# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ [1])

*А. Ф. Иоффе, Ленинград.*

## Упругое последействие.

Электрическая теория кристаллических решеток строит схему упругого тела, соответствующую до некоторой степени свойствам кристаллов. Истинное же поведение твердых тел значительно сложнее, чем позволяет предположить эта схема. Некоторые из экспериментальных фактов, повидимому, однако, противоречат основному представлению о кристалле как о равновесном состоянии твердого тела. Для объяснения этих противоречий мы должны углубиться в детали механизма этих явлений.

Прежде всего мы обратимся к явлениям, происходящим ниже предмета упругости, т. е. соответствующим очень малым деформациям. Здесь с самого начала мы встречаемся с затруднением объяснить упругое последействие, явление, свойственное в большей или меньшей мере всем твердым телам. Сила, приложенная к любому твердому телу, вызывает напряжение, непрерывно изменяющееся во времени. Применяя чувствительные методы наблюдения, мы можем заметить нечто вроде сползания, которое следует за начальной деформацией в течение многих месяцев после того, как сила, вызвавшая деформацию, была удалена. При удалении силы главная часть напряжения исчезает со скоростью звука. Но некое остаточное напряжение остается и исчезает медленно, асимптотически приближаясь к начальному со-

[1]) Статья представляет собою извлечение из находящейся в печати книги автора „Физика кристаллов“.

Физический Ин-т Библиотека Академии Наук СССР

стоянию. После достаточно долгого времени тело совершенно восстанавливается, и в нем нельзя заметить никаких остаточных свойств. Производя деформацию бесконечно медленно, мы можем получить обратимый процесс. Наоборот, при конечной скорости деформация необратима и сопровождается потерей энергии. При повторном круговом процессе упругое последействие приведет к упругому гистерезису. Вследствие упругого последействия колебания сильнее затухают и звук становится более глухим. Далее, Кельвин обнаружил, что при длительном действии колебаний затухание все усиливается; он назвал этот эффект упругой усталостью. Первоначальные свойства восстанавливаются либо после нагрева, боли после продолжительного отдыха. Так, например, колеблющаяся проволока постепенно утомляется и приходит в нормальное состояние лишь после некоторого отдыха.

Подобные антропоморфизмы применяются к упругим процессам на основе замеченной аналогии между явлением упругого последействия и свойствами человеческой памяти. В самом деле, из описанных выше фактов следует, что форма и размер твердого тела не являются однородной функцией внешних сил, как того требовали бы наши рассуждения, но зависят от всей предшествующей его истории. Всякое воздействие вызывает изменение, которое исчезает весьма постепенно. В каждом данном состоянии мы находим следы воздействия сил давным-давно удаленных, но все еще и теперь продолжающих действовать.

Было бы совершенно безнадежно пытаться объяснить явления, подобные описанным нами, поскольку мы рассматриваем вообще правильную кристаллическую решетку. Необходимо, однако, отметить, что эти явления никогда не были обнаружены в одиночных кристаллах. Обычно изучаемые образцы представляют собою аггрегаты мелких кристаллов, отличающихся крайней сложностью и неоднородностью. Как в свое время показал Максвелл, в такого рода материалах могут иметь место явления, подобные внутреннему трению или упругому последействию. В самом деле, наибольшее упругое последействие было найдено в наиболее неоднородных телах, как то: резина, воск, шелк и т. п. Этот эффект

оказывается значительно меньше в металлах и в стекле и особенно мал в кварцевых нитях. Возникает вопрос, является ли неоднородность единственною причиною последействия. Не окажется ли правильно построенный одиночный кристалл совершенно свободным от какого-либо последействия.

Для такого исследования я выбрал кварц, ибо кварц может быть легко получен в виде образцов подходящих размеров. Его предел упругости весьма велик, и вплоть до момента разрыва в нем нельзя наблюдать никакой остаточной деформации. Его твердость и прозрачность позволяют уменьшать число экспериментальных ошибок. Наконец, я был приведен к изучению именно кварца вопросом, предложенным мне Рентгеном для моей докторской диссертации. Вопрос этот гласил: является ли деформация или напряжение первопричиной пьезо-электричества? Наблюдая появление пьезо-электричества на поверхности кварцевой пластинки во время последействия, мы должны приписать его деформации, так как ни нагрузка, ни напряжения, следовательно, не меняются. Если бы, наоборот, первопричиной пьезоэлектричества было напряжение, заряды не должны были бы появиться под действием постоянного напряжения при последействии. Я лично сомневался в существовании последействия в кристаллах кварца вообще и начал с измерения величины этого предполагаемого явления последействия.

Рис. 1.

В первом примененном мною методе я пользовался пьезоэлектричеством для измерения последействия. Тонкая пластинка кварца, вырезанная перпендикулярно к пьезо-электрической оси с главной осью, направленной по ширине пластинки, была снабжена серебряными электродами и подвергалась нагрузке. Электроды были отделены от заземленных концов посредством узких изолирующих полосок, как показано на рис. 1.

Один из электродов был заземлен. Другой сначала под нагрузкой кратковременно заземлялся, а потом присоединялся к электрометру. Малый заряд, появляющийся на



Физический ин-т Библиотека СССР

электрометре, может быть легко объяснен утечкой со свободных полосок кварца, отделяющих электроды от оправ на концах. Длина электродов составляла около 80 *мм*, а ширина изолирующих промежутков около 0,1 *мм* каждый. Допустив, что половина созданного нагрузкой заряда притечет к электроду, мы должны ожидать, что около 0,1 % всего произведенного нагрузкой заряда притечет к электроду со стороны. Таким образом точность метода составляла около 0,1 %, и таковы были и отклонения электрометра. Полагая, что если бы упругое последействие существовало, оно бы создавало заряды совершенно так же, как упругое напряжение, мы должны заключить, что наблюденное последействие в исследуемой пластинке не превышает 0,1 % деформации.

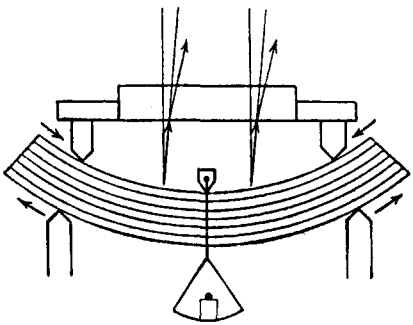

Рис. 2.

Однако пьезо-электрический метод связан с определенным кристаллом и определенной его кристаллографической ориентацией. Кроме того, этот метод заключает в себе гипотезу, хотя не лишенную смысла, но и не лишенную возражений. Я поэтому перешел к более общему методу, позволяющему большую точность. Я измерял изгиб пластинки, опирающейся на две призмы. Для того чтобы исключить влияние смещения ребер призм, поддерживающих пластинку, и деформации всего прибора, я исследовал изменение расстояния между серединой прогнутой пластинки и стеклянной пластинкой, опирающейся посредством трех винтов на кварцевую пластинку. Установка показана на рис. 2.

Монохроматический свет натрия отражался одновременно и от нижней поверхности стеклянной пластинки, покрытой полупрозрачным слоем серебра, и от верхней поверхности кварца, давая интерференционные полосы. При медленном прогибе кварцевой пластинки полосы перемещаются. Всякий раз, когда расстояние между двумя пластинками возрастает

на полволны примененного света натрия, темная интерференционная полоска перемещается на место соседней полоски. Положение полос по отношению к оптическому кресту отмечалось посредством трубы, и от времени до времени измерялся ход деформации.

Вначале была исследована ранее описанная пьезо-электрическая пластинка. Весь прогиб составлял около 1 000 полос (500 длин волн). Против ожидания была обнаружена медленно ползущая деформация, превосходящая размеры ошибок наблюдения. Прежде чем, однако, приписать этот прогиб упругому последействию, мы должны заняться рассмотрением возможных систематических ошибок, созданных побочными явлениями. Эти явления могут быть предсказаны на основании второго начала термодинамики.

Тепловое расширение требует, чтобы всякое изменение размеров вызывало вторичное изменение температуры, с своей стороны уменьшающее деформацию. В то время как температурное изменение исчезает, деформация растет от своего первоначального адиабатического значения до окончательного изотермического. Таким образом создается эффект, симулирующий явление последействия. Разность между изотермическими $S$ и адиабатическим $\sigma$ модулями равна

$$S-\sigma=J\frac{a_1a_2T}{\rho C_v},$$

где $a_1$ и $a_2$ суть два коэффициента теплового расширения параллельно и перпендикулярно к оси, $T$ — абсолютная температура, $J$ — механический эквивалент тепла; $\rho$ — плотность, а $C_v$ — теплоемкость при постоянном объеме. Для кварца находим:

$$\frac{S-\sigma}{S}=0{,}0021.$$

Полный прогиб в 1 000 полос будет сопровождаться вторичной деформацией, в 2,1 полосы. Однако, вычисляя скорость этой деформации, мы находим, что это явление не может считаться ответственным за наблюденное упругое последействие. В самом деле, прогиб сжимает верхние слои и растягивает нижние слои кварцевой пластинки. Первые

будут нагреты, а вторые охлаждены. При деформации возникает разность температур в $2{,}5 \cdot 10^{-2}$ градуса Цельсия между поверхностями и этим создается температурный градиент в пластинке. Рассчитывая процесс выравнивания температур через теплопроводность пластинки, мы убеждаемся, что остающийся градиент, значит и остающаяся деформация спускаются до 1 % своего значения через первые 0,07 секунд. Мы же начинаем отмечать эффект лишь после того, как протечет это время. Остающийся тепловой эффект ничтожно мал и не превосходит грани случайных ошибок.

Помимо вторичного теплового явления деформация пьезоэлектрического кристалла должна сопровождаться вторичными электрическими эффектами. Расчет, основанный на втором начале термодинамики, определяет электрическую деформацию в 0,9 % первоначальной деформации, т. е. в 9 полос при полной деформации в 1 000 полос. Малая электропроводность кварца наводит на мысль, что вторичная электрическая деформация будет исчезать значительно медленнее, чем тепловая. Фактически известно, что заряд, изолированный кварцем, стекает постепенно в течение ряда дней.

Мы можем легко вообразить себе распределение зарядов в изогнутой пластинке кварца. Разделим мысленно пластинку вдоль на большое число тонких листков (рис. 2). Верхний листок будет особенно сильно сжат. Вниз сжатие постепенно уменьшается, достигает нуля в каком-то среднем слое и переходит дальше в растяжение по мере приближения к нижней поверхности. Каждый из листков может быть рассматриваем как наэлектризованная благодаря напряжению пластинка, несущая противоположные заряды на обеих поверхностях. Заряд пропорционален напряжению. Граница между слоями будет заряжаться положительно верхним и отрицательно нижним слоем, но заряды будут неодинаковы. Разностный заряд одного и того же знака останется на каждой пограничной поверхности, создавая внутри всей пластинки кристалла объемный заряд того же знака. Заряд противоположного знака, но равной величины, что и объемный заряд, возникнет на верхней и нижней поверхностях (рис. 3). Каким путем могут теперь нейтрализоваться эти

заряды? Направление, перпендикулярное к поверхности, т. е. направление наибольшего градиента, есть в то же время наименее проводящее направление в кварце (как перпендикулярное к главной оси). Направление, совпадающее с главной осью, обладает, примерно, в 1 000 раз большей электропроводностью — это есть в данной пластинке направление, параллельное ширине пластинки. Однако геометрические условия (длина пути и поперечное сечение), примерно, в 1 000 раз ухудшают это направление. Естественно предположить, что, покрыв поверхность, например, проводящим слоем серебра, мы можем облегчить этот второй путь и несколько ускорить взаимную нейтрализацию зарядов после изгиба. Ускорение процесса нейтрализации должно также ускорить соответствующую деформацию. Это предположение было подтверждено на опыте, впрочем еще недостаточно убедительно, чтобы иметь возможность с уверенностью доказать электрический характер упругого последействия в кварце.

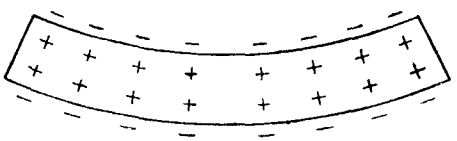

Рис. 3.

Было желательно удалить объемный заряд более непосредственным и более действительным способом. Я попытался поэтому увеличить внутреннюю электропроводность кварца посредством ионизирующих лучей. Как раз в то время такой эксперимент был поставлен Дж. Дж. Томсоном. Однако наблюденное им увеличение тока под действием рентгеновых лучей было объяснено Рентгеном как ток, идущий вокруг твердого диэлектрика через воздух. Предполагалось, в особенности в этом был уверен Рентген, что истинное увеличение электропроводности здесь не имеет места. Первоначальные наблюдения над действием лучей радия на скорость последействия дали, однако, отрицательный результат. Впрочем, я при этом заметил, что, в то время как приближение или удаление радия почти не влияло на деформацию, самый процесс ускорялся с каждым днем опытов с лучами радия. Оказалось, что под влиянием лучей электропроводность возрастает постепенно в течение многих

дней, приближаясь к некоторому максимальному значению, во много раз превосходящему первоначальную электропроводность кварца. Увеличивая электропроводность до наибольшего возможного значения, мне удалось добиться того, что последействие чрезвычайно сильно ускорялось, и получить такое состояние, при котором, повидимому, все последействие заканчивалось в измеримый промежуток времени. В этом случае весь эффект последействия оказывался равным значению, вычисленному для вторичной электрической деформации, а именно он составлял 7,2 полос при начальном изгибе в 800 полос. Рис. 4 изображает деформацию как функцию времени при различных состояниях электропроводности. Нижняя кривая соответствует нормальным условиям, самая верхняя кривая относится к случаю наибольшей электропроводности, а прямая линия соответствует вычисленной чистой электрической деформации.

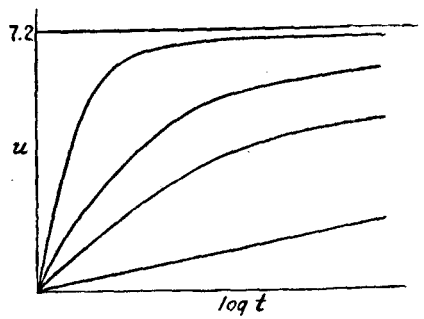

Рис. 4.

Полное наблюденное упругое последействие в пьезоэлектрической пластине никогда не превышало вторичного электрического эффекта. Таким образом упругое последействие изменяется под действием ионизирующих лучей, которые вряд ли могут вызвать непосредственно упругие явления. В тех случаях, когда я был в состоянии измерить полный эффект, он оказывался равным электрическому. Следовательно, не остается никаких оснований предполагать, будто существует упругое последействие независимо от ожидаемого термодинамического вторичного явления. Тем не менее граница для наименьшего возможного реального упругого последействия лежала еще недостаточно низко. Я исследовал затем кварцевые пластинки, различно ориентированные по отношению к кристаллографическим осям, и обнаружил, что наблюденный упругий эффект всегда меньше, чем электрический.

Расчет показывает, что пластинка, вырезанная так, что ее длина параллельна главной оси, не должна приобретать объемных зарядов под действием изгиба. В такой пластинке вторичная электрическая деформация невозможна, а потому все измеренное упругое последействие должно быть реальным. Однако в такой пластине никакого последействия не было найдено. Полный прогиб был увеличен до 3 000 полос. Начиная с 1 секунды и продолжая наблюдение до 24 часов после деформации, я не мог заметить большего смещения, как в 0,1 полосы. Анализ всех возможных случайных ошибок приводил к пределу точности около 0,1 полосы. Отсюда мы можем заключить, что реальное упругое последействие в кварце, если бы таковое существовало, не могло быть больше, чем $3 \cdot 10^{-5}$ деформации. Это на самом деле весьма низкий предел, если принять во внимание размер обычно наблюдаемых упругих последействий, доходящих до $3 \cdot 10^{-2}$ деформации, а иногда еще выше.

Этот результат, полученный в 1904 г., был подтвержден в 1906 г. М. Брилюэном (M. Brillouin), пользовавшимся кварцевыми пружинами и доказавшим отсутствие последействия. Это обстоятельство ныне нашло себе широкое применение в радиотехнике. Благодаря ничтожно малому затуханию пьезо-электрические осцилляторы из кварца отличаются исключительно четким резонансом при высоких частотах.

Впоследствии этот результат был обобщен. Было показано, что одиночные кристаллы рутила, вольфрама, цинка, меди, висмута не обладают никаким упругим последействием ниже предела упругости.

Первое противоречие в теории кристаллических решеток, которое мы встретили в области идеальной упругости, ныне разрешено в том смысле, что все осложняющие явления, как то: упругое последействие, упругий гистерезис, упругая усталость и т. п., отсутствуют в чистых одиночных и правильно построенных кристаллах. Эти эффекты проистекают от неправильностей в неоднородных телах, от перехода через предел упругости или прочности в некоторых малых областях внутри тела и от взаимодействия между кристаллическими зернами.

Новые трудности оказываются перед нами, как только мы достигаем предела упругости и вступаем в область пластичности.

## Предел упругости.

Результаты исследования металлов и других мелкокристаллических аггрегатов обычно сводятся к следующему определению упругих свойств твердого тела: во всей области, где тело является идеально упругим, оно следует закону Гука, иначе говоря, до тех пор, пока не появилось остаточное изменение, напряжение пропорционально нагрузке. Уклонение от закона Гука, согласно выше приведенному определению, наблюдается обычными методами испытательных лабораторий и свидетельствует о появлении остаточной деформации. Обычно предполагается, что предел пропорциональности может быть отождествлен с пределом упругости. Более тщательные исследования показали, однако, что уклонения от закона Гука наблюдаются подчас, прежде чем достигнут предела упругости, и что предел пропорциональности понижается непрерывно по мере увеличения точности измерений. Но закон Гука представляет собою не что иное, как первый член ряда, изображающего силовую функцию, разложенную по $\Delta r$. Сила

$$f = \frac{mA}{r^{m+1}}$$

может быть изображена в виде

$$f = f_0 + f' \Delta r + \frac{1}{2!} f'' (\Delta r)^2 + \frac{1}{3!} f''' (\Delta r)^3 + \ldots$$

Полагая $f_0 = 0$ и пренебрегая членами, содержащими $r$ в степени выше первой, мы получаем закон Гука

$$f = f_0' \Delta r.$$

Таким образом становится очевидным, что предел пропорциональности не может быть обнаружен, ибо на самом деле нельзя ожидать, что существует пропорциональность между силой и деформацией. Наблюденный предел пропор-

циональности есть функция точности измерений и размера ошибок опыта. То обстоятельство, что эта величина была измерена и применялась в технических испытаниях, показывает, что, прежде чем в грубых измерениях становится заметным уклонение от закона Гука, появляется новое явление — остаточная деформация, иными словами: пластическая деформация возникает при столь малых нагрузках, что кривая, изображающая зависимость между $f$ и $r$, при этом еще не успевает заметно уклониться от прямой линии.

При технических испытаниях пользуются еще третьим пределом, при котором происходит легко наблюдаемая деформация, минимум в полпроцента. Этот предел именуется пределом текучести. На рис. 5 представлена типичная кривая, на которой виден как предел упругости (*E. L.*), так и предел текучести (*Y. P.*).

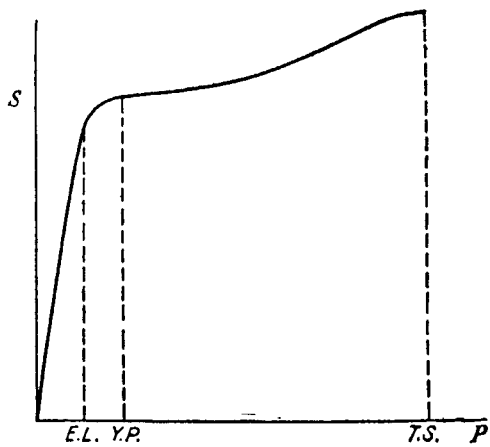

Рис. 5.

Микроскопическое исследование нового явления остаточной деформации, наступающего при переходе через предел упругости в кристаллических аггрегатах, показало, что текучесть состоит из ряда малых элементарных сдвигов либо между отдельными кристаллическими зернами, либо внутри одиночных кристалликов. В первом случае мы наблюдаем на полированной поверхности большие ступени в направлении максимального скалывающего напряжения, т. е. под углом в 45° к оси растягивающих усилий. Во втором случае в микроскоп наблюдаются плоскости скольжения внутри отдельных кристалликов, связанные с определенными их кристаллографическими плоскостями, как то: плоскость основания в гексагональных кристаллах, плоскости куба или ромбического додекаэдра в кристаллах кубической симметрии.

Можно было предполагать, что изучение одиночных кристаллов позволит свести эти сложные явления к простым. В противоположность упругому последействию и упругой усталости, пластическая деформация может быть, однако, наблюдена и в одиночных кристаллах, как то: каменная соль, гипс, цинк, алюминий и т. д. Эффект этот легко замечается, если подвергать изгибу или кручению кристалл каменной соли, нагретый до 600° Ц. Пластичностью своей каменная соль при этом напоминает воск. Тем не менее, изогнутый или скрученный кристалл продолжает оставаться прозрачным и как будто сохраняет цельность и прочность нормального кристалла. Отпущенный, он, однако, уже не возвращается к своей первоначальной форме, но остается изогнутым. Существование изогнутой кристаллической решетки, сохраняющей это состояние без участия внешних сил, очевидно противоречило бы представлению о решетке как о расположении, соответствующем минимуму потенциальной энергии.

Надо заметить, что изогнутость внешней формы отнюдь не означает, что непременно изогнута кристаллическая решетка, ибо, разумеется, мы можем вырезать из нормального кристалла образец любой желаемой формы, не изменяя вовсе внутренней структуры. В самом деле, предположим, что ряд слоев кристаллической решетки движется во время пластической деформации строго параллельно какому-либо кристаллографическому направлению. Мы можем представить себе, что кристалл продолжает существовать, когда атомы скользящего слоя пришли в новое взаимное положение, аналогичное нормальной решетке, соответствующее расстоянию, равному целому кратному атомных расстояний, как показано на рис. 6.

Таким образом можно получить любую остаточную деформацию без изменения нормальной структуры решетки. Такой механизм вполне совместим с теорией решеток. Несколько простых опытов убеждают нас, однако, что приведенное объяснение не соответствует истинной пластической деформации кристаллов. В самом деле, деформация, соответствующая рис. 6, должна была бы восстанавливать кристалл

и возвращать его к нормальному состоянию; таким образом мы могли бы ожидать, что изогнутый образец обладает *свойствами нормального кристалла*. Далее, поверхности скольжения должны быть плоскими, следуя плоскостям правильной кристаллической решетки. Вместо плоскостей мы обнаруживаем, однако, поверхности скольжения, изогнутые параллельно внешней изогнутой форме кристалла. Это показывает, что каменная соль претерпела какое-то внутреннее изменение. С другой стороны, как уже было сказано, мы не можем согласиться с наиболее простой картиной, вытекающей из опытов со сдвигом, а именно представить себе, что изогнутая решетка может существовать, не будучи удерживаема в этом виде внешними силами.

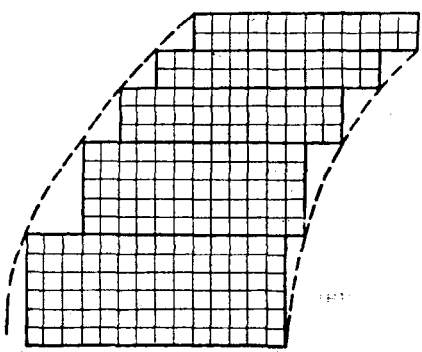

Рис. 6.

Другой путь объяснения заключался бы в том, чтобы приписать кривизну влиянию внутренних напряжений, остающихся в результате неоднородной деформации изгиба или кручения. Будь это объяснение правильным, кривизна должна уменьшиться, если от изогнутого кристалла отколоть небольшой кусок так, чтобы разность напряжений была не велика; экспериментальная проверка этого следствия дала, однако, отрицательный результат. Мы раскололи согнутый кристалл каменной соли на два искривленных куска. Один из них мы нагревали до 700° в продолжение двадцати четырех часов. При этой температуре уже ничтожная сила вызывает в кристалле остаточную деформацию. Если бы в кристалле существовали внутренние напряжения, достаточные по величине, чтобы изогнуть кристалл, эти напряжения должны были бы исчезнуть при нагреве. Осторожно остудив, мы сложили снова оба куска кристалла вместе и имели возможность убедиться, что как внешняя форма, так и внутренние изменения, выразившиеся в искривленных

поверхностях спайности, не исчезли от нагревания. Хотя внутренние напряжения и существуют в пластически деформированном кристалле, они не являются ни единственной, ни даже главной причиной изменения свойств кристалла.

Следовательно, загадка пластичности кристаллов не разрешается ни механизмом скольжения, ни влиянием внутренних напряжений.

Нам небходимо было узнать, какое же изменение производит на самом деле в кристаллической решетке пластическая деформация. Как только, благодаря открытию Лауэ, был разработан метод исследования кристаллических решеток рентгеновыми лучами, М. В. Кирпичева и я применили этот метод к изучению пластических деформаций. Мы действительно обнаружили существенное изменение картины Лауэ от пластически деформированных кристаллов. Вместо отдельных четких пятен мы увидели картину радиальных пучков, исходящих из каждого пятна, как это наблюдается теперь при исследовании волокнистых структур. Объяснение этого явления было сложно вследствие сложности самой неоднородной деформации.

Мы поэтому приступили к исследованию однородной деформации, как то: одномерного сжатия и растяжения. Всестороннее давление, легко получаемое посредством гидростатического давления, должно быть исключено, ибо сдвиг является основной характерной чертой пластической деформации. Действительно, при однородной деформации понимание наблюденных явлений оказывается значительно легче. Вторым существенным усовершенствованием было визуальное наблюдение картины Лауэ на флюоресцирующем экране во время деформации. В темной комнате через 10—15 минут чувствительность глаза оказывается достаточной, чтобы наблюдать наиболее яркие пятна картины Лауэ. Мы применяли обычную рентгеновскую трубку при 70 киловольтах и 10 миллиамперах. При растяжении не удавалось визуально заметить нагрузку, вызывающую пластическую деформацию. Однако фотографируя на одной и той же пластинке картины слабо и сильно нагруженного кристалла и пропуская рентгеновы лучи через очень тонкие диафрагмы, мы оказались в состоя-

нии измерить пластическую деформацию. Для исследования изменения углов необходимо пользоваться сплошным спектром, для исследования изменения размеров — монохроматическим. Упругий изгиб и кручение могут быть наблюдены и легко измерены как на фотографической пластинке, так и на флуоресцирующем экране.

Для качественного исследования явлений, протекающих во время пластической деформации, визуальный метод имеет то преимущество, что он показывает не окончательный результат, а весь процесс в целом.

Постепенно увеличивая нагрузку кристалла, мы, наконец, достигаем некоторого предела, после которого картина

Рис. 7.

Лауэ внезапно меняется (рис. 7). Вместо системы пятен, соответствующих отражениям от одного ряда плоскостей кристалла, на картине оказываются несколько пересекающихся систем пятен, соответствующих нескольким кристаллам. Число таких систем возрастает по мере того, как прогрессируют деформации. Все эти системы имеют, однако, одну общую точку на картине — значит, и одну общую плоскость в кристалле. Таким образом можно видеть, что одиночный кристалл оказался раздроблен на несколько кусков, несмотря на то, что прозрачность и жесткость получившегося аггрегата придают ему вид одиночного кристалла. Смещение и вращение обломков соответствуют скольжению в некоторой определенной кристаллографической плоскости (плоскость 110 в случае каменной соли) и вращению вокруг оси, перпендикулярной к плоскости, оставшейся неизменной,

Физический Ин-т Библиотека Академии Наук СССР

соответствующей яркому неизменному пятну. Эта ось может быть либо перпендикулярной к плоскости скольжения, или же может лежать в этой плоскости (например, в каменной соли это — направление оси [100]).

Нагрузка, при которой наблюдается первое изменение рентгенограммы, соответствует какому-то необратимому разрушению решетки и может быть названа пределом текучести. Дальнейшее исследование показало, что первый необратимый сдвиг не всегда возникает немедленно по достижении этого предела и что последующие сдвиги отделены друг от друга промежутками времени. Измеренный предел до некоторой степени зависит поэтому от скорости нагрузки. Эта ошибка прогрессивно уменьшается, когда мы переходим к более высоким температурам. Но даже и при комнатной температуре эта ошибка у каменной соли может быть понижена до 1 %.

Существование такого определенного предела многократно оспаривалось. Опыты, произведенные над металлами и стеклами, привели к мнению, будто „все течет более или менее медленно". На этом основании представление об определенном пределе принималось неохотно. Разумеется, невозможно установить, что данное тело не течет, пока самый термин „течь" не ограничен некоторой минимальной скоростью. Мы можем, однако, утверждать, что при 500° Ц. нагрузка на 2 %, не достигающая измеренного предела, не вызывает ни малейшего видимого изменения рентгенограммы, действуя на образец в течение 24 часов; между тем нагрузка, на 2 % превышающая этот предел, вызывает изменение спустя одну секунду. Физически это означает, что этот предел имеет определенное физическое значение, даже если практически измеренное значение превышает теоретический предел, соответствующий бесконечно долгому времени.

Далее, мы убедились, что это явление зависит от внутренних напряжений, но не зависит от размера кристалла. Мы выбирали кристаллы одной и той же кристаллографической ориентации, но с различным отношением поперечного сечения к периметру. Предел текучести, измеренный

при четырех температурах между 20° и 600° Ц., оказывался всегда пропорциональным площади поперечного сечения, но не зависел от периметра (рис. 8). Предел оказывался также одним и тем же для сжатия и растяжения. Кристаллы каменной соли различного происхождения, а следовательно с различными примесями и с поверхностью, обработанной

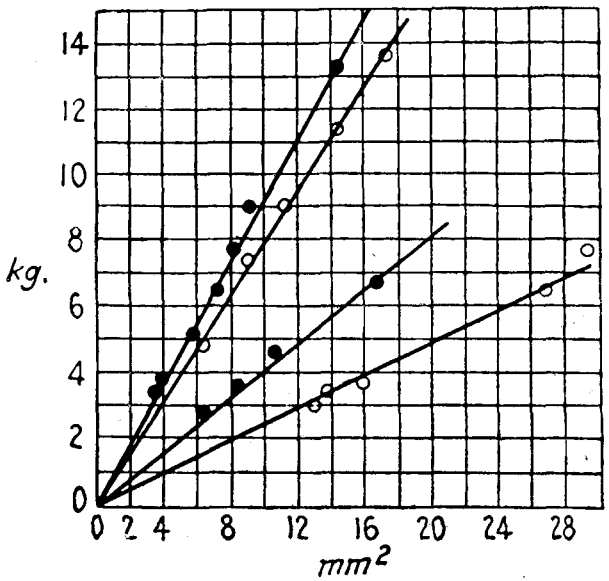


Рис. 8.

различными путями, например: растворенной в воде, полированной, сколотой и т. д.,—все имели один и тот же предел, различаясь не более как на 2%. Мы, можем, следовательно заключить, что предел текучести, измеренный рентгеновыми лучами, имеет вполне определенный физический смысл.

Мы изучали затем зависимость этого предела от температуры и обнаружили, что предел текучести быстро убывает с ростом температуры и достигает нуля в точке плавления (рис. 9). Два гетерополярных кристалла, как то NaCl и $NaNO_3$, затем металлы Al и Mg, весьма сходно вели себя в этом отношении. Мы пытались выяснить, обращается ли предел

текучести в точке плавления прямо в нуль, или же, сохраняя некоторое определенное, но малое значение, он скачком переходит в нуль уже в жидком состоянии. Опыт мог лишь ответить следующим образом: скачок меньше некоторой измеримой величины. Мы установили, что этот скачок меньше $\frac{1}{100}$ значения предела текучести при комнатной температуре. При комнатной температуре предел этот оказывается равным, примерно, 3 *кг*. Мы поэтому нагрузили кристалл 30 *г* и, постепенно повышая температуру, следили за изменением картины до достижения точки плавления. Четкость краев доказывала, что мы не достигли еще точки плавления. Помимо этого доказательства, начало плавления отчетливо обнаруживается по появлению неправильно рассеянных рентгеновых лучей и по общему просветлению флуоресцирующего экрана.

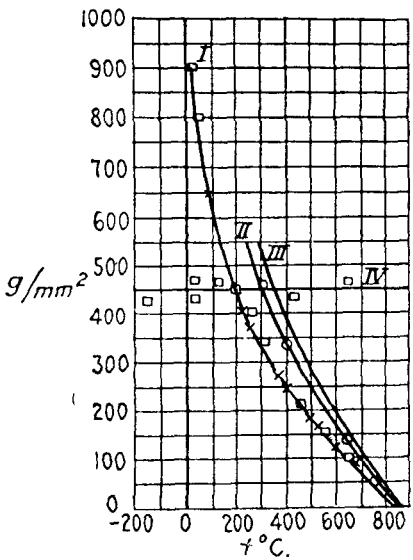

Рис. 9.

Можно думать, что совпадение точки плавления с точкой, где предел разрушения равен нулю, имеет реальное физическое значение, если предположить, что механизм плавления эквивалентен своего рода разрушению, вызывающему наличие предела при низких температурах. Когда малейшее скалывающее напряжение достаточно, чтобы вызвать разрушение, существование решетки становится невозможным, а тепло, поглощенное кристаллом, затрачивается на то, чтобы привести атомы в новое положение равновесия. Возможно, что это может объяснить то обстоятельство, что мы не знаем примеров перегретых кристаллов, между тем как все прочие пределы, как правило, могут быть превзойдены.

В статье, напечатанной летом 1926 г. в „Zeitschrift für Physik", Георгиев указывает, что он обнаружил в висмуте конечный предел упругости при температуре плавления. Вид его кривой, которая, повидимому, вначале спускается прямо к нулю и внезапно, перед самой точкой плавления, меняет свой ход, наводит на мысль, что его результаты были искажены каким-то процессом рекристаллизации. Мы занимаемся ныне более детальным исследованием того же вещества.

Предел текучести зависит от направления разрывающих усилий в кристалле, вызывающих сдвиги в плоскости (110). Сдвиг происходит в определенной кристаллографической плоскости, а потому мы можем ожидать, что сдвиг связан не со скалывающим напряжением в этой плоскости, а с разрывающим усилием. На самом деле предел текучести зависит от ориентации натяжения. Это показывает рис. 9, где кривая I соответствует направлению [100] для приложенной растягивающей силы, кривая II измерена для направления [110], а кривая III — для [111].

Следует отметить, что все кривые достигают нуля при одной и той же точке — точке плавления. Численное значение отношения напряжений для двух направлений не соответствует, однако, равным скалывающим напряжениям в плоскостях (110). Предел текучести должен, следовательно, зависеть не только от величины скалывающего напряжения в плоскости (110), но также и от направления скольжения в этой плоскости. Этот результат не представляет собою ничего неожиданного, если только припомнить строение этой плоскости (110) в таком кристалле, как каменная соль. В самом деле, при скольжении по направлению [110] ряд положительных ионов скользит по отрицательным, подобно, напр., поезду, движущемуся по рельсам. При движении в направлении [100] в той же плоскости положительные ионы попеременно притягиваются отрицательными и отталкиваются положительными ионами так, что это движение напоминает движение телеги через ухабы и рытвины. Хотя в общем это заключение удовлетворяется, нам, однако, до

сих пор не удалось найти зависимость предела текучести от ориентации в плоскости (110) и изучить возможность сдвигов в других плоскостях помимо плоскости (110).

## Механизм пластической деформации.

Наблюдение посредством рентгеновых лучей границы разрушения кристалла дает величину силы, вызывающей необратимое изменение в строении кристалла. Кристалл обращается в порошок, и мелкие осколки, слипшись совершенно беспорядочно, скользят и поворачиваются друг относительно друга. Пластическая деформация не нарушает прозрачности кристалла; следовательно при этом разрушении в кристалле не образуется дыр размера длины волны света или больше ее. Далее, прочность кристалла, таким образом разрушенного, не понижается, но, наоборот, для разрыва пластически деформированного кристалла требуется большее напряжение, чем для разрыва однокристалла. Следовательно мы можем заключить, что при пластической деформации частицы расходятся на расстояния, не превышающие размера междуатомных расстояний. Комбинация этих условий с условиями скольжения, требующими, чтобы скольжение происходило лишь в одной плоскости, а именно, например (110), т. е. в плоскости спайности, ограничивает беспорядочность расположения возможных обломков. В результате пластической деформации посредством сжатия или растяжения мы получаем не спрессованный порошок, но нечто, напоминающее волокнистую структуру, обладающую определенной осью или же определенной плоскостью симметрии. Полное восстановление образца после такого разрушения не может быть достигнуто посредством обратной деформации. Процесс, имеющий место при пластической деформации, необратим не только в том смысле, что произведенная работа превращается в теплоту, но и в том смысле, что, даже производя работу в обратном направлении, мы не сможем восстановить первоначальное состояние.

Несомненное внутреннее разрушение, имеющее место при пластической деформации, не исключает, однако, возможно-

сти остаточных явлений другого типа, каковые мы упомянули при рассмотрении изгиба каменной соли, а именно деформации, состоящей из ряда скольжений параллельно одной из кристаллографических осей без вращения. Рентгеновы лучи не могут обнаруживать такой деформации, так как при этом не меняется ориентация атомных плоскостей, отражающих лучи. Однако такая деформация может быть наблюдена другими способами, как то: точное измерение размеров и формы кристалла или же исследование образца в поляризованном свете.

М. А. Левитская измеряла угол между концами прогнутого стержня из каменной соли посредством пучка света, отраженного от трех зеркал, укрепленных на стержне. Она тщательно отметила первое появление остаточной деформации и сравнивала его с грузом, необходимым для появления необратимого изменения, видимого в рентгенограмме. Эти измерения показали, что существует предварительная фаза пластических деформаций, при которых скольжение происходит без вращения, как это примерно изображено на рис. 6. Эта пластическая деформация, хотя также необратимая, и также развивающая теплоту, может быть уничтожена посредством воздействия обратного знака.

Следовательно мы должны различать два предела:

1. Предел упругости, вызывающий первую остаточную деформацию скольжения кристаллических слоев параллельно какому-либо из кристаллографических направлений без заметного вращения.

2. Предел текучести, который сводится к необратимому разрушению решетки кристалла. Он достигается при больших силах и обнаруживается рентгеновыми лучами по повороту решетки. Он состоит в скольжении по двум плоскостям, приводящем к повороту отдельных осколков вокруг одной из осей. Если мы себе представим, для примера, что в каменной соли происходит сдвиг по двум плоскостям (110) и (110) под углом 45° к направлению силы, совпадающему с [100], то мы получаем вращение вокруг оси [100], лежащей в обеих плоскостях скольжения одновременно. За последние годы для многих металлических кристаллов были найдены

плоскости сдвига в целях выяснения процессов холодной обработки металлов. Эти исследования показывают, что указанные свойства каменной соли типичны для всех кристаллов.

Пластически деформированный кристалл уже не является более однокристаллом, но представляет собою аггрегат малых смещенных кристалликов, слипшихся между собою настолько, что они представляют как бы одно целое. Можно спросить, изменяется ли при пластической деформации решетка каждого из осколков в отдельности. Исследование в поляризованном свете показывает наличие напряжений в кристаллах вследствие взаимных воздействий зерен друг на друга. Эти напряжения могут, однако, быть уничтожены посредством отжига кристалла при высокой температуре. Строение отдельных осколков было изучено далее посредством дебайевского метода в монохроматических лучах серебра. Этот метод показывает, что атомные расстояния не зависят от ориентации индивидуальных кристалликов. Было показано, что, несмотря на столь энергичную деформацию всего кристалла отдельные зерна остаются неизменными.

Приведенное выше кажущееся противоречие между возможностью пластической деформации и представлениями о кристаллической решетке разъяснилось. Никогда не наблюдалось изменение кристаллической решетки без наличия внешних сил, уравновешивающих внутренние напряжения, созданные деформацией решетки. Таким образом деформированная решетка должна рассматриваться как равновесное состояние атомов, смещенных под действием одних лишь внешних сил, как и следует из свойств модели, которой мы пользуемся. Вопреки мнению О. Лемана (O. Lehmann), считавшего необходимым допустить, что кристалл, подвергнутый пластической деформации, представляет собой новый тип кристалла (гомеотропия второго рода), оказывается, что осколки такого кристалла не отличаются от первоначального кристалла ничем кроме размеров.

Чрезвычайно мощным и полезным методом изучения деформации в кристаллах является метод наблюдения кристалла в поляризованном свете между двумя николями. Если

кристалл прозрачен и обладает кубической симметрией, то он не будет давать двойного лучепреломления, пока он не подвергнут воздействию внешних сил. Величина двойного лучепреломления пропорциональна скалывающей силе или разности двух главных сил. Оптический метод может быть применен для измерения всестороннего давления, т. е. для определения модуля сжатия. И. В. Обреимов и Л. В. Шубников разработали метод измерения малых изменений показателя преломления, вызванных изменением плотности посредством погружения кристалла в жидкость, обладающую тем же показателем преломления. При этом применяются определенные смеси, позволяющие быстро подгонять показатель преломления жидкости к показателю кристалла. Применяя оба эти метода, мы изучаем объемную деформацию и деформацию сдвига. В изотропных телах или в некоторых кристаллах, вроде каменной соли, этих двух данных достаточно для полного описания напряжений.

Оптическое исследование естественных кристаллов показало, что они уже заранее обладают внутренними напряжениями. Будучи помещен между скрещенными николями, естественный кристалл никогда не может быть доведен до темноты. Продолжительный отжиг от 600° до 700° Ц. необходим для того, чтобы уничтожить все напряжения и сделать кристалл действительно однородным. Конструкция аппарата, применявшегося для нагрузки, была тщательно проработана для того, чтобы создать однородное натяжение по всему сечению кристалла. Это обстоятельство проверялось тем же оптическим методом. Постепенно нагружая кристалл и наблюдая картину в поляризованном свете, мы наблюдали первое появление остаточной деформации при нагрузках, составлявших лишь, примерно, одну десятую тех сил, которые вызывали разрушение целости кристалла в рентгеновых лучах. Четкая, яркая линия появлялась на темном фоне и оставалась после удаления груза. При постоянной нагрузке, слегка превышающей этот предел упругости, через некоторое время появлялась вторая линия, параллельная первой, затем третья и т. д. Все эти линии являются проекциями плоскостей (110). Чаще они внезапно

Физический ин-т Библиотека Академии Наук СССР

пересекают весь кристалл, иногда начиная с одного края и быстро распространяясь через кристалл до другого края.

Компенсируя двойное лучепреломление, удалось измерить напряжения в кристалле и показать, что каждая такая плоскость разделяет кристалл на две части. Верхняя часть растянута, нижняя сжата. Как сжатие, так и растяжение особенно велики на границе и постепенно убывают по мере удаления от плоскости скольжения. Если мы станем рассматривать любой слой кристалла между двумя плоскостями скольжения, то мы заметим, что этот слой растянут в своих нижних слоях и сжат в верхних. Это означает, что все слои подвергнуты изгибающим усилиям. Действительно, когда процесс зашел уже достаточно далеко и образовались очень тонкие прослойки, мы легко можем видеть искривление плоскостей скольжения, доходящее иногда даже до 30°. Распределение главных напряжений, определенное на основе оптических данных, приведено на рис. 10 a.

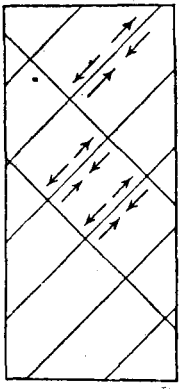

Рис. 10 a.

При постоянной нагрузке промежутки времени между появлениями двух последовательных скольжений постепенно возрастают, пока не наступит полное прекращение появления новых сдвигов; тогда при нагрузке, превышающей первоначальный предел упругости, оказывается достигнутым новое упругое равновесие. Для того чтобы теперь продлить дальше процесс появления сдвигов, приходится увеличивать нагрузку. Чем больше число уже существующих скольжений, тем выше тот предел упругости, при переходе которого появляются новые скольжения. При всякой стадии процесса плоскости скольжения распределены совершенно равномерно. Каждая стадия процесса может быть охарактеризована числом существующих сдвигов, кривизной плоскостей скольжения или же пределом упругости. Общий вид описанной нами картины дан на рис. 10 b.

Явления пластической деформации этого типа состоят из ряда сдвигов, параллельных некоторой кристаллографи-

ческой плоскости, и создаются скалывающим усилием в данной плоскости. Для того чтобы иметь правильное описание этого явления, желательно было изучить сначала лежащее в его основе элементарное явление — чистый однородный сдвиг — в зависимости от ориентации плоскости сдвига, от величины усилия и от температуры. Можно ожидать, что даже в плоскости спайности (110), сдвиг будет зависеть от направления усилия в данной плоскости. Действительно ряд ионов в направлении [100], лежащем в данной плоскости, состоит попеременно из положительных и отрицательных ионов. В нормальной решетке каждый ион встречает ион противоположного знака в соседнем слое. Если следующий слой сдвинется относительно первого в этом направлении, то после смещения на половину междуатомного расстояния отрицательные ионы заменят собою положительные. В этот момент встретятся ионы одинаковых знаков, и слой, который ранее притягивался, теперь станет отталкиваться. При дальнейшем полупериоде перемещения притяжение восстанавливается, и снова встречаются противоположные ионы. Таким образом сдвиг в направлении [100] будет периодически вызывать притяжение и отталкивание скользящих поверхностей. При таких условиях перемещение равносильно движению телеги по ухабам плохой дороги.

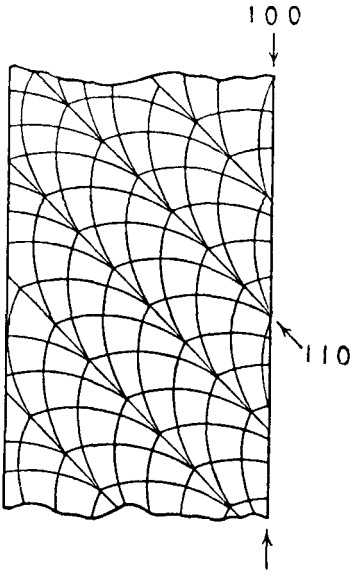

Рис. 10b.

Рассматривая направление [110] в той же плоскости (110), мы видим, что оно состоит из ионов одного знака, чередующихся рядом ионов противоположного знака в следующем слое. Скольжение в этой плоскости будет происходить при постоянном притяжении между скользящими поверхно-

стями. Только размер притяжения будет периодически меняться. Такое перемещение будет походить на движение вагона по рельсам.

На рис. 11 дано распределение ионов в плоскости (110) и указаны направления [100] и [110]. Мы должны представить себе следующий слой с противоположными зарядами над нижним атомным слоем. Для того чтобы создать сдвиг в данном направлении, мы зажимали стержень из каменной соли между стальными державками (рис. 12). Одна из них

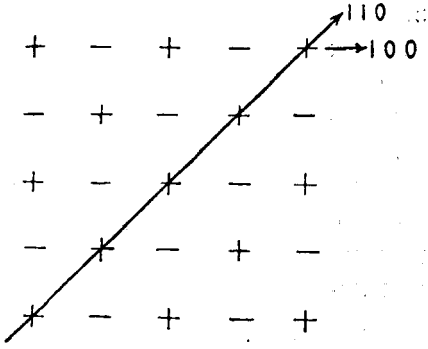


Рис. 11.

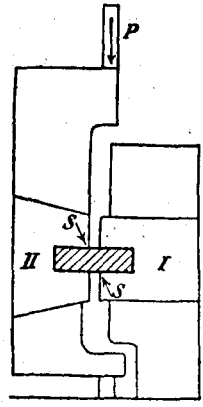


Рис. 12.

(I) была неподвижна, вторая (II) могла перемещаться строго параллельно под действием груза $P$, приложенного в точке над щелью между державками I и II.

При таком устройстве изгиб стержня был доведен до минимума. Изгиб пропорционален кубу длины, в то время как сдвиг не зависит от расстояния между двумя парами, действующими на концах. Чем меньше расстояние между зажатыми концами, тем меньше изгиб. Впрочем, усилия в точках, отмеченных стрелками $S$, быстро превышают предел упругости, возникает пластическая деформация, вызывающая увеличение изгиба. Мы до некоторой степени исключаем этот источник ошибки, уменьшая площадь поперечного сечения в середине посредством надреза, соответствующего площади, зажатой в державках.

Исследование еще не закончено и не дало еще определенных количественных результатов, однако полученные уже некоторые качественные результаты бросают свет на явление пластичности. Исследование было начато проф. П. Эренфестом (P. Ehrenfest) и мною, а затем велось М. В. Классен. Мы обнаружили, что сдвиг нагретой каменной соли и цинка происходит малыми скачками, причем каждый из них сопровождается шумом, напоминающим тиканье часов. В комнате при отсутствии шума эти тики хорошо слышны и следуют через правильные промежутки времени. Можно отметить много сотен тиков, причем частота их зависит от приложенного груза. Скачки становятся заметными и слышными только при значительной уже пластической деформации. В начальной стадии сдвиги наблюдались оптическим методом.

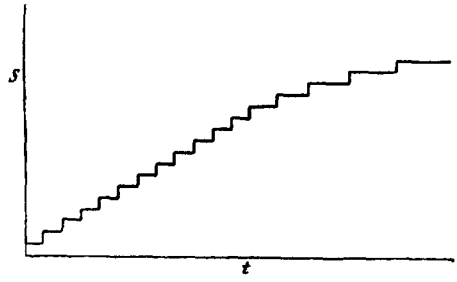

Рис. 13.

М. В. Классен измеряла относительные перемещения державок посредством отражения света от двух зеркал, пользуясь увеличением в 10 000. Она обнаружила, что не только промежутки времени между двумя тиками замечательно постоянны, но что и размер отдельных скачков при данных условиях остается неизменным в пределах 10%. Можно было наблюдать тысячи скачков. Промежутки между скачками, однако, постепенно возрастают, затем скачки становятся редкими и, наконец, прекращаются вовсе. Величина скачка все время остается постоянной. Рис. 13 дает общее представление изменения деформации со временем. Увеличивая груз $P$, мы одновременно увеличиваем частоту скачков. Частота равна нулю при пределе упругости $P_0$, поэтому мы вправе рассматривать частоту как функцию $(P-P_0)$ Размер скачка, повидимому, не зависит от $(P-P_0)$ как при изменении $P$, так и при возрастании $P_0$. При малых значениях $(P-P_0)$ промежуток времени между двумя

скачками может доходить до 30 минут, но закономерность явления остается неизменной.

При низких температурах размер скачков уменьшается. Мы можем считать $S$ функцией температуры.

Как уже было указано выше, предел упругости $P_0$ возрастает с числом $N$ сдвигов, уже произведенных на единицу длины $L$.

Согласно этому утверждению мы можем считать

$$Z = \frac{\Delta N}{\Delta t} = F(P - P_0) \qquad [1]$$

$$P_0 = f\left(\frac{N}{L}\right) \qquad [2]$$

$$S = \varphi(T). \qquad [3]$$

Скорость пластической деформации может быть выражена через

$$v_p = \frac{\Delta S}{\Delta t} = Z \cdot S = \Phi(P_1 N)\,\varphi(T). \qquad [4]$$

Эта скорость принципиально отличается от аналогичной скорости $vf$ в вязкой жидкости. Количество движения, перенесенное через единицу сечения за время $\Delta t$ в вязкой жидкости, где скорости перемещения двух слоев, отстоящих друг от друга на $\Delta x$, отличаются на $\Delta v$, будет

$$\Delta q = \eta \frac{\Delta v}{\Delta x} \Delta t,$$

где $\eta$ — коэффициент внутреннего трения. Сила трения на единицу сечения в таком случае равна

$$P = \eta \frac{\Delta v}{\Delta x}.$$

Если скорость одного слоя равна нулю, а другого $vt$,

то

$$P = \eta \frac{vt}{\Delta x},$$

или

$$vf = \frac{1}{\eta} P \Delta x. \qquad [5]$$

Сопротивление течению происходит из-за переноса количества движения и создается градиентом скоростей в направлении $X$. Ничего подобного нельзя обнаружить при пластической деформации, несмотря на сходность математических законов. Пластическая деформация развивается скачками. В промежутке между двумя скачками скорости во всем кристалле равны нулю. Во время скачка скорости не зависят от действующей силы. Сила определяет число скачков в секунду или промежуток времени между двумя последовательными скачками. Сила, создавая напряжение в кристалле, воздействует на какой-то процесс, идущий в это время и подготовляющий следующий скачок. Объяснение этого процесса является сейчас наиболее важным вопросом в объяснении пластической деформации. Другая задача есть объяснение постоянства $S$. Наконец мы должны объяснить, почему распределение плоскостей скольжения $\frac{\Delta N}{\Delta L}$ столь равномерно. Ни $Z$, ни $S$, ни даже $\frac{\Delta N}{\Delta L}$ не обнаруживают статического характера. Вопреки тому, что можно было ожидать, они все определяются строгими законами, уклонения от которых не превышают ошибок наблюдения.

Наше знание механизма пластической деформации и количественные законы, ею управляющие, не достаточны для построения определенной теории. Тем не менее, мы перечислим здесь несколько возможных гипотез, объясняющих сущность описанных здесь таинственных явлений.

Увеличение предела упругости посредством пластической деформации, или, говоря языком технологов, посредством холодной обработки, ныне нередко приписывается изгибам кристаллических пластов. Предполагается, что скольжение в нормальном кристалле с плоскими поверхностями проще, чем в кристалле с изогнутыми атомными поверхностями, что и объясняет упрочнение при пластической деформации. Хотя кривизна на самом деле существует, но она обычно невелика, и трудно понять, как может этот факт объяснять столь сильное упрочнение. Скольжение вдоль плавной изо-

гнутой поверхности должно было бы быть почти столь же легким, как и вдоль плоской.

Другая напрашивающаяся сама собой гипотеза предполагает, что скольжение вдоль какой-либо поверхности разрушает правильность ее атомного расположения. Поверхность становится в атомном масштабе шероховатой. Эта неправильность простирается от плоскости скольжения внутрь кристалла и постепенно убывает с расстоянием. Чем более неправильна данная часть кристалла, тем больше должна быть сила, способная вызвать скольжение. Легко видеть, что новый сдвиг произойдет в середине слоя, где искажение наименьшее, и притом оно произойдет сначала в наиболее толстом слое. Предел упругости зависит от расстояния между новой плоскостью скольжения и предыдущей. Этой гипотезой объясняется как увеличение предела упругости с числом скачков на единицу длины, так и распределение плоскостей скольжения на равных относительных расстояниях. Тепловое движение будет постепенно разрушать неправильности и будет облегчать появление нового скачка по истечении некоторого промежутка времени.

Третья гипотеза может рассматривать сдвиг как разрядку упругой энергии, накопленной в единичном пласте. Сдвиг приводит к появлению двух новых поверхностей с разрушенной решеткой; такие поверхности будут обладать более высокой потенциальной энергией, чем первоначальный кристалл. Если скольжение происходит в течение меньшего времени, чем требуется для прохождения звука через весь кристалл, энергия сообщается малой областью кристалла около новой поверхности. Прежние сдвиги представляют собой слои с различными скоростями звука, отражающие упругие волны, распространяющиеся по направлению к плоскости, где происходит новый сдвиг. Таким образом возможно, что энергия берется всего лишь из одного или нескольких пластов. Запас энергии $U$ в пласте толщины $D$ и поверхности $S$ при усилии $p$ будет

$$U_1 = \frac{1}{2} EDSp^2,$$

а энергия, необходимая для сдвига,

$$U_2 = 2aS.$$

Наименьшее усилие $p_0$, способное вызвать сдвиг, т. е. предел упругости, равно

$$p_0 = 2\sqrt{\frac{a}{E}}\sqrt{\frac{1}{D}}. \qquad [6]$$

Формула [6] может объяснить закономерность пластов и увеличение предела упругости при холодной обработке. Рассматривая условия после сдвига как новое состояние упругого равновесия, соответствующее аморфному состоянию, мы можем найти некоторое объяснение постоянству размера сдвигов.

Покуда, однако, мы еще не имеем более точных данных и пока вид функций [1], [2] и [3] остается невыясненным из новых опытов, дальнейшее обсуждение механизма пластической деформации кажется бесцельным. Мы, впрочем, можем утверждать, что хотя модель кристаллической решетки в ее нынешней форме оказалась недостаточной для объяснения пластической деформации, тем не менее в данной области не видно аргументов, говорящих против основных предпосылок этой модели.

## Прочность.

В наибольшем противоречии с предсказаниями электрической теории решеток оказывается прочность твердых тел. Мы подсчитали максимальную величину сцепления в каменной соли на основании теории кристаллических решеток и нашли ее порядка 300 *кг/мм*² для всестороннего растяжения. Одностороннее растяжение при комнатной температуре дало бы около 200 *кг/мм*². Между тем, наблюденная прочность отдельных кристаллов каменной соли на растяжение не превышает 0,5 *кг/мм*². Создавая растягивающее усилие, равномерно распределенное по поперечному сечению, и исключив таким образом эксцентрические силы, вызывающие изгиб, мы получим значения для прочности, отличающиеся

друг от друга не более как на 10 % при среднем 0,44 *кг/мм*². Понижение температуры до температуры жидкого воздуха не влияет заметным образом на прочность каменной соли. Также не вызвал какого-либо изменения нагрев до 200° Ц. (кривая IV, на рис. 9). Выше этой температуры прочность, казалось, росла.

Однако выяснилось, что при высоких температурах прочность измерялась на самом деле не на одиночных кристаллах, а на кристаллических аггрегатах. Это объяснялось тем, что при 200° Ц. предел упругости кристалла падает до 0,44 *кг/мм*², т. е. равен пределу прочности. Таким образом при температурах выше 200° Ц. предел упругости оказывается ниже предела прочности. Увеличивая постепенно нагрузку, мы сначала достигаем предела упругости, причем наступает пластическая деформация, разрушающая решетку кристалла. Как уже упомянуто было, процесс пластической деформации увеличивает прочность кристалла во много раз.

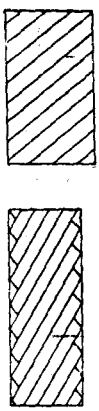

Рис. 14.

Дабы установить количественный закон зависимости прочности от степени деформации и от искажения решетки, мы определяем эту степень деформации по изменению сечения. Мы видели, что пластическое растяжение кристалла заключается в скольжении вдоль некоторых кристаллографических плоскостей — для каменной соли вдоль плоскости (110). В результате таких сдвигов (рис. 14) цилиндрический стержень превращается в ленту, ширина которой $B$ равна первоначальному диаметру стержня, а толщина $D$ постепенно убывает в процессе растяжения. Поперечное сечение $s$ становится меньше первоначального сечения $S$. Отношение $\frac{S}{s}$ дает некоторую меру степени пластической деформации. Нанося прочность как функцию этого отношения, мы получили кривую, приведенную на рис. 15.

При деформации, соответствующей $\frac{S}{s} = 35$, прочность достигала 5 *кг/мм*², т. е. примерно в 12 раз превышала

прочность одиночного кристалла. Отсюда явствует, что значение прочности, найденное из опытов над растяжением, не выражает собою прочности одиночного кристалла выше 200° Ц., но соответствует прочности при данной степени пластической деформации, имевшей место к моменту разрыва. Но поскольку развитие пластической деформации требует времени, можно ожидать, что, укорачивая промежуток времени между моментом перехода через предел упру-

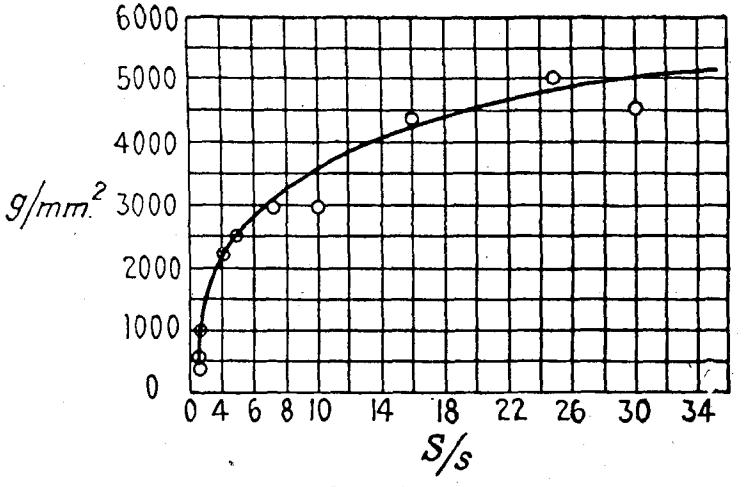


Рис. 15.

гости и моментом разрыва, мы уменьшим размер ошибки. Действительно, сокращая это время, мы имеем возможность наблюдать вплоть до 650° Ц. гораздо меньшую прочность, чем измеренная нами ранее. Она стремилась к некоторому более низкому пределу. Однако при получении этого результата необходимо было при нагрузке избегать резких толчков. Мы должны в таком случае считать этот постоянный низкий предел — пределом прочности одиночного кристалла. Как показывает рис. 9, этот предел прочности сохранял вплоть до 650° Ц. то же значение, что и при комнатной температуре. Таким образом в диапазоне температур от — 180° Ц. до + 650° Ц. прочность каменной соли остается приблизительно постоянной.

Пересечение кривых, соответствующих пределу прочности, с кривыми, соответствующими пределу упругости, повидимому, представляет собой общее свойство всех кристаллов. Прочность однокристалла всегда превышает предел упругости при приближении к точке плавления, здесь предел упругости падает до нуля. При достаточно низких температурах предел упругости растет быстрее, чем прочность, и превосходит последнюю. При более высоких температурах кристалл будет разрываться как пластическое тело, при более низких температурах это будет разрыв хрупкого тела, т. е. разрыв будет происходить раньше, чем появится какая-либо пластическая деформация. Следовательно хрупкость и пластичность не являются свойствами различных тел, но обе они определяются температурой и характером деформации одного и того же тела. Всякое тело хрупко при низких и пластично при высоких температурах. Точка пересечения на рис. 9 для данного типа деформации определяет температуру, при которой хрупкое тело становится вязким. Нам при этом не нужно предполагать, как это делал О. Леман для объяснения пластичности, наличия специальной гомеотропии второго рода в каменной соли — геомеотропии, существующей при высоких температурах и отсутствующей при низких.

Подбирая соответственно температуру, можно придать телу как раз желаемые механические свойства. Так, напр., для того чтобы избегнуть возникновения пластических деформаций и ухудшения кристалла при обработке одиночных кристаллов свинца и цинка, следует понизить температуру до температуры жидкого воздуха. В других случаях можно рекомендовать нагревание.

Прочность одиночных кристаллов на растяжение примерно в 500 раз меньше, чем вычисленный максимум для сил сцепления, и разрыв наступает прежде, чем может быть замечено существенное отклонение от закона Гука. Даже пластически деформированные кристаллы обладают в 40 раз меньшей прочностью, чем следовало бы ожидать. Если электрическая теория не ошибается в своих основных предпосылках, это противоречие не должно существовать. Впро-

чем, весьма возможно, что обычно наблюдаемый разрыв, при растяжении не имеет ничего общего с истинной прочностью. Мы можем легко понять, что постепенный частичный разрыв требует гораздо меньшей силы, чем разрыв одновременно по всему поперечному сечению. Допустим, например, что на боковой поверхности растянутого стержня существует малая, но очень резкая трещина. Распределение усилий будет таково, что на краю трещины усилие будет чрезвычайно концентрированным, как это явствует из диаграммы рис. 16.

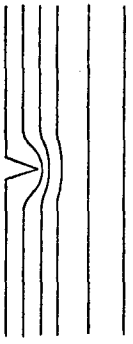

Рис. 16.

Если радиус кривизны дна трещинки достаточно мал, отношение усилия у края трещины к среднему усилию на все поперечное усилие может оказаться весьма большим; можно предполагать, что это имеет место в кристалле. В самом деле подсчет показывает, что отношение усилия, существующего у трещины, к среднему усилию на поперечном сечении образца может оказаться порядка нескольких сотен. Сравнивая энергию в данном состоянии с энергией, которая будет создана, если трещина станет возрастать, Гриффизс (Griffith) и Вольф (Wolf) сформулировали условия, способствующие росту трещины; в надорванном кристалле этот процесс приводит в конце концов к полному разрыву образца. Гриффизсу удалось показать экспериментально, в какой мере может быть понижена прочность от присутствия этих трещинок.

Если этим объясняется малая прочность кристаллов на растяжение, то, очевидно, состояние поверхности, с которой начинаются надрыв и разрушение образца, должно играть существенную роль: в таком случае необходимо найти еще объяснение тому факту, что наблюдаемая прочность на растяжение постоянна в пределах 10%.

Влияние состояния поверхности на прочность каменной соли действительно наблюдали и описали В. Фогт (W. Voigt), Селла (Sella) и Г. Мюллер (Müller).

Первые два автора нашли, что прочность кристаллов каменной соли зависит не только от ориентации усилия, но и от ориентации внешних поверхностей, ограничивающих кристалл. Они обнаружили, напр., что прочность кристалла с поверхностями (110) оказывается почти вдвое больше прочности кристалла с поверхностями (100). Однако необходимо отметить, что острота краев кристалла в обоих случаях весьма различна. Я пытался избегнуть этого возражения, изготовляя кристаллически образцы, в которых истинная поверхность была различной при одной и той же форме кристалла, а края всегда были закруглены, как показано на рис. 17.

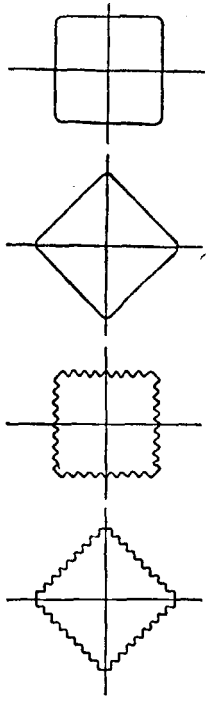

Рис. 17.

Но в этих образцах не было найдено влияний того порядка, какой приводится Фогтом и Селла. Наблюденные значения предела прочности в этих опытах оказывались лишь рассеянными в несколько большем диапазоне, чем обычно.

Г. Мюллер нашел, что прочность, выраженная через растягивающее усилие на единицу поперечного сечения, возрастает с 0,5 *кг/мм*² до 7 *кг/мм*², когда сечение уменьшается примерно с 20 *мм*² до 0,3 *мм*². Это должно было бы означать, что прочность зависит не только от поперечного сечения, но и от периметра образца. В противоположность этим утверждениям М. А. Левитская нашла, что в том случае, когда исследовались одинаковым путем изготовленные кристаллы, при изменении поперечного сечения в пределах от 36 до 0,1 *мм*², влияние изменения периметра отсутствует. Мы подозреваем, что результаты Мюллера объясняются обработкой кристаллов водой, ибо, как мы покажем ниже, вода в сильной степени влияет на прочность. На рис. 18 кривая I приводит результаты Мюллера, а кривая II — результаты М. А. Левитской.

В листках слюды уменьшение толщины до 0,1 *мм* не влияет на прочность, однако, при уменьшении толщины с 0,01 до 0,001 *мм* прочность, как показал А. Вальтер, возрастает, примерно, в 4 раза; при температуре жидкого воздуха этот эффект еще удваивается.

Ни опыты Фогта и Селла, ни опыты Г. Мюллера не доказывают существенного влияния состояния поверхности на разрыв образцов каменной соли обычных размеров. Если таким образом действительно трещинки повинны в разрыве кристаллов, то они очевидно должны быть со-

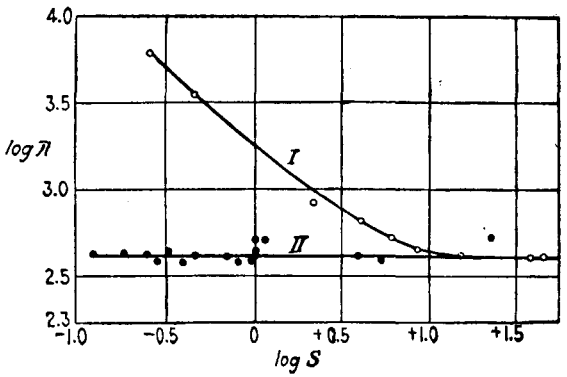


Рис. 18.

зданы каким-то закономерным процессом, а их глубина и острота определяются структурой кристалла. Увеличение прочности при толщинах порядка величины 1 μ свидетельствует, что трещинки имеют размер от 0,1 μ до 0,01 μ, или от $10^{-5}$ до $10^{-6}$ *см*.

Хотя описанные опыты не подтверждают теории, приписывающей малую прочность влиянию поверхности, но они не противоречат этой гипотезе. Даже не зная механизма образования трещинок, мы можем ожидать, что процесс их образования требует времени. Иначе говоря, свежая поверхность должна отличаться от старой поверхности. Непрестанно обновляя поверхность посредством растворения ее в воде, мы можем предупредить появление трещинок. Чем быстрее будет удаляться водою старая поверхность, тем более ве-

роятно предположение, что трещинки не успеют образоваться. Некоторые указания такого рода даются свойством каменной соли становиться пластичной в воде; это свойство означает, что предел прочности становится выше предела упругости.

М. А. Левитская и я попытались поэтому разрывать кристаллы каменной соли, погруженные в горячую воду, и мы нашли, что при этом прочность значительно возрастала, каменная соль всегда разламывалась в сухом сечении даже тогда, когда поперечное сечение сухой части по крайней мере в 10 раз превосходило сечение части кристалла, погруженной в воду. Растворяя постепенно кристалл, мы уменьшали сечение мокрой части, пока образец не разрывался по шейке толщиной около 0,2 *мм*, в то время как сухая часть имела толщину около 6 *мм*. Рассчитывая усилие при разрыве как отношение приложенного груза к поперечному сечению образца, мы нашли предел прочности до 30 и даже до 160 *кг/мм*$^2$. Эти значения уже в достаточной мере близко подходят к теоретической прочности 200 *кг/мм*$^2$.

Прежде чем наступал разрыв, достигался предел упругости, соответствующий при комнатной температуре 0,9 *кг/мм*$^2$, и в момент, когда происходил разрыв, кристалл оказывался пластически деформированным. Измерявшаяся прочность была, таким образом, не прочностью одиночного кристалла, но прочностью кристаллического аггрегата. Тем не менее этот результат является существенным для электрической теории кристаллов, ибо он показывает, что внутренняя прочность каменной соли не меньше 160 *кг/мм*$^2$ и что кристаллики каменной соли могут выдержать подобные усилия. Этот результат весьма удовлетворительно подтверждает расчет сил сцепления, данный электрической теорией.

М. Полани (M. Polanyi) и В. Эвальд (W. Ewald) возражали против наших результатов. Они высказывали предположение, что влияние воды заключается не в увеличении прочности, а в понижении предела упругости. Поэтому, указывали они, каменная соль становится пластичной и ее прочность будет возрастать вследствие явления пластиче-

ской деформации, как указывалось на рис. 15. Хотя, может быть, такой ход мыслей и правилен, фактический процесс не соответствует этим утверждениям. Мы измеряли одновременно и предел упругости в той мере, как он выявляется рентгеновыми лучами, и предел прочности одиночного кристалла по быстро возрастающей нагрузке. В противоположность предположениям М. Полани и В. Эвальда предел упругости был в пределах 1% один и тот же как в воде, так и в сухом воздухе. Кристалл, который не разрывался в воде при напряжениях до 5 *кг/мм*², будучи затем высушен, обладал нормальной малой прочностью в 0,4 *кг/мм*², соответствующей недеформированному кристаллу. Эта непосредственная проверка гипотезы М. Полани и В. Эвальда не подтвердила ее, но, наоборот, доказала, что увеличение прочности в воде не связано с пластической деформацией.

Любопытно выяснить, сколько времени на самом деле требуется для того, чтобы привести свежую поверхность с высокой прочностью к нормальным условиям, при которых поверхность покрыта, как я думаю, маленькими трещинками. Лучше всего это можно наблюдать, испытывая каменную соль на изгиб. При комнатных температурах предел упругости на изгиб, повидимому, лишь немногим ниже усилия, вызывающего излом; поэтому при изгибающих усилиях куски каменной соли оказываются хрупкими. Под водою они становятся гибкими, что указывает на увеличение прочности. Если удалить образцы из воды, то оказывается, что некоторые из них остаются гибкими в течение многих секунд, минут, а иногда даже дней, в особенности, если их поместить в вакуум. Образцы различного происхождения ведут себя различно. Некоторые из них становятся хрупкими немедленно по удалении их из воды.

Мы заметим, что насыщенный раствор соли или сухое масло не влияет на прочность. То же оказалось в отношении газов водорода, углекислоты, а также при сохранении кристалла в течение многих дней в пустоте. Прочность всегда равнялась примерно 0,5 *кг/мм*².

Хотя разрыв каменной соли в горячей воде на самом деле обнаруживал ожидаемую прочность, но это не была

прочность одиночного кристалла. Экспериментальные трудности не позволяли нам измерять на однокристаллах под водою усилие больше 10 *кг/мм*².

Но есть и другой путь — избегнуть влияния поверхностных трещин. Если распределение усилий таково, что поверхностные слои не растягиваются, влияние поверхности будет исключено. Ни трещины, ни какое-либо другое поверхностное явление не может влиять на процесс разрыва, происходящий внутри, где усилие достигает максимального значения. Такого рода испытание можно осуществить, если подвергнуть внезапному и всестороннему нагреву шар. Внешние слои расширятся прежде других и растянут холодную центральную часть, создавая всестороннее растяжение. Именно такова деформация, которая рассматривается при выводе сил сцепления из электрической теории кристаллических решеток. Ясно, что на поверхности никогда не может существовать радиального натяжения, ибо поверхность может свободно расширяться и никакие силы на нее не действуют. Распределение усилий внутри сферы было рассчитано Г. А. Гринбергом. Оно состоит в равномерном натяжении $T$, идущем от поверхности к центру и достигающем его через время $\tau$, определенное теплопроводностью. Это натяжение имеет максимум

$$T_{max} = A(t - t_0),$$

где $A$ — коэффициент, равный 0,08 *кг/мм*² для каменной соли; $t$ и $t_0$ суть начальная и конечная температуры сферы.

Время $\tau$ оказывается для каменной соли равным

$$\tau = 1{,}9\ r^2 \text{ сек.},$$

где $r$ — радиус сферы.

Помимо радиального натяжения в сфере должно появиться и касательное усилие, которое приведет к сжатию, отличному от нуля на поверхности в первые стадии нагрева. Но сжатие не столь опасно по своему влиянию на прочность, как растяжение.

Несколько шаров из каменной соли сначала охлаждались в жидком воздухе, а затем внезапно погружались в горячую воду при 100° Ц. или расплавленное олово при 600° Ц.

Если были приняты меры к тому, чтобы нагрев шара был равномерным, то ни растрескивания, ни разрыва не наблюдалось. Наибольшее всестороннее натяжение в центре должно было доходить в этих опытах до 60 *кг/мм*². Центральная часть оставалась холодной, так что кристаллическая решетка не разрушалась. В поверхностных слоях могла иметь место пластическая деформация, но за время в полсекунды, необходимое для того, чтобы вызвать в центре усилие в 60 *кг/мм*², деформация не могла далеко развиться. Действительно, в малых шарах следов такой деформации обнаружено не было. Поэтому можно быть уверенным, что истинное натяжение в центре было немногим меньше значений, вычисленных в предположении совершенной упругости.

Хотя опыт с шаром не дает количественного значения истинного предела прочности, но он, однако, доказал, что этот предел превышает 60 *кг/мм*². Этим опытом, стало быть, показано, что наблюдаемая обычно малая прочность в 0,5 *кг/мм*² не имеет ничего общего с истинным сцеплением. Это последнее по своему порядку величины совпадает, наоборот, с вычисленным из теории.

Вопросы прочности твердых мелкокристаллических тел, влияние размера и расположение кристаллических зерен, холодной обработки и т. п., повидимому, в значительной степени зависят от образования маленьких трещинок как внутри зерен, так и на границе между кристаллическими зернами. Рассчитанная по электрической теории прочность дает нам поэтому высший предел прочности кристалла, который в то же время является вообще наивысшим достижимым пределом прочности.

Исследование упругих свойств кристаллов в этом и предшествующих отделах привело нас к заключению, что все без исключения наблюденные факты согласны с теорией кристаллических решеток. Все противоречия, касающиеся явления упругого последействия пластичности и прочности, оказались кажущимися противоречиями. Общие предсказания теории были подтверждены и качественно и количественно.

Впрочем выяснилось, что теория в своей современной форме не в состоянии объяснить механизма некоторых

упругих явлений, как то: скольжение в кристаллической решетке, появление трещинок на поверхности и т. д. Для построения точной модели кристалла необходимо детальное изучение этих явлений.

---

*БИБЛИОГРАФИЯ.*

А. Ф. Иоффе. Упругие и электрические свойства кварца. Петроград 1915 г. („Изв. Политехн. Института", т. XXIV; там же вся литература по 1915 г.).

A. Joffe, M. W. Kirpitschewa, M. A. Lewitzky, Zeitschrif für Physik. Bd. 22. S. 286. 1924.

A. Joffe, M. W. Kirpitschewa, Phil. Mag. (6) 43, p. 204. 1922.

N. Georgieff u. E. Schmid, Zeitschrift für Physik. Bd. 36. S. 759. 1926.

A. Joffe u. M. Lewitzky. Zeitschrift für Physik. Bd. 31, S. 575. 1925.

М. А. Левитская, Ж. Р. Ф.-Х. О. 1925, Z. f. Phys.

И. В. Обремов и Л. В. Шубников. Ж. Р. Ф.-Х. О. 1927, ZS. f. Phys. 1927.

М. В. Классе, Ж. Р. Ф.-Х. О. 1927, 1928.

A. Joffe, M. W. Kirpitschewa, M. A. Lewitzky. Zeitschrift für Physik. 1924. Ж. Р. Ф.-Х. О.

Grifith, Proceedings of the I Intern. Congress for Applied Mechanics. Delft 1924 (edited 1925), p. 55.

Voigt und Sella. Wied. Ann., 48, S. 636. 1893.

H. Müller, Zeitschrift für Physik. Bd. 25, S. 223. 1924.

M. Polanyi u. W. Ewald, Zeitschrift für Physik, Bd. 28. S. 29. 1924.

A. Joffe u. M. Lewitzky. Zeitschrift für Physik. Bd. 35. S. 442.

M. Polanyi u. G. Sachs. Zeitschrift für Physik. Bd. 33, S. 697. 1927.

---