:

1) Начало; 2) Ввод значений; 3) Провести статический расчет; 4) Если Получить J-интеграл - Да, то в каждом узле фронта трещины вычисляем значение J-интеграла; 5) Иначе если Получить  $G_I$ ,  $G_{II}$ ,  $G_{III}$  - Да, то в каждом узле фронта трещины вычисляем  $G_I$ ,  $G_{II}$ ,  $G_{III}$ ; 6) Иначе если Получить  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$  - Да, то в каждом узле фронта трещины вычисляем  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$ ; 7) Иначе Конец.

В случае усталостного расчета алгоритм позволяет получить: число циклов до разрушения по Парису (если характер изменения нагрузки гармонический); коэффициент запаса по усталостной трещиностойкости (если характер изменения нагрузки случайный).

Описание алгоритма усталостного расчета (характер изменения нагрузки гармонический):

1) Начало; 2) Ввод значений; 3) Провести статический расчет; 4) Вычислить  $K_{I_{max}}$  и  $K_{I_{min}}$  в каждом узле фронта трещины; 5) Вычислить пороговое значение КИН  $K_{th}$ ; 6) Если  $\Delta K > K_{th}$  - Да, то число циклов  $N = 10^8$ ; 7) Иначе число циклов  $N$  вычисляем по формуле; 8) Конец.

Описание алгоритма усталостного расчета (характер изменения нагрузки случайный):

1) Начало; 2) Ввод значений; 3) Провести статический расчет; 4) Вычислить  $K_{I_{max}}$  и  $K_{I_{min}}$  в каждом узле фронта трещины; 5) Вычислить пороговое значение КИН  $K_{th}$ ; 6) Если  $\Delta K > K_{th}$  - Да, то число циклов  $N = 10^8$ ; 7) Иначе число циклов  $N$  вычислить по формуле; 8) Если число циклов  $N > 0$  - Да, то фактор повреждаемости  $DF = DF + 0.5/N$ ; 9) Иначе фактор повреждаемости  $DF = DF + 1$ ; 10) Вычислить коэффициент запаса прочности  $FSF$ ; 11) Конец.

Если анализ на трещиностойкость проводится по результатам нелинейного расчета (физическая, геометрическая или общая нелинейность), то вдоль фронта трещины вычисляются значения нелинейного инвариантного J-интеграла (коэффициент интенсивности напряжений и интенсивность выделения энергии в нелинейной механике разрушения использовать нельзя). Вычисление нелинейного инвариантного J-интеграла является ключевым моментом в анализе объектов машиностроения на трещиностойкость, поскольку большинство деталей (около 90%) изготавливаются из пластичных материалов. Вычисление нелинейного инвариантного J-интеграла выполняется по алгоритму статического расчета.

*Второй алгоритм* описывает последовательность действий при встраивании полуэллипсоидной (Semi-ellipsoid) трещины в конечно элементную модель объекта любой конфигурации. Встраивание трещины в объект любой конфигурации является существенным преимуществом передан алогичными зарубежными CAE-системами, например, ANSYS'ом.

Описание алгоритма встраивания трещины:

1) Начало; 2) Ввод значений; 3) Если две точки пересечения фронта трещины с КЭ-моделью найдены - Да, то сформировать геометрическую модель полуэллипсоидной трещины; 4) Иначе Конец; 5) Если проекции точек полуэллипса на КЭ-модель получены - Да, то создать пластинчатые КЭ на нижней и верхней частях полуэллипсоида; 6) Иначе Конец; 7) Создать объемные КЭ

вдоль фронта трещины; 8) Сгенерировать объемные КЭ между основной КЭ-моделью и КЭ-моделью трещины; 9) Конец.

Пример конечно элементной модели полуэллипсоидной (Semi-ellipsoid) трещины показан на Рисунке 2.

*Третий алгоритм* определяет последовательность действий при анализе на трещиностойкость объектов машиностроения с использованием функций «Рождение и Смерть» конечных элементов.

Описание алгоритма:

1) Начало; 2) Ввод значений; 3) Если номер текущей итерации  $i == 0$  - Да, то использовать текущее значение перемещения  $U_{isum}$ ; 4) Иначе использовать предыдущее значение перемещения  $U_{i-1 sum} = U_{isum}$ ; 5) Получить значения по трем теориям прочности; 6) Вычислить удельную работу разрушения  $U_{Csolve}$ ; 7) Вычислить интенсивность выделения энергии  $G_C$ ; 8) Если условия прочности и трещиностойкости выполняется - Да, то перейти к следующей итерации  $i = i + 1$ ; 8) Иначе Конец.

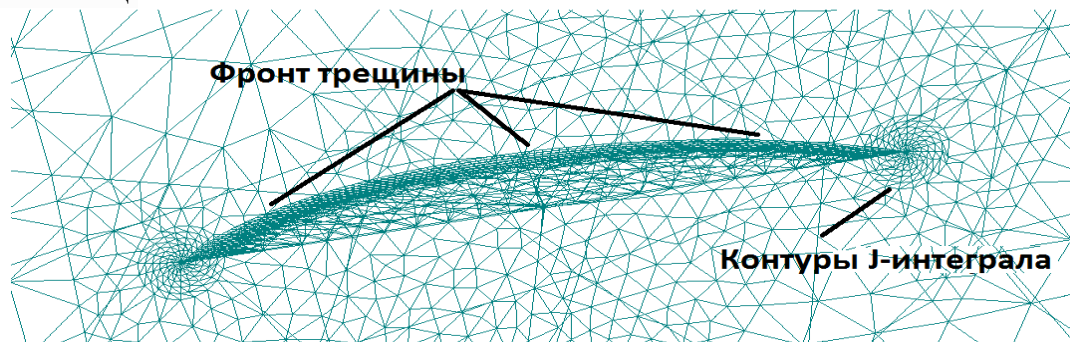


Рисунок 2. Пример конечно элементной модели полуэллипсоидной (Semi-ellipsoid) трещины

Алгоритм основан на использовании следующих теорий прочности: теория Мора; теория наибольших касательных напряжений; теория потенциальной энергии формоизменения.

Указанные алгоритмы используются для анализа объектов машиностроения на этапе эксплуатации и позволяют инженеру-расчетчику получить ответы на следующие вопросы: 1) какие размеры трещины являются критическими для данной нагрузки; 2) какая нагрузка является критической для текущих размеров трещины; 3) возможна ли дальнейшая эксплуатация конструкции с трещиной.

**Четвертая глава** посвящена разработке промышленного программного модуля APM Fracture, реализующего разработанные методы и алгоритмы.

По результатам анализа отечественных САЕ-систем по таким критериям как функциональность, интегрируемость и надежность, выбор был сделан в пользу САЕ-системы APM Structure3D компании НТЦ «АПИ».

Программный модуль APM Fracture является частью системы APM Structure3D, которая в свою очередь входит в пакет программ конечно-элементного анализа APM FEM. Модульная структура программной линейки продуктов APM показана на Рисунке 3. Программный модуль APM Fracture написан на объектно-ориентированном языке C++ с применением стандарта

OpenMP и содержит около 15 000 строк кода (с учетом всех \*.cpp и заголовочных \*.h файлов).

Рекомендуется использовать ЭВМ и устройства со следующими характеристиками:

1) Система с общей памятью и параметрами: а) количество одновременно выполняющих расчет ядер от 16; б) оперативная память от 64 Гб; в) архитектура центрального процессора Westmere или новее.

2) Персональная рабочая станция с параметрами: а) оперативная память объемом от 16 Гб; б) память на жестком диске объемом не менее 100 Гб; в) архитектура центрального процессора Westmere или новее.

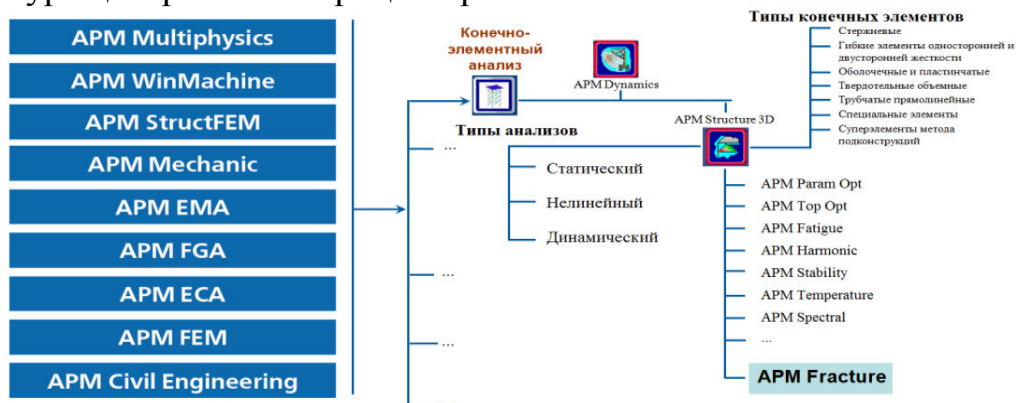


Рисунок 3. Структура программной линейки продуктов APM и место программного модуля APM Fracture в ней

Интерфейс диалогового окна «Встроить трещину в модель» для задания параметров полуэллипсоидной (Semi-ellipsoid) трещины, выбора типа анализа и результатов расчета показан на Рисунке 4.

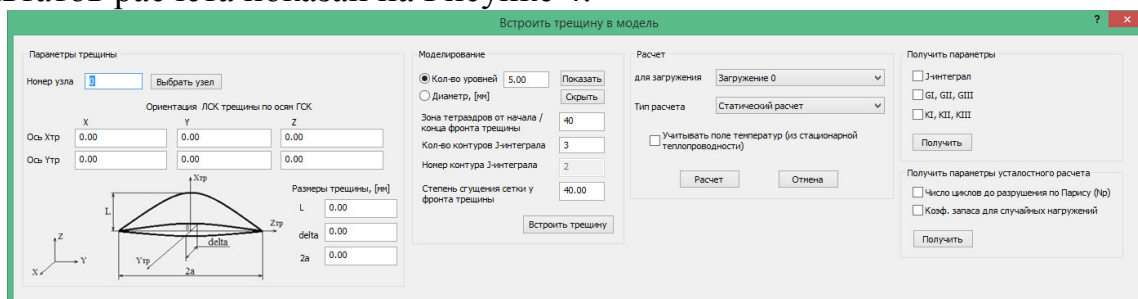


Рисунок 4. Диалоговое окно модуля APM Fracture «Встроить трещину в модель»

Интерфейс для настройки расчета на трещиностойкость объектов машиностроения с использованием функций «Рождение и Смерть» конечных элементов показан на Рисунке 5.

Разработка пользовательского интерфейса велась с учетом требований к эргономике, единству представления предметной области и восприятию на интуитивном уровне.

**В пятой главе** представлены верификационные исследования разработанных методов, алгоритмов и программного обеспечения на основе вычисления параметров механики разрушения.

Верификация включает в себя несколько этапов.

*Первый этап* посвящен статическому анализу на трещиностойкость с применением коэффициента интенсивности напряжений. Значения данного

параметра, полученные в APM Fracture, были сопоставлены со значениями, полученными в программном комплексе ANSYS Workbench 17.2, который рассматривался как эталонный.

В качестве объекта исследования была взята объемная конечно-элементная модель бруска с трещиной. Для конечно-элементной модели заданы свойства материала Сталь 3. Основание бруска закреплено жесткой заделкой. К верхней грани приложена растягивающая нагрузка в виде распределенного давления  $P$  на объемный конечный элемент со значением 100 МПа. Трещина имеет следующие размеры: длина (глубина)  $L = 5$  мм; раскрытие  $\delta = 0,005$  мм (в APM Fracture) и  $\delta = 0$  мм (в ANSYS Workbench 17.2); расширение трещины  $2a = 20$  мм. Значения коэффициентов интенсивности напряжений для каждого типа трещины показаны в виде диаграмм на Рисунке 6. Близкие формы диаграмм и значения коэффициентов интенсивности напряжений подтверждают работоспособность методов и алгоритмов для статического анализа.

*Второй этап* посвящен усталостному анализу на трещиностойкость в случае повторно-переменного характера изменения нагрузки с использованием числа циклов до разрушения по Парису. Сравнение данного параметра, вычисленного в модуле APM Fracture, проводилось с аналитическим решением, полученным для бруска с трещиной в центре. Для конечно-элементной модели были заданы свойства стали марки А 533-В.

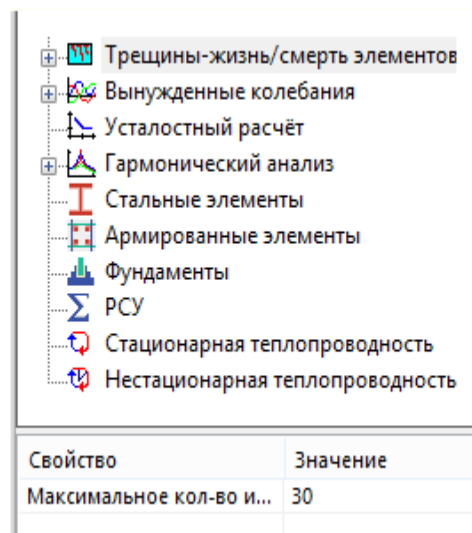


Рисунок 5. Настройка расчета с применением функций «Рождение и Смерть» конечных элементов

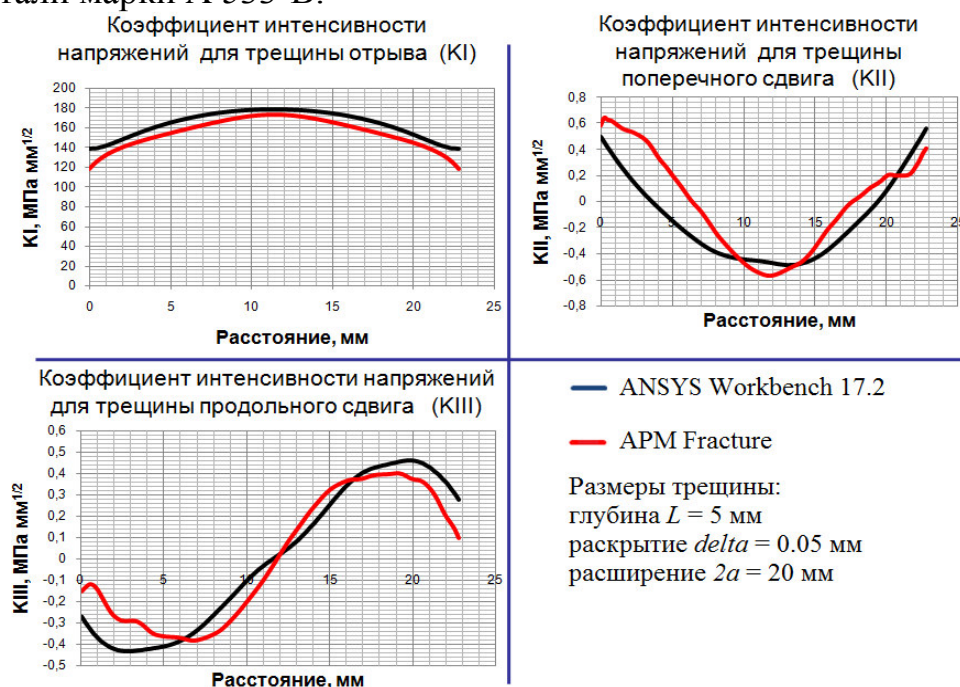


Рисунок 6. Зависимость коэффициентов интенсивности напряжений от длины фронта трещины



В Таблица 1 показаны результаты аналитического и численного расчетов для разных длин трещин. Незначительное отклонение численного решения от аналитического говорит о работоспособности алгоритмов и методов для усталостного анализа.

Таблица 1.

Число циклов до разрушения по Парису при разных длинах трещин

Длина трещины $a$ , мм	Численное решение в APM Fracture	Аналитическое решение	Относительная погрешность, %
20	75 423	76 756	1,73
25	66 195	67 467	1,88
30	58 781	60 029	2,08

*Третий этап* имеет своей целью усталостный анализ при случайном характере изменения нагрузки с использованием коэффициента запаса. Качественная оценка проводилась путем определения данного параметра с использованием двух модулей: APM Fatigue и APM Fracture. Первый модуль также является частью системы APM Structure3D и предназначен для усталостного анализа деталей без трещин.

В роли объекта исследования был рассмотрен узел, состоящий из шпильки и гайки. В свойствах материала были заданы характеристики алюминия марки 2024-T3. На Рисунке 7,а показаны значения коэффициентов запаса по долговечности, полученные в APM Fatigue методом Веллера для конечно-элементной модели узла без трещины, а на Рисунке 7,б значения коэффициентов запаса по трещиностойкости, полученные в APM Fracture по методу Париса для конечно-элементной модели узла с трещиной.

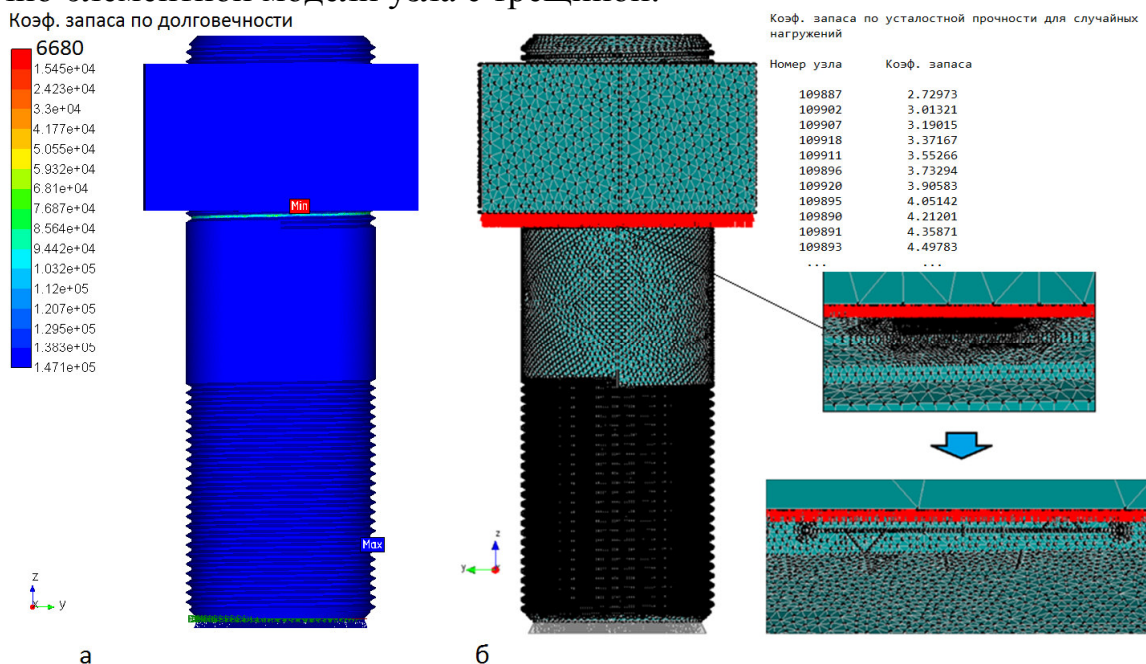


Рисунок 7. Объект исследования: а) значения коэффициентов запаса по долговечности по методу Веллера в конечно-элементной модели без трещины; б) значения коэффициентов запаса по трещиностойкости в конечно-элементной модели с трещиной

Минимальное значение коэффициента запаса, полученного по методу Веллера в узле без трещины, составляет 6680, а минимальное значение, полученного по методу Париса в узле с трещиной, равно 2,73, что соответствует действительности.

*Четвертый этап* посвящен нелинейному анализу на трещиностойкость на основе инвариантного нелинейного J-интеграла. В роли объекта исследования выступала пластина с боковой трещиной. К нижнему торцу пластины применена жесткая заделка, к верхнему торцу приложено давление  $P$  равное 200 МПа. Конечно-элементная модель пластины в деформированном состоянии показана на Рисунке 8. Диаграмма деформирования материала показана на Рисунке 9.

Значения по каждому контуру J-интеграла приведены в обобщенной Таблица 2. Можно видеть, что значения J-интеграла, полученные для каждого контура, близки. Небольшое расхождение обусловлено следующими факторами:

- особенностью решателей, указанных в Таблица 2 CAE-систем;
- расположением контуров интегрирования (в ANSYS Workbench 17.2 предполагается, что контуры расположены вблизи фронта трещины, а в APM Fracture контуры привязаны к 8-ми узловым объемным конечным элементам, поэтому они могут быть достаточно удалены от фронта трещины).

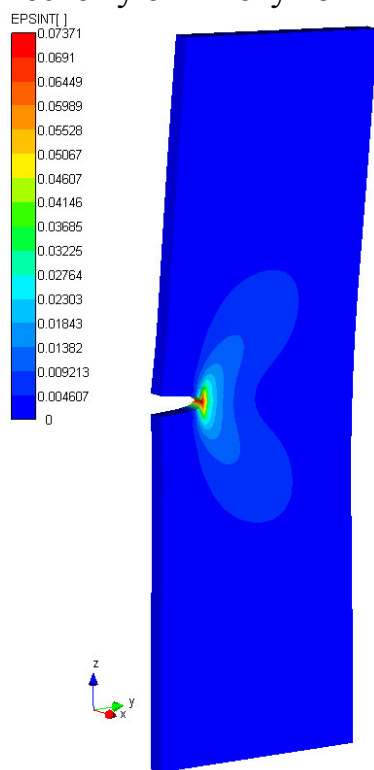


Рисунок 8. Конечно-элементная модель пластины с боковой трещиной в APM Fracture. Карта полных деформаций

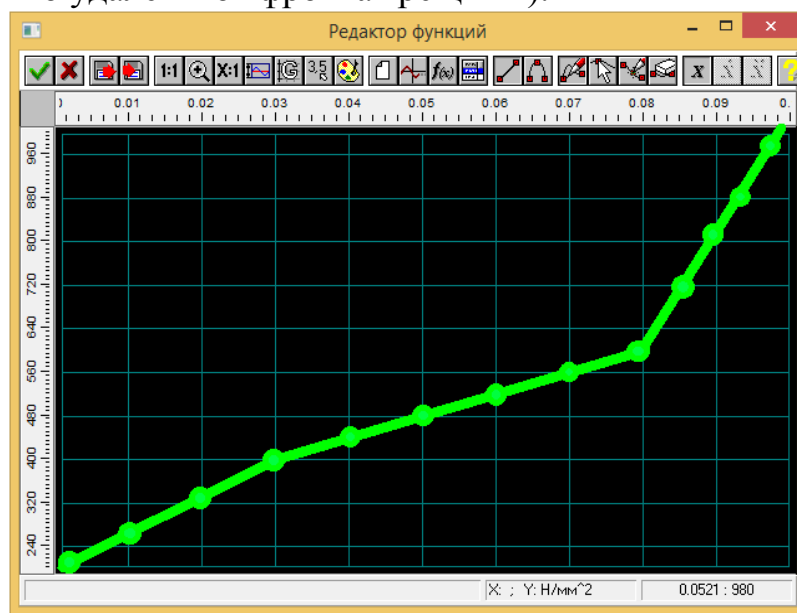


Рисунок 9. Диаграмма деформирования. Зона текучести и упрочнения

*Пятый этап* имеет своей целью квазистатический анализ объектов машиностроения на трещиностойкость с использованием функций «Рождение и Смерть» конечных элементов и метода вычисления интенсивности выделения энергии.

Для этой цели на кафедре РК5 МГТУ им. Н.Э. Баумана были проведены натурные испытания различных образцов. Результаты испытаний были приняты как эталонные. В последствии были получены конечно-элементные модели

данных образцов и проведены численные расчеты в APM Fracture. В качестве примера рассмотрим три образца.

Таблица 2.

Обобщение данных по каждому контуру J-интеграла				
Расстояние от начала фронта трещины, мм	Контур J-интеграла, МПа·мм			
	1-й	2-й	3-й	4-й
ANSYS Workbench 17.2				
0	2,245	2,541	2,605	2,618
2,5	2,503	3,128	3,199	3,214
5	2,503	3,128	3,199	3,214
7,5	2,245	2,541	2,605	2,618
APM Fracture				
0	2,103	2,475	2,345	2,235
2,5	2,051	2,475	2,357	2,244
5	2,051	2,475	2,357	2,244
7,5	2,103	2,475	2,345	2,235

Образец №1. Схема нагружения - растяжение по ГОСТ 1497-84. Образец №1 изготовлен из сплава В96ЦЗ, который относится к категории квазихрупких (относительное удлинение после разрыва  $\delta$  составляет 8%). На Рисунке 10, а показана карта напряжений по Мизесу, а на Рисунке 10, б - конечные элементы, которые были «Убиты» в процессе расчета в APM Fracture.

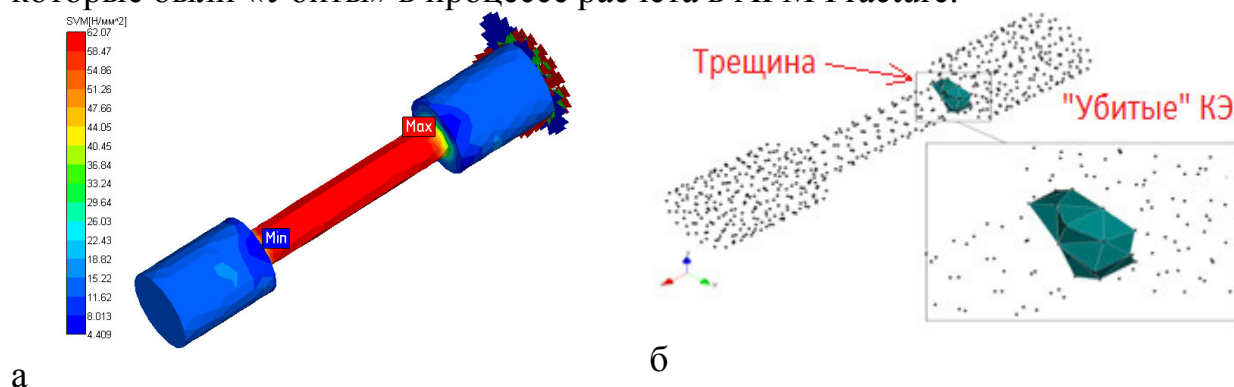


Рисунок 10. Образец №1: а) карта напряжений по Мизесу; б) «Убитые» конечные элементы

Образец №2. Схема нагружения - кручение по ГОСТ 3565-80.

Образец №3. Схема нагружения - трехточечный изгиб по ГОСТ 25.506-85.

На *шестом этапе* была выполнена качественная оценка алгоритма встраивания полуэллипсоидной (Semi-ellipsoid) трещины в конечно-элементную модель объекта.

На Рисунке 11 показаны результаты встраивания трещины в сложные геометрические участки конечно-элементной модели подвагонной балки.

Примеры расчетов и иные справочные сведения приведены в приложениях диссертации.



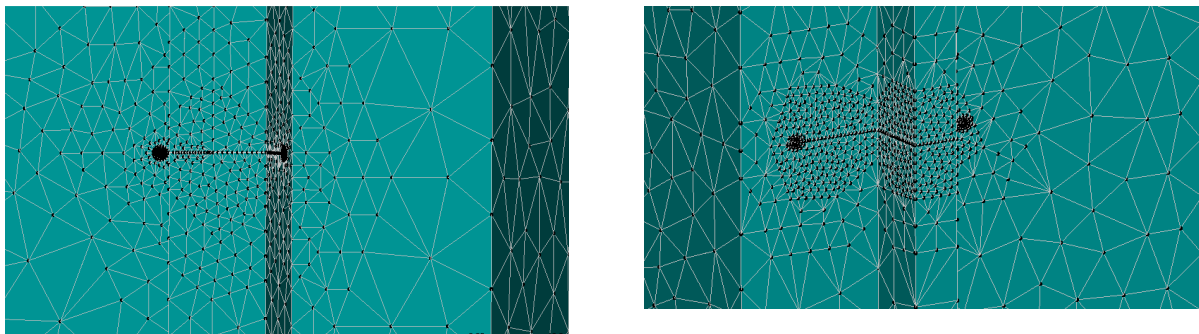


Рисунок 11. Пример встраивания трещины в сложные геометрические участки подвагонной балки

### Основные результаты работы

1. Разработан метод определения критического значения коэффициента интенсивности напряжений (параметра механики разрушения) материала на основе исследований его физических свойств.

2. Получено численное конечно – элементное решение задачи анализа долговечности конструкции по Парису при повторно-переменном характере нагружения для произвольной геометрии твердотельных и оболочечных конструкции.

3. Создан метод численного прогнозирования роста трещин, полученный с использования метода конечно-элементного анализа интенсивности выделения энергии на основе критерия Гриффитса и критерия энергий формоизменения.

4. Разработан метод конечно-элементного расчета проектных решений на основе вычисления нелинейного инвариантного J-интеграла для прогнозирования роста трещины в деталях, который позволяет работать с материалами, зона пластичности которых у вершины/фронта трещины превышает 20% ее длины, что характерно для подавляющего большинства машиностроительных объектов.

5. Предложен алгоритм статического усталостного и нелинейного расчета объектов машиностроения на трещиностойкость, который поддерживает расчет с повторно-переменным и случайным характером изменения нагрузки.

6. Разработан алгоритм встраивания полуэллипсоидных (Semi-ellipsoid) трещин в конечно-элементную модель для компьютерного анализа прочности и трещиностойкости деталей машин и элементов конструкций любых форм и размеров.

7. Предложен алгоритм расчета объектов машиностроения на трещиностойкость с использованием функций «Рождение и Смерть» конечных элементов.

8. Разработано промышленное программное обеспечение, как средство САПР, реализующее созданные методы и алгоритмы.

9. Созданное в результате проведенных исследований промышленное программное обеспечение оформлено в качестве программного модуля APM Fracture. Модуль встроен в отечественную CAE-систему APM Structure3D компаний НТЦ «АПМ», которая используется на более чем 1000 предприятиях

России и других государств. Компания НТЦ «АПМ» финансировала весь комплекс проведенных работ.

10. Выполнена верификация разработанного математического и программного обеспечения при решении статических, усталостных и нелинейных задач.

### **Основные публикации**

- Российские рецензируемые научные издания, текущие номера которых или их переводные версии входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus:

1. Renev S.A., Prokopov V.S. Development of an algorithm for solving problems of fracture mechanics // Materials Physics and Mechanics. 2016 Vol.26. P. 93–96.(0.125 п.л. / 0.125 п.л.)

2. Sergej A. Renev, Vladimir V. Shelofast The Method of Solving the Problems of Strength and Fracture Toughness Using the Modified Function «Birth and Death» for Three Modes of Deformation at the Tip of a Crack // MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES Scientific journal № 4 (38) V. 3 2017. V. 3(38).P.72–79.(0.312 п.л. / 0.125 п.л.)

3. Ренев С.А. Методы и средства инженерного анализа усталостной трещиностойкости при гармоническом нагружении детали // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. №6 (711).С. 12–19.(0.5 п.л.)

- Научные издания, индексируемые в международной наукоёмкой базе Scopus и не входящие в ВАК:

4. Renev S.A., Prokopov V.S. Development of Mathematical Model for Detection of Conditional Sizes Primordial Cracks in LEFM and its Implementation in Russian Cax System // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150.P. 683–688.(0.250 п.л. / 0.125 п.л.)

5. Renev S.A., Prokopov V.S. Method of Analytical Calculation of Critical Stress Intensity Factor and its Application in CAE System // Indian Journal of Science and Technology. 2017. Vol. 10(3).P.1–9. (0.437 п.л. / 0.125 п.л.)

6. Renev S.A., The Method of Solving Problems of Strength and Fracture Toughness in CAE-System Using Modified «Birth and Death» Functions // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206.P. 581–587. (0.437 п.л.)

7. Ренев С.А., Прокопов В.С., Шаврина Н.В. Метод расчёта критического коэффициента интенсивности напряжений с использованием модифицированной формулы Мураками // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2016) труды XVI-ой международной молодёжной конференции. 2016. С. 412–416. (0.187 п.л. / 0.125 п.л.)

8. Ренев С.А., Шелофаст В.В., Абдурашитов А.И., Венедиктов М.О. Сравнительный анализ ANSYS Mechanical APDL и APM Structure3D при использовании различных объемных конечных элементов // САПР и графика. 2018. №12. С.54–59. (0.250 п.л. / 0.125 п.л.)