<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%85%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C>

<https://scienceforum.ru/2016/article/2016025941>

<https://nsportal.ru/ap/library/nauchno-tekhnicheskoe-tvorchestvo/2015/06/02/sverhprovodnikovye-tehnologii-nastoyashchee>

<http://electrik.info/main/fakty/445-sverhprovodimost-v-elektroenergetike-nastoyaschee-i-buduschee.html>

<https://goaravetisyan.ru/ispolzovanie-sverhprovodimosti-sverhprovodniki-innovacionno-revolyucionnye/>

<https://elementy.ru/bookclub/chapters/430825/430831>

<http://schoolnano.ru/node/5337>

<http://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/2320-primenenie-sverhprovodimosti-v-nauke-i-tehnike.html>

Сверхпроводимость

**Сверхпроводи́мость** — [свойство](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D0%BE%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE) некоторых [материалов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B0%D0%BB) обладать *строго нулевым* [электрическим сопротивлением](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D1%81%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) при достижении ими [температуры](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0) ниже определённого значения (критическая температура). Известны несколько сотен соединений, чистых элементов, [сплавов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B2) и [керамик](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B5%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0), переходящих в сверхпроводящее состояние. Сверхпроводимость — [квантовое явление](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0). Оно характеризуется также [эффектом Мейснера](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82_%D0%9C%D0%B5%D0%B9%D1%81%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B0), заключающимся в полном вытеснении [магнитного поля](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5) из объёма сверхпроводника. Существование этого эффекта показывает, что сверхпроводимость не может быть описана просто как *идеальная проводимость* в классическом понимании.

Как известно, атомы проводников постоянно колеблются и задевают электроны, из-за этого энергия электрического тока падает, и, чем выше температура, тем сильнее колебание атомов, и тем выше сопротивление. Т.е, если температура ниже, то и сопротивление меньше.

Получив в 1908 жидкий гелий, Г.Камерлинг-Оннес из Лейденского университета стал измерять сопротивление чистой ртути, погруженной в жидкий гелий, и обнаружил (1911), что при температурах жидкого гелия сопротивление ртути падает до нуля. Позднее было установлено, что многие другие металлы и сплавы тоже становятся сверхпроводящими при низких температурах. Следующее важное открытие было сделано в 1933 немецким физиком В. Мейсснером и его сотрудником Р. Оксенфельдом. Они обнаружили, что если цилиндрический образец поместить в продольное магнитное поле и охладить ниже температуры перехода, то он полностью выталкивает из себя магнитный поток. Эффект Мейсснера, как назвали это явление, был важным открытием, поскольку благодаря ему физикам стало ясно, что сверхпроводимость - квантово-механическое явление. Если бы сверхпроводимость заключалась только в исчезновении электрического сопротивления, то ее можно было пытаться объяснить законами классической физики.

Итак, сверхпроводимость – свойство, которое проявляется у некоторых материалов в виде резкого падения удельного электрического сопротивления вплоть до нуля при температуре ниже определённого значения. А вещества, в которых это явление наблюдается – сверхпроводники. У сверхпроводников есть уникальное свойство – они отталкивают любое магнитное поле, т.е. любой магнит будет парить над сверхпроводником.

**Виды сверхпроводников и их свойства.**

1.     По температуре перехода в сверхпроводящее состояние

А) Низкотемпературные (Тс ниже 77 К).

В низкотемпературных сверхпроводниках электроны взаимодействуют через фононы – кванты тепловых колебаний положительно заряженных ионов, составляющих кристаллическую решетку металла. Ее искажение, возникающее при прохождении одного электрона, через несколько микросекунд оказывает влияние на его партнера. Таким образом, при испускании и поглощении фононов между электронами возникает слабое взаимное притяжение.

Б) Высокотемпературные (Тс от 77 до 135 К).

Все известные в настоящее время высокотемпературные сверхпроводники являются оксидами, большинство из которых содержат медь, но имеются также и соединения без меди. Особое значение в оксидных высокотемпературных сверхпроводниках имеет состояние кислородной подрешетки, т.е. концентрация, структурное положение и подвижности атомов кислорода в кристаллической структуре. Это вызвано тем, что с кислородом в оксидных сверхпроводниках связывают как понимание природы высокотемпературной сверхпроводимости, так и объяснение нестабильности свойств высокотемпературных сверхпроводящих материалов.

В) Комнатные (293 К).

Отдельные зерна графита могут проявлять сверхпроводящие свойства при комнатной температуре после обработки водой и выпекания в печи, что говорит о возможности достижения сверхпроводимости в нормальных условиях на практике. Но пока что в этой области сделано очень мало открытий.

2.     По магнитным свойствам: (см. Приложение 2)

А) Сверхпроводники I рода.

Сверхпроводниками I рода являются все чистые металлы, кроме переходных. Для сверхпроводников I рода характерны скачкообразный переход в сверхпроводящее состояние и наличие одной критической напряженности магнитного поля, при которой наблюдается этот переход. Значения критической температуры и критической напряженности магнитного поля у них малы, что затрудняет их практическое применение. Для сверхпроводников I рода характерным является проявление эффекта Мейснера.

Б) Сверхпроводники II рода.

Все интерметаллические соединения и сплавы относятся к сверхпроводникам II рода. Они переходят в сверхпроводящее состояние в некотором интервале температур. Значения критической температуры и напряженности у них меньше. В таких сверхпроводниках токи не вытесняются на поверхность образца, а образуют цилиндрические каналы, пронизывающие весь объем. В центре канала куперовских пар нет, и сверхпроводимость отсутствует. При возрастании магнитного поля нити, расширяясь, сближаются и сверхпроводящее состояние разрушается. Достаточно сильные магнитные поля, которые способны выдерживать эти сверхпроводники, позволяют использовать их в различного типа устройствах для создания сильного магнитного поля.

Однако деление веществ по их сверхпроводящим свойствам на два вида не является абсолютным. Любой сверхпроводник I рода можно превратить в сверхпроводник II рода, если создать в нем достаточную концентрацию дефектов кристаллической решетки.

3. По общим свойствам:

А) Органические сверхпроводники (Tc= 11,5 К).

Б) Соединения типа A-15, представляющие собой классические низкотемпературные сверхпроводники (Tc= 23,2 К).

В) Магнитные сверхпроводники или фазы Чевреля, объединяющие ферромагнитные и антиферромагнитные сверхпроводники (Tc= 15 К и Bc2 (вернее поле) = 60 Тл).

Г) Тяжелые фермионы (Tc=18К) демонстрируют сосуществование сверхпроводимости с ферромагнитизмом и антиферромагнитизмом.

Д) Оксидные сверхпроводники без меди – предшественники высокотемпературных сверхпроводников (Tc=31К),  монокристаллы перовскитного диэлектрика – оксида вольфрама, допированного натрием (91 К).

Е) Оксипниктиды – редкоземельные оксидные структуры без меди, (Tc=55К); также как и ВТСП имеют слоистую кристаллическую структуру и соответствующие проводящие плоскости FeAs.

Ж) Оксиды пирохлоров, представляющие группу минералов, содержащих титан, тантал и ниобий (Tc= 9,6 К).

З) Рутенокупраты – ближайшие структурные родственники ВТСП, в которых сверхпроводимость сосуществует с ферромагнетизмом (Tc= 50 К).

И) Высокотемпературные сверхпроводники – сверхпроводящие купраты, в которых сверхпроводимость осуществляется по плоскостям CuO2, (Tc= 166 ± 1,5 K).

К) Редкоземельные борокарбиды (Tc= 23 К).

Л) Кремниевые сверхпроводники (при высоком избыточном давлении Tc= 14 К).

М) Халькогениды – структуры на основе серы и селена (Tc= 4,15 К).

Н) Углеродные сверхпроводники – фуллеренные структуры (Tc= 40 К).

О) MgB2 и родственные структуры (Tc=39К) - дешевые и широкодоступные материалы (магнезию можно купить в любой аптеке!).

4. По типу кристаллических решеток:

А) Мягкие - чистые металлы, за исключением ниобия, ванадия, теллура. Основным недостатком является низкое значение критической напряженности магнитного поля.

Б) Твердые – сплавы с искаженными кристаллическими решетками. Обладают рядом особенностей:

•          при охлаждении переход в сверхпроводящее состояние происходит на протяжении некоторого температурного интервала;

•         имеют высокую Тс;

•          некоторые имеют относительно высокие значения критической магнитной индукции Вкр;

•          при изменении магнитной индукции могут наблюдаться промежуточные состояния между сверхпроводящим и нормальным;

•          имеют тенденцию к рассеянию энергии при пропускании через них переменного тока;

•          зависимость свойств сверхпроводимости от технологических режимов изготовления, чистоты материала и совершенства его кристаллической структуры.

5. По технологическим свойствам:

 А) сравнительно легко деформируемые, из которых можно изготавливать проволоку и ленты;

Б) трудно поддающиеся деформации из-за хрупкости, из которых получают изделия методами порошковой металлургии.

# Применение сверхпроводников в современном мире.

1. **Настоящее.**

Спектр применений сверхпроводников удобно разделить на:

* различные материалы: пленочные проводники, сверхпроводящие магниты и пр.;
* микротехника: микроволновые устройства, сверхчувствительные системы обнаружения магнитных полей, цифровая электроника, искусственные биологические системы;
* макротехника: силовые кабели, электрические системы и сети, генераторы и двигатели.

Основные области применения явления сверхпроводимости сегодня можно представить в виде таблицы (см. Приложение 4).

Рассмотрим несколько наиболее важных отраслей применения.

А) В силовых применениях сверхпроводники позволяют снизить энергопотери и сократить массогабаритные показатели оборудования. Высокая плотность тока в сверхпроводниках позволяет уменьшать размеры оборудования, а также создавать магнитные поля высокой интенсивности, недостижимые обычной аппаратурой. Ограничивающим фактором является необходимость поддержания проводника при низкой температуре, что само по себе требует энергозатрат, поэтому наиболее актуальны применения в устройствах большой мощности. В этом случае затраты на криообеспечение пренебрежимо малы.

В настоящее время промышленность США уже имеет коммерческие ВТСП изделия - трансформаторы, электрические моторы, токоограничители и силовые кабели. С ростом производства изготовители ВТСП кабелей будут способны установить их во всех электросетях США. ВТСП кабели имеют целый ряд преимуществ в сравнении с традиционными, включая более низкие потери, меньший вес, более компактные размеры. ВТСП кабели не воздействуют на окружающую среду – они не излучают электромагнитные поля, в них не используют для охлаждения при подземной прокладке технические масла, как в случае традиционных кабелей. Исключение суммы потерь (4 млрд. долл. ежегодно) может компенсировать относительно высокую на данное время стоимость ВТСП кабеля.

На диаграмме (см. Приложение 3) показаны потери в ВТСП и традиционных кабельных сетях при 50 МВА и 132 кВ.

Б) Кто из нас не мечтал в детстве летать? Не так давно в Тель-Авивском университете прошла презентация проекта Superconductivity Group, которая наглядно показала, что эта мечта может сбыться.

Суть квантовой левитации состоит в том, что благодаря правильному использованию физических свойств сверхпроводников их возможно не просто удержать в воздухе, но и заставить двигаться над и даже под магнитными "рельсами" с умопомрачительной скоростью (см. Приложение 4, 5).

В) Несмотря на кажущуюся простоту, трение остается дискуссионной и плохо изученной проблемой. В частности, отсутствие ясной взаимосвязи между трением на микро- и макроскопическом уровне не позволяет вывести фундаментальный закон, позволяющий одинаково правильно описывать это явление на разных масштабах.

С изобретением в 1986 году атомно-силового микроскопа с кантилевером с микроскопической иглой на конце исследование трения переместилось на атомарный уровень, а сама наука о силе трения превратилась в нанотрибологию.

Оказалось, что прояснить ситуацию помогает явление сверхпроводимости.

Неконтактное трение имеет двойную природу: электронное трение (электростатическое плюс ван-дер-ваальсово) и фононное.

Парное объединение электронов при сверхпроводимости приводит к тому, что они начинают вести себя как единое целое. Благодаря этому единству электроны без потерь энергии двигаются через кристаллическую решетку, игнорируя ее сопротивление.

Значит, если электроны становятся невосприимчивы к препятствиям на своем пути, они не будут реагировать и на внешний раздражитель в виде иглы микроскопа. Следовательно, в системе «игла кантилевера — сверхпроводящая поверхность» вклад в трение будет давать лишь фононная часть, а электронная будет равна нулю.

Группа ученых из Швейцарии и Испании под руководством Эрнста Мейера ряд таких экспериментов, которые доказали, что трение главным образом имеет электронную природу при условии, что вещество находится в нормальном состоянии. В сверхпроводящем состоянии вдалеке от критической температуры основным «источником» трения являются фононы.

2. **Будущее.**

Через 10-20 лет сверхпроводимость будет широко использоваться в энергетике, промышленности, на транспорте и гораздо шире в медицине и электронике. Внедрение СП-технологий приведет как к простой замене традиционного оборудования на более эффективное сверхпроводящее, так и к изменениям структурного характера и к появлению совершенно новых технологических нововведений.

Одним из самых перспективных направлений является комнатная сверхпроводимость. Оно будет усиленно развиваться, т.к. имеет огромное значение.

В электронике сверхпроводимость найдет широкое применение в компьютерных технологиях. Потенциально наиболее выгодное промышленное применение сверхпроводимости связано с генерированием, передачей и эффективным использованием электроэнергии. Еще одно перспективное применение сверхпроводников – в генераторах тока (от мощных электростанций до обычных ветряных установок) и электродвигателях. С развитием СП-технологий сверхпроводящие двигатели найдут широкое применение также и в самолетах и на автомобильном транспорте.

Строительство сверхпроводящей железной дороги запланировано в Японии. За счет сил взаимного отталкивания между движущимся магнитом и током, индуцируемым в направляющем проводнике, поезд будет двигаться плавно, без шума и трения и будет способен развивать очень большую скорость. Ожидается, что дорога будет введена в эксплуатацию к 2020 г.

Возможность ускорения макроскопических объектов электромагнитным полем найдет свое применение также на аэродромах и космодромах, где СП-магниты будут обеспечивать взлет/посадку воздушным судам и космическим кораблям. Рассматриваются также возможности применения сверхпроводящих магнитов для аккумулирования электроэнергии в магнитной гидродинамике и для производства термоядерной энергии.

### **Что в будущем: топ-3 перспективных применений сверхпроводников**

***Провода на высокотемпературных сверхпроводниках***  
С самых первых лет открытия сверхпроводимости человечество задумывалось о том, как передавать ток с помощью сверхпроводников. Обычные воздушные высоковольтные линии занимают много пространства, а также теряют 6-10% передаваемой энергии.  
  
Сначала не подходили, собственно, сверхпроводящие металлы, чьи химические свойства не позволяли сделать из них провода. Затем с открытием сверхпроводников II рода встал вопрос об их охлаждении, для которого требовался дорогой гелий. Только в 1986 году была открыта высокотемпературная сверхпроводимость, то есть были найдены сверхпроводники с критической температурой выше 30 кельвинов. Это позволило использовать для охлаждения более дешёвый азот, однако теперь встал вопрос о том, как поддерживать высокопроводящее состояние, то есть низкую (высокую) температуру на очень больших отрезках.  
  
Сейчас в России, Китае, Японии, Южной Корее, Европе и США есть проекты по созданию сверхпроводящих кабелей длиной от одного до десяти километров. Успеха добились российские инженеры — в прошлом году завершились испытания самой протяженной сверхпроводящей кабельной линии постоянного тока. Опытный образец на основе сверхпроводника Bi2Sr2Ca2Cu3O10+x длиной 2,5 км с критической температурой –165 °С планируется ввести в эксплуатацию в 2020 году соединит две подстанции в Санкт-Петербурге.  
  
***Высокоскоростной транспорт***  
Способность сверхпроводников создавать мощное и устойчивое магнитное поле нашла применение в транспорте. В начале 1970-х был создан первый прототип поезда на магнитной подушке (германский Transrapid 02), а в 1984 году первый коммерческий маглев (от словосочетания «магнитная левитация») начал курсировать между терминалом аэропорта Бирмингема и железнодорожной станцией города (проработал до 1995-го).  
  
Суть технологии проста: состав удерживается над дорожным полотном силой электромагнитного поля. Она же толкает состав вперед — включение одинаковых по полюсам магнитов отталкивает состав от дороги, а разных — притягивает. Быстрое попеременное включение таких магнитов создает постоянный зазор между полотном со сверхпроводящими электромагнитами и поездом. Благодаря отсутствию трения маглевы способны разгоняться до 500-600 км/ч.  
  
Однако несмотря на относительную простоту технологии, она не получила широкого распространения. Дело в том, что она слишком дорогая. Скажем, шанхайский маглев-аэроэкспресс (в коммерческой эксплуатации с 2004-го года) приносит ежегодный убыток в 93 млн долл.  
  
Поэтому более перспективным применение электромагнитных полей сверхпроводников может быть в дорогостоящих космических проектах. Тот же принцип магнитной левитации предполагается использовать для вывода в космос грузовых кораблей. К примеру, разработчики проекта Startram (ориентировочная стоимость 20 млрд долл.), заявляют, что снизят стоимость отправки одного килограмма космических грузов до 40 долл., построив разгонный туннель, направленный на околоземную орбиту (против нынешних 2500 долл. у SpaceX на Falcon-9).  
  
***Термоядерные реакторы***  
Еще одна перспективная область применения сверхпроводниковых магнитов — термоядерные реакторы. Они нужны для создания так называемой магнитной ловушки, для удержания вырабатываемой реактором плазмы. Заряженные частицы вращаются вокруг силовых линий магнитного поля. По сути, намагниченная плазма становится диамагнетиком, который стремится покинуть магнитное поле. Соответственно, если окружить плазму сверхпроводниковыми магнитами, генерирующими мощные поля, плазма будет удерживаться в заданном объеме и не сможет разрушить стенки реактора.  
  
Именно такая технология используется для строительства термоядерного реактора ИТЕР во Франции. В этом проекте принимает участие и Россия, причем именно она была ответственна за поставку во Францию сверхпроводящих кабелей для создания того самого электромагнитного поля, «укрощающего» плазму. Как предполагается, опробованы магниты будут во время первого запуска реактора в 2025 году.

(https://habr.com/ru/company/toshibarus/blog/460425/)