

КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

Г. Г. ЛЕММЛЕЙН

**ПРОЦЕСС ЗАЛЕЧИВАНИЯ ТРЕЩИНЫ В КРИСТАЛЛЕ  
И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФОРМЫ ПОЛОСТЕЙ ВТОРИЧНЫХ  
ЖИДКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ**

*(Представлено академиком Д. С. Белянкиным 10 IV 1951)*

Поскольку подавляющая масса жидких включений в минералах образовалась вторичным путем в результате залечивания трещин, было весьма существенно изучить самый процесс залечивания экспериментально. В моей работе (1), в которой впервые был описан этот процесс, были фиксированы только отдельные этапы этого процесса; поэтому нельзя было полностью судить обо всех его деталях и о таких важных его сторонах, как источник материала и энергии, потребных для осуществления залечивания. Так как залечивание трещины протекает довольно медленно, то для создания цельной картины всего процесса была применена покадровая микрокиносъемка с интервалами между кадрами от 3 сек. до 1 мин. Скорость залечивания существенно зависит от растворимости веществ и потому для опытов была использована обладающая большой растворимостью Na-селитра. Опыт проводился в помещении, температура которого при непрерывном горении осветительной лампы повышалась с 19 до 21° в течение 10—12 час. Съемка велась на 16-миллиметровую пленку через микроскоп с увеличением в 300 раз.

Кристаллы Na-селитры обладают идеальной спайностью по ромбоэдру. В куске кристалла 10×10×4 мм нажимом лезвия ножа делалась неглубокая трещина, параллельная широкой грани спайного куска. Глубина такой выклинивающейся трещины не более 3—5 мм, высота ее в широкой части была менее 1 μ. В сухую трещину вводилась капля насыщенного или даже недосыщенного раствора селитры. Рост залечивающего дендрита начинался мгновенно в выклинивающейся части трещины или на входящих углах микроступеней поверхности трещины. Как видно на приведенных увеличенных кинокадрах (см. рис. 1, 1, 2a), растущие поверхности дендрита образованы гранями ромбоэдра. Образец помещался на микроскопе так, что короткая диагональ ромбоэдрической грани, параллельно которой была сделана трещина, располагалась на кадре вертикально. Плоскость трещины совпадает с плоскостью кадра. Просмотр снятого фильма, дающий ускорение течения процесса от 50 до 900 раз, позволил установить ряд совершенно новых и важных обстоятельств.

1. Установлено, что вблизи выклинивающегося края трещины отложение вещества протекает с громадной скоростью. С увеличением высоты трещины скорость залечивания прогрессивно и резко падает. В некотором удалении от выклинивающегося края трещины скорость роста плоского дендрита замедляется настолько, что можно спокойно наблюдать все своеобразные особенности роста кристалла из насыщен-

ного раствора в клиновом пространстве капиллярных размеров между стенками того же вещества. Встает вопрос: откуда берется вещество для залечивания трещины, раз в нее введен насыщенный или даже недосыщенный раствор, а температура системы остается постоянной или медленно повышается? Оказывается, материал для роста дендрита и залечивания трещины получается со стенок трещины, путем их растворения, т. е. проникший в трещину раствор только переоткладывает материал. Перед фронтом растущих граней дендрита отчетливо видна огибающая его непрерывная нерезкая полоса, свидетельствующая о том, что впереди четких растущих граней имеется пологая ступенька, в своем перемещении все время предшествующая фронту нарастания (рис. 1, 1, 2а). С исчезновением этой ступеньки прекращается нормальный рост граней дендрита. Высота растущих граней дендрита и высота прилегающего к ним пространства каймы растворения выше высоты залечиваемой трещины. Включения, образующиеся из затеков маточного раствора между балочками дендрита, имеют, соответственно, также большую высоту полости, чем была высота трещины в том месте, на котором они образовались. Однако суммарный объем всех включений, оставшихся после залечивания относительно большого участка трещины, равен исходному объему этого участка трещины. В условиях режима охлаждения, естественно, из проникшего в трещину раствора должна выделяться часть растворенного вещества, однако для залечивания трещины его было бы недостаточно, даже при весьма высоких растворимостях.

2. Откуда же берется энергия для всей этой перестройки в изотермических условиях? Вводя в трещину насыщенный раствор, мы создаем своеобразную капиллярную систему кристалл — раствор. С некоторыми допущениями мы вправе рассматривать достаточно большой участок объема трещины, заполненной раствором, как систему замкнутую. Особенностью этого объема является его огромная удельная поверхность. Поверхность трещины в десятки, даже в сотни раз превышает минимальную поверхность для того же объема, ограниченного гранями того же индекса. Отсюда ясно, что основным источником энергии, требующейся для перестройки стенок трещины, является избыток поверхностной энергии системы. Граница раздела системы стремится принять форму полого ромбоэдра с ребрами равной величины. Однако, так как залечивание трещины идет дендритообразно во многих пунктах, то происходит разбиение всего неравновесного объема трещины на ряд малых равновесных объемов — вторичных включений раствора.

3. Включение раствора в кристалле является уже без особых допущений замкнутой системой, весьма удобной для наблюдения. Можно утверждать, что после достижения равновесия между кристаллом и раствором форма полости включения вполне эквивалентна равновесной форме кристалла соответствующего размера. Опыт с образованием вторичных жидких включений позволяет экспериментально решить задачу П. Кюри<sup>(2)</sup>, предложенную им в 1885 г. в известном мемуаре о капиллярных постоянных граней кристалла. Он пишет: «Когда кристалл погружен в свой насыщенный маточный раствор при постоянной температуре, то совершенно очевидно, что этот кристалл не изменит своей формы, если эта форма наиболее устойчива; но если она не удовлетворяет условию устойчивости, то будет ли он деформироваться сам собою? Это кажется вероятным, но решит это только опыт». Ю. В. Вульф<sup>(3)</sup>, развивая вопрос о равновесной форме кристаллов и о поверхностной энергии граней, пришел к выводу, что «минимум поверхностной энергии при данном объеме многогранника достигается при том взаимном расположении его граней, когда они удалены от одной и той же точки на расстояния, пропорциональные их капиллярным постоянным». Это правило получило название принципа Вульфа — Кюри.

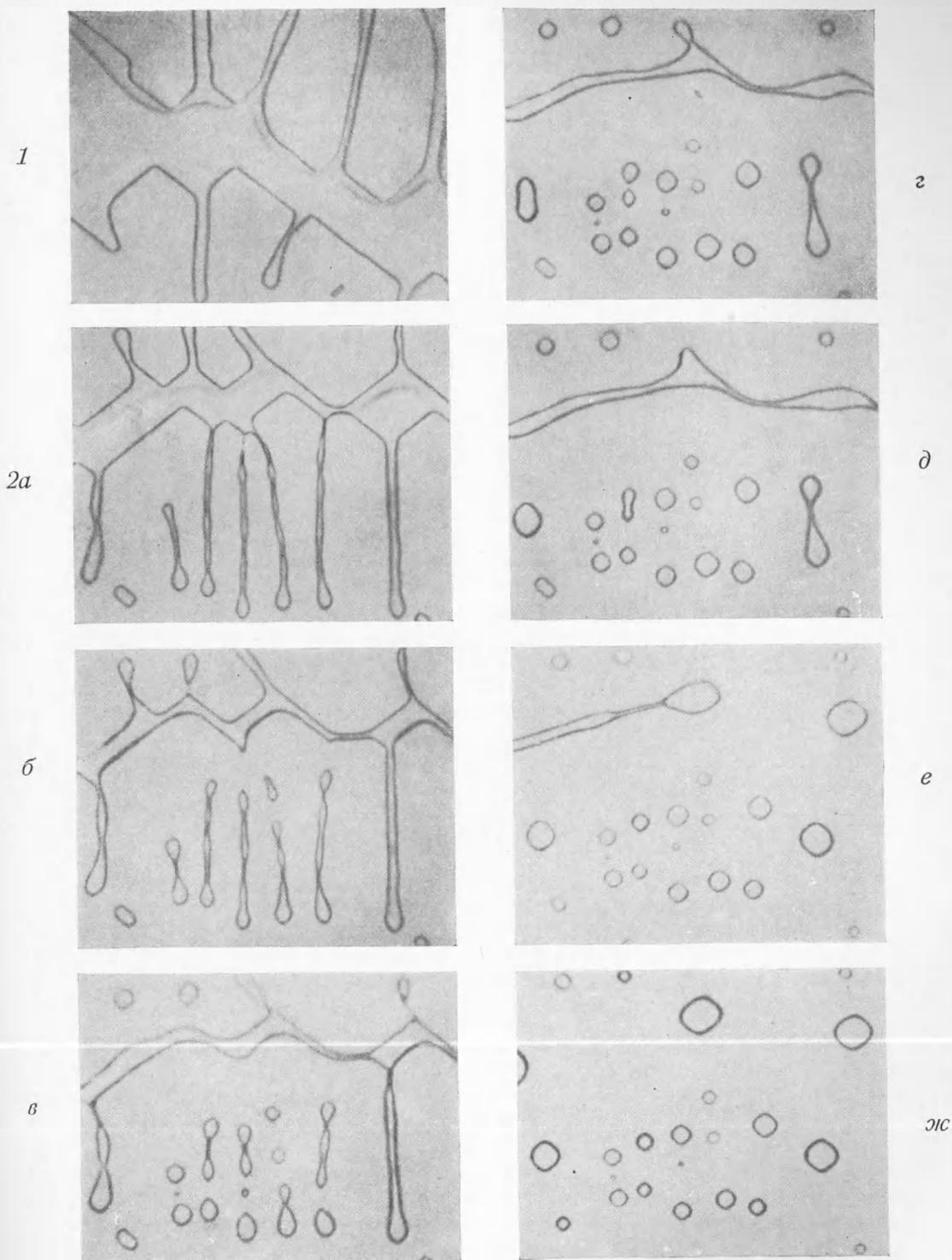


Рис. 1. 1 — кайма растворения впереди растущего фронта граней дендрита, 2а — жс — преобразование формы полости включений. Интервал между снимками а и б 45 мин.; б и в 55 мин.; в и г 154 мин.; г и д 63 мин.; д и е 20 час.; е и жс 4 суток.  $\times 300$

Как было отмечено мною в 1929 г., принцип Вульфа — Кюри применим и к форме полости включения раствора в кристалле (отрицательному кристаллу). Более того, описываемый опыт является первым примером, в котором форма полости в кристалле (соответственно, форма кристалла) меняется в результате стремления принять поверхность с наименьшей поверхностной энергией. На прилагаемых последовательных кадрах фильма (рис. 1, 2а—ж) видно, как первоначальная неравновесная удлиненная форма включений, унаследованная от затеков между балочками дендрита, постепенно превращается в равновесную форму ромбоэдра с несколько округленными ребрами и вершинами (4). В ряде случаев удлиненные включения распадаются на несколько включений. Вначале обычно происходит замена неустойчивых поверхностей гранями ромбоэдра {1011}. Одновременно происходит растворение всех выпуклых поверхностей и углов и отложение на вогнутых участках и углах. После того как полость огранена уже гранями ромбоэдра, но размеры этих граней еще между собой не равны, происходит постепенное уравнивание граней и ребер. Полость еще несколько увеличивается по высоте, но при этом сокращается площадь граней, параллельных бывшей трещине.

Итак, преобразование формы полостей включений идет в следующих направлениях: 1) сглаживания поверхностей, 2) образования равновесных граней, 3) уравнивания ребер. Этот процесс не идет прямолинейно. В первую очередь совершается та перестройка, которая, очевидно, сразу дает максимальный энергетический эффект, хотя полученная поверхность еще и не является равновесной и подлжет дальнейшей перестройке. В этом ступенчатом процессе происходит неоднократное переотложение вещества. Конечная картина расположения вторичных включений только отдаленно, общим планом, напоминает о картине дендритного роста и последующих этапах преобразования.

Описанный процесс залечивания трещины, образования вторичных включений раствора и преобразования формы полости включений наблюдается во всей полноте только в тонких участках трещины. В более толстых участках образующиеся включения практически никогда полностью не достигают равновесной формы, а остаются плоскими и нередко разветвленными.

4. Очевидно, что трещины капиллярных размеров в кристаллах минералов залечивались подобным путем. Об этом особенно свидетельствуют участки вблизи выклинивающегося края трещины. В широкой части трещины, у входа в тело кристалла, конечно, мог быть обмен раствора и помимо диффузии, но этот обмен только способствовал бы ускорению запечатывания трещины и перекрытию ее входа слоями, вновь нарастающими на наружной поверхности кристалла (5). В одном и том же кристалле кварца или топаза из пегматита вторичные включения, образовавшиеся при более высоких температурах, имеют полости более изометричные, чем включения, образовавшиеся при более низких температурах. А изометричные формы получают у первых полостей больших размеров, чем у вторых.

Переотложение вещества в результате стремления к минимуму поверхностной энергии кристаллов в геологических условиях, повидимому, достигает внушительных масштабов, если вспомнить, что, по подсчетам В. И. Вернадского (6), количество воды включений в полостях минералов соизмеримо с количеством воды в океане. Обширные явления перекристаллизации, столь характерные для зон цементации и метаморфизма пород, в значительной мере могут протекать эндотермически, только путем трансформации энергии, полученной в результате тектонического дробления кристаллов, или энергии (в конечном счете, солнечной), аккумулярованной зернами минералов, окатанных на земной поверхности. Большое значение имеет подобный же процесс пере-

стройки агрегатов, основанный на принципе Вульфа — Кюри, в некоторых металлургических процессах, в явлениях фирнообразования, режелекции льда в изотермических условиях ледников, а также во всех явлениях перестройки систем кристалл — насыщенный раствор (пар), обладающих избыточной внутренней поверхностью.

Институт кристаллографии  
Академии наук СССР

Поступило  
8 IV 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> Г. Г. Леммлейн, *Zs. Krist.*, **71**, 237 (1929). <sup>2</sup> P. Curie, *Bull. Soc. Minér. France*, **8**, 145 (1885). <sup>3</sup> Г. Вульф, *Варш. унив. изв.* (1895). <sup>4</sup> Л. Д. Ландау, *Сборн.*, посвящ. 70-летию акад. А. Ф. Иоффе, 1950, стр. 44. <sup>5</sup> Г. Г. Леммлейн, *Тр. Ломоносовск. ин-та АН СССР*, **6**, 13 (1935). <sup>6</sup> В. И. Вернадский, *История минералов земной коры*, **2**, *История природных вод*, ч. 1, в. 1, стр. 96, 1933.