

Некоторые вопросы физики твердого тела.

§ 1. Введение.

Несколько лет тому назад физика твердого тела была в полном забвении. Не считали ее интересной потому, что в ней не было общей идеи, которая объединяла бы всю группу явлений этого отдела. Очень немногие физики занимались изучением отдельных явлений физики твердого тела. Они получали некоторые закономерности, которые были настолько сложны, что не могли быть основой для теории. Это особенно характерно подчеркнул Буассе¹⁾, который в результате своих многолетних исследований пришел к заключению, что в физике твердого тела не существует общих законов и каждый индивидуум нужно исследовать и описывать особо. Недаром проф. Б. П. Вейнберг²⁾ в своем докладе на Менделеевском съезде в 1910 г. сказал, что «по отношению к физике твердого тела можно без преувеличения констатировать, что это—область захудалая и весьма медленно развивающаяся». В те годы одна работа, относящаяся к физике твердого тела, приходилась почти на 200 работ в других отделах.

Громадное количество образцов из разных материалов было растянуто, сжато, закручено, разрушено, и, казалось бы, накопился большой опытный материал для построения теории, а общая теория не появлялась; чем больше было опытного материала, тем меньше было надежд на создание теории. Природа упругих сил все еще была непонятна и физика твердого тела была совершенно оторвана от других отделов.

Теория появилась с той стороны, откуда ее никто не ожидал. Она родилась из целого ряда неудачных попыток получить явления интерференции и диффракции рентгеновских лучей. Лауэ предположил, что длина рентгеновских лучей слишком мала, чтобы получить интерференционные явления обычным способом. Все самые тонкие оптические приборы, напр. диффракционные решетки, были слишком грубыми для этих лучей. Он воспользовался для получения диффракционного спектра рентгеновских лучей той естественной решеткой, в которой располагаются молекулы кристалла. Эта идея оправдалась экспериментально и открыла физикам совершенно новые пути для изучения природы лучей Рентгена и структуры кристаллов.

Притягательные и отталкивательные силы, природа которых была совершенно темна, сведены к электрическим взаимодействиям между отдельными элементами кристаллической решетки. Физика твердого тела сделалась главой учения об электрических явлениях, появилась электрическая теория твердых тел. В постановке опытов появилась определенная руководящая идея и их результаты сделались значительно плодотворнее. В настоящее время каждый экспериментатор в физике твердого тела должен стоять на точке зрения электрической теории, чтобы участвовать в общем развитии этого отдела.

Физика твердого тела, несколько лет тому назад совершенно изолированная, оказалась в тесной связи с другими отделами. Теперь можно связать в одно целое такие далекие вопросы, как упругость, пластичность, прочность, релаксация, внутреннее трение, поверхностная энергия кристаллов с одной

¹⁾ Н. Bouasse *Résistance des Matériaux*. Paris. 1920.

²⁾ Б. П. Вейнберг. *Ж. Р. Ф. О.* Вып. 2 (1913).

стороны, электризация при соприкосновении, диссоциация, ионизация, электропроводность, фото-электрический эффект и т. п.—с другой стороны.

Большую роль во всех этих явлениях играет температура, влияние которой теоретически пока не совсем ясно и понятно.

В настоящей статье я хотел бы рассмотреть несколько вопросов из физики твердого тела, которые по моему мнению представляют интерес с теоретической и практической стороны и которые следует изучить экспериментально.

§ 2. Внутреннее трение кристаллов.

Изучение внутреннего трения кристаллов—тел с определенной, известной структурой—может пролить свет на внутреннее трение твердых тел вообще. Для исследования лучше всего взять такие кристаллы, строение которых достаточно известно. Опыт необходимо поставить так, чтобы возможно было исследовать скорость сдвига по различных направлениям. Напр., для каменной соли или для металлов, кристаллизующихся в кубической системе, следует определять угловую скорость при перемещении слоев параллельно плоскостям $(1, 0, 0)$, $(1, 1, 0)$ и $(1, 1, 1)$. Можно ожидать, что в плоскости $(1, 1, 0)$ внутреннее трение будет наименьшее, так как параллельно этой плоскости легче всего происходят скольжения.

Нужно выяснить, что происходит с кристаллами, когда к нему приложены такие напряжения, под действием которых он начинает течь и устанавливается постоянство скорости сдвига. Здесь можно сделать три предположения.

1. Когда к кристаллу прилагается небольшое внешнее напряжение, то элементы решетки—атомы или ионы—смещаются на небольшие расстояния друг относительно друга и при удалении напряжения они возвращаются в первоначальные положения. Это—упругая часть, подчиняющаяся приблизительно закону Гука. Если перемещение элементов решетки превзойдет некоторый предел, то возможно скольжение одной части кристалла относительно другой. При скольжении атомы или ионы могут перескочить на целое число нормальных расстояний между ними. Кристаллическая решетка от такого перемещения или перескока может совсем не измениться и ее рентгенограмма будет иметь обыкновенный вид.

2. Может случиться, как это обнаружили А. Ф. Иоффе и М. В. Кирпичева для NaCl , что при достаточно большой деформации кристалл разобьется на ряд мелких кристалликов. Внутреннее трение есть ничто иное, как перемещение отдельных кристалликов друг относительно друга.

3. При достаточном напряжении происходит и перемещение кристаллитов и скольжения внутри них.

Для изучения внутреннего трения кристаллов следует по возможности использовать различные методы. Мне кажется, что наиболее пригодным методом является следующий. Две одинаковые кристаллические пластинки зажимаются между тремя металлическими пластинками с шероховатыми поверхностями. Две крайние пластинки остаются неподвижными, а к средней привешивается груз, который, вытягивая среднюю часть, производит сдвиг в двух кристаллических пластинках. При этом интересно рентгенографировать кристаллы, чтобы наблюдать момент, когда в них начинаются разрушения и перемещения отдельных кристалликов.

Необходимо изучить зависимость угловой скорости скольжения при различных нагрузках и при различных температурах, доходя до температур, близких к точке плавления.

В частности интересно изучить внутреннее трение аммониевых и калиевых квасцов потому, что электропроводность этих кристаллов достаточно изучена.

Электропроводность кристаллов зависит от диссоциации и от внутреннего трения. Диссоциация, по всей вероятности, является величиной скалярной; что же касается внутреннего трения, то естественно допустить, что оно различно по различным направлениям. Опыты А. Ф. Иоффе и М. В. Кирпичевой¹⁾ показали, что электропроводность аммониевых квасцов (кубической системы) в пределах точности опытов одинакова по направлениям, перпендикулярным граням куба и октаэдра. Если это так, то внутреннее трение кристаллов аммониевых квасцов не должно зависеть от направления. Этот вопрос требует экспериментального исследования.

Если взять смешанные кристаллы аммониевых и калиевых квасцов, то оказывается, что их электропроводность несколько меньше электропроводности чистых кристаллов, следовательно, можно предполагать, что внутреннее трение в смешанных кристаллах несколько больше, чем в кристаллах с безупречной кристаллической структурой.

§ 3. Внутреннее трение металлов.

Если образец металла с полированной поверхностью подвергать какой либо деформации и следить в микроскоп за изменением его микроструктуры, то можно обнаружить двоякого рода изменения. Или при деформации образца отдельные кристаллиты перемещаются друг относительно друга без изменения формы и структуры отдельных зерен, или же в кристаллических зернах происходят остаточные деформации, заключающиеся в простых или двойниковых скольжениях. Если происходят скольжения, то поверхность кристаллита становится ступенчатой.

Под действием внешних сил всякий кристалл деформируется и, когда напряжение превосходит предел упругости, в нем или происходят скольжения по плоскостям спайности, если он пластичен, или кристалл разрушается, если он хрупок. По мере повышения температуры кристалл из хрупкого переходит в пластичный, если не изменяется его химический состав.

В кристаллах меди и золота при деформациях происходят скольжения и кристаллы разделяются на отдельные слои, которые скользят друг относительно друга. Для меди, кристаллизующейся в кубической системе плоскостями скольжения являются плоскости ромбического додекаэдра.

При двойниковом скольжении в кристалле параллельные слои поворачиваются вокруг осей, расположенных в некоторой плоскости, при чем этот поворот совершается на такой угол, что все эти слои оказываются наклоненными к этой плоскости на такой же угол, как раньше, но только обращены в другую сторону.

При определенном напряжении на полированных поверхностях кристаллитов меди и золота появляются сначала линии скольжения, а затем наблюдается перемещение отдельных кристаллитов. В цинке, олове, свинце, кадмии, мангани, железе и никеле при определенном напряжении начинается перемещение кристаллитов без их остаточных деформаций. Кристаллиты, перемещаясь, вылезают на поверхность и делают ее шероховатой. Это перемещение кристаллитов сопровождается характерным треском у олова, цинка и др. металлов. У третьих металлов, к которым принадлежат алюминий и серебро, при достаточном напряжении появляются одновременно и линии скольжения и начинается перемещение кристаллитов.

Для выяснения природы внутреннего трения металлов, мне кажется, следует изучить влияние величины кристаллитов на внутреннее трение. Следовательно, параллельно с измерением вязкости необходимо изучать под микроскопом шлифы образцов. Изменение размеров кристаллитов можно осуществить путем отжига образцов, полученных в почти аморфном, стекло-

¹⁾ Ж. Р. Ф. О. 48. 261 (1916).

образном состоянии путем протавливания металлов через отверстие. Можно ожидать, что для тех металлов, у которых при деформации сначала происходят перемещения кристаллитов, внутреннее трение увеличивается с возрастанием размеров отдельных зерен.

§ 4. Влияние величины кристаллитов на прочность металлов.

Если растягивать два деревянных стержня, вырезанных один параллельно, а другой перпендикулярно волокнам, то второй стержень разрывается при значительно меньшем напряжении, чем первый. Прочность на разрыв кристаллического образца, вырезанного параллельно плоскостям спайности больше, чем прочность такого же образца, вырезанного перпендикулярно этим плоскостям. Если плоскости спайности расположены под некоторым углом к оси образца, то напряжение P , необходимое для разрыва, будет заключаться между P_{\max} и P_{\min} .

Возьмем образец, состоящий из мелких кристаллитов, которые ориентированы относительно плоскостей спайности по всевозможным направлениям. Исследуя такой образец по длине, мы всегда найдем в нем такое сечение, в котором наибольшее число кристаллитов расположено так, что плоскости спайности лежат в этом сечении. При растяжении такой образец разрывается при некотором напряжении p_1 . Если взять образец из того же материала, но с большими кристаллитами, то может случиться, что в некотором месте большой кристаллит будет расположен своими плоскостями спайности перпендикулярно длине. Это будет наименее прочное сечение и образец разорвется по нему при напряжении $p_2 < p_1$. Следовательно, можно ожидать, что прочность на разрыв образцов будет тем больше, чем меньше кристаллиты.

При проковке, вальцовке, вытекании металлов из отверстий, протягивании через волоочильную доску и тому подобным механическим воздействиям кристаллиты раздробляются, образец получает мелкокристаллическую структуру и его прочность увеличивается. Если образец отжигать, то кристаллиты растут, при чем большие кристаллиты растут за счет маленьких, подобно тому, как большие капли жидкости растут за счет малых, если эти капли находятся вблизи больших. Это объясняется тем, что поверхностная энергия у малых капель по отношению ко всей внутренней энергии их значительно больше, чем у крупных капель. Прочность отожженного образца должна быть меньше, чем у неотожженного.

Когда растягивается образец, то в некотором месте его образуется сужение. В этом месте происходит течение вещества, состоящее в перемещении и в раздроблении кристаллитов. Если, не доводя образец до разрыва, обточить его на токарном станке так, чтобы он имел по всей длине одинаковое сечение, и затем снова растягивать, то шейка образуется в каком либо новом месте, при чем место первоначальной шейки гарантировано от сужения. Это можно объяснить тем, что в месте сужения происходит течение вещества, состоящее в перемещении и в раздроблении кристаллитов, в этом месте кристаллиты становятся более мелкими, а потому прочность образца увеличивается.

Мне представляется интересным изучить зависимость прочности металлов от величины кристаллитов, исследуя на разрыв образцы и измеряя под микроскопом величину кристаллитов шлифованных поверхностей разрезом.

§ 5. Поверхностная энергия кристаллов.

Я. И. Френкель в своей книге «Электрическая теория твердых тел», стр. 195—210 (1924 г.) теоретически рассматривает вопрос о поверхностной энергии различных кристаллических грапей. Эта энергия равняется той работе, которую необходимо совершить, чтобы отделить одну грань от другой.

экспериментальное определение поверхностной энергии кристаллов представляет большой интерес. Теория дает неожиданно малое значение для величины энергии. Так для отделения 1 см² поверхности (1,0,0) каменной соли (NaCl) необходима работа около 0,3 гр × см. Для грани (1,1,0) эта работа в 2,50 раз больше, а для грани (1,1,1) — в 5,81 раз больше.

Для определения работы пригодно простое отрывание, расщепление, сдвиг и т. п. Недостаточно измерения той силы, которая необходима для отделения одной грани от другой, так как оно не дает величины работы.

Если бы возможно было изготовить нож с таким острием, толщина которого была бы порядка 10⁻⁸ см, т. е. немного меньше расстояния между элементами кристаллической решетки и если бы возможно было установить острие ножа точно по линии между элементами решетки, то работу можно было бы легко определить. Но обычное острие ножа имеет толщину порядка нескольких тысяч расстояний между элементами решетки, а потому определение энергии сопряжено с затруднениями.

§ 6. Явление релаксации.

Если какой либо силой F вызывать в твердом теле деформацию, то, для сохранения постоянства величины этой деформации с течением времени, необходимо силу постепенно уменьшать. Явление релаксации, т. е. уменьшение с течением времени способности сопротивляться внешнему воздействию, тесно связано с явлением внутреннего трения.

Несмотря на ряд исследований можно считать, что релаксация почти не изучена и ее закон не установлен. Пока у нас нет теоретического подхода к этому явлению. Формулы Максвелла и Шведова не справедливы для большинства тел. Соотношение, установленное Максвеллом:

$$\eta = NT, \dots \dots \dots (1)$$

где η — внутренне трение, N — модуль сдвига и T — время релаксации, т. е. тот промежуток времени, в течение которого сила убывает в e раз, где e — основание натуральных логарифмов, не может оправдываться, так как величина внутреннего трения зависит от угловой скорости сдвига.

Установление закона релаксации, выяснение природы этого явления, влияние величины кристаллитов на релаксацию и т. д. — все эти вопросы являются настолько насущными и для теории и для практики, что ими стоит заняться.

Мне кажется, что релаксация должна подчиняться следующему дифференциальному уравнению:

$$-\frac{dF}{dt}t = \text{Const.} \quad (2)$$

т. е. скорость убывания силы при постоянстве деформации обратно пропорциональна промежутку времени t от начала приложения силы.

§ 7. Влияние магнитного поля на прочность металлов.

Известно следующее явление. Если железный образец растягивать то он намагничивается; при разрыве обе его половины оказываются магнитами.

Если считать, что элементарные магнитики представляют из себя некоторые частицы не симметричные относительно движущихся в них электронов, то можно предполагать, что при растяжении железного стержня элементарные магнитики поворачиваются и располагаются своими магнитными осями вдоль оси стержня. Вместо хаотического распределения частиц получается определенная ориентация, и, как следствие ее, появляется намагничивание, при чем прочность металла может измениться.

Можно ожидать, что влияние магнитного поля на пара и диамагнитные металлы будет противоположное, т. е. если прочность парамагнитных метал-

лов в продольном магнитном поле возрастает, то для диамагнитных—она должна уменьшаться, в поперечном магнитном поле должно быть обратное явление.

Вероятно к этой группе явлений можно отнести старое наблюдение Дюфура ⁴⁾, который нашел, что сопротивление на разрыв медных проволок при продолжительном пропускании электрического тока уменьшается, а для железных проволок—увеличивается. Здесь могут быть две причины: или под влиянием электрического тока развивается хотя бы небольшое количество теплоты, которое способствует росту кристаллитов, или прочность металлов изменяется под влиянием магнитного поля, создаваемого вокруг проволоки электрическим током.

Во всяком случае влияние магнитного поля на прочность металлов, по-видимому, почти не изучено, между тем как этот вопрос интересен с теоретической стороны.

Кроме влияния постоянного продольного и поперечного магнитных полей следует еще изучить влияние переменного поля, которое заставляет элементарные магнетики поворачиваться то в ту, то в другую сторону.

§ 8. Заключение.

В настоящей статье я далеко не исчерпал те вопросы, которые следует изучать экспериментально. Даже у меня этих вопросов больше, чем я указал. Например, я совершенно не затронул вопрос о так называемых монокристаллах, между тем как изучение свойств металлических монокристаллов представляет большой интерес с теоретической стороны. Далее, я не коснулся вопроса об исследовании твердых тел посредством лучей Рентгена. Применение этих лучей к исследованию структуры тел настолько велико и настолько плодотворно, что в краткой статье невозможно даже сделать беглого обзора.

Для меня ясно одно, что необходимо установить самую тесную связь между чистой физикой и техническими науками. Необходимо, чтобы физики и техники работали над одними и теми же вопросами, имеющими значение для промышленности и техники. Благодаря такой связи техник сможет находить наилучшие способы для того или иного производства. Необходимость такой связи ясно осознана за границей, где крупные промышленные предприятия для улучшения производства основывают громадные научно-исследовательские институты, в которых ученые ведут чисто научную работу, иногда не связанную непосредственно с производством. Расходы на содержание таких институтов быстро и с излишком окупаются.

Я наметил здесь только те вопросы, которые могут представлять одинаковый интерес, как для физиков, так и для техников.

Томск.

Декабрь 1924 г.

⁴⁾ Dufour. Pogg. Ann. 99, 611 (1856).