

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Павлов Илья Алексеевич

Изучение закономерностей изменения коэффициента трещиностойкости
горных пород при умеренном тепловом воздействии для повышения
точности моделирования геомеханических процессов

2.8.6 Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Винников Владимир Александрович

Москва, 2024

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Процесс разрушения горных пород является ключевым процессом добычи и переработки полезных ископаемых. Механизм разрушения по своей природе представляет собой процесс зарождения и развития трещин. На сегодняшний день в горном и нефтегазовом деле активно используются технологии, сущность которых сводится к образованию трещин. Одной из таких технологий является гидроразрыв пласта, применяемый в нефте- и газодобыче для интенсификации продуктивности скважин; в горном деле – для снижения опасных напряжений в массиве в окрестностях горных выработок, для извлечения метана из угольных пластов. В строительстве эта технология применяется при сооружении подземных хранилищ и захоронении отходов. Расчет этого процесса основывается на положениях механики разрушения, и одной из необходимых для проведения такого расчета величин является величина коэффициента трещиностойкости. Учет этой величины, помимо прочего, позволит более точно прогнозировать геомеханическое состояние массивов горных пород при ведении в них взрывных работ, может способствовать снижению рисков плохой взрывной проработки массивов, что приведет к более рациональному расходу взрывчатых веществ, а, значит, и уменьшению издержек.

В настоящее время отечественные стандарты с описанием методики определения коэффициента трещиностойкости K_{IC} горных пород отсутствуют. В то же время, параметр K_{IC} входит практически во все сервисные пакеты моделирования. Как правило значение параметра принимают по умолчанию $1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$. На сегодняшний день вопрос влияния температурного воздействия на способность горных пород сопротивляться росту трещин при действии на них механической нагрузки в научной литературе освещен мало, в основном изучались процессы температурного выветривания. Однако этот фактор имеет ключевое значение при строительстве подземных резервуаров. Факт линейной

корреляции коэффициента трещиностойкости и степени предварительно оказанных термических воздействий на горные породы подтверждается различными исследователями. Более того, эмпирические данные говорят об изменчивости такой корреляции. При испытаниях образцов песчаника методом трехточечного изгиба коэффициент трещиностойкости с повышением температуры предварительного нагрева от 20 °С до 400 °С повышался, однако при дальнейшем повышении температуры предварительного нагрева от 400 °С до 800 °С показатель постепенно снижался.

Таким образом, экспериментальное выявление закономерностей изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от генезиса горной породы, а также насыщенности её флюидом при умеренном (до 100 °С) тепловом воздействии, которому и посвящено данное диссертационное исследование, является актуальной научной задачей.

Целью данного исследования является установление закономерности изменения степени влияния температурного поля на значение коэффициента трещиностойкости горных пород в зависимости от их генезиса, а также насыщенности флюидом порового пространства для повышения точности моделирования различных геомеханических процессов.

Основная идея работы заключается в получении статистических данных, а также поиске закономерностей изменения коэффициента трещиностойкости при умеренном тепловом воздействии на горные породы различного генезиса.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Провести анализ существующих методов определения коэффициента трещиностойкости различных материалов, в том числе горных пород и выбрать наиболее пригодный для горных пород метод.
2. Разработать специальную установку к лабораторной испытательной машине LFM-50kN для определения трещиностойкости

образцов, выполненных в форме балки (90 мм×20 мм×10 мм) с пропилом в средней части глубиной 7 мм, обеспечивающую возможность формирования теплового поля непосредственно во время испытаний.

3. Установить зависимости коэффициента трещиностойкости от величины температурного воздействия для горных пород различного генезиса.

4. Установить зависимости коэффициента трещиностойкости от величины температурного воздействия при насыщении порового пространства осадочных горных пород флюидом.

Основные научные положения и их новизна:

1. Установлено, что снижение величины коэффициента трещиностойкости в температурном диапазоне 20 – 100 °С в основном определяется генезисом породы. Снижение составило: 5,38 – 59,02 % для метаморфических, 17,95 – 28,27 % для магматических и 23,84 % для осадочных горных пород, при этом скорость снижения коэффициента трещиностойкости при нагревании в температурном диапазоне от 20 °С до 60 °С больше, чем при температурном диапазоне от 60 °С до 100 °С у гранита, известняка, белого мрамора, средне- и крупнозернистого серых мраморов, и наоборот у горных пород габбро и мелкозернистого серого мрамора.

2. Выявлена тенденция снижения величины коэффициента трещиностойкости при температурном воздействии в диапазоне 20 – 100 °С для серых мраморов, отличающихся размером структурных элементов: снижение величины коэффициента трещиностойкости с ростом температуры составило для мелко-, средне- и крупнозернистого материала 5,38 %, 59,02 % и 44,52 % соответственно.

3. Доказано, что насыщение образцов известняка флюидом не влияет или влияет незначительно на коэффициент трещиностойкости в температурном диапазоне 20 – 40 °С и приводит к снижению коэффициента трещиностойкости при умеренном тепловом воздействии в температурном диапазоне 60 – 100 °С. Коэффициент трещиностойкости насыщенных

образцов известняка меньше коэффициента трещиностойкости ненасыщенных при 60 °С на 2,4 %, при 80 °С на 1,1 %, при 100 °С на 2,36 %.

Обоснованность и достоверность выдвинутых положений и выводов подтверждается:

- использованием апробированных на горных породах методик экспериментальных исследований;
- непротиворечивостью полученных в ходе экспериментов данных законам физики, теории прочности, а также данным, опубликованными в научной литературе;
- большим объемом экспериментального материала, собранного и обработанного с использованием стандартных методов математической статистики.

Новизна работы заключается в:

- применении и реализации методики определения коэффициента трещиностойкости при трехточечной схеме нагружения образца в виде балки с пропилом при различных температурах в насыщенных и ненасыщенных флюидом образцах;
- установлении общих тенденций изменения способности горных пород разных генотипов сопротивляться росту трещин при тепловом воздействии.

Методы исследований включали анализ и обобщение литературных источников; экспериментальные лабораторные исследования процесса зарождения и развития трещин на образцах горных пород, а также факторов, влияющих на их развитие; при обработке результатов экспериментов – методы математической статистики.

Научное значение работы состоит в установлении полученных экспериментальным путем температурных зависимостей величин коэффициента трещиностойкости горных пород и выявлении закономерностей изменения этих величин для горных пород различного генезиса и различной заполненности флюидами их порового пространства в условиях умеренного теплового воздействия.

Практическая значимость результатов исследования заключается в получении экспериментальным путем актуальных значений коэффициента трещиностойкости горных пород различного генезиса при умеренном тепловом воздействии, что актуально для расчетов устойчивости массивов и процессов разрушения при проведении добычных работ на больших глубинах. Результаты диссертационной работы в части температурных зависимостей величины коэффициента трещиностойкости осадочных пород приняты к использованию ООО «Газпром геотехнологии» и будут учтены при проектировании объектов подземного хранения.

Апробация работы. Результаты испытаний и основные положения диссертационного исследования были представлены и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции «Ашировские чтения» (Самара, ФГБОУ ВО «СамГТУ», 26 сентября 2023 г.); Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2024» (Москва, НИТУ «МИСИС», 29.01-02.02 2024 г.); LXVII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (Екатеринбург, ФГБОУ ВО «УГГУ», 2-5 апреля 2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 4 статьи, в том числе 2 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и двух приложений, изложенных на 116 страницах текста, включает 34 рисунка, 13 таблиц, список источников из 145 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** представлен анализ становления представлений о прочности и разрушении горных пород посредством описания исследований ученых разного времени. Значительный вклад в развитие представлений о прочности и разрушении горных пород внесли Иоффе А. Ф., Протодяконов М. М., Александров А. П., Журков С. Н., Работнов Ю. Н.,

Качанов Л. М., Журавский Д. И., Партон В. З., Бабкин Л. Б., Морозов Е. М., Новожилов В. В., Малинин Н. Н., Дроздовский Б. А., Колосов Г. В., Кирпичева М. В., Ребиндер П. А., Бочвар А. А., Слуцкер А. И., Левитская М. А., Попкович П. Ф., Гуз Е. М., Griffith A. A., Orowan E., Irwin G. R., Hooke R., Coulomb Ch. A., Saint-Venant A. B., Mariotte E., Murgatroid J. B., Mohr C. O., Taylor G. I., Tresca H. E., Haward R. N и другие. В данной главе рассматривается развитие представлений о прочности, начиная с позиции механики сплошной среды и формирования предельных критериев прочности, в основе которых лежит феноменологический подход описания процесса разрушения. Переход к рассмотрению среды не как единой сплошной, а как атомно-молекулярной системы с четко организованной структурой составных элементов. Рассмотрено представление о процессе разрушения с учетом влияния воздействия внешних факторов на внутреннюю структуру материала, ставшее возможным благодаря исследованиям, направленным на установление зависимости прочности материала от степени термического воздействия, от длительности нагрузки, от скорости нагружения и условий испытания. С учетом наличия энергетических флуктуаций, сопровождающихся формированием зародышевых трещин во всем объеме среды, накопление критической концентрации которых в единице объема дает начало образованию трещины, процесс разрушения был разделен на два этапа: нелокальный с зарождением зародышевых трещин по всему объему среды и локальный с образованием трещины. Главным результатом систематического изучения кинетической, термофлуктуационной теории природы прочности стало установление эмпирической зависимости долговечности образца от напряжения и температуры на основе результатов экспериментов в широком интервале значений одноосного растяжения гладких образцов.

Исследование зоны концентрации напряжений при формировании неоднородного поля напряжений в объеме среды позволило обнаружить тот факт, что разрушение многих материалов происходит при более высоких значениях локального напряжения, чем при испытаниях на прочность гладких

образцов. Данное несоответствие позволяет сделать вывод о том, что для того, чтобы судить о прочности тела, недостаточно обладать решением теории упругости или пластичности о концентрации напряжений в зоне трещин или надпиллов, важны еще критерии прочности. Таким образом на основе энергетических соображений Griffith A. A. сформулировал критерий прочности. Irwin G. R. сформулировал силовой критерий прочности, гласящий, что начало разрушения (роста трещины) связано не с достижением в опасной точке растягивающим напряжением предела прочности, а с достижением в окрестности опасной точки критического распределения напряжений. Данный критерий фактически является первым применением нелокального подхода для формулировки критерия разрушения.

В рамках описания процесса разрушения с позиции механики сплошной среды материал наделяется свойством сопротивляться росту трещин. Репрезентативным параметром данной способности выступает коэффициент интенсивности напряжений, именуемый коэффициентом трещиностойкости. В данной главе представлена практическая применимость коэффициента трещиностойкости, значение данного параметра при моделировании.

Согласно изложенным ключевым этапам развития представлений о прочности, можно сделать вывод о том, что коэффициент интенсивности напряжений (коэффициент трещиностойкости) положен в основу данных представлений, начиная еще с момента становления линейной упругой механики разрушения и играет важную роль в современных теориях прочности. Анализ литературных источников показал, что несмотря на превращение процесса моделирования в одно из основных мероприятий при проектировании разных видов горных работ, определение коэффициента трещиностойкости, входящего во многие сервисные пакеты моделирования, практически не проводилось. Определение влияния теплового поля на изменение коэффициента трещиностойкости проводилось лишь с точки зрения предварительного воздействия (температурного выветривания).

Таким образом, проведенный обзор литературных источников позволил сделать вывод о том, что представленные в данной работе исследования являются перспективными, а тема – актуальной.

Во **второй главе** описывается методика выполнения экспериментов, а также подробно описывается разработанное специальное оборудование для осуществления лабораторных испытаний.

На сегодняшний день в Российской Федерации отсутствуют стандарты с описанием методики определения коэффициента трещиностойкости горных пород. В этих условиях существуют два выхода из ситуации: либо адаптация государственных стандартов, разработанных для других материалов (например, металлов или бетонов), либо использование специально разработанных рекомендаций международных научных сообществ. Одним из таковых является Международное общество по механике горных пород (ISRM), которым в разное время было выделено 4 методики с целью унификации результатов измерения. Помимо рекомендованных ISRM методов, было предложено множество иных способов определения статического коэффициента трещиностойкости, также в этих целях используются и стандартные методики для металлов и керамики. Для поиска значений коэффициента трещиностойкости у металлов (ГОСТ 25.506.85) изготавливают образцы в виде прямоугольного параллелепипеда с пропилом в средней части одной из сторон. Стандарт предполагает трехточечную схему нагружения образца. Данная экспериментальная схема основана на подходах линейной механики упругого разрушения, что используется при моделировании разрушения металлических, керамических и др. материалов, в том числе и горных пород.

Для осуществления всех задач исследования лабораторное оборудование можно представить в виде системы, состоящей из силовой установки (испытательная машина LFM-50kN), а также специальной установки, позволяющей создать условия эксперимента (захваты для испытания образцов на изгиб, а также термостатированная камера).

Управление тепловым полем осуществлялось посредством подачи разного напряжения на нагревательные элементы в виде керамических обкладок посредством лабораторного трансформатора.

В данной главе также обосновывается корректность применения требований ГОСТ 25.506.85 к геометрическим параметрам образцов путем сопоставления их со средним размером зерен горных пород. В этих целях были подготовлены аншлифы всех видов исследованных горных пород с последующим определением среднего размера зерна слагающих их минералов. Всего для исследования были подготовлены образцы из следующих горных пород: габбро (Другорецкое месторождение, Карелия), гранит (Топское месторождение, Украина), известняк (месторождение Сарыташ, Кыргызстан), белый мрамор (Коелгинское месторождение, Челябинская область), а также три вида серого мрамора с различным размером зерен (мелкозернистый и среднезернистый Уфалейского месторождения, Челябинская область, и крупнозернистый Полевского месторождения, Свердловская область). На рисунках 1 и 2 представлены полученные изображения аншлифов с масштабными сетками и нанесенными размерными линиями.

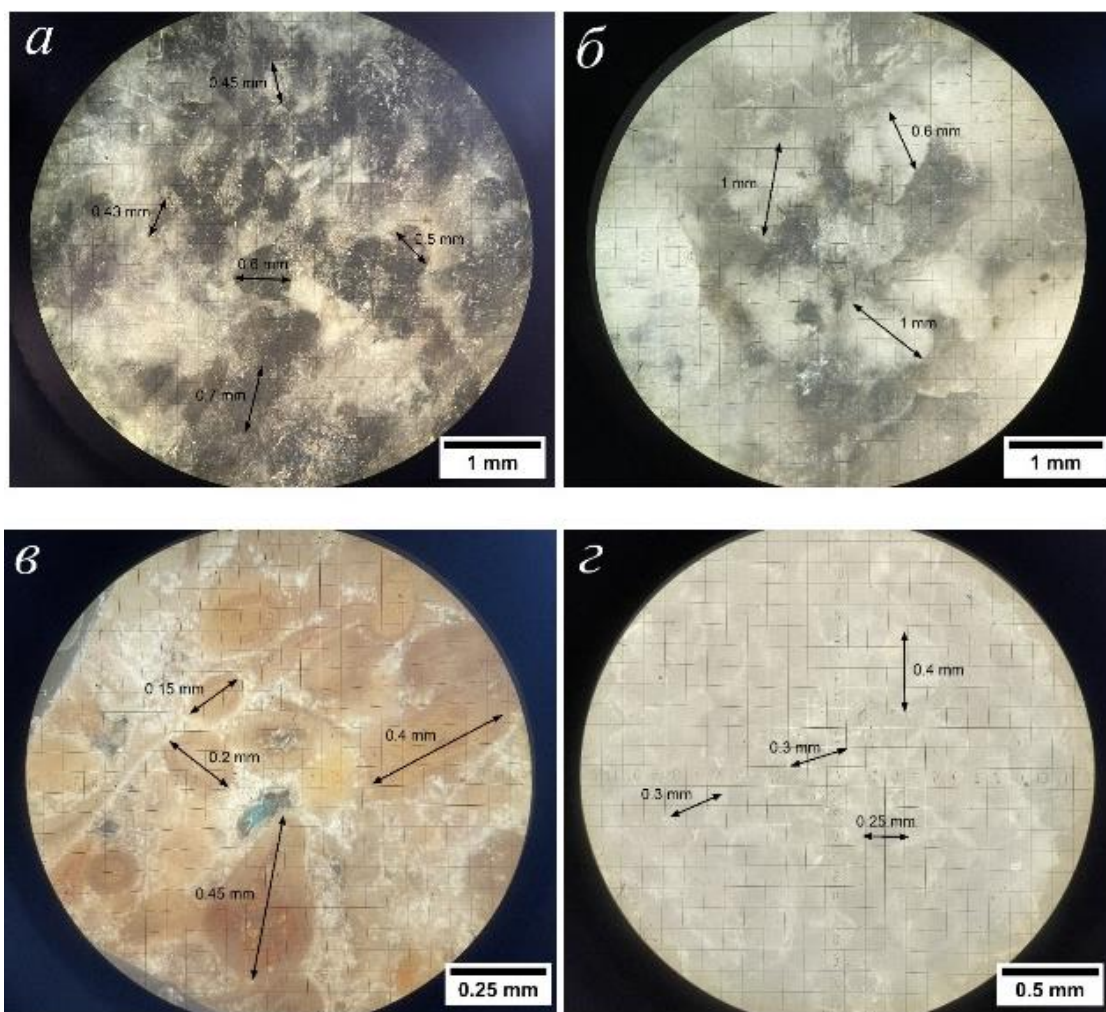


Рисунок 1 – Изображения аншлифов с нанесенным масштабом и размером зерен: *а* – габбро; *б* – гранит; *в* - известняк; *г* – белый мрамор

Условие соотношения геометрических параметров образца и структурных элементов материала составляет более 10:1 соответственно. Такое соотношение дает право утверждать, что изготовленные с учетом требований ГОСТ 25.506.85 образцы отражают свойства материала, из которого они изготовлены.

Сами горные породы подбирались таким образом, чтобы представить вариативность с точки зрения генезиса и крупности зерен. Монолитность образцов после многоэтапной механической подготовки контролировалась проведением замеров скорости распространения в них продольных волн с помощью ультразвукового дефектоскопа.

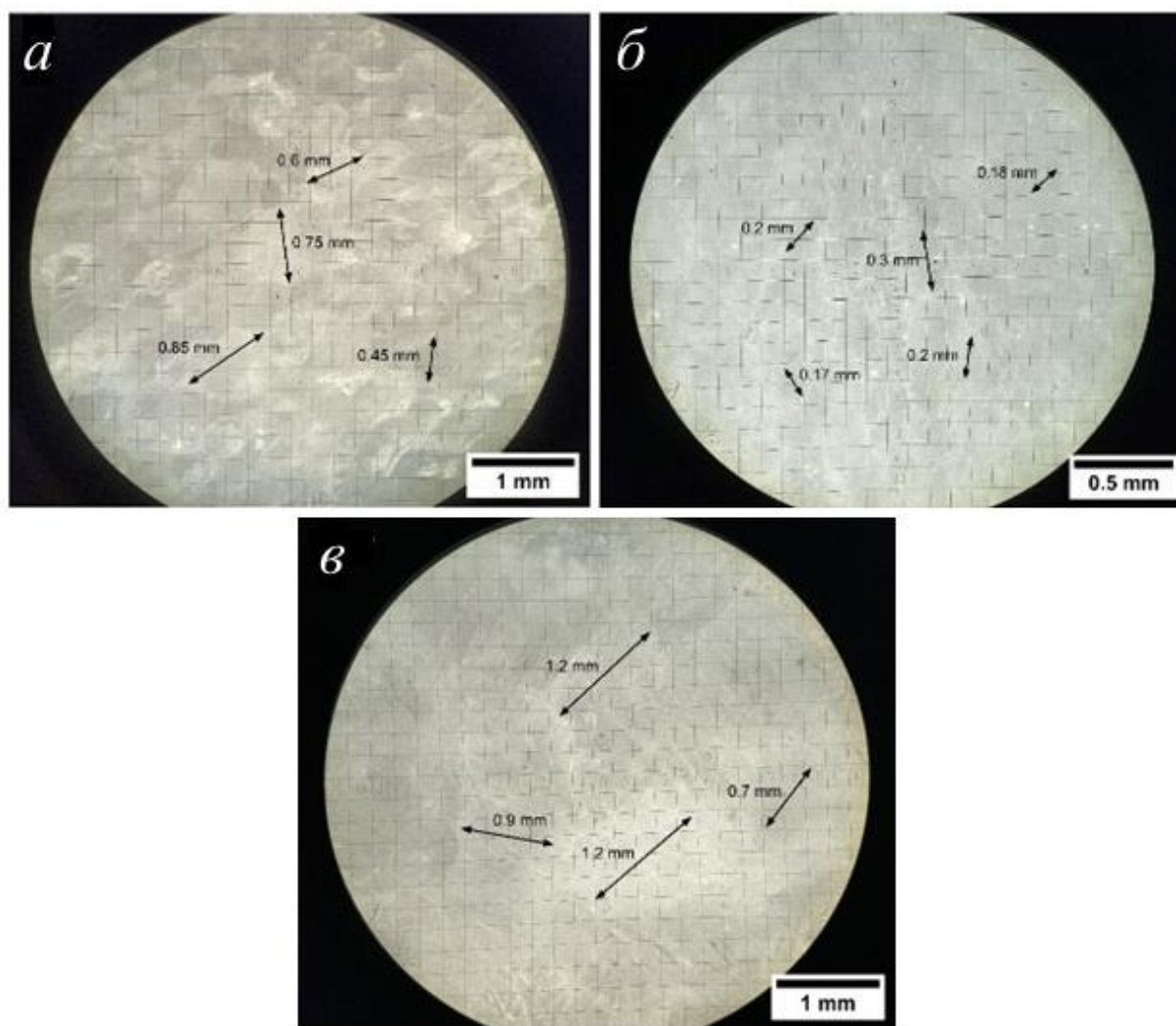


Рисунок 2 – Изображения аншлифов с нанесенным масштабом и размером зерен: *а* - серый мрамор (среднезернистый); *б* – серый мрамор (мелкозернистый); *в* – серый мрамор (крупнозернистый)

В качестве породы-коллектора для изготовления образцов с целью установления зависимости коэффициента трещиностойкости от насыщенности образца флюидом был выбран известняк. В качестве флюида использовался авиационный керосин ТС-1 в силу его относительно малой вязкости и высокой проникающей способности.

Процесс насыщения осуществлялся в вакууме. Для создания вакуумной среды использовалась вакуумная камера МТ 40 4D.

Третья глава содержит основные результаты лабораторных экспериментов, как с точки зрения разной размерности зерен, а также с точки зрения разного генезиса.

Раздел 3.1 содержит результаты проведенных испытаний, направленных на установление температурных режимов, характеризующих скорость прогревания образца с целью предотвращения негативного влияния температурного градиента на свойство пород сопротивляться росту трещин.

Результаты свидетельствуют о несущественном влиянии генотипа образца на формируемый температурный градиент в разных частях образца. Превалирующим фактором, влияющим на формирование температурного градиента, является геометрия образца. За оптимальный с точки зрения достижения необходимых температур, в рамках которых проводились эксперименты, был взят режим нагрева, при котором в сеть с нагревательными элементами подается электрический ток напряжением 100 В. Из приведенных результатов главным образом использовалось ориентировочное время достижения образцом той или иной температурной отметки при определенном значении напряжения в сети. В ходе осуществления дальнейших испытаний нагрев прекращался по достижении поверхностью образца температуры, превышающей температуру данного этапа испытаний, после чего выжидалось время, необходимое для приведения образца в термодинамическое равновесие при температуре, соответствующей текущему этапу испытаний.

Раздел 3.2 содержит результаты экспериментов, целью которых является установление закономерности изменения коэффициента трещиностойкости при умеренном тепловом воздействии для горных пород разного генезиса. В рамках данных исследований было проведено 259 экспериментов, измерения проводились при температурах 20, 40, 60, 80 и 100 градусов Цельсия. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов разного генезиса

Образец	Температура, °С	R_c^* , Н	K_{IC}^* , МПа·м ^{0,5}	Коэффициент вариации, %
Габбро	20	539,18	2,49	3,62
Гранит		358,84	1,76	8,09
Известняк		201,12	0,94	8,65
Мрамор белый		90,51	0,44	20,77
Мрамор серый (среднезернистый)		192,11	0,96	8,16
Мрамор серый (мелкозернистый)		293,19	1,44	10,57
Мрамор серый (крупнозернистый)		138,01	0,69	6,14
Габбро	40	521,95	2,46	4,67
Гранит		364,28	1,73	17,60
Известняк		185,28	0,87	17,07
Мрамор белый		80,18	0,39	15,50
Мрамор серый (среднезернистый)		133,95	0,66	5,74
Мрамор серый (мелкозернистый)		284,31	1,41	6,16
Мрамор серый (крупнозернистый)		124,86	0,63	11,76
Габбро	60	471,27	2,40	3,79
Гранит		278,49	1,37	14,08
Известняк		171,10	0,81	16,95
Мрамор белый		68,12	0,34	14,56
Мрамор серый (среднезернистый)		109,61	0,54	8,47
Мрамор серый (мелкозернистый)		283,30	1,42	9,36
Мрамор серый (крупнозернистый)		99,21	0,47	8,47

* - приведены усредненные значения по анализируемой серии испытаний

Продолжение таблицы 1 – Результаты испытаний образцов разного генезиса

Образец	Температура, °С	P_c^* , Н	K_{IC}^* , МПа·м ^{0,5}	Коэффициент вариации, %
Габбро	80	481,22	2,36	1,44
Гранит		309,81	1,49	7,40
Известняк		171,31	0,81	16,37
Мрамор белый		62,63	0,30	13,20
Мрамор серый (среднезернистый)		81,96	0,41	14,96
Мрамор серый (мелкозернистый)		258,44	1,30	6,98
Мрамор серый (крупнозернистый)		98,23	0,46	11,37
Габбро	100	419,18	2,04	7,19
Гранит		275,63	1,26	9,27
Известняк		151,94	0,72	20,72
Мрамор белый		50,16	0,24	6,31
Мрамор серый (среднезернистый)		78,11	0,39	3,98
Мрамор серый (мелкозернистый)		275,38	1,37	5,68
Мрамор серый (крупнозернистый)		79,05	0,38	7,82

* - приведены усредненные значения по анализируемой серии испытаний

На рисунках 3 – 9 результаты представлены в виде графика зависимости коэффициента трещиностойкости от температуры образца при испытании. Каждая точка на графике является средним значением K_{IC} , полученных в серии экспериментов. Для характеристики выборок на графики добавлен размах в виде линии, соединяющей максимально и минимально полученное значение коэффициента трещиностойкости в каждой из них. На каждом графике представлено уравнение линии тренда изменения коэффициента трещиностойкости, а также коэффициент детерминации.

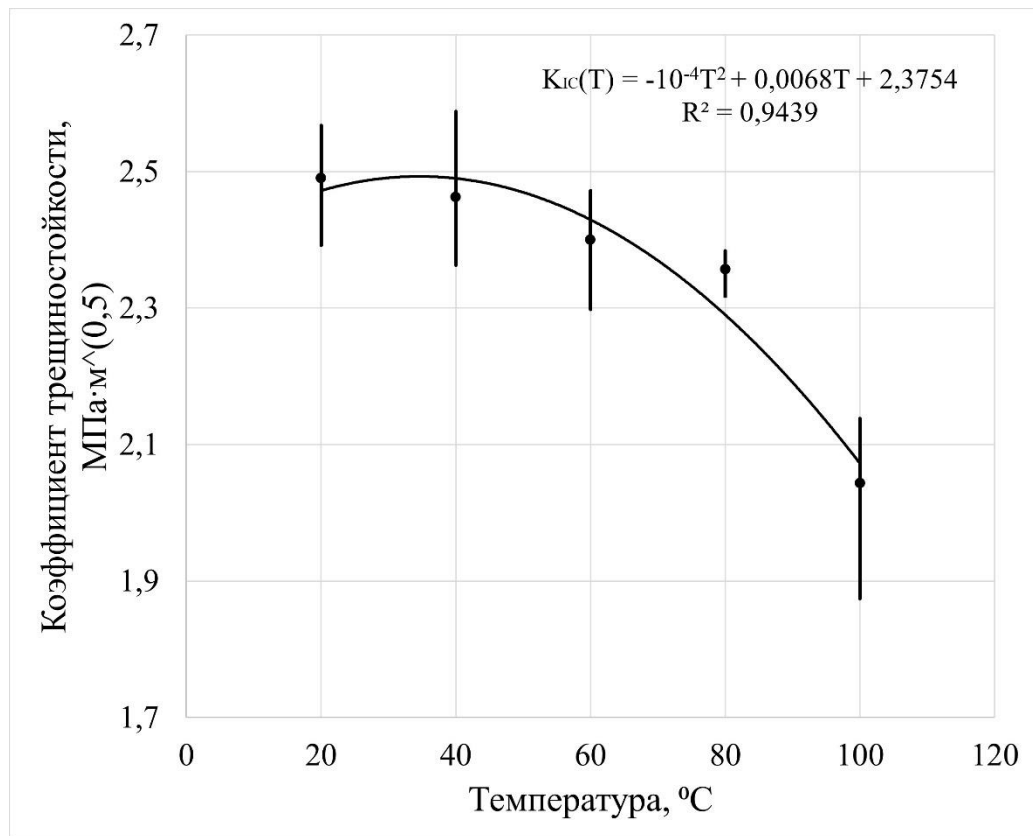


Рисунок 3 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов габбро

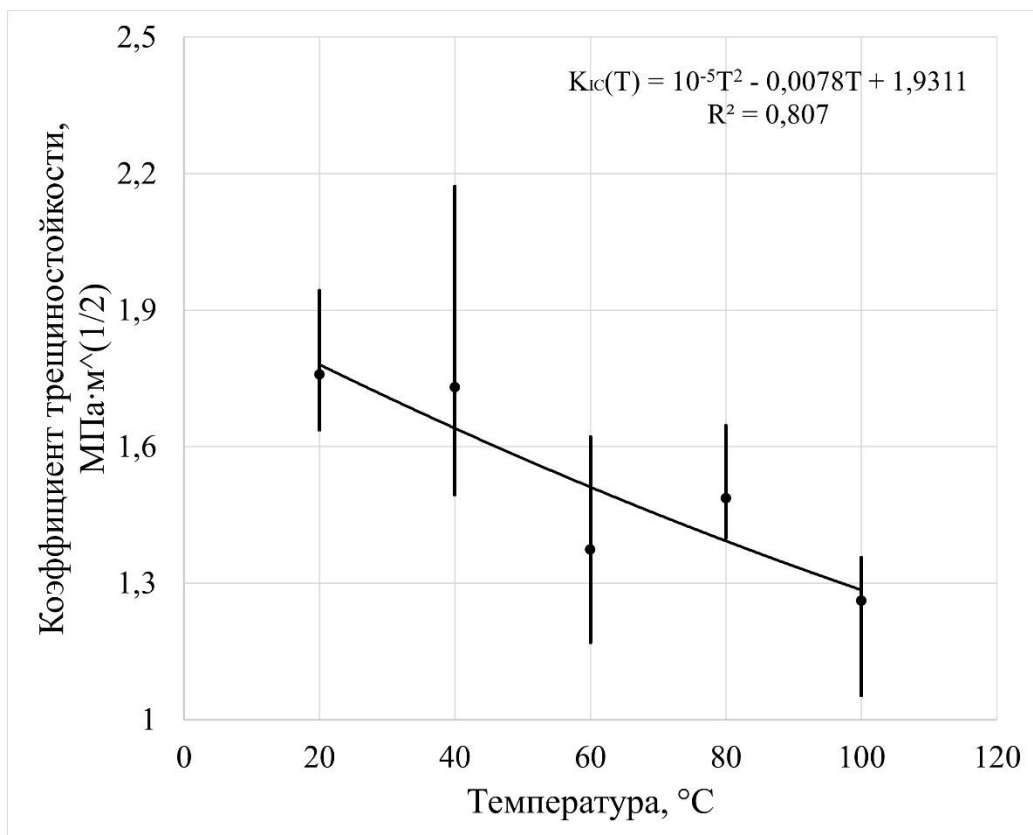


Рисунок 4 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов гранита

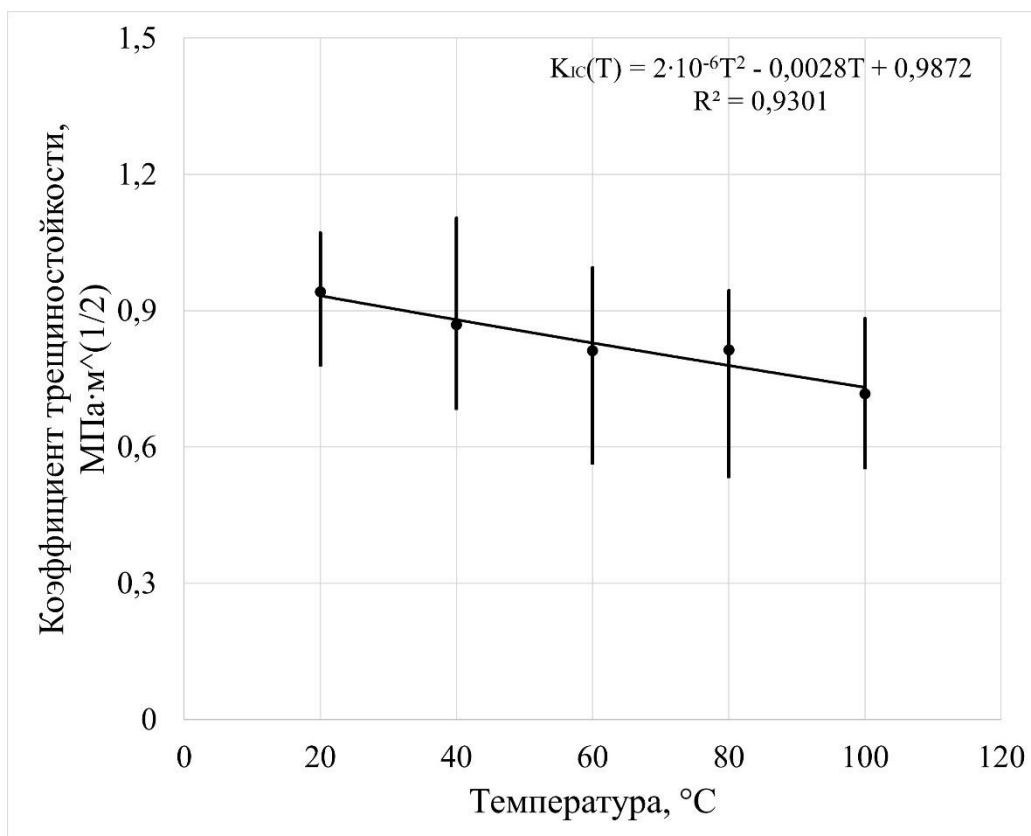


Рисунок 5 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов известняка

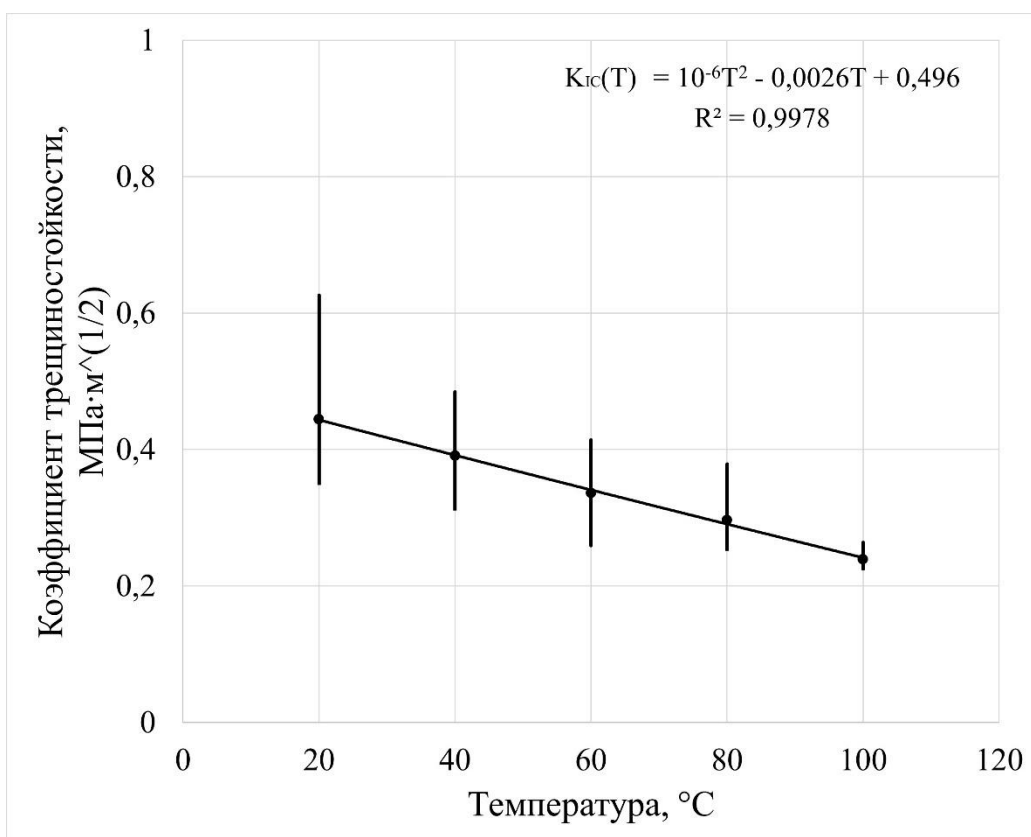


Рисунок 6 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов мрамора белого

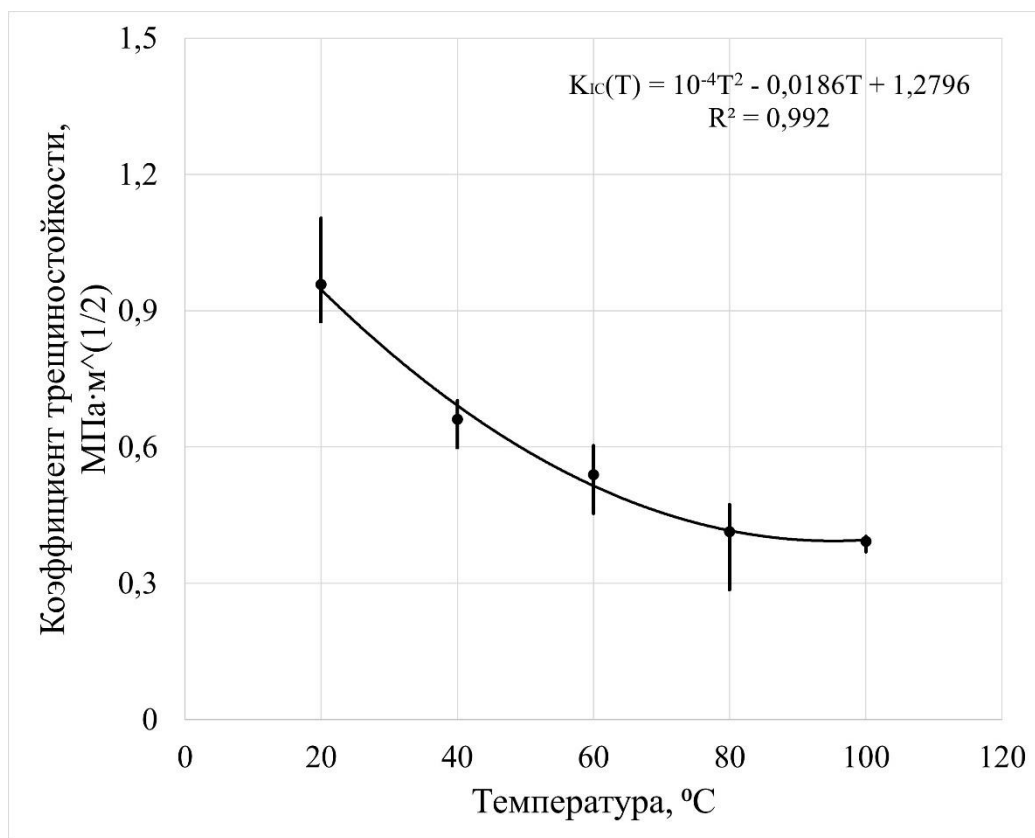


Рисунок 7 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов серого мрамора среднезернистого

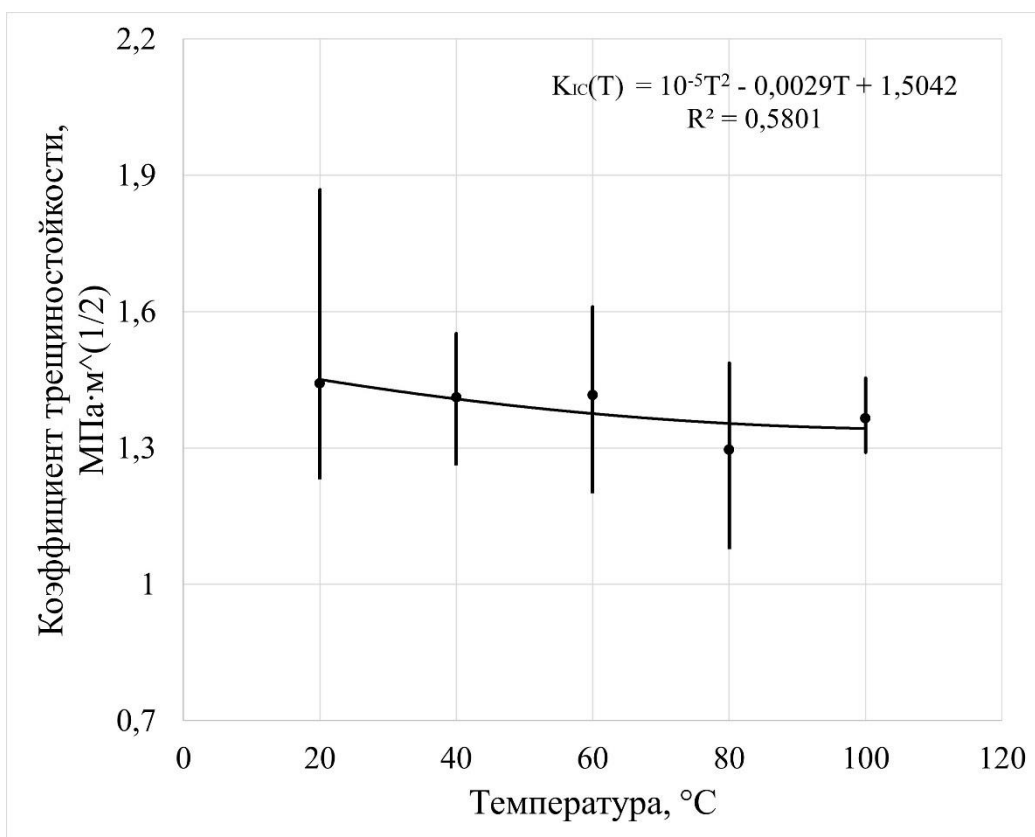


Рисунок 8 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов серого мрамора мелкозернистого

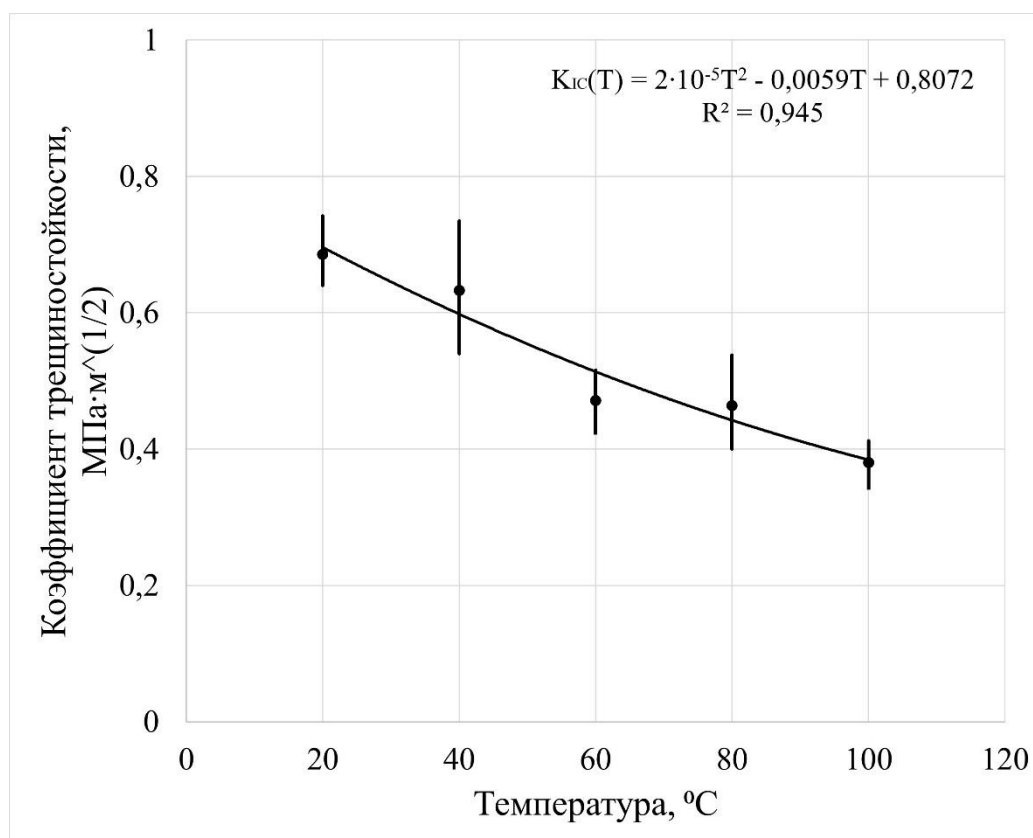


Рисунок 9 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов серого мрамора крупнозернистого

Согласно приведенным результатам, можно выделить общие характерные черты, присущие испытываемым образцам горных пород. В первую очередь, это снижение статического коэффициента трещиностойкости с ростом температуры для образцов горных пород всех генотипов. Тренд данного снижения для всех пород одинаков (линии трендов вогнуты), за исключением небольшого отклонения (выгнутости) линии тренда изменения K_{IC} образцов габбро – имеющих самое высокое значение коэффициента трещиностойкости на всех этапах теплового воздействия из всех испытанных пород. Непостоянная скорость снижения коэффициента трещиностойкости с ростом температуры также характерна для образцов всех горных пород.

Среди всех исследуемых горных пород наименьшую восприимчивость к изменению температуры от 20 °C до 100 °C с точки зрения изменения коэффициента трещиностойкости демонстрируют образцы мелкозернистого серого мрамора со снижением значения показателя лишь на 5,38 %, наибольшую – среднезернистый серый мрамор со снижением значения

показателя на 59,02 %. У остальных исследуемых горных пород аналогичный показатель составил 17,95 % у габбро, 23,84 % у известняка, 28,27 % у гранита, 44,52 % у крупнозернистого серого мрамора и 46,19 % у белого мрамора.

Раздел 3.3 посвящен описанию результатов экспериментов, направленных на установление зависимости коэффициента трещиностойкости от среднего размера зерна при умеренном тепловом воздействии.

В рамках данных исследований было поставлено 128 экспериментов. В качестве материала для анализа использовались данные экспериментов раздела 3.2. На образцы оказывалось тепловое воздействие, измерения проводились при температурах 20, 40, 60, 80 и 100 градусов Цельсия. Результаты испытаний серого мрамора представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний серого мрамора с разной крупностью зерен

Образцы серого мрамора	Температура, °C	Разрушающее усилие R_c^* , Н	Коэффициент трещиностойкости K_{IC}^* , МПа·м ^{0,5}	Коэффициент вариации*, %
Мелкозернистые	20	293,19	1,44	10,57
Среднезернистые		192,11	0,96	8,16
Крупнозернистые		138,01	0,69	6,13
Мелкозернистые	40	284,31	1,41	6,16
Среднезернистые		133,95	0,66	5,74
Крупнозернистые		124,86	0,63	11,76
Мелкозернистые	60	283,30	1,42	9,36
Среднезернистые		109,61	0,54	8,47
Крупнозернистые		99,21	0,47	8,47
Мелкозернистые	80	258,44	1,30	6,98
Среднезернистые		81,96	0,41	14,96
Крупнозернистые		89,90	0,46	11,37
Мелкозернистые	100	275,38	1,37	5,68
Среднезернистые		78,11	0,39	3,98
Крупнозернистые		79,05	0,38	7,82

* - приведены усредненные значения по анализируемой серии испытаний

Было установлено, что при повышении температуры коэффициент трещиностойкости уменьшается у всех образцов. Это хорошо видно при графическом представлении результатов (рис. 10 – 12). Каждая точка на графике является средним в серии экспериментов значением K_{IC} . Для

характеристики выборок на графики добавлен размах в виде линии, соединяющей максимально и минимально полученное значение коэффициента трещиностойкости в каждой из них. На каждом графике представлено уравнение линии тренда изменения коэффициента трещиностойкости, а также коэффициент детерминации.

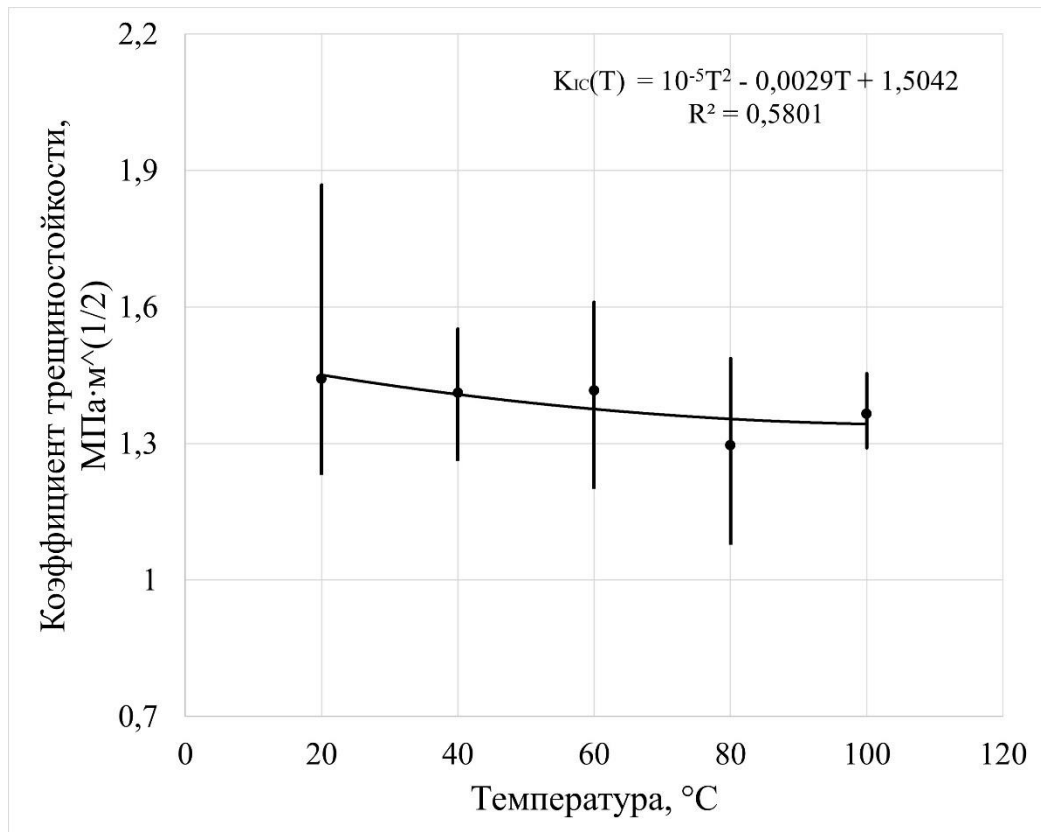


Рисунок 10 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов серого мрамора мелкозернистого

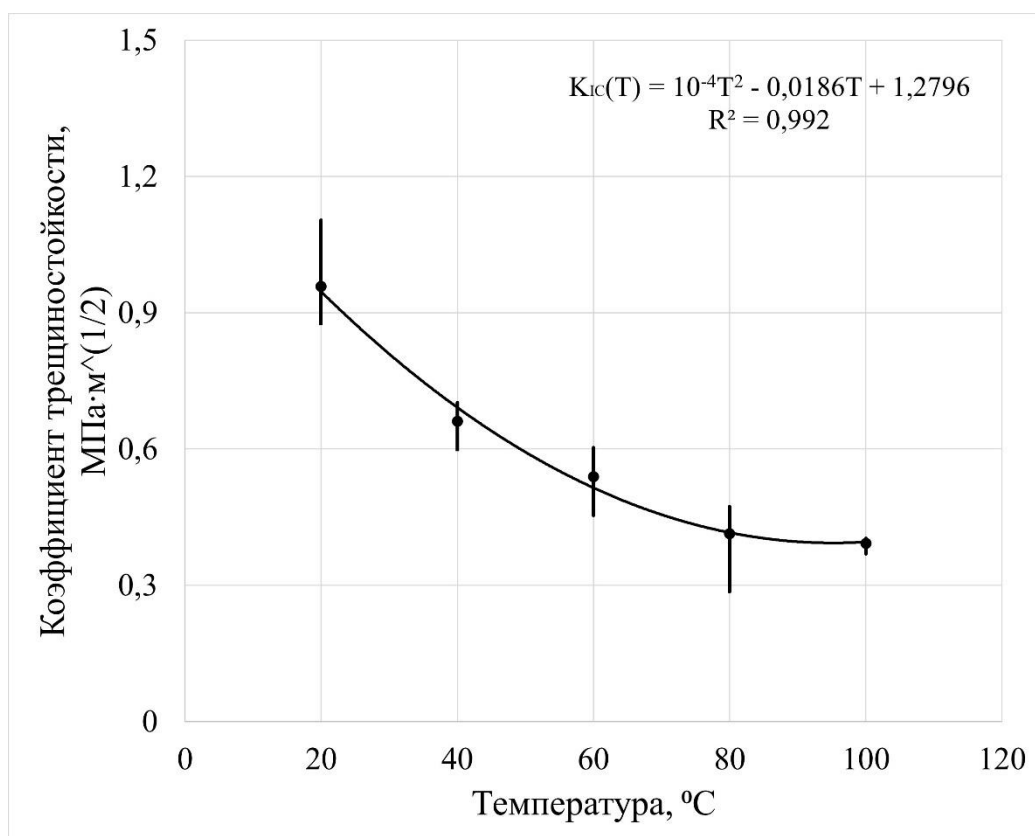


Рисунок 11 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов серого мрамора среднезернистого

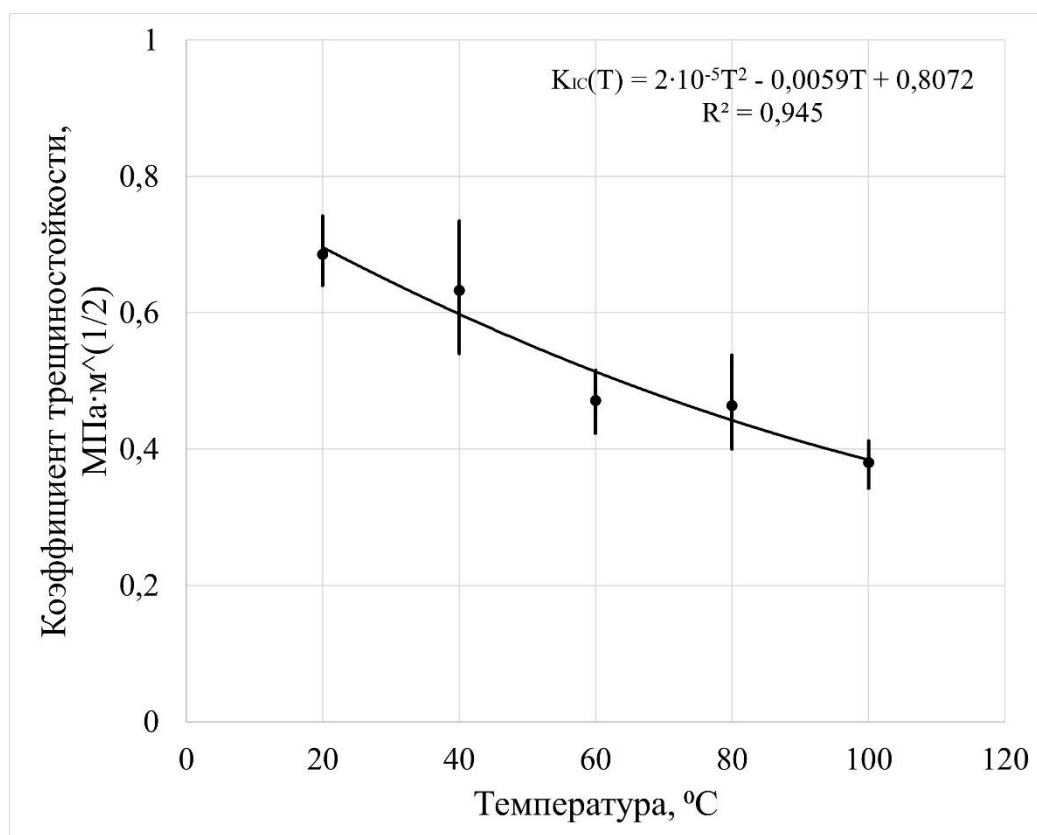


Рисунок 12 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов серого мрамора крупнозернистого

Приведенные данные позволяют проанализировать особенности изменения коэффициента серых мраморов разной зернистости. Так, материал с меньшим размером зерен в лице среднезернистого серого мрамора лучше сопротивляется росту трещин при комнатной температуре, чем крупнозернистый, однако при нагревании до 100 °С эта способность у данных материалов становится одинаковой. Коэффициент трещиностойкости мелкозернистого серого мрамора существенно выше средне- и крупнозернистого при всех указанных температурных отметках, а общее снижение коэффициента при нагревании от 20 °С до 100 °С гораздо менее существенно.

В четвертой главе представлены результаты экспериментов, целью которых является установление закономерностей изменения коэффициента трещиностойкости известняков при умеренном тепловом воздействии в зависимости от заполнения пор образца флюидом. В качестве флюида использовался авиационный керосин ТС-1, заполнение пор происходило в вакуумной камере, образцы испытывались без покрытия. В рамках данных исследований было проведено 309 экспериментов, исследование проводилось при температурах 20, 40, 60, 80 и 100 градусов Цельсия. Результаты экспериментов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты экспериментов для ненасыщенного и насыщенного флюидом известняка

Образец известняка	Температура, °С	Разрушающее усилие P_c^* , Н	Коэффициент трещиностойкости K_{IC} , МПа·м ^{0,5}	Коэффициент вариаций*, %
Ненасыщенный	20	226,45	1,08	5,83
Насыщенный		223,21	1,09	8,45
Ненасыщенный	40	214,26	1,04	7,28
Насыщенный		214,78	1,04	11,24
Ненасыщенный	60	214,14	1,05	5,95
Насыщенный		208,14	1,02	13,64
Ненасыщенный	80	206,61	1,00	11,79
Насыщенный		201,42	0,98	18,76
Ненасыщенный	100	204,78	1,00	13,87
Насыщенный		194,44	0,98	23,65

* - приведены усредненные значения по анализируемой серии испытаний

Из приведенных в таблице данных видно, что коэффициент вариации значений коэффициента трещиностойкости насыщенных образцов известняка выше коэффициента вариации значений параметра ненасыщенных образцов известняка на всех этапах умеренного теплового воздействия, что косвенно свидетельствует о влиянии флюидонасыщения образцов известняка на значение коэффициента трещиностойкости.

Полученные результаты свидетельствуют о тенденции к снижению коэффициента трещиностойкости известняка при нагревании от 20 °С до 40 °С, влияние насыщенности пор при нагревании в данном температурном диапазоне мало или отсутствует вовсе. Коэффициент трещиностойкости при нагреве в данном температурном диапазоне снизился на 3,68 % и 4,22 % у ненасыщенных и насыщенных известняков соответственно. При дальнейшем нагреве образцов в температурном диапазоне от 60 °С до 80 °С коэффициент трещиностойкости насыщенных образцов известняка демонстрирует более стабильное снижение (снижение относительно предыдущей температурной отметки проведения испытаний) коэффициента трещиностойкости, чем ненасыщенных образцов. Тем не менее, полученные средние значения коэффициента трещиностойкости насыщенных образцов известняка при температурном воздействии 60 °С и выше оказываются ниже значений коэффициента трещиностойкости ненасыщенных образцов известняка при том же тепловом воздействии. Эта разница составляет для 60 °С – 2,4 %, для 80 °С – 1,1 % и для 100 °С – 7,45 %. Эти изменения хорошо видны на рисунке 13 по линиям трендов. Каждая точка на графике является средним значением K_{IC} , полученных в серии экспериментов. Для характеристики выборок на графике добавлен размах в виде линий с выступами соответствующего цвета, соединяющими минимально и максимально полученное значение коэффициента трещиностойкости в каждой из них. На графике также представлены уравнения линий трендов изменения коэффициента трещиностойкости, а также коэффициент детерминации.

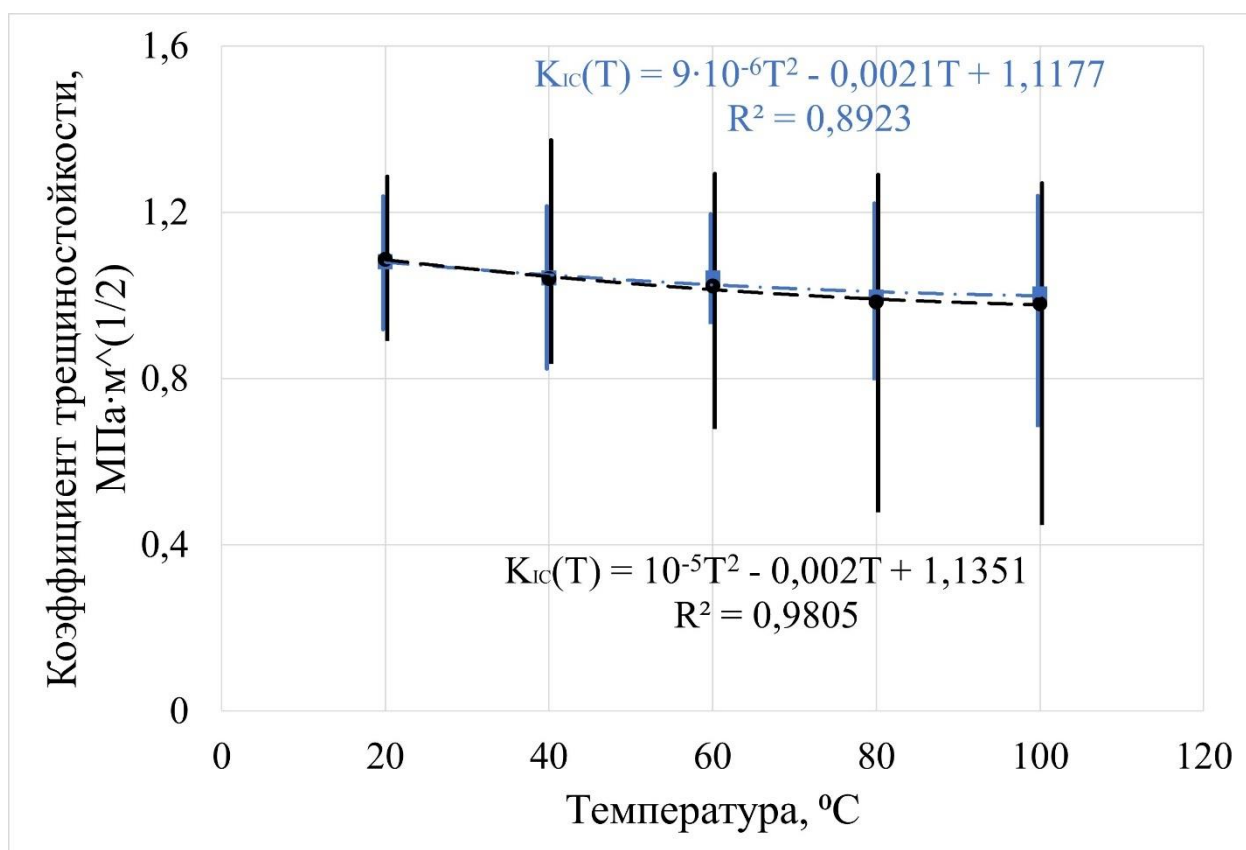


Рисунок 13 – Значения коэффициента трещиностойкости, а также линии трендов его изменения в зависимости от температуры ненасыщенного (синий цвет, значения помечены квадратными точками, а тренд пунктиром с точкой) и насыщенного (черный цвет, значения помечены круглыми точками, а тренд пунктиром) известняка

Из рисунка 13 видно, что наблюдается схожая тенденция снижения коэффициента трещиностойкости известняков в ненасыщенном и насыщенном состояниях. Более того, характер снижения коэффициента трещиностойкости насыщенных образцов известняка с ростом температуры согласуется с характером снижения коэффициента трещиностойкости других горных пород с ростом температуры в ранее проведенных исследованиях, результаты которых представлены в главе 3.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о влиянии флюидонасыщенности образцов известняка на коэффициент трещиностойкости при умеренном тепловом воздействии. Максимальное снижение коэффициента трещиностойкости ненасыщенных образцов известняка достигается при нагревании до 80°C и составляет 7,95 %,

максимальное снижение коэффициента трещиностойкости насыщенных образцов достигается при температуре нагрева 100 °С и составляет 9,86 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, на основании выполненных автором экспериментальных исследований содержится решение актуальной научной задачи выявления закономерностей изменения коэффициента трещиностойкости горных пород при умеренном термическом воздействии в зависимости от их генезиса, размеров зерен и влияния флюидонасыщенности, что имеет важное значение для моделирования геомеханических процессов и процессов трещинообразования в горных породах.

Основные научные результаты работы и выводы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Разработано и успешно применено специальное оборудование для осуществления лабораторных испытаний по методике ГОСТ 25.506.85 с возможностью оказания термического воздействия на образец непосредственно в момент проведения эксперимента.
2. Выявлена тенденция снижения величины коэффициента трещиностойкости при температурном воздействии в диапазоне 20 – 100 °С для серых мраморов, отличающихся размером структурных элементов: снижение величины коэффициента трещиностойкости с ростом температуры составило для мелко-, средне- и крупнозернистого материала 5,38 %, 59,02 % и 44,52 % соответственно.
3. Установлено, что снижение величины коэффициента трещиностойкости в температурном диапазоне 20 – 100 °С в основном определяется генезисом породы. Снижение составило: 5,38 – 59,02 % для метаморфических, 17,95 – 28,27 % для магматических и 23,84 % для осадочных горных пород, при этом скорость снижения коэффициента трещиностойкости при нагревании в температурном диапазоне от 20 °С до 60 °С больше, чем при температурном диапазоне от 60 °С до 100 °С у гранита, известняка, белого

мрамора, средне- и крупнозернистого серых мраморов, и наоборот у горных пород габбро и мелкозернистого серого мрамора.

4. Экспериментально установлено, что влияние насыщения порового пространства осадочных горных пород при температурах 20 – 40 °С на коэффициент трещиностойкости мало или отсутствует.
5. Экспериментально установлено влияние насыщения порового пространства осадочных горных пород при нагревании в температурном диапазоне 60 – 100 °С на коэффициент трещиностойкости. Коэффициент трещиностойкости насыщенных образцов известняка меньше коэффициента трещиностойкости ненасыщенных при 60 °С на 2,4 %, при 80 °С на 1,1 %, при 100 °С на 2,36 %.
6. Результаты диссертационной работы в части температурных зависимостей величины коэффициента трещиностойкости осадочных пород приняты к использованию ООО «Газпром геотехнологии» и будут учтены при проектировании объектов подземного хранения.

Основные положения диссертации изложены в следующих опубликованных работах:

В рецензируемых научных периодических изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Винников, В. А., Павлов И. А. Изменение коэффициента трещиностойкости горных пород при умеренном тепловом воздействии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 3. – С. 5-16. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_3_0_5.

2. Павлов И. А. Влияние флюидонасыщения на трещиностойкость известняков при умеренном тепловом воздействии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 6 (специальный выпуск 16). — С. 3–13. DOI 10.25018/0236_1493_2024_6_16_3.

В прочих изданиях:

3. Павлов И. А., Винников В. А., Павлов К. А. Лабораторная установка для исследования трещиностойкости пород-коллекторов // Ашировские чтения. – 2023. – Т. 2, № 15. – С. 13-23.

4. Павлов И. А. Изменение коэффициента трещиностойкости серого мрамора с разным размером зерен при умеренном тепловом воздействии // Актуальные вопросы прочности: Сборник тезисов LXVII Международной конференции, Екатеринбург, 02–05 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. – С. 326-327.