

Программа
итерационной обработки
результатов испытаний образцов
на скорость роста трещины усталости



Версия 1.01 Руководство пользователя

Авторы:

Перепелица Д.Д.
Потапов С.Д.

Июнь, 2024

Содержание

1 Обзор программы	3
1.1 Рабочий процесс	3
2 Основы графического интерфейса пользователя	4
2.1 Компоненты	4
2.2 Строка меню	4
2.3 Окно ввода	5
2.4 Окно с результатами	5
3 Исходные данные	6
4 Критерии и режимы расчета	8
4.1 Критерии расчета	8
4.2 Режимы расчета	8
4.3 Расчет	9
5 Отображение результатов расчета	10
6 Программа «Расчет размаха КИН»	11
7 Программа «Расчет средних значений»	12
8 Форматы файлов	13
8.1 Файл с исходными данными образца	13
8.2 Файл с зависимостью размаха нагружения от длины трещины	13
8.3 Файл с зависимостью размаха КИН от длины трещины	13
8.4 Файл с результатами расчета свойств трещиностойкости	14
8.5 Файл со свойствами трещиностойкости образцов	14
8.6 Файл с результатами расчета средних значений свойств трещиностойкости	15
8.7 Файл с исходными данными образца, записанный испытательным оборудованием	15

1 Обзор программы

Программное обеспечение разработано для определения свойств трещиностойкости (коэффициентов уравнения Пэриса), описывающих линейный участок кинетической диаграммы развития трещины усталости. Кинетической диаграммой развития усталостной трещины является логарифмическая зависимость скорости роста трещины усталости от размаха коэффициента интенсивности напряжения (КИН).

В программном обеспечении реализован итерационный метод определения границ линейного участка кинетической диаграммы развития трещины и свойств трещиностойкости в пределах заданных границ. При поэтапном удалении точек (замеров) определяется сначала нижняя граница устойчивого участка развития трещины, затем при поэтапном добавлении точек (замеров) – верхняя граница.

Свойства трещиностойкости вычисляются по зависимости длины трещины от количества циклов, что уменьшает погрешность их вычисления по сравнению с методом, основанным на линейной аппроксимации логарифмической зависимости скорости роста трещины усталости от размаха КИН.

1.1 Рабочий процесс

Графический пользовательский интерфейс программы позволяет пользователям загружать исходные данные, задавать настройки вычисления и визуализировать результаты. Результаты выполнения программы можно сохранять в текстовом формате.

2 Основы графического интерфейса пользователя

2.1 Компоненты

Графический интерфейс пользователя состоит из трех основных компонентов:

1. Строка меню – предоставляет доступ к дополнительным инструментам.
2. Окно ввода – отображает выбранные исходные данные и настройки вычисления.
3. Окно с результатами – отображает результаты расчета, в том числе, графически.

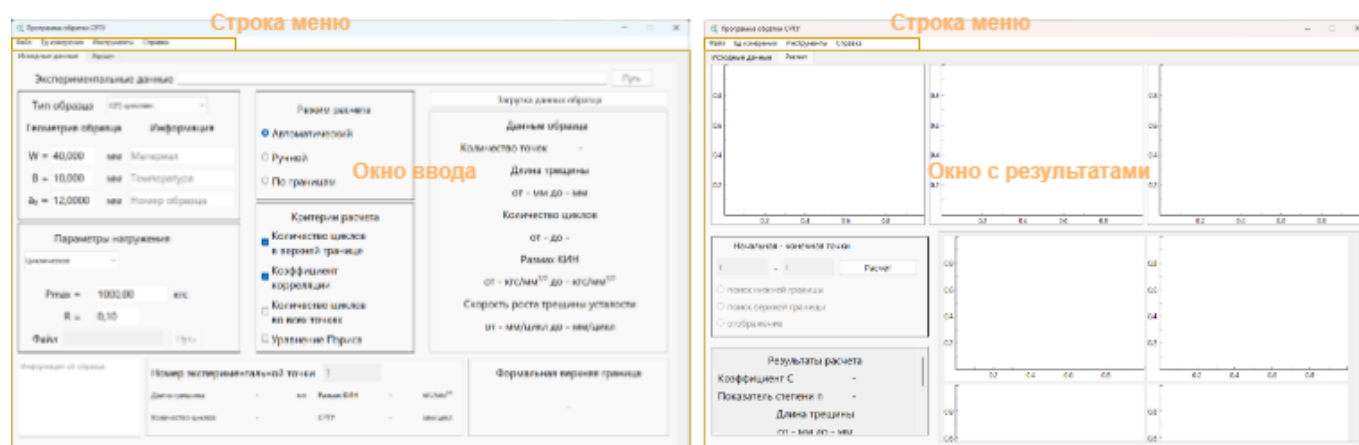


Рисунок 2.1 – Вид программы

2.2 Строка меню

Строка меню используется для доступа к различным инструментам. Она состоит из четырех меню: Файл, Ед измерения, Инструменты, Справка.

2.2.1 Меню «Файл»

Меню «Файл» используется для управления файлами проекта:

- Сохранить – сохраняет результат решения в виде текстового файла. Содержание файла приведено в разделе 8.4.

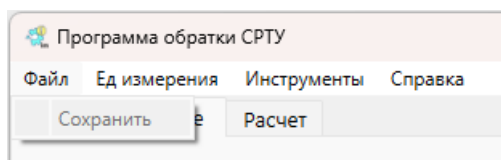


Рисунок 2.2 – Меню «файл»

2.2.2 Меню «Ед измерения»

Меню «Ед измерения» позволяет изменять единицы измерения, используемые в расчете:

- Метрическая – задание метрической системы измерений;
- СИ – задание стандартной системы измерений;
- Преобразование – перевод величин между системами измерений;
- Ед измерения... – отображение размерностей величин для систем измерений.

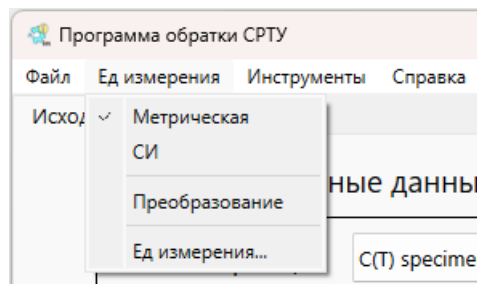


Рисунок 2.3 – Меню «Ед измерения»

2.2.3 Меню «Инструменты»

Меню «Инструменты» используется для доступа к дополнительным инструментам программы:

- Расчет размаха КИН – запуск программы расчета размаха КИН для стандартизированных образцов;
- Расчет средних значений – запуск программы расчета средних значений свойств трещиностойкости.

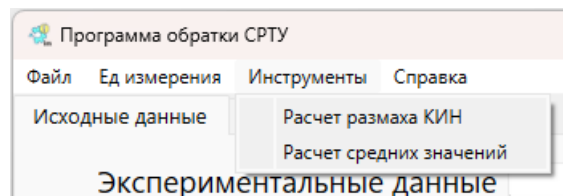


Рисунок 2.4 – Меню «Инструменты»

2.2.4 Меню «Справка»

Меню «Справка» используется для доступа к документации программы:

- Руководство – открытие файла с руководством программы;
- Теория – открытие файла с описанием реализованных в программе подходов;
- О программе – отображение версии программы.

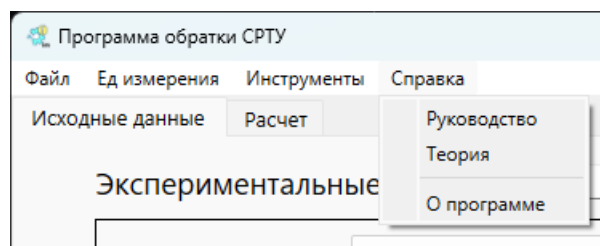


Рисунок 2.5 – Меню «Справка»

2.3 Окно ввода

Окно ввода расположено во вкладке «Исходные данные» и содержит информацию об образце и настройками вычисления.

2.4 Окно с результатами

Окно с результатами расположено во вкладке «Расчет» и содержит информацию с результатами обработки экспериментальных данных образца.

3 Исходные данные

Исходные данные для выполнения расчетов задаются в Окне ввода. Для проведения расчетов необходимо загрузить экспериментальные данные развития трещины усталости в образце (зависимость количества циклов нагружения от длины трещины), задать размеры образца, параметры нагружения образца.

Экспериментальные данные. Указывается путь к файлу, содержащему экспериментальные данные в виде зависимости длины трещины от количества циклов нагружения. Файл составляется в соответствии с требованиями раздела 8.1.

Тип образца. Из всплывающего списка выбирается тип образца: *C(T) specimen* – компактный образец на внецентренное растяжение; *SENB specimen* – прямоугольный образец на трехточечный изгиб; *Load file SIF range* – при исследовании образца, для которого отсутствуют аппроксимационные данные, зависимость размаха КИН от длины трещины задается через файл в строке «Файл». Требования к составлению файла приведены в разделе 8.3. При этом геометрия образца и параметры нагружения не указываются.

Геометрия образца.

W – расстояние зависит от типа образца.

B – толщина образца.

a_0 – начальный надрез образца.

Параметры нагружения. Из всплывающего списка выбирается тип нагружения:

dP=const – циклическое нагружение образца при «постоянной» нагрузке (амплитуда и среднее значение нагружения не меняются во время проведения испытаний).

Load file dP(L) – при исследовании образца, для которого отсутствует тип нагружения, зависимость размаха нагружения от длины трещины задается через файл в строке «Файл». Требования к составлению файла приведены в разделе 8.2. При этом параметры нагружения не указываются.

Load file L(N) – зачитывается файл с экспериментальными данными, созданный испытательной машиной после проведения испытаний. Требования к составлению файла приведены в разделе 8.7.

Load file L(N) dP=const – зачитывается файл с экспериментальными данными, созданный испытательной машиной после проведения испытаний при «постоянной» нагрузке. Параметры циклического нагружения зачитываются из файла с экспериментальными данными. Величины максимальной нагрузки и коэффициента асимметрии принимаются как средние арифметические значения по всем экспериментальным данным. Требования к составлению файла приведены в разделе 8.7. При этом параметры нагружения будут указаны после зачитывания файла.

Load file L(N) dP(L) – зачитывается файл с экспериментальными данными, созданный испытательной машиной после проведения испытаний. Параметры циклического нагружения зачитываются из файла с экспериментальными данными. Размах нагрузки определяется как линейная интерполяция по всем экспериментальным данным. Требования к составлению файла приведены в разделе 8.7. При этом параметры нагружения не указываются.

P_{max} – максимальная нагрузка в цикле нагружения.

R – коэффициент асимметрии нагружения.

Файл – путь к файлу, содержащий либо зависимость размаха КИН от длины трещины, либо зависимость размаха нагружения от длины трещины.

Загрузка данных образца. После указания всех исходных данных необходимо нажать кнопку «Загрузка данных образца». Если исходные данные или файлы содержат недопустимые значения, программное обеспечение может выдать предупреждение или ошибку.

Данные образца. После удачной загрузки исходных данных программное обеспечение приведет зачитанные экспериментальные данные образца, содержащие общее количество точек (замеров) и границы, в пределах которых проведено испытание образца.

4 Критерии и режимы расчета

Перед проведением расчетов в окне ввода необходимо задать настройки решения: указать критерии расчета и режим расчета.

4.1 Критерии расчета

Расчеты при «автоматическом» и «ручном» режимах завершаются при достижении требуемого уровня критерия. При указании нескольких критериев расчет завершится после достижения требуемого уровня всех выделенных критериев одновременно. В качестве требуемого уровня задана величина 0,9995.

Стоит отметить, данное требование допустимо для критериев «Количество циклов в верхней границе» и «Коэффициент корреляции», что подтверждено, в том числе, на основе фрактографических исследований. Для критериев «Количество циклов во всех точка» и «Уравнение Пэриса» требование 0,9995 явно завышено. Однако, анализ изменений указанных критериев позволит дополнительно убедиться в достоверности принятых границ линейного участка кинетической диаграммы развития трещины, в особенности, для результатов испытаний с более 200 экспериментальных точек.

В случае, если ни один критерий не выбран, расчет завершится при достижении минимального количества точек (замеров), необходимого для определения свойств трещиностойкости. Минимальным количеством является 20 точек (замеров).

В качестве нижней границы линейного участка развития трещины определяется точка (замер), которая первая будет удовлетворять заданным критериям, даже если после будут точки (замеры), для которых критерии не будут удовлетворены.

В качестве верхней границы линейного участка развития трещины определяется точка (замер), после которой не будет ни одной точки, удовлетворяющей заданным критериям.

4.2 Режимы расчета

Автоматический. Итерационным методом определяются границы линейного участка развития трещины и свойства трещиностойкости в автоматическом режиме. Для вычисления нижней границы, определяется экспериментальная точка, которая не превышает формальную верхнюю границу. Формальная верхняя граница соответствует скорости роста трещины усталости 1 мкм/цикл.

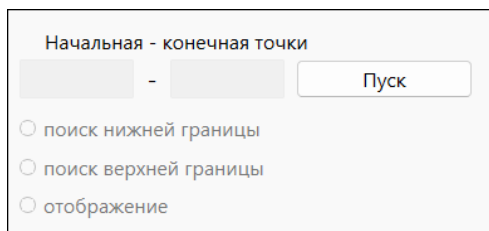
Ручной. Итерационным методом определяется либо нижняя, либо верхняя границы линейного участка развития трещины при задании начальных границ для расчета. При поиске нижней границы свойства трещиностойкости определяются по набору точек (замеров) в заданных границах при последовательном отбрасывании точек (замеров), соответствующих нижней границе (начиная с начальной точки). При поиске верхней границы свойства трещиностойкости определяются по набору точек (замеров) в заданных границах при последовательном добавлении точек (замеров), соответствующих верхней границе (начиная с конечной точки).

По границам. Вычисляются свойства трещиностойкости только для точек (замеров), указанных в заданных пределах. Итерационный поиск границ не выполняется.

Автоматический режим является предпочтительным. По границам и ручной режимы предназначены для определения свойств трещиностойкости только в исследовательских целях. В случае неудовлетворения критериям при проведении расчетов на автоматическом режиме возможно использование режимов по границам и ручной для определения свойств трещиностойкости. При этом необходимо иметь данные о свойствах трещиностойкости, полученных на таких же образцах и в тех же условиях, и опыт обработки результатов испытаний образцов.

4.3 Расчет

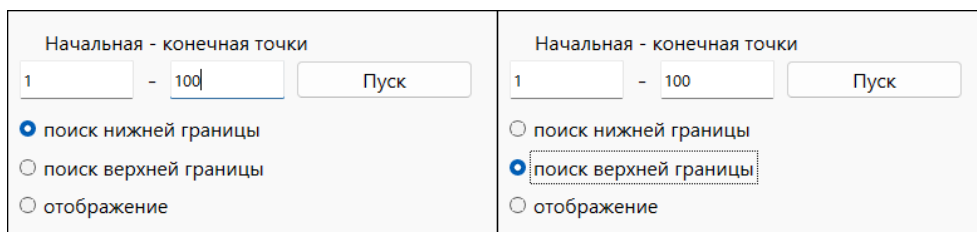
Для определения свойств трещиностойкости при автоматическом режиме необходимо нажать на кнопку «Пуск» в окне с результатами. Номера точек (замеров), соответствующие верхней и нижней границам линейного участка, приводятся в файле с результатами расчета свойств трещиностойкости (п.8.4).



The screenshot shows a window titled "Начальная - конечная точки". It contains two input fields, the first with the value "1" and the second with "100", separated by a minus sign. To the right is a button labeled "Пуск". Below the input fields are three radio buttons: "поиск нижней границы", "поиск верхней границы", and "отображение". The "поиск нижней границы" option is selected.

Рисунок 4.1 – Запуск расчета при автоматическом режиме

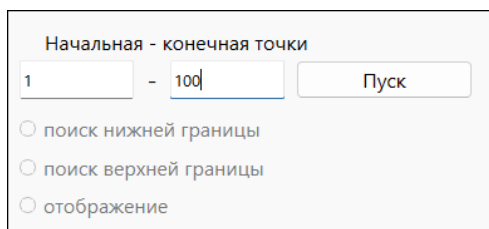
Для определения свойств трещиностойкости при ручном режиме необходимо указать поиск какой границы выполняется (верхней или нижней), задать начальную и конечную точки (замеры), определяющих начальные границы, и нажать на кнопку «Пуск» в окне с результатами.



The screenshot shows two side-by-side window instances. Both are titled "Начальная - конечная точки" and have input fields with "1" and "100" and a "Пуск" button. The left window has the "поиск нижней границы" radio button selected. The right window has the "поиск верхней границы" radio button selected, and this option is highlighted with a dashed rectangular border.

Рисунок 4.2 – Запуск расчета при ручном режиме

Для определения свойств трещиностойкости при режиме по границам необходимо указать начальную и конечную точки (замеры) проведения расчета и нажать на кнопку «Пуск» в окне с результатами.



The screenshot shows a window titled "Начальная - конечная точки". It contains two input fields, the first with the value "1" and the second with "100", separated by a minus sign. To the right is a button labeled "Пуск". Below the input fields are three radio buttons: "поиск нижней границы", "поиск верхней границы", and "отображение". The "поиск нижней границы" option is selected.

Рисунок 4.3 – Запуск расчета при режиме по границам

5 Отображение результатов расчета

Для режимов автоматический и по границам результаты отображаются в окне с результатами после завершения расчетов. Для режима ручной необходимо указать, какой из полученных результатов необходимо отобразить.

Окно с результатами содержит экспериментальные и расчетные зависимости «длина трещины от количества циклов нагружения», «размах КИН от длины трещины» и «скорость роста трещины усталости от размаха КИН». Зависимость «скорость роста трещины усталости от размаха КИН» строится в логарифмических координатах.

Приводятся зависимости изменения критериев и свойств трещиностойкости от количества отброшенных точек или от количества добавленных точек. Данные графики не отображаются при задании режима расчета «по границам».

В «результатах расчета» приводятся полученные свойства трещиностойкости и границы, в пределах которых они определены.

Для ручного режима расчетные зависимости «длина трещины от количества циклов нагружения», «размах КИН от длины трещины» и «скорость роста трещины усталости от размаха КИН» строятся после задания «отображение», указания начальной и конечной точек (замеров) и нажатия кнопки «Пуск» (рисунок 5.1).

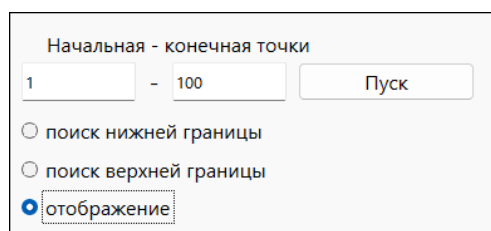


Рисунок 5.1 – Построение результатов

6 Программа «Расчет размаха КИН»

Программа «Расчет размаха КИН» позволяет определять размах КИН по длине трещины или длину трещины по размаху КИН для компактного образца на внецентренное растяжение и прямоугольного образца на трехточечный изгиб.

Необходимую систему измерений необходимо устанавливать в строке меню.

The software interface is titled "Размах КИН". It is divided into several sections:

- Тип образца** (Specimen type): A dropdown menu showing "C(T) specimen".
- Геометрия образца** (Specimen geometry):
 - $W = 0,01$ мм
 - $B = 0,01$ мм
 - $a_0 = 0,0000$ мм
- Параметры нагружения** (Loading parameters):
 - $P_{max} = 0,01$ кгс
 - $R = 0,01$
- Расчет** (Calculation): A button to perform the calculation.
- Выбор метода** (Method selection): Two radio buttons: "длины трещины" (crack length) and "размаха КИН" (KIN range). The "размаха КИН" option is selected.
- Результаты** (Results):
 - $L = 0,0000$ мм
 - $\Delta K = -$ кгс/мм^{3/2}
- Diagram**: A schematic of a C(T) specimen. It shows a rectangular specimen with a central notch and a crack. Dimensions are labeled: $1,2W$ for the total height, W for the width, B for the thickness, L for the crack length, and a_0 for the notch depth. Forces P are applied at the top and bottom.

Рисунок 6.1 – Программа «Расчет размаха КИН»

7 Программа «Расчет средних значений»

Программа «Расчет средних значений» позволяет определять средние значения свойств трещиностойкости (коэффициенты уравнения Пэриса) для каждой температуры.

В строке «Путь к файлу» указывается путь к файлу, содержащему свойства трещиностойкости для каждого образца. Файл с исходными данными должен быть составлен в соответствии с требованиями раздела 8.5.

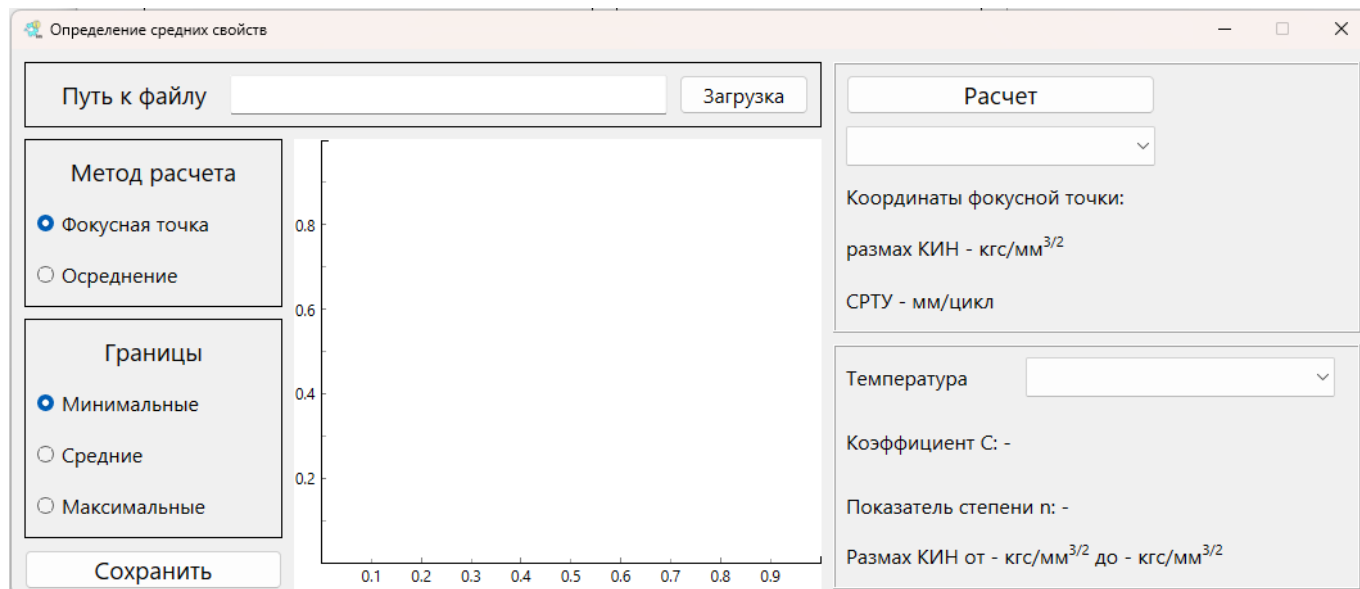


Рисунок 7.1 – Программа «Расчет средних значений»

Перед расчетом необходимо задать настройки решения: установить «метод расчета» и «границы» расчета.

Фокусная точка. Средние свойства трещиностойкости определяются на основе средних значений показателя степени уравнения Пэриса для каждой температуры и координат фокусной точки.

Осреднение. Средние свойства трещиностойкости определяются на основе осредненных зависимостей длины трещины от количества циклов нагружения для каждой температуры.

Минимальные. Нижняя граница определяется как максимальная величина размаха КИН, верхняя граница – минимальная величина размаха КИН.

Средние. Нижняя и верхняя границы определяются как средние значения размахов КИН.

Максимальные. Нижняя граница определяется как минимальная величина размаха КИН, верхняя граница – максимальная величина размаха КИН.

Координаты фокусной точки определяются только для метода расчета «фокусная точка».

По результатам расчета определяются средние свойства трещиностойкости для каждой температуры.

При сохранении результатов расчета создается файл в соответствии с разделом 8.6.

8 Форматы файлов

Исходные файлы могут иметь расширение *.txt и *.csv. Результаты расчета программы сохраняются в формате *.txt. В разделе приведены требования к составлению файлов с исходными данными и форма записи результатов расчетов.

8.1 Файл с исходными данными образца

Файл с исходными данными образца должен содержать экспериментальную зависимость «количество циклов нагружения – длина трещины».

В первой строке задаются названия столбцов в произвольной форме.

Числа могут задаваться как с запятой, так и с точкой. Необходимо указывать полную длину трещины (с учетом длины концентратора). Между числами должен быть разделитель типа пробел или табуляция.

Последовательность «количество циклов нагружения» должна быть возрастающая: $N_i < N_{i+1}$. Для одного значения количества циклов не может существовать два разных значения длины трещины.

Последовательности «количество циклов нагружения» и «длина трещины» должны содержать не отрицательные значения.

Количество циклов нагружения	Длина трещины
N_1	l_1
N_2	l_2
...	...

Рисунок 8.1 – Содержание файла с исходными данными образца

8.2 Файл с зависимостью размаха нагружения от длины трещины

Файл с зависимостью размаха нагружения от длины трещины должен содержать зависимость «размах нагружения – длина трещины».

В первой строке задаются названия столбцов в произвольной форме.

Числа могут задаваться как с запятой, так и с точкой. Необходимо указывать полную длину трещины (с учетом длины концентратора). Между числами должен быть разделитель типа пробел или табуляция.

Последовательность «длина трещины» должна быть возрастающая: $l_i < l_{i+1}$. Для одного значения длины трещины не может существовать два разных значения размаха нагружения.

Последовательности «размах нагружения» и «длина трещины» должны содержать не отрицательные значения.

Длина трещины	Размах нагружения
l_1	ΔP_1
l_2	ΔP_2
...	...

Рисунок 8.2 – Содержание файла с зависимостью размаха нагружения от длины трещины

Значения длин трещин и/или их количество может не совпадать со значениями и/или количеством экспериментальных данных.

Зависимость размаха нагружения от длины трещины интерполируется кубическим сплайном.

8.3 Файл с зависимостью размаха КИН от длины трещины

Файл с зависимостью размаха КИН от длины трещины должен содержать зависимость «размах КИН – длина трещины».

В первой строке задаются названия столбцов в произвольной форме.

Числа могут задаваться как с запятой, так и с точкой. Необходимо указывать полную длину трещины (с учетом длины концентратора). Между числами должен быть разделитель типа пробел или табуляция.

Последовательность «длина трещины» должна быть возрастающая: $l_i < l_{i+1}$. Для одного значения длины трещины не может существовать два разных значения размаха КИН.

Последовательности «размах КИН» и «длина трещины» должны содержать не отрицательные значения.

Длина трещины	Размах КИН
l_1	ΔK_1
l_2	ΔK_2
...	...

Рисунок 8.3 – Содержание файла с зависимостью размаха КИН от длины трещины

Значения длин трещин и/или их количество может не совпадать со значениями и/или количеством экспериментальных данных.

Зависимость размаха КИН от длины трещины интерполируется кубическим сплайном.

8.4 Файл с результатами расчета свойств трещиностойкости

Файл с результатами содержит информацию о режиме расчета и выбранных критериях расчета:

Type of calculation: ...

Selected criteria: ...

свойства трещиностойкости (для режимов расчета автоматический и по границам):

Coefficient C Exponent n

...

нижняя граница (для режимов расчета автоматический и по границам):

length_min cycle_min delta SIF_min V_min start point

...

верхняя граница (для режимов расчета автоматический и по границам):

length_max cycle_max delta SIF_max V_max end point

...

значения критериев для вычисленных свойств трещиностойкости (для режимов расчета автоматический и по границам):

Values of criteria

cycle_end = ...

R_square = ...

cycle_all = ...

comparison = ...

результаты итерационных процедур (для режима расчета ручной):

Search for the lower bound. / Search for an upper bound.

Start point End point Coefficient C Exponent n Criteria: Cycle end Criteria: R square Criteria: Cycle all Criteria: comparison

...

Далее в файле приводится информация об образце, зачитанной в окне ввода.

При вычислении нижней и верхней границ результаты определения верхней границы приводятся после информации об образце.

8.5 Файл со свойствами трещиностойкости образцов

Файл со свойствами трещиностойкости образцов содержит коэффициенты уравнения Пэриса, размахи КИН, в пределах которых они определены, и температура для каждого образца.

В первой строке задаются названия столбцов в произвольной форме.

Числа могут задаваться как с запятой, так и с точкой. Между числами должен быть разделитель типа пробел или табуляция.

Все последовательности должны содержать не отрицательные значения.

Коэффициент C	Показатель степени n	Размах КИН мин	Размах КИН макс	Температура
C_1	n_1	ΔK_{1_min}	ΔK_{1_max}	T_1
C_2	n_2	ΔK_{2_min}	ΔK_{2_max}	T_2
...

Рисунок 8.4 – Содержание файла со свойствами трещиностойкости образцов

8.6 Файл с результатами расчета средних значений свойств трещиностойкости

Файл с результатами содержит информацию о методе расчета и границах расчета:

Mode: ...
Border sif: ...

количестве образцов:

The number of specimens: ...

температуры и количество образцов для каждой температуры:

Temperature	Number specimens
T_1	N_1
T_2	N_2
...	...

координаты фокусной точки (при задании метода расчета «фокусная точка»):

delta K_fp V_fp
... ..

средние свойства трещиностойкости, границы, в пределах которых они определены, и температуру:

Coefficient C	Exponent n	delta K_min	delta K_max	Temperature
C_1	n_1	ΔK_{1_min}	ΔK_{1_max}	T_1
C_2	n_2	ΔK_{2_min}	ΔK_{2_max}	T_2
...

8.7 Файл с исходными данными образца, записанный испытательным оборудованием

Файл с исходными данными, созданным испытательным оборудованием, содержит результаты замеров в соответствии с рисунком 8.5. Первые строки могут быть пустыми.

da/dN; [nm/cycles];	deltaK; [MPa-m ^{1/2}];	crackLength; [mm];	Total cycles; ;	Pmax; [kN];	Pmin; [kN];	Pmean; [kN];	Pa; [kN];	R; ;	Frequency; [Hz];
-----;	-----;	-----;	-----;	-----;	-----;	-----;	-----;	-----;	-----;
da/dN_1	ΔK_1	L_1	N_1	P_{max_1}	P_{min_1}	P_{mean_1}	Pa_1	R_1	F_1
da/dN_2	ΔK_2	L_2	N_2	P_{max_2}	P_{min_2}	P_{mean_2}	Pa_2	R_2	F_2
...

EBC; [mm/kN];	V/CorrelationCoeff; [V];	V/Vr; ;
-----;	-----;	-----;
EBC_1	V_1	V/Vr_1
EBC_2	V_2	V/Vr_2
...

Рисунок 8.5 – Содержание файла с исходными данными образца, созданным испытательным оборудованием

Числа могут задаваться как с запятой, так и с точкой. Необходимо указывать полную длину трещины (с учетом длины концентратора). Между числами должен быть разделитель типа пробел или табуляция. В конце числа может стоять точка с запятой.

Последовательность «количество циклов нагружения» должна быть возрастающая: $N_i < N_{i+1}$. Для одного значения количества циклов не может существовать два разных значения длины трещины. Последовательности «количество циклов нагружения» и «длина трещины» должны содержать не отрицательные значения.