

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование трещиностойкости титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6 методом расклинивания

УДК 669.295.5:620.191.33

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ81	Богданов Алексей Алексеевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ ТПУ	Зенин Борис Сергеевич	к.ф.-м.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник ИФПМ СО РАН	Дерюгин Евгений Евгеньевич	д.ф.-м.н., профессор		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Якимова Татьяна Борисовна	к. э. н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Романцов Игорь Иванович	к. т. н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.04.01 Материаловедение и технологии материалов	Овечкин Борис Борисович	к.т.н., доцент		

*Планируемые результаты обучения по ООП 22.04.01*

<b>Код результата</b>	<b>Результат обучения</b> (выпускник должен быть готов)
P1	Осуществлять сбор и критический анализ информации, включая научные публикации, патенты, маркетинговые исследования в области материаловедения и технологии материалов
P2	Управлять научно-исследовательским и производственным проектом, включая критический анализ проблемных ситуаций, оценки потенциала коллектива и самооценки
P3	Способен представлять и защищать результаты своей работы и деятельности коллектива, включая планы научно-исследовательских работ, производственных проектов, научные публикации и доклады с использованием современных коммуникативных технологий, в том числе на иностранном языке.
P4	Руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
P5	Ориентироваться в современных технологиях новых материалов с учетом экономичности, требований готовой продукции и интеллектуального потенциала предприятия, производства или научной группы
P6	Внедрять в производство технологии получения керамических, металлических наноматериалов и изделий, включая эксплуатацию соответствующего оборудования.
P7	Эксплуатировать оборудование и обрабатывать экспериментальные результаты с целью изучения структуры и свойств материалов, диагностики их эксплуатационных характеристик
P8	Разрабатывать новые и модернизировать существующие технологии получения керамических, металлических материалов и изделий, в том числе наноматериалов

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Б.Б. Овечкин  
 (Подпись)      (Дата)

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

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ41	Богданову Алексею Алексеевичу

Тема работы:

Исследование трещиностойкости титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6 методом расклинивания	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ № 52-52/с от 21.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <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>Объектом исследования является новая методика определения трещиностойкости конструкционных материалов, разрабатываемая в лаборатории физической мезомеханики и неразрушающих методов контроля ИФПМ СО РАН. Испытания проводятся на примере титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6 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> (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).</p>	<p>Обзор литературы по методикам определения трещиностойкости; Постановка задачи, методика и материал исследования; Результаты исследования и их обсуждение; Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; Социальная ответственность; Заключение по работе.</p>
--	---

<p><b>Перечень графического материала (13 слайдов)</b> (с точным указанием обязательных чертежей)</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. Критерии трещиностойкости</li> <li>10. Результаты</li> <li>11. Результаты</li> <li>12. Заключение</li> <li>13. Заключение</li> <li>14. Список публикаций</li> </ol>
---	---

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Обзор литературы	Е. Е. Дерюгин, ведущий научный сотрудник ИФПМ СО РАН
Постановка задачи, методика и материал исследования	Е. Е. Дерюгин, ведущий научный сотрудник ИФПМ СО РАН
Результаты исследования и их обсуждение	Е. Е. Дерюгин, ведущий научный сотрудник ИФПМ СО РАН
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Т. Б. Якимова, доцент ОСГН ШБИП
Социальная ответственность	И. И. Романцов, доцент ООД ШБИП
Приложение (справочное)	И. К. Забродина, доцент ОИЯ ШБИП

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

Введение – Introduction

Обзор литературы – Literature overview

**Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику**

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ ТПУ	Зенин Борис Сергеевич	к.ф.-м.н.		
Ведущий научный сотрудник ИФПМ СО РАН	Дерюгин Евгений Евгеньевич	д.ф.-м.н., профессор		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ81	Богданов Алексей Алексеевич		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 100 страниц, 22 рисунка, 23 таблицы, 31 источник.

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

Цель работы: Изучение новой методики определения характеристик трещиностойкости конструкционных материалов, разрабатываемой в лаборатории физической мезомеханики и неразрушающих методов контроля ИФПМ СО РАН и проверка методики на примере титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6. В качестве основной характеристики трещиностойкости определяется удельная энергия разрушения.

В качестве материала исследования использованы титановые сплавы ВТ1-0 и ВТ6. Испытания проведены методом расклинивания малоразмерных образцов с шевронным надрезом на универсальной разрывной машине Instron-5582 при комнатной температуре. 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 К-5 с интервалом в 4с. По полученным изображениям измерена длина трещины и 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. Полученные значения  $K_{Ic}$  соответствуют значениям для титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6, приведенным в справочниках, что свидетельствует о работоспособности методики.

Данная ВКР размещена в электронно-библиотечной системе ТПУ.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$a$	длина трещины
$a_0$	начальная длина трещины
$B$	толщина образца
$C(T)$	компактный образец на растяжение
$E$	модуль Юнга
$f_{ij}(\theta)$	угловые функции поля напряжения вершины трещины
$G$	скорость высвобождения упругой энергии
$G_c$	критическая скорость высвобождения упругой энергии
$G_{Ic}$	плоская деформационная трещиностойкость, характеризуемая $G$
$J$	$J$ -интеграл
$K_I$	коэффициент интенсивности напряжений для трещины I-типа
$K_{Ic}$	критический коэффициент интенсивности напряжений
$P$	приложенная нагрузка
$P_{max}$	максимальная приложенная нагрузка или усилие
$S$	расстояние между опорами для образца с односторонним надрезом для трехточечного изгиба
$SE(B)$	образец с односторонним надрезом для трехточечного изгиба
$T$	$T$ -напряжение, представляющее собой второй член упругого поля напряжений у вершины трещины
$W$	ширина образца

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	8
1. Обзор методов испытаний на трещиностойкость.....	15
1.1 Физика и механика разрушения конструкционных материалов.....	15
1.2 Коэффициент интенсивности напряжений и упругое поле у вершины трещины.....	17
1.3 Скорость высвобождения упругой энергии.....	19
1.4 Энергия разрушения.....	22
2. Постановка задачи, методика и материалы исследования.....	24
2.1 Постановка задачи исследования.....	24
2.2 Методика определения трещиностойкости твердых тел.....	25
2.3 Материалы исследования.....	33
2.4 Оборудование для исследования.....	34
3. Результаты и их обсуждение.....	37
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение....	44
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	44
4.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	45
4.3 SWOT-анализ.....	46
4.4 Планирование комплекса работ по проведению НТИ.....	51
4.5 Определение трудоемкости работ.....	51
4.6 Техническая готовность НТИ.....	53
4.7 Построение графика работ.....	54
4.8 Расчет бюджета затрат на НТИ.....	56
4.9 Оценка ресурсоэффективности.....	59
4.10 Определение научно-технического уровня исследования.....	60
5. Социальная ответственность. Введение.....	63
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	63
5.2 Производственная безопасность.....	64
5.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	66
5.4 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя.....	69
5.5 Экологическая безопасность.....	73
5.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	75
5.7 Выводы по разделу.....	78
Заключение.....	79
Список публикаций.....	81
Список использованных источников.....	82
Приложение.....	85

## ВВЕДЕНИЕ

Конструкционные материалы, используемые в таких сферах науки и техники, как авиация, строительство, медицина и др. требуют определения характеристик трещиностойкости.

Трещиностойкость обычно используется в качестве общего термина для измерения сопротивления материала трещине отрыва. Экспериментальное измерение и стандарты по определению трещиностойкости играют важную роль в применении методов механики разрушения для оценки прочности конструкции, проектирования допустимой величины повреждений, оценки пригодности к эксплуатации и анализа остаточной прочности для различных инженерных деталей и конструкций. Значения трещиностойкости могут также служить основой для характеристики материала, оценки производительности и обеспечения качества для типовых инженерных сооружений, включая ядерные сосуды высокого давления и трубопроводы, нефтехимические сосуды и резервуары, нефте- и газопроводы, а также автомобильные, судовые и авиационные конструкции. Поэтому исследование и оценка трещиностойкости является очень важной темой в развитии механики разрушения и её инженерных применений.

Коэффициент интенсивности напряжений  $K$  (или его эквивалент – скорость высвобождения упругой энергии  $G$ ),  $J$ -интеграл – это одни из самых важных параметров, используемых в механике разрушения. Показатель  $K$  был предложен в 1957 году Ирвином [1] для описания интенсивности упругих полей у вершины трещины и символизирует линейную упругую механику разрушения.  $J$ -интеграл был предложен в 1968 Райсом [2] для характеристики интенсивности упругопластических полей у вершины трещины и символизирует механику упругопластического разрушения.

В основном, поведение трещины относится к микро-механизму разрушения и обычно описывается как пластическое или хрупкое [3]. Хрупкое поведение трещины приводит к развитию быстрого и неустойчивого



распространения трещины, и может соответствовать микропластическому пустотному росту трещины или хрупкому излому [4]. Макроскопически испытываемый образец, демонстрирующий этот режим разрушения, имеет уникальную и четко определенную точку начала зарождения трещины. Эта точка соответствует внезапному падению нагрузки и разрушению. По точке, соответствующей моменту снижения нагрузки измеряется точечное значение трещиностойкости [5].

Поскольку для распространения трещины посредством пластического роста микропустот и их объединения происходит поглощение большей энергии, пластическое поведение при разрушении приводит к медленному и стабильному распространению трещины [3]. Этот макрорежим разрушения имеет непрерывный процесс пластического разрыва, а не моментное разрушение. Типичное точечное значение пластической трещиностойкости обычно определяется вблизи начала устойчивого распространения трещины, то есть вблизи перехода от первоначального затупления трещины к её распространению. Этот результат называют трещиностойкостью при зарождении трещины [5]. Типичным примером является оценка пластической трещиностойкости как вязкости, демонстрируемой в образце на изгиб с глубокой трещиной при распространении трещины на 0,2 мм от места первоначального затупления вершины трещины [6].

Деформационное поведение материала можно охарактеризовать как линейно-упругое, нелинейно-упругое или упругопластическое [4]. В общем случае для описания трещиностойкости и измерения значения вязкости материала следует исходить из деформационного поведения материала. Деформационное поведение определяет выбор параметров нагружения при механических испытаниях до разрушения. Для хрупкого разрушения поле линейной упругой деформации окружает и преобладает над вершиной трещины, а сопротивление хрупкому разрушению в момент начала раскрытия трещины преобладает над сопротивлением разрушению материала с незначительным дополнительным сопротивлением распространения трещины

за пределы её начала [6]. Часто энергия, необходимая для распространения трещины за пределы начала её распространения, мала по сравнению с энергией, накопленной в испытательной машине, образец выходит из строя нестабильно, и никакое измерение сопротивления разрушению за пределами начала её распространения невозможно [7]. Таким образом, вязкость часто измеряется как точечное значение и характеризуется коэффициентом интенсивности напряжений  $K$  или скоростью высвобождения энергии  $G$  при зарождении трещины. Первый стандарт испытаний на трещиностойкость ASTM E399 [5] был разработан для определения точечного значения трещиностойкости при плоской деформации в момент или вблизи начала возникновения трещины,  $K_{Ic}$ .

При пластическом разрушении на вершине трещины преобладает пластическая деформация, и сопротивление материала разрушению увеличивается по мере роста трещины, поэтому вязкость часто описывается в форме кривой сопротивления с использованием  $J$ -интеграла [8].  $J$ -интеграл является нелинейной упругой величиной, а не истинной пластической величиной, поэтому требуется осторожность в ее применении для измерения упругопластической трещиностойкости.

Для переходного пластично–хрупкого разрушения вязкость демонстрирует большую изменчивость из-за механизма разрушения, который инициирует трещину в этих материалах. В некоторых случаях вязкость начала распространения трещины может быть определена в единицах критической упругости  $K_{Ic}$ , но другие испытания при той же температуре требуют использования упруго-пластического  $J$ -интеграла, чтобы точно определить начало распространения трещины [9].

Использование методов механики разрушения в инженерном проектировании и структурном анализе требует, чтобы трещиностойкость служила свойством материала, которое может быть перенесено из результатов лабораторных испытаний в условия производства. Однако, ограничение вершины трещины, вызванное толщиной, размером и конфигурацией образцов при испытаниях на трещиностойкость может иметь сильное влияние на

значения трещиностойкости, измеренные в лаборатории. В целом, сильное стеснение деформации приводит к более высоким напряжениям в вершине трещины с меньшей пластической деформацией у вершины трещины и способствует более хрупкому разрушению или уменьшает вязкость кривой сопротивления для пластического разрушения; в то время как слабое стеснение деформации приводит к более низким напряжениям в вершине трещины с большей пластической деформацией у вершины трещины и имеет тенденцию уменьшать возможность хрупкого разрушения и повышать вязкость кривой сопротивления для пластического разрушения.

Ограничение по толщине обычно определяется как плоское напряжение или плоская деформация [7], причем трещиностойкость при плоской деформации считается нижней границей значения. В условиях плоской деформации конфигурация образца, режим нагружения и глубина трещины могут оказывать влияние на трещиностойкость в плоскости ограничения. Для уменьшения влияния конфигурации и толщины образца на результаты вязкости, стандарты ASTM требуют использования образцов, в которых преобладает изгиб [5], а также фиксированный ряд отношений глубины трещины к ширине образца [6]. Также устанавливают пределы на отношение остаточной связки (лигаменты) к толщине, требуют её минимального размера, и во многих случаях требуют бортовых пазов вдоль связки для зарожденной трещины. Когда бортовые пазы присутствуют и образец соответствует другим требованиям ASTM, образец может находиться большей частью в условиях плоской деформации [9]. Так измеряется плоскодеформационная трещиностойкость. Однако остается проблема перехода от лабораторного образца, испытанного в основном методом изгиба с глубокой трещиной, до применения на производстве, где, вероятно, трещина будет более мелкой, нагруженной медленнее или быстрее, чем лабораторный образец.

Для того чтобы получить неизменные, независимые от стеснений деформации измерения трещиностойкости, все стандарты ASTM предписывают строгие требования к геометрии образца [9]. Они нацелены на получение

нижней границы трещиностойкости в большинстве случаев, хотя степень консервативности (неизменности) не определена. Вдобавок, скорость нагрузки, температура, окружающая среда, и т.д., все они оказывают влияние и должны быть учтены при измерении и применении значений трещиностойкости [6].

Испытания на трещиностойкость были признаны ключевыми для определения точных значений вязкости, необходимых в линейной упругой механике разрушения и в упругопластической механике разрушения [4]. Начиная с 1950-х годов во всем мире были проведены обширные аналитические, численные и экспериментальные исследования в области технической разработки эффективной методики испытаний и методов испытаний для измерения критических значений параметров  $G$ ,  $K$  и др. [6]. Различные экспериментальные методы и процедуры испытаний для измерения этих параметров разрушения были разработаны и поддерживаются ASTM в Соединенных Штатах Америки [6]. Все международные стандарты испытаний на трещиностойкость были в основном разработаны на основе ведущих стандартов ASTM, как это обсуждалось Ландесом [6] и Швальбе и др. [8].

При стандартных испытаниях на трещиностойкость наиболее часто используются образцы на растяжение C(T) и на трёхточечный изгиб SE(B), как показано на рисунке 1.

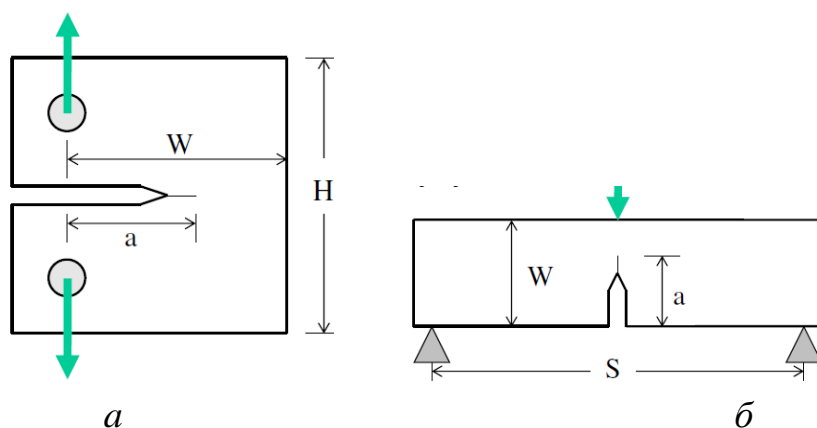


Рисунок 1 – Стандартные образцы испытаний на трещиностойкость: а) компактный образец растяжения (C(T)), б) образец с одиночным надрезом на трёхточечный изгиб (SE(B)) [9]

На этом рисунке  $W$  – это ширина образца,  $H$  – высота образца  $C(T)$ ,  $S$  – расстояние между опорами образца  $SE(B)$ ,  $a$  – длина трещины. В большинстве случаев,  $W = 2B$ , где  $B$  – толщина образца,  $H = 1.2W$ ,  $S = 4W$  и  $a/W \approx 0.5$ . Однако в различных стандартах испытаний на разрушение предписываются различные требования к размерам образцов, с тем, чтобы получить действительную трещиностойкость и ограничить влияние стеснения деформации на этот параметр трещиностойкости.

Существующие способы расчета трещиностойкости материалов (вязкости разрушения) разделяют на аналитические и численные [3]. 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 [5, 6]. 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 [10] 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, которые необходимо избегать в расчетах  $K_{Ic}$  на отрыв.

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

В лаборатории физической мезомеханики ИФПМ СО РАН разрабатывается аналитический метод, который 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».

## 1. Обзор методов испытаний на трещиностойкость

### 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 [10]. 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.

На рисунке 2 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).

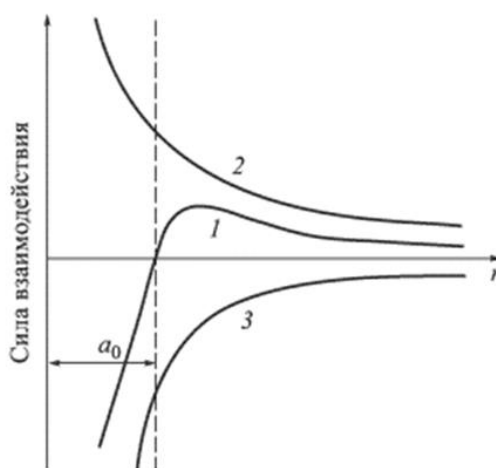


Рисунок 2 – Силы взаимодействия между частицами в зависимости от расстояния между ними [7]

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  $U_0$ . Частицы, расположенные на расстоянии  $a_0$  образуют 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].

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 3 приведены примеры ряда микромеханизмов разрушения металлов.

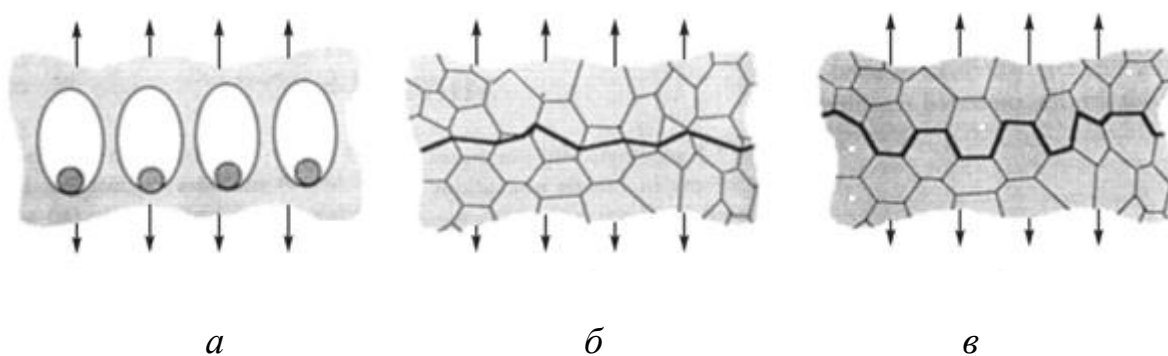


Рисунок 3 – Микромеханизмы разрушения металлов:  
*a* - вязкое разрушение, *б* - транскристаллитный скол,  
*в* - интеркристаллитный скол [7]

Вязкий микромеханизм разрушения сопровождается локализацией деформации (возникновение шейки) т.е. локализованным сужением в связи с большой пластической деформацией, связанной со слиянием микропор и разрывом перемычек между порами [7]. При достижении критических напряжений перед вершиной трещины образуются микропоры. В результате их роста, слияния и развития локализованной пластической деформации происходит рост вязкой трещины.

Конструкционные материалы имеют поликристаллическую структуру. Разрушение поликристаллических материалов может проходить по транскристаллитному типу и по интеркристаллитному механизму разрушения [10].



Транскристаллитный скол происходит по кристаллографическим плоскостям. Так в кристаллах с ОЦК решеткой разрушение протекает в семействе плоскостей  $\{100\}$  [10]. В поликристаллических материалах транскристаллитный скол реализуется посредством распространения и дальнейшего объединения множества микротрещин. На поверхности образуются ступеньки скола, образуя так называемый «ручьистый рельеф» [3]. Транскристаллитный скол обычно имеет хрупкий характер разрушения [4], 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 [3].

## **1.2 Коэффициент интенсивности напряжений и упругое поле у вершины трещины**

Одной из наиболее значимых характеристик трещиностойкости материалов является коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$ , где индекс  $I$  указывает на первый тип разрушения разрывом [1]. Для сквозной трещины длиной  $2a$  в бесконечной пластине, подвергнутой удаленному растягивающему напряжению  $\sigma$ , Ирвин [11] в лаборатории морских исследований США и Уильямс [12] в Калифорнийском технологическом институте независимо друг от друга получили асимптотическое поле напряжений у вершины трещины согласно уравнению:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (1)$$

где индексы  $i, j$  обозначают индексы компонент тензора напряжений,  $r$  и  $\theta$  - полярные координаты с началом координат в вершине трещины,  $f_{ij}(\theta)$  - угловая функция напряжения, и  $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$ .

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  $2\sigma$ .

Формула (1) указывает на то, что упругое поле вершины трещины имеет сингулярность, поскольку стремится к бесконечности при  $r \rightarrow 0$ . Параметр  $K_I$  характеризует интенсивность сингулярности напряжений у вершины трещины, и называется «коэффициентом интенсивности напряжений» для трещины разрыва типа-I. В действительности бесконечные напряжения не существуют, и пластическая деформация материала у вершине трещины, сохраняет эти напряжения конечными [2]. Для плоского напряженного состояния трещины I-го типа, Ирвин и его коллеги [12] определили размер пластической зоны  $r$  перед вершиной трещины в виде уравнения:

$$r = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2)$$

где  $\sigma_{ys}$  - условный предел текучести материала. Формула (2) верна только для хрупких материалов [3]. Пластическая деформация приводит к перераспределению напряжений у вершины трещины. Поэтому зона пластической деформации будет больше. Из условия равновесия следует, что размер пластической зоны в два раза больше, чем предсказывает уравнение (2). Аналогичный результат был получен Дагдейлом [13].

Как таковой, коэффициент интенсивности напряжения  $K_I$  – это уникальная мера напряжений и деформаций в упругой вершине трещины. Когда напряжения или деформации на его вершине достигнут критических значений, трещина станет расти. Это означает, что распространение трещины начнется, когда  $K_I$  достигнет критического значения  $K_{Ic}$ , т.е. когда  $K_I = K_{Ic}$ .  $K_{Ic}$  – это параметр, характеризующий трещиностойкость материала или сопротивление материала разрушению [10].

Используя решение упругой вершины трещины и энергетическую теорию Гриффитса [14], Ирвин [1, 11] установил простую зависимость между фактором  $K_I$  и скоростью высвобождения упругой энергии  $G$ :

$$\frac{K_I^2}{E'} = G \quad (3)$$

где  $E' = E$  для плосконапряженного и  $E' = E/(1 - \nu^2)$  для плоскодеформированного состояния материала с модулем Юнга  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\nu$ .

Формула (3) строго справедлива только для сквозной трещины в нагруженной бесконечной пластине [3]. Критерий энергии Гриффитса, т. е.  $G = G_c$ , эквивалентен критерию напряжений  $K$ .

Многие аналитические и вычислительные решения для коэффициента интенсивности напряжений были разработаны для различных конфигураций геометрии и нагрузки, а решения  $K$  собраны в справочниках по коэффициентам интенсивности напряжений Тада и др. [16], Мураками [17], Рука и Картрайта [18]. В настоящее время большинство коммерческих программ для анализа конечных элементов имеет возможность численно вычислить коэффициент  $K$  для любой адекватно смоделированной трещины. Параллельно проводились обширные экспериментальные исследования по измерению трещиностойкости  $K_{Ic}$  для широкого спектра материалов, о которых сообщается, например, в источнике [19].

### **1.3 Скорость высвобождения упругой энергии**

Высвобождение деформации и работа образования новых граничных поверхностей определяют скорость высвобождения упругой энергии  $G$ .

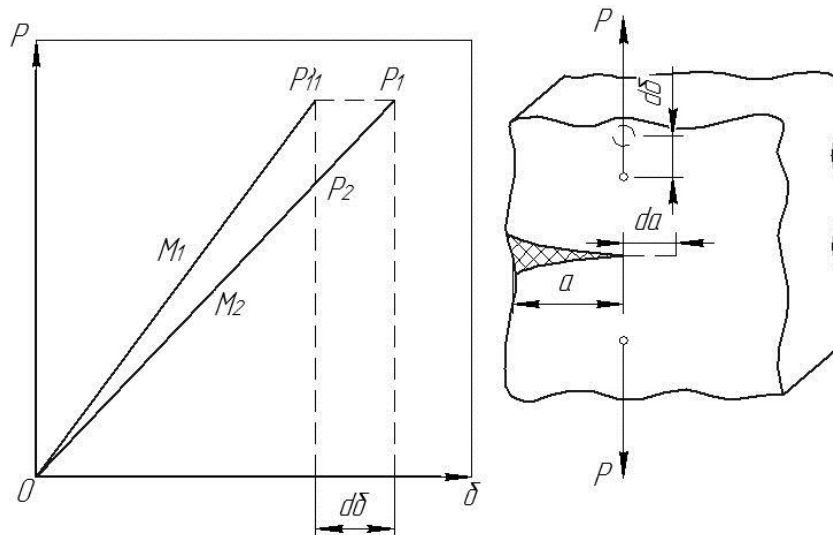


Рисунок 4 – График в координатах нагрузка – смещение для большой пластины с трещиной по всей толщине [3]

При нагружении твёрдого тела с трещиной длиной  $a$  в упругой области, рисунок 4, накопленная упругая энергия деформации равна [3]:

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

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

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  $M$  [7]:

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

Для продвижения трещины на элементарное расстояние  $da$  необходима дополнительная поверхностная энергия. Она появляется за счёт работы внешних сил  $Pd\delta$  и высвобождения энергии деформации  $dV$  [3]:

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

Упругая энергия переходит в энергию пластической деформации. С продвижением трещины на расстояние  $da$  жесткость 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 твердого тела. Однако отношение  $P/M$  сохранится, поскольку  $\delta_1 = \delta_2 = P_1 / M_1 = P_2 / M_2$  (рисунок 4):

Тогда расчёт скорости высвобождения упругой энергии проводится по уравнению:

$$\left( \frac{dU}{da} \right)_{\delta} = \frac{1}{2} \left[ \frac{2P}{M} \cdot \frac{\partial P}{\partial a} + P^2 \frac{\partial(1/M)}{\partial a} \right]. \quad (4)$$

Продифференцировав уравнение 4 получим:

$$\frac{1}{M} \frac{\partial P}{\partial a} + P \frac{\partial(1/M)}{\partial a} = 0. \quad (5)$$

Подставим (5) в (4):

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

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.

## 1.4 Энергия разрушения

В зависимости от вида кривой нагружения материалы разделяют на хрупкие и вязкие [4]. На рисунке 5б (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 [20].

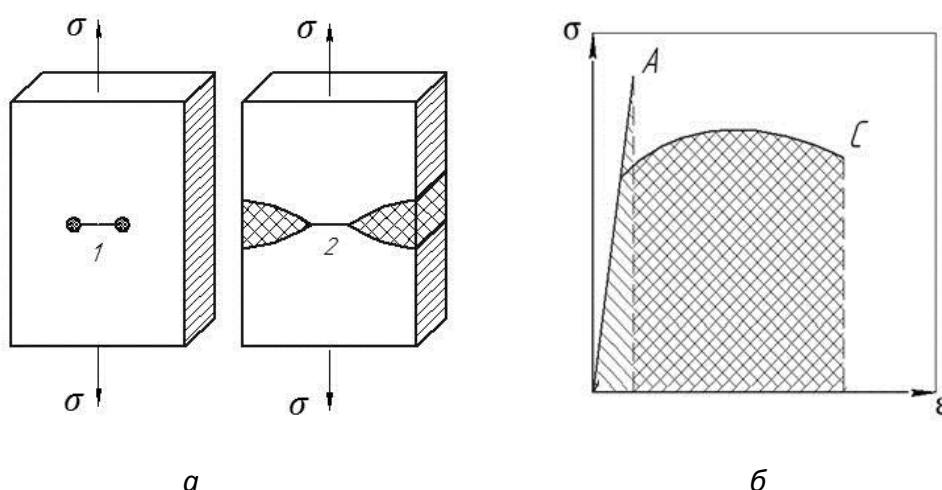


Рисунок 5 – а) Распространение пластической зоны (затемненная область) при разрушении по хрупкому (1) и вязкому (2) механизмам, б) Кривые напряжение – деформация [20]

Пластическая зона у вершины трещины образца с надрезом возникает, когда концентрация напряжений у вершины трещины превышает определенный уровень. При пластической деформации тратится намного больше энергии, чем при упругой. Поэтому вязкость образца с надрезом возрастает с увеличением пластической зоны у вершины трещины. Таким образом, при малой величине пластической зоны, материал характеризуется малой вязкостью образца. Иными словами, материал ведет себя как хрупкий. В случае, когда пластическая зона обширна вокруг вершины трещины, т.е.

затрагивает протяженные объемы материала в образце вдали от зоны разрушения, то такой материал обладает высокой энергией разрушения и характеризуется высокой вязкостью.

Строгие ограничение на размеры и геометрию образца в стандартных методах испытаний, вызваны главным образом необходимостью обеспечить наиболее жесткие условия нагружения и возможность получать консервативные результаты испытаний. Поскольку кажущаяся вязкость  $K_c$  уменьшается с увеличением размера образца до тех пор, пока не будет достигнуто плато, требования к размерам образцов вводятся в ASTM E399, чтобы измерение  $K_{Ic}$  соответствовало нижней границе на плато плоской деформации. Метод с применением образцов с шевронным надрезом не получил достаточно широкого распространения, и не используется в стандартных методах испытаний. Однако применение образцов с шевронным надрезом позволяет увеличить напряжения на вершине шеврона и тем самым позволяет создать условия для распространения трещины у малоразмерных образцов без наведённой усталостной трещины. Применение энергетического подхода с расчётом скорости высвобождения упругой энергии позволяет снять ограничение на геометрию и размер образцов даже для материалов с высокой пластичностью, однако существует проблема аналитического определения трещиностойкости материалов с шевронным надрезом.

## **2. Постановка задачи, методика и материалы исследования**

### **2.1 Постановка задачи исследования**

Надежность является важнейшей характеристикой проектируемых конструкций. В связи с этим необходимо понимание механики процессов, приводящих к разрушению материалов. Знание механизмов зарождения и распространения трещин, дает возможность проектировать конструкции требуемой надёжности. Для этого требуется знать и определять параметры трещиностойкости материалов.

Пластические свойства материалов могут изменяться в широком диапазоне, поэтому существующие в настоящее время стандартные методы испытаний на трещиностойкость имеют много требований и ограничений на форму и размеры испытываемых образцов. Формулы для расчётов содержат эмпирические и поправочные коэффициенты, которые не имеют строгого теоретического обоснования.

В лаборатории ИФПМ СО РАН, разрабатывается новый подход к методике определения трещиностойкости на малоразмерных двухконсольных образцах с шевронным надрезом. При нагружении такого у вершины шевронного надреза возникают высокие напряжения, способствующие образованию трещины. Отпадает необходимость в наведении перед испытанием усталостной трещины. Новая методика позволит определять трещиностойкость образцов малой толщины.

Исходя из вышеизложенного, в настоящей работе ставится цель освоить и применить на практике новую методику определения трещиностойкости конструкционных материалов на примере титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить новую методику определения трещиностойкости материалов, разработанную в ИФПМ СО РАН для малоразмерных образцов с



- шевронным надрезом;
2. Провести испытания образцов с шевронным надрезом из титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6;
  3. Применить данную методику для определения характеристик трещиностойкости титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6;
  4. Проанализировать полученные экспериментальные данные и дать заключение о критериях трещиностойкости титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6.

## 2.2 Методика определения трещиностойкости твердых тел

Существует классический пример вычисления коэффициента интенсивности напряжения  $K_I$  для случая испытания двухконсольных образцов с прямолинейным надрезом [4, 10].

На рисунке 6 изображен двухконсольный образец с прямолинейным надрезом. Расстояние от точки приложения нагрузки  $P$  до фронта трещины рассматривается как начальная длина трещины  $l$ .

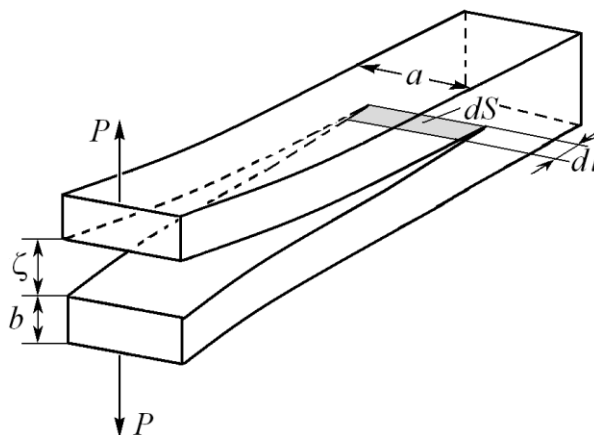


Рисунок 6 – Образец с прямолинейным надрезом:  $\zeta$  – величина прогиба двух консолей,  $b$  – ширина консоли,  $a$  – толщина консоли,  $P$  – внешняя нагрузка,  $dS$  – поверхность, образованная трещиной,  $dl$  – прирост длины трещины [10]

Из теории изгиба консоли [7] следует, что смещение  $\lambda_e$  точек приложения силы, рисунок 7, 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 равно  $2\lambda_e$ . Каждую половину образца можно рассматривать как прямоугольную балку, один конец которой зафиксирован, а на другой конец приложена определённая нагрузка  $P$ , рисунок 7. Известно, что при упругой деформации прямоугольной балки толщиной  $b$  и шириной  $a$  связь между стрелой прогиба  $\lambda_e$  и величиной нагрузки  $P$  определяется формулой [7]

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

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

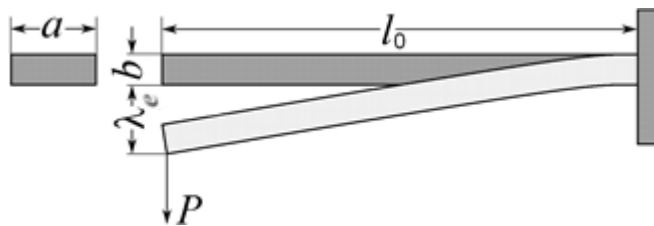


Рисунок 7 – Схема балки под нагрузкой [7]

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 8. 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]:

$$G_s = 0.5 \frac{P^2}{a} \frac{d\eta}{dl} = \frac{P^2 d\eta}{2adl} = \frac{P^2 d\eta}{dS}, \quad (6)$$

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:

$$P = \frac{E\lambda_e a}{8} \left( \frac{b}{l} \right)^3. \quad (7)$$

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 (6):

$$\frac{d\eta}{dS} = \frac{d\eta}{2adl} = \frac{12 \cdot l^2}{Ea^2 \cdot b^3}. \quad (8)$$

Подставляя выражение (8) в уравнение (6) получим:

$$G = P^2 \frac{d\eta}{dS} = \frac{12P^2 l^2}{Ea^2 b^3}. \quad (9)$$

Уравнение (9) определяет удельную энергию разрушения по длине трещины  $l$  и величине внешней нагрузки  $P$ , при которой начинается спонтанное распространение трещины.

Подставляя в это уравнение выражение (7), получим уравнение для  $G$ , позволяющее вычислить энергию разрушения по длине трещины  $l$  и по величине  $\lambda_e$ :

$$G = \frac{3E\lambda_e^2 b^3}{16l^4}. \quad (10)$$

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

Для учёта геометрии шевронного надреза рассмотрим образец с шевронным надрезом как пучок консолей бесконечно малой толщины  $dx$  (рисунок 8). На рисунке 8 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.

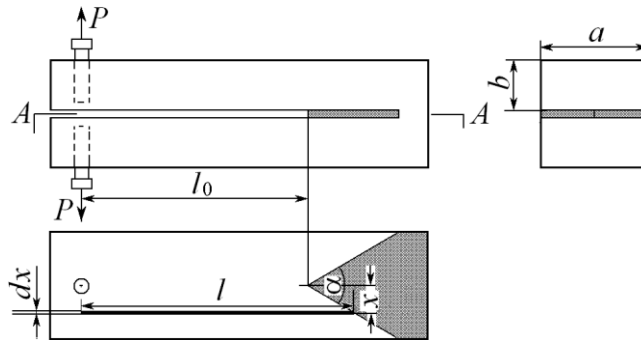


Рисунок 8 – Проекция образца с шевронным надрезом [10]

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

$$\lambda_e = \frac{4dP(x)}{Edx} \left( \frac{l(x)}{b} \right)^3, \quad (11)$$

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:

$$dP(x) = \frac{\lambda_e E}{4} \left( \frac{b}{l(x)} \right)^3 dx. \quad (12)$$

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

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

Данное уравнение отличается от уравнения (7) 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 (11), 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 с момента ее зарождения на конце шевронного надреза. Таким образом, при 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 (7), подставив в нее текущую толщину образца  $h$  вместо  $a$ :

$$P' = \frac{\lambda_e E \Delta l}{4} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \left( \frac{b}{l} \right)^3. \quad (14)$$

Силу, действующую на часть образца с шевронным надрезом  $P''$ , найдём по формуле (13), подставив в нее текущую толщину образца  $a - h$  вместо  $a$ :

$$P'' = \frac{\lambda_e \Delta l \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} E}{4} \left( \frac{b}{l} \right)^3 \left( 1 - \frac{2 \Delta l}{a} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \frac{l}{l_0} \left[ 4 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} + \frac{2 \Delta l}{l_0} \right] / \left[ 2 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right]^2. \quad (15)$$

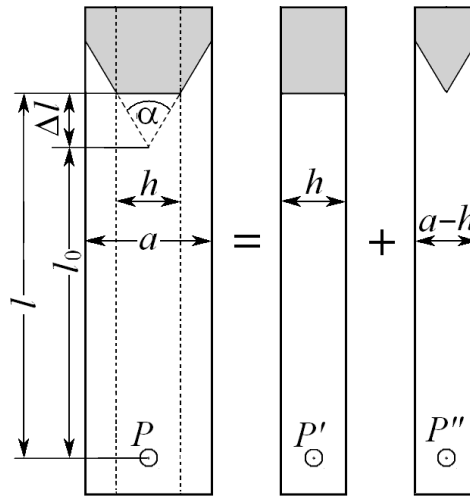


Рисунок 12 – Представление образца с трещиной в виде образцов с прямолинейным и шевронным надрезами [22]

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

$$\lambda_e(l) = \frac{4P}{Ea} \left( \frac{l}{b} \right)^3 k^{-1}, \quad (16)$$

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 (16) для  $\lambda_e$  в уравнение (10), получим выражение для удельной энергии разрушения  $G$ .

$$G = \frac{12P^2 l^2}{Eb^3 a^2} k^{-2}. \quad (15)$$

Полученное уравнение отличается от подобного уравнения для случая прямолинейного надреза лишь коэффициентом  $k^{-2}$ . В частности, если угол шевронного надреза  $\alpha = \pi$ , то уравнение (15) переходит в уравнение (10) 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).

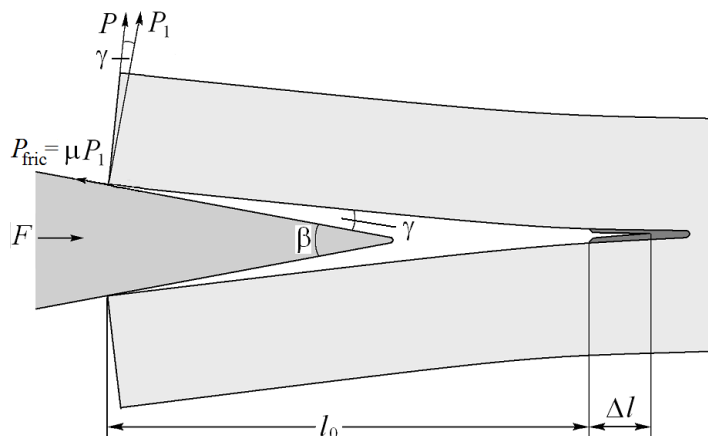


Рисунок 13 –Схема расклинивания образца с шевронным надрезом [22]

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

$$P = \frac{F \cdot \cos(\gamma)}{2 \cdot \left( \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) + \mu \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \right)}, \quad (16)$$

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 пропорционален силе нормального давления клина на консоль. Коэффициент трения является совокупной характеристикой пары материалов, которые соприкасаются и не зависит от площади соприкосновения тел. В данном эксперименте возникает трение скольжения. 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 (16) и подставив в нее формулу (11). В итоге получаем следующее выражение для аналитического расчёта коэффициента трения  $\mu$ :

$$\mu = \frac{\Delta P}{\Delta \lambda} \frac{\cos \gamma \cdot 2}{E \cdot a \cdot \sin \frac{\beta}{2}} \cdot \left( \frac{l_0}{b} \right)^3 \cdot \frac{\left( 2 + \frac{a}{l_0} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right)^2}{4 + \frac{a}{l_0} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}} - \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}, \quad (17)$$

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  $\gamma$  изменяется незначительно, поэтому считается константой.

В качестве критерия трещиностойкости в инженерной механике разрушения для трещины отрыва используется, как правило, коэффициент интенсивности напряжений [3], который связан с удельной энергией разрушения формулой  $K_{Ic} = \sqrt{EG / (1 - \nu^2)}$ , где  $\nu$  – коэффициент Пуассона.



## 2.3 Материалы исследования

В качестве материала исследования выбраны титановые сплавы ВТ1-0 и ВТ6 в исходном отожженном крупнокристаллическом состоянии с размером зерна порядка 25 мкм, а также ВТ1-0 с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой и размером зерна порядка 0,2 мкм. Для получения УМЗ структуры использована технология деформационной обработки исходной заготовки методом интенсивной пластической деформации. Она состоит из:

- многократного abc-прессования (всестороннего) при 500 °С – на 50 %, при 450 °С – на 45 %, при 400 °С – на 40 %;
- многоходовой прокатки при температуре 250 °С до прутков сечением 8x8 мм;
- низкотемпературного отжига при температуре 300 °С 1 час и охлаждения на воздухе.

ВТ1-0 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. Фазовый состав марки ВТ1-0 –  $\alpha$ -сплав с ГПУ кристаллической решеткой. 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:  $E = 105$  ГПа и  $\nu = 0.37$ .

Титановый сплав ВТ6 незаменим в авиастроении, сборных конструкциях и медицине. В титановый сплав входит алюминий, который благоприятно влияет на жаропрочность и прочность продукции, а также ванадий, способный повысить прочность металла и сделать его более пластичным. По структуре в отожженном состоянии марка ВТ6 относится к ( $\alpha+\beta$ )- сплавам, где  $\beta$ -фаза имеет ОЦК кристаллическую решетку. Химический состав: Fe – до 0.3%; C – до 0.1%; Si – до 0.15%; V – от 3,5 до 5,3%; N – до 0.05%; Ti – 86.485– 91.2%; Al – от 5,3 до 6,8%; Zr – до 0.3%; O – до 0.2%; H – до

0.015% [21].

В данной работе использовались двухконсольные образцы с шевронным надрезом длиной 30 мм, вырезанные из прутка квадратной формы сечением  $9 \times 4 \text{ мм}^2$ . 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  $\alpha = \pi/3$ .

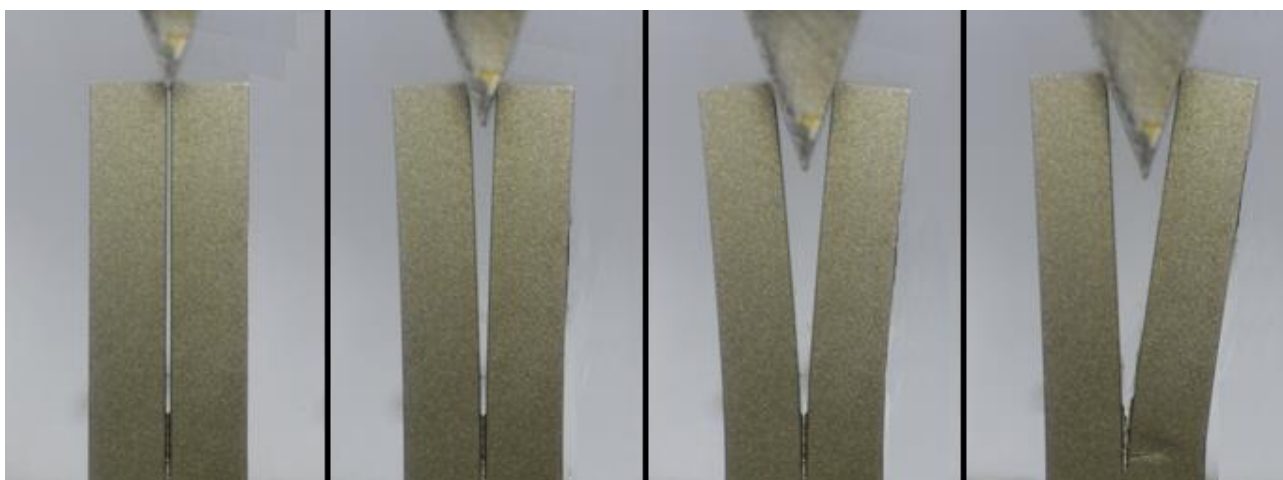


Рисунок 14 – Испытание образца ВТ1-0

На рисунке 14 показаны снимки процесса расклинивания образца с шевронным надрезом.

## 2.4 Оборудование для исследования

Испытание образцов производили на машине для механических испытаний материалов 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.

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



Рисунок 17 – Камера производит съемку в процессе нагружения образца

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4БМ81	Богданов Алексей Алексеевич

<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ОМ</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	1. Инициатор проекта ИФПМ СОРАН; Примерный бюджет проекта 210тыс.руб.; В исследовании задействовано 2 человека: руководитель проекта, инженер – разработчик (магистрант).
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	2. Проект выполняется в соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов»; Минимальный размер оплаты труда в 2020 году составляет 12 130руб; Районный коэффициент- 1,3; Коэффициент доплат – 0,2; Накладные расходы – 16%.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	3. Согласно п.3 п.п.16 ст. 149 НК РФ данная НТИ не подлежит налогообложению. На основании главы 34 НК РФ с 2016 года для расчета отчислений во внебюджетные фонды используется ставка 30,2% от фонда оплаты труда.

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

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НТИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	- Техничко-экономическое обоснование научно-исследовательской работы; - Потенциальные потребители результатов исследования; - Swot-анализ НТИ.
2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	- Планирование комплекса работ по проведению НТИ; - Расчет бюджета затрат на НТИ.
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности исследования	- Оценка эффективности НТИ; - Определение научно-технического уровня проекта.

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

1. Матрица SWOT;
2. График проведения и бюджет НТИ.

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	02.03.20
---	----------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
доцент	Якимова Татьяна Борисовна	к. э. н.		02.03.20

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4БМ81	Богданов Алексей Алексеевич		02.03.20

#### **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 [23]:

- 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.

Темой магистерской диссертации является «Исследование трещиностойкости титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6 методом расклинивания». Объектом исследования является методика определения трещиностойкости конструкционных материалов, разрабатываемая в Лаборатории физической мезомеханики и неразрушающих методов контроля ИФПМ СО РАН.

##### **4.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

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

#### 4.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Научное исследование посвящено изучению новой методики определения трещиностойкости конструкционных материалов, разрабатываемой в лаборатории физической мезомеханики ИФПМ СО РАН и определению характеристик трещиностойкости титановых сплавов BT1-0 и BT6.

Разработка НТИ производится группой, состоящей из двух человек – руководителя и магистранта.

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 2.

Таблица 2 – 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 данных 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.

### 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 3 представлены сильные и слабые стороны, из которых следуют возможности и угрозы реализации данного проекта [23].

Таблица 3 – SWOT-анализ проекта

<b>Сильные стороны</b>	<b>Возможности во внешней среде</b>
С1. Не требуется наносить усталостную трещину на образцы; С2. Экономия материала на образцы; С3. Нет необходимости в тензорезисторе; С4. Скорость получения результата; С5. Образцы простой формы без жестких требований к ней; С6. Возможность оценки пластических свойств материала; С7. Метод аналитический: нет эмпирических или феноменологических констант.	В1. Экономичность и скорость методики заинтересует потенциальных потребителей; В2. Большой потенциал применения методики для испытаний новых материалов; В3. Для методики возможен выход на мировой уровень за счет ее фундаментальности.
<b>Слабые стороны</b>	<b>Угрозы внешней среды</b>
Сл1. Необходимость фотокамеры; Сл2. Погрешность измерений; Сл3. Ручная обработка результатов; Сл4. Высокие требования к квалификации персонала.	У1. Сложность выхода на уровень государственных стандартов; У2. Отсутствие спроса на новую методику; У3. Технология подразумевает ручную обработку результатов, что может оттолкнуть потенциальных потребителей; 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 4 представлены корреляции сильных сторон проекта и возможностей его реализации.

Таблица 4 – Сильные стороны проекта и возможности

Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	V1	+	+	+	+	+	+	-
V2	-	-	-	-	-	-	+	+
V3	-	-	-	-	-	-	+	+

Из таблицы 4 следует, что сильные стороны проекта соответствуют возможностям реализации по параметрам:

V1C1C2C3C4C5

V2C6C7

V3C6C7

Возможность V1 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 V2 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 V3 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 5 – Слабые стороны проекта и возможности

		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
Возможности проекта	V1	+	-	+	+
	V2	-	+	-	-
	V3	-	-	+	-

Из таблицы 5 следует, что слабые стороны проекта коррелируют с возможностями реализации по параметрам:

V1Сл1Сл3Сл4

V2Сл2

V3Сл3

Возможность V1 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 V2 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 V3 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 6 – Сильные стороны проекта и угрозы

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

Из таблицы 6 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 7 – Слабые стороны проекта и угрозы

Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	У1	+	+	+	–
	У2	–	+	+	+
	У3	–	–	+	+
	У4	+	–	–	+

Из таблицы 7 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 НТИ используется экспертная оценка [23]. Расчёт ведётся в человеко-днях, но, поскольку зависит от множества факторов, носит вероятностный характер. Этапы выполнения данной работы представлены в таблице 8.

Таблица 8 – 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 титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6	инженер
	7	Анализ полученных результатов, определение трещиностойкости сплавов титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6, выводы	инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Оценка эффективности полученных результатов	руководитель; инженер
	9	Составление пояснительной записки	инженер

#### 4.5 Определение трудоемкости работ

Для определения трудоёмкости работ используется опытно-статистический метод расчёта ожидаемого времени выполнения работ в человеко-днях по формуле [23]:

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

где  $t_{ож\ i}$  – 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:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожci}}{Ч_i},$$

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

$t_{ожci}$  – 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:

$$k = \frac{T_{КГ}}{T_{КГ} - T_{ВД} - T_{ПД}} = \frac{366}{366 - 104 - 14} = 1,48.$$

Длительность этапов в рабочих днях. Следует учесть, что расчетную величину продолжительности работ  $T_K$  нужно округлить до целых чисел [23].

Результаты расчетов приведены в таблице 10.

#### 4.6 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, магистрант выступает в качестве основного исполнителя [23].

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

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

где  $Y_i$  – 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.

Результаты расчетов приведены в таблице 9.

Таблица 9 – 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>к</sub> кал.дн	У <sub>i</sub> , %	Г <sub>i</sub> , %
1	Дерюгин Е.Е., 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., Богданов А.А.	12	24	18	18	35	22,32	70,6
5	Дерюгин Е.Е., 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., 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
Итого	Богданов А. А.:	51	138	87	63,97	117	92,14	534,46
Итого	Дерюгин Е.Е.:	19	57	34	26,6	50	35,05	246,02

Таким образом, суммарное количество рабочих дней на выполнение данного проектирования 117.

#### 4.7 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 [23].

Таблица 10 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 10 – Календарный график проведения НТИ

Этапы	Вид работы	Исполнители	Тк	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
1	Составление и утверждение 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 BT1-0 и BT6	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 магистранта и 50 у руководителя.

## 4.8 Расчет бюджета затрат на НТИ

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

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 [23].

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

Таблица 11 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Титановый сплав	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 12.

Таблица 12 – 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.

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 13 – 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. 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  $I_{\text{ам.обор}}$  ведётся по следующей формуле:

$$I_{\text{ам.обор}} = \left( \frac{T_{\text{исп.обор}}}{366} \right) \cdot K_{\text{обор}} \cdot H_a,$$

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

366 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.

$$I_{\text{ам.исп.уст}} = \left( \frac{T_{\text{исп.уст}}}{366} \right) \times K_{\text{исп.уст}} \times H_a = \left( \frac{21}{366} \right) \times 4900000 \times \left( \frac{1}{10} \right) = 28191,78 \text{ руб.}$$

Результаты расчета амортизации оборудования представлены в таблице 14.

Таблица 14 – 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.

Таблица 15 – 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	Студент (УВП, 1 кв. уровень)	64	12130	12130/21=577,62	36967,68
1,4,5,8	Руководитель (Профессор, д.н)	27	49150	49150/21=2340,48	63192,96
Итого:					100160,64

В таблице 16 представлена смета бюджета затрат на НИИ.

Таблица 16 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Порядок расчета
1. Материальные затраты НИИ	640,00	Таблица 11
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	28191,78	Таблица 13, таблица 14
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	100160,64	Таблица 15
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	12019,28	$(осн.З.П.) \cdot 0,12$ $100160,64 \cdot 0,12$
5. Отчисления на социальные нужды (во внебюджетные фонды)	33878,34	$(осн.З.П. + доп.З.П.) \cdot 0,302$ $(100160,64 + 12019,28) \cdot 0,302$
6. Затраты на научные и производственные командировки	–	–
7. Контрагентские расходы	5000	Таблица 12
8. Накладные расходы	28782,41	$(сумма пунктов 1-7) \cdot 0,16$ $(640,00 + 28191,78 + 100160,64 + 12019,28 + 33878,34 + 0 + 5000) \cdot 0,16 = 179890,04 \cdot 0,16$
Бюджет затрат НИИ	208672,45	сумма всех затрат $640,00 + 28191,78 + 100160,64 + 12019,28 + 33878,34 + 0 + 5000 + 28782,41$

#### 4.9 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.

#### 4.10 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 НТИ. Общая оценка даётся после суммирования баллов с учётом весовых характеристик и выражается формулой:

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

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

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

Таблица 17 – Весовые коэффициенты НТУ

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

Таблица 18 – Шкала оценки новизны

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

Таблица 19 – 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 20 – Возможность реализации по времени и масштабам

<u>Время реализации</u>	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2
<u>Масштабы реализации</u>	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.

Предложенная методика подразумевает использование образцов малых размеров и простой формы, что в свою очередь, снижает количество использованного материала и отходов при их изготовлении. Также методика позволяет быстрее получать результаты прочностных испытаний. Таким образом, при внедрении данной методики на производстве и замещении предшествующих технологий, подразумевающих использование крупных образцов, будет наблюдаться положительный эффект в виде экономии времени и ресурсов.

## 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.
2. Богданов А. А. Исследование вязкости разрушения технического титана ВТ1-0 по данным испытаний малоразмерных образцов с шевронным надрезом / А. А. Богданов, Е. Е. Дерюгин // Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения: сборник трудов Международной научно-технической молодежной конференции, г. Томск, 26–30 ноября 2018 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – [С. 36-37].
3. Богданов А. А. Аналитический расчёт трещиностойкости материалов по данным испытаний малоразмерных образцов с шевронным надрезом / А. А. Богданов; науч. рук. Е. Е. Дерюгин // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 24-27 апреля 2018 г.: в 7 т. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2018. – Т. 1: Физика. – [С. 72-74].
4. Богданов А. А. Исследование скоростной чувствительности сопротивления деформированию при испытаниях на трещиностойкость нержавеющей стали 12Х15Г9НД / А. А. Богданов, Е. Е. Дерюгин // Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения: сборник трудов Международной научно-технической молодежной конференции, г. Томск, 21–25 сентября 2020 г. Принято к печати.