

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 федеральное государственное автономное образовательное  
 учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий  
 Отделение материаловедения  
 Направление подготовки: *Материаловедение и технологии материалов*

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

| Тема работы   |  |
|---|--|
| Определение трещиностойкости малоразмерных образцов технического титана BT1-0 |  |

УДК 669.295.002.6:620.186

Студент

| Группа | ФИО                         | Подпись | Дата |
|--------|-----------------------------|---------|------|
| 4Б41   | Богданов Алексей Алексеевич |         |      |

Руководитель

| Должность                 | ФИО          | Ученая степень, звание  | Подпись | Дата |
|---------------------------|--------------|-------------------------|---------|------|
| Ведущий научный сотрудник | Дерюгин Е.Е. | д.ф.-м.н.,<br>профессор |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность             | ФИО            | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------------|----------------|------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель | Гаврикова Н.А. |                        |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО           | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|---------------|------------------------|---------|------|
| Ассистент | Раденков Т.А. |                        |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Руководитель ООП   | ФИО          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--|--------------|------------------------|---------|------|
| 22.03.01<br>Материаловедение<br>и технологии<br>материалов | Овечкин Б.Б. | к.т.н., доцент         |         |      |

**Планируемые результаты обучения по ООП 22.03.01  
Материаловедение и технологии материалов (бакалавриат)**

| Код результата | Результат обучения (выпускник должен быть готов)   |
|----------------|--|
|                | <i>Общекультурные компетенции</i>  |
| P1             | Способность применять основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социально-общественных и профессиональных задач, способность анализировать социально-значимые проблемы и процессы. Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе на иностранном языке.  |
| P2             | Демонстрировать понимание сущности и значения информации в развитии современного общества, владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации; использование для решения коммуникативных задач современных технических средств и информационных технологий.   |
| P3             | Способность самостоятельно применять методы и средства познания, обучения и самоконтроля, осознавать перспективность интеллектуального, культурного, нравственного, физического и профессионального саморазвития и самосовершенствования, уметь критически оценивать свои достоинства и недостатки.  |
| P4             | Способность эффективно работать в кооперации с коллегами, находить организационно-управленческие решения в нестандартных ситуациях и готовность нести за них ответственность, владеть основами общего и производственного менеджмента и использовать их в профессиональной деятельности.   |
| P5             | Демонстрировать знание правовых, социальных, экологических и культурных аспектов комплексной инженерной деятельности, осведомленность в вопросах охраны здоровья, использовать методы и приемы организации труда, обеспечивающие эффективное, экологически и технически безопасное производство.   |
|                | <i>Профессиональные компетенции</i>  |
| P6             | Умение использовать базовые знания математических и естественнонаучных дисциплин и дисциплин общепрофессионального цикла в объеме, необходимом для использования в профессиональной деятельности основных законов соответствующих наук, разработанных в них подходов, методов и результатов математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в комплексной инженерной деятельности с целью моделирования объектов и технологических процессов в машиностроении. |
| P7             | Умение использовать традиционные и новые технологические процессы, операции, оборудование, нормативные и методические материалы по технологической подготовке производства, качеству, стандартизации и сертификации изделий и процессов, умение выбора материалов для заданных условий эксплуатации с учетом требований технологичности, экономичности, надежности и долговечности, экологических последствий их применения.   |
| P8             | Умение применять основы высокотехнологичного инновационного менеджмента, в том числе малого бизнеса, владеть навыками в организации и техническом оснащении рабочих мест; разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, оценке рисков и определении мер по обеспечению экологической и технической безопасности разрабатываемых материалов, техники и технологий.   |
| P9             | Умение использовать принципы и методики комплексных исследований, испытаний и диагностики, обработки и модификации материалов, изделий и процессов их производства, включая стандартные и сертификационные испытания; умение применять технические средства для измерения и контроля основных параметров технологических процессов, свойств материалов и изделий из них.   |
| P10            | Умение применять современные информационно-коммуникационные технологии, глобальные информационные ресурсы в научно-исследовательской и расчетно-аналитической деятельности в области материаловедения и технологии материалов.   |
| P11            | Умение использовать на практике современные представления наук о материалах, взаимодействии материалов с окружающей средой, владение навыками сбора данных, изучения, анализа и обобщения научно-технической информации по тематике исследования, разработки и использования технической документации, основных нормативных документов по вопросам интеллектуальной собственности, подготовки документов к патентованию, оформлению ноу-хау.   |
| P12            | Способность комплексно оценивать и прогнозировать тенденции и последствия развития науки о материалах, на основании комплексной оценки формулировать научно-техническую проблему в области изготовления, диагностики и применения наноматериалов. Знание внутри- и междисциплинарных связей в сфере профессиональной деятельности.   |

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа новых производственных технологий  
Отделение материаловедения  
Направление подготовки *Материаловедение и технологии материалов*

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
(Подпись)                      \_\_\_\_\_ (Дата)                      Б.Б. Овечкин

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

| Группа | ФИО                         |
|--------|-----------------------------|
| 4Б41   | Богданов Алексей Алексеевич |

Тема работы:

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| Определение трещиностойкости малоразмерных образцов технического титана ВТ1-0 |                               |
| Утверждена приказом директора ИШ НПО  | Приказ № 1448/с от 02.03.2018 |

|  |  |
|--|--|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: |  |
|--|--|

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|  |   |
|--|---|
| <p><b>Исходные данные к работе</b><br/><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p> | <p>Целью работы является ознакомление с новой методикой определения трещиностойкости конструкционных материалов, разрабатываемой в лаборатории физической мезомеханики ИФПМ СО РАН, и проверка методики на примере технического титана ВТ1-0. Испытания проводятся методом расклинивания малоразмерных образцов с шевронным надрезом. По полученным данным строится диаграмма нагружения в координатах «сила давления на клин – смещение сторон надреза». В качестве основной характеристики трещиностойкости определяется удельная энергия разрушения.</p> |
|--|---|

|  |   |
|--|---|
| <p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b><br/> <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p> | <p>Обзор литературы по вопросу исследования трещиностойкости малоразмерных образцов.<br/> Постановка задачи, методика и материал исследования.<br/> Результаты исследования и их обсуждение.<br/> Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.<br/> Социальная ответственность.</p> |
|--|---|

|   |   |
|---|---|
| <p><b>Перечень графического материала (18 слайдов)</b><br/> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Введение</li> <li>2. Цели и задачи</li> <li>3. Материал исследования</li> <li>4. Оборудование для исследования</li> <li>5. Оборудование для исследования</li> <li>6. Метод определения трещиностойкости</li> <li>7. Метод определения трещиностойкости</li> <li>8. Метод определения трещиностойкости</li> <li>9. Метод определения трещиностойкости</li> <li>10. Критерии трещиностойкости</li> <li>11. Температурная зависимость</li> <li>12. Результаты</li> <li>13. Финансовый менеджмент</li> <li>14. Социальная ответственность</li> <li>15. Заключение</li> <li>16. Заключение</li> <li>17. Список публикаций</li> </ol> |
|---|---|

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

*(с указанием разделов)*

| Раздел  | Консультант    |
|---|----------------|
| Обзор литературы  | Дерюгин Е.Е.   |
| Постановка задачи, методика и материал исследования             | Дерюгин Е.Е.   |
| Результаты исследования и их обсуждение                         | Дерюгин Е.Е.   |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | Гаврикова Н.А. |
| Социальная ответственность                                      | Раденков Т.А.  |

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

Реферат – Abstract

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p> |  |
|--|--|

**Задание выдал руководитель:**

| Должность                 | ФИО          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------------|--------------|------------------------|---------|------|
| Ведущий научный сотрудник | Дерюгин Е.Е. | д.ф.–м.н., профессор   |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                         | Подпись | Дата |
|--------|-----------------------------|---------|------|
| 4Б41   | Богданов Алексей Алексеевич |         |      |

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 91 страница, 22 рисунка, 25 таблиц, 21 источник.

Ключевые слова: малоразмерные образцы, шевронный надрез, пластичность, прочность, разрушение, коэффициент интенсивности напряжений, удельная энергия разрушения, физика твёрдого тела.

Цель работы: ознакомление с новой методикой определения характеристик трещиностойкости конструкционных материалов, разрабатываемой в лаборатории физической мезомеханики ИФПМ СО РАН, проверка методики на примере технического титана ВТ1-0. В качестве основной характеристики трещиностойкости определяется удельная энергия разрушения.

В качестве материала исследования использован технический титан ВТ1-0. Испытания проведены методом расклинивания малоразмерных образцов с шевронным надрезом на универсальной разрывной машине Instron-5582 при положительной  $+16^{\circ}\text{C}$ , а также отрицательных (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ) температурах. В результате нагружения получены данные о нагрузке на клин и смещении клина, по которым построены диаграммы «нагрузка-смещение».

В процессе нагружения производилась фиксация процесса нагружения с помощью зеркальной камеры Pentax K-5 с интервалом 4с. По полученным изображениям измерены: длина трещины, величина раскрытия у конца шевронного в процессе нагружения. Полученные данные использовали для расчета критериев трещиностойкости.

Результатом проведенного исследования являются следующие характеристики трещиностойкости:  $G$  – удельная энергия разрушения и  $K_{Ic}$  – коэффициент интенсивности напряжений. Полученное значение  $K_{Ic}$  соответствует значениям для технического титана, приведенным в справочниках, что свидетельствует о работоспособности методики.

Данная ВКР размещена в электронно-библиотечной системе ТПУ.

## ABSTRACT

Final qualifying work 91 pages, 22 figures, 25 tables, 21 sources.

Keywords: small-sized samples, chevron notch, plasticity, strength, destruction, stress intensity factor, specific energy of destruction, solid-state physics.

Objective: familiarization with a new technique for determining crack resistance properties of structural materials developed in the laboratory of physical mesomechanics ISPMS SB RAS, verification of the technique on example of technical titanium VT1-0. The specific fracture energy determine as a main characteristic of crack resistance.

Technical titanium VT1-0 used as a research material. Tests carried out by method of wedging small-sized samples with a chevron notch on Instron-5582 universal tensile machine from positive temperature  $+16^{\circ}\text{C}$  to negative (to  $-60^{\circ}\text{C}$ ) temperature. As a result of loading was obtained data of load on the wedge and the wedge displacement. Also were derived the "load-displacement" diagrams.

Process of loading was fixed by camera Pentax K-5 with interval of 4 s. For measuring length of crack obtained images are used. Also value of opening at the end of chevron in the process of loading is obtained. This data used for calculate fracture toughness criteria.

The following characteristics of crack resistance are obtained: the specific energy of failure  $G$  and the stress intensity factor  $K_{Ic}$ . The obtained characteristics are confirmed by the values  $K_{Ic}$  for technical titanium in the reference books. It indicates the operability of the technique.

This FQW is available in electronic-library system TPU.

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 9  |
| 1 Обзор литературы .....   | 11 |
| 1.1 Физика и механика разрушения конструкционных материалов .....  | 11 |
| 1.2 Теоретическая прочность твердого тела .....  | 13 |
| 1.3 Механика трещин в упругих телах .....  | 15 |
| 1.4 Коэффициент интенсивности напряжений. Приближенные методы<br>расчета.....  | 17 |
| 1.5 Критерий разрушения механики трещин. Силовой и энергетический<br>критерии разрушения.....                            | 18 |
| 1.6 Механика трещин в упругопластических телах .....   | 20 |
| 1.7 Энергетический контурный J-интеграл.....   | 21 |
| 1.8 Скорость высвобождения упругой энергии .....   | 24 |
| 1.9 Энергия разрушения .....   | 26 |
| 2 Постановка задачи, методика и материал исследования .....  | 28 |
| 2.1 Постановка задачи исследования .....   | 28 |
| 2.2 Методика определения трещиностойкости твердых тел.....   | 29 |
| 2.3 Материал исследования.....   | 37 |
| 2.4 Оборудование для исследования.....   | 38 |
| 3 Результаты и их обсуждение.....  | 40 |
| 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....   | 47 |
| 4.1 Техничко-экономическое обоснование научно-исследовательской<br>работы.....   | 47 |
| 4.2 Потенциальные потребители результатов исследования .....   | 48 |
| 4.3 SWOT-анализ.....   | 49 |
| 4.4 Планирование комплекса работ по проведению НТИ .....   | 54 |
| 4.4.1 Определение трудоемкости работ.....  | 54 |
| 4.4.2 Техническая готовность НТИ.....  | 56 |
| 4.4.3 Построение графика работ.....  | 57 |
| 4.5 Расчет бюджета затрат на НТИ .....   | 59 |
| 4.6 Оценка ресурсоэффективности .....  | 63 |
| 4.7 Определение научно-технического уровня исследования .....  | 63 |
| 5 Социальная ответственность .....   | 66 |
| 5.1 Производственная безопасность .....  | 66 |
| 5.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть<br>на рабочем месте при проведениии исследований ..... | 68 |

|  |    |
|--|----|
| 5.1.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов .....               | 70 |
| 5.2 Экологическая безопасность.....  | 76 |
| 5.2.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду .  | 76 |
| 5.2.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды .....   | 77 |
| 5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....   | 78 |
| 5.3.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований .....                                  | 78 |
| 5.3.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований .....           | 78 |
| 5.3.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС ..... | 80 |
| 5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....  | 82 |
| 5.4.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства .....   | 82 |
| 5.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны  | 82 |
| Заключение .....   | 84 |
| Список публикаций.....   | 86 |
| Список использованных источников .....   | 87 |



## ВВЕДЕНИЕ

Конструкционные материалы, используемые в таких сферах науки и техники, как авиация, строительство, медицина и др. требуют определения характеристик трещиностойкости. В настоящее время существуют аналитические и численные способы расчета трещиностойкости материалов (вязкости разрушения). Преимуществом аналитического метода является скорость расчёта т.к. нет необходимости в моделировании процесса разрушения и геометрии образца. Численный метод требует длительного времени, а также большого ресурса вычислительных систем. При разработке аналитических методов принято проводить их проверку численными методами. Наиболее широко применяется метод испытания образцов стандартных размеров с предварительно нанесенной на них усталостной трещиной [1, 2]. Этот метод построен на измерении характеристик диаграмм нагружения, а также длины полученной трещины, и последующем расчете характеристик трещиностойкости по полуэмпирическим формулам. Наиболее важная характеристика трещиностойкости – критический коэффициент интенсивности напряжений I рода (для трещины отрыва). Для корректности производимых стандартных испытаний требуется условие плоско-деформированного состояния нагружаемого образца, поэтому для этого используют образцы толщиной не менее 10 мм.

Применяемые способы имеют следующие недостатки: невозможность оценки трещиностойкости материала образцов малой толщины; требование нанесения предварительной усталостной трещины; металлоёмкость образцов; необходимость в нагружаемом оборудовании большой мощности; необходимость периодически разгружать образец, чтобы оценить изменение его податливости; наличие феноменологических констант в уравнениях расчёта для учёта геометрии образца и условий нагружения.

Существующие аналитические методы расчета пригодны для расчёта образцов простой конфигурации – двухконсольный образец с прямолинейным

надрезом. Недостатком прямолинейного надреза является то, что образовавшаяся трещина не распространяется вдоль плоскости надреза. Вследствие этого отклонения направления распространения трещины возникают деформации сдвига, которых необходимо избегать в испытаниях на отрыв.

Использование образцов с шевронным надрезом позволяет задавать направление распространения трещины и делает его стабильным [3, 4]. Под действием нагрузки на конце шеврона возникает напряжение и зарождается трещина, а значит, исключается необходимость предварительного нанесения усталостной трещины.

При испытании малоразмерных образцов, как правило, используют образцы с шевронным надрезом. В настоящей работе излагается метод аналитического расчёта трещиностойкости двухконсольного образца с шевронным надрезом, разработанный в лаборатории физической мезомеханики ИФПМ СО РАН. Метод позволяет определить характеристики трещиностойкости материалов без жестких ограничений на размеры зоны пластической деформации, формирующейся впереди трещины. В расчётных формулах нет эмпирических констант и феноменологических зависимостей. Характеристики трещиностойкости получают в условиях непрерывного нагружения, без операции «нагрузка-разгрузка».

В данной работе поставлены задачи: освоить новую методику определения трещиностойкости конструкционных материалов, разрабатываемой в лаборатории физической мезомеханики ИФПМ СО РАН, с применением данной методики рассчитать трещиностойкость такого материала как титан ВТ1-0.

## 1 Обзор литературы

### 1.1 Физика и механика разрушения конструкционных материалов

Твердые тела являют собой структурные частицы, взаимодействующие друг с другом при их сближении на малые расстояния. Такими частицами могут выступать молекулы, атомы или ионы. Прочность твердых тел определяется силой притяжения этих частиц. Для создания устойчивой связи в структуре твердых тел необходимо наличие не только сил притяжения, но и сил отталкивания, препятствующих полному слиянию частиц.

В условиях равновесия частиц вклад в полную энергию их взаимодействия сил притяжения намного превышает вклад сил отталкивания, которые резко спадают пропорционально экспоненциальному закону. Поэтому при отсутствии внешних напряжений полная энергия приблизительно равна энергии притяжения и называется энергией связи [3].

Атомы в кристаллических телах совершают колебательные движения около положений равновесия. Амплитуда этих колебаний зависит от температуры тела, увеличиваясь с ее ростом. Таким поведением атомов определяются временная и температурная зависимости процессов деформирования и разрушения твердых тел.

На рисунке 1 [1] представлены силы, возникающие при сближении частиц. Так, на больших расстояниях появляются силы притяжения, которые увеличиваются с уменьшением расстояния между частицами  $r$  (кривая 2). На относительно малом расстоянии возникают силы отталкивания. Эти силы возрастают значительно быстрее сил притяжения (кривая 3). Алгебраическая сумма сил притяжения и отталкивания и есть сила взаимодействия частиц (кривая 1).

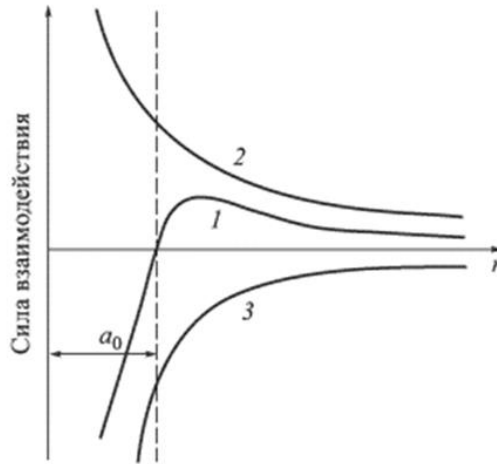


Рисунок 1 – Силы взаимодействия между частицами в зависимости от расстояния между ними

На определенном расстоянии возникает равновесие сил притяжения и отталкивания  $r = a_0$ . Суммарная сила взаимодействия между частицами обращается в нуль, что соответствует минимальной энергии взаимодействия  $U_0$ . Таким образом, частицы, сближенные на расстояние  $a_0$  должны образовать строгий порядок с правильной внутренней структурой называемой кристаллом. Частицы в позициях равновесия имеют минимальную энергию, и при удалении от этих позиций энергия будет возрастать, т.е. появляются силы, стремящиеся вернуть частицы в положения равновесия [4].

Приложенная к совершенному металлическому кристаллу внешняя растягивающая сила вызывает деформацию удлинения, т. е. увеличение межатомных расстояний. В результате механическое равновесие между атомами нарушается, и равнодействующая сила становится отличной от нуля. Изменение силы взаимодействия между двумя изолированными атомами при удалении их друг от друга выражается изменением равнодействующей. Для преодоления сил взаимодействия между атомами требуется преодолеть максимум силы сцепления между ними. Этот максимум является теоретической

прочностью:  $\sigma_{теор} \approx \frac{E}{10}$ .

## 1.2 Теоретическая прочность твердого тела

Таблица 1 – Сравнение теоретической и реальной прочности твердых тел [2]

| Материал                                 | Реальная прочность, МПа | $\sigma_{теор} / \sigma_{реал}$ |
|--|-------------------------|---------------------------------|
| Усы $Al_2O_3$                            | $1,54 \cdot 10^4$       | 3,3                             |
| Усы железа                               | $1,3 \cdot 10^4$        | 2,3                             |
| Высокоуглеродистая<br>рояльная проволока | $2,5 \cdot 10^4$        | 5,6                             |
| Борные волокна                           | $2,4 \cdot 10^4$        | 14,5                            |
| Стекло                                   | $1,1 \cdot 10^4$        | 66                              |
| <i>NaCl</i>                              | $1,0 \cdot 10^4$        | 40                              |

В таблице 1 приведены примеры соотношения между расчетной величиной теоретической прочности для некоторых твердых тел и их реальной прочностью. В реальном теле силы связи преодолеваются не одновременно в силу наличия местных дефектов. Разрушение происходит в результате возникновения трещин в зонах дефектов и их распространения по сечению тела с его разделением на части. Предположение о роли дефектов в разрушении твердых тел имеет экспериментальное и теоретическое подтверждение. Таким образом, реальная прочность твердых тел во многом обусловлена наличием в них дефектов, например, дефектов строения кристаллической решетки.

В зависимости от структурного и напряженно-деформированного состояний твердого тела, а также в зависимости от внешней среды реализуются те или иные механизмы разрушения. На рисунке 2 приведены некоторые микромеханизмы разрушения металлов.

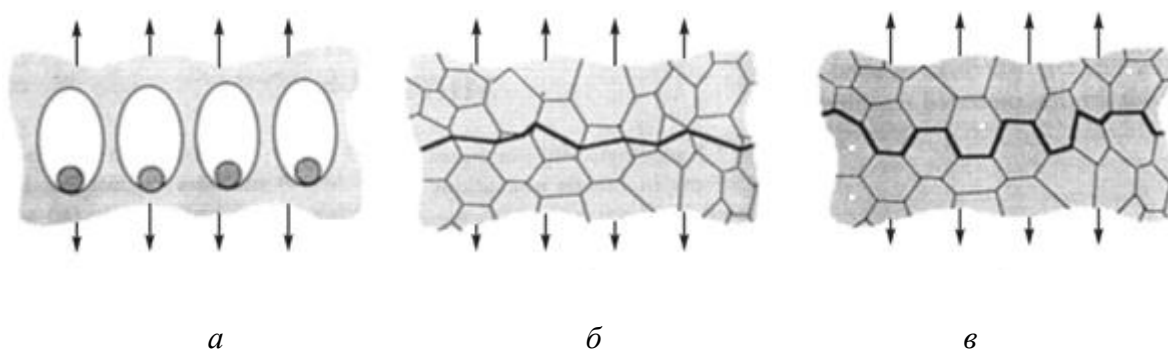


Рисунок 2 – Микромеханизмы разрушения металлов:  
*a* — вязкое разрушение, *б* — транскристаллитный скол, *в* — межзеренный скол

Микромеханизмы разрушения металлов принято делить на три вида, рисунок 2 [1]: вязкое разрушение, транскристаллитный и межзеренный скол. Кроме того, существуют специфические микромеханизмы разрушения, связанные с усталостью, ползучестью и динамическим нагружением.

Вязкий микромеханизм разрушения металлов обусловлен образованием микропор возле включений или частиц второй фазы, их ростом, локализацией микропластической деформации в перемычках между порами и локализацией деформации (возникновение шейки) т.е. локализованным сужением в связи с большой пластической деформацией, слиянием микропор и разрывом перемычек. При достижении критических напряжений перед вершиной трещины образуются микропоры. В результате роста микропор и локализации пластической деформации происходит слияние микропор и, таким образом, рост вязкой трещины.

Конструкционные материалы имеют поликристаллическую структуру. Разрушение поликристаллических материалов может проходить по транскристаллитному типу и по межзеренному.

Транскристаллитный скол характеризуется разрушением твердого тела (распространением трещины) по кристаллографическим плоскостям. Так в кристаллах с ОЦК решеткой разрушение протекает в семействе плоскостей  $\{100\}$ . В поликристаллических материалах транскристаллитный скол реализуется посредством распространения и дальнейшего объединения множества микротрещин. На поверхности образуются ступеньки скола, образуя так называемый «ручьистый рельеф». Транскристаллитный скол обычно имеет

хрупкий характер разрушения, однако процессы пластической деформации не исключены. Особенности такого скола во многом зависят от структуры поликристалла.

Межзеренный скол происходит посредством зарождения и распространения микротрещин вдоль границ зерен. Этот микромеханизм разрушения вызван тем, что энергия разрушения вдоль границ зерен меньше, чем энергия разрушения по типу транскристаллитного скола.

### 1.3 Механика трещин в упругих телах

Для получения выражений, характеризующих напряжения, возникающие в упругом изотропном теле, решают плоскую задачу теории упругости о растяжении бесконечной плоскости со сквозной трещиной [3], однако точного решения напряжения вблизи трещины данный подход не дает.

На рисунке 3 [3] приведены компоненты напряжений у вершины трещины в общем случае.

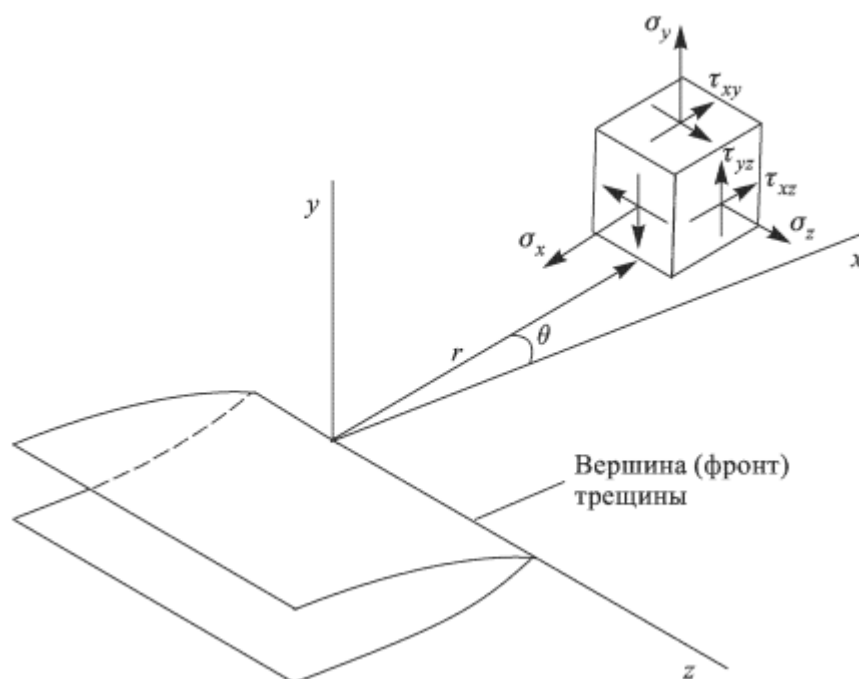


Рисунок 3 – Компоненты напряжений у вершины трещины

Поле напряжений в линейно упругом теле в общем виде выглядит следующим образом [3]:

$$\sigma_{ij} = \left( \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \right) f_{ij}(\theta) + \text{регулярные члены}$$

где  $\sigma_{ij}$  — тензор напряжений,  $K$  — коэффициент интенсивности напряжений,  $r$  и  $\theta$  — координаты точки в полярной системе координат,  $f_{ij}$  — безразмерная функция угла  $\theta$  ( $i, j = x, y$ ).

Напряжения вблизи трещины в полярных координатах, например, для трещины отрыва представляются в виде следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) - \sigma; \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right); \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}. \end{aligned}$$

Точки поверхностей трещины могут смещаться тремя различными способами в зависимости от типа нагружения, рисунок 4 [2]. Для первого типа, рисунок 4 а, характерно образование трещин нормального отрыва, т.е. точки поверхности трещины смещаются в направлении, перпендикулярном плоскости трещины. Такая трещина склонна к раскрытию. Ко второму типу, рисунок 4 б, относятся трещины, точки поверхности которых смещаются поперек передней кромки трещины (фронта). Третьему типу соответствует трещина продольного сдвига, когда точки поверхности трещины смещаются вдоль фронта трещины, рисунок 4 в. Тело с трещиной может находиться как под действием одного из видов нагружения, так и под действием их комбинации.



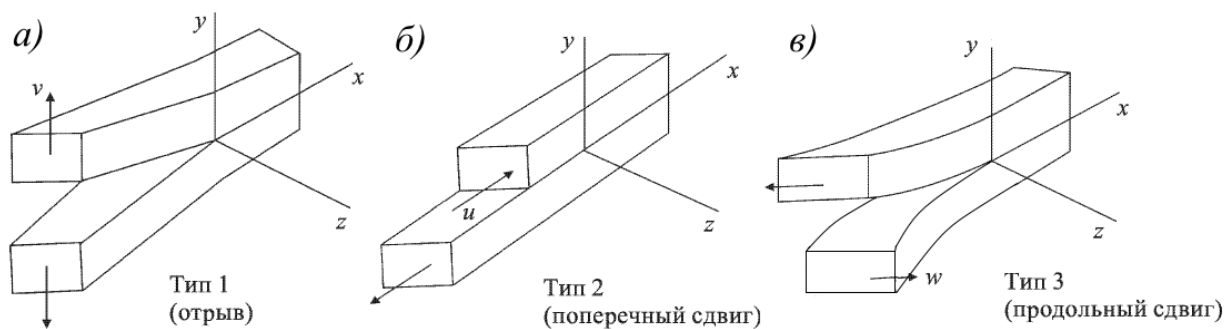


Рисунок 4 – Типы смещений точек поверхностей трещины:  
 а) отрыв; б) поперечный сдвиг; в) продольный сдвиг [2]

В окрестности вершины трещины в изотропном линейно упругом теле возникают напряжения, компоненты которых можно записать асимптотическими формулами для трещин I, II и III типа:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(I)} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(I)}(\theta),$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(II)} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(II)}(\theta),$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(III)} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(III)}(\theta).$$

#### 1.4 Коэффициент интенсивности напряжений. Приближенные методы расчета

Одной из наиболее значимых характеристик трещиностойкости материалов является коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$ , где индекс I указывает на первый тип разрушения. Коэффициент  $K_I$  определяет поле напряжений при вершине трещины. Например, две трещины имеют одинаковый коэффициент  $K_I$ , т.е. одинаковые поля напряжений, если одна трещина размером  $4a$  нагружена напряжением  $\sigma$ , а другая размером  $a$  нагружена напряжением  $2\sigma$ .

Для того чтобы в задачах механики трещин можно было использовать коэффициент интенсивности напряжений, этот параметр следует вычислить. Точное решение в случае растяжения неограниченной плоскости со сквозной трещиной длины  $2l$  дает следующую формулу для коэффициента  $K_I$  [3]:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi l}.$$

Определение коэффициента интенсивности напряжений для тел сложной геометрии может быть основано как на аналитических методах теории упругости, так и на численных и экспериментальных методах, дающих информацию о перемещениях, деформациях и напряжениях в окрестности вершины трещины. Эта информация является исходной для определения коэффициента  $K$  с помощью асимптотических формул. Кроме того, для расчета коэффициента интенсивности напряжений могут быть привлечены приближенные аналитические методы.

### **1.5 Критерий разрушения механики трещин. Силовой и энергетический критерии разрушения**

Использование методов теорий упругости и пластичности материалов позволяет решать задачи о телах в напряженно-деформированном состоянии, имеющими трещину-разрез. В этих параметрических задачах параметром выступает размер надреза. Однако в полученных решениях не учитывается функциональная связь между внешним напряжением и размером разреза. Чтобы установить такую связь, к решению задачи необходимо добавить определенный критерий разрушения. Критерий разрушения определяет внешнее напряжение, при котором начинается распространение трещины, т.е. увеличение длины надреза.

Энергетический критерий разрушения Гриффитса. Гриффитс, формулируя энергетический подход, обращает основное внимание на изменении энергии тела при распространении трещины, игнорируя

особенности процесса разрушения в зоне предразрушения у вершины трещины.

Для упругого тела с трещиной энергетический баланс можно записать:

$$\frac{d\Pi}{dl} + \frac{d\Gamma}{dl} = 0,$$

где  $\Pi$  — потенциальная энергия упругой деформации тела с трещиной,  $\Gamma$  — поверхностная энергия тела, связанная с поверхностью трещины.

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi l}}, \quad (1)$$

где  $\gamma_s$  — удельная поверхностная энергия,  $l$  — половина длины трещины .

Формула 1 носит название формулы Гриффитса. В случае плоской деформации формула Гриффитса может быть путем замены модуля упругости  $E$  на  $E/(1-\nu^2)$  переписана в виде:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi(1-\nu^2)l}},$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Критические напряжения, при которых происходит самопроизвольный рост трещины за счет накопленной телом потенциальной энергии упругой деформации, зависят как от размера трещины, так и от физических и механических свойств твердого тела. Таким образом, в задачи механики разрушения вводятся представления о поверхностной энергии твердого тела.

Если решать задачи теории упругости по асимптотическим формулам, то в малой окрестности трещины возникает неограниченный рост компонент напряжений. Но в природе нет материалов, способных выдерживать неограниченно большие напряжения. Поэтому в реальных телах возникают нелинейные эффекты вблизи вершины трещины, и происходит переход материала в пластическое состояние. Пластическое течение должно привести к

"срезанию" особенности распределения упругих напряжений вблизи вершины трещины [5].

## 1.6 Механика трещин в упругопластических телах

Изменение условий деформирования твердого тела в зоне вершины трещины от упругого к упругопластическому и увеличение размеров зоны пластической деформации (превышающей на 20% линейный размер трещины) приводят к замене критериальных подходов линейной механики хрупкого разрушения критериями механики упругопластического разрушения (нелинейной механики разрушения). При этом критериальные подходы нелинейной механики разрушения отражают закономерности поглощения энергии в зоне пластических деформаций или особенность поля пластических (либо упругопластических) деформаций у вершины трещины [6].

Рассмотрим основные положения модели Дагдейла-Леонова-Панасюка:

- если расстояние  $2u_y(x) = 2v(x)$  между противоположными поверхностями дополнительного разреза не превышает некоторой величины  $\delta$ , то к этим поверхностям приложено напряжение  $\sigma_0$ ;
- если же выполняется условие  $2v(x) > \delta$ , то между поверхностями трещины силовое взаимодействие отсутствует;
- длина тонкой зоны пластической деформации  $d$  определяется из условия плавности смыкания поверхностей дополнительного разреза в его вершине:  $v'(x)|_{x=a} = 0$ ;
- критерии разрушения записывается в виде  $2v(x=l, \sigma = \sigma_c) = \delta_c$ , т. е. скачок перемещения в вершине трещины при внешних напряжениях  $\sigma = \sigma_c$  достигает предельного (критического) значения, и трещина получает возможность распространяться.

## 1.7 Энергетический контурный $J$ -интеграл

Контурный  $J$ -интеграл был предложен в качестве параметра разрушения для нелинейно упругого тела с трещиной при плоской деформации. В рамках деформационной теории пластичности, т.е. при отсутствии разгрузки материала, концепция  $J$ -интеграла оказывается справедливой для упругопластического поведения твердого тела. Характерной особенностью контурного интеграла является его независимость от контура интегрирования, охватывающего вершину трещины. Кроме того, для линейно или нелинейно упругого тела  $J$ -интеграл эквивалентен интенсивности освобождающейся энергии в квазистатических условиях [7].

$$J = \int_{\Gamma} \left( \omega dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) .$$

Контурная инвариантность  $J$ -интеграла:

$$J = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 = 0 .$$

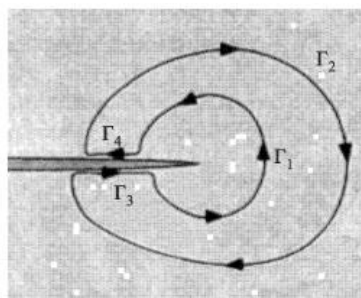


Рисунок 5 – Произвольные контуры интегрирования, охватывающие вершину трещины [3]

$$-\frac{d\Pi}{dl} = \int_{\Gamma'} \left( \omega dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) = J .$$

Таким образом, контурный интеграл эквивалентен интенсивности освобождающейся энергии для упругого твердого тела. В случае развития

значительных пластических деформаций  $J$ -интеграл определяет не поток упругой энергии, а разность энергий двух твердых тел с различными размерами трещин, поделенную на разность длин этих трещин.

Существуют стандартные методы определения трещиностойкости твердых тел. Обычно испытания проводятся на образцах больших размеров. Минимальная толщина стандартного образца должна быть не менее 10 мм по толщине. При этом, как правило, в образце предварительно необходимо зародить трещину путем циклического нагружения. Следует отметить, что данный метод требует расхода большого количества материала, а также времени и ресурсов для наведения усталостной трещины.

В лаборатории мезомеханики ИФПМ СО РАН разрабатывают инновационный метод для определения трещиностойкости малоразмерных образцов с шевронным надрезом. При этом отпадает необходимость наводить трещину, т.к. трещина зарождается на определенном этапе нагружения и устойчиво растет достаточно длительное время. Преимущество этого метода заключается в том, что в отличие от стандартного метода, затрачивается небольшое количество материала, времени и ресурсов.

Способ измерения трещиностойкости на малоразмерных образцах обосновал в 1979 году Баркер [8]. Он предложил для этой цели использовать короткий образец круглого сечения с шевронным надрезом, представленным на рисунке 6. При упругой деформации работа  $A$  внешней силы  $P$  будет тратиться на энергию поля внутренних напряжений  $U$  в пластине с трещиной и на поверхностную энергию  $W$  свободной поверхности трещины при ее распространении. Условие увеличения длины трещины  $a$  на величину  $da$  тогда можно записать в виде равенства  $d(U + W - A) / da = 0$  или

$$d(A - U) / da = dW / da.$$

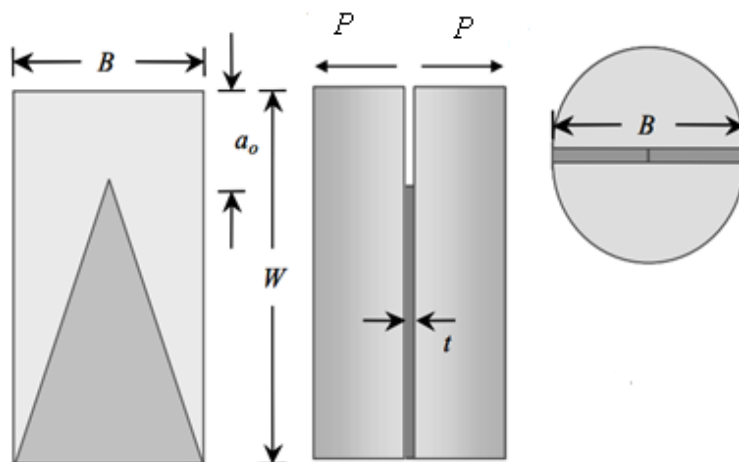


Рисунок 6 – Схема образца с шевронным надрезом [8]

Энергетический критерий разрушения формулируется так: трещина растёт только в случае, когда система способна выделить энергию, требуемую для распространения трещины. Таким образом, для продвижения трещины на элементарное расстояние  $da$ , необходима энергия  $W$ , появляющаяся за счёт энергии упругой деформации  $U$ . Энергия  $U$  возникает в объеме материала при нагружении внешней силой  $P$ . Тогда скорость высвобождения упругой энергии  $G$  есть отношение  $dW/da$ .

### 1.8 Скорость высвобождения упругой энергии

Высвобождение деформации и работа образования новых граничных поверхностей определяют скорость высвобождения упругой энергии  $G$ . При нагружении твёрдого тела с трещиной длиной  $a$  в упругой области, рисунок 7, накопленная упругая энергия деформации составит [3]:

$$V = 0.5P\delta = 0.5P^2/M$$

где  $V$  – накопленная упругая энергия деформации;  $P$  – приложенная нагрузка;  $\delta$  – смещение краёв трещины, вследствие нагрузки (раскрытие трещины);  $M_1$  – жесткость твердого тела с трещиной длиной  $a$ .

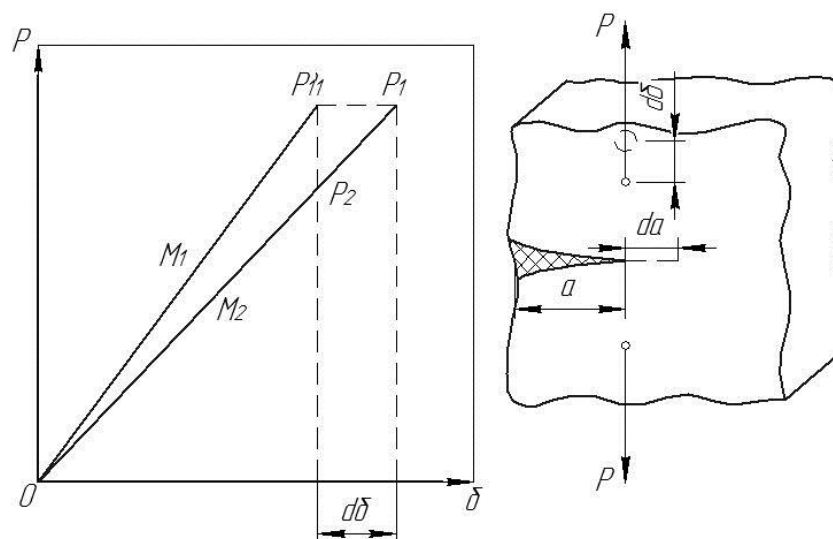


Рисунок 7 – График в координатах нагрузка – смещение для большой пластины с трещиной по всей толщине [3]

В случае, когда длина трещины увеличивается на  $da$  ( $OP_2$  соответствует условию фиксированного положения захватов, а  $OP_1$  – случаю фиксированной нагрузки).

Податливость образца  $\eta$  есть величина обратная жёсткости  $M$ :

$$\eta = \frac{1}{M} = \frac{\lambda_e}{P}.$$

Для продвижения трещины на элементарное расстояние  $da$  необходима дополнительная поверхностная энергия. Она появляется за счёт работы внешних сил  $Pd\delta$  и высвобождения энергии деформации  $dV$ :

$$G = \frac{dU}{da} = P \frac{d\delta}{da} - \frac{dV}{da}.$$

Упругая энергия переходит в энергию пластической деформации. С продвижением трещины на расстояние  $da$  жёсткость образца уменьшается от  $M_1$  до  $M_2$ . Если образец жёстко зафиксирован в неподвижных захватах при внешней нагрузке  $P_1$ , увеличение длины трещины на величину  $da$  вызовет падение нагрузки от  $P_1$  до  $P_2$ . Это уменьшит жёсткость твёрдого тела. Однако отношение  $P/M$  сохранится, поскольку, рисунок 7:



$$\delta_1 = \delta_2 = P_1 / M_1 = P_2 / M_2.$$

Тогда для расчёта скорости высвобождения упругой энергии определяется согласно уравнению

$$\left( \frac{dU}{da} \right)_\delta = \frac{1}{2} \left[ \frac{2P}{M} \cdot \frac{\partial P}{\partial a} + P^2 \frac{\partial(1/M)}{\partial a} \right]. \quad (2)$$

Проведя дифференцирование уравнения 2 получим:

$$\frac{1}{M} \frac{\partial P}{\partial a} + P \frac{\partial(1/M)}{\partial a} = 0. \quad (3)$$

Подставим (3) в (2):

$$\left( \frac{dU}{da} \right)_\delta = -\frac{1}{2} P^2 \frac{\partial \eta}{\partial a}.$$

Тогда для условия фиксированной нагрузки формула примет вид:

$$\left( \frac{dU}{da} \right)_P = 0.5 P^2 \cdot \partial \eta / \partial a.$$

Видно, что скорость высвобождения упругой энергии для обоих случаев отличается только знаком. Это свидетельствует о том, что  $G$  не зависит от типа приложенной нагрузки (постоянная нагрузка или смещение захватов). В итоге уравнение для определения критической скорости высвобождения энергии деформации (в условиях нестабильного распространения трещины) примет вид:

$$G_c = 0,5 P_{\max}^2 \cdot \partial \eta / \partial a$$

После определения зависимости податливости от длины трещины для данной формы образца,  $G_c$  вычисляется по максимальному значению нагрузки (в момент разрушения) при условии, что величина пластической деформации в области вершины трещины минимальна.

## 1.9 Энергия разрушения

В зависимости от вида кривой нагружения материалы разделяют на хрупкие и вязкие. На рисунке 8 б (кривая *C*) представлен вязкий материал или иначе, материал с высокой вязкостью разрушения. Для него характерна высокая энергия. В случае низкой энергии (как для кривой *A*), материал считается хрупким. Для образцов с надрезом определяют относительную вязкость (или хрупкость) материала по величине области пластической деформации у вершины трещины [9].

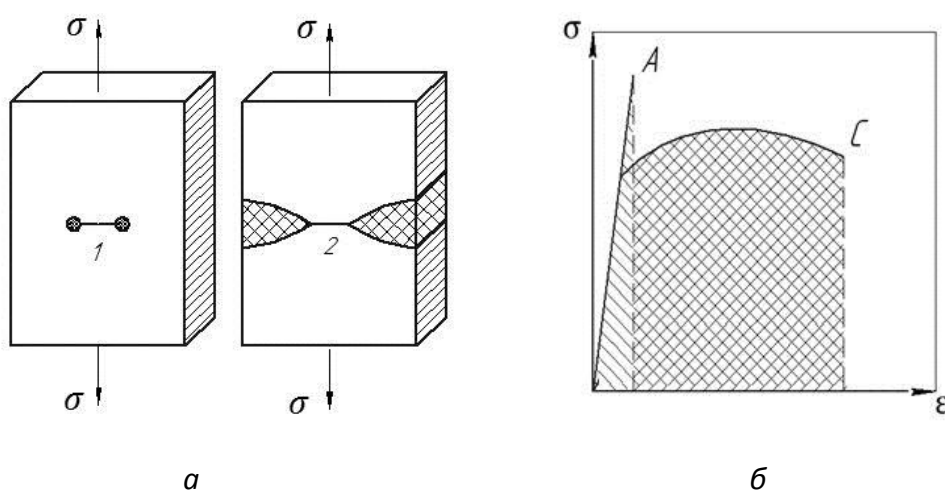


Рисунок 8 – а) Распространение пластической зоны (затемненная область) при разрушении по хрупкому (1) и вязкому (2) механизмам, б) Кривые напряжение-деформация

Пластическая зона у вершины трещины образца с надрезом ведет себя следующим образом. Поскольку концентрация напряжений у вершины трещины чаще всего превышает уровень, после которого возникает необратимая пластическая деформация, в области у вершины трещины существует зона пластически деформированного материала, расположенная в упруго деформированной среде. При пластической деформации тратится намного больше энергии разрушения, чем при упругой. Поэтому вязкость образца с надрезом возрастает с увеличением пластической зоны у вершины трещины. Таким образом, при малой величине пластической зоны перед разрушением делается вывод о низком общем уровне вязкости образца. Иными словами, материал характеризуется как хрупкий. В случае, когда пластическая

зона распространена широко вокруг вершины трещины, т.е. затрагивает протяженные объемы материала в образце вдали от зоны разрушения, то такой материал обладает высокой энергией разрушения и характеризуется как вязкий. Таким образом, вид кривой нагружения материала зависит от характера нагружения.

Приведённый обзор показывает, что существует проблема аналитического определения трещиностойкости материалов с шевронным надрезом.

## **2 Постановка задачи, методика и материал исследования**

### **2.1 Постановка задачи исследования**

Надежность проектируемых конструкций является важнейшей характеристикой, поэтому необходимо понимание механики процессов, приводящих к разрушению.

Существует целая наука, названная механикой разрушения твердых тел, в которой изучаются закономерности зарождения и роста трещин. Для понимания этих закономерностей необходимо успешно применять знания в области материаловедения и прикладной механики. Знание того, по каким механизмам трещина зарождается и распространяется, дает возможность проектировать конструкции требуемой надёжности, но для этого необходимы параметры для определения трещиностойкости материалов.

В мире уже существуют закрепившиеся и названные стандартными методы определения трещиностойкости, где используются образцы больших размеров (шириной не менее 10 мм). В стандартных образцах требуется предварительное наведение усталостной трещины.

В лаборатории ИФПМ СО РАН, разрабатывается новый подход к методике определения трещиностойкости, где крупные образцы заменены на малоразмерные, а образование трещины происходит на вершине шевронного надреза, благодаря чему отпадает необходимость в наведении усталостной трещины.

Исходя из вышеизложенного, в настоящей работе ставится цель освоить и применить на практике новую методику определения трещиностойкости конструкционных материалов.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Изучить новую методику определения трещиностойкости, разработанную в ИФПМ СО РАН;
- 2) Провести испытания образцов с шевронным надрезом из титана ВТ1-0;

- 3) Применить данную методику для определения характеристик трещиностойкости титана ВТ1-0;
- 4) Проанализировать полученные экспериментальные данные и дать заключение о критериях трещиностойкости титана ВТ1-0.

## 2.2 Методика определения трещиностойкости твердых тел

Существует классический пример вычисления коэффициента интенсивности напряжения  $K_I$  для случая испытания двухконсольных образцов с прямолинейным надрезом [12, 13].

На рисунке 9 изображен двухконсольный образец с прямолинейным надрезом. Расстояние от точки приложения нагрузки  $P$  до фронта трещины есть начальная длина трещины  $l$ .

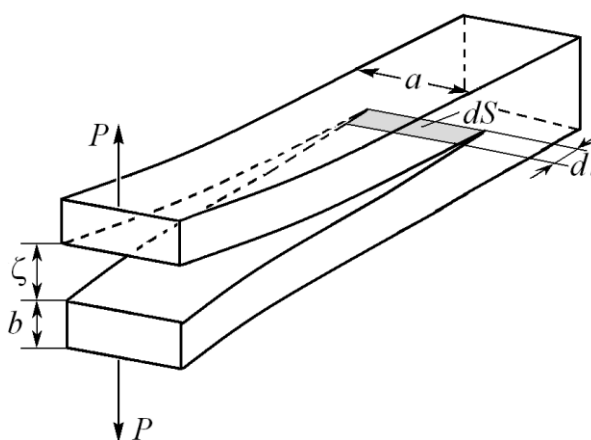


Рисунок 9 – Образец с прямолинейным надрезом, где  $\zeta$  – величина прогиба двух консолей,  $b$  – ширина консоли,  $a$  – толщина консоли,  $P$  – внешняя нагрузка,  $dS$  – поверхность, образованная трещиной,  $dl$  – прирост длины трещины

Из теории изгиба консоли [14] следует, что смещение  $\lambda_e$  точек приложения силы, рисунок 10, равно

$$\lambda_e = \frac{4P}{Ea} \left( \frac{l}{b} \right)^3,$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $b$  – толщина консоли.

Для двухконсольного образца смещение точек приложения нагрузки =  $2\lambda_e$ . Каждую половину образца можно рассматривать как прямоугольную балку, один конец которой зафиксирован, а на другой конец приложена определённая нагрузка  $P$ , рисунок 10. Известно, что при упругой деформации прямоугольной балки толщиной  $b$  и шириной  $a$  связь между стрелой прогиба  $\lambda_e$  и величиной нагрузки  $P$  определяется формулой [3]

$$\lambda_e = \frac{4P}{Ea} \left( \frac{l_0}{b} \right)^3$$

где  $l_0$  – расстояние от точки приложения нагрузки до основания балки.

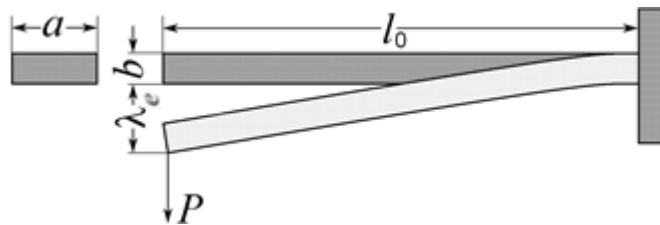


Рисунок 10 – Схема балки под нагрузкой

В образцах с шевронным надрезом надрез наводят в виде узкой щели. Граница надреза задаётся в виде ломаной линии с углом  $\alpha$ , расположенной симметрично относительно оси образца, рисунок 11. Клиновидная геометрия шевронного надреза, в отличие от прямолинейной геометрии, обеспечивает концентрацию напряжения на вершине шеврона и стабильное распространение трещины в плоскости надреза.

При определении условия нестабильного распространения трещины целесообразен энергетический подход. Суть энергетического критерия разрушения можно сформулировать следующим образом: рост трещины может иметь место в том случае, если система может выделить энергию, необходимую для начала распространения трещины на элементарное расстояние  $dl$ . Энергия, необходимая для роста трещины, появляется исключительно за счёт энергии упругой деформации, возникающей в объёме материала под действием внешней приложенной силы.

В условиях нестабильного распространения трещины длиной  $l$  на элементарную величину  $dl$  в образце шириной  $a$  критическая скорость высвобождения упругой энергии деформации на единицу длины фронта трещины определяется уравнением [2]:

$$G_s = 0.5 \frac{P^2}{a} \frac{d\eta}{dl} = \frac{P^2 d\eta}{2adl} = \frac{P^2 d\eta}{dS}, \quad (4)$$

где  $P$  – приложенная к образцу нагрузка,  $\eta = \lambda/P$  податливость образца (величина, обратная жесткости образца  $M = P/\lambda$ ),  $dS = 2adl$  удвоенная площадь, которую заметает прямолинейный фронт трещины, продвигаясь на малое расстояние  $dl$ .

Величина  $G_s$  всегда равна производной от упругой энергии, т.е. определяет интенсивность высвобождения упругой энергии при распространении трещины. Далее характеристику  $G_s$  мы будем называть удельной энергией разрушения. Упругое смещение точек приложения нагрузки  $\lambda_e$  для образца шириной  $a$  с трещиной длины  $l$  обеспечивает нагрузка:

$$P = \frac{E\lambda_e a}{8} \left( \frac{b}{l} \right)^3. \quad (5)$$

Податливость такого образца равна:  $\eta = \frac{2\lambda_e}{P} = \frac{8}{Ea} \left( \frac{l}{b} \right)^3$ .

Учитывая, что  $dS = 2adl$ , найдём производную  $d\eta/dS$  в уравнении (4):

$$\frac{d\eta}{dS} = \frac{d\eta}{2adl} = \frac{12 \cdot l^2}{Ea^2 \cdot b^3}. \quad (6)$$

Подставляя выражение (6) в уравнение (4) получим:

$$G = P^2 \frac{d\eta}{dS} = \frac{12P^2 l^2}{Ea^2 b^3}. \quad (7)$$

Уравнение (7) определяет удельную энергию разрушения по длине трещины  $l$  и величине внешней нагрузки  $P$ , при которой начинается спонтанное распространение трещины.

Подставляя в это уравнение выражение (5), получим уравнение для  $G$ , позволяющее вычислить энергию разрушения по длине трещины  $l$  и по величине  $\lambda_e$ :

$$G = \frac{3E\lambda_e^2 b^3}{16l^4}. \quad (8)$$

Видно, что в данном представлении величина  $G_s$  не зависит от толщины образца  $a$ .

Для учёта шевронного надреза в геометрии образца рассмотрим образец с шевронным надрезом как пучок консолей бесконечно малой толщины  $dx$ . На рисунке 11 представлены проекции образца с шевронным надрезом. Каждая мини-консоль бесконечно малой толщины имеет длину  $l(x) = l_0 + x \cdot \text{ctg}(\alpha/2)$ , где  $l_0$  – расстояния от точки приложения нагрузки до шеврона;  $\alpha$  – угол шевронного надреза.

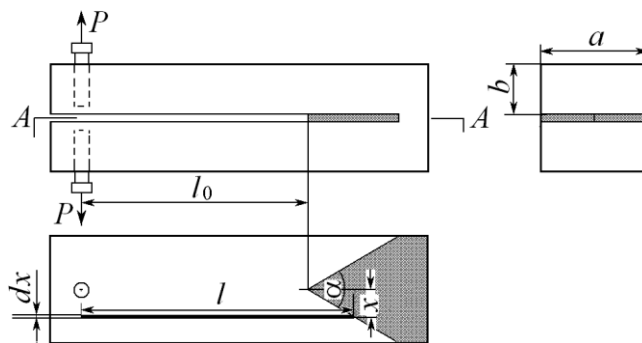


Рисунок 11 – Проекция образца с шевронным надрезом

Из теории упругости [2] воспользуемся формулой для упругого прогиба балки, которая справедлива и для рассматриваемой мини-консоли:

$$\lambda_e = \frac{4dP(x)}{Edx} \left( \frac{l(x)}{b} \right)^3, \quad (9)$$

где  $\lambda_e$  – упругий прогиб мини-консоли,  $dP$  – элементарная нагрузка, под действием которой консоль толщиной  $dx$  прогибается на величину  $\lambda_e$ ,  $b$  – толщина мини-консоли.



Выразив из (9) величину элементарной нагрузки  $dP(x)$ , получим:

$$dP(x) = \frac{\lambda_e E}{4} \left( \frac{b}{l(x)} \right)^3 dx. \quad (10)$$

Интегрирование элементарных сил действующих на каждую мини-консоль по всей ширине образца  $a$ , очевидно, определит действительную нагрузку  $P$ , обеспечивающую прогиб мини-консоли на величину  $\lambda_e$ :

$$P = \frac{E\lambda_e a}{4} \left( \frac{b}{l_0} \right)^3 \left[ 4 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right] / \left[ 2 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right]^2 = \frac{E\lambda_e a}{4} \left( \frac{b}{l_0} \right)^3 k'. \quad (11)$$

Данное уравнение отличается от уравнения (5) для случая прямолинейного надреза коэффициентом

$$k' = \left[ 4 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right] / \left[ 2 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right]^2.$$

Согласно уравнению (9), упругий прогиб отдельной консоли двухконсольного образца с шевронным надрезом равен

$$\lambda_e(l_0) = \frac{4P}{Ea} \left( \frac{l_0}{b} \right)^3 \frac{1}{k'}.$$

При нагружении образца наступает момент зарождения трещины на вершине шеврона. Приняв, что фронт трещины являет собой прямую линию, получим длину этого фронта  $h = 2 \cdot \Delta l \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2)$ . здесь  $\Delta l$  – расстояние, на которое продвинулась трещина от момента ее зарождения. Таким образом, при зарождении и распространении трещины надрез представляет собой совокупность прямолинейной и шевронной геометрии. Часть образца с прямолинейным надрезом имеет ширину  $h$ . Часть с шевронным надрезом имеет ширину  $a-h$  соответственно.

Силу, действующую на часть образца с прямолинейным надрезом  $P'$ , найдём по формуле (5), подставив в нее текущую толщину образца  $h$  вместо  $a$ :

$$P' = \frac{\lambda_e E \Delta l}{4} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \left( \frac{b}{l} \right)^3. \quad (12)$$

Силу, действующую на часть образца с шевронным надрезом  $P''$ , найдём по формуле (11), подставив в нее текущую толщину образца  $a-h$  вместо  $a$ :

$$P'' = \frac{\lambda_e \Delta l \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} E}{4} \left( \frac{b}{l} \right)^3 \left( 1 - \frac{2\Delta l}{a} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \frac{l}{l_0} \left[ 4 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} + \frac{2\Delta l}{l_0} \right] / \left[ 2 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right]^2. \quad (13)$$

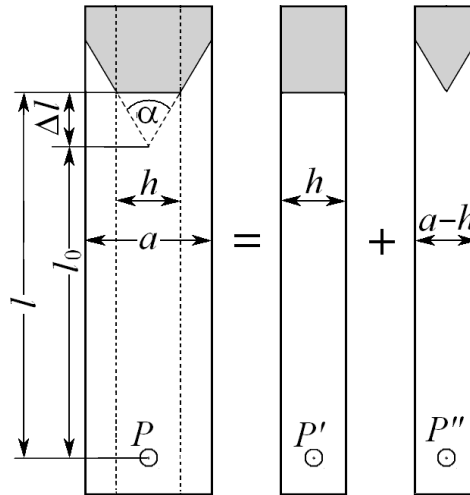


Рисунок 12 – Представление образца с трещиной в виде образцов с прямолинейным и шевронным надрезами

Просуммировав силы  $P'$  и  $P''$ , а также выразив из полученного выражения  $\lambda_e$ , получим:

$$\lambda_e(l) = \frac{4P}{Ea} \left( \frac{l}{b} \right)^3 k^{-1}, \quad (14)$$

где  $P = P' + P''$ ,  $l = l_0 + \Delta l$  и коэффициент  $k$  равен

$$k = \left[ \frac{2\Delta l}{a} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \left[ 2 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right]^2 + \left( 1 - \frac{2\Delta l}{a} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \left( \frac{l}{l_0} \right) \left( 4 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} + \frac{2\Delta l}{l_0} \right) \right] / \left[ 2 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right]^2.$$

Легко убедиться, что при  $\Delta l \rightarrow 0$  значение  $k \rightarrow k'$ .

Подставляя выражение (14) для  $\lambda_c$  в уравнение (8), получим выражение для удельной энергии разрушения  $G$ .

$$G = \frac{12P^2 l^2}{Eb^3 a^2} k^{-2}. \quad (13)$$

Полученное уравнение отличается от подобного уравнения для случая прямолинейного надреза лишь коэффициентом  $k^{-2}$ . В частности, если угол шевронного надреза  $\alpha = \pi$ , то уравнение (13) переходит в уравнение (4) для прямолинейного надреза, т.к. тогда  $k=1$ .

Нагружение образцов с шевронным надрезом проводили методом расклинивания. На рисунке 13 схематически показано как внедряющийся клин раздвигает консоли и вызывает распространение трещины. Здесь  $F$  – сила давления на клин,  $P_{\text{fric}}$  – сила трения,  $P$  – сила отгиба консоли,  $P_1$  – сила нормального давления клина на ребро консоли (перпендикулярна поверхности клина),  $\beta$  – угол клина,  $\gamma$  – угол между поверхностью клина и поверхностью консоли,  $l_0$  – длина надреза (начальная длина трещины),  $\Delta l$  – прирост длины трещины (расстояние, на которое продвинулась трещина).

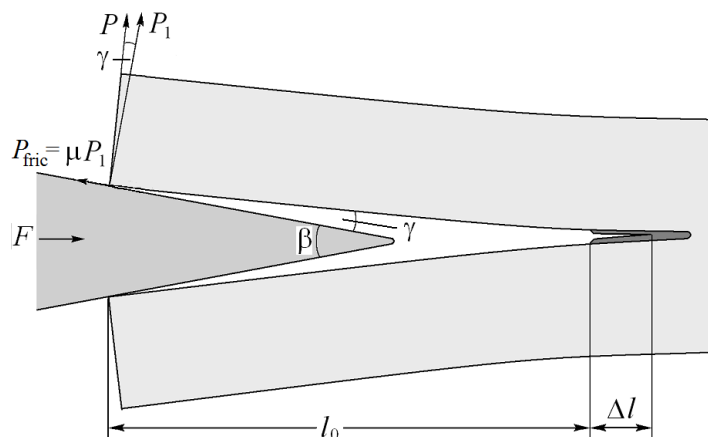


Рисунок 13 – Схема расклинивания образца с шевронным надрезом

Из условия равновесия сил получено выражение для расчета силы  $P$ , изгибающей консоль:

$$P = \frac{F \cdot \cos(\gamma)}{2 \cdot \left( \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) + \mu \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \right)} \quad (15)$$

где  $F$  – нагрузка на клин,  $\mu$  и  $\gamma$  – соответственно коэффициент трения и угол между плоскостями клина и консоли,  $\beta$  – угол раствора клина.

Важным в эксперименте является определение коэффициента трения  $\mu$ . Коэффициент трения устанавливает пропорциональность между силой трения и силой нормального давления, прижимающей тело к опоре. Коэффициент трения является совокупной характеристикой пары материалов, которые соприкасаются и не зависит от площади соприкосновения тел. В данном эксперименте возникает трение скольжения, т.к. клин движется с постоянной скоростью. Коэффициент трения скольжения зависит только от угла наклона между поверхностями трущихся тел. В данном случае это угол  $\gamma$ . Коэффициент трения  $\mu$  находим, выразив его из формулы (15) и подставив в нее формулу (9). В итоге получаем следующее выражение для аналитического расчёта коэффициента трения  $\mu$ :

$$\mu = \frac{\Delta P}{\Delta \lambda} \frac{\cos \gamma \cdot 2}{E \cdot a \cdot \sin \frac{\beta}{2}} \cdot \left( \frac{l_0}{b} \right)^3 \cdot \frac{\left( 2 + \frac{a}{l_0} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right)^2}{4 + \frac{a}{l_0} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}} - \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}$$

где  $\Delta F/\Delta \lambda$  – наклон прямой упругого нагружения на экспериментальной диаграмме «сила  $F$  – смещение клина  $\lambda^*$ ».

Расчёт коэффициента трения  $\mu$  ведется в предположении, что в процессе нагружения угол  $\gamma$  не изменяется, т.е. остается константой.

В качестве критерия трещиностойкости в инженерной механике разрушения для трещины отрыва используется, как правило, коэффициент интенсивности напряжений, который связан с удельной энергией разрушения формулой:

$$K_{Ic} = \sqrt{EG / (1 - \nu^2)},$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

### 2.3 Материал исследования

В качестве материала исследования выбран технический титан ВТ1-0. Он применяется для изделий с высокой прочностью, имеет высокое сопротивление хрупкому и усталостному разрушению. Наиболее широкое применение нашел в машиностроении и приборостроении, в инструментальной и химической промышленности. Химический состав: Fe – до 0.25%; C – до 0.07%; Si – до 0.1%; N – до 0.04%; Ti – 99.24 – 99.7%; O – 0.2%; H – 0.01%; прочих примесей – до 0.3%.

Технический титан ВТ1-0 обладает следующими значениями упругих характеристик:  $E = 110$  ГПа и  $\nu = 0.3$  [10].

В данной работе использовались двухконсольные образцы с шевронным надрезом длиной 30 мм, вырезанные из прутка квадратной формы сечением  $9 \times 4$  мм<sup>2</sup>. Консоль – это балка, один конец которой жестко защемлен, а второй свободен. Шевронный надрез наносили электроэрозионным способом в виде узкой щели шириной 0,3 мм, разделяющей образец на две равные части, толщиной  $b = 4,4$  мм и шириной,  $a = 4,5$  мм границу надреза задавали в виде V-образной линии с углом  $\alpha = \pi/3$ .



Рисунок 14 – Изображение образца ВТ1-0

На рисунке 14 изображено расклинивание образца с шевронным надрезом.

#### **2.4 Оборудование для исследования**

Испытания проводили в интервале температур от  $+16^{\circ}\text{C}$  до отрицательной  $-60^{\circ}\text{C}$ . Испытание образцов производили на специальной разрывной машине Instron – 5582, рисунок 15.



Рисунок 15 – Испытательная машина Instron – 5582

В данной работе исследование двухконсольных образцов проводилось методом расклинивания. Для этого использован клин с углом  $40^\circ$ , рисунок 16.



Рисунок 16 – Клин с углом  $40^\circ$

В процессе нагружения с помощью зеркальной камеры Pentax K-5, с интервалом в 4 сек фиксировались изображения нагружаемого образца.



Рисунок 17 – Камера производит съемку в процессе нагружения образца

На рисунке 17 изображен процесс нагружения и фотографирования боковой поверхности образца. Фотографии делались с целью последующего измерения смещений точек надреза и определения прироста трещины.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

|               |                             |
|---------------|-----------------------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                  |
| 4Б41          | Богданов Алексей Алексеевич |

|                            |   |                                  |   |
|----------------------------|---|----------------------------------|---|
| <b>Инженерная школа</b>    | новых<br>производственных<br>технологий | <b>Отделение</b>                 | материаловедения                                    |
| <b>Уровень образования</b> | бакалавр                                | <b>Направление/специальность</b> | 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» |

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

|   |  |
|---|--|
| 1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i> | - Инициатор проекта ИФП СО РАН;<br>- Примерный бюджет проекта 200 тыс.руб.;<br>- В исследовании задействовано 2 человека: руководитель проекта, инженер - разработчик.   |
| 2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>   | - Проект выполняется в соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов»;<br>- Минимальный размер оплаты труда в 2018 году составляет 9750 руб.  |
| 3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>                                  | - Согласно п.3 п.п.16 ст. 149 НК РФ данная НИР не подлежит налогообложению. На основании п. 1 ст. 58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году вводится пониженная ставка для расчета отчислений во внебюджетные фонды – 27,1% от фонда оплаты труда. |

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

|   |  |
|---|--|
| 1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i> | - Техничко-экономическое обоснование научно-исследовательской работы;<br>- Потенциальные потребители результатов исследования;<br>- Swot-анализ НИИ. |
| 2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>  | - Планирование комплекса работ по проведению НИИ;<br>-Расчет бюджета затрат на НИИ.  |
| 3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>        | - Оценка эффективности НИИ;<br>- Определение научно-технического уровня проекта.   |

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. Матрица SWOT                   |
| 2. График проведения и бюджет НИИ |

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

**Задание выдал консультант:**

|                       |                                 |                               |                |             |
|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Должность</b>      | <b>ФИО</b>                      | <b>Ученая степень, звание</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| Старший преподаватель | Гаврикова Надежда Александровна |                               |                |             |

**Задание принял к исполнению студент:**

|               |                             |                |             |
|---------------|-----------------------------|----------------|-------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                  | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| 4Б41          | Богданов Алексей Алексеевич |                |             |



## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» имеет своей целью анализ перспектив и успешности научно-исследовательского проекта. Также в данном разделе разрабатываются механизмы управления и другие проектные решения этапа реализации проекта.

Достижение поставленной цели требует решения следующих задач [16]:

- дать оценку коммерческому потенциалу проекта и перспективам его разработки;
- обозначить поэтапный план выполнения исследования;
- произвести расчёт бюджета исследования;
- оценить эффективность проекта по ресурсным и экономическим показателям.

### **4.1 Технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы**

Темой ВКР является «Определение трещиностойкости малоразмерных образцов технического титана ВТ1-0». Объектом исследования является методика определения трещиностойкости конструкционных материалов, разработанная в ИФПМ СО РАН.

Научное исследование посвящено изучению новой методики определения трещиностойкости конструкционных материалов, разрабатываемой в лаборатории физической мезомеханики ИФПМ СО РАН и определению характеристик трещиностойкости титана ВТ1-0.

Разработка НИР производится группой, состоящей из двух человек – руководителя и студента.

Трещины являются угрозой конструкциям, поскольку способны вызвать их внезапное разрушение. Поэтому необходимо экспериментально исследовать характеристики трещиностойкости материала на этапе проектировки, до

выхода конструкции или детали в эксплуатацию.

Сравнение данной методики с существующими аналогами представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение методик определения трещиностойкости

| Параметр  | Методика данной работы, разрабатываемая в ИФПМ СО РАН        | Аналоги методики: ГОСТ 25.506-85, ASTM E399 - 17  |
|---|--|---|
| Размер образцов   | не фиксирован, возможно использование малоразмерных образцов | жёсткая фиксация размеров стандартных образцов, нельзя применять для образцов толщиной менее 10мм |
| Предварительное выращивание усталостной трещины           | не требуется   | требуется   |
| Использование дополнительного измерительного оборудования | не требуется   | требуется   |
| Требуемая мощность разрывных машин                        | низкая   | высокая   |
| Погрешность измерений                                     | высокая  | низкая  |
| Расход материала на образцы                               | малый  | большой   |

Из сравнения в таблице 3 следует, что методика, описанная в данной работе, обладает лучшими показателями скорости получения результата и является более экономичной за счёт экономии материала для изготовления образцов и за счёт оборудования меньшей мощности и стоимости, однако методика обладает меньшей точностью. Поэтому данную методику рекомендовано применять для экспресс-анализа, когда необходимо быстро получить приблизительные результаты [16].

#### **4.2 Потенциальные потребители результатов исследования**

Данный проект является инициативным и не имеет коммерческого потенциала. Проект выполнен в рамках научно-исследовательской работы для ИФПМ СО РАН. Проект обладает инновационным потенциалом, выраженным в новой методике определения трещиностойкости конструкционных

материалов, поскольку данный метод быстрее и экономичнее существующих аналогов.

Потенциальными потребителями результатов исследования являются предприятия машиностроительной отрасли, расположенные на территории Российской Федерации, включающие в себя судостроительные, автомобильные, авиакосмические, железнодорожные, оборонно-промышленные комплексы и т.д.

### 4.3 SWOT-анализ

Комплексный анализ внутренней и внешней среды научно-исследовательского проекта производится посредством SWOT-анализа. SWOT-анализ дает оценку сильных и слабых сторон проекта, его возможностей, угрозам внешней среды. В таблице 4 представлены сильные и слабые стороны, из которых следуют возможности и угрозы реализации данного проекта [17].

Таблица 4 – SWOT-анализ проекта

| Сильные стороны   | Возможности во внешней среде  |
|---|---|
| С1. Не требуется наносить усталостную трещину на образцы;<br>С2. Экономия материала на образцы;<br>С3. Нет необходимости в тензорезисторе;<br>С4. Скорость получения результата;<br>С5. Образцы простой формы без жестких требований к ней;<br>С6. Возможность оценки пластических свойств материала;<br>С7. Метод аналитический: нет эмпирических или феноменологических констант. | В1. Экономичность и скорость методики заинтересует потенциальных потребителей;<br>В2. Большой потенциал применения методики для испытаний новых материалов;<br>В3. Для методики возможен выход на мировой уровень за счет ее фундаментальности.                                       |
| Слабые стороны  | Угрозы внешней среды  |
| Сл1. Необходимость фотокамеры;<br>Сл2. Погрешность измерений;<br>Сл3. Ручная обработка результатов;<br>Сл4. Высокие требования к квалификации персонала.  | У1. Сложность выхода на уровень государственных стандартов;<br>У2. Отсутствие спроса на новую методику;<br>У3. Технология подразумевает ручную обработку результатов, что может оттолкнуть потенциальных потребителей;<br>У4. Переход на новую методику требует экономических затрат. |

Следующим этапом является выявление соответствия сильных и слабых

сторон проекта условиям внешней среды. Данный анализ соответствий (или несоответствий) необходим для оценки необходимости каких либо стратегических изменений. В таблице 5 представлены корреляции сильных сторон проекта и возможностей его реализации.

Таблица 5 – Сильные стороны проекта и возможности

|                     |    | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 |
|---------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Возможности проекта | B1 | +  | +  | +  | +  | +  | -  | -  |
|                     | B2 | -  | -  | -  | -  | -  | +  | +  |
|                     | B3 | -  | -  | -  | -  | -  | +  | +  |

Из таблицы 5 следует, что сильные стороны проекта соответствуют возможностям реализации по параметрам:

B1C1C2C3C4C5

B2C6C7

B3C6C7

Возможность B1 взаимодействует с сильными сторонами C1C2C3C4C5 потому, что экономичность и скорость методики определяется этими сильными сторонами: отсутствие необходимости нанесения усталостной трещины экономит время и средства на проведение этой операции; малый размер образцов экономит материал; нет необходимости в тензорезисторе – экономия; скорость получения результата за счет простоты методики; образцы простой формы быстрее и легче изготовить, а значит и затраты на их изготовление ниже.

Возможность B2 взаимодействует с сильными сторонами C6C7 потому, что новые материалы могут быть хрупкими, пластичными или обладать долей того и того. Данная методика позволяет испытывать как хрупкие, так и пластичные материалы, так как она фундаментальная и имеет возможность оценивать вклад пластической деформации.

Возможность B3 взаимодействует с сильными сторонами C6C7 потому, что данная методика носит аналитический характер, т.е. описывает процессы,

происходящие при зарождении и распространении трещины с позиции физики и механики разрушения, без использования эмпирических или феноменологических констант. Возможность оценки пластических свойств материала также может помочь выходу методики на мировой уровень, т.к. существующие аналогичные методики не подразумевают эту оценку.

Таблица 6 – Слабые стороны проекта и возможности

|                     |    | Сл1 | Сл2 | Сл3 | Сл4 |
|---------------------|----|-----|-----|-----|-----|
| Возможности проекта | В1 | +   | -   | +   | +   |
|                     | В2 | -   | +   | -   | -   |
|                     | В3 | -   | -   | +   | -   |

Из таблицы 6 следует, что слабые стороны проекта коррелируют с возможностями реализации по параметрам:

В1Сл1Сл3Сл4

В2Сл2

В3Сл3

Возможность В1 взаимодействует со слабыми сторонами Сл1Сл3Сл4 потому, что необходимость фотокамеры это лишние затраты; ручная обработка результатов требует некоторого времени, что негативно сказывается на скорости; высокие требования к квалификации персонала подразумевают дополнительные затраты на обучение и оплату труда.

Возможность В2 взаимодействует со слабой стороной Сл2 потому, что испытания новых материалов и последующее занесение полученных характеристик в справочники требует точности полученных значений, погрешностей необходимо избегать.

Возможность В3 взаимодействует со слабой стороной Сл3 потому, что, не смотря на фундаментальность самих формул методики, испытания требуют ручной обработки результатов, во время которой возможны ошибки, а это, в свою очередь может оттолкнуть мировую общественность от применения данной методики.

Таблица 7 – Сильные стороны проекта и угрозы

| Угрозы |    | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|
|        | У1 | +  | -  | +  | -  | +  | -  |
|        | У2 | +  | +  | +  | +  | +  | +  |
|        | У3 | -  | -  | -  | -  | -  | -  |
|        | У4 | -  | -  | -  | -  | -  | -  |

Из таблицы 7 следует, что сильные стороны проекта соответствуют угрозам реализации по параметрам:

У1С1С3С5

У2С1С2С3С4С5С6

Угроза У1 взаимодействует с сильными сторонами С1С3С5 потому, что отсутствие требования наносить усталостную трещину, ненужность тензорезистора, простота формы образцов упрощают методику, что, в свою очередь, поможет избежать угрозу сложности выхода методики на уровень государственных стандартов.

Угроза У2 взаимодействует с сильными сторонами С1С2С3С4С5С6 потому, что все эти сильные стороны способны заинтересовать потенциальных потребителей, а значит, снизить угрозу отсутствия спроса.

Таблица 8 – Слабые стороны проекта и угрозы

| Возможности проекта |    | Сл1 | Сл2 | Сл3 | Сл4 |
|---------------------|----|-----|-----|-----|-----|
|                     | У1 | +   | +   | +   | -   |
|                     | У2 | -   | +   | +   | +   |
|                     | У3 | -   | -   | +   | +   |
|                     | У4 | +   | -   | -   | +   |

Из таблицы 8 следует, что слабые стороны проекта соответствуют угрозам реализации по параметрам:

У1Сл1Сл2Сл3

У2Сл2Сл3Сл4

У3Сл3Сл4

У4Сл1Сл4

Угроза У1 взаимодействует со слабыми сторонами Сл1Сл2Сл3 потому, что для того, чтобы методика была признана стандартом она должна быть однозначной. Наличие дополнительного оборудования в виде фотокамеры наложит ряд дополнительных требований к ее типу и свойствам, что усложнит стандарт. Погрешность измерений также мешает продвижению методики в ряд стандартных. Ручная обработка результатов усложняет методику, что негативно сказывается на возможности ее становления стандартом.

Угроза У2 взаимодействует со слабыми сторонами Сл2Сл3Сл4 потому, что спрос на методику может упасть из-за неточности измерений, необходимости их ручной обработки, а также высоких требований к квалификации персонала и вытекающих из этого затрат.

Угроза У3 взаимодействует со слабыми сторонами Сл3Сл4 потому, что ручная обработка результатов должна проводиться квалифицированным персоналом, а затраты на это могут оттолкнуть потенциальных потребителей методики.

Угроза У4 взаимодействует со слабыми сторонами Сл1Сл4 потому, что закупка дополнительного оборудования в виде фотокамеры, переобучение персонала потребует от предприятия дополнительных экономических затрат, из-за чего предприятие может отказаться от внедрения данной методики.

Анализ показал, что наибольшей угрозой проекту является сложность выхода данной методики на уровень стандарта. Чтобы данную методику признали стандартной и начали использовать необходимо проведение ряда дополнительных испытаний, организационных мероприятий, направленных на формализацию методики.

Слабой стороной проекта является необходимость ручной обработки результатов, что, в свою очередь, вызывает необходимость в опытном кадровом составе.

#### 4.4 Планирование комплекса работ по проведению НТИ

Для анализа трудоемкости выполнения НИР используется экспертная оценка [18]. Расчёт ведётся в человеко-днях, но, поскольку зависит от множества факторов, носит вероятностный характер. Этапы выполнения данной работы представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

| Основные этапы                                 | № работы | Содержание работы  | Должность исполнителя |
|--|----------|--|-----------------------|
| Разработка ТЗ на проектирование                | 1        | Составление технической записки для НТИ  | руководитель; инженер |
| <b>Проведение НТИ</b>                          |          |  |                       |
| Выбор направления исследования                 | 2        | Изучение литературы по соответствующей тематике                                  | инженер               |
|  | 3        | Изучение методики определения трещиностойкости                                   | инженер               |
|  | 4        | Планирование проведения эксперимента по испытанию титанового сплава.             | руководитель; инженер |
| Теоретические и экспериментальные исследования | 5        | Установка и настройка необходимого оборудования.                                 | руководитель; инженер |
|  | 6        | Испытание титанового сплава ВТ1-0  | инженер               |
|  | 7        | Анализ полученных результатов, определение трещиностойкости сплава ВТ1-0, выводы | инженер               |
| Обобщение и оценка результатов                 | 8        | Оценка эффективности полученных результатов                                      | руководитель; инженер |
|  | 9        | Составление пояснительной записки  | инженер               |

##### 4.4.1 Определение трудоемкости работ

Для определения трудоёмкости работ используется опытно-статистический метод расчёта ожидаемого времени выполнения работ в человеко-днях по формуле [18]



$$t_{ожі} = \frac{3 \cdot t_{\min i} + 2 \cdot t_{\max i}}{5},$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, чел.-дн.;

$t_{\min i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Для установления продолжительности работы в рабочих днях используем формулу:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k,$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения одной работы, календ. дн.;

$T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$k$  – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{T_{КГ}}{T_{КГ} - T_{ВД} - T_{ПД}},$$

где  $T_{КГ}$  – количество календарных дней в году;

$T_{ВД}$  – количество выходных дней в году;

$T_{ПД}$  – количество праздничных дней в году.

Определим длительность этапов в рабочих днях и коэффициент календарности:

$$k = \frac{T_{КГ}}{T_{КГ} - T_{ВД} - T_{ПД}} = \frac{365}{365 - 108 - 10} = 1,48.$$

Длительность этапов в рабочих днях. Следует учесть, что расчетную величину продолжительности работ  $T_K$  нужно округлить до целых чисел [17].

Результаты расчетов приведены в таблице 10.

#### 4.4.2 Техническая готовность НТИ

Техническая готовность исследования отражает то, насколько выполнены запланированные этапы или работа. Численно показатель технической готовности выражается как отношение продолжительности работ, выполненных на момент исчисления этого показателя, к общей запланированной продолжительности работ, при этом следует учесть, что период исследования составляет примерно 6 месяцев, студент-дипломник выступает в качестве основного исполнителя [16].

Для выделения удельного значения отдельной работы из общей продолжительности работ используется формула:

$$U_i = \frac{T_{pi}}{T_p} \cdot 100\% ,$$

где  $U_i$  – удельное значение каждой работы в %;

$T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб.дн.;

$T_p$  – суммарная продолжительность работ, раб.дн.

Техническую готовность индивидуальной работы определим по формуле:

$$\Gamma_i = \frac{\sum_{i=1} T_{pi}}{T_p} \cdot 100\% ,$$

где  $\sum_{i=1} T_{pi}$  – нарастающая продолжительность на момент выполнения  $i$ -той работы. [17]

Результаты расчетов приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Временные показатели проведения НТИ

| № раб. | Исполнители                    | Продолжительность работ  |                          |                         |                        |                        |                    |                    |
|--------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
|        |                                | t <sub>min</sub> чел-дн. | t <sub>max</sub> чел-дн. | t <sub>ож</sub> чел-дн. | T <sub>p</sub> раб.дн. | T <sub>k</sub> кал.дн. | У <sub>i</sub> , % | Г <sub>i</sub> , % |
| 1      | Дерюгин Е.Е.,<br>Богданов А.А. | 1                        | 3                        | 2                       | 1,2                    | 3                      | 1,72               | 1,05               |
| 2      | Богданов А.А.                  | 18                       | 38                       | 25                      | 25                     | 32                     | 32,26              | 37,61              |
| 3      | Богданов А.А.                  | 6                        | 13                       | 11                      | 2,8                    | 7                      | 5,50               | 47,71              |
| 4      | Дерюгин Е.Е.,<br>Богданов А.А. | 12                       | 24                       | 18                      | 18                     | 35                     | 22,32              | 70,6               |
| 5      | Дерюгин Е.Е.,<br>Богданов А.А. | 4                        | 18                       | 8                       | 4                      | 6                      | 3,92               | 81,26              |
| 6      | Богданов А.А.                  | 5                        | 12                       | 8                       | 4,7                    | 15                     | 7,04               | 14,21              |
| 7      | Богданов А.А.                  | 1                        | 9                        | 4                       | 0,87                   | 4                      | 6,30               | 88,91              |
| 8      | Дерюгин Е.Е.,<br>Богданов А.А. | 2                        | 12                       | 6                       | 3,4                    | 6                      | 7,09               | 93,11              |
| 9      | Богданов А.А.                  | 2                        | 9                        | 5                       | 4                      | 9                      | 5,99               | 100                |

#### 4.4.3 Построение графика работ

Диаграммы Ганта, или иначе ленточные диаграммы, используются для удобного и наглядного представления календарного плана работ. В текущей работе диаграмма Ганта представлена в виде горизонтального ленточного графика проведения ВКР (таблица 11), на котором каждая работа представлена отрезками, протяженными во времени и имеющими дату начала и окончания выполнения [18].

Таблица 11. состоит из столбцов, разбитых на месяцы и недели, за которые происходит выполнение ВКР. Ячейки, закрашенные определенным цветом, отражают вид работы и ее исполнителя. У каждого исполнителя свой цвет.

Таблица 11 – Календарный график проведения НИР

| Этапы | Вид работы  | Исполнители                 | T <sub>k</sub> | Февраль | Март | Апрель | Май | Июнь |
|-------|---|-----------------------------|----------------|---------|------|--------|-----|------|
| 1     | Составление и утверждение тех. задания                              | Дерюгин Е.Е., Богданов А.А. | 3              |         |      |        |     |      |
| 2     | Изучение литературы по соответствующей тематике                     | Богданов А.А.               | 32             |         |      |        |     |      |
| 3     | Изучение методики определения трещиностойкости                      | Богданов А.А.               | 7              |         |      |        |     |      |
| 4     | Планирование проведения эксперимента.                               | Дерюгин Е.Е., Богданов А.А. | 35             |         |      |        |     |      |
| 5     | Установка и настройка необходимого оборудования.                    | Дерюгин Е.Е., Богданов А.А. | 6              |         |      |        |     |      |
| 6     | Испытание титана ВТ1-0  | Богданов А.А.               | 15             |         |      |        |     |      |
| 7     | Анализ полученных результатов: определение трещиностойкости, выводы | Богданов А.А.               | 4              |         |      |        |     |      |
| 8     | Оценка полученных результатов                                       | Дерюгин Е.Е., Богданов А.А. | 6              |         |      |        |     |      |
| 9     | Составление пояснительной записки                                   | Богданов А.А.               | 9              |         |      |        |     |      |

 – инженер,  – руководитель.

График выполнения работ учитывает выходные и праздничные дни. Таким образом, суммарное количество рабочих дней на выполнение данного

проектирования 117: 117 у студента-дипломника и 50 у руководителя.

#### 4.5 Расчет бюджета затрат на НИИ

Затраты на НИИ являют собой все производственные формы потребления денежных средств, а также материальных ценностей, выраженных в денежном эквиваленте, служащих непосредственному достижению производственной цели [17].

При расчёте сметы расходов учитываются затраты на приобретение необходимого оборудования и текущие расходы.

Себестоимость работы формируется из затрат, которые, в свою очередь, группируются по следующим экономическим элементам:

$$K_{\text{проекта}} = I_{\text{мат}} + I_{\text{ат.техн}} + I_{\text{ЗП}} + I_{\text{соц.отч.}} + I_{\text{накл.расх.}} + I_{\text{прочие}},$$

Здесь  $I_{\text{мат}}$  – материальные затраты, включающие стоимость материалов и сырья, необходимого при изготовлении продукции [18].

В данной работе использовалось 10 образцов сплава ВТ1-0. Стоимость 1кг материала 1600 руб. Вес одного образца 0,04 кг.

Таблица 12 – Материальные затраты

| Наименование            | Единица измерения | Количество | Цена за ед., руб. | Затраты на материалы, руб. |
|-------------------------|-------------------|------------|-------------------|----------------------------|
| Технический титан ВТ1-0 | кг                | 0,4        | 1600              | 640                        |
| Итого                   |                   |            |                   | 640                        |

Изготовление образцов и их обработку заказывали в сторонней организации. Расходы на эти операции отнесены к контрагентским, их расчёт представлен в таблице 13.

Таблица 13 – Контрагентские расходы

| Наименование   | Единица измерения | Количество | Цена за ед., руб. | Затраты всего, руб. |
|--|-------------------|------------|-------------------|---------------------|
| Изготовление образца                                 | шт                | 10         | 200               | 2000                |
| Электроэрозионная резка (создание надреза и шеврона) | шт                | 10         | 300               | 3000                |
| Итого  |                   |            |                   | 5000                |

Также для исследования требуется оборудование: установка для испытаний Instron-5582, зеркальная фотокамера Pentax К-5 и ПК.

Срок полезного использования каждого вида оборудования:

1) установка Instron-5582 и фотокамера – по пятой группе (оборудование испытательное): 10 лет.

2) Компьютер – по третьей группе (техника электронно-вычислительная): 5 лет [19].

Рассчитываем материальные затраты  $I_{\text{мат}}$ . Результаты расчета представлены в таблице 4.11.

$$I_{\text{мат}} = I_{\text{исп.уст}} + I_{\text{кам}} + I_{\text{комп}}$$

$$I_{\text{мат}} = 4900000 + 22000 + 28000 = 4950000 \text{ руб.}$$

Таблица 14 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

| Материалы и оборудование             | Ед. изм. | Срок службы, год | Кол-во, ед | Цена за ед, руб | Затраты, руб |
|--------------------------------------|----------|------------------|------------|-----------------|--------------|
| Испытательная установка Instron-5582 | шт       | 10               | 1          | 4900000         | 4900000      |
| Фотокамера Pentax К-5                | шт       | 10               | 1          | 22000           | 22000        |
| Компьютер                            | шт       | 5                | 1          | 28000           | 28000        |
| Итого:                               |          |                  |            |                 | 4 950 000    |

Стоит отметить, что при проведении исследования не потребовалось приобретать испытательную установку Instron, фотоаппарат и компьютер, так как они уже имеются в ИФПМ СО РАН, следовательно, их стоимость не учитывается в бюджете затрат.

Амортизация основных фондов – сумма амортизационных отчислений

на полное восстановление основных производственных фондов, вычисленная исходя из их балансовой стоимости и утвержденных норм амортизации. Корректно при расчете затрат учитывать в год приобретения и в последующие годы только ту часть затрат, которая происходит от старения основных фондов в каждом году [18]. Учёту амортизации подлежит оборудование сроком использования более года и стоимостью за единицу оборудования более 100 тыс. руб. Таким образом, амортизацию рассчитываем только для испытательной установки Instron-5582.

Расчёт амортизации оборудования  $I_{\text{ам.обор}}$  ведется по следующей формуле:

$$I_{\text{ам.обор}} = \left( \frac{T_{\text{исп.обор}}}{365} \right) \cdot K_{\text{обор}} \cdot H_a,$$

где  $T_{\text{исп.обор}}$  – время использования оборудования;

365 дней – количество дней в году;

$K_{\text{обор}}$  – стоимость оборудования;

$H_a$  – норма амортизации.

$$H_a = \frac{1}{T_{\text{с.с.обор}}}.$$

где  $T_{\text{с.с.обор}}$  – срок службы оборудования.

$$I_{\text{ам.исп.уст}} = \left( \frac{T_{\text{исп.уст}}}{365} \right) \times K_{\text{исп.уст}} \times H_a = \left( \frac{21}{365} \right) \times 4900000 \times \left( \frac{1}{10} \right) = 28191,78 \text{ руб.}$$

Результаты расчета амортизации оборудования представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Расчет величины амортизационных отчислений

| Тип оборудования                     | Стоимость, руб. | Срок эксплуатации, лет | Срок использования в НТИ, кал.дн. | Амортизационные отчисления, руб. |
|--------------------------------------|-----------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Испытательная установка Instron-5582 | 4 900 000       | 10                     | 21                                | 28191,78                         |

Расчёт заработной платы ведётся с учётом занятости в работе каждого исполнителя, а также районного и тарифного коэффициентов.

Затраты на оплату труда состоят из следующих пунктов:

- выплаты заработной платы за фактически выполненную работу;
- выплаты стимулирующего характера по системным положениям;
- выплаты по районным коэффициентам;
- компенсации за неиспользованный отпуск;
- другие виды выплат [16].

Таблица 16 – Расчет основной заработной платы

| Наименование этапов | Исполнители по категориям     | Трудовое мкость, чел.-раб.дн. | Заработная плата по тарифу (окладам) с учётом РК, руб. | Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., руб. | Итоговая з/п |
|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|---|--------------|
| 1-9                 | Инженер (УВП, 1 кв. уровень)  | 64                            | 10470  | $10470/21=387,78$                                     | 24817,92     |
| 1,4,5,8             | Руководитель (Профессор, д.н) | 27                            | 55200  | $55200/21=2628,57$                                    | 70971,39     |
| Итого:              |                               |                               |  |   | 95789,31     |

В таблице 17 представлена смета бюджета затрат на НИР.

Таблица 17 – Расчет бюджета затрат НИИ

| Наименование статьи   | Сумма, руб. | Порядок расчета  |
|---|-------------|--|
| Материальные затраты НИИ  | 640,00      | Таблица 12   |
| Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ | 28191,78    | Таблица 14, таблица 15   |
| Затраты по основной заработной плате исполнителей темы                    | 95789,31    | Таблица 16   |
| Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы              | 11494,72    | $(осн.З.П.) \cdot 0,12$<br>$95789,31 \cdot 0,12$                           |
| Отчисления на социальные нужды  | 29073,97    | $(осн.З.П. + доп.З.П.) \cdot 0,271$<br>$(95789,31 + 11494,72) \cdot 0,271$ |
| Затраты на научные и производственные командировки                        | -           | -  |



|                        |           |   |
|------------------------|-----------|---|
| Контрагентские расходы | 5000      | Таблица 13  |
| Накладные расходы      | 27230,36  | (сумма пунктов 1-7)*0,16<br>(640,00+28191,78+95789,31+<br>11494,72+29073,97+0+5000)*0,16=<br>170189,78*0,16 |
| Бюджет затрат НИИ      | 197420,14 | сумма всех затрат<br>640,00+28191,78+95789,31+<br>11494,72+29073,97+0+5000+27230,36                         |

#### 4.6 Оценка ресурсоэффективности

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Данная научно-исследовательская работа финансируется за счет средств государственного бюджета и по характеру получаемых результатов относится к поисковым работам. Результаты данных работ, как правило, не заканчиваются созданием и промышленным внедрением новых видов материалов и средств изготовления продукции, поэтому оценивать её эффективность преждевременно.

#### 4.7 Определение научно-технического уровня исследования

Коэффициент научно-технического уровня научного исследования необходим для оценки его эффективности, а также технической и научной значимости. Для расчёта коэффициента НТУ используется специальная шкала балльных оценок для каждого признака НИИ. Общая оценка даётся после суммирования баллов с учётом весовых характеристик и выражается формулой:

$$НТУ = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \Pi_i ,$$

где  $k_i$  – весовой коэффициент  $i$  – го признака;

$P_i$  – количественная оценка  $i$  – го признака.

Таблица 18 – Весовые коэффициенты НТУ

| Признаки НТУ           | Весовой коэффициент |
|------------------------|---------------------|
| Уровень новизны        | 0.6                 |
| Теоретический уровень  | 0.4                 |
| Возможность реализации | 0.2                 |

Таблица 19 – Шкала оценки новизны

| Баллы | Уровень                  |
|-------|--------------------------|
| 1-4   | Низкий НТУ               |
| 5-7   | Средний НТУ              |
| 8-10  | Сравнительно высокий НТУ |
| 11-14 | Высокий НТУ              |

Таблица 20 – Значимость теоретических уровней

| Характеристика значимости теоретических уровней   | Баллы |
|---|-------|
| Установка законов, разработка новой теории  | 10    |
| Глубокая разработка проблем, многосторонний анализ, взаимозависимость между факторами                       | 8     |
| Разработка способа (алгоритм, устройство, программы)  | 6     |
| Элементарный анализ связей между факторами (наличие гипотезы, объяснение версий, практические рекомендации) | 2     |
| Описание отдельных факторов (вещества, свойств, опыта, результатов)   | 0.5   |

Таблица 21 – Возможность реализации по времени и масштабам

| Время реализации               | Баллы |
|--------------------------------|-------|
| В течение первых лет           | 10    |
| От 5 до 10 лет                 | 4     |
| Свыше 10 лет                   | 2     |
| Масштабы реализации            | Баллы |
| Одно или несколько предприятий | 2     |
| Отрасль                        | 4     |
| Народное хозяйство             | 10    |

$$k_1 = 0.6, P_1 = 7, k_2 = 0.4, P_2 = 8,$$

$$k_3 = 0.2, P_3 = 10, k_4 = 0.2, P_4 = 4.$$

$$НТУ = 0.6 \cdot 7 + 0.4 \cdot 8 + 0.2 \cdot 10 + 0.2 \cdot 4 = 10.2$$

Результаты расчёта коэффициента НТУ приводят к выводу, что текущий проект имеет в себе элементы новизны, обладает значимостью на теоретическом уровне, имеет возможность внедрения в широком круге отраслей за сравнительно небольшое время.

## Список публикаций

1. Богданов А. А., Дерюгин Е. Е. Зависимость характеристик трещиностойкости технического титана ВТ1-0 от температуры // Современные технологии и материалы новых поколений: сборник трудов международной конференции с элементами научной школы для молодежи, Томск, 9 - 13 Октября 2017. - Томск: ТПУ, 2017 - С. 24-25.