

Л. П. Вовк, д-р техн. наук, Е. С. Кисель, канд. физ.-мат. наук,
А. С. Даниленко

Автомобильно-дорожный институт
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

ИНФОРМАЦИОННО-СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Решена задача о распределении коэффициента интенсивности напряжений по фронту полуэллиптической продольной трещины, расположенной на внешней поверхности полый цилиндрической детали, подверженной внутреннему давлению. Расчет выполнен на базе метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Предложенный информационно-системный подход позволил получить достаточно точное распределение напряжений в области начального надреза на поверхности цилиндра по фронту трещины и в ее вершинах, с учетом эффекта раскрытия, а также вычислить коэффициент интенсивности напряжений по фронту полуэллиптической краевой продольной трещины.

Ключевые слова: метод конечных элементов, эллиптическая трещина, коэффициент интенсивности напряжений, фронт трещины, полый цилиндр, информационно-системный подход

Постановка проблемы

Этап проектирования является одним из наиболее важных этапов в процессе создания автомобильной детали. Автоматизация проектирования осуществляется системами автоматизированного проектирования (САПР). В САПР машиностроительных отраслей промышленности принято выделять информационные системы конструкторского (системы САД), функционального (системы расчетов и инженерного анализа – системы САЕ) и технологического проектирования (системы САМ). На этом этапе формируется объемная геометрическая модель автомобильной детали, которая будет играть определяющую роль на многих последующих этапах инженерного анализа. Для создания объемной модели изделия конструктор может воспользоваться методами трехмерного твердотельного, поверхностного моделирования или сочетанием этих методов. Большинство систем инженерного анализа используют метод конечных элементов. Современные программные средства САЕ позволяют решать широкий спектр задач анализа линейной и нелинейной статики и динамики, устойчивости, теплопередачи, акустики, аэроупругости, оптимизации конструкции и многие другие.

Развитие современного машиностроения связано с дальнейшим повышением долговечности и надежности изделий. Значительное количество деталей машин представляют собой цилиндры различной конфигурации, работающие в условиях распределенной нагрузки на их поверхностях. Эксплуатационная надежность детали зависит от качества исходных материалов, вида обработки, условий эксплуатации. Металлические автомобильные детали зачастую разрушаются или приходят в негодность из-за изменения размеров еще в процессе производства или впервые часы эксплуатации при достаточно низком уровне эксплуатационных напряжений. Если на поверхности цилиндрической детали имеются растягивающие остаточные напряжения, которые в процессе эксплуатации складываются с внешними растягивающими или знакопеременными напряжениями, то на поверхности возможно образование трещин, которые постепенно приводят к разрушению детали.

Автомобильная промышленность обладает огромным потенциалом для моделирования, и предложенный в данной работе алгоритм является лишь малой частью возможных применений проектирования и инженерного анализа при решении задач в данной области. Расчеты с помощью высококачественных, верифицированных продуктов программного ком-

плекса ANSYS позволяют инженерам экономически эффективно определять ходовые характеристики и надежность в широком диапазоне задач автомобилестроения.

Анализ последних исследований и публикаций

Для описания поведения объектов, имеющих поверхностные дефекты в зонах конструктивных концентраторов напряжений необходимо учитывать совокупность таких факторов, как распределение напряжений по толщине элемента, форма дефекта и значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) по контуру поверхностного дефекта. Известно, что КИН позволяет установить взаимосвязь между условиями нагрузки материала в вершине трещины, а также с геометрией и напряженным состоянием тела, содержащего трещину. Распределение КИН по фронту трещин позволяет оценить трещиностойкость и живучесть модели, в этом случае можно применить силовой критерий разрушения Ирвина, что стало возможно в программном комплексе ANSYS [1].

Для определения КИН в деталях с трещинами, как правило, используют численные методы, в первую очередь метод конечных элементов (МКЭ). Чаще всего применяют стандартные конечно-элементные комплексы, в которых имеется встроенная функция вычисления КИН. Например, в [2] для вычисления КИН по фронту полуэллиптической краевой трещины в трубе используется программно-информационная среда ANSYS. Часто при оценке трещиностойкости деталей используют аппроксимационные выражения для КИН. С ними можно ознакомиться в справочной литературе [3–6], а также в [7]. Однако не для всех схем можно найти готовые решения. Следует отметить, что простым и в то же время обладающим приемлемой точностью методом определения КИН является метод сечений [8]. Анализ литературы показывает малое количество исследований об изменении формы поверхностных трещин, развивающихся в зонах концентраторов напряжений, и о критериях, описывающих эту кинетику. В частности, особенностью усталостных повреждений сварных соединений является существенное замедление скорости распространения развития сквозной трещины в глубину материала при выходе ее вершины из зоны концентрации напряжений [3].

Следует отметить, что в литературных источниках приводятся решения с использованием метода сечений в основном только для сквозных трещин, но в них не рассматривается распределение КИН по фронту трещины и в ее вершинах, которое имеет место для несквозных трещин.

Основной материал исследования

Расчет механики разрушения – это сложный многоступенчатый прочностной расчет, который может учитывать геометрическую нелинейность, пластичность, температурную нагрузку и нагрузку, приложенную к поверхности трещины. Для выполнения КЭ анализа цилиндрической детали в окне *Project Schematic* необходимо создать блок *Static Structural*, предназначенный для решения задач механики деформируемого твердого тела в статической постановке. Нажав и удерживая левую клавишу мыши, необходимо перетащить наименование блока из окна *Toolbox* в ограниченное штриховой линией место вставки блока в окне *Project Schematic*.

На следующем этапе происходит построение геометрической модели элементом *Geometry* в *Design Modeler*, реализующим современные методы моделирования плоской и трехмерной геометрии. *Design Modeler* позволяет подготовить модель к инженерному анализу в ANSYS. Программа позволяет выбирать необходимые твердые материалы для исследуемых моделей объектов из библиотеки материалов ANSYS. По умолчанию для каждого твердого материала уже заданы все свойства.

Рассмотрим объект исследования. Геометрия полого цилиндра (рисунок 1а) следующая: длина цилиндра 6,е-002 м, больший радиус 3,е-002 м, меньший радиус 2,е-002 м; материал – сталь марки 08пс: модуль упругости 2,03·10⁵ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; пре-

дел текучести 175 МПа, плотность материала 7850 кг/м³ [4]. Фронт трещины задается перпендикулярным направлению нагружения детали. Нагружение осуществляется путем приложения давления $P = 180$ Па к внутренней поверхности полого цилиндра.

Целью настоящей работы является вычисление КИН по фронту полуэллиптической краевой продольной трещины, расположенной на внешней поверхности цилиндрической детали. В основе алгоритма лежит метод сечений, реализованный в программном комплексе ANSYS 2019 R1.

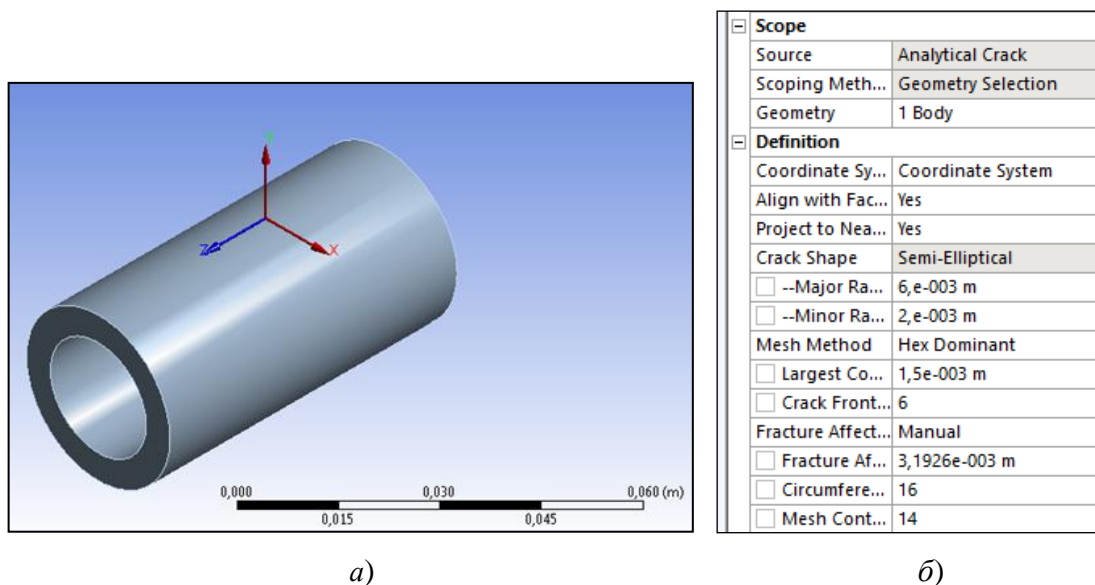


Рисунок 1 – а) 3D-геометрия цилиндрической детали,
б) окно настроек элемента *Semi-Elliptical Crack*

Моделируем трещину, используя возможность автоматического создания полуэллиптической трещины (*Semi-Elliptical Crack*) в любом месте модели. Для задания трещины достаточно указать ее положение и ориентацию. Ориентацию трещины определяет введенная вспомогательная система координат, ориентированная таким образом, что ось X перпендикулярна фронту трещины. Параметры трещины определяем в соответствующем окне настроек объекта *Fracture > Semi-Elliptical Crack* (рисунок 1б). Большую и меньшую полуоси определим следующим образом: $a = 0,006$ м, $c = 0,002$ м.

Разбиение геометрической модели конечно-элементной сеткой выполняется модулем *Mesh* дерева проекта для получения дальнейшего численного решения. Создается трехмерная модель цилиндрического образца с глобальной сеткой элементов и модель области трещины с локальной сеткой тетраэдрических элементов. Размер элементов глобальной сети составляет 4–5 мм, локальной 0,2 мм. Конечно-элементная разбивка в окрестности трещины показана на рисунке 2. Указываем в настройках элемента *Semi-Elliptical Crack* 6 контуров интегрирования. Следует отметить, что использование здесь регулярной радиальной сетки в объеме, окружающем фронт трещины, обеспечивает высокую точность вычисления параметров механики разрушения.

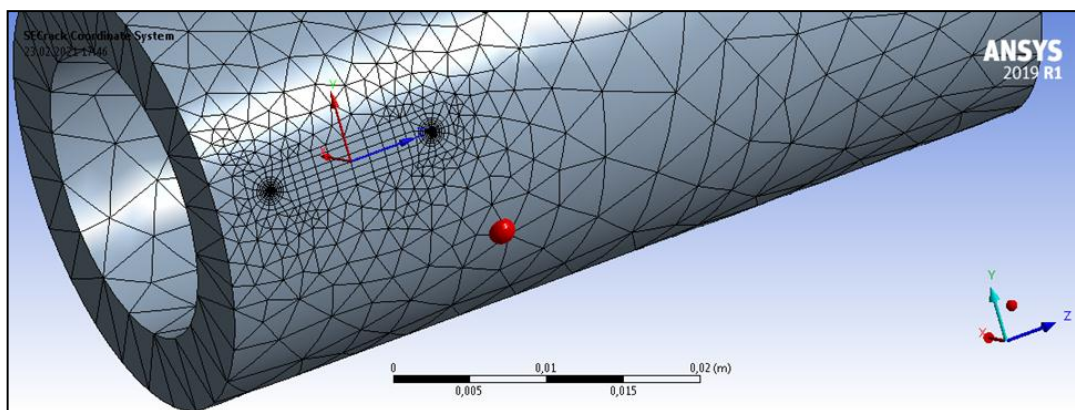


Рисунок 2 – Конечно-элементная сетка модели полого цилиндра в области трещины

Определим внешние воздействия на конструкцию. Внешнее воздействие определяется терминами «ограничение» и «нагрузка». В первом случае предполагается закрепление, т. е. ограничение перемещений и вращений. Закрепление предполагается на торцевой поверхности цилиндра, расположенной дальше от трещины. В качестве «нагрузки» в задачах механики разрушения понимается воздействие (приложение) сосредоточенных или распределенных сил. В данной задаче рассмотрим поверхностно распределенное давление по внутренней стенке полого цилиндра («Pressure», Applied By «Surface Effect») величиной 180 Па.

Переходим к этапу запуска решателя и анализу результатов. Для этого нажимаем кнопку *Solve* в контекстном меню раздела *Solution* окна *Outline*. При верном указании всех исходных данных и настройке решателя, после выполнения расчета в окне дерева проекта возле раздела *Solution* появляется зеленая галочка. А в окнах *Graph* и *Tabular Data*, расположенных в нижней части экрана, отражено графическое и численное представление вычисляемых характеристик анализа. Одним из основных результатов расчета напряженно-деформированного состояния, проводимого с помощью МКЭ в модуле *Static Structural*, является получение эквивалентных напряжений (*Equivalent Stress*) узлов КЭ-модели. Для данной модели максимальное эквивалентное напряжение равно 3,18 МПа наблюдаем в вершинах трещины и на линии ее фронта, а минимальное 0,33 МПа – на боковой поверхности цилиндра (рисунок 3).

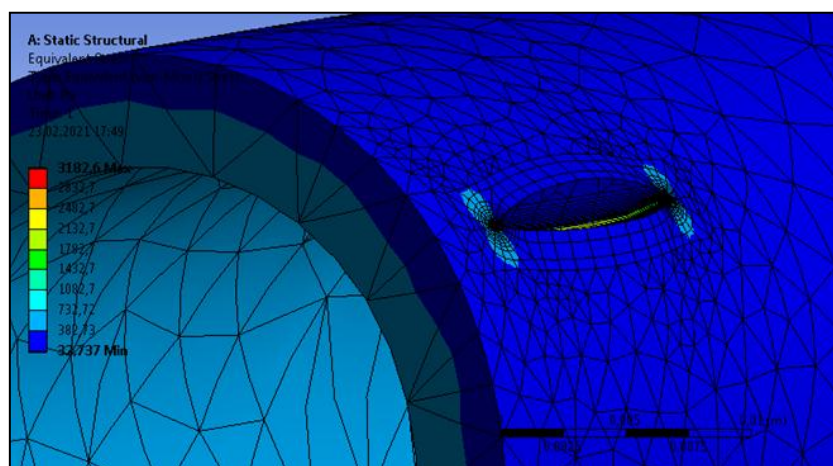


Рисунок 3 – Результаты расчета эквивалентных напряжений

В [9] следует отметить применение специальных конечных элементов для моделирования сингулярности напряжений в вершине трещины. В [10] рассмотрен прямой метод вычисления коэффициента интенсивности напряжений. В результате вычислений получено значение КИН по контуру поверхностной трещины. На рисунке 4 представлены результаты

распределения КИН (KI) по линии фронта поверхностной трещины от метки 1 к метке 2. Очевидно существенное увеличение значений KI с увеличением глубины трещины, так максимальное наблюдаемое значение – $30,283 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Наиболее напряженные элементы располагаются посередине сторон начального надреза, от них начинается распространение трещины. В финальной стадии фронт трещины становится близким к полуэллиптическому (рисунок 4), а распределение наибольших главных напряжений – более равномерным по контуру фронта.

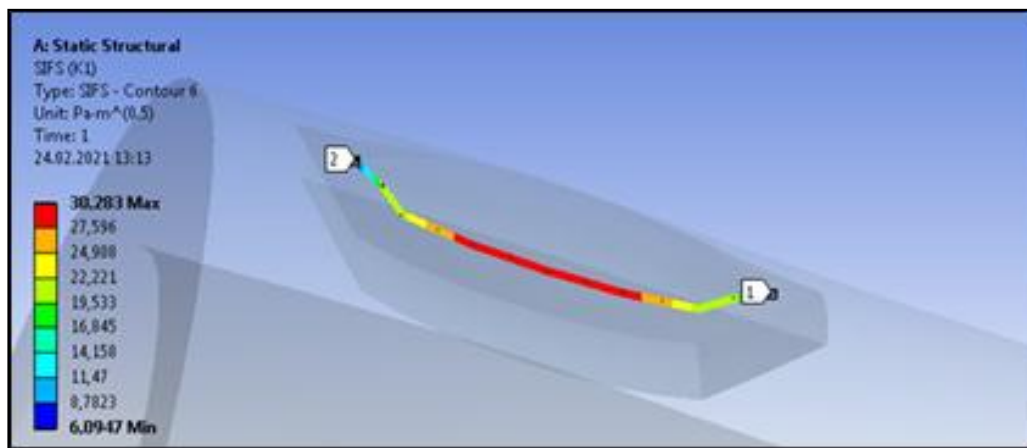


Рисунок 4 – Расчет КИН (KI), $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ вдоль контура трещины

Аналогичные результаты дает вычисление KI для наиболее информативных пятого и шестого контуров. Графическая зависимость значения KI от расположения точки на линии фронта трещины представлена на рисунке 5. Сплошной линией отмечен 6-й контур, пунктирной – 5-й. Результаты для контуров 1–4 не представлены ввиду большой погрешности вычислений.

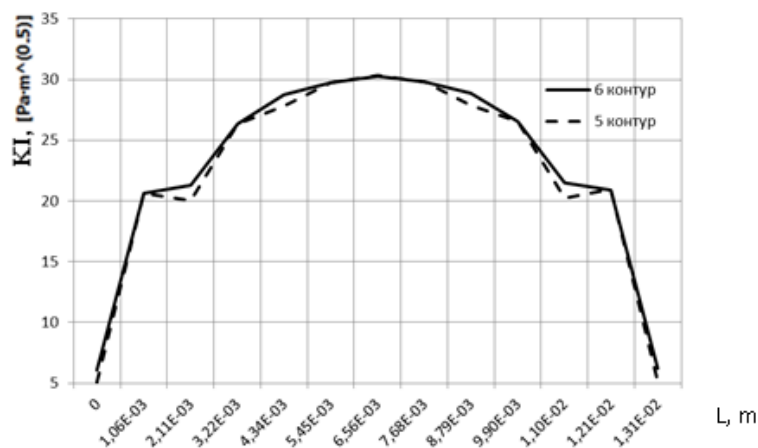


Рисунок 5 – Зависимость значения KI, $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ от положения на линии фронта L, m

Выводы

Развитие техники создает условия для совершенствования методов расчета и проектирования на заданный ресурс, методов оценки технического состояния и ресурса в условиях эксплуатации конструкций, деталей машин, подвергающихся действию интенсивных переменных нагрузок. Это объясняется в первую очередь появлением прикладных компьютерных программ, с помощью которых можно моделировать достаточно сложные объекты при любых видах нагружения.

В данной работе с помощью метода конечных элементов в программе ANSYS Workbench моделировалась полуэллиптическая трещина в толстостенном цилиндре. Задача решена в линейно-упругой постановке без учета пластических деформаций. В рамках линейно-упругой механики разрушения исследовалось влияние давления в толстостенной модели цилиндра на величину эквивалентных напряжений и их значения в области трещины. В качестве критерия для оценки прочности использовался коэффициент интенсивности напряжений КИ. Как показали результаты, наибольшее значение КИН наблюдается в точке, определяющей максимальную глубину трещины. Анализ напряжений в вершинах трещины и вдоль ее фронта был выполнен в информационном комплексе ANSYS. Зонами локальной концентрации напряжений стали области, прилегающие к вершинам трещины и линия ее фронта.

Представляет интерес дальнейшее исследование зависимости КИН от локализации трещины, от геометрического соотношения полуосей, отношения малой полуоси трещины к толщине стенки сосуда.

Результаты работы могут стать основой исследования параметров механики разрушения для сборных сварных конструкций цилиндрических сосудов высокого давления, а также в задачах, где необходим учет упругопластического поведения материала. На основе предложенного метода исследования могут быть выявлены дополнительные факторы, влияющие на рассматриваемые вопросы прочностных расчетов динамического напряженно-деформированного состояния автомобильных деталей.

Список литературы

1. Сборник руководств программы ANSYS. – Текст : электронный. – URL: <http://iamdrunk.ru/teach/!%D0%A3%D1%87%D0%B5%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B8/ANSYS/%D0%A0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%20%D0%BF%D0%BE%20%D0%BE%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D1%8B%D0%BC%20%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D0%BC.pdf>.
2. Глушков, С. В. Сравнение результатов решения задачи механики разрушения для трубы с несквозной трещиной / С. В. Глушков, Ю. В. Скворцов, С. Н. Перов // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2014. – № 3. – С. 36–49.
3. Панасюк, В. В. Механика разрушения и прочность материалов. Т. 2: Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами / В. В. Панасюк. – Киев : Наукова думка, 1988. – 620 с.
4. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений : [в 2 томах] ; под редакцией Ю. Мураками. – Москва : Мир, 1990. – 2 т. – 1016 с.
5. Матвиенко, Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения / Ю. Г. Матвиенко. – Москва : Физматлит, 2006. – 328 с.
6. Сапунов, В. Т. Прочность поврежденных трубопроводов: течь и разрушение трубопроводов с трещинами / В. Т. Сапунов. – 3-е изд. – Москва : Ленанд, 2019. – 187 с.
7. Бочектуева, Е. Б. Анализ трещиностойкости прокатных валков стана кварто / Е. Б. Бочектуева, В. Е. Рогов // Омский научный вестник. – 2017. – № 6(156). – С. 12–14.
8. Применение метода плоских сечений для определения коэффициентов интенсивности напряжений / С. Ю. Гоог, И. С. Таболин, Е. И. Ширяев, Л. Б. Шрон // Вестник КузГТУ. – 2012. – № 1. – С. 137–140.
9. Морозов, Е. М. Метод конечных элементов в механике разрушения / Е. М. Морозов, Г. П. Никишков. – Москва : Наука, 1981. – 254 с.
10. Сиратори, Т. Вычислительная механика разрушения / Т. Сиратори, Т. Миёси, Х. Мацусита. – Москва : Мир, 1986. – 334 с.

Л. П. Вовк, Е. С. Кисель, А. С. Даниленко
Автомобильно-дорожный институт

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка
Информационно-системное моделирование в задачах механики разрушения

Для исследования появления и распространения трещин в тех или иных условиях успешно используется механика разрушения. Однако в настоящее время аналитические решения существуют только для простых трещин. Трещины же сложные (наклонные, разветвленные и т. д.) могут быть решены только с использованием численных методов.

Благодаря постоянно развивающимся компьютерным технологиям инженеры и ученые уже получили возможность анализа прочности, напряженно-деформированного состояния конструкции с трещинами или без, не прибегая к созданию моделей, эквивалентных данным, а лишь работая в системах инженерного анализа (CAE-системы). Метод, использующий математические модели вместо экспериментальных стендов, очень перспективен с точки зрения автоматизации и ускорения инженерных расчетов. Данный метод экономичен по материальным и трудовым затратам.

В ANSYS была смоделирована аналогичная образцу 3D геометрическая модель полого толстостенного цилиндра с полуэллиптической поверхностной трещиной, построена конечно-элементная сетка и приложены необходимые нагрузки. Следует также заметить, что при трехмерном моделировании необходимо искусственно сдвигать узлы конечного элемента в вершине трещины. Следовательно, появляется необходимость в разработке метода автоматизированного процесса построения сетки конечных элементов в вершине трещины для трехмерных объектов.

В результате расчета были получены карты распределения перемещений и эквивалентных напряжений по IV теории прочности, а также распределение коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) по фронту трещины. Полученные в ANSYS значения КИН были представлены в виде графиков зависимости КИН от номера узла фронта трещины.

По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что такие виды дефектов зависят от растягивающих напряжений. Внутреннее давление, технические характеристики материала, а также толщина стенки и диаметр цилиндра в наибольшей степени влияют на растягивающие напряжения. Результаты работы могут стать основой исследования параметров механики разрушения для сборных сварных конструкций цилиндрических сосудов высокого давления, а также в задачах, где необходим учет упругопластического поведения материала. На основе предложенного метода исследования могут быть выявлены дополнительные факторы, влияющие на рассматриваемые вопросы прочностных расчетов динамического напряженно-деформированного состояния автомобильных деталей.

МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ЭЛЛИПТИЧЕСКАЯ ТРЕЩИНА, КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ, ФРОНТ ТРЕЩИНЫ, ПОЛЫЙ ЦИЛИНДР, ИНФОРМАЦИОННО-СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД

L. P. Vovk, E. S. Kisel, A. S. Danilenko

Automobile and Road Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka

Information and System Modelling in the Problems of the Fracture Mechanics

The fracture mechanics is successfully used to study the crack appearance and proliferation under certain conditions. However, analytical solutions currently exist only for simple cracks. The complex cracks (inclined, branched, etc.) can only be solved using the numerical methods.

Thanks to the constantly developing computer technologies, the engineers and scientists have already received the opportunity to analyze the strength, the deflected mode of a structure with or without cracks, without resorting to creating the models that are equivalent to the data, but only working in the analysis engineering systems. The method using mathematical models instead of the experimental stands is very promising from the point of view of the automation and acceleration of engineering calculations. This method is economical in terms of the material and labour costs.

In the ANSYS, a similar 3D geometric model of a hollow thick-walled cylinder with a semi-elliptical surface crack was simulated, a finite-element mesh is built, and the necessary loads are applied. It should also be noted that in the 3D modelling it is necessary to shift the units of the finite element at the crack tip. Consequently, there is a need to develop a method for the automated process for generating a finite element mesh at the crack tip for three-dimensional objects.

As a result of the calculation, the maps of the shift distribution and equivalent stresses according to the IV theory of strength, as well as the distribution of stress intensity factors (SIF) along the crack front are obtained. The SIF

values obtained in the ANSYS were presented in the form of graphs of the SIF dependence on the number of the crack front unit.

Based on the simulation results, it can be concluded that these types of defects depend on the tensile stresses. The internal pressure, material specifications, the wall thickness and the cylinder bore have the greatest influence on the tensile stresses. The results of this work can become the basis for studying the parameters of the fracture mechanics for the prefabricated welded structures of the cylindrical high-pressure vessels, as well as in problems where it is necessary to take into account the elastoplastic behaviour of the material. On the basis of the proposed research method, the additional factors, affected the considered issues of the strength calculations of the dynamic deflected mode of the automobile parts, can be identified.

FINITE ELEMENT METHOD, ELLIPTIC CRACK, STRESS INTENSITY FACTOR, CRACK FRONT, HOLLOW CYLINDER, INFORMATION AND SYSTEM APPROACH

Сведения об авторах:

Л. П. Вовк

SPIN-код: 9860-6682
Телефон: +38 (071) 301-98-55
Эл. почта: lv777@list.ru

А. С. Даниленко

Телефон: +38 (071) 306-31-85
Эл. почта: a.danilenko@e.adidonntu.ru

Е. С. Кисель

SPIN-код: 7676-8943
Телефон: +38 (071) 443-74-77
Эл. почта: e.s.kisel@gmail.com

Статья поступила 25.02.2021

© Л. П. Вовк, Е. С. Кисель, А. С. Даниленко, 2021

Рецензент: В. Л. Николаенко, канд. техн. наук, доц., АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»