

ОБЗОР ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЬДА

Коновалов С.В. Email: Konovalov689@scientifictext.ru

Коновалов Сергей Вадимович – магистрант,
кафедра гидротехники, теории зданий и сооружений,
Инженерная школа
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Аннотация: в данной статье проведен обзор физико-механических свойств льда. Здесь было установлено, что прочность на изгиб колеблется в значениях от 0,7 до 3,1 МПа, а прочность на сжатие варьируется в диапазоне 5-25 МПа, в зависимости от температуры (от -10°C до -20°C). Прочность на сжатие находится в обратной зависимости от температуры окружающей среды и скорости приложения нагрузки. Прочность на растяжение уменьшается с увеличением размеров зерен льда. Вязкостное разрушение находится в диапазоне 50-150 кПа $\text{м}^{1/2}$.

Ключевые слова: физико-механические свойства льда, лёд, обзор, прочность на сжатие, прочность на растяжение, вязкостная прочность, термическое разрушение, структура льда, зависимость параметров льда.

OVERVIEW OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ICE

Konovalov S.V.

Konovalov Sergey Vadimovich - Undergraduate,
DEPARTMENT OF HYDROTECHNICS, THEORY OF BUILDINGS AND STRUCTURES,
SCHOOL OF ENGINEERING
FAR EASTERN FEDERAL UNIVERSITY, VLADIVOSTOK

Abstract: this article reviews the physical and mechanical properties of ice. It was found here that the compressive strength varies in the range of values from 0.7 to 3.1 MPa, and the compressive strength varies in the range of 5-25 MPa, depending on temperature (from -10°C to -20°C). Depending on temperature and load application speed. Tensile strength decreases with increasing grain sizes of ice. Viscous fracture is in the range of 50-150 kPa $\text{m}^{1/2}$.

Keywords: physico-mechanical properties of ice, ice, review, compressive strength, tensile strength, viscosity strength, thermal fracture, ice structure, ice parameter dependence.

УДК 551.467

Введение:

Физико-механические свойства льда играют важнейшую роль в различных отраслях. Благодаря им можно находить требуемую прочность для гидротехнических сооружений в ледовых условиях, определять вероятность схода лавин и откол ледников. Целью данного обзора является интерпретация имеющейся информации в области физико-механических свойств льда. В статье рассматриваются параметры пресноводного льда.

Кристаллическая структура льда

Лед существует в нескольких разных кристаллических структурах, а также в двух аморфных состояниях [5]. Под низким давлением стабильная фаза - называется льдом I. Лёд I имеет 2 варианта. Лед Ih шестиугольный и получается замораживанием воды под давлением внешней среды. Лед Ic кубический и формируется осаждением пара на низких температурах.

Модуль упругости

Модуль упругости и коэффициент Пуассона поликристаллического льда был измерен путем подвергания льда двухосному изгибу [4]. При температурах от -10°C для измерения на ледяных кувшинках диаметром 0.5м, модуль льда Янга был получен в промежутке 9.7-11.2 ГПа и коэффициент Пуассона составил 0.29-0.32.

Прочность на растяжение и сжатие

Прочность льда была измерена сравнительно небольшое количество раз. Испытания показали относительно широкий диапазон разброса прочности на растяжение льда, от 0,7 МПа до 3,1 МПа. Средняя прочность на растяжение льда по результатам опубликованных исследований составляет 1,43 МПа в диапазоне температур от -10°C до -20°C . В этом температурном диапазоне прочность на сжатие льда составляет 5-25 МПа [2]. Прочность льда зависит от переменных температуры, скорости деформации, тестируемого объема и размера зерна льда. Данные зависимости будут рассмотрены.

Влияние температуры

Прочность льда на сжатие и растяжение находится в обратной зависимости от температуры, как показано на рисунке 1.

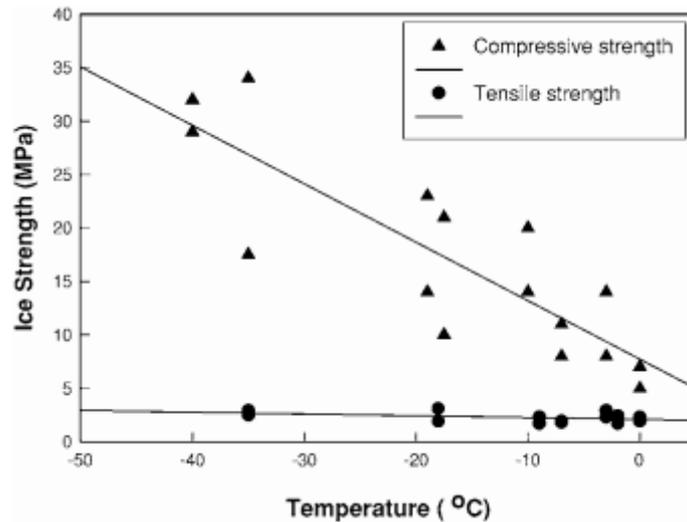


Рис. 1. График зависимости прочности льда от температуры [1]

Температура оказывает большее влияние на прочность на сжатие, чем на растяжение. Прочность на сжатие увеличилась в 4 раза в диапазоне от 0 °С до – 40 °С. Однако прочность на растяжение увеличилась лишь в 1,3 раза в том же температурном диапазоне.

Можно предположить, что зависимость прочности на сжатие от температуры появляется в результате изменения скольжения зёрен в текстуре льда, которое приводит к накоплению напряжений в границах отдельных зёрен.

Влияние скорости нагружения

Рисунок 2 показывает влияние скорости нагружения на прочность льда на растяжение и сжатие.

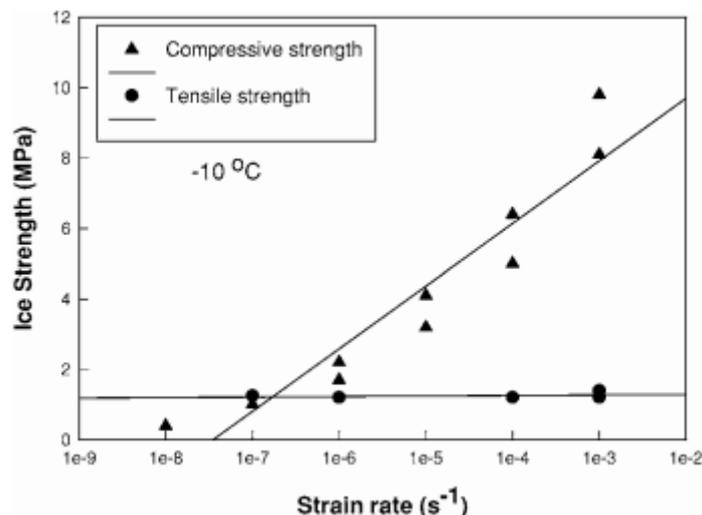


Рис. 2. График зависимости прочности льда от скорости нагружения [1]

В то время как прочность на сжатие зависит от скорости деформации, прочность на разрыв не зависит от неё в том же диапазоне. Кривые растяжение-напряжение показывают пластичное поведение при низких и средних скоростях деформации, но хрупкое поведение при более высоких скоростях. Эффекты скорости деформации согласуются с механизмами деформации скольжения и скольжения на границах зёрен, которые действуют во время ползучего поведения льда.

Влияние структуры льда

Прочность на растяжение льда уменьшается с увеличением диаметра зерна льда как показано на рисунке 3.

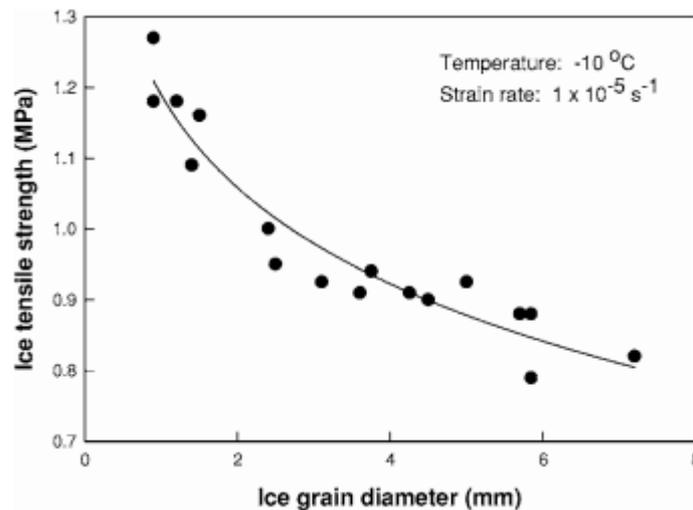


Рис. 3. График зависимости прочности на растяжение льда от размера зёрен

Влияние объема

Прочность льда на растяжение находится в обратной зависимости от объема испытываемого материала как показано на рисунке 4. Влияние объема на прочность хрупких материалов обычно описывается теорией статистического распределения Вейбулла. Её часто называют теорией разрушения «самого слабого звена».

Из данных, отображенных на рисунке 4, можно получить значение модуля Вейбулла для льда, который является безразмерным параметром. Его значение, по оценкам, приблизительно имеет значение равное 5. В рассмотренных данных модуль Вейбулла для льда был предложен теоретически впервые. Для сравнения, данный параметр хрупких керамических материалов обычно находится в диапазоне 5-20. Чем выше значение модуля Вейбулла, тем ниже статистический разброс в измеренном напряжении разрушения.

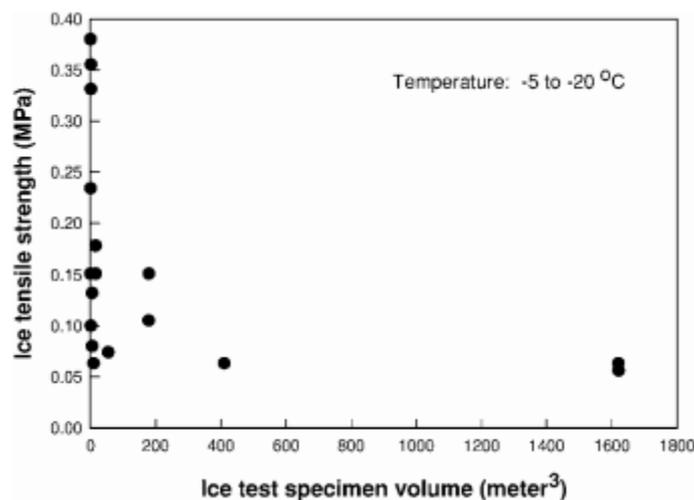


Рис. 4. График зависимости прочности на растяжение льда от объема образца [1]

Вязкостное разрушение

Вязкостное разрушение наблюдалось только в ограниченных исследованиях. Как правило, оно составляло 50-150 КПа м^{1/2} [3]. Для сравнения вязкостное разрушение стекла обычно составляет 700-1000 КПа м^{1/2}. Таким образом, лёд имеет всего лишь одну десятую фактической данной прочности стекла.

На рисунке 5 продемонстрированы данные зависимости вязкостной прочности льда от температуры. Данная прочность, как оказалось, слабо зависит от температуры. На рисунке 6 продемонстрирована зависимость вязкостной прочности от скорости нагружения. Как оказалось, этот параметр льда относительно чувствителен к изменению скорости нагружения. На рисунке 7 вязкостная прочность была рассмотрена в отношении к размеру зёрен льда. Оказалось, что в рассматриваемой зависимости наблюдается обратная связь. С увеличением зёрен льда уменьшается вязкостная прочность. Предполагается, что это можно объяснить механизмом возникновения микротрещин во льду.

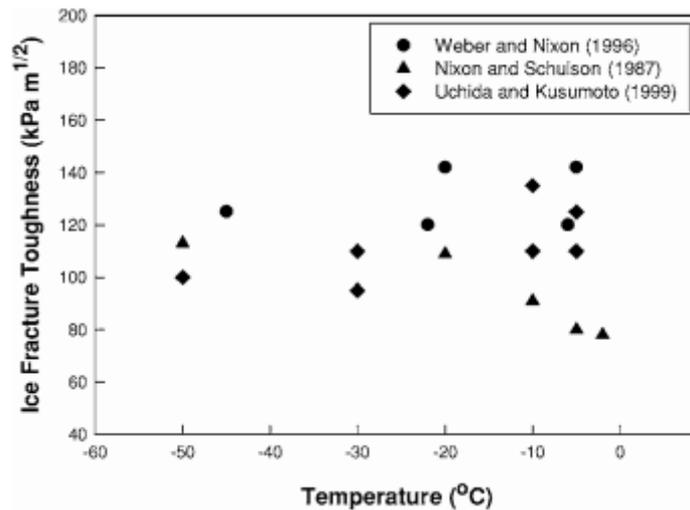


Рис. 5. График зависимости вязкостной прочности льда от температуры [1]

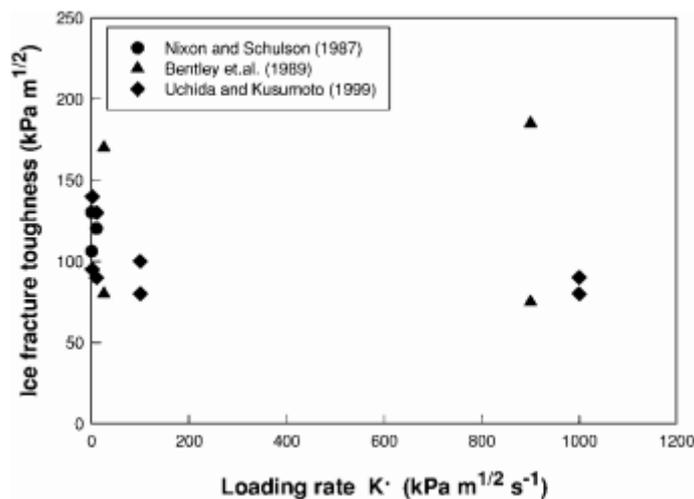


Рис. 6. График зависимости вязкостной прочности льда от скорости нагружения [1]

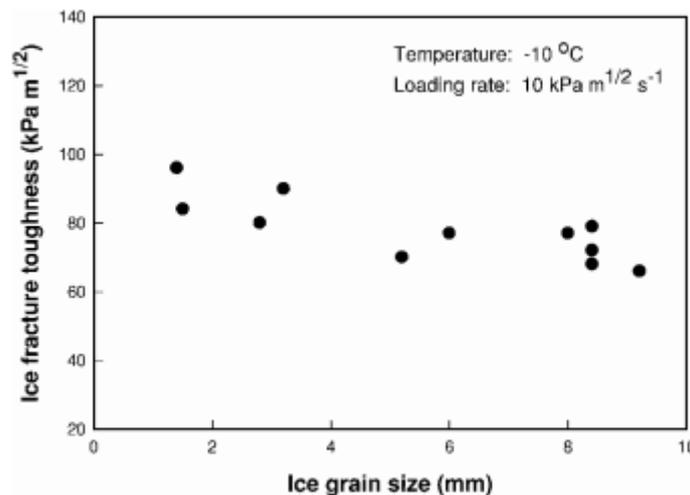


Рис. 7. График зависимости вязкостной прочности льда от размера зёрен [1]

Термическое разрушение

Шарики льда диаметров 2-3 см охлаждали до различных минусовых температур, а затем помещали в воду, приближенную температурой к 0 °С. Исследовали лёд цельный и с внутренними включениями воздуха. Было обнаружено, что вероятность термического разрушения составляет 50% при разности температур в 15 °С и 100% при разности 20 °С и выше. Трещины термического разрушения

образовывались под поверхностью сферы, повторяли сферическую форму поверхности исследуемого тела (хотя эти трещины не замыкались).

Заключение

Механические свойства льда как материала демонстрирует сходство с механическими свойствами керамических материалов, среди них прочность на разрыв, упругие свойства и прочность на разрыв. Все эти показатели свойств значительно ниже аналогичных свойств керамических материалов.

Эти отличия можно объяснить различиями на уровне атомных связей данных материалов. Фундаментальные исследования в этом направлении представляют особое значение, так как изученные свойства льда, анализ их зависимостей и способность прогнозирования изменения показателей различных свойств могут найти широкое применение в изучении регионов, в которых особой проблемой являются особые ледовые условия, такие как Арктика.

Примечательно, что прочность на растяжение льда относительно чувствительна к температуре и скорости деформации, а прочность на сжатие зависит от этих переменных. Необходимо проводить большее количество исследований для более подробного описания механизма механической деформации.

Список литературы / References

1. *Petrovic J.J.* Review properties of ice and snow. Journal of materials science. 38, 2003.
2. *Haynes F.D.* "Effect of temperature on the strength of snow-ice", Department of the Army, Cold regions research and engineering laboratory, Corps of Engineers, CRREL Report 78-27. Hanover. New Hampshire, 1978.
3. *Andrews R.M.* Journal of Glaciology. 31, 1985.
4. *Gold L.W.* Canadian Journal of civil engineering 15, 1988.
5. *Schulson E.M.* Journal of the minerals. Metals. Materials Society. 51, 1999.