

Р.В. Гольдштейн, В.П. Епифанов

Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Москва

К ИЗМЕРЕНИЮ АДГЕЗИИ ЛЬДА К ДРУГИМ МАТЕРИАЛАМ

Исследуется адгезионная прочность ледяной корки, намороженной на поверхность элемента конструкций, в зависимости от условий на границе контакта, включая соотношение сдвиговых и нормальных напряжений, а также влияние бокового стеснения, геометрии поверхности и антиадгезионного покрытия. Соответственно задаче исследования предложены методики и устройства для измерения адгезии льда к другим материалам, в частности на цилиндрических образцах, в условиях комбинированного сдвига (вдоль оси образца и в окружном направлении). Показано, что наличие даже малого сдвига в окружном направлении резко снижает адгезионное сопротивление по отношению к осевому сдвигу. Исследована адгезия льда к реальному конструкционному элементу токонесущего кабеля с антиадгезионным покрытием и без покрытия. Сделаны выводы о практическом применении полученных результатов.

Ключевые слова: адгезия льда к твердым телам; методы измерения и устройства; нормальные и сдвиговые напряжения; адгезионная прочность; боковое стеснение, ледяная корка.

Введение

Функционирование машин, конструкций и сооружений при низких температурах нередко сопровождается их обледенением, которое может приводить к возникновению аварийных и катастрофических ситуаций. Обрывы линий электропередач, недопустимые подвижки опор мостов через реки и ледостойких платформ, потеря хода судами и ледоколами, аварийные ситуации и нерасчетные режимы на аппаратах аэрокосмической техники часто являются следствием намерзания льда. По мере освоения районов с экстремальным климатом возрастает актуальность проблем борьбы с обледенением. Среди разнообразных способов снижения адгезии льда к различным поверхностям элементов конструкций весьма эффективными во многих случаях оказываются ледофобные покрытия. Помимо снижения адгезии покрытия могут замедлить процесс намораживания льда и уменьшить его количество.

Важные аспекты проблемы борьбы с обледенением – оценка адгезионной прочности границ лед–материал иной природы, исследование механизмов адгезии льда, разработка технических решений по ее снижению, а также оценка эффективности этих решений.

Ввиду важности указанной проблемы довольно большое внимание уделялось в последние десятилетия экспериментальным исследованиям адгезии льда к поверхностям различных, главным образом конструкционных, материалов [1–5]. Предложен ряд схем проведения испытаний по измерению адгезии льда. В большинстве случаев адгезию льда определяют в испытаниях, в которых осуществляется сдвиг по границе лед–конструкционный материал посредством нагружения либо самого льда, либо образца конструкционного материала, на котором предварительно наморожен лед (см., например [2]). В отдельных случаях измерение адгезии проводилось в условиях кручения образца относительно намороженного льда [1]. В частности, в работе [2] исследована сравнительная эффективность четырех различных покрытий для снижения адгезии льда.

Учитывая, что в большинстве материалов и соединений условия прочности и адгезионной прочности при комбинированных нагрузках отличаются от условий, соответствующих какому-то одному виду нагружения, представляется важным разработка методики и ее аппаратной реализации для измерения адгезии льда к конструкционным материалам, в частности в условиях комбинированного сдвига. Такая методика предложена в настоящей работе.

Необходимость в подобных испытаниях возникает, например, при изучении адгезии льда к токонесущим кабелям воздушных линий электропередач. Кабели имеют сложную криволинейную поверхность, образованную винтовой укладкой отдельных проводов кабеля. В результате при действии сдвиговой нагрузки вдоль оси кабеля возникает и крутящий момент, т.е. на поверхности лед–кабель действует сложный сдвиг (комбинация продольного и поперечного сдвига).

1. Методики экспериментальных исследований и устройства для их реализации

Объект исследований. Исследуется адгезионная прочность ледяной корки, намороженной на поверхность элемента конструкций, в зависимости от условий на границе контакта, включая соотношение сдвиговых и нормальных напряжений, а также влияние бокового стеснения, геометрии поверхности и антиадгезионного покрытия. Соответственно задаче исследования разработаны методы определения адгезионной прочности льда к металлическим поверхностям конструкцион-

ных элементов и устройства, их реализующие. В качестве основного объекта исследований выбран кабель воздушных токопроводящих сетей. На рис. 1 показан элемент многопроволочного кабеля диаметром 21,4 мм. Слева на рисунке – элемент кабеля без антиадгезионного покрытия, справа – с покрытием. Кабель представляет собой сталеалюминиевый многопроволочный стальной сердечник из семи стальных проводов (в центре сечения), обвитый двумя слоями (по 10 и 16 жил) алюминиевой проволоки. В методических целях использовали образцы и иных форм: плоские пластины (для анализа влияния покрытия на процесс намерзания и оценки прочности на отрыв (диски)), цилиндрические образцы в виде прямого кругового цилиндра (для оценки влияния дополнительного к осевому нагружению сдвигом в окружном направлении).

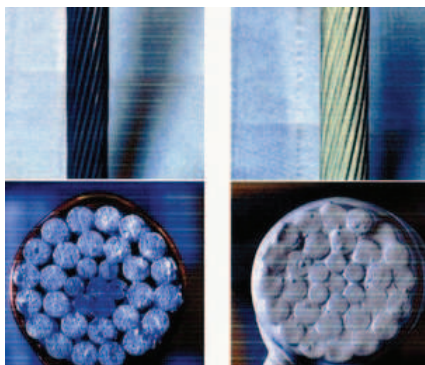


Рис. 1. Элемент многопроволочного кабеля диаметром 21,4 мм

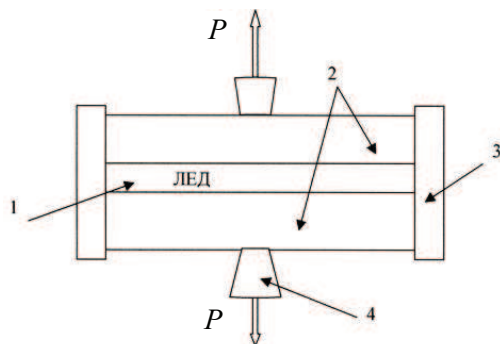


Рис. 2. Схема устройства для испытания плоских образцов: 1 – лед, 2 – диски, 3 – направляющая втулка, она же термостатирующая оболочка, 4 – захваты. P – сила растяжения

Устройство для испытания плоских образцов. Для определения адгезии льда к плоским пластинкам разработано приспособление (рис. 2). Между направляющей втулкой и дисками помещено тонкое фторопластовое кольцо (на рисунке не показано). Приспособление состоит из двух соосно расположенных алюминиевых дисков и примороженной между ними пластины льда. Толщина ледяной пластины 2,5 мм. Диаметр рабочей поверхности дисков 48 мм. Отношение диаметра дисков к толщине образца около 20, что соответствует созданию однородного поля напряжений внутри ледяного образца при условии его гомогенности.

Устройство для испытаний гладких цилиндрических образцов и образцов из токонесущего кабеля на сдвиг в условиях стеснения. Схема устройства для определения адгезии льда, примороженного к образцу, показана на рис. 3. Боковое стеснение льда достигалось замораживанием воды в зазоре между верхней направляющей втулкой 6 и цилиндрическим стержнем 8, причем толщина свода ледяной «корки» составляла 2,5 мм.

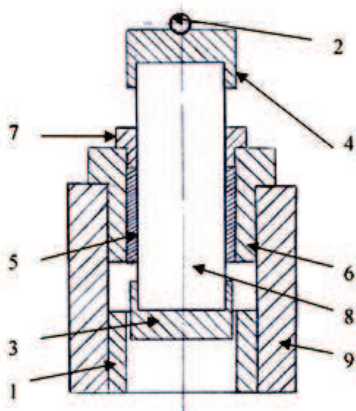


Рис. 3. Схема устройства для определения адгезии льда, примороженного к образцу: 1, 6 – нижняя и верхняя направляющие втулки, 2 – шаровая опора, 3, 4 – захваты, 5 – лед, 7 – подшипник скольжения, 8 – стальной цилиндрический стержень или элемент кабеля, 9 – опорное кольцо

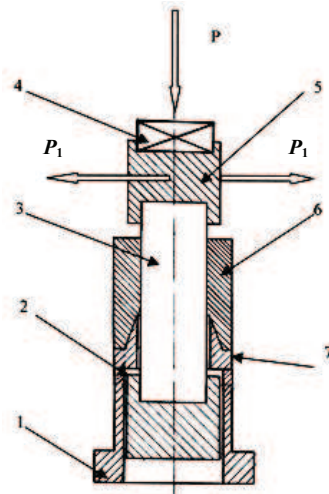


Рис. 4. Схема устройства для испытаний в условиях сложного сдвига: 1 – опорная втулка, 2, 5 – захваты, 3 – стальной цилиндрический стержень или элемент кабеля, 4 – упорный шарикоподшипник, 6 – лед, 7 – коническая втулка, P – сила, P_1P_1 – пара сил

Устройство для испытаний в условиях сложного сдвига. Схема устройства показана на рис. 4. Вращательное движение ледяному кольцу передавалось через стержень, к которому прикладывали момент M , создаваемый парой сил P_1 в плоскости, ортогональной к оси стержня. Таким образом, на границе контакта лед–стержень действовали сдвиговые напряжения, создаваемые внешней осевой силой P и крутящим моментом пары сил M . Устройство позволяет экспериментально проверить влияние дополнительных сдвиговых напряжений на адгезионную прочность намороженного льда, т.е. реализовать условия сложного сдвига в ледяной корке, намороженной на цилиндрический стержень.

Измерительная акустическая линия. Для измерения характеристик акустической эмиссии, возникающей при адгезионном разрушении контакта лед–металл, использовали измерительную акустическую линию (от 50 Гц до 20 кГц). Измерительная линия характеристик акустической эмиссии включает приемник сигналов акустической эмиссии, предусилитель (типа USB SOUND PC CE), акустическую плату в ноутбуке и анализатор спектра. Приемник сигналов состоит из пьезодатчика (тип KB10 или KD91), акустического волновода, в качестве которого использован стальной стержень (см., например, рис. 4 (3)), и высокочастотного кабеля, по которому сигнал поступает на звуковую плату.

Методики экспериментальных исследований. В большинстве случаев обледенение проводов происходит в воздушной атмосфере, содержащей капли воды, при температурах от 0 до -25 °С. Вода при попадании на поверхность охлажденного кабеля кристаллизуется, образуя ледяную корку. Процесс формирования ледяной корки и структура образующегося льда, вероятно, зависят от особенностей условий на границе контакта. Поэтому, чтобы понять влияние антиадгезионного покрытия на процесс замораживания воды, был выполнен следующий эксперимент.

Естественный процесс обледенения токопроводящего кабеля имитировали при температуре $-(13\pm 1)$ °С. Для этого в криостате устанавливали алюминиевые пластинки габаритами 90 мм×90 мм×1,5 мм (плакированные чистым алюминием), без покрытия и с антиадгезионным покрытием (см. рис. 2), причем пластинки были изолированы от металлического корпуса с помощью теплоизолирующих прокладок. На пластинки помещали капли воды одинаковой массы с помощью пипетки и измеряли время их замораживания. Процесс фазового перехода регистрировали (1 кадр/с) с помощью кинокамеры с целью выявления визуальных различий для рассматриваемых случаев (с покрытием и без антиадгезионного покрытия).

Далее с помощью устройства для испытания плоских образцов (см. рис. 2) выполнен ряд экспериментов, включающих определение силы отрыва для следующих условий:

- 1) образец льда приморожен между обезжиренными поверхностями алюминиевых дисков;
- 2) на поверхность одного диска нанесено антиадгезионное покрытие (промышленная двухкомпонентная эпоксидная грунтовочная

краска для алюминиевых поверхностей ИНЕРТА ПРАЙМЕР 5 (производитель концерн TEKNOS)).

Испытания проводили с помощью машины типа FM-1000 при скорости перемещения грузовых площадок около 0,064 см/с в интервале температур от -7 до -21 °С. Основные измеряемые величины – максимальная растягивающая сила и изменение силы во времени, кроме того, изучалась поверхность отрыва. Эксперименты этой серии имели целью в простом случае плоской поверхности контакта установить количественное различие адгезионной прочности льда для выбранных условий нагружения и одинаковой структуры природного льда.

Рабочая гипотеза следующей серии экспериментов состоит в том, что в реальных условиях разрушение на границе лед–кабель происходит сдвигом, причем разрушение ледяной корки, замороженной на тонконесущий кабель, при сдвиге происходит с ее вращением. Угол поворота задан навитыми проводами верхнего слоя электропроводящего кабеля. Соответственно адгезионную прочность ледяной корки следует испытывать на сдвиг, обращая внимание на малоисследованные ранее факторы, например боковое стеснение, соотношение сдвиговых и нормальных напряжений, дополнительные сдвиговые напряжения в условиях сложного сдвига, которые, вероятно, должны оказать существенное влияние на адгезионную прочность соединения льда с проводом.

Для испытаний адгезионной прочности ледяной корки, замороженной на элемент токопроводящего кабеля с антиадгезионным покрытием и без покрытия, использовали устройство для испытаний образцов на сдвиг в условиях стеснения (см. рис. 3) и аналогичное устройству, показанному на рис. 4 (вместо конической втулки 7 использовали плоскую шайбу, замороженную ко льду – 6). Устройство помещалось между грузовыми площадками испытательной машины типа FM-1000. В этом случае измеряли осевые усилия как функцию времени при скорости смещения 0,6 мм/мин.

Момент разрушения адгезионного контакта определен как точка достижения предельного угла поворота, которое происходит при максимальной силе сдвига. После чего реализуется скольжение ледяной корки по алюминиевым проводам кабеля. Однако эта граница между статикой и динамикой сдвига бывает выражена недостаточно явно/резко, поэтому был применен метод акустической эмиссии [6]. С этой целью регистрировали сигналы акустической эмиссии в диапазоне частот от 50 Гц до 20 кГц. Максимальная амплитуда сигнала сви-

детельствует о хрупком разрушении адгезионного контакта на границе лед–металл. Метод деформационной акустической эмиссии позволяет четко отслеживать истинный момент, при котором происходит разрушение адгезионного контакта намерзшего на провод льда и, следовательно, достигается критический угол поворота, измерение которого осуществляли оптическим методом (по смещению лазерного луча, отраженного от зеркала, установленного на образце).

2. Процедура изготовления образцов

При определении адгезии льда к плоским пластинкам использован природный пресноводный лед, который вырезали из среднего прозрачного слоя ледяного покрова пресного водоема и доставляли в лабораторию. Лед имел структуру типа А4 по классификации Н.В. Черепанова [7]. Структуру определяли по микрошлифам на столике Е.С. Федорова. Плоские пластинки льда такой структуры вводили в контакт с алюминиевыми дискам при температуре около 0 °С и охлаждали до температуры испытаний со скоростью 3 °С/час.

При исследовании влияния бокового стеснения лед намораживали на элемент токонесущего кабеля с антиадгезионным покрытием и без него. Для намораживания использовали съемный стакан из фторопласта, послоную заливку дистиллированной воды в зазор между верхней направляющей втулкой и цилиндрическим стержнем выполняли со скоростью 2 мл через каждые 20 минут. Необходимо отметить, что процедуры изготовления и термостатирования образцов из-за существенного различия в термических коэффициентах расширения льда и металла критична к градиенту температуры, поэтому должны выполняться в условиях, близких к равновесным. Опытным путем установлено, что для предварительного термостатирования образца при температуре испытания достаточно 14–16 часов, при минимально возможном перепаде температуры (менее 1 °С/ч). Образцы, предназначенные для испытаний без бокового стеснения, имели корку льда с толщиной свода 20 мм.

При приготовлении образцов, предназначенных для испытания на сложный сдвиг, на круглый гладкий стальной стержень диаметром 20 мм намораживали слой льда толщиной свода 7 мм. В результате получали кольцо льда с внешним диаметром 34 мм. Нижняя поверхность ледяного кольца изначально оказывалась примороженной к конической втулке 7 (см. рис. 4), которая снизу опиралась на втулку 1 и оставалась неподвижной в процессе испытаний.

3. Результаты и анализ экспериментов

Оценка влияния покрытия на характеристики замораживания. В экспериментах по замораживанию одинаковых по размеру капель воды на поверхности алюминиевых пластинок, без покрытия и с антиадгезионным покрытием, обнаружена разная продолжительность фазового перехода. Так, при замораживании на пластине без покрытия при температуре $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ время замораживания составило 7–10 с, а на пластинке с покрытием 42–50 с. Из этого следует, что применение полимерного адгезива существенно (в пять раз) увеличивает время, необходимое для обледенения. Не вызывает сомнений, что этот положительный в данном случае эффект связан с низкой тепло- и температуропроводностью покрытия и их влиянием на механизм фазового перехода. Следует ожидать, что процесс обледенения токопроводящих кабелей без покрытия также будет более интенсивным, чем с покрытием.

Нельзя не отметить, что при быстром замерзании воды образуется матовый лед (из-за микровключений пузырьков воздуха), а при медленном замерзании воды – прозрачный лед. Этот важный для практики термодинамический аспект обледенения был учтен в методике приготовления образцов (см. п. 2).

Определение силы отрыва. При примораживании ледяной пластинки к обезжиренным поверхностям дисков (лед–алюминий) наблюдали смешанный тип отрыва (рис. 5). Эффективное значение напряжений отрыва рассчитывали из соотношения $\sigma_k = P / S_{\text{эфф}}$, где $S_{\text{эфф}} = \pi R_0^2$ и R_0 – радиус диска. Для среднего значения силы $P = 890\text{ Н}$ (при температуре $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$) получено эффективное значение $\sigma_k = 0,49\text{ МПа}$. Это значение находится между когезионной и адгезионной прочностью льда [8, 9].



Рис. 5. Смешанный тип отрыва

В серии экспериментов с плоскими образцами, когда на поверхность одного из дисков нанесено антиадгезионное покрытие, устойчиво воспроизводится чисто адгезионный тип отрыва при максимальном значении силы 200 Н, что соответствует эффективному значению адгезии лед–покрытие около 0,108 МПа. Однако, как показали дальнейшие эксперименты, полученное значение адгезионной прочности существенно зависит от температурно-временного режима подготовки образцов к испытаниям. Так, при примораживании ледяной пластины к охлажденным до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ дискам и медленном охлаждении до $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ с последующим 2-часовым термостированием среднее значение адгезионной прочности равно $(0,108 \pm 0,008)$ МПа, а в случае отжига и 12-часового термостатирования $(0,22 \pm 0,01)$ МПа. Такое же значение величины адгезионной прочности $(0,1 \div 0,2)$ МПа получено другими исследователями для системы лед–пластмассы [2, 3]. Вероятно, температурно-временной режим подготовки образцов влияет на процесс образования «пятен контакта». Это может быть связано, например, с релаксацией напряжений, вызванных различием температурных коэффициентов расширения льда ($\alpha_{273} = 53 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$) и стали ($\alpha_{273} = 10,86 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$) [10].

Таким образом, помимо известного факта влияния режима заморозки и термостатирования образцов на адгезию к металлическим поверхностям выявлено также, что нанесение покрытия в разы замедляет скорость замораживания воды. Подтвержден факт меньшей прочности прилипания льда к плоским алюминиевым образцам с антиадгезионным покрытием, чем без покрытия. Для условий проведенных экспериментов ($-21\text{ }^{\circ}\text{C}$) адгезионная прочность уменьшается почти в пять раз (от 0,48 до 0,1 МПа). Полученные значения сопоставимы со значениями, опубликованными другими исследователями. Так, если на чистые плоские стальные диски нанесено гидрофобное покрытие, то средняя сила ледяного примерзания ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$) уменьшается в 4,2 раза [11]. Это подтверждает перспективность применения антиадгезионных покрытий для предотвращения обледенения токонесущих кабелей воздушных линий электропередач (пассивный способ). Далее рассмотрим, как влияют нормальные и сдвиговые напряжения на адгезионную прочность льда к конструкционному элементу реального токонесущего кабеля (активный способ). Для определения количественных характеристик этих зависимостей были проведены специальные исследования.

Влияние бокового стеснения. На рис. 6 показаны деформационные зависимости при испытании льда на сдвиг при $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ для пресноводного льда, намороженного на элемент токонесущего кабеля с антиадгезионным покрытием (кривая 1) и без покрытия (кривые 2, 3). Кривые 1 и 2 (смещены одна относительно другой по шкале времени) получены в условиях бокового стеснения (см. рис. 3), а кривая 3 – без бокового стеснения (см. рис. 4) для корки льда с толщиной свода 20 мм.

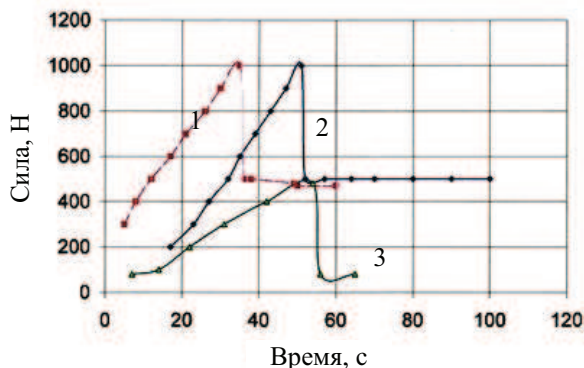


Рис. 6. Деформационные зависимости при испытании льда на сдвиг

Из рис. 6 следует, что, во-первых, кривые 1 и 2 одинаковы по своим параметрам. Так, максимальное напряжение сдвига в обоих случаях равно $\sim 1000\text{ Н}$ и углы наклона восходящих ветвей кривых в пределах точности эксперимента одинаковы. Во-вторых, амплитуда кривой 3 почти в два раза меньше (480 Н), причем восходящая ветвь имеет меньший угол наклона. Различие кривых 2 и 3 однозначно подтверждает, что наблюдаемый эффект увеличения прочности льда обусловлен именно боковым стеснением, а одинаковость кривых 1 и 2 свидетельствует о том, что эффект антиадгезионного покрытия перестает проявляться в условиях бокового стеснения. Эти экспериментальные факты, по-видимому, представляют интерес для дальнейшего изучения механизма адгезии в части, касающейся влияния нормальных напряжений на трение на границе контакта.

По экспериментальным данным (кривые 2 и 3 на рис. 6), а также с учетом геометрии ледяной корки, намороженной на провод без покрытия, можно рассчитать сдвиговые напряжения на контакте с площадью поверхности $S = 2\pi R_1 h$, где R_1 – радиус токопроводящего ка-

беля и h – высота ледяной корки. Подставляем в известное соотношение $\tau_s = P / 2\pi R_1 h$, где $P = 480$ Н – экспериментально измеренная сила сдвига, значения соответствующих величин и находим значения сдвиговых напряжений на границе контакта лед–кабель: $\tau_s = P / 2\pi R_1 h = (480 / 2\pi \cdot 0,0107 \cdot 0,015) = (0,48 \pm 0,02)$ МПа для кривой 3 и для кривой 2 $\tau_s = (1,0 \pm 0,05)$ МПа. Таким образом, адгезионная прочность при боковом стеснении при испытании на сдвиг при прочих равных условиях эксперимента возрастает, по крайней мере, в два раза. Из этого следует, что при разработке метода испытания адгезионной прочности льда к твердым телам необходимо учитывать влияние нормальных напряжений на боковой поверхности ледяной корки, а также нормальные напряжения, возникающие при температурной усадке.

Влияние антиадгезионного покрытия. Для уточнения количественных характеристик выполнены исследования влияния антиадгезионного покрытия на адгезионную прочность для образцов с покрытием и без покрытия при испытании на сдвиг без стеснения. Внимание было сосредоточено на двух условиях. Во-первых, момент разрушения адгезионного контакта определяли по сигналу акустической эмиссии, и, во-вторых, деформационную кривую записывали в *координатах сила сдвига – угол поворота* ледяной корки относительно кабеля. Естественно, что при прочих равных условиях толщина свода ледяной корки и ее другие размеры оставались одинаковыми. Как уже отмечалось, сдвиг ледяной корки (кольца) на элементе токонесущего кабеля при приложении осевой силы P (см. рис. 1 и 4) происходит с вращением, которое реализуется при скольжении ледяной корки по кабелю. Момент разрушения адгезионного контакта определяли с помощью метода деформационной акустической эмиссии [6]. Экспериментальные зависимости силы сдвига от угла поворота элемента токонесущего кабеля с покрытием (кривая 1) и без покрытия (кривая 2) при толщине свода ледяной корки 7 мм и температуре -21 °С показаны на рис. 7. По виду кривых можно предположить, что начальные участки их соответствуют упругим деформациям льда, а последующий участок, вплоть до некоторого предельного угла поворота ($\sim 1,7^\circ$) – упрочнению адгезионного контакта, после чего происходит полное разрушение контактных пятен на границе лед–подложка.

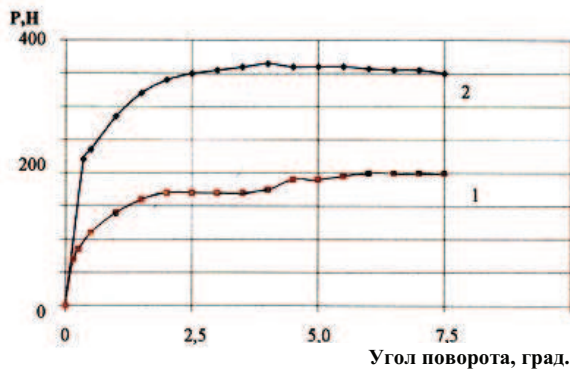


Рис. 7. Зависимости силы сдвига от угла поворота элемента токонесущего кабеля

Из положения кривых 1 и 2 на рис. 7 следует, что при отсутствии бокового стеснения отношение адгезионной прочности на сдвиг для образцов без покрытия и с покрытием равно двум. Сопоставляя полученные значения адгезионной прочности с опубликованными значениями, необходимо отметить, что близкое отношение ($1,8 \div 2,1$) получено, например, в работе [2], для системы сталь–лед при различных гидрофобных покрытиях. По-видимому, затраты энергии на разрушение контакта лед–подложка определяются не только видом напряженного состояния, формой граничной поверхности, а также соотношением нормальных и сдвиговых напряжений, причем большему значению этого отношения соответствуют большие затраты энергии.

Для того чтобы оценить относительное влияние сдвига в осевом и окружном направлениях на адгезию льда, были выполнены испытания цилиндрических образцов с ледяной коркой при сложном сдвиге. Как уже отмечалось, в этой серии экспериментов ледяную корку формировали на гладком цилиндрическом стержне (см. рис. 4). Сложный сдвиг на адгезионном контакте достигался приложением осевой силы P и момента $M = 0,25$ Нм, создаваемого под действием пары сил P_1P_1 в ортогональной к осевой силе плоскости. Результаты измерений приведены на рис. 8. Деформационная кривая 1 получена при испытаниях на «чистый» сдвиг при $M = 0$, а кривая 2 – на сложный сдвиг ($M = 0,25$ Нм); остальные условия те же самые (температура -21 °С, скорость перемещения грузовых площадок $1,7 \cdot 10^{-3}$ см/с).

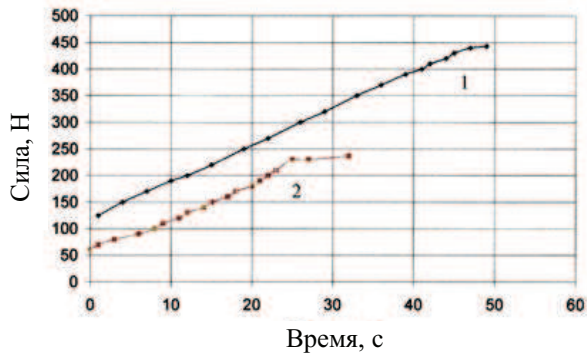


Рис. 8. Деформационные кривые при сложном сдвиге цилиндрических образцов

Предельные напряжения сдвига оценим по максимальным напряжениям силы сдвига (кривые 1 и 2) и геометрическим параметрам ледяной корки и стержня $\tau_{S_1} = P / 2\pi R_1 h = 440 \text{ Н} / 2\pi \cdot 0,01\text{м} \cdot 0,015\text{м} = 0,47 \text{ МПа}$, $\tau_{S_2} = 0,25 \text{ МПа}$. Из этого следует, что придание вращательного движения ледяной корке, образовавшейся в результате намерзания на электрический кабель, в два раза снижает ее адгезионное сопротивление сдвигу вдоль оси образца.

Заключение

Разработан метод для исследования адгезии льда к охлажденной поверхности твердого тела в условиях комбинированного нагружения с возможностью независимого изменения нормальной и сдвиговых компонентов напряжения.

С помощью разработанного метода выполнены серии испытаний образцов с антиадгезионным покрытием и без него, из результатов которых следует, что применение покрытия (известный пассивный метод защиты от обледенения) уменьшает адгезионную прочность ледяной корки к металлу в два раза. В дополнение к пассивному методу защиты от обледенения рассмотрена возможность использования слабых сдвиговых напряжений, например придание корке вращательного движения (активный метод защиты от обледенения), что дополнительно снижает адгезионную прочность, по крайней мере, в два раза.

Полученные результаты могут быть применены при решении прикладных задач по удалению намерзшего льда с воздушных электрических кабелей.

Библиографический список

1. Blackburn C., Laforte C., Laforte J.L. Apparatus for measuring the adhesion force of a thin ice sheet on a substrate // For presentation at the Ninth International Workshop of Atmospheric Icing of Structures. – Chester, UK, 2000, June 5–8. – P. 1–5.
2. Lyyra M., Jantti M., Launiainen J. Adhesive strength of spray accreted ice on materials and coatings // International Offshore and Navigation Conference and Exhibition. – ESPOO. – 1986. – P. 484–496.
3. Matsumoto K., Kobayashi T. Fundamental study on adhesion of ice to cooling solid surface // International Journal of Refrigeration. – 2007. – Vol. 30 – P. 851–860.
4. Raraty L.E., Tabor D. The adhesion and strength properties of ice // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. – 1958. – Vol. 245. – No. 1241 – P. 184–201.
5. Williams G.P. Adhesion of frazil ice to underwater structures // Reprinted from Proceedings Twenty-Fourth Annual Eastern Snow Conference. – 1967, February. – P. 82.
6. Епифанов В.П., Глазовский А.Ф. Акустические характеристики как индикатор особенностей движения льда в ледниках // Криосфера Земли. – 2010. – Т. XIV, № 4 – С. 42–55.
7. Черепанов Н.В. Систематизация кристаллических структур льдов в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. – Л., 1972. – Вып. 40 – С. 78–83.
8. Кобеко П.П. Аморфные вещества. – М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1952. – 432 с.
9. Schulson E.M., Duval P. Creep and fracture of ice. – Cambridge University Press. – 2009. – 401 p.
10. Физические величины: справ. / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
11. Relationships between Water Wettability and Ice Adhesion: www.acsaml.org / J. Adam, J. Meuler, D. Smith, K. Kripa Varanasi, Joseph M. Mabry, Gareth H. McKinley and Robert E. Cohen. – ACS Applied materials & interfaces. American Chemical Society, 2010. – P. A–K.

Получено 15.05.2011