

СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ОБРАЗЦОВ В КОНТАКТЕ СО ЛЬДОМ И СНЕГОМ

Шадрин Н.В.^{1,2}, Попов С.Н.¹, Антоев К.П.¹

¹ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия

²ФГАОУ ВПО Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
Якутск, Россия

Nshadrinov@gmail.com

В настоящее время для доставки грузов в условиях Арктики по автозимникам широкое применение имеют грузовые сани со стальной или деревянной рамой с металлическими лыжными полозьями. Их недостатками являются большая масса, необходимость применения специальных морозостойких сталей, высокий коэффициент трения по льду, низкая износостойкость полозьев, а также возможность их примерзания к грунту при стоянках. Одним из перспективных решений данной проблемы является разработка санных прицепов выполненных полностью из полимерных материалов. При разработке санных прицепов необходимо учесть множество факторов влияющих на эксплуатационные свойства саней. Начиная с физико-механических свойств материалов применяемых в качестве полозьев и несущей рамы, заканчивая учетом эксплуатационных условий саней. В работе приведены результаты низкотемпературных стендовых испытаний полимерных материалов на трение по снегу и льду в условиях максимально приближенных к эксплуатационным, а также приведены результаты исследования адгезии примерзания полимерных материалов в естественно-низких климатических условиях и климатической камере.

Целью данной работы являлось определение наиболее перспективных полимерных композитов для применения в качестве опор скольжения (полозьев).

Как известно, трение – одна из главных проблем, встречающихся в любых системах имеющихдвигающиеся части. Несмотря на то, что количественные исследования по трению берут корни со времен Леонардо да Винчи, только 150 лет назад, трение по льду стало объектом научных исследований [1]. Лед – весьма сложный материал. Теоретическое объяснение того, что коэффициент трения мал, пока остается противоречивым. Традиционное объяснение Боудена и Хьюза [2, 3], состоит в том, что при трении о поверхность льда выделяется тепло, в результате чего образуется тонкая пленка талой воды. В принципе при скольжении по льду выделяется достаточно энергии для образования тонкой пленки талой воды. Даже при относительно низкой температуре водяные пленки наблюдались многими исследователями. Однако остается еще много исследователей, которые не убеждены в том, что в наличии тонких пленок талых вод заключается основная причина. Так, Хуциока [4, 5] обнаружил, что талые воды увеличивают трение, по-видимому, вследствие вязкого сопротивления. В работах приводятся аргументы в пользу того, что малое трение льда и снега обусловлено также некоторыми уникальными характеристиками поверхности льда, а не только наличием пленки талой воды. Авторы рассматривают лед как твердый смазочный материал, аналогичный, например, графиту, который имеет относительно низкий коэффициент трения вследствие того, что плоскости соседних кристаллов могут легко скользить одна по другой и менять ориентировку. Поверхностные пленки окислов иногда играют роль твердой смазки, и их наличие не обязательно вызывается трением. В работе ученых Миннесотского университета, являющейся, вероятно, наиболее полным исследованием из всех, которые были посвящены трению льда и снега, шероховатость ледяной поверхности была смоделирована как эластично-пластичные микроскопические выступы. На основании своих теоретических и экспериментальных работ они сделали

вывод о том, что шероховатость льда обуславливает чрезвычайно низкие значения напряжения сдвига. Было также выдвинуто предположение, что ледяная поверхность обладает внутренней «жидкостноподобной» структурой независимо от таяния, возникающего вследствие трения, которое можно рассматривать как отдельный, самостоятельный эффект. Они приводят предположение Уэйла [6] о том, что толщина «жидкостно-подобного» поверхностного слоя может составлять несколько сотен молекулярных слоев, т. е. сопоставима с высотой бугорков, создающих шероховатость. Последующие исследования, выполненные в этом университете, многочисленные теоретические аргументы и результаты экспериментов показывают, что на поверхности льда в изобилии отмечаются подвижные протоны, хаотически расположенные атомы, заметен также большой масштаб дефектов. Было показано, что при температуре $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ толщина дефектного слоя составляет 10^4 нм, слоя хаотически расположенных атомов — 10^2 нм, а слоя подвижных протонов — 10 нм. В каком-то смысле комбинация дефектов, хаотичности атомов и подвижных протонов могла бы быть причиной наличия «жидкостноподобной» поверхности. В работе также полагается, что структура поверхности существенно отлична от жидкости, так что термин «жидкостноподобная» вводит в заблуждение и от него следует отказаться. Перечисленные выше факторы должны снижать напряжение сдвига шероховатостей льда, а следовательно, и уменьшать трение. При температуре ниже 0°C хаос и мобильность уменьшаются, а дефекты становятся труднее активизировать. Следовательно, бугорки, составляющие шероховатость, труднее сдвинуть (или переориентировать), так что трение льда увеличивается с понижением температуры.

Из всего вышеизложенного следует, что чем ниже будет температура окружающей среды, тем коэффициент трения полозьев по снегу и льду будет больше и износ у полозьев саней будет больше. Республика Саха (Якутия) является самым холодным регионом в Российской Федерации с резко континентальным климатом, что делает его уникальным полигоном для проведения испытаний материалов, при максимально сложных условиях приближенных к реальным эксплуатационным. Соответственно, проведение стендовых испытаний в условиях Якутии дает возможность получения достоверной информации по триботехническим свойствам полимерных материалов в контакте со снегом и льдом, на основе которых можно подобрать наиболее оптимальные полимерные материалы для разработки грузовых саней.

Исследование полимерных образцов на трение по снегу и льду в условиях максимально приближенных к эксплуатационным, проводилось с помощью специально разработанных макетов саней с возможностью установки исследуемых образцов в качестве сменных полозьев. Суть исследования заключается в том, что полимерные образцы прикрепляются к полозьям саней и прокатываются по автозимнику. Перед проведением испытаний, образцы полимерных материалов предварительно взвешиваются, замеряются линейные размеры и закрепляются к полозьям саней. Движение саней осуществляется за счет тяги автомобиля. После преодоления определенного расстояния при определенной температуре окружающей среды, образцы снимаются, сушатся и взвешиваются. Тем самым определяется массовый и линейный износ материалов при определенной наружной температуре воздуха.

Расчет удельной нагрузки на полозья, проведен с учетом габаритов стандартных саней для снегохода «Буран» (240x15 см) и максимальной массы буксируемого прицепа 500 кг. Расчетная удельная нагрузка на полозья составляет $0,069\text{ кг/см}^2$. Для того, чтобы обеспечить такую нагрузку на полозья, вес макетов саней должен составить 34,5

кг. До достижения данного веса, во внутреннюю часть каждого короба саней заморожен определенный объем воды.

Испытания проводились на проселочной дороге (неравномерный снежный покров, с участками обледеневшей поверхности, в небольших количествах щебень и песок) в условиях приближенных к реальным условиям эксплуатации саней буранов в условиях Арктики по автозимникам.

Для проведения исследований трения по снегу и льду, выбраны 3 вида полимерных материалов:

1. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4150 с молекулярной массой 9,2 млн.
2. Полиэтилен марки ПЭ63
3. Металлофторопластовый материал. Подложка - Сталь 20, толщиной 1 мм. Бронзо-латунная сетка, припеченная к стали через тонкий слой оловянистой бронзы, толщиной 0,6 мм. Свободное пространство бронзового слоя заполнено композицией политетрафторэтилена (65 мас.%) + порошковый свинец (35 мас.%).

Предварительные испытания (пробег по автозимнику 15 км) полимерных образцов при температуре -21°C показали, что образцы металлофторопласта не выдерживают нагрузки и разрушаются. Бронзо-латунная сетка с нанесенной композицией фторопласта со свинцом полностью стерлась до блестящей стальной пластины (до подложки). У образцов СВМПЭ, следы трения (бороздки) наблюдаются намного меньше, чем у образцов ПЭ63. Массовый износ у образцов СВМПЭ составил 0,49 г, что в 4,4 раза меньше, чем у образцов ПЭ63 (2,18 г).

Испытания полимерных образцов, с помощью разработанных саней показали, что конструкция саней и способ их крепления недостаточно надежны. При испытании, из-за того, что ширина макетов саней в два раза меньше ширины колеи от автомобиля, сани «кидает» из стороны в сторону и образцы подвергаются большим боковым нагрузкам. Это приводит к тому, что образцы, закрепленные в один ряд, отрываются из полозьев. Поэтому, для повышения надежности конструкции, разработаны большие сани из бруса с размерами полозьев 200x10 см. Габариты конструкции позволяют закреплять образцы в два ряда, что повышает надежность их соединения.

С использованием больших саней исследованы 3 вида полимера: сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4150 (мол. масса 9,2 млн), GUR 4130 (мол. масса 6,8 млн) и полиэтилен трубной марки ПЭ63. Исследование образцов на трение по снегу и льду на протяжении 100 км со средней скоростью 35-40 км/ч (средняя скорость снегохода «Буран») при температуре окружающей среды -26°C показало, что износ у образцов сверхвысокомолекулярного полиэтилена примерно одинаковый. Массовый износ у образца GUR4150 составил 30,0 г, что на 10 г меньше, чем у образца GUR 4130 (40 г). Наиболее существенный износ наблюдается у образца ПЭ63 (470г). Исследования показали, что у образца ПЭ63 массовый износ после трения по снегу и льду выше, чем у образца GUR4150 более чем в 15 раз. Массовые износы образцов GUR4150, GUR 4150 и ПЭ63 составили 0,20 мм, 0,35 мм и 3,42 мм соответственно.

Одним из основных аспектов в разработке материалов для изготовления полозьев саней является исследование адгезии примерзания материала к поверхности льда. Однако, исследование адгезии льда к различным полимерным материалам представляет собой сложную задачу [7]. Известно [8-10], что на адгезию льда к различным материалам влияют различные факторы, определяемые как химическим строением материала и состоянием его поверхности, так и условиями формирования льда, метода исследования и т.д. Принято считать, что все экспериментальные данные по адгезии

льда к различным материалам не являются абсолютными и не в полной мере характеризуют поведение того или иного материала в реальных условиях эксплуатации. Следовательно, исследование адгезии льда к различным полимерным материалам, ее механизмов, разработка технических решений по ее снижению, а также методов по ее определению представляют собой актуальную задачу.

Большинство работ, посвященных исследованию адгезии льда к различным материалам, проведены в низкотемпературных камерах, где сложно обеспечить имитацию реальных условий эксплуатации криофобных материалов. Проведение исследований при естественно низких температурах, дает возможность получить информацию об адгезии льда к полимерным материалам в широком диапазоне температур (до -60°C). В данной работе измерение адгезии проведены двумя различными способами: на улице при естественно-низких температурах Якутии и в низкотемпературной камере.

Исследование адгезии льда к различным материалам при естественно-низких температурах проведено следующим образом: На специально изготовленные деревянные бруски прикреплены исследуемые образцы материалов. Перед исследованием образцы с обезжиренной поверхностью заранее выносятся на улицу и термостатируются в течение 3-6 часов, в зависимости от температуры воздуха. Это делается для того, чтобы линейное расширение полимерных материалов не стало причиной предварительного отрыва образцов от поверхности льда. Затем поверхность льда подплавляется с помощью электронагревателя и на эту поверхность примораживаются исследуемые образцы. Площадь контакта исследуемого материала и льда 50 см^2 . Через 5-6 часов (время может варьироваться в зависимости от наружной температуры воздуха), образцы отрываются и с помощью электронного динамометра ДИН-1У фиксируется усилие отрыва образца от поверхности льда. Исследование проводится на трех образцах. За результат берется среднестатистическое значение адгезии. Отрыв образцов осуществляется в горизонтальной плоскости параллельно поверхности примерзания и имитирует старт снегохода. Подплавление поверхности льда, имитирует реальные условия примерзания саней, где из-за трения по снегу и льду, полозья нагреваются и во время стоянок примерзают к грунту. В качестве льда, используется речной лед.

Измерения адгезии льда к полимерным материалам в низкотемпературной криокамере проведены по запатентованному Институтом проблем нефти и газа СО РАН способу [11]. Способ осуществляется следующим образом. На обезжиренную поверхность исследуемого образца, ставится фторопластовая втулка, в которую наливается вода и замораживается (лед) в климатической камере в течение определенного времени в зависимости от температуры. Для того, чтобы вода не вытекала по краям, на втулку, сверху ставится груз, имеющий продольное отверстие для заливки воды. Затем, образец с примороженным к нему льдом, внутри фторопластовой втулки, закрепляется в зажимы универсальной испытательной машины. Испытание проводится в режиме сжатия со скоростью движения захватов $0,5\text{ мм/мин}$. Давление на образец производится с помощью бруска, который, прикреплен к захвату с использованием специального фиксатора, с толщиной исследуемого образца. Таким же образом, с боковой стороны исследуемого образца, прилагается фиксатор с толщиной бруска. Адгезия льда к исследуемому материалу вычисляется по формуле $W=P/S$, где P – сила, приложенная для сдвига льда от материала, S – площадь основания льда.

Исследование адгезии льда к различным материалам при естественно-климатических условиях, проведено на 6 разных материалах. Помимо полимерных

образцов, исследованы образцы стальной пластины. В табл. 1 представлены значения адгезии льда к исследуемым образцам, полученные при естественно-низких температурах окружающего воздуха (от -21°C до -46°C) и в низкотемпературной камере при -30°C.

Таблица 1 – Адгезия образцов к поверхности льда

№	Материал	Адгезия льда при естественно-низких температурах окружающего воздуха, Н/см ²								Адгезия льда в камере при -30°C, Н/см ²
		-21°C	-24 °C	-25 °C	-26 °C	-29 °C	-30 °C	-35°C	-46°C	
1	Фторопласт	6,06	0,99	3,03	3,36	2,52	2,15	0,49	0,46	1,00
2	СВМПЭ (GUR 4150)	2,67	4,42	1,84	1,92	1,34	2,33	0,11	0,42	1,40
3	GUR4150 +4мас.%MoS ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	1,29
4	GUR 4150 +4,5мас.%TPG	-	-	-	-	-	-	-	-	1,28
5	СВМПЭ (GUR 4130)	2,88	4,88	1,96	4,00	0,65	3,90	0,17	0,21	-
6	Полиэтилен (ПЭ63)	4,39	2,88	2,17	2,08	1,83	4,10	0,16	0,18	1,23
7	Металло-фторопласт	1,20	1,37	0,82	0,60	0,72	1,56	0,62	0,21	-
8	Сталь	3,06	2,60	2,17	2,98	2,75	5,79	2,29	0,90	-

Как и ожидалось, наблюдается разброс показателей. Как описывалось ранее, причин может быть много. Одна из возможных причин разброса показателей, это отрыв образцов от поверхности льда не по зоне контакта образца со льдом, а внутри льда. Возможными причинами когезионного отрыва льда является большая адгезия исследуемого материала ко льду, а также образование трещины внутри льда при подплавлении поверхности льда. Однако четко видно, что при уменьшении температуры окружающего воздуха, наблюдает уменьшение адгезии примерзания образцов к поверхности льда. Наибольшую среднюю по всем температурам адгезию к поверхности льда имеют образцы стали. Наиболее низкие и относительно стабильные показатели адгезии к поверхности льда наблюдаются у образцов сверхвысокомолекулярного полиэтилена GUR4150 и металлофторопласта. Причем у образцов чистого фторопласта адгезия значительно выше, чем у образцов металлофторопластов. Адгезия образцов ПЭ63 ко льду находятся на уровне между сталью и образцами СВМПЭ.

В табл. 1 видно, что наблюдается небольшое расхождение в значениях адгезии, измеренных двумя различными способами. Так, адгезии льда к поверхности фторопласта и СВМПЭ, полученные в климатической камере при температуре -30°C в 2,15 и 1,6 раза ниже адгезии измеренной при естественно-климатических условиях при -30°C. В случае ПЭ63, наблюдается аномально высокое значение адгезии при измерении в естественно-климатических условиях, что, возможно связано с погрешностью в измерении. Однако, необходимо отметить согласованность результатов измерений адгезии двумя различными способами. В обоих способах

наименьшую адгезию при температуре -30°C показывают образцы фторопласта. Однако, несмотря на это, если смотреть всю таблицу значений, то, как уже было отмечено ранее, образцы СВМПЭ марки GUR4150 показывают наиболее стабильные и низкие значения адгезии льда. Также, в низкотемпературной камере были исследованы образцы полимерных композитов на основе СВМПЭ марки GUR4150. Видно, что введение MoS_2 и ТРГ в матрицу СВМПЭ, приводит к снижению адгезии льда. Возможно, это объясняется изменением надмолекулярной структуры СВМПЭ, а именно трансформацией ламеллярной структуры в сферолитную [12].

Заключение

Стендовые испытания триботехнических свойств полимерных материалов на трение по снегу и льду в условиях максимально приближенных к эксплуатационным показали, что СВМПЭ марки GUR 4150, после 100 км пробега со скоростью 35-40 км/ч по автозимнику, при температуре воздуха -26°C имеет наименьший массовый и линейный износ равный 30 г и 0,3 мм соответственно.

Исследование адгезии льда к различным материалам двумя различными способами в диапазоне естественно низких температур от -21°C до -46°C показало, что наименьшее значение адгезии также наблюдается у образца GUR 4150.

Таким образом, предварительные исследования показали, что сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4150 представляет собой наиболее перспективный материал, для разработки полозьев саней эксплуатирующихся в условиях Арктики.

Литература

1. Kietzig A.-M., Hatzikiriakos S.G., Englezos P. *Journal of glaciology*, 2010, **56**, 197.
2. Bowden F.P. *Proceedings of the Royal Society of London, Ser.A*, 1953, **217**, 462-78.
3. Bowden F.P., & Hughes, T.P. *Proceedings of the Royal Society of London, Ser. A*, 1939, **172**, No.949, 280-98.
4. Huzioka T. V. *Teion-kagaku: Low Temperature Science, Ser. A*, 1962, **20**, 159-79.
5. Huzioka T. *Teion-kagaku: Low Temperature Science, Ser. A*, 1963, **21**, 31-44.
6. Weyl W.A. *J. Colloid and Interface Science*, 1951, **6**, 389-405.
7. Гольдштейн Р.В., Епифанов В.П. *Вестник Пермского гос. техн. Университета*, 2011, **2**, 28-41.
8. Matsumoto K., Kobayashi T. *International Journal of Refrigeration*, 2007, **30**, 851-860.
9. Raraty L.E., Tabor D. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1958, **245**, 184-201.
10. Williams G.P. *Reprinted from Proceedings Twenty-Fourth Annual Eastern Snow Conference*, 1967, **2**, 82.
11. Попов С.Н., Шадринов Н.В., Архипов А.А., Соколова М.Д. *Патент РФ №2522818 от 21.05.2014*, Бюл. **20**.
12. Gogoleva O.V., Popov S.N., Petrova P. N., Okhlopko A.A. *Russian Engineering Research*, 2014, 34, **12**, 743-746.