



National Research
**Tomsk
State
University**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)**
Физико-технический факультет



**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

**ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ
ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ СОЗДАНИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА
ОБРАЗЦА С ТРЕЩИНОЙ**

Руководитель ВКР

Канд. физ.-мат. наук А.А. Козулин

Автор работы

Студент группы № 102009 Насибуллин А. Р.

Томск 2022



ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ СОЗДАНИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ОБРАЗЦА С ТРЕЩИНОЙ

Цель работы: провести оценку изменения параметров трещиностойкости и НДС алюминиевого сплава для создания цифрового двойника образца с использованием численного моделирования на основе экспериментальных данных по внецентренному растяжению компактного образца с трещиной.





ВВЕДЕНИЕ



Трещины хорошо известны в качестве одной из основных причин разрушения инженерных сооружений. Они распространены повсеместно. Так же в г. Томск разрабатываются программные комплексы, которые способны автоматически идентифицировать трещины, а так же наблюдать за ними в конструкциях.

Для полной картины описания НДС трещины необходимо знать параметры, описывающие трещиностойкость, поэтому крайне важно понять механизмы разрушения конструкций, подвергающихся образованию трещин и анализировать передовые критерии трещиностойкости на основе механики разрушения для оценки структурной целостности с целью создания цифрового двойника на основе сертифицированного программного обеспечения, чем и обусловлена актуальность данной работы.



Для создания цифрового двойника компактного образца с наведенной трещиной при внецентренном растяжении было использовано 4 метода исследования.



- Эксперимент на растяжение плоских образцов
- Эксперимент на растяжение компактных образцов с предварительно наведенной трещиной
- Численное моделирование задачи о исследовании НДС компактного образца при внецентренном растяжении
- Методика создания цифрового двойника компактного образца с использованием результатов обработки оптических изображений.



Материал исследования

Материал исследования - Алюминиевый сплав Д16.



Таблица 1. Химический состав алюминиевого сплава Д16.

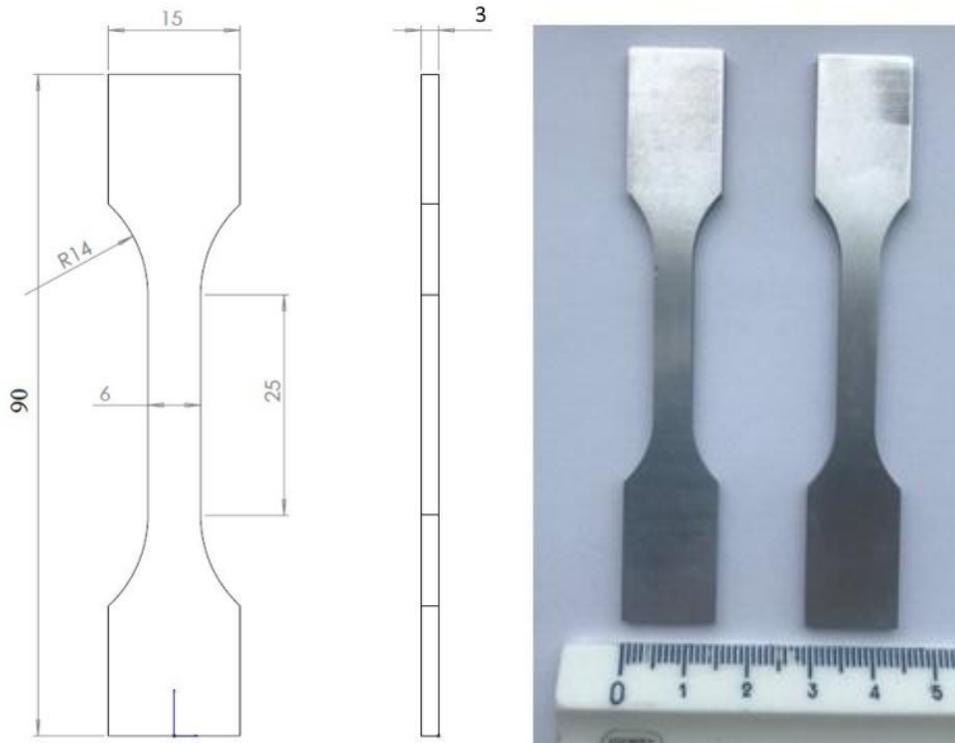
Fe	Si	Mn	Ni	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Примесей
До 0.5	До 0.5	0.3-0.9	До 0.1	До 0.1	90.8-94.7	3.8-4.9	1.2-1.8	До 0.3	прочие, каждая 0.05; всего 0.15



Эксперимент на растяжение плоских образцов из алюминиевого сплава Д16



Эксперимент на растяжение плоских образцов из алюминиевого сплава Д16



а – чертеж плоских образцов; б – внешний вид шлифованных образцов

Рисунок 1 – Внешний вид плоских образцов для проведения испытаний по одноосному растяжению исследуемого сплава Д16

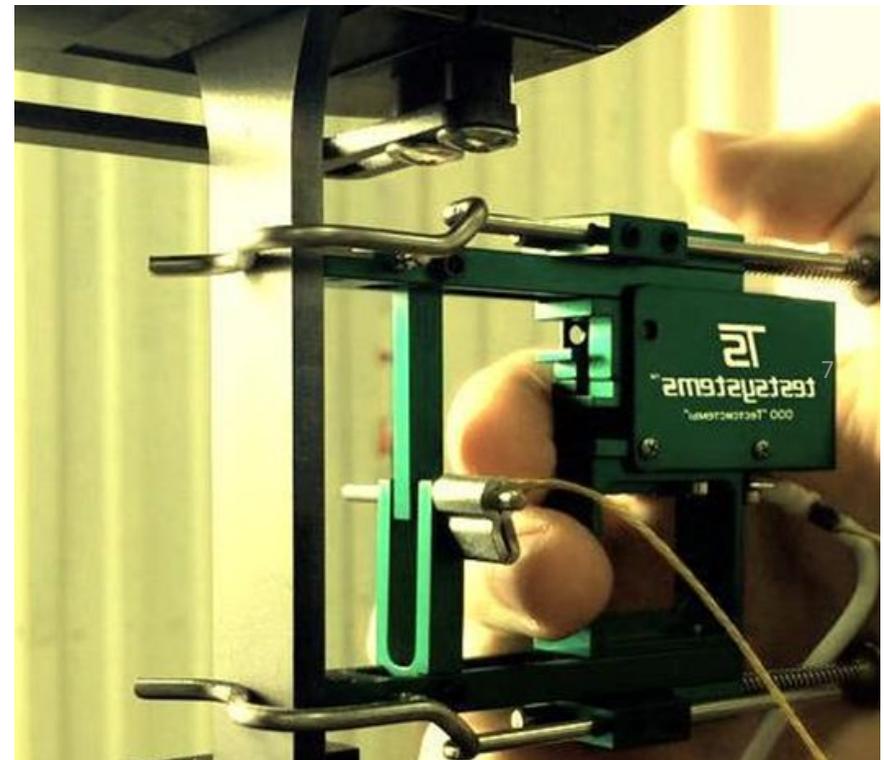


Рисунок 2 - Фотография образца на растяжение с контактным экстензометром

Эксперимент на растяжение плоских образцов из алюминиевого сплава Д16

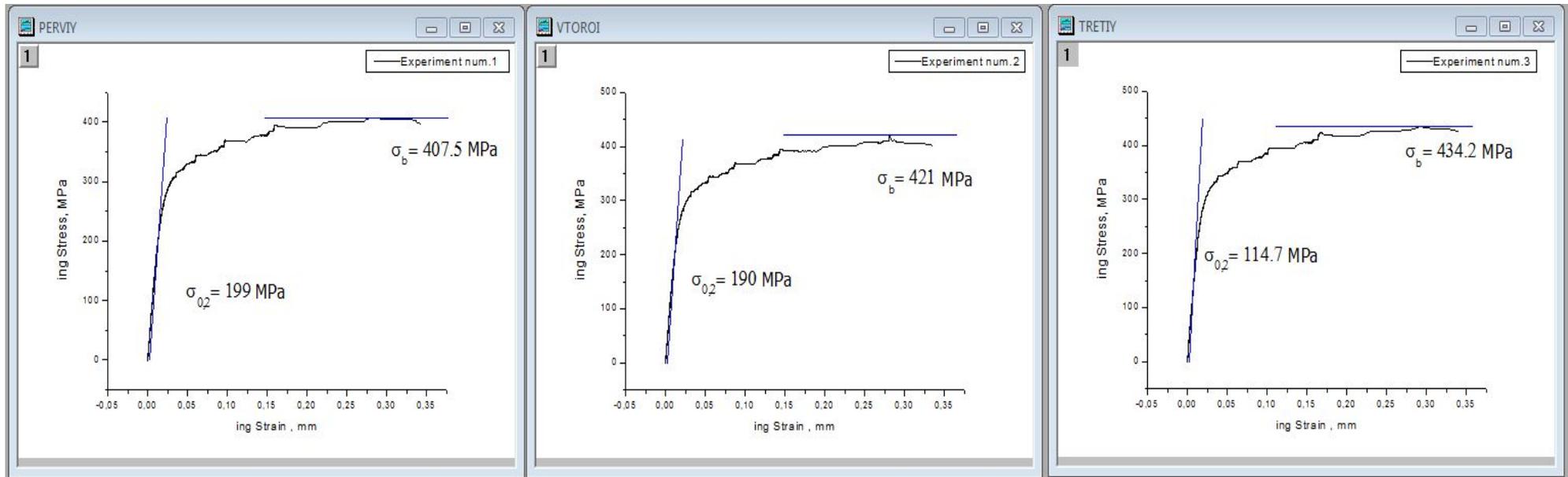


Рисунок 3 - Определение механических свойств сплава.

Таблица 1 - Механические свойства алюминиевого сплава Д16.

Номер кривой	Условный предел текучести $\sigma_{0.2}$, МПа	Временное сопротивление σ_b , МПа	Относительное удлинение Δl , mm
1	199	408	0,343
2	190	421	0,336
3	115	434	0,341

Эксперимент на растяжение плоских образцов из алюминиевого сплава Д16

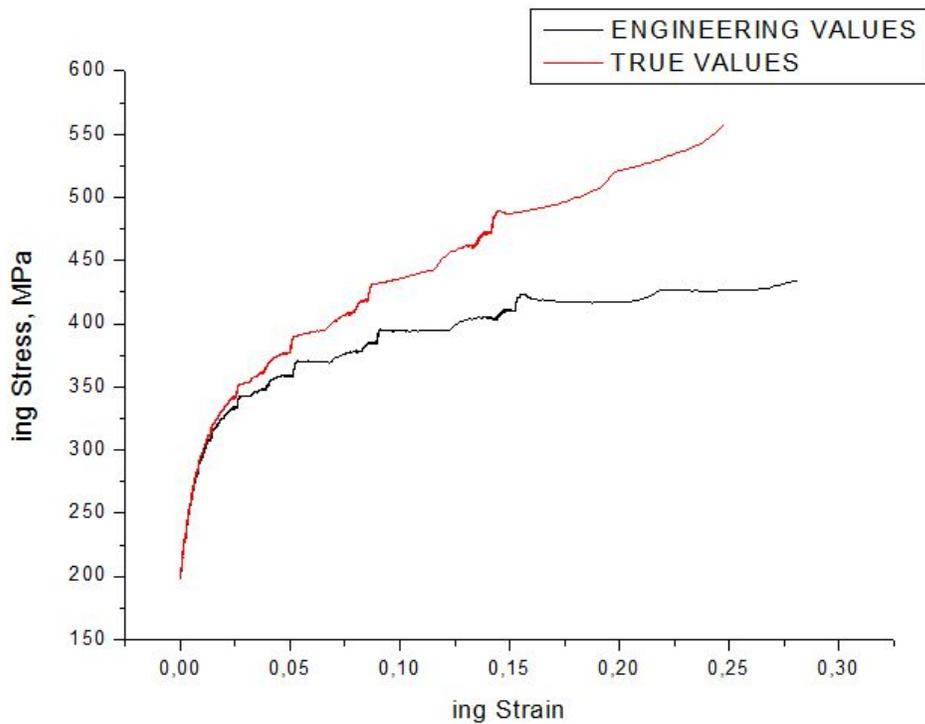


Рисунок 3 - σ - ε диаграммы для инженерных (черный цвет) и истинных (красный) значений пластического поведения образца.

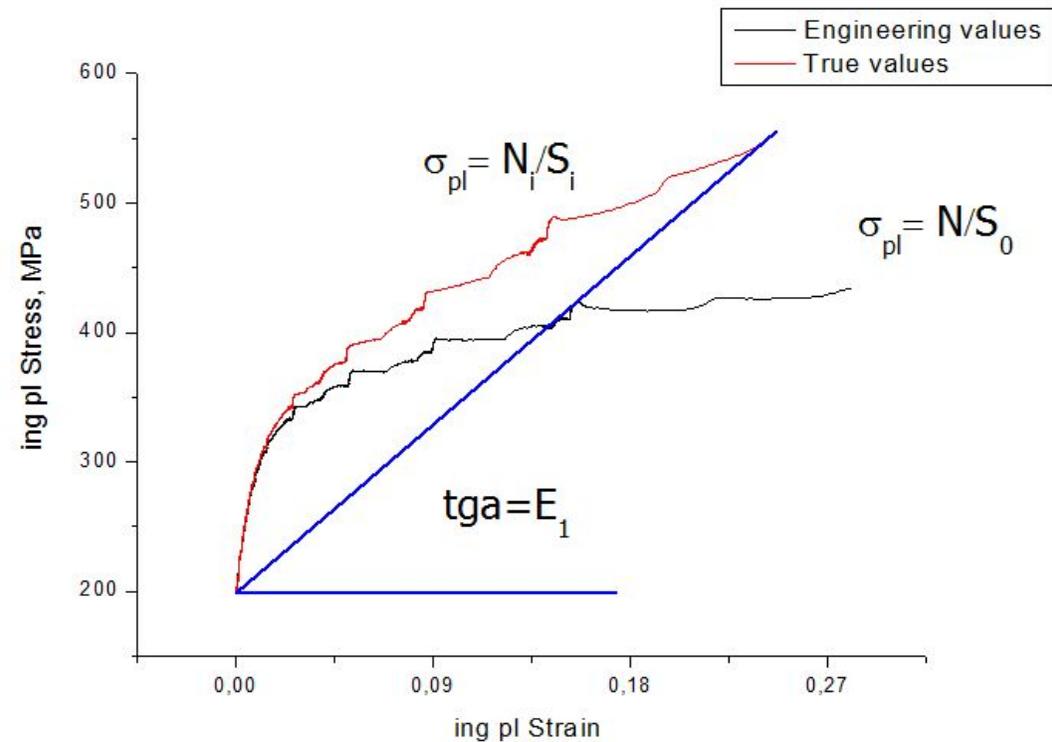


Рисунок 4 - Нахождение коэффициента деформационного упрочнения.



Эксперимент на растяжение компактных образцов из алюминиевого сплава Д16 с предварительно наведенной трещиной



Эксперимент на растяжение компактных образцов из алюминиевого сплава Д16 с предварительно наведенной трещиной

Для проведения натурных экспериментов использовалась универсальная сервогидравлическая испытательная система Biss 1500 с датчиком усилия Динаселл, контактным экстензометром и датчиком раскрытия Кистлер в соответствии с ASTM стандартом. Во время проведения эксперимента образец подвергался внецентренному растяжению с автоматической регистрацией диаграммы нагрузка-раскрытие берегов надреза образца. Эксперимент проводился до достижения нагружающего усилия 9100 Н – стараясь не допустить роста трещины.

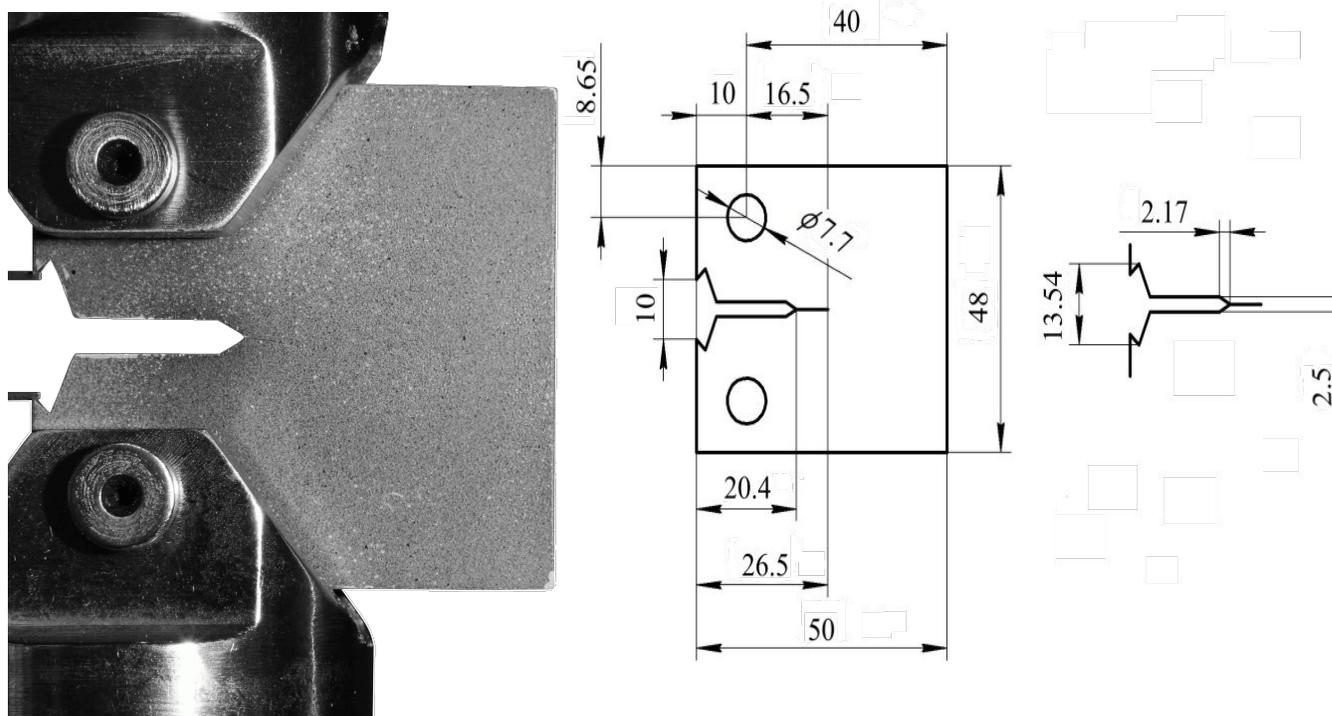


Рисунок 5 - Фотография компактного образца в захватах испытательной машины во время проведения эксперимента и его чертеж

Эксперимент на растяжение компактных образцов из алюминиевого сплава Д16 с предварительно наведенной трещиной

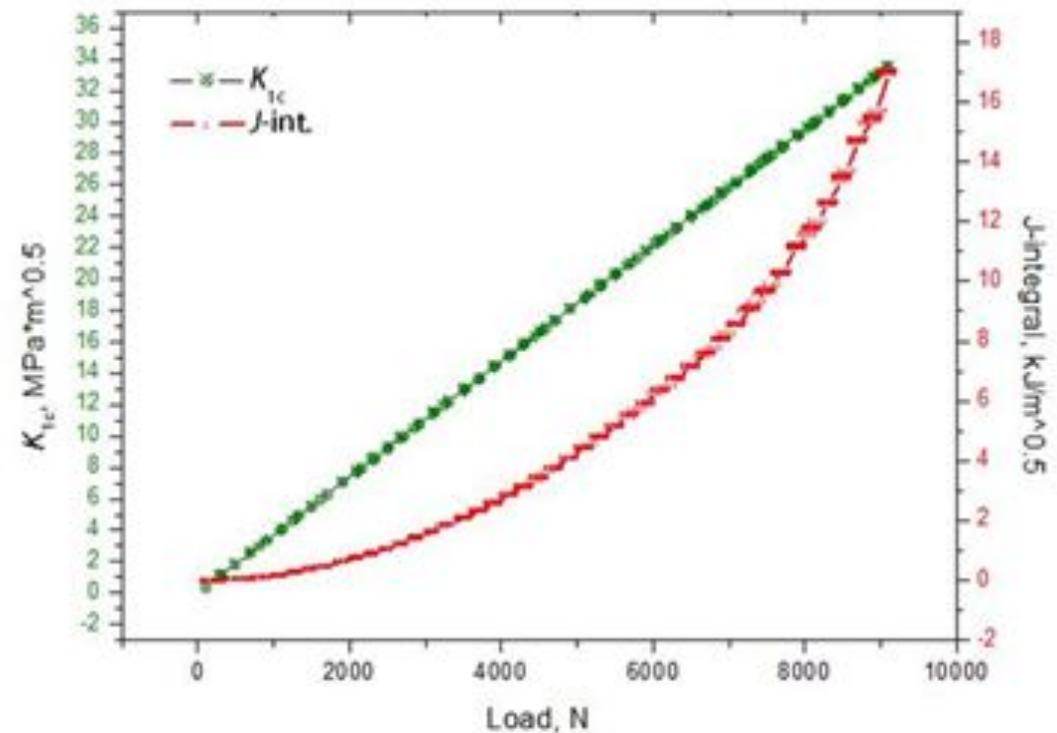
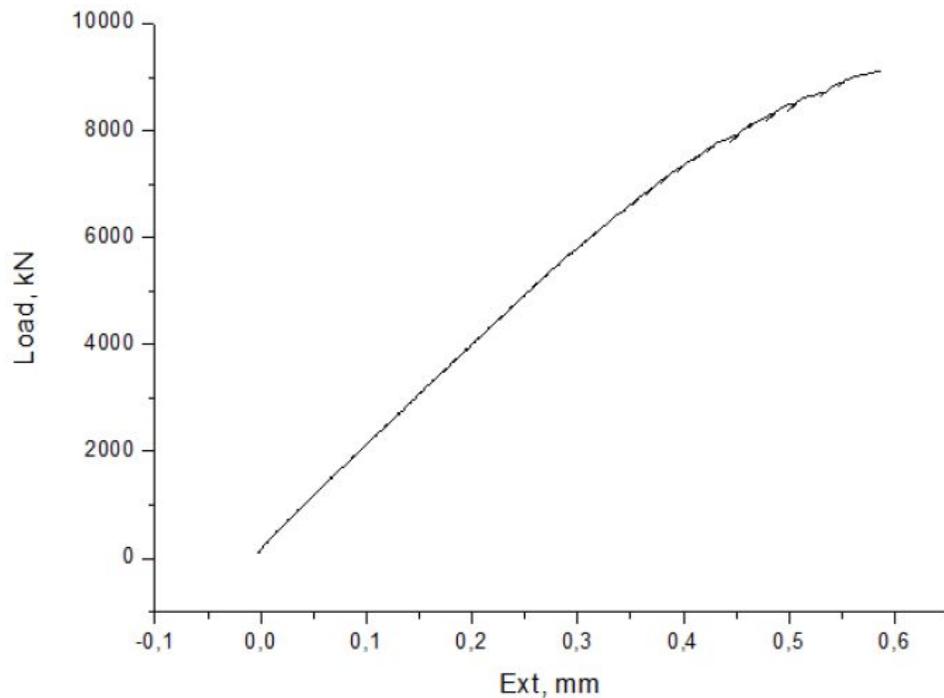


Рисунок 6 – Диаграмма нагрузки – раскрытия берегов надреза образца

Рисунок 7 - Зависимости изменения величины K_{1c} и J-интеграла от приложенного усилия



**Численное моделирование задачи о
исследовании напряженно-
деформированного состояния компактного
образца при внецентренном растяжении**



Метод внецентренного растяжения компактного образца. Численное моделирование.

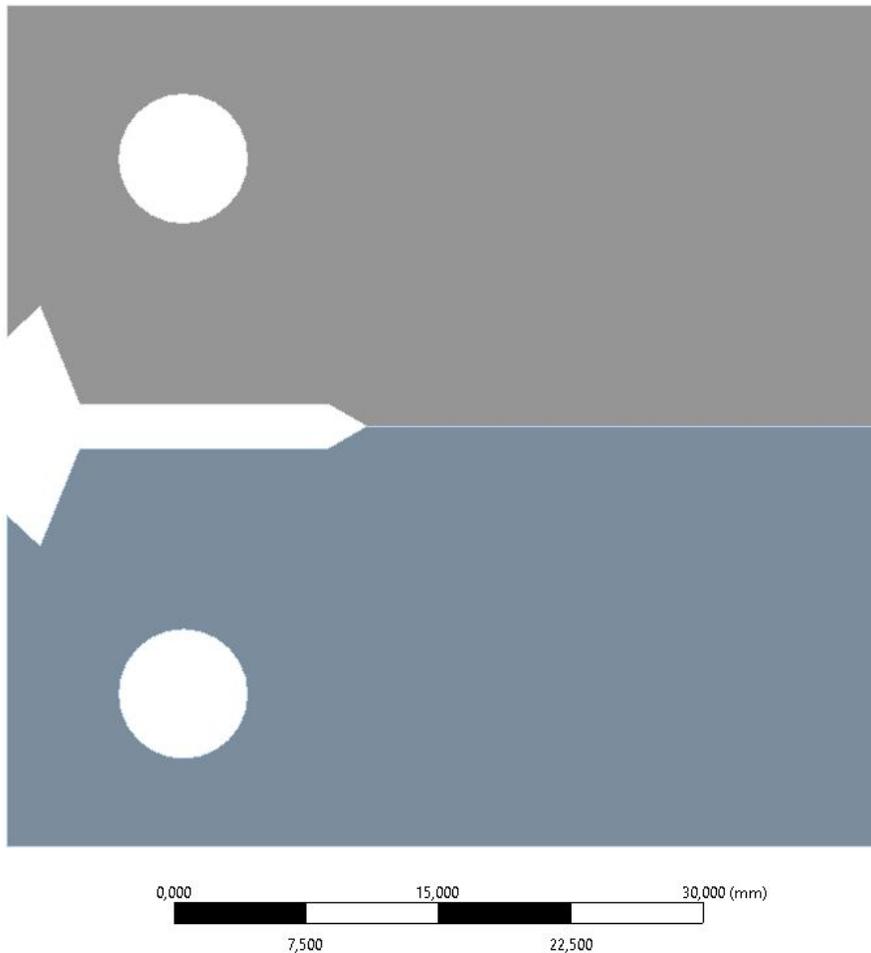


Рисунок 7 – Геометрическая модель
образца

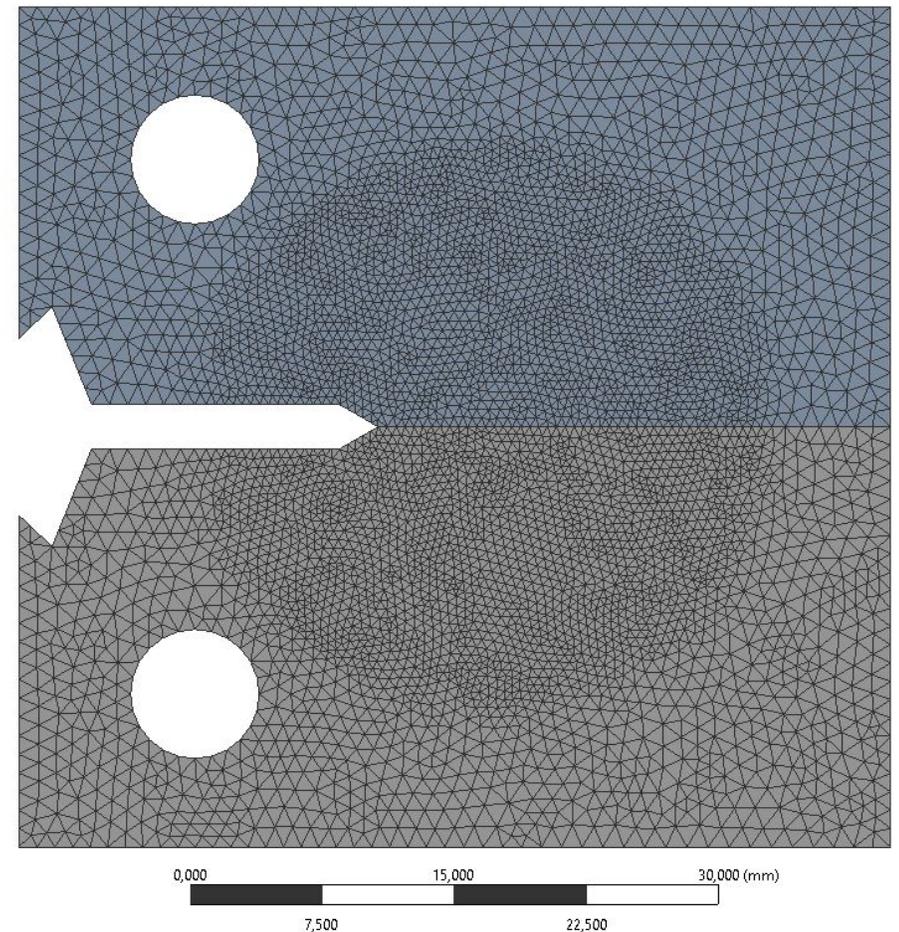


Рисунок 8 - Сеточная модель образца



Математическая постановка задачи



Математическая модель для решения задачи представлена в виде систем уравнений в рамках подхода механики сплошной среды, которые включают в себя:

Уравнения равновесия:

$$\nabla_j \sigma_{ij} + \rho f_i = 0, \quad (1)$$

Соотношений Коши, описывающих связь между компонентами вектора перемещений и компонентами тензора деформации:

Закон Гука:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

где $\varepsilon_{kk} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$, λ и μ — коэффициенты Ляме, δ_{ij} — символ Кронекера.

Прямой метод вычислений предполагает непосредственное нахождение J -интеграла по зависимости

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - \sigma_{ij} n_j \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right), \quad (3)$$

где Γ — контур, охватывающий вершину трещины, начинающийся на нижней части поверхности трещины и заканчивающийся на верхней; W — плотность энергии деформации; — удельная потенциальная энергия деформации (в точке контура);



ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

$$U_{x,y}|_{L_1} = 0, \quad F_y|_{L_2} = F_i, \quad F_i = 0 - 9 \text{ кН.}$$

где $U_{x,y}$ - компоненты вектора перемещений на соответствующих плоскостях модели.

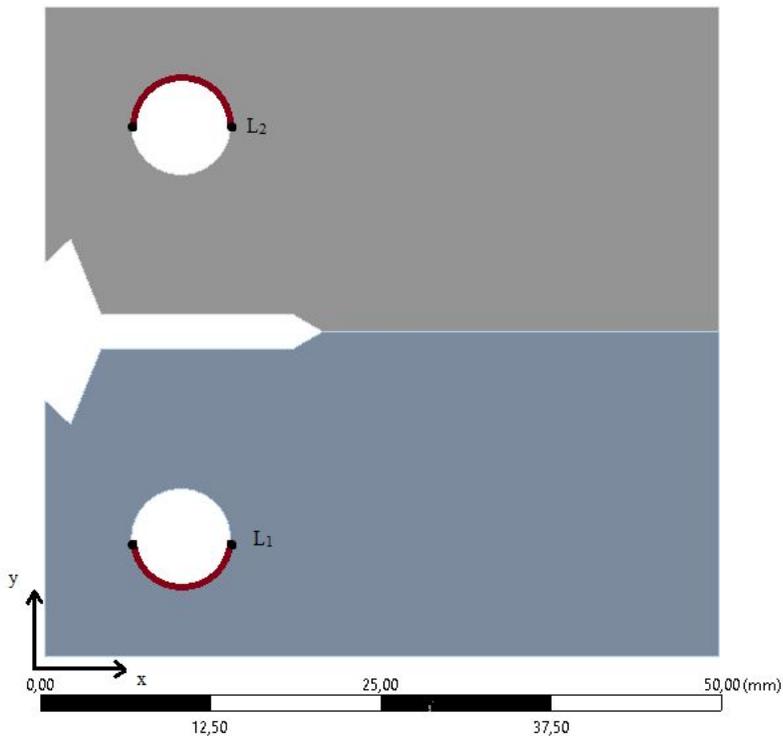


Рисунок 9 - Конечно элементная модель

БИЛИНЕЙНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} \sigma^{el} = E\varepsilon, & \varepsilon_{ij} \in \varepsilon^{el} \\ \sigma^{pl} = \sigma_{0.2} + E_1\varepsilon^{pl}, & \varepsilon_{ij} \in \varepsilon^{pl} \end{cases}$$

Где

$\sigma_{0.2}$ -условный предел текучести

$E = \tan \alpha$ -модуль юнга

$E_1 = \tan \beta$ -коэффициент упрочнения

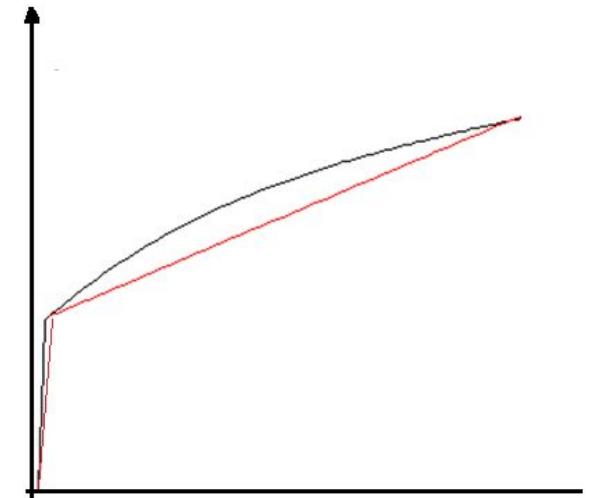


Рисунок 10 - Схематическая диаграмма аппроксимации

Метод внецентренного растяжения компактного образца. Численное моделирование.

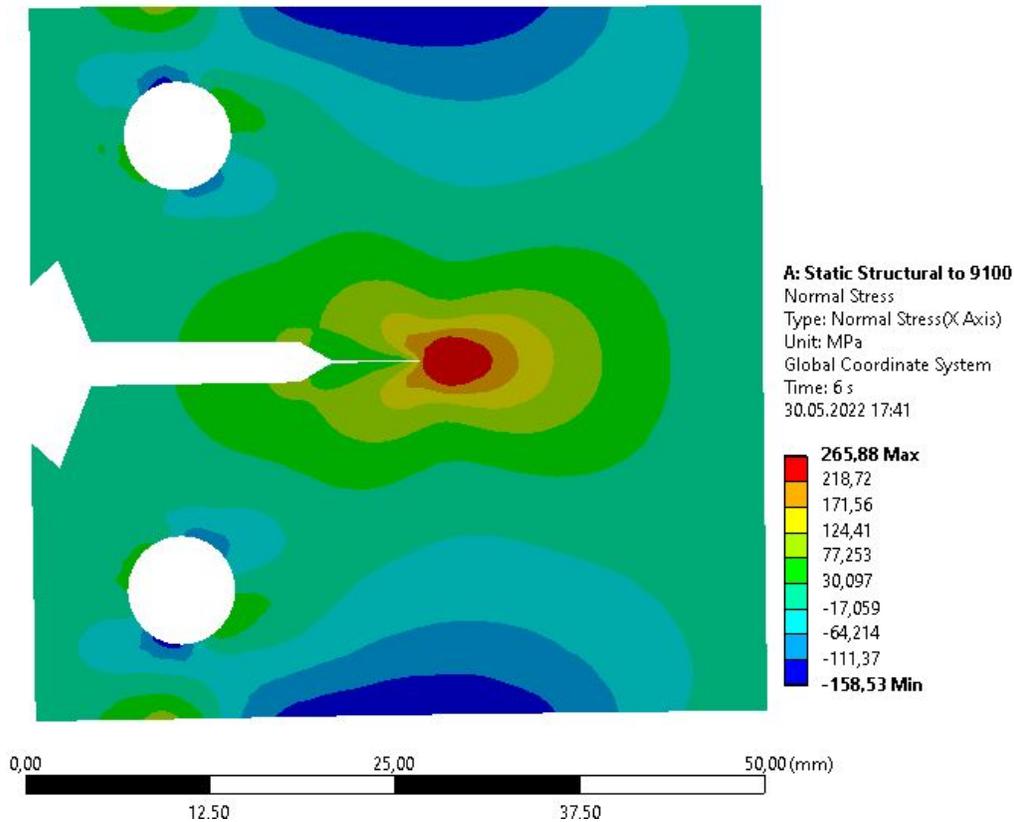


Рисунок 11 - Поля распределения интенсивности напряжений в компактном образце при максимальном нагружающем усилии 9100 Н

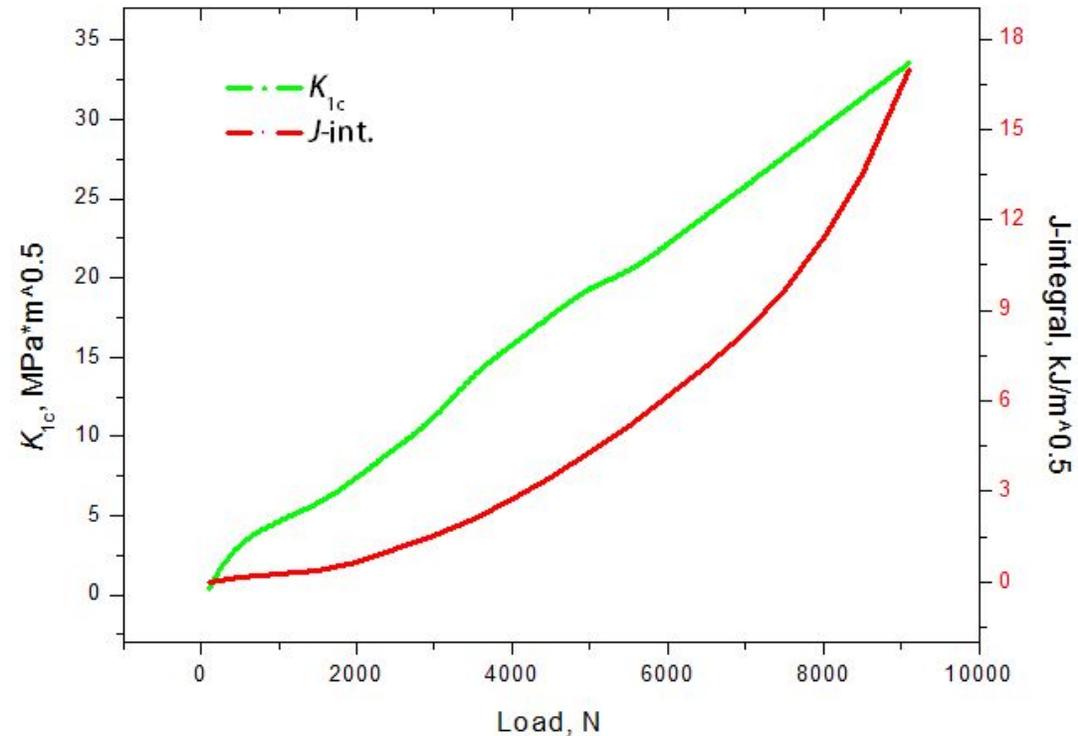


Рисунок 12 - Зависимость изменения величин K_{Ic} и J -интеграла от приложенных усилий



Метод внецентренного растяжения компактного образца. Численное моделирование.



Верификация созданной модели для растяжения компактного образца.

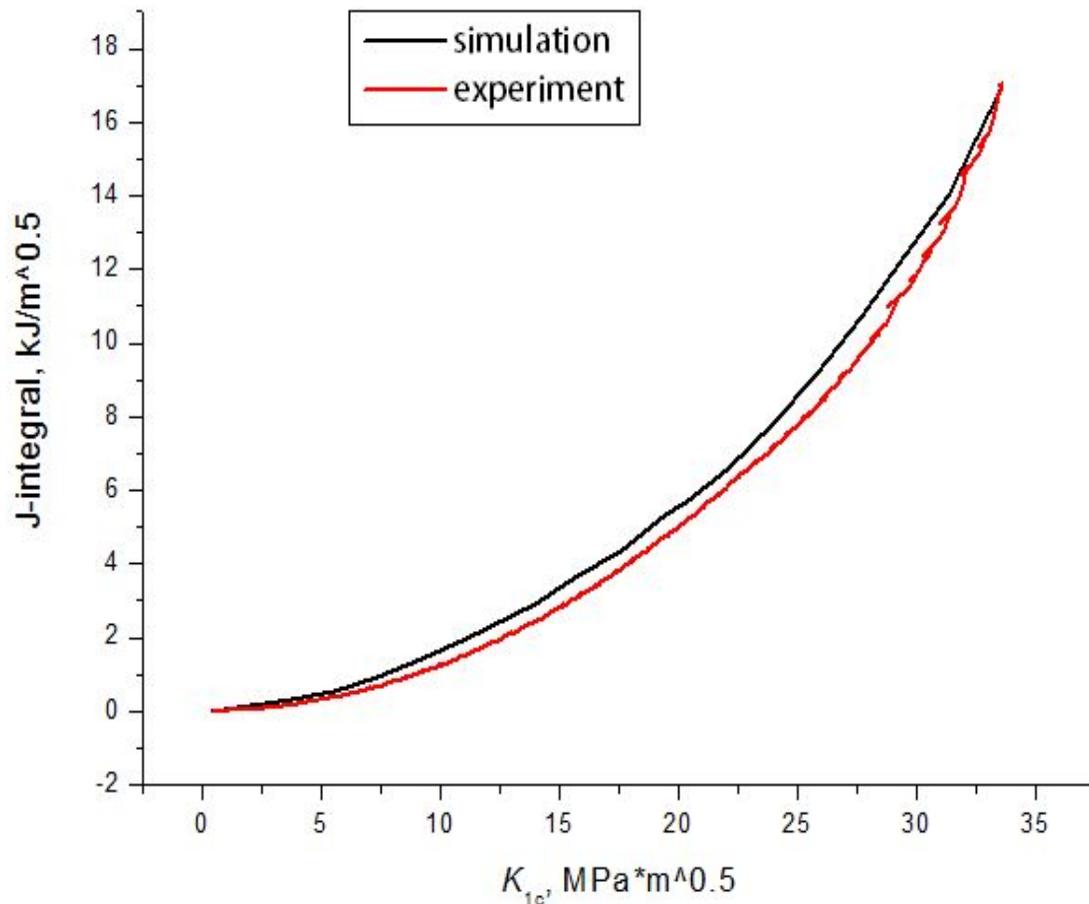


Рисунок 13 - Сравнение результатов, полученных численно и экспериментально



**Методика создания цифрового двойника
компактного образца с использованием
результатов обработки оптических
изображений.**



Методика создания цифрового двойника компактного образца с использованием результатов обработки оптических изображений.



В Институте физики прочности и материаловедения СО РАН научным коллективом под руководством профессора Панина С.В. реализован лабораторный макет системы технического стереозрения (СТСЗ), который включает две цифровые фотокамеры Canon EOS 700D, закрепленные на штанге с возможностью регулировки расстояния и угла между камерами (без использования дополнительных модулей).

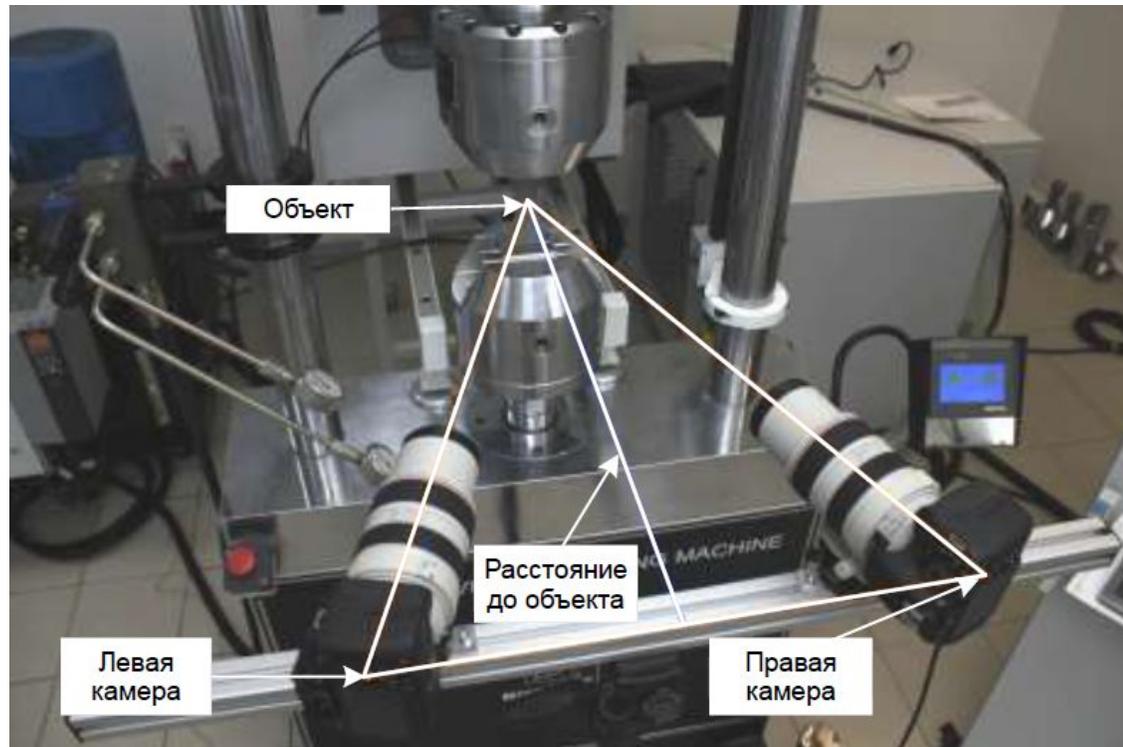


Рисунок 14 - Лабораторный макет системы технического стереозрения



Методика создания цифрового двойника компактного образца с использованием результатов обработки оптических изображений, моделирование.

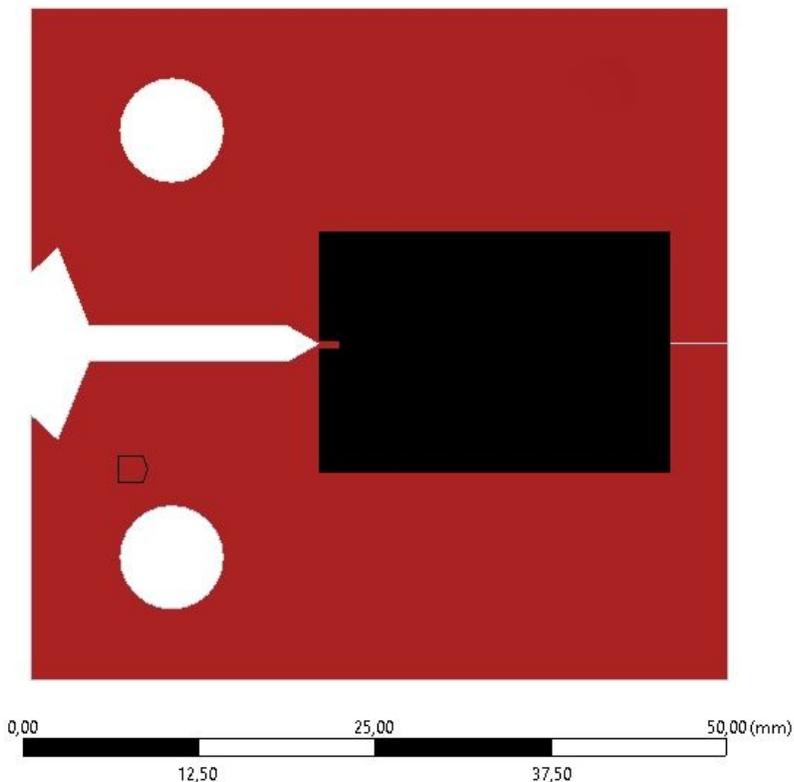


Рисунок 15 – Отображение поля реперных точек на образце

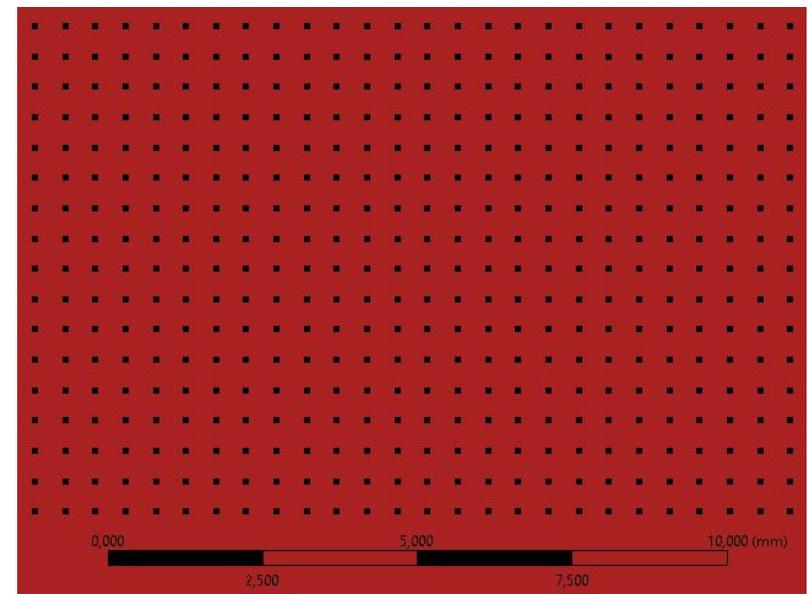


Рисунок 16 – Увеличенное изображение участка поля реперных точек на образце

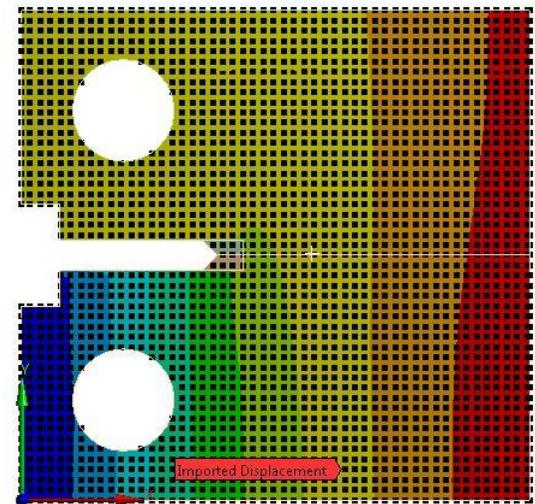
Методика создания цифрового двойника компактного образца с использованием результатов обработки оптических изображений.

Таблица 3 – Значения J-интеграла для различного шага реперных точек

Load, kN	J - интеграл, N/m					
	MS10	MS10fromvf	MS10fromvf filtr	MS50	MS50fromvf	MS50fromvf filtr
1	117	106	108	103	104	95
5	2958	2687	2771	2835	2835	2625
10	11958	11056	12442	15060	15060	14860
13	22773	21427	24313	24750	24754	24429

B: Static Structural 2
 Imported Displacement
 Time: 3, s
 Y Component (Global Coordinate System)
 Unit: mm
 31.01.2019 11:33

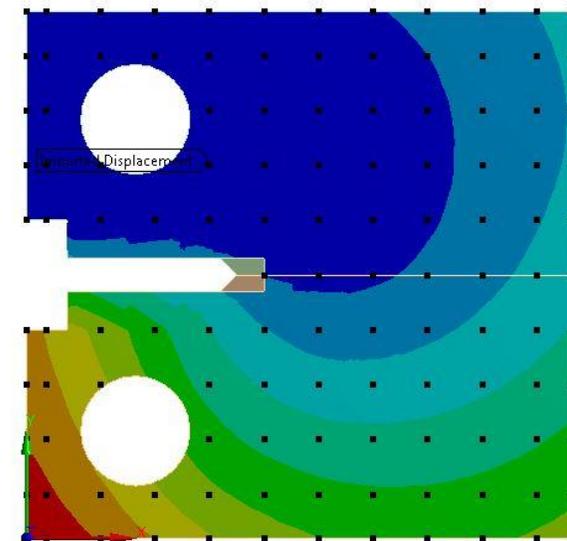
0.13689 Max
 0,081742
 0,026594
 -0,028553
 -0,083701
 -0,13885
 -0,194
 -0,24914
 -0,30429
 -0.35944 Min



0,00 12,50 25,00 37,50 50,00

B: Static Structural 2
 Imported Displacement
 Time: 3, s
 Total
 Unit: m
 01.02.2019 13:49

Automatic
 0,00039816
 0,00034847
 0,00029879
 0,0002491
 0,00019942
 0,00014973
 0,00010004
 5,0357e-5
 6,7119e-7 Min



0,000 0,010 0,020 0,030 0,040 (m)

Рисунок 17 – Тестовая модель цифрового двойника для анализа



Верификация методики создания цифрового двойника компактного образца с использованием результатов обработки оптических изображений.



Через уравнения перемещений контактного датчика построена зависимость J -интеграла от нагрузки в разных условиях.

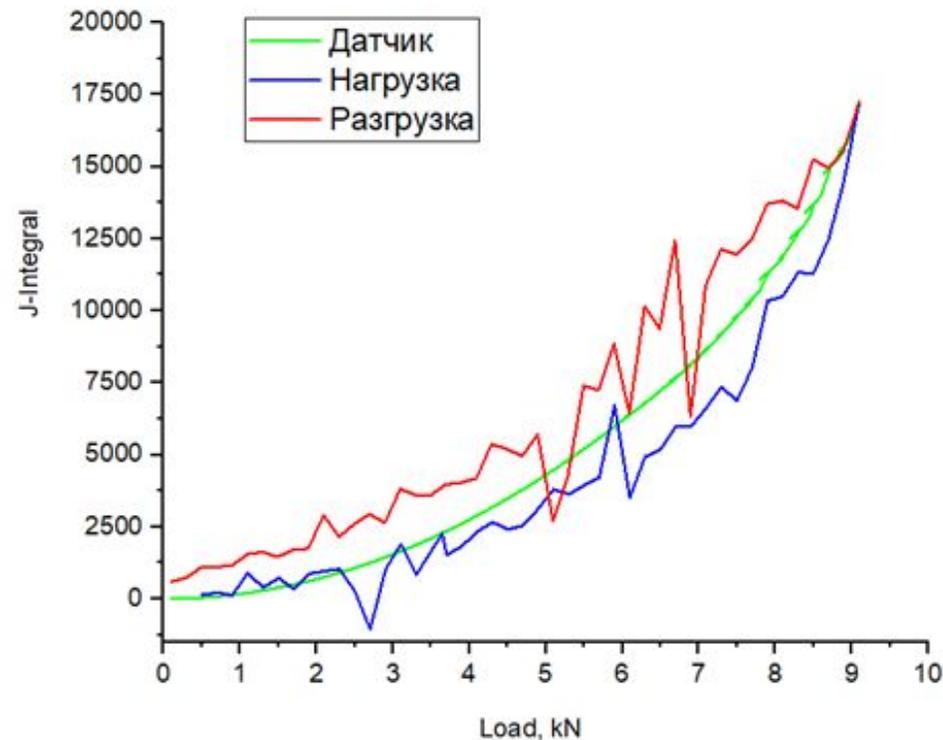


Рисунок 18 – Зависимость J -интеграла от нагрузки в разных условиях





ЗАКЛЮЧЕНИЕ



На основе комплекса комплекса проведенных исследований и построенных моделей создана модель цифрового двойника, позволяющая оценить напряженно-деформированное состояние в области трещины с применением метода цифровой корреляции изображений во времени без использования контактных методов.

Проверена адекватность данного цифрового двойника путем сравнения результатов экспериментов при одновременном использовании контактного экстензометра и путем фотографирования области трещины.

Описан алгоритм создания цифрового двойника для использования в дальнейшем на практике.



Спасибо за внимание!



**National Research
Tomsk State University**

36, Lenina Avenue, Tomsk, 634050, Russia
Tel.: +7 (3822) 529 852, fax: +7 (3822) 529 585
E-mail: rector@tsu.ru

www.tsu.ru

