

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ (K_{Ic}) НАТУРНОГО МОРСКОГО ЛЬДА

Представлены результаты экспериментального определения зависимостей трещиностойкости (K_{Ic}) натурального морского льда от температуры и масштаба образцов для испытаний. Рассмотрен ряд методических вопросов экспериментального определения K_{Ic} натурального льда.

1. Введение. Необходимость усовершенствования методов расчета ледовых нагрузок обуславливает расширение исследований закономерностей деформирования и разрушения ледяного покрова при взаимодействии с гидротехническими сооружениями. Количественное описание этого процесса в общем случае представляется затруднительным из-за различия масштабов геометрических и силовых факторов рассматриваемой задачи.

В рамках известного подхода¹ задача упрощается разбиением на внешнюю (масштабы соразмерны с характерными размерами покрова) и внутреннюю (разрушение льда в зоне контакта) задачи. Каждой форме разрушения во внутренней задаче соответствует определенный диапазон коэффициентов интенсивности напряжений внешней задачи. Во многих представляющих практический интерес случаях основу процессов разрушения в масштабах внутренней задачи составляет развитие трещин нормального отрыва [1, 2]. Поэтому одним из основных параметров, характеризующих процесс взаимодействия судов и сооружений с ледяным покровом, является критический коэффициент интенсивности напряжений нормального отрыва K_{Ic} (трещиностойкость) льда. Однако, хотя имеется уже значительное количество работ, посвященных определению K_{Ic} морского льда (см. библиографии работ [1, 3]), вопрос об основных зависимостях K_{Ic} далеко не закрыт.

В данной работе приводится часть результатов экспериментального определения трещиностойкости натуральных льдов дальневосточного моря, полученных в 1987 г. Особое внимание уделяется усовершенствованию методики определения трещиностойкости морского льда. В рамках работы проводилось определение трещиностойкости (K_{Ic}) натурального льда, отобранного из морского ледяного покрова. В силу сложных метеорологических условий во время ледостава ледяной покров имел множество нарушений, поэтому образцы для испытаний отбирались из ровных ледяных полей (дрейфующих и приайных). Тип исследуемого льда по структурно-генетической классификации льдов природных водоемов, предложенной в [4] — В4. Текстура льда волокнистая с приблизительно равномерно нарастающим поперечных размеров кристаллов от 0,5–2 мм в верхнем горизонте до нескольких сантиметров на нижней поверхности льдины. Цвет льда светло-серый. Наблюдалось большое количество солевых и воздушных включений сферической формы (размером 1–3 мм), равномерно распределенных по толще льда, а также включений сложной ветвистой формы в виде стоковых русел диаметром 3–5 мм. Слоистость кристаллической структуры, как правило, не наблюдалась.

Распределение температуры и солености льда по толщине покрова представлено на фиг. 1.

2. Методика определения трещиностойкости (K_{Ic}) льда. Использовались две разные методики определения K_{Ic} льда по результатам однократных статических нагружений изгибающими или растягивающими нагрузками образцов с начальными трещинами.

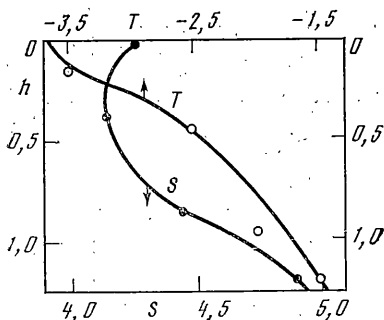
В крупномасштабных опытах использовалась модифицированная методика определения K_{Ic} при внецентренном растяжении компактного прямоугольного образца с краевым надрезом сосредоточенными силами, приложенными к берегам надреза [1]. Нагружение образца осуществлялось вручную с помощью домкрата; временная развертка нагрузки фиксировалась датчиком усилий.

В мелкомасштабных испытаниях использовалась методика определения K_{Ic} при разрушении балочки с краевым надрезом по схеме четырехточечного изгиба [5]. Испытания проводились с помощью гидравлического прессы.

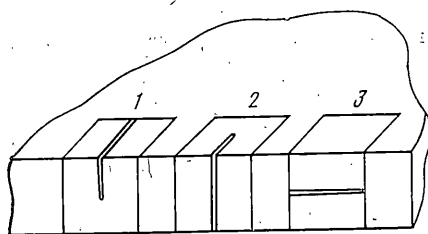
3. Подготовка образцов. При испытании натурального льда выбирали ровный участок ледяного поля, из которого с помощью пыльного агрегата ремонта скважин выщипывали на всю толщину ледяного поля (1,1–1,8 м) куб размером в плане около 1 м × 1 м. Затем срезали верхний слой снежного льда и нижний слой ледяной шуги и измеряли распределение температуры и солености по горизонтам льда (фиг. 1).

Для крупномасштабных испытаний из куба изготавливали один компактный прямоугольный образец. Начальная краевая трещина имитировалась надрезом бензопилой (ширина надреза около 10 мм), затем, — двуручной пилой (ширина около 4 мм). Верхняя часть надреза формировалась приспособлением типа удлиненного строгального ножа (ширина меньше 1 мм). Общая длина надреза составляла около 0,4–0,6 ширины образца. Прямоугольная выемка для установки домкрата и датчика усилий формировалась бензопилой; высота кромки не превышала 0,2 длины надреза.

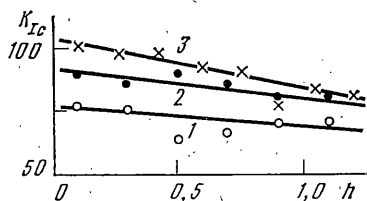
¹ Гольдштейн Р. В.; Осипенко Н. М. Механика разрушения ледяного покрова. Препринт № 200. М.: ИМП АН СССР, 1982.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

Обломки после испытания крупномасштабных образцов обычно использовались для изготовления новых компактных образцов на внецентричное растяжение. Таким образом, компактные прямоугольные образцы с краевым надрезом имели размеры $(0,5-1,0) \cdot (1,0-1,4) \text{ м}^3$.

Мелкомасштабные образцы льда залива Байкал получались при распиливании по горизонтали или вертикали куба бензопилой на 5-6 пластин, каждая из которых, в свою очередь, распиливалась на балочки размером $(0,10 \div 0,20) \cdot (0,10 \div 0,20) \cdot (0,70 \div 1,2) \text{ м}$.

Для получения мелкомасштабных образцов льда приповерхностного слоя дрейфующих ледовых образований производилась высадка с вертолетов на дрейфующие льдины. На глубину рабочей части бензопилы (около 0,4 м) выпишивались прямоугольные заготовки, которые затем распиливались на 2-3 слоя (соленость верхнего слоя - около 4,3‰, нижнего слоя - около 5,3‰). Балочки, полученные из слоев, маркировались и доставлялись для испытаний непосредственно на полигоне. При этом пытались обеспечить такие условия хранения и транспортировки, чтобы кристаллографические и механические изменения были минимальны. В частности, исключалось воздействие на заготовки льда солнечного излучения; для уменьшения испарения льда заготовки хранились в пластмассовых мешках; для уменьшения вытекания рассола заготовки размещались таким образом, что полости с рассолом были ориентированы в горизонтальной плоскости.

Часть балочек разрушалась при определении прочности льда на изгиб и одноосное сжатие; в остальных посредине длинной стороны изготавливался ножовкой по дереву надрез шириной около 3 мм; вершина надреза формировалась ножовкой по металлу (ширина менее 1 мм).

Во всех случаях формирование вершины исходного надреза проводилось непосредственно перед испытанием после механической обработки в условиях, максимально близких к условиям испытаний. Длина вершины надреза составляла не менее двух толщин исходного надреза.

Испытания проводились на образцах со следующими направлениями (ориентациями) начальных надрезов (фиг. 2): 1) по нормали к плоскости льдины; 2) фронт надреза совпадает с нормалью к плоскости льдины; 3) в плоскости льдины.

4. Испытания и характер разрушения образцов. Испытания проводились в первой половине марта 1987 г. на открытом воздухе при температуре воздуха от -10°C до -25°C . При всех испытаниях проводилась запись временных разверток нагрузки (с помощью светолучевого осциллографа) для последующего анализа линейности деформирования образца и уровня падения нагрузки после разрушения образца. По этим разверткам также определялось время до разрушения каждого образца; в частности, скорость нагружения в вершине трещины K_{Tc} изменялась от 10 до $100 \text{ кПа} \cdot \text{м}^{-1/2} \cdot \text{с}^{-1}$.

В случае испытания образцов - балочек вначале для определения максимальной нагрузки проводилось пробное испытание с образцом без начального надреза.

Испытания считались недействительными при: выпучивании образца (потере устойчивости формы); разрушении образца вследствие роста двух и более макроответвлений трещины; угловом отклонении трещины от оси исходного надреза более чем на 5° .

После испытаний повторно измерялись толщина образца и длина начального надреза в трех точках, расположенных равномерно вблизи вершины излома как

№	Ориентация	a	W	B	P	K_{Ic}
1	1	0,40	1,30	0,61	10,50	90
2	2	0,15	0,59	0,64	12,03	133
3	3	0,36	0,93	0,61	11,25	136
4	3	0,32	0,93	0,60	10,50	116
5	3	0,30	0,61	0,80	10,87	163
6	2	0,35	0,92	0,49	6,01	89
7	2	0,43	0,88	0,67	10,09	149
8	3	0,18	0,50	0,60	7,38	116
9	3	0,35	0,90	0,83	15,15	137

можно ближе к излому. По этим данным вычислялось среднее значение, которое использовалось при определении K_{Ic} .

Для каждого образца заполнялся протокол испытаний, включающий сведения о льде, образце, условиях испытаний и характере излома. К протоколу прилагалась временная развертка нагрузки.

Во всех испытаниях излом имел хрупкий интеркристаллитный характер. Нагрузка линейно возрастала до момента начала разрушения, после чего резко падала почти до нуля.

Эти факты свидетельствуют о квазикрупном режиме разрушения образцов льда при условиях испытаний, что позволило использовать при их анализе методы линейной механики разрушения.

Для дополнительного контроля за механизмом разрушения образца (в результате роста растягивающих напряжений вблизи вершины надреза до значения прочности льда σ_p на растяжение или роста K_I в вершине надреза до значения трещиностойкости K_{Ic}) обычно проводилось несколько определений K_{Ic} на образцах с различными значениями длины a исходного надреза. Достоверными считались значения трещиностойкости, полученные при равенстве в пределах погрешности эксперимента величин K_{Ic} , определенных на образцах с различной a .

5. Результаты определения K_{Ic} морского льда. 1°. Мелкомасштабные испытания льда припайных и дрейфующих ледяных полей. Для повышения достоверности определяемых значений K_{Ic} было проведено две серии мелкомасштабных испытаний. Блоки-заготовки льда вырезались в разных местах ледяного поля на расстоянии около 150 м друг от друга; соответствующие зависимости K_{Ic} от горизонта для одной ориентации начального надреза (ориентация 2, $T = -2^\circ \text{C}$) приводятся на фиг. 3 (кривые 1 и 2). Видно, что хотя во второй серии испытаний получены более высокие значения K_{Ic} , наблюдаемое различие находится в пределах погрешности эксперимента (около 25%). Поскольку наблюдаемые в двух сериях зависимости K_{Ic} аналогичны, в дальнейшем будем рассматривать данные серий вместе.

Среднее значение K_{Ic} по 56 мелкомасштабным испытаниям при $T = -2^\circ \text{C}$ составляет 75 ± 20 кПа·м^{1/2} и согласуется с данными для K_{Ic} льда Охотского моря: в [6, 7] (80 кПа·м^{1/2}).

Для исследования температурной зависимости K_{Ic} морского льда ледовый блок выдерживался сутки при средней температуре воздуха -20°C , после чего при T около -15°C изготавливалась серия мелкомасштабных образцов и проводились определения K_{Ic} (кривая 3 фиг. 3 для ориентации 2). Полученное по 21 образцу среднее значение 88 ± 20 кПа·м^{1/2} свидетельствует об увеличении трещиностойкости морского льда с понижением температуры, что согласуется с данными [1].

Практически во всех случаях значения K_{Ic} при направлении трещины сверху (ориентация 1 фиг. 2) и поперек кристаллов льда (ориентация 3) незначительно в пределах погрешности эксперимента превышает соответствующие значения K_{Ic} при направлении трещины сбоку вдоль кристаллов льда (ориентация 2). В [6], сделан вывод о сильной зависимости K_{Ic} соленого льда от совокупности двух факторов — ориентации начального надреза и расположения вершины надреза по глубине. Данные настоящего исследования позволяют уточнить, что более сильное влияние на трещиностойкость морского льда оказывает расположение вершины надреза. В частности, оказалось, что при $T = -2^\circ \text{C}$ K_{Ic} на образцах из нижних слоев льдины больше K_{Ic} на образцах из верхнего слоя [6, 7].

Качественно полученную при $T = -2^\circ \text{C}$ зависимость (фиг. 3) легко объяснить, приняв введенное в [6, 8] предположение, что главную роль в процессе разрушения в вершине трещины играет средний размер зерен. Однако, изменение характера рассматриваемой зависимости при понижении температуры (кривая 3 фиг. 3) свидетельствует о большем влиянии дефектов типа пор и соляных включений, размеры которых (в отличие от размера зерен) изменяются при охлаждении блока льда в результате, например, перераспределения соляного раствора по толщине блока. Средний размер этих дефектов можно определить из соотношения $K_{Ic} = \sigma_* (\pi c)^{1/2}$, используя в качестве σ_* экспериментальные значения прочности льда при изгибе. Полученное значение $c = 0,4$ см качественно согласуется с оценкой в [6] и визуальной оценкой размеров дефектов. Заметим, что вопрос о критическом элементе разрушения льда требует дополнительных экспериментальных исследований.

2°. Крупномасштабные испытания льда. Значения K_{Ic} морского льда, полученные в крупномасштабных испытаниях, приведены в таблице. Используются следующие

щие обозначения: a — длина начального надреза, W — длина образца вдоль надреза, B — толщина образца, все геометрические размеры приведены в метрах; P — разрушающая сила в кН, K_{Ic} — трещиностойкость в кПа·м^{3/2}. Опыты 1–5 соответствуют температуре $T = -2^\circ\text{C}$, 6–9 — $T = -15^\circ\text{C}$.

Среднее значение трещиностойкости при $T = -2^\circ\text{C}$ (120 ± 35 кПа·м^{3/2}) совпадает со средним значением, полученным после отбрасывания наибольшего (опыт 5) и наименьшего (опыт 1) значений K_{Ic} и не выходит за пределы изменения K_{Ic} , представленные в литературе (50 – 150 кПа·м^{3/2}).

Наблюдаемая зависимость K_{Ic} от ориентации начального надреза находится в пределах погрешности эксперимента, не подтверждается данными мелкомасштабных опытов и предположительно является результатом сбоя в опыте 4. Для подтверждения (или опровержения) этого вывода необходимо проведение серии статистически достоверных определений K_{Ic} .

Среднее значение K_{Ic} для образцов размером около $1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0$ м³ приблизительно на 30% больше соответствующего значения для мелкомасштабных образцов ($0,2 \cdot 0,2 \cdot 0,8$ м³). Подобная зависимость противоположна по характеру экспериментальной зависимости от масштаба образцов прочностных характеристик льда и намного слабее последней. Сравнительно малое изменение K_{Ic} , согласно [4], можно объяснить влиянием противоположно направленных эффектов при увеличении масштаба разрушения. При этом, с одной стороны, уменьшается эффективная прочность льда, а с другой — возрастают размеры характерных образований (кристаллов льда, слоистости, дефектов и неоднородностей), которые могут определять условия разрушений в вершине трещины. Полученная зависимость K_{Ic} от масштаба образца согласуется с качественными оценками и экспериментальными данными, приведенными соответственно в [1, 7].

Опыты 6–9 (таблица) проводились с крупномасштабными образцами, которые в течение 24 часов охлаждались при средней температуре воздуха -20°C ; испытания проводились при -15°C . Полученное среднее значение 123 ± 25 кПа·м^{3/2} свидетельствует о слабом (в отличие от мелкомасштабных испытаний) температурном изменении трещиностойкости крупномасштабных образцов морского льда и превышает среднее значение K_{Ic} по данным мелкомасштабных испытаний как при $T = -2^\circ\text{C}$ (75 ± 20 кПа·м^{3/2}), так и при $T = -15^\circ\text{C}$ (88 ± 20 кПа·м^{3/2}). В силу этого маловероятным представляется возможность систематического завышения K_{Ic} крупномасштабных образцов вследствие более медленного охлаждения этих образцов на воздухе за время от вырезки блока льда до проведения испытания. Об этом также свидетельствует наблюдаемое (в интервале температур испытаний) неумножение трещиностойкости морского льда с понижением температуры. В силу этого различие температур крупно- и мелкомасштабных образцов не могло приводить к наблюдаемому масштабному эффекту.

Следует отметить, что данные таблицы в пределах погрешности эксперимента согласуются с результатами определения K_{Ic} припайного льда при четырехточечном изгибе крупномасштабных балок с надрезом (будет опубликовано). Это подтверждает вывод о приблизительно совпадении результатов определения K_{Ic} при изгибе балок с надрезом и внецентренном растяжении компактных образцов с надрезом [1, 7].

При определении K_{Ic} льда необходимо вследствие, например, способности льда к «самозалечиванию» дефектов учитывать влияние конечной ширины имитирующего трещину начального надреза на вычисляемое значение K_{Ic} . Длина a_0 остроконечной трещины, эквивалентной (по параметрам напряженного состояния) надрезу длиной a с закруглением ρ в вершине равна $a_0 = a - 0,07\rho$. В случае полуплоскости с отверстием в виде удлиненного полуэллипса можно получить [9] $a_0 = a + 0,18\rho$. Использование метода конечных элементов в случае образца конечных размеров приводит к несколько иному соотношению [10] $a_0 = a + \rho$. При $a = 0,32$ м, $\rho = 0,005$ м (ширина полотна двуручной пилы 0,040 м) a_0 по последней формуле равняется 0,325. Изменение K_{Ic} для, например, $W = 0,93$ м (образец 4 из таблицы) не превышает 1%, т. е. находится в пределах погрешности эксперимента. Поэтому при используемых конфигурациях крупномасштабных образцов надрез шириной $\sim 0,01$ м можно (только в геометрическом смысле!) считать остроконечной трещиной.

Однако, проведенное рассмотрение не исключает возможности изменения эффективных значений K_{Ic} с изменением остроты начального надреза в результате упруго-вязкопластических процессов в зоне непосредственной организации разрушения. Определение размеров этой зоны для морского льда, как упоминалось выше, требует проведения дополнительных методических исследований.

Авторы благодарят Р. В. Гольдштейна, Б. Д. Носкова и Н. М. Осипенко за внимание к работе и полезные обсуждения, А. Б. Белова, А. А. Илиади и А. Н. Македонского за участие в опытах, а также Т. П. Бурдюг за помощь в обработке и обобщении результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. Механика разрушения и некоторые вопросы разрушения льда // В сб.: Механика и физика льда. М.: Наука, 1983. С. 65–94.
2. Palmer A. C., Goodman D. J., Ashby M. F., Evans A. G. at al. Fracture and its role in determining ice forces of offshore structures // Annals of Glaciology. 1983. No. 4. P. 216–221.
3. Hamza H. Application of fracture mechanics techniques to ice-structure interaction

- problems // In: IAHR Symposium on Ice. 1986. Proceedings of the ..., Iowa City, 1986. V. 1. P. 329-347.
4. Черепанов Н. В. Классификация льдов природных водоемов. В кн.: Строение и физико-механические свойства льда // Гр. Арктического и Антарктического к.-м. ин-та. 1976. Вып. 331. С. 77-99.
 5. Браун У., Струлли Дж. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. М.: Мир, 1972. 246 с.
 6. Urabe N., Iwasaki T., Yoshitake A. Fracture toughness of sea ice // Cold Region Science and Technology. 1980. V. 3. No. 1. P. 29-37.
 7. Urabe N., Yoshitake A. Strain rate dependent fracture toughness (K_{Ic}) of pure ice and sea ice // In: IAHR International Symposium on Ice. 1981. Proceedings of the ..., Quebec, 1981. P. 410-420.
 8. Timco G. W., Frederking R. M. W. Flexural strength and fracture toughness of sea ice // Cold Region Science and Technology. 1982. V. 6. No. 1. P. 35-41.
 9. Bowie O. L., Neal D. M. The effective crack length of an edge slot in a semi-infinite sheet under tension // Int. J. of Fract. Mech. 1967. V. 3. No. 2. P. 111-119.
 10. Ottens H. H., Lof C. J. Compliances of a tapered DCB specimen configurations by a finite element method // Engng. Fract. Mech., 1974. V. 6. No. 3. P. 573-585.

Москва

Поступила в редакцию
2.VIII.1988