

ДЕФОРМАЦИЯ И ПРОЧНОСТЬ КРИСТАЛЛОВ *)

A. Ф. Иоффе и М. В. Кирпичева, М. А. Левитская

(Отдел общей физики)

1. Упругие свойства твердого тела в действительности плохо подчиняются той простой схеме, которую дает теория упругости и закон Гука. Многочисленные аномалии, как-то: упругое последействие, утомление и восстановление, упругий гистерезис, остаточная деформация и т. д., так запутывают явления, что, например, А. Буасс **) в результате своих многолетних исследований пришел к убеждению, что в этой области не существует никаких общих законов и каждый индивидуум должен отдельно быть исследован и описан. С другой стороны, наши представления о типическом твердом теле — кристалле — так определены и просты, что мы не можем допустить в его модели всех названных выше аномалий. В последнее время достигнута даже количественная теория сил сцепления, которая вполне удовлетворительно может предвычислить плотность, сжимаемость и теплопроводность кристалла. Но упомянутые аномалии, так же как и прочность, остаются как качественно, так и количественно вне рамок электрической теории кристаллов.

Экспериментальными исследованиями упругого последействия в кварце я пытался ***) в 1905 г. доказать, что это последействие является

*) Впервые опубликовано в Журн. Русск. физ.-хим. об-ва, часть физ. 56 (1924). Воспроизводится по Тр. Ленингр. физ.-тех. лаб. (Научн.-тех. отдел ВСНХ, № 100), вып. 1, 7 (1925).

**) H. Bouasse, Resistance des matériaux, Paris, 1920.

***) A. Ioffé, Elastische Nachwirkung in kristallinischen Quarz (Diss.), München, 1905, Ann. d. Phys. 20, 919 (1906).

следствием неоднородности большинства тел, но что в однородном кристалле кварца оно, наверное, меньше чем $7 \cdot 10^{-5}$ первоначальной деформации. Этот результат позднее много раз был подтвержден и распространен и на другие кристаллы. Этим мы приобрели право при обсуждении упругих свойств кристаллов не принимать во внимание явления последействия. Остаточная деформация со всеми сопровождающими ее аномалиями почти столь же непонятна с точки зрения теории кристаллических решеток. При исчезновении внешних сил кристаллическая решетка должна была бы возвращаться к устойчивой нормальной форме. Правда, мыслимы остаточные деформации без изменения структуры именно через трансляции или образование двойников, не изменяющих устойчивости решетки, но

легко убедиться, что пластичность кристаллов этим путем объяснить нельзя. Например, если мы сгибаем кристалл каменной соли при приблизительно 600°C , то, несмотря на его твердое состояние и чистоту, его внутренняя структура меняется; плоскости спайности уже не плоски, прочность его изменилась. Можно думать о внутренних напряжениях между смещенными слоями, но двойное лучепреломление, которое дает верную меру напряжений, так мало, что и это объяснение отпадает. Нагревание кристалла в течение 24 часов до температуры 750°C , при которой предел упругости крайне мал и возможные существующие напряжения должны были бы вызвать обратную деформацию, не оказывает на самом деле никакого влияния. Искривление плоскостей спайности не меняется ни в малейшей степени. После такого нагревания можно было один отломанный кусок приложить к части, оставшейся холодной, без малейшего заметного просвета.

Рентгенографический анализ дает вполне надежное средство исследовать изменения структуры при деформациях. В 1919—1920 гг. мы совместно с М. В. Кирпичевой *) произвели подобное исследование. Явления можно проследить как субъективно на флуоресцирующем экране, так и объективно на фотографической пластинке.

Для исследования пластической деформации мы фотографировали на одной и той же пластинке лаузовскую диаграмму слабо и сильно нагруженного кристалла. Получающийся двойной снимок дает в белом рентгеновском свете (узкий пучок) вращения, в монохроматическом (пучок с большим углом раскрытия) — изменение расстояний плоскостей решетки. Из обоих снимков можно вычислить все постоянные упругости кристалла, без особой, впрочем, точности.

Для исследования остаточной деформации мы наблюдали на флуоресцирующем экране лаузовскую картину при однородной деформации (одностороннее сжатие). В момент перехода через предел упругости картина менялась. Отдельные пятна интерференционной картины вытягивались постепенно в длинные полосы. Сначала наблюдалось удвоение, затем увеличение каждого пятна, пока, наконец, вся картина не получала звездообразного вида «волокнистой диаграммы», как в вытянутой метал-

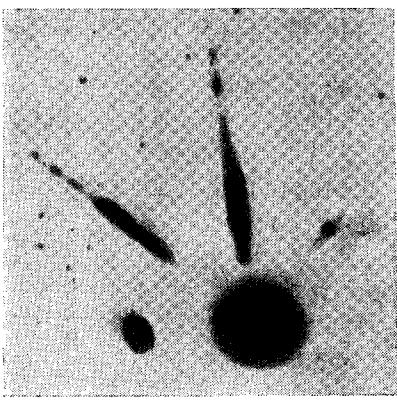


Рис. 1.

*) A. Ioffé and M. Kirpicheva, Phil. Mag. 43 (6), 204 (1922).

лической проволоке. Только пятно, представлявшее отражение от плоскости ромбического додекаэдра (110), оставалось неизменным (рис. 1).

Мы вывели из этого заключение, что остаточная деформация состоит в постепенном разрушении цельного кристалла, причем отдельные кристаллики скользят в плоскости (110) и в то же время поворачиваются на различные углы вокруг нормальной оси.

В настоящей работе, которую я продолжал далее с М. А. Левитской, применен метод рентгенографического анализа для количественного измерения предела упругости и для выяснения расхождения между теоретической и практической величинами прочности кристаллов.

Исследование произведено главным образом с каменной солью. Каменная соль много раз подробно исследовалась в отношении своей упругости, прочности, сдвигов и вязкости, так что относительно ее свойств существует уже обильный материал. С другой стороны, электрическая теория кристаллов количественно разработана и испробована как раз для гетерополярной решетки каменной соли. Поэтому представляется целесообразным испробовать поставленную нами выше задачу именно на каменной соли. Для сравнения были также взяты гипс, исландский шпат и алюминий.

2. Предел упругости. Рентгенографическая картина проще всего истолковывается тогда, когда исследуемый кристалл подвергается однородной деформации. Большинство опытов относится поэтому к одностороннему растяжению и сжатию, при которых, как известно, появляются также и напряжения сдвига. Кроме того, производились также опыты скошения, расщепления, гнутья и кручения.

Для опытов с раздавливанием прибор был устроен следующим образом (рис. 2). Кристалл K , имеющий параллельные плоскости, помещался между двумя стальными цилиндрами B_1 и B_2 и с помощью подвеса A и железного сердечника E нагружался втягиванием сердечника в электромагнит M . Давление определялось по силе тока в электромагните. Для

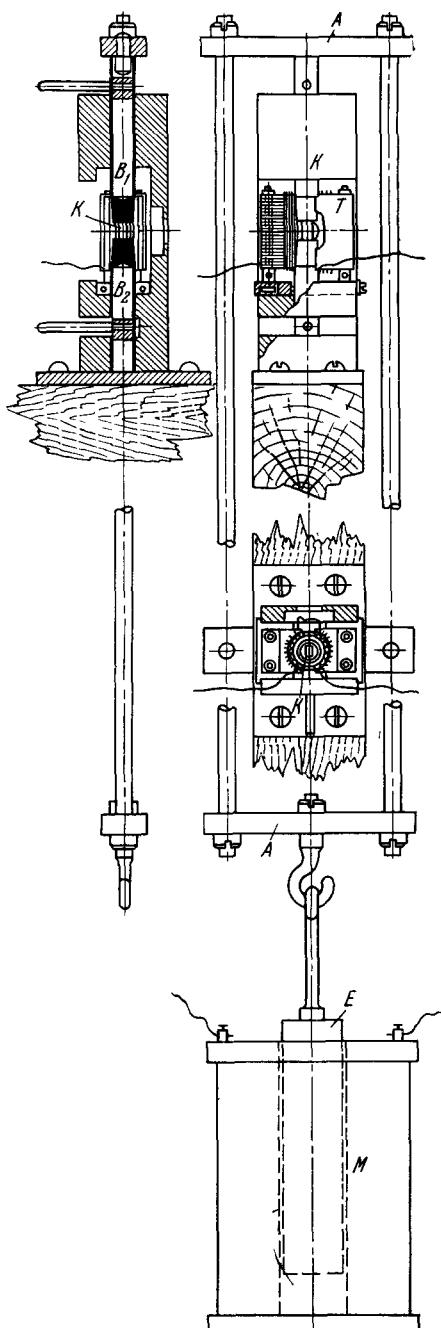


Рис. 2.

оценки давления применялся также точно проградуированный рычаг, причем градуирование было произведено для различных расстояний $B_1 - B_2$ и, следовательно, для различных положений сердечника E . Точность измерения силы была не ниже 1%. В этих пределах ошибки силы P могли быть вычислены по формуле

$$P = aI^2 + p,$$

причем I означает силу тока и p — вес подвеса и сердечника.

Для более высоких температур употреблялась платиновая печка, состоящая из двух частей и навитая на слюде. Средняя часть имела просвет для пропускания рентгеновских лучей; иногда он закрывался тонким слоем асбеста. Температура в этой печке была неравномерна, что очень затрудняло определение температуры кристалла. Позднее оказалось, что печка на кварцевой трубке с платиновой обмоткой и изоляцией шамотом без всякого отверстия достаточно пропускает рентгеновские лучи и дает более равномерную температуру.

Температура определялась посредством термоэлемента, спай которого возможно ближе подводился к кристаллу. Для контроля кристалл был расколот и спай зажат между половинами. При первой печке надо было вводить значительную и не очень определенную поправку, при кварцевой печке неопределенность в измерении температуры была гораздо меньше.

Рентгеновская трубка (собственной фабрикации с водяным

охлаждением) позволяла длительную нагрузку в 10 ма при 70 кв. Для защиты от лучей служил цилиндрический свинцовый экран толщиной 15 мм. Трубка приводилась в действие и регулировалась из камеры для наблюдения — домика, выложенного свинцом и зачерненного. Для установки рентгеновского пучка очень удобно было приспособление, изображенное на рис. 3. Свинцовый шар K зажимался в соответствующей шаровой впадине в свинцовом экране при помощи трех зажимов S , коническая диафрагма D , которую можно было менять, определяла сечение пучка лучей. Для установки и субъективных наблюдений диаметр диафрагмы брался приблизительно от 3 до 5 мм, для снимков — до 0,3 мм. Прямо идущий рентгеновский пучок загораживался находящимся позади экрана свинцовым диском. Через 15—20 мин. аккомодации в темноте картина Лаэ на флуоресцирующем экране делается настолько ясной, что всякое изменение в виде пятен сейчас же заметно. Временами можно было достигать лучшей ориентировки, поднимая ток в трубке до 15—20 ма.

Для монохроматического света употреблялся или серебряный антракатод и Pd-фильтр, или молибденовый антракатод и фильтр из Zr или Nb. Тонкие детали могли быть различаемы только при помощи фотографии.

Самым существенным при опытах с растяжением были хорошая центрировка кристалла и отсутствие всякого изгибающего момента. С этой целью куски кристалла обрабатывались на станке, получая форму 1 или 2 (рис. 4), и вставлялись в точно пригнанные захваты B . Подвесная система состояла из двойного карданова подвеса C . Сужение на кристалле имело целью наметить место, где начинается переход через предел упругости, и именно его ввести в рентгеновский пучок. Нагрузка произ-

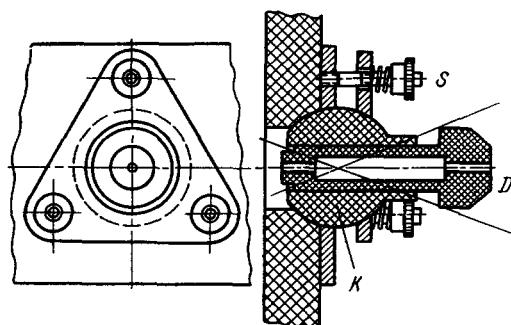


Рис. 3.

водилась при помощи ртути, которую можно было вливать как угодно медленно или отсасывать в выкачанный сосуд. Кроме того, можно было пользоваться электромагнитной нагрузкой (рис. 2). Для нагрева употреблялась вышеописанная кварцевая трубка с платиновой обмоткой и изоляцией из шамота.

Первый вопрос, который надо было разрешить, относился к зависимости предела упругости от сечения и от ориентировки боковых граней. Как известно, Фойгт и Селла наблюдали подобную зависимость для прочности на разрыв. Были исследованы прямоугольные и круглые образцы поперечного сечения от 3 до 32 мм^2 , по возможности с различным отношением периметра к площади, при различных температурах между 15 и 700° С. Наблюдалось давление, при котором пятна рентгенограммы начинали растягиваться. При каждой температуре сила была пропорциональна сечению; наибольшие и притом не систематические отклонения не превосходили 5%. Позднее, при лучшем постоянстве температуры и осторожной нагрузке, точность можно было увеличить до 0,5%. На рис. 5 нанесены первые наблюдения для температур 10, 50, 230 и 400° С. Десять точек относятся к кристаллам с боковыми гранями || (110), остальные || (100).

Можно было твердо установить, что существует определенная граница, при которой наступает изменение пятен, т. е. кристалл начинает течь. Чем выше температура, тем скорее замечается изменение. Если напряжение хотя бы немножко не дошло до указанной границы, то даже через шесть часов я не мог ничего заметить, тогда как при малейшем перенапряжении пятна уже через несколько секунд или минут ясно размыты. Особенно чувствительно пятно от (010).

Из рис. 5 видно, что при всякой температуре существует вполне определенный предел упругости, который определяется силой на единицу сечения и не зависит от формы периметра и ориентировки боковых граней. При повышении температуры предел упругости значительно понижается.

Мы обратились к вопросу о количественной зависимости от температуры и в особенности к определению предела упругости при точке плавления. Наибольшее число наиболее тщательных опытов произведено с растяжением. Как предел упругости бралось отношение силы в момент начала изменения структуры к первоначальному сечению. Кривая I (рис. 6) представляет результаты. Измерения сжатия и растяжения дают числа, лежащие на одной и той же кривой, которая с приближением

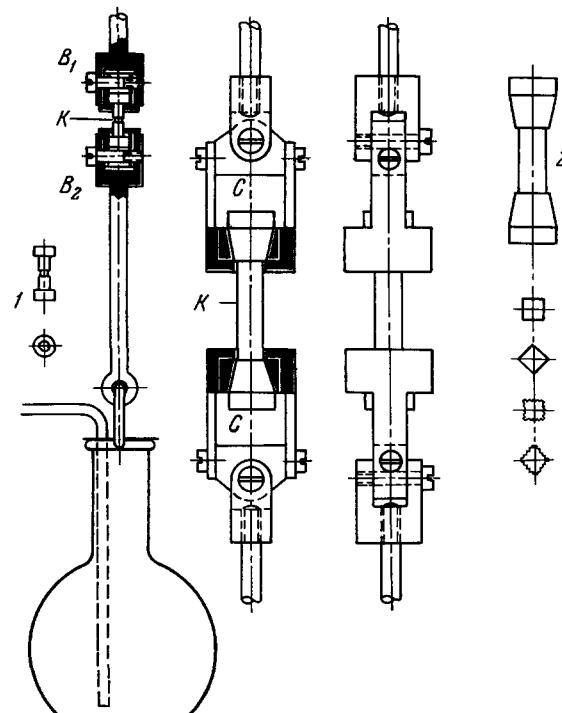


Рис. 4.

к точке плавления (приблизительно 810°C) плавно приближается к нулю. Точка плавления для каменной соли есть та температура, при которой исчезает предел упругости формы. Это как раз есть упругость сдвигов,

которые обусловливают расширение лаузских пятен и для которых измерялся предел упругости.

Скольжение, которое начинается после перехода через предел упругости, происходит в плоскости ромбического додекаэдра (110) в направлении [110]; оно производится напряжением сдвига в этом направлении. Если плоскость (110) стоит под другим углом к направлению растяжения, то наибольшее напряжение приходится в другом направлении. Несмотря на это, плоскостью скольжения всегда является плоскость ромбического додекаэдра. Но чтобы достигнуть в этой плоскости напряжения,

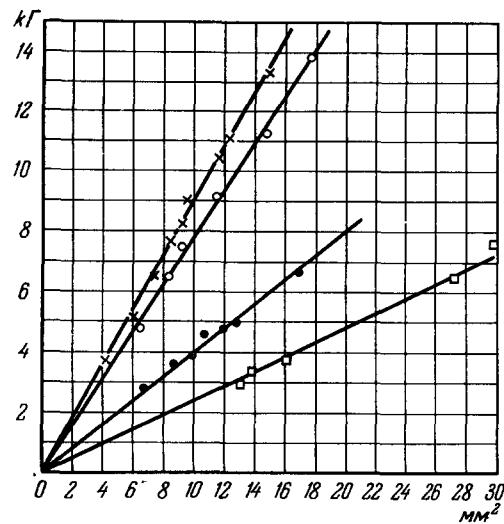


Рис. 5.

соответствующего пределу упругости, нужна большая сила растяжения. И действительно, для кристаллов, ось которых была перпендикулярна к плоскости (110) или (111), растягивающее усилие было больше. На рис. 6 кривая II относится к первому случаю, кривая III — ко второму. Обе кривые, как и кривая I, относящаяся к оси, перпендикулярной к (100), идут к нулю в точке 810°C , т. е. в точке плавления. При критическом рассмотрении кривой появляется сомнение в том, насколько температура кристалла была правильно определена вблизи плавления. Для улучшения этих определений один из образцов кристалла был просверлен и в канал шириной приблизительно 0,3 мм вложен спай термоэлемента; температура начинаящегося плавления была определена с таким термоэлементом, и эта точка была использована для проверки кривой.

Из положения точек на кривых видно, что точность отдельных измерений вряд ли была ниже 1%. Таким образом, наблюдение лаузской диаграммы представляет один из наиболее точных методов для определения предела упругости, и определяемый таким образом предел упругости есть характерная для вещества постоянная, в противоположность обычным определениям и способам измерения.

Едва ли предвиденный результат, что при приближении к точке плавления предел упругости для сдвигов твердой каменной соли прибли-

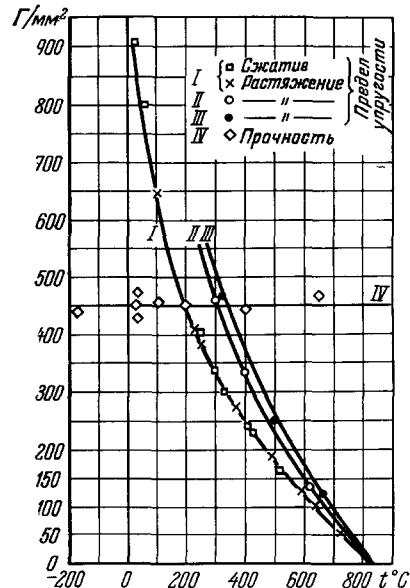


Рис. 6.

жается к нулю, может быть распространен, как показывают ведущиеся в настоящее время опыты, на металлы и на так называемые хрупкие кристаллы. Возможно, что мы придем к определению точки плавления как такой температуры, при которой предел упругости кристалла становится равным нулю и самое плавление объясняется сдвигами в кристалле. Однако для этих далеко идущих заключений нужно еще исследование многих типов кристаллов в отношении их упругости формы и упругости объема вблизи точки плавления и количественное объяснение теплоты плавления.

Метод рентгенографического анализа пригоден также для определения точки плавления. В момент плавления мгновенно появляется наряду с лаузевскими пятнами диффузное излучение — общее свечение всего флуоресцирующего экрана. Интерференционную картину при этом можно совсем устраниć; поле зрения до точки плавления остается темным и затем ясно освещается.

3. Прочность. Прочность каменной соли была исследована главным образом при растяжении, так как разрыв есть гораздо лучше определяемое явление, чем раздавливание (о явлениях сдвига и раскалывания я сообщу позднее). Фойгт и Селла установили влияние ориентировки боковых граней. Против их опытов можно возразить, что решающей была ориентировка направления скольжения относительно прямоугольного сечения (например, в направлении сторон или в направлении диагонали поперечного сечения), а не свойства граней. Поэтому я исследовал не только кристаллы, которые при одной и той же площади сечения имели боковые стороны ориентированными по (100) и (110), но и такие, которые, будучи вырезаны по (100), были гофирированы по (110), и такие, которые, представляя плоскость (110), были гофирированы по (100) (рис. 4, справа). Этим способом оба влияния могли быть разделены; соотношения для скольжения по переходе через предел упругости были для простых и гофирированных кристаллов одинаковы, тогда как боковые грани были ориентированы различно. Разница в прочности была не так велика, как дает Фойгт, и казалась не зависящей от направления скольжения. Сечения в этих опытах были приблизительно 30 mm^2 ; они были значительно больше, чем у Фойгта.

Важнейшие измерения были произведены с сечениями формы круга площадью $5-6 \text{ mm}^2$.

Известно, что каменная соль при комнатной температуре разрывается без всякой остаточной деформации, тогда как при высоких температурах она совершенно пластична. О. Лемани на этом основании построил гипотезу о гомеотропии второго рода, которая должна была объяснить это явление. Действительно, ниже 200° С невозможно было заметить никакого следа изменения пятен на лаузевской диаграмме. Кристалл рвется, не переходя через предел упругости. Несмотря на все предосторожности, мы не могли при многих наших попытках около 190° С заметить какое-нибудь течение каменной соли. Напряжение разрыва не показывало никакого изменения с температурой и колебалось между -190° и $+190^\circ \text{ С}$ около средней величины 450 Г/мм^2 со случайными отклонениями около 5% (кривая IV, рис. 6).

Из сравнения с кривой I (рис. 6) видно, что как раз при 200° С предел упругости лежит при 450 Г/мм^2 . Здесь пересекаются кривая прочности и кривая предела упругости. Мы покажем, что обе кривые могут быть продолжены далее и сохраняют свой характер. Различное поведение каменной соли ниже и выше 200° уже достаточно объясняется тем, что ниже 200° при возрастающей нагрузке раньше достигается разрывное напряжение, чем предел упругости, тогда как выше 200° имеет место

противоположный случай — кристалл течет прежде, чем он разрывается. Далее мы покажем, что присоединяется другое явление — упрочнение, которое делает разницу в поведении каменной соли еще резче, чем можно было ожидать.

При температурах выше 200°C наблюдается сначала течение, идущее вперед медленнее или быстрее, в зависимости от нагрузки. При температурах едва выше 200°C мы наблюдали течение в продолжение 4 суток без разрыва кристалла. При 750°C опыт длится приблизительно 5 минут. При этом образуется сужение, делающееся все тоньше. Поперечное сечение приобретает в этом месте вид эллипса со все возрастающим эксцентрикитетом. Если дать соли течь достаточно долго, то кристалл, наконец, разрывается в форме, напоминающей скорее клин, чем цилиндр. Такое поведение в последнее время часто наблюдалось и описано для однокристальных металлов.

Если рассчитать после разрыва напряжение, приходившееся в последний момент на окончательное самое маленькое сечение, то получаются числа, далеко превосходящие прочность 450 Г/мм^2 , — числа до 5000 Г/мм^2 . С повышением температуры эта прочность делается все больше. Впрочем, при высоких температурах течение идет все дальше и дает

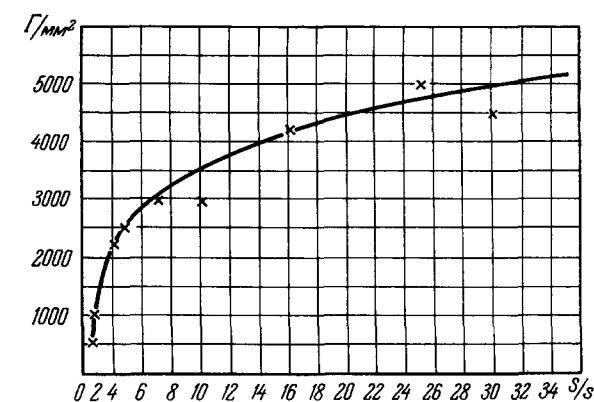


Рис. 7.

все большее сужение. Так что наперед нельзя сказать, что температура сама по себе могла бы увеличить прочность. Действительно, когда кристалл, вытянутый при высокой температуре, был затем охлажден и разорван при комнатной температуре, получалась та же высокая прочность в тысячи граммов на 1 мм^2 . Наоборот, когда при высокой температуре нагрузка была без толчков повышена так быстро, что течение в момент, когда был достигнут предел прочности, едва началось, каменная соль разорвалась при 400° и 650°C приблизительно при том же напряжении 440 — 475 Г/мм^2 , что и при комнатной температуре (кривая IV, рис. 6).

Таким образом, мы можем утверждать, что прочность недеформированного кристалла и выше 200°C почти не зависит от температуры и остается равной прочности при комнатной температуре.

За меру изменения структуры в месте разрыва мы можем прежде всего принять уменьшение поперечного сечения (с таким же успехом можно взять идущее параллельно с ним увеличение эксцентрикитета поперечного сечения или удлинение лаузевских пятен). На рис. 7 прочность нанесена как функция S/s , где S — начальное сечение и s — окончательное. На кривой нанесены как наблюдения при высоких температурах, так и значения, полученные после охлаждения до комнатной температуры.

Ход кривой оказывается вполне закономерным, отклонения могут быть вполне объяснены неточным измерением поперечного сечения S .

Кроме того, мы еще убедились, что уменьшение поперечного сечения существенно лишь постольку, поскольку оно сопутствует изменению

структурой. Когда уменьшение сечения достигалось не течением, но обточкой на станке без изменения структуры, тогда оно не имело никакого влияния на прочность. Кристалл поперечного сечения $0,7 \text{ mm}^2$ имел ту же прочность, что и при 5 mm^2 и 30 mm^2 , тогда как подобного рода тонкий кристалл, полученный путем течения из первоначального более толстого сечением 5 mm^2 , имел прочность 2700 Г/mm^2 .

Явление упрочнения вследствие течения увеличивает разницу в поведении каменной соли при низких и высоких температурах. Каменная соль или разрывается при довольно малых силах, или же, если предел упругости благополучно достигнут, она все упрочняется и течет без разрыва при нагрузках, больших тех, которые вызвали бы разрыв цельного кристалла. Гипотеза существования второй модификации совершенно излишня. Она противоречит также данным рентгенографического анализа. В монохроматическом рентгеновском свете деформированная и недеформированная каменная соль имеет совершенно одинаковую постоянную решетку и структуру решетки. Вместо того чтобы говорить о хрупких и пластических телах, мы должны различать хрупкое и пластическое состояния одного и того же тела, которые разделены точкой пересечения кривой прочности и кривой предела упругости.

4. Упрочнение. Явление упрочнения после механической обработки хорошо известно и находит себе широкое применение в технике. Для объяснения его были сделаны различные предложения, которые, однако, едва ли являются достаточными.

а) Вращение отдельных кристаллов приводит их в положения, отвечающие большой прочности и большому пределу упругости. В кристаллах правильной системы можно этим путем объяснить упрочнение вдвое. Однако прочность, в 12 раз большая, не была найдена в каменной соли ни в каком направлении ни Фойгтом, ни нами.

б) Возможность изменения структуры отдельных кристалликов исключается вследствие вышеописанного результата рентгеновского анализа в монохроматических лучах.

в) Внутренние напряжения между частями кристалла действительно существуют. Величина их была оценена из двойного лучепреломления; она не превосходит 100 Г/mm^2 . Во всяком случае, напряжение могло бы увеличить прочность на разрыв самое большое вдвое, даже если мы сделаем невозможное предположение, что во всем поперечном сечении все части одновременно сжаты, что на самом деле без участия внешних сил невозможно; без этого предположения можно было бы объяснить упрочнение самое большое на 10—20%.

Для объяснения упрочнения вводилось также предположение о существовании аморфных слоев, расположенных между отдельными кристалликами и увеличивающих их сцепление. Мы пытались установить существование таких слоев.

При наблюдении на флуоресцирующем экране действительно наблюдается наряду с удлинением лаузских пятен усиление свечения экрана вокруг центрального пучка. Это свечение могло указывать либо на появление аморфного вещества, либо на совершенно беспорядочное распределение кристаллов, все увеличивающееся наряду с правильным вращением отдельных частей кристалла. Решение вопроса должно было дать фотографирование в монохроматических лучах. Предполагаемые беспорядочно расположенные кристаллики должны были бы дать круги, образующие продолжение закономерных пятен. Между кругами не должно было быть никакого почернения.

Мы пользовались для фотографий, приведенных на рис. 8, Ag-антикатодом с палладиевым фильтром, но при таком высоком напряжении

в трубке, что к яркой линии Ag было примешано еще довольно много белого света, в котором, однако, линия K_{α} резко выделялась. Снимок 1 представляет недеформированный кристалл, снимок 2 — кристалл средне деформированный и 3 — кристалл сильно деформированный. Все три кристалла фотографировались одновременно на одинаковых пленках, и снимки обработаны в совершенно одинаковых условиях. На снимках 2 и 3 поле кажется сильнее зачерненным, чем на снимке 1. Не видно никакого стремления этого почернения стянуться в круги дебаевской фотограммы. Таким образом, если промежуточные слои и существуют, то они, судя по интенсивности почернения, очень тонки и скорее аморфны, а не кристалличны.

Существование аморфных прослоек, следовательно, не невозможно; но если даже считать прочность их очень большой, все же вследствие того, что они в каждом сечении занимают только небольшую его часть, они не могут существенно влиять на прочность кристалла.

г) Искривление внутренних плоскостей раздела может, конечно, изменить предел упругости, но не влияет на прочность кристалла.

Если предположить, что измеренная прочность кристалла приблизительно 450 Г/мм^2 действительно представляет напряжение, при котором преодолевается сила сцепления между разделенными плоскостями, то упрочнение, которое было наблюдено, вряд ли можно объяснить. Против этого предположения можно, однако, выдвинуть различные возражения. Теоретическая прочность, выводимая из хорошо обоснованной электрической теории кристаллов, для плоскостей (100) имеет величину, равную приблизительно 200 кГ/мм^2 . Вычисление, правда, произведено для абсолютного нуля; но мы видели, что влияние температуры не так значительно, чтобы объяснить такое расхождение.

По какому бы закону ни действовали силы сцепления, во всяком случае, теоретически надо ожидать, что предел прочности отвечает максимуму на кривой напряжение — деформация, т. е. точке, где модуль упругости делается равным нулю. В противоположность этому закон Гука справедлив до предела прочности, и модуль упругости не обнаруживает никакой тенденции к уменьшению.

Вторая производная энергия дает вблизи положения равновесия значение коэффициента сжимаемости. Было бы очень странно, если бы

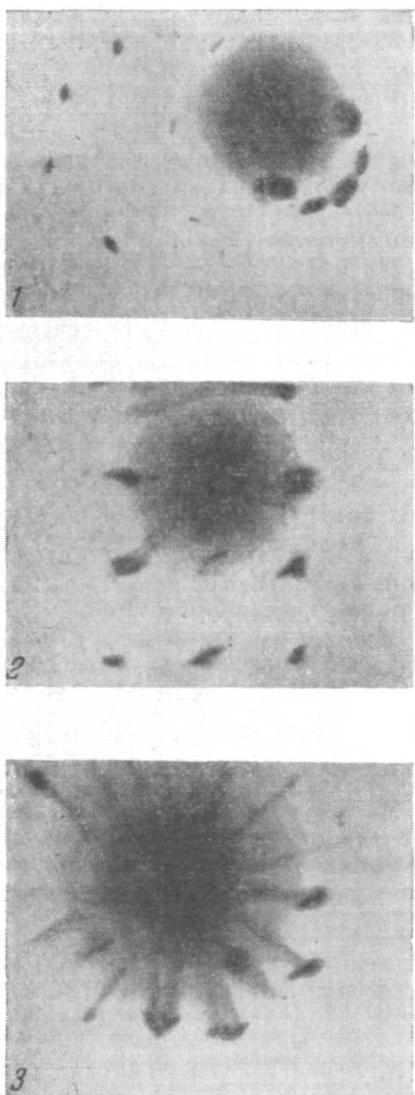


Рис. 8.

максимум ее давал столь неверное значение прочности, совершенно другого порядка величины, чем действительное.

Поэтому невероятно, что действительная прочность, которую определяет наибольшая сила сцепления на единицу площади, имеет величину вычисленную, а не наблюденную. Разрыв происходит гораздо раньше, чем достигается эта граница. Если это предположение верно, то в кристалле разрыв должен обусловливаться другими побочными причинами и в упрочнении мы имеем только приближение к истинной прочности через устранение части этих причин.

Гриффитс видит такую причину в образовании тонких и острых трещин, и на этом основании он построил новую теорию прочности. Если мы примем, что при достижении наблюдаемой прочности 450 Г/мм^2 на поверхности кристалла возникают такие трещины и вследствие перенапряжения на своих острых концах растут все дальше, то вскоре же весь кристалл будет расщеплен без того, чтобы хотя на один момент силы сцепления были преодолены по всей поверхности. Если такие тонкие трещины уже с самого начала существуют на поверхности, то «прочность» 450 Г/мм^2 дает среднее напряжение, при котором трещины начинают расти вследствие значительных перенапряжений на их концах. Если мы не имеем уже деформированное многокристальное тело, то каждая трещина может идти только до границы отдельного кристаллика и не влечет за собою расщепления всего образца.

Такое представление сейчас же объяснило бы опыты Фойгта и заставило бы придать особенное значение поверхности кристалла. В самом деле, известно, что Буд на съезде в Ливерпуле обратил внимание на то, что каменная соль в горячей воде делается гибкой, тогда как в столь же горячем масле она остается хрупкой. Мы убедились, что также в кипящем насыщенном растворе соли каменная соль остается хрупкой, тогда как в холодной воде тонкие кристаллы совершенно пластичны. Мы предположили, что теплая вода, растворяя поверхность, быстро уничтожает трещины и через это предохраняет от преждевременного разрыва.

Мы попытались произвести разрыв в горячей воде. Тотчас же оказалось, что, несмотря на то, что температура кристалла была гораздо ниже 200° С , предел упругости был перейден без разрыва и кристалл начал течь, одновременно растворяясь. Прочность, определяемая отношением нагрузки к окончательному сечению при разрыве, достигла величин, которые возросли до 30 и даже 160 кГ/мм^2 , т. е. до величин порядка, указанного теорией.

Вполне наглядное доказательство упрочнения при действии воды представляет рис. 9. Образец соли имел форму 2 на рис. 4. Середина его имела сечение 20 мм^2 , и эта часть была помещена в воду.

Вода кверху доходила до места, имевшего сечение около 60 мм^2 . Средняя часть была растворена до сечения 5 мм^2 . При нагрузке разрыв произошел не по тонкой части (в воде), имевшей поперечное сечение 5 мм^2 , а в части, лежавшей непосредственно над водой, при нагрузке приблизительно 25 кГ . На сухом месте разрыва напряжение было 450 Г/мм^2 , часть же, находившаяся в воде, выдерживала при этом напряжение 5000 Г/мм^2 , не разрываясь. В другом опыте иголочка из каменной соли толщиной приблизительно $0,1 \text{ мм}$, т. е. поперечного сечения $0,01 \text{ мм}^2$, выдерживала под водой без разрыва нагрузку $1,5 \text{ кГ}$, т. е. 150 кГ/мм^2 .



Рис. 9.

Эти числа подходят гораздо ближе к теоретической величине 200 kГ/мм^2 , чем к обычной — 450 Г/мм^2 .

Насколько в этих опытах, сопровождаемых, конечно, одновременным течением вещества, оказывается влияние ускорения и внутреннего трения — это еще должно быть исследовано.

Одновременно эти опыты открывают возможность наблюдать предел упругости ниже 200° С не только при сжатии, но и при растяжении. Соответствующие величины нанесены на рис. 6, кривая I.

Дальнейшие опыты над связью электрической теории кристаллов с явлениями прочности при раскалывании и сдвиге в различных направлениях, так же как и наблюдение других кристаллов, производятся в настоящее время и будут опубликованы позднее.

Средства для этой работы были доставлены мне в большей части Научно-техническим отделом ВСНХ.

За щадительное и точное выполнение всех описанных приборов и препаратов кристаллов я весьма обязан механику Э. Фельдману. Конструкция приборов разработана инженером В. Н. Дыньковым.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Применен способ рентгеновского анализа для исследования упругости и для выяснения пластичности и твердости кристаллов. Обнаружилось, что пластическая деформация состоит в разделении кристалла на отдельные части, которые скользят в плоскости ромбического додекаэдра и при этом поворачиваются на различные углы.

2. Предел упругости определен как напряжение при начинающемся изменении рентгеновской картины, и установлено, что он представляет однозначную постоянную вещества. При возрастающей температуре предел упругости понижается и с приближением к точке плавления падает до нуля. Представляется вероятным, что такой ход выражает общий закон.

3. Прочность на разрыв не зависит от температуры между —190° и +650° С, по крайней мере в первом приближении, и для круглых цилиндров из каменной соли в направлении [100] равна приблизительно 450 Г/мм^2 .

При 200° С прочность на разрыв в этом направлении равна пределу упругости. Ниже 200° С каменная соль разрывается без остаточной деформации, выше 200° С она течет без разрыва. Температура перехода из хрупкого в пластическое состояние зависит от ориентировки и от рода деформации. Подобная же температура существует и для других кристаллов.

4. Пластическая деформация увеличивает прочность каменной соли на разрыв до 12 раз.

5. Теории упрочнения недостаточны для количественного объяснения упрочнения даже в том случае, если бы их можно было вообще считать качественно верными.

6. Истинной прочностью кристалла является, по-видимому, та, которая предсказывается теорией, 200 kГ/мм^2 , а не наблюдается обычно (0,45 kГ/мм^2). Кристалл разрывается прежде всего вследствие поверхностных дефектов (вероятно, тонких трещин). Если во время опыта непрерывно возобновлять поверхность растворением в воде, то кристалл не разрывается при 450 Г/мм^2 , но достигает предела упругости при 700 Г/мм^2 и течет. Напряжение на поверхности разрыва может при этом стать близким к теоретической величине. Были наблюдены напряжения до 160 kГ/мм^2 в случае каменной соли.