



# Специализированная смазка на углеводородной основе для криогенных применений

---

Обсуждение требований криогенных приложений и исследований, рассмотрение поведения углеводородной смазки для термического контакта и герметизации.

## Специализированная смазка на углеводородной основе для криогенных применений

### Введение

Криогеника обычно относится к работе при температуре ниже 123K или  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , во многих областях науки и медицины необходимо проводить эксперименты и запускать оборудование при криогенных температурах, вплоть до нескольких градусов Кельвина. Чтобы обеспечить герметичность и теплопроводность при таких температурах, необходимо использовать специальные материалы, поскольку стандартные теплоотводящие и герметизирующие составы могут растрескиваться, что, в свою очередь, снижает эффективность герметизации и ухудшает теплопроводность.

В настоящее время существует много видов смазок, таких как продукты на основе перфторполиэфира, у которых рабочие температуры значительно ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Однако почти все эти продукты имеют предел допустимого диапазона рабочих температур, равный  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Рабочая температура типичных составов теплоотводов достигает  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Единственным исключением является смазка на углеводородной основе (с запатентованными присадками), которая может работать вплоть до  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$  - температуры, при которой кипит жидкий гелий.<sup>1</sup>

В этой статье будут рассмотрены требования к криогенным применениям и исследованиям, в которых определяется поведение смазки на углеводородной основе для термического контакта и герметизации.

### Примеры криогенных применений

Существует ряд отраслей промышленности и научных направлений, где применяются криогенные температуры. Здесь рассмотрены два примера: исследования и сверхпроводники.

При проведении университетских исследований есть много вариантов, когда образцы необходимо охлаждать до экстремально низких температур. В этих экспериментах необходимо закрепить образец на «холодном пальце» криостата, чтобы достичь очень низких температур. После завершения эксперимента образец необходимо снова удалить. В этом случае состав, используемый для монтажа, должен быть пластичным при комнатной температуре, но затвердевать при более низких температурах. Кроме того, очень полезно, если после завершения эксперимента состав можно легко удалить и очистить с образца.

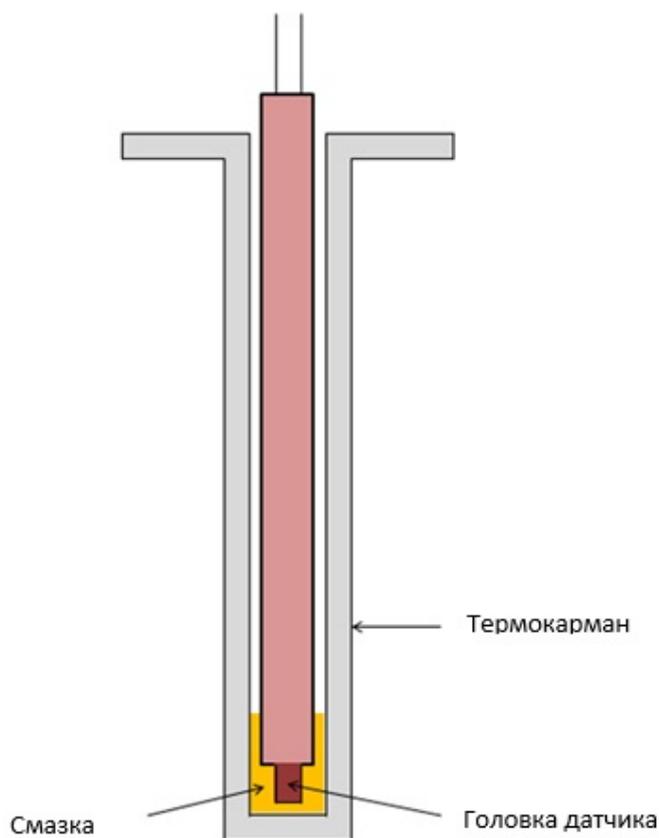
Другим основным применением криогеники является область сверхпроводников, где требуются очень низкие температуры, чтобы получить очень низкое электрическое сопротивление. Типичная температура для низкотемпературных сверхпроводников меньше 30K, а так называемые высокотемпературные сверхпроводники работают при температурах до 138K. Хотя этот показатель считается высокой температурой, он также подходит для криогенного диапазона и требует использования материалов, которые будут выдерживать очень низкие температуры, не теряя ни одного из своих свойств.

Сверхпроводники являются ключом к производству очень высокопрочных магнитов, используемых в таких устройствах, как сканеры магнитно-резонансной томографии (МРТ) и транспортные системы с магнитной левитацией. К другим специализированным вариантам применения относятся ускорители частиц и термоядерные реакторы, где необходимы магнитные поля чрезвычайно высокой мощности для обеспечения требуемых сил сдерживания и ускорения. В этих системах применяется тепловой контакт между холодильным оборудованием и сверхпроводящими материалами, а также точное измерение температуры.

## Датчики температуры

При использовании датчиков температуры очень важно поддерживать хороший тепловой контакт, чтобы обеспечить точные измерения. Термокарманы обычно используются там, где необходимо напрямую измерять температуру жидкого азота или гелия. Термокарман применяется для защиты чувствительных датчиков температуры от повреждения, а также обеспечивает размещение датчика температуры в интересующей области, например, в середине трубопровода. Одна из проблем использования термокармана заключается в том, что между внешней стенкой и датчиком температуры должен быть установлен хороший тепловой контакт. Для заполнения термокарманов в криогенном оборудовании часто используется углеводородная смазка, чтобы обеспечить этот необходимый контакт между датчиком и измеряемой средой. В этом сценарии смазка представляет идеальный вариант, поскольку ее легко нанести на термопару или заполнить отверстие. Тот факт, что смазка будет размягчаться при комнатной температуре, означает, что сенсорную головку можно легко снять с термокармана для обслуживания или замены, если это необходимо. Это невозможно для эпоксидной смолы или подобного постоянно нанесенного материала для термоизоляции. После замены и охлаждения зонда смазка снова затвердевает, обеспечивая превосходный термический контакт с внешней поверхностью.

**Рисунок 1 - Применение термокармана для смазки**



## Крио-смазка

Одной из областей, где обычные смазки не могут обеспечить решение, является криосмазка. Независимо от базового масла, при температуре ниже 170 К используемые смазки будут твердыми, что не обеспечивает смазку во время работы. Смазку можно применять в качестве сборочной там, где соединение применяется для реализации криогенной системы, например, позволяет вводить вал через уплотнительное кольцо, не повреждая эластомер.

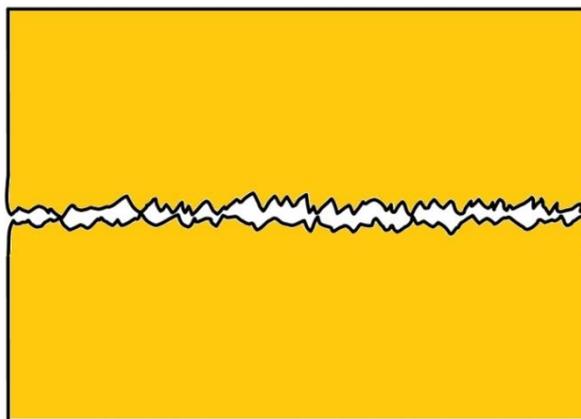
В этом случае также полезна смазка, способная выдерживать термические циклы, поскольку она позволяет снимать и заменять вал в целях технического обслуживания. Однако следует отметить, что для работы динамических систем при очень низких температурах необходимы твердые смазочные покрытия.

### Характеристики теплопередачи

Поскольку теплопередача при криогенных температурах является основной областью, где можно применять специально разработанную смазку, следовало бы взглянуть на сравнительные характеристики более подробно. Одной из основных проблем криогеники является обеспечение хорошего теплообмена между охлаждающим оборудованием и экспериментальным объектом. Возьмем, к примеру, монтаж полупроводникового кристалла на блок «холодного пальца» криостата. Для эффективного охлаждения кристалла необходимо обеспечить превосходный термический контакт между двумя поверхностями.

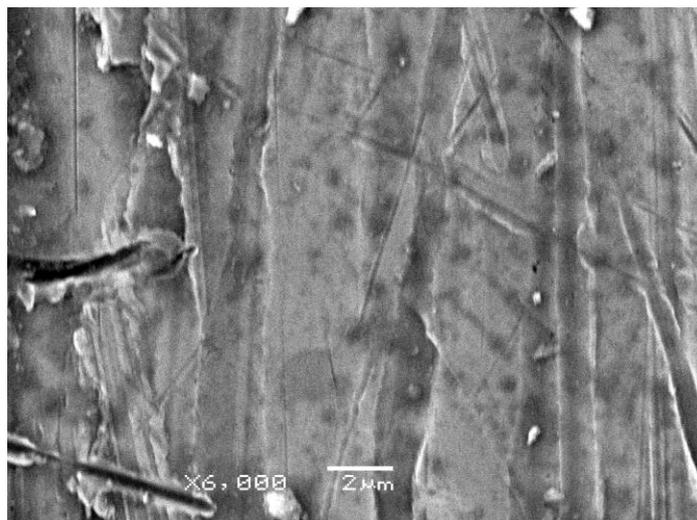
При криогенных температурах теплопередача происходит преимущественно за счет прямой проводимости, поскольку влияние излучения и конвекции незначительно. При рассмотрении теплопроводности необходимо иметь хороший контакт между материалами, и на макроскопическом уровне может показаться, что две смежные поверхности являются плоскими, однако если взглянуть на микроскопический уровень, можно увидеть, что это не так. Диаграмма на рисунке 2 показывает, как шероховатость поверхности может привести к тому, что реальная площадь поверхности в контакте между двумя материалами будет очень маленькой. Фактически из-за микроскопической шероховатости действительная площадь контакта может составлять всего 1-2% от общей площади поверхности между двумя материалами. <sup>ii</sup> При комнатной температуре это не представляет проблемы, поскольку движение молекул газа между двумя материалами способствует передаче тепла. Однако этот процесс довольно неэффективен, и когда температура приближается к абсолютному нулю, движение молекул газа замедляется, и в теплопередаче преобладает эффект проводимости.

**Рисунок 2 - Влияние шероховатости поверхности на площадь контакта**



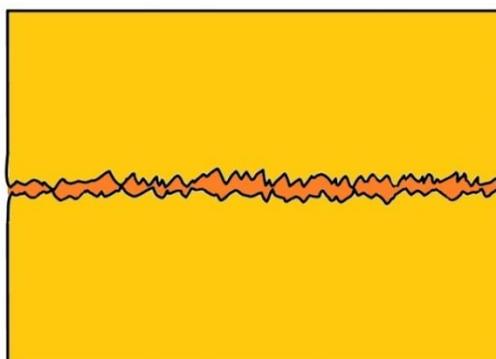
На рисунке 3 показана поверхность медной пластины с увеличением в 6000 раз, что наглядно демонстрирует возможные неровности, даже если поверхность кажется гладкой при взгляде невооруженным глазом.

**Рисунок 3 - изображение поверхности меди, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа**



Принцип использования смазки для теплопередачи достаточно прост. Смазка обеспечивает прямой путь теплопередачи между двумя материалами, как показано на рисунке 4, она устраняет все свободное пространство и заполняет пики и впадины

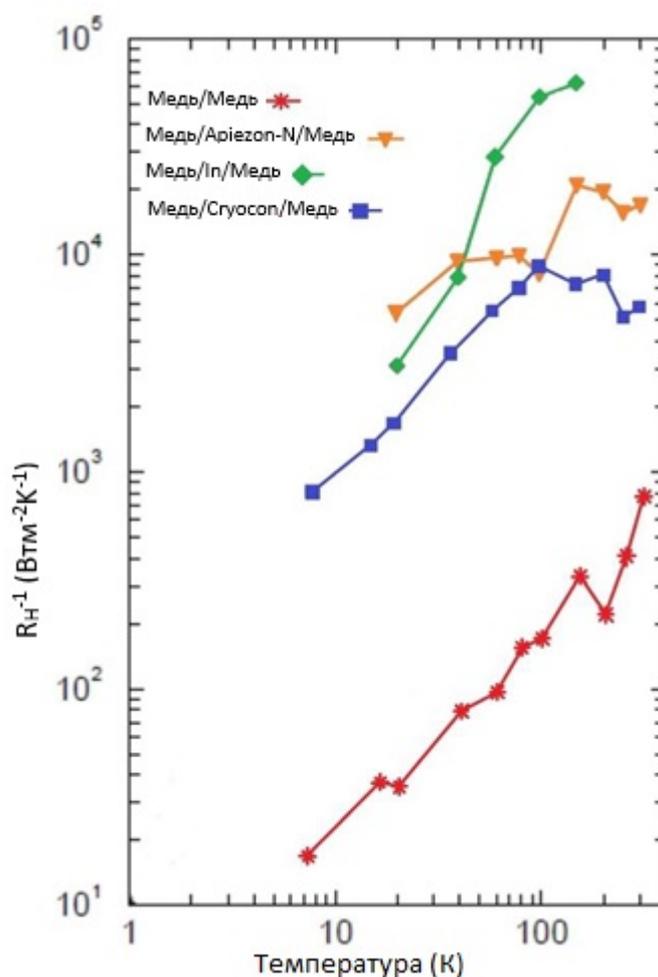
**Рисунок 4 - Нанесение термопасты**



Существует широкий спектр теплоотводящих составов, которые разработаны для обеспечения хорошей теплопроводности, некоторые из них содержат металлические частицы для улучшения объемной теплопередачи. Большой недостаток этих материалов для криогенного использования заключается в том, что добавление частиц увеличивает пространство между контактными поверхностями и может фактически ухудшить характеристики теплопередачи системы. Два других общепринятых метода теплопередачи, которые применяются в криогенных условиях - это фольга из индия или специально разработанная углеводородная смазка, в которой присутствуют присадки, предотвращающие растрескивание при очень низких температурах.

Сравнивая эффективность этих трех решений, можно рассмотреть полный температурный диапазон от комнатной температуры до температур жидкого гелия, при которой работают низкотемпературные сверхпроводники. Диаграмма на рисунке 5 представляет результаты сравнения теплопроводности между медными контактами, заполненными углеводородной смазкой Arjezon N, медной смазкой с наполнителем под названием Cгyocоп или фольгой из индия, добавленной между двумя медными контактами.<sup>ii</sup>

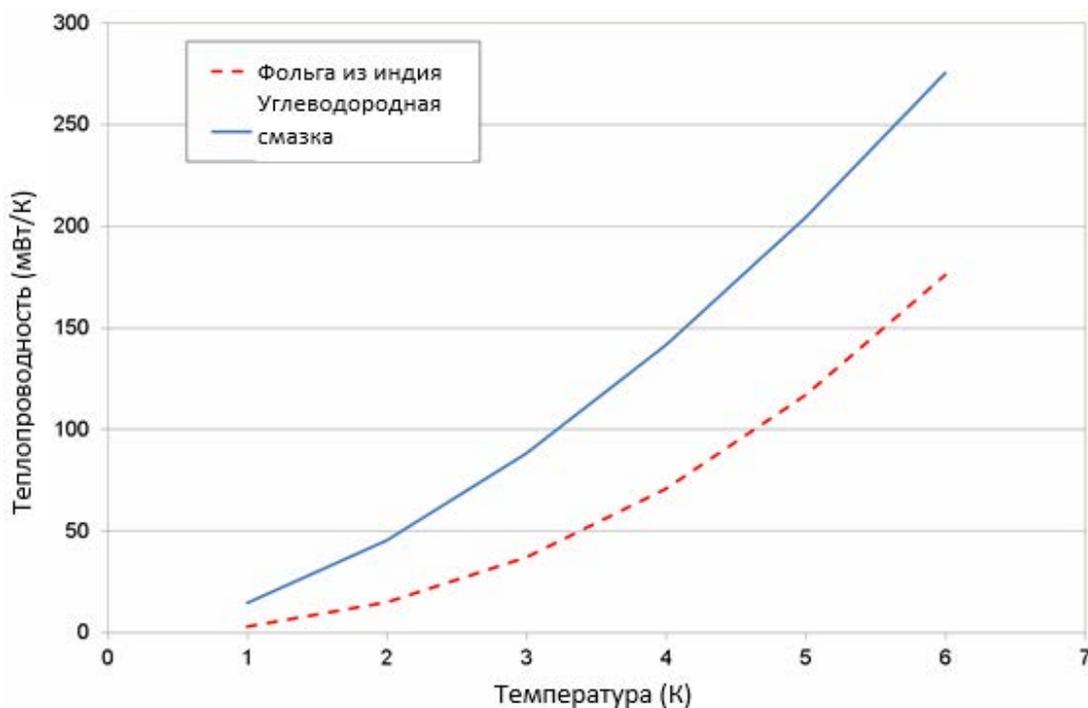
Рисунок 5 - Теплопроводность медных контактов с различными тепловыми интерфейсами



Можно увидеть, что при более высоких температурах фольга из индия обеспечивает лучшую теплопроводность, но, когда температура падает ниже 40 К, углеводородная смазка Ariezon становится более эффективной. Смазка, заполненная металлом спуосоп, обладает повышенной теплопроводностью при изолированном измерении, однако в этом варианте применения преимущество добавления металлических частиц не так очевидно, поскольку расстояние между контактами больше по сравнению с двумя другими решениями.

При гелиевых температурах видно, что углеводородная смазка обладает гораздо лучшими характеристиками, чем фольга из индия, когда температуры падают дальше до диапазона 1-6К, как показано на рисунке 6<sup>iii</sup>.

Рисунок 6 - Теплопроводность медных контактов при температуре жидкого гелия



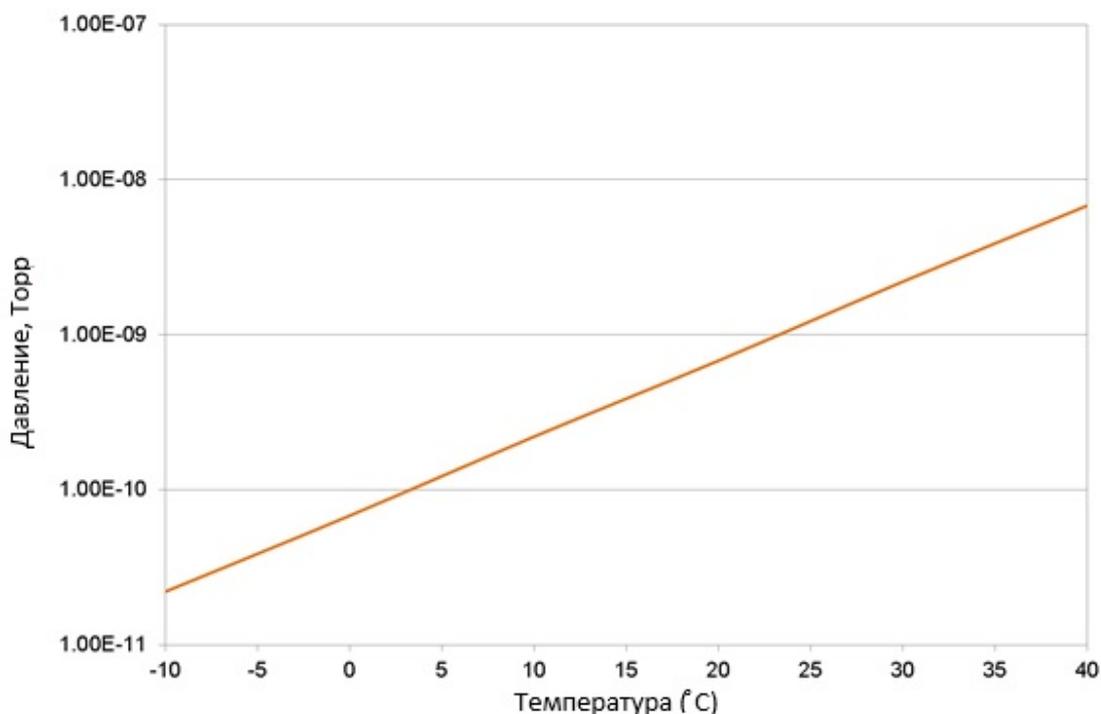
Эти эксперименты показывают, что в случае криогенных температур углеводородная смазка предлагает превосходный материал для термического контакта, особенно для тех систем, которые работают в диапазоне температур жидкого гелия.

Еще одним преимуществом использования углеводородной смазки является возможность ее легкого удаления. Это может быть особенно полезно при проведении научных экспериментов, когда необходимо временно закрепить образец на поверхности криостата. Если используется фольга из индия, то после завершения эксперимента ее очень сложно удалить, тогда как углеводородную смазку можно полностью снять с помощью углеводородных растворителей, таких как толуол или d-лимонен.

### Системы, использующие давление пара и вакуум

Помимо обеспечения термоконтакта, углеводородная смазка может также создать превосходную герметизирующую среду для вакуумных систем, которая необходима для работы при криогенных температурах. В таком варианте применения ключевыми особенностями продукта являются способность избегать трещин вплоть до очень низких температур и обеспечение низкого давления пара, чтобы предотвратить выделение нежелательного материала в вакуумную среду.

На рисунке 7 показана кривая давления пара для той же смазки Arizeon, здесь видно, что продукт можно использовать в качестве герметика, а также в качестве материала для теплопередачи.

**Рисунок 7 - Давление паров смазки**

До тех пор, пока давление поддерживается на уровне выше точки на кривой для данной температуры, значительного выделения газа не должно происходить. Например, при работе при -10 °C смазка будет выдерживать вакуумное давление до  $2,2 \times 10^{-11}$  Торр, что считается высоким вакуумом. Когда температура снижается до криогенного диапазона, давление пара будет уменьшаться, не обеспечивая дегазации даже при сверхвысоком вакууме

### Заключение

Для криогенных систем часто возникает необходимость обеспечить хорошую теплопроводность между двумя поверхностями, вплоть до температуры, не превышающей нескольких градусов Кельвина. Для достижения этого необходим состав, который обеспечит требуемую теплопроводность и выдержит циклическое воздействие при экстремально низких температурах.

Углеводородная смазка разрабатывалась и использовалась в течение многих лет для обеспечения превосходных характеристик вплоть до температур жидкого гелия. Помимо обеспечения хорошей теплопроводности, ее можно периодически циклировать до комнатной температуры, чтобы можно было снимать и заменять компоненты, такие как испытательные устройства на «холодных пальцах» криостата. Смазку можно полностью удалить с поверхности, используя обычные углеводородные растворители.

Кроме того, ее можно использовать в качестве вакуумного герметика, обеспечивающего очень низкое давление пара, что, в свою очередь, позволяет применять ее при очень низких давлениях в диапазонах сверхвысокого вакуума.

i Arizeon N Grease, Криогенная высоковакуумная смазка, Технический паспорт продукта, ноябрь 2012 г.

ii Тепловое граничное сопротивление механических контактов между твердыми телами при температурах ниже температуры окружающей среды, E.Gmelin, M.

Asen-Palmer, M. Reuther and R. Villar, J. Phys. D: Appl. Phys. 32 (1999) R19-R43

iii Теплопроводность металлических контактов, усиленная фольгой из индия или консистентной смазкой Arizeon N, при температурах жидкого гелия, J. Salerno, P.Kittel, A.L. Spivak, Cryogenics 1994, Volume 34, Number 8