

КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

Г. Г. ЛЕММЛЕИН

**ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ЖИДКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ  
В НАПРАВЛЕНИИ К ИСТОЧНИКУ ТЕПЛА**

*(Представлено академиком Д. С. Белянкиным 21 V 1952)*

В работе о залечивании трещин в кристалле я показал, что процесс этот может осуществляться насыщенным раствором в изотермических условиях (<sup>1</sup>). Необходимый для залечивания трещины материал берется со стенок трещины, а потребная для этой перестройки кристалла энергия есть часть освобождающегося избытка поверхностной энергии системы кристалл — раствор в капиллярной трещине. Замкнувшиеся в результате залечивания трещины участки насыщенного раствора — жидкие включения обычно продолжают изменять свою форму в направлении уменьшения поверхности и приобретения кристаллически устойчивых поверхностей с наименьшей поверхностной энергией. Особенно этот процесс заметен на изменении сильно удлинённых включений, форма которых обусловлена формой затеков раствора между балочками дендрита, залечивающего трещину. Такое удлинённое включение со значительным избытком поверхности стремится сокращать поверхность полости. При этом часть освобождающейся энергии в виде тепла излучается в пространство.

Если длина включения превышает его ширину и высоту не более, чем в два, три раза, то обычно происходит постепенное выравнивание размеров включения, и полость в конце концов приобретает строго изометричную форму. Естественно, что скорость всех этих преобразований формы полости очень мала. Поэтому полный цикл преобразования формы полости вплоть до равновесной изометричной формы можно наблюдать только на весьма малых включениях (до 0,01—0,05 мм). Повышение температуры, увеличивая растворимость, значительно ускоряет процесс преобразования формы полости.

Если длина включения значительно превышает ширину и высоту, то обычно с обоих концов удлинённого включения одно за другим отшнуровываются небольшие, уже почти изометричные включения. Реже длинное включение расшнуровывается сразу на несколько более коротких, которые уже в свою очередь могут распасться на изометричные.

Детали этого процесса изучались на примере залечивания трещины в кристалле натровой селитры с помощью покадровой микрокиносъемки.

Процесс отшнуровывания неизменно идет следующим образом. Сперва конец удлинённой полости начинает расширяться. Растворенный материал переоткладывается поблизости в трубчатой части полости, постепенно сужая соединительный канал, который становится еле заметным при больших увеличениях. Закладывание соединительного канала осуществляется с обеих сторон — и со стороны отшнуровывающегося включения и со стороны делящейся удлинённой полости. При этом, ко-

нечно, происходит соответствующее расширение нового конца полости. Наконец, наступает обрыв отшнуровавшегося участка — образование нового включения. Впрочем, наблюдаются случаи, когда почти расшнуровавшееся включение, казалось бы, уже готовое разделиться на два включения, начинает менять свою форму в обратном направлении, канал постепенно расширяется и укорачивается, а соединяемые им две расширяющиеся камеры сливаются в одну изометричную.

Чрезвычайно интересна дальнейшая судьба тончайшего канала, существовавшего между материнским и дочерним включениями. Обрыв его происходит сперва с одного конца, и затем он или втягивается во включение, с которым еще осталась связь, или происходит обрыв и со второго конца канала. В этом случае между разделившимися включениями образуется удлиненное, крайне малых размеров включение (5—10  $\mu$ ). Такое промежуточное малое включение весьма быстро преобразует свою полость и принимает равновесную изометричную форму задолго до того, как окончится процесс преобразования формы несравненно более крупных включений, между которыми оно образовалось.

Размеры этих промежуточных включений в произведенных мною опытах залечивания кристаллов натровой селитры не превышали нескольких микрон. Столь малые размеры этих включений и сильно увеличивающаяся с повышением температуры растворимость селитры позволили наблюдать поразительное явление перемещения малого жидкого включения в теле кристалла в направлении к источнику тепла. Локальным источником тепла в данном случае являлось отшнуровавшееся включение, продолжавшее сокращать поверхность своей полости и поэтому излучавшее в виде тепла освобождавшийся избыток поверхностной энергии. Вокруг такого меняющего свою форму включения создается некоторый градиент температуры. Малое промежуточное включение оказывается чувствительным к этому градиенту. На гранях полости малого включения, обращенных к излучающему тепло включению, происходит растворение вещества кристалла, которое откладывается на противоположных гранях. В результате малое включение перемещается в сторону преобразующего свою форму включения. Удавалось наблюдать перемещение малого включения на расстояние, в несколько раз превышающее размеры самого включения. После того как преобразующееся включение достигает равновесной формы, перемещение малого включения, естественно, прекращается. В некоторых случаях перемещение малого включения продолжалось до соприкосновения и слияния с излучающим тепло крупным включением.

На рис. 1 представлена серия фотографий, показывающих образование и перемещение малого включения. Опыт велся при 20°. Фотографии эти являются сильно увеличенными участками кадров 16-миллиметрового микрокинофильма, некоторые из которых были помещены в статье 1951 г. (1). Здесь представлено образование двух малых включений. Одно, образовавшееся в левой части поля зрения, возникло посредине между включениями, образовавшимися путем деления более крупного включения пополам. Это малое включение не меняет своего положения (рис. 1 а — в). Другое малое включение, в правой части поля зрения, образовалось несколько позже первого. Включения, между которыми оно появилось, несколько отличались по величине (рис. 1 г — е). Нижнее, меньшее, раньше успело принять устойчивую изометричную форму, а верхнее, удлиненное, большего объема, на некотором этапе преобразования своей формы, очевидно, стало выделять некоторое количество тепла. Малое включение, находившееся между обоими включениями, стало с этого момента заметно перемещаться в сторону включения, преобразующего свою форму (рис. 1 ж, з). В момент, когда включение достигает более или менее изометричной устойчивой формы, малое включение перестает перемещаться (рис. 1 и).

На рис. 2 изображена короткая серия микрофотографий, показывающая момент подготовки к отщурованию включения (а), образование промежуточного малого включения (б) и, наконец, момент, когда ма-

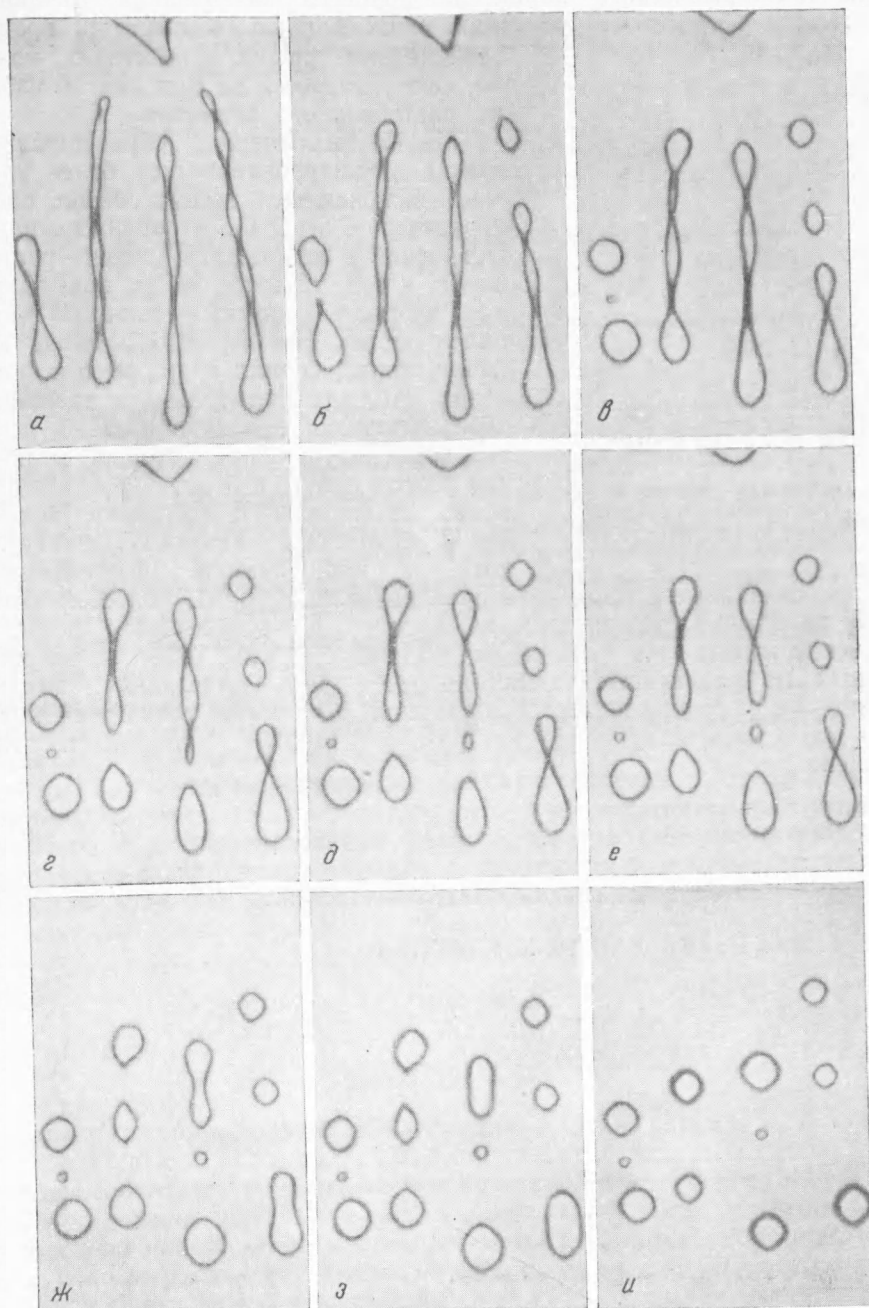


Рис. 1. Образование и перемещение „малого“ включения.  $\times 450$ . Между рис. а и б интервал 16 мин.; б и в — 20 мин.; в и г — 11 мин.; г и д — 75 сек.; д и е — 105 сек.; е и ж — 31 мин.; ж и з — 18 мин.; з и и — 3 суток

лое включение в результате перемещения в направлении преобразующегося включения сливается с ним и перестает существовать (в).

Трудно было бы лучше, чем это получилось в снятом микрокинофильме, организовать постановку специального опыта, который нагляд-

но демонстрировал бы выделение избыточной энергии при сокращении поверхности раздела кристалл — насыщенный раствор. Описанное явление перемещения малого включения является бесспорным доказательством эндотермического характера процесса залечивания трещин в кристаллах. Впрочем, в условиях снижающихся температур процесс

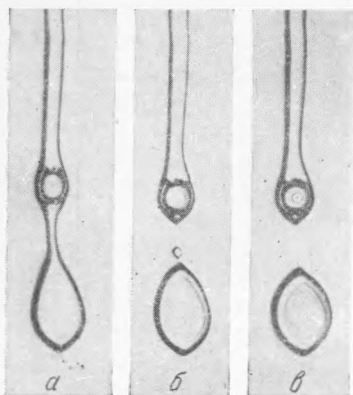


Рис. 2. Образование и исчезновение малого включения.  $\times 400$

залечивания трещин в кристалле, конечно, еще ускоряется за счет снятия избытка растворенного вещества. Малые включения, образовавшиеся между расшнуровавшимися более крупными включениями, весьма обычны среди первичных и особенно вторичных жидких включений в кристаллах сильно растворимых в воде веществ, таких, как, например, хлористый натрий — галит. В минералах менее растворимых, таких, как кварц, топаз, берилл и др., малые включения наблюдаются только в трещинах, залечивавшихся при сравнительно высоких температурах, при которых включения успели притти к более или менее равновесным формам. В трещинах, залечивавшихся при более низких температурах, хотя и наблюдаются разнообразные явления, связанные с процессом преобразования формы полостей включений, но обычно этот процесс не доходит до равновесных форм, и включения имеют «замороженные» стадийные формы, развитие которых прервано на различных стадиях процесса расшнуровывания. Такими стадийными формами являются включения с длинным, тончайшим каналом — «хвостом», соединение которого с вторым включением уже нарушено.

Институт кристаллографии  
Академии наук СССР

Поступило  
21 V 1952

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> Г. Г. Леммлейн, ДАН, 78, № 1, 685 (1951).