

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ЯВЛЕНИЯ РАЗЛОМА В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
И АМОРФНЫХ ТЕЛАХ***Д. Б. Гогоберидзе*

ВВЕДЕНИЕ

До сих пор во всех исследованиях механических свойств кристаллов и аморфных тел авторы особенно подчёркивали различие между ними. Действительно, эти различия очень велики. У кристаллических тел мы наблюдаем правильную пластическую деформацию с определёнными и ясно выраженными плоскостями деформации и с определённой геометрией. У аморфных тел правильной пластической деформации не наблюдается. Аморфные тела под действием силы или разламываются, или текут, или же приходят в напряжённое состояние, заметное по вызванному им двойному лучепреломлению.

Однако существуют явления, в которых проявляется известная аналогия между свойствами кристаллических и аморфных тел — это явление разлома. До сих пор, как будто бы, на такую аналогию не обращалось достаточного внимания, и нашей задачей в настоящей статье будет обсудить этот интересный вопрос.

§ 1. ЯВЛЕНИЯ РАЗЛОМА В АМОРФНЫХ ТЕЛАХ

При ударе по аморфному телу или при статическом воздействии достаточной величины происходит его разрушение. Как известно, аморфные тела не могут пластически деформироваться и при малых воздействиях деформируются упруго, а затем, если воздействие длительное и небольшое по величине, они текут. Если же воздействие достаточно велико по своей величине, то в аморфных телах наблюдается хрупкое разрушение — круп-

кий разлом. Наконец, известно, что в аморфных телах могут иметь место большие деформации особого рода, связанные появлением двойного лучепреломления. Эти деформации могут обратимо исчезать при снятии нагрузки, но могут и оставаться в теле.

Детали явления разлома очень сильно зависят от формы и материала образца, от величины и скорости воздействия силы, но общая картина остаётся во всех случаях до некоторой степени сходной. На всех поверхностях разлома аморфных тел — так называемого раковистого разлома — мы наблюдаем гладкую искривлённую поверхность, на которой заметны образования двух родов: во-первых, это системы радиальных трещин, иногда насквозь прорезающих образец, во-вторых, своеобразная система концентрических колец. Образование радиальных трещин наблюдается, например, при ударе телом с большой поверхностью, движущимся с малой скоростью, но с достаточно большой кинетической энергией, о пластинку стекла (рис. 1). В этом случае выкалывается конусообразный кусок стекла, который делится радиальными трещинами на части. При ударе тела с малой кинетической энергией, например лёгкого шарика, в стекле возникает круглая трещина, не проходящая пластинку насквозь.

Если ударяющееся тело имеет малую площадь, но большую кинетическую энергию, например пуля, то оно пробивает стекло насквозь, не разбивая его. При этом в стекле образуется конусообразная выколка, обращённая вершиной к направлению движения пули, иногда без трещин. Что же касается конусообразного куска стекла, выбитого из пластинки, то он обычно разбивается на части.

Наконец, при ударе по большому куску стекла неправильной формы, особенно у его края, возникают осколки (рис. 2), по форме очень напоминающие раковину. Очевидно, это давно уже заметили и отсюда и возникло само название — раковистый излом.

Внимательно разглядывая поверхность такого раковистого излома, мы замечаем в нём, кроме изогнутой поверхности разлома, ещё своеобразную систему трещинок или линий, исходящих из той точки, в которую был произведён удар, и образующих как бы своеобразный веер. Мы подобное образование назвали «розой разлома» по аналогии с «розой ветров». Линии розы разлома соответствуют направлениям действия силы.

Как уже сказано, кроме системы радиальных линий, на поверхности разлома мы находим ещё также и своеобразную систему концентрических колец, которую мы называем «кольцами разлома». На каждой поверхности разлома налицо образования этих двух родов — розы разлома и колец разлома. При этом относительное развитие этих двух образований (рис. 3 и 4) будет

зависеть от условий действия силы, от её величины, от скорости воздействия, от площади соприкосновения тел и от материала тела. Наконец, следует отметить, что когда под влиянием неравномерного нагрева стеклянная пластинка трескается, то эта трещина (если она одна) имеет волнообразную форму, воспроизводя в увеличенном по оси ординат масштабе картину, наблюдающуюся в кольцах разлома. При соответственных изменениях условий теплового воздействия можно добиться повторения тех же колец разлома и розы разлома, что и при механическом воздействии. Иными словами, резкое и неравномерное нагревание, вызывающее заметное расширение стекла и возникновение внутренних напряжений, приводит к таким же последствиям, что и местное механическое воздействие.

Совершенно естественно встаёт вопрос о причине возникновения этих образований.

Что касается розы разлома, то её линии представляют собой линии действий силы при разломе и их направление характеризует собою направление максимальных скальвающих напряжений при разломе. Сложнее обстоит дело с кольцами разлома.

Действительно, рассматривая различные стеклянные изделия, мы можем заметить, что аналогичные образования возникают не только при разломе, но также, например, при раздувании и вытягивании стекла. На многих оконных стёклах, на поверхности стеклянной посуды мы замечаем аналогичные образования (рис. 5). Наконец, подобные образования могут быть воспроизведены ещё и следующим образом. Возьмём пластинку из тёмного стекла и тщательно её обезжирим. После этого погрузим пластинку в воду. Если её поверхность была достаточно тщательно обезжирена, то она приобретёт способность смачиваться водой и после вынимания её из воды на ней останется тонкий и (если пластинку расположить горизонтально) равномерный слой воды. Если теперь быстро надавить на угол этой пластинки пальцем, то мы увидим, как по поверхности воды побежит кольцевая волна, совершенно аналогичная тем кольцам разлома, которые наблюдаются в стекле. Конечно, в случае водяной поверхности эта волна быстро затухнет и исчезнет, но можно со всей вероятностью предположить, что при разломе аморфных тел кольца разлома тоже представляют собою как бы застывший след такой волны. Иначе говоря, можно предполагать, что образующиеся при вытягивании стекла и при разломе твёрдых аморфных тел кольца разлома представляют собою как бы след той упругой волны, которая возникла в момент воздействия силы на тело и под влиянием которой произошёл разлом.

Волна, бегущая по поверхности жидкости, когда в неё брошено какое-либо тело, представляет собою совершенно аналогичное образование.

§ 2. РАЗЛОМ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛАХ

Как известно, разлом в кристаллических телах резко отличается от разлома в аморфных прежде всего тем, что кристаллические тела анизотропны и, в частности, в них есть некоторые основные плоскости, по которым разделение частей кристалла происходит особенно легко (так называемые плоскости спайности), чего в аморфных телах нет. Однако, кроме разлома по спайности, в кристаллических телах возможен также и раковистый излом. При этом некоторые кристаллы имеют настолько плохую спайность, что в них возможен только раковистый излом.

Не следует думать, что в кристаллах раковистый излом является чем-то редким или даже исключительным. Напротив, у большинства кристаллов именно раковистый излом является основным, а часто даже и единственным возможным разломом. Только у некоторых кристаллов с особенно совершенной спайностью разлом по спайности играет существенную роль и встречается часто, но даже у них он никогда не является исключительным.

Поэтому мы сначала рассмотрим раковистый разлом в кристаллах, а затем разлом по спайности.

§ 3. РАКОВИСТЫЙ ИЗЛОМ В КРИСТАЛЛАХ

Раковистый излом в кристаллах совершенно подобен раковистому разлому в аморфных телах. Мы встречаем в кристаллах такую же гладкую изогнутую поверхность разлома, покрытую системой колец разлома и линиями розы разлома. Нам случалось видеть обломки кварца, которые по форме были совершенно тождественны формам осколков стекла, настолько, что без помощи поляризационного микроскопа было бы невозможно сказать, является ли данный обломок осколком кристаллического или аморфного тела.

Однако нередко и на правильно образованных кристаллах или на их частях можно видеть поверхности раковистого излома или их части. Особенно ясная картина раковистого излома нами наблюдалась на кристаллах кварца (рис. 6, 7 и 8).

Нужно отметить, что в минералогии, в общем, хорошо известно, что многие кристаллы могут давать раковистый излом. Наряду с этим некоторые учёные считают, что некоторые кристаллы (например, каменная соль, кальцит и т. п.) всегда при разломе ограничены плоскостями спайности. Нам подобное утверждение представляется неосновательным. Действительно, мы уже макроскопически можем убедиться в том, что в кристаллах кальцита иногда встречается раковистый излом. Что же касается кристаллов каменной соли, то здесь дело обстоит сложнее.

Весьма часто высказывается мысль о том, что кристаллы каменной соли при дроблении всегда делятся на части, ограниченные гранями куба. Подобная мысль, например, наша, своё отражение в известном учебном кинофильме «Кристаллы», поставленном под редакцией и с участием покойного проф. Н. И. Добронравова, где изображается, как большой куб каменной соли делится при ударе молотком на ряд прямоугольных параллелепипедов, а ромбоэдр кальцита — на ряд других ромбоэдров и не показывается явлений, связанных с возникновением разлома по другим плоскостям и раковистого излома. Подобная же мысль положена в основу теории, представляющей твёрдость как поверхностную энергию ионных кристаллов, развиваемой известным томским физиком В. Д. Кузнецовым. Согласно взглядам В. Д. Кузнецова в процессе шлифовки и полировки от основного кристалла отрывается ряд осколков, представляющих собою по форме прямоугольные, параллелепипеды или кубы, которые затем уже, в ходе обработки, не испытывают дальнейшего дробления. Кузнецов считает, что разлом кристалла каменной соли по другим граням, кроме грани куба, всегда имеет ступенчатый характер, а раковистый излом вообще невозможен.

Мы уже указывали, что нам подобный механизм этих явлений представляется неверным. Трещины, возникающие в кристаллах каменной соли, под действием сосредоточенной нагрузки как при ударе, так и при статическом вдавливании, легче образуются по плоскостям ромбододэкаэдра. При ударе на грани куба раньше возникает система трещин, идущих приблизительно вдоль плоскостей ромбододэкаэдра, а затем уже система трещин, идущих точно по граням куба, которые менее ясно выражены и при малых деформациях, т. е. при малых нагрузках, вообще могут отсутствовать. Таким образом, в условиях воздействия локализованной нагрузки разлом по ромбододэкаэдру может идти легче, чем по кубу, т. е. чем по плоскости спайности.

Нужно отметить, однако, что трещины по ромбододэкаэдру не идут точно по кристаллографическому направлению; они могут заметно от него отклоняться (как на это уже указывал В. Д. Кузнецов) и даже изгибаться, в то время как трещины по кубу, более узкие и менее ясно выраженные, идут точно по грани куба.

Далее, благодаря исследованиям В. Д. Кузнецова известно, что плоскость свободных колебаний маятника с одной опорой (одно остриё или шарик) стремится установиться таким образом, чтобы она совпадала с направлением наименьшей прочности того материала, на который опирается маятник. Иначе говоря, маятник с одной опорой, когда эта опора помещена на анизотропное тело, поворачивается до тех пор, пока плоскость его качаний не совпадёт с направлением наименьшей прочности в этом теле. В частности, как оказалось по наблюдениям В. Д. Кузнецова, в кристалле

каменной соли направление свободных качаний такого маятника совпадает с плоскостью ромбододэкаэдра. Это понятно, так как опора маятника при качании выдавливает углубление эллиптического сечения и, согласно принципу минимума работы, маятник должен ориентироваться так, чтобы направление большей оси этого эллипса совпадало с направлением наименьшей прочности на данной грани.

Таким образом, мы снова приходим к выводу, что в некоторых условиях плоскость ромбододэкаэдра в кристаллах каменной соли и есть плоскость наименьшей прочности.

При шлифовке и пилке кристаллов каменной соли часто откалываются треугольные осколки, ограниченные двумя гранями, близкими к ромбододэкаэдру (короткие стороны треугольника, сходящиеся у тупого угла) и одной (длинной стороной) гранью куба. Это очень ясно видно на рис. 9. Подобные осколки встречаются наиболее часто по сравнению с другими формами. Наряду с такими, наиболее часто встречающимися осколками сравнительно правильной формы, при шлифовке и резке каменной соли встречаются также и осколки совершенно неправильной формы, ограниченные, по видимому, только поверхностями раковистого излома. Микрофотография подобного осколка изображена на рис. 10.

Таким образом, мы приходим к заключению, что даже у кристаллов с весьма совершенной спайностью, например каменная соль и кальцит, наблюдается раковистый разлом, со всеми его характерными особенностями, отмеченными в случае аморфных тел и кристаллов, с плохо выраженной спайностью. На поверхности разлома мы находим такую же розу разлома и кольца разлома, как на поверхности аморфных тел.

§ 4. РАЗЛОМ ПО СПАЙНОСТИ

Кроме раковистого излома, у некоторых кристаллов мы встречаемся с разломом по спайности, причём эта спайность бывает разной степени совершенства. Приводимые ниже соображения относятся к разлому и спайности кристаллов с весьма совершенной спайностью, например каменная соль, кальцит, барит и т. п. В этих кристаллах плоскость спайности, получаемая при расколе, представляет собою почти что идеальную, зеркально-гладкую поверхность. На ней заметны только сравнительно ничтожные неровности. Это послужило причиной тому, что обычно так и считают, что поверхность спайного скола у кристаллов с весьма совершенной спайностью представляет собой действительно очень гладкую поверхность. Между тем это совсем не так. Разглядывая поверхность спайного скола в отражённом свете под малым углом, мы заметили на ней характерные неровности. Эти неровности особенно простую форму приобретают в том случае, если раскол вести

с помощью очень острого лезвия и если это лезвие ориентировано определённым образом относительно кристалла.

В частности, в случае кристалла каменной соли лезвие следует ориентировать в плоскости куба, вдоль которой хотя и произвести раскол, и при этом так, чтобы оно образовывало углы в 45° с плоскостями куба, перпендикулярно к той плоскости, по которой мы хотим расколоть кристалл. Иначе говоря, лезвие должно быть перпендикулярно к тому ребру куба, которое, в свою очередь, перпендикулярно к плоскости, вдоль которой желательно произвести раскол, и в то же время должно образовывать с обеими плоскостями, которые пересекаются в этом ребре, равные углы.

Если немозаичный кристалл каменной соли расколоть подобным образом, то на поверхности спайного скола мы увидим образования двух родов. С одной стороны — это ряд линий, веерообразно расходящихся из того угла, где находилось лезвие в момент раскола. Этот веер линий совершенно аналогичен с розой разлома, возникающей на поверхности разлома аморфных тел. В случае спайного скола кристалла линии меньше и тоньше. Внимательно рассматривая поверхность подобного кристалла, мы легко убедимся в том, что линии розы разлома на его поверхности представляют собою ряд очень мелких ступенек, т. е. что раскол по спайности имеет слегка ступенчатый характер (рис. 11). В некоторых случаях, если число этих ступенек невелико, то их высота может быть значительна (порядка 0,1 мм), если же их много, то они гораздо ниже.

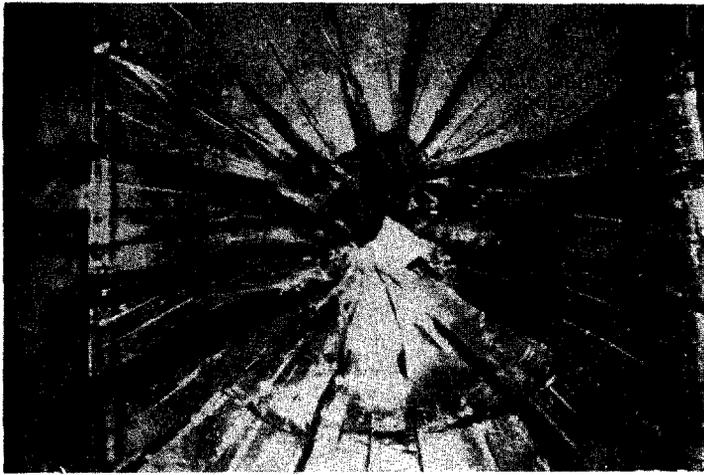
Наряду с этим, кроме линий, образующих розу разлома, наблюдаются также ещё линии и другого рода. Эти линии образуют как бы ряд концентрических колец. Они вполне аналогичны описанным выше кольцам разлома, но только в случае кристалла гораздо мельче, чем у аморфных тел. Эти кольца по профилю сильно отличаются от линий розы разлома. В то время как первые представляют собою ступеньки, эти последние представляют собою возвышения, имеющие волнистый характер (рис. 12 и 13). Мы считаем, что действительно они представляют собою кольца разлома, такие же, как в случае аморфных тел или раковистого излома. Следует заметить, что, кроме кристаллов каменной соли, нам случалось наблюдать кольца разлома и розу разлома также и на спайном сколе кристаллов барита.

Сравнительное развитие колец разлома и розы разлома на поверхностях спайного скола не всегда одинаково. В зависимости от условий при расколе, от степени совершенства кристалла и от того, насколько точно удалось ориентировать лезвие бритвы при расколе, бывают яснее выражены то кольца разлома, то роза разлома. Наличие несовершенств в кристалле, например приводящих к возникновению уступов на плоскости раскола, обязательно приводит к возникновению около этого уступа особенно

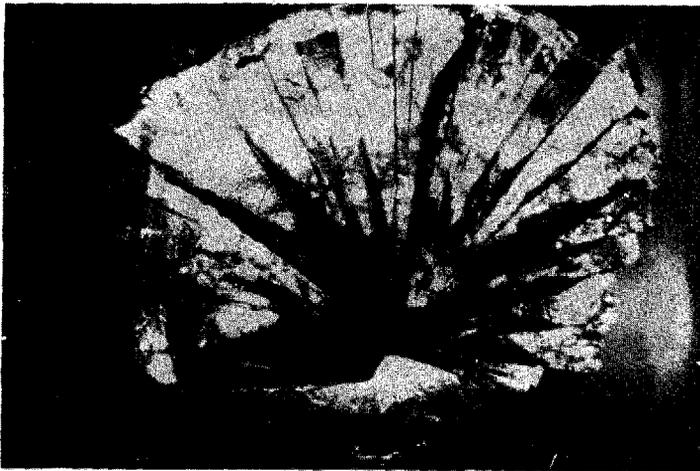
густой системы колец разлома. Это совершенно подобно особенно густой системе прибойных волн у волнолома в море.

Таким образом, мы видим, что в случае разлома по спайности мы встречаемся с теми же образованиями — розой разлома и кольцами разлома, присутствие которых мы уже отмечали в случае аморфных тел.

В заключение автор хотел бы отметить, что часть снимков в настоящей статье сделана Цариковской. Автор выражает искреннюю признательность доценту В. А. Франк-Каменецкому за предоставление ряда кристаллов.



a

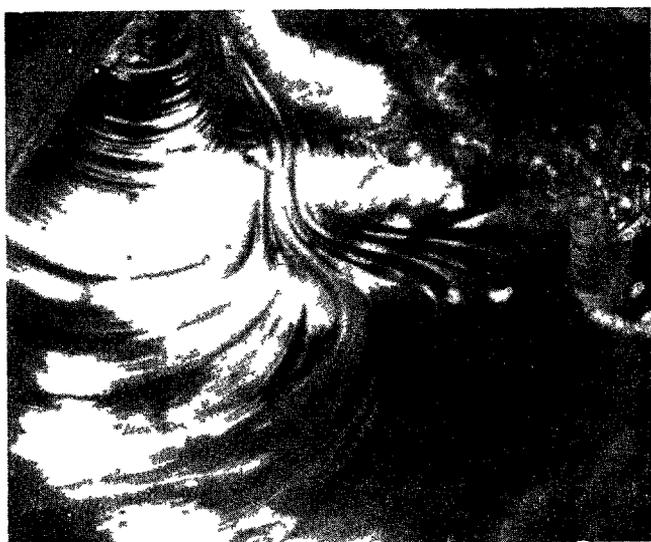


б

Рис. 1. Воздействие локализованной силы на квадратную пластинку стекла.

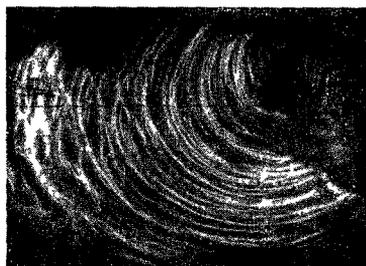


Рис. 2. Осколок стекла с раковистым изломом; по форме действительно очень напоминает раковину.



a

Рис. 3. Кольца разлома на большом куске стекла.



б

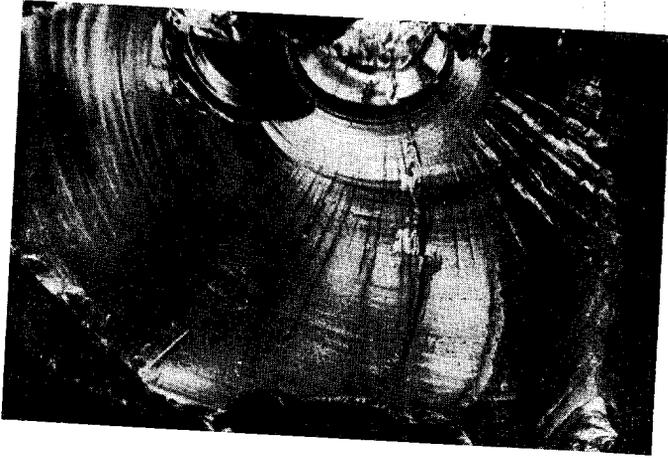


Рис. 4. Кольца разлома и роза разлома на канифоли.

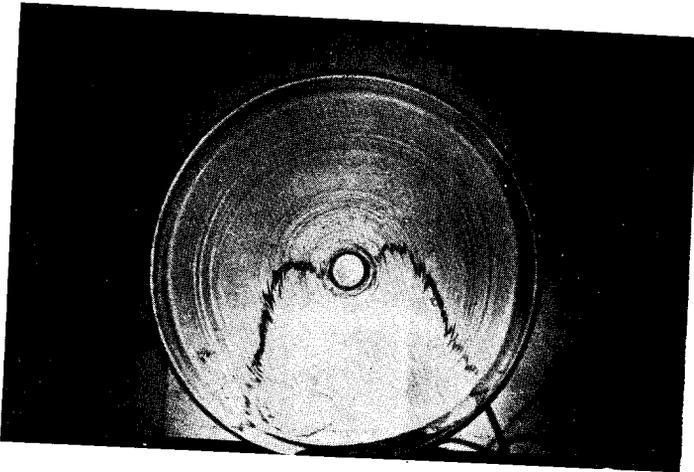


Рис. 5. Кольца на поверхности стеклянной воронки.



Рис. 6. Кольца разлома на кристалле кварца.

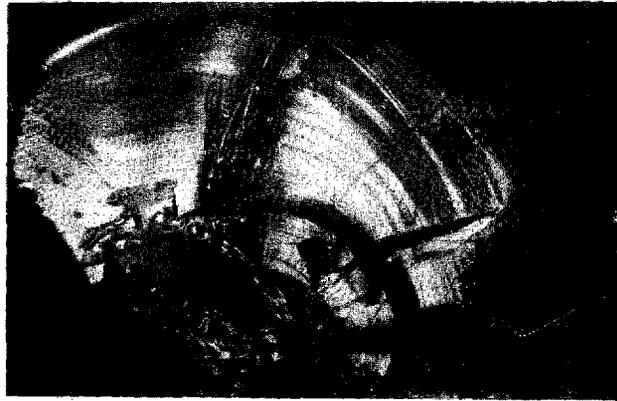


Рис. 7. Роза разлома и кольца разлома на поверхности кристалла.



Рис. 8. Раковистый излом на кварце. Осколок.

Рис. 9. Треугольный осколок типичной формы для кристалла каменной соли, полученный в начальной стадии шлифовки. Длинная сторона—точно грань куба, короткие стороны близки к ромбододекаэдру. Видны также поверхности раковинного излома. Увеличено в 20 раз.

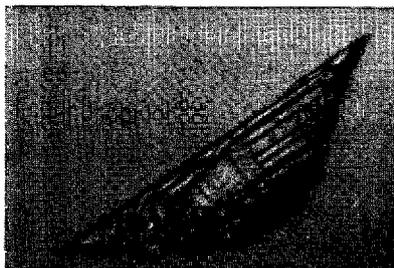


Рис. 10. Осколок кристалла каменной соли, полученный при шлифовке и ограниченный поверхностями раковинного излома. Микрофотография. Увеличено в 20 раз.



Рис. 11. Линии розы разлома на спайном сколе кристалла каменной соли.

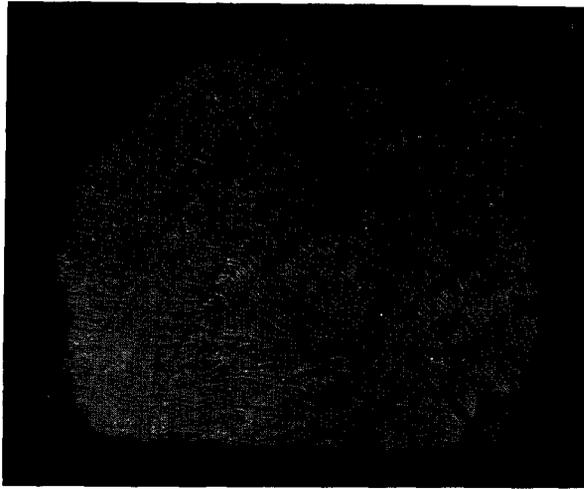


Рис. 12. Весьма совершенный спайный скол каменной соли. Тончайшие линии розы разлома и их изгибы, образующие кольца разлома.

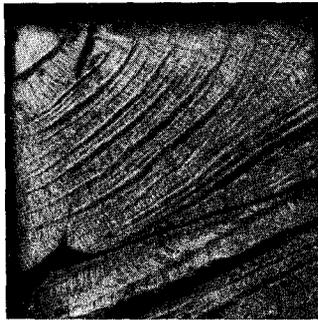


Рис. 13. Кольца разлома на поверхности спайного скола у ступеньки на поверхности.