

**О ДИСЛОКАЦИЯХ В КРИСТАЛЛАХ МАГНЕТИТА
ИЗ ДАШКЕСАНСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
И ИХ РОЛЬ В МАРТИТИЗАЦИИ**

В. Н. СЕРГЕЕВ, А. М. КУЗЬМИН

Учение о дислокациях кристаллов в настоящее время получило столь широкое признание и применение в различных областях современной науки и промышленного производства, что в этой статье авторы не считают нужным сколько-нибудь останавливаться на указанном явлении, тем более этому вопросу посвящено большое количество капитальных исследований [2]. В данной работе предполагается остановиться на линейном виде дислокаций [3, 4, 5, 8], которые возникают в минералах в процессе кристаллизации, перекристаллизации и деформации в форме пористости, скольжений, трещин по границам блоков и контакту зерен, и рассмотреть, в какой степени подобные виды дислокаций способствуют процессу мартитизации магнетита. Для ответа на только что поставленные вопросы были изучены образцы магнитного железняка из Дашкесанского месторождения, полученные от профессора Д. П. Григорьева.

Вышеупомянутые образцы магнетита представляют собой параллельно-шестоватые агрегаты первого рода (по Д. П. Григорьеву), которые в форме жилок рассекают скарн [1]. Кристаллы магнетита из этих жилок имеют форму «собачьего зуба», отношение длины к ширине которых колеблется от 2:1 до 6:1. Сами размеры изучаемых кристаллов изменяются от долей миллиметра до нескольких сантиметров. Поверхность отдельных зерен сложно искривлена и покрыта контактной штриховкой, возникшей, как правило, на контакте двух или нескольких соприкасающихся между собой совместно растущих кристаллов. Подобная штриховка представляет собой результат сложных отношений скоростей роста того или другого индивида и окружающих его соседей [9]. Описываемые шестоватые кристаллы магнетита завершаются гранями ромбододекаэдра и октаэдра; их внутреннее строение зонарное, секториально-зонарное или незонарное, так как зонарность в этих кристаллах в связи с последующими процессами метаморфизма и деформации часто затушевывается или же проявляется в форме не всегда ясно выраженных реликтов.

По этой причине следует описать в качестве примера хорошо выраженную зонарность кристаллов магнетита в форме (110) из железных руд¹⁾ Тайгажирского месторождения (Горная Шория). На рис. 1 имеет-

¹⁾ В данном месторождении кристаллы магнетита достигают 18—20 см в поперечнике и представлены в форме ромбододекаэдров и октаэдров.

ся несколько косою срез к $[001]$, видимые следы граней²⁾ отвечают $(10\bar{1})$, (011) и $(\bar{1}01)$. Как видно из рисунка, ширина зон колеблется от 0,005 до 0,1 миллиметра. Ширина одной и той же зоны в своем развитии за один и тот же период роста не оставалась постоянной, т. е. грани, принадлежащие одной форме в зависимости от притока вещества, перемещались параллельно самим себе с различной скоростью. В пределах каждой зоны кристалла можно отчетливо видеть, что внутренняя ее часть в отраженном свете выглядит плотной, тогда как внешняя часть зоны кажется более темной, и густота подобной окраски постепенно нарастает к ее периферии. Такую особенность строения каждой зоны

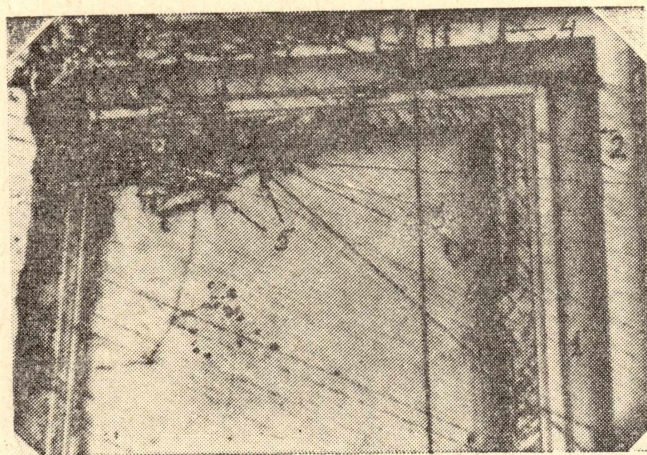


Рис. 1. Зонарный кристалл магнетита в сечении $[001]$: 1 — плотная часть зоны; 2 — пористая часть зоны; 3 — трещинки в пределах зоны параллельны $(\bar{1}11)$ и $(11\bar{1})$; 4 — трещинки параллельные $(10\bar{1})$ и (011) ; 5 — игольчатый гематит. Тайгажир (горная Шория) Увел. 60.

можно объяснить пористостью, в которой свет отчасти поглощается и отчасти рассеивается. Переход от одной зоны к другой, как правило, резкий.

В пределах одной и той же зоны кристалла магнетита встречаются системы трещинок, параллельных граням октаэдра $(\bar{1}11)$ и частично (111) . Трещинки при сильном увеличении имеют точечный характер и отвечают, как и упомянутая выше пористость в пределах зоны, выходам осей линейной или точечной дислокаций [4, 8], частично обусловленных включением в кристалл посторонних механических примесей. Кроме того, позже в кристалле вследствие деформации появляются параллельные $(\bar{1}01)$ и (011) трещинки, вдоль которых в массу магнетита проникает игольчатый гематит.

Описанный пример зонарного магнетита имеет аналогов и среди дашкесанских магнетитов, но в последних, как отмечалось выше, зонарность роста сохранялась лишь в виде отдельных реликтов среди зерен, которые испытали на себе метаморфизм и позже подверглись мартитизации.

Первым из дашкесанских руд рассмотрим магнетит, микрофотография которого представлена на рис. 2. На последнем сфотографирована часть кристалла, поверхность которого в отраженном свете кажет-

²⁾ В соответствии с положением рисунка по отношению первой и второй координатных осей, лежащих в плоскости фотографии.

ся несколько косою срез к $[001]$, видимые следы граней²⁾ отвечают $(10\bar{1})$, (011) и $(\bar{1}01)$. Как видно из рисунка, ширина зон колеблется от 0,005 до 0,1 миллиметра. Ширина одной и той же зоны в своем развитии за один и тот же период роста не оставалась постоянной, т. е. грани, принадлежащие одной форме в зависимости от притока вещества, перемещались параллельно самим себе с различной скоростью. В пределах каждой зоны кристалла можно отчетливо видеть, что внутренняя ее часть в отраженном свете выглядит плотной, тогда как внешняя часть зоны кажется более темной, и густота подобной окраски постепенно нарастает к ее периферии. Такую особенность строения каждой зоны

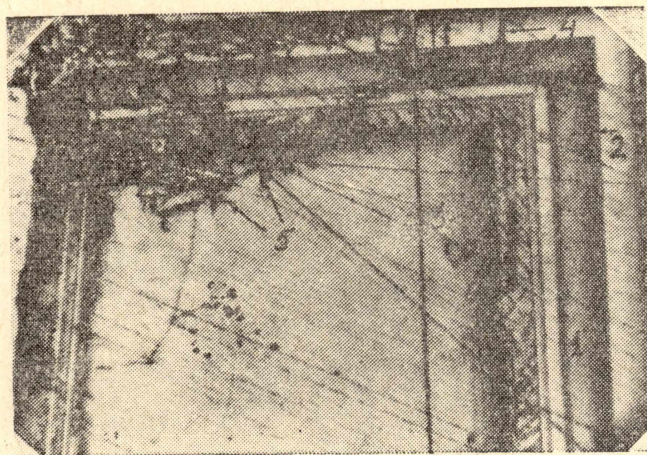


Рис. 1. Зонарный кристалл магнетита в сечении $[001]$: 1 — плотная часть зоны; 2 — пористая часть зоны; 3 — трещинки в пределах зоны параллельны $(1\bar{1}1)$ и $(11\bar{1})$; 4 — трещинки параллельные $(10\bar{1})$ и (011) ; 5 — игольчатый гематит. Тайгажир (горная Шория) Увел. 60.

можно объяснить пористостью, в которой свет отчасти поглощается и отчасти рассеивается. Переход от одной зоны к другой, как правило, резкий.

В пределах одной и той же зоны кристалла магнетита встречаются системы трещинок, параллельных граням октаэдра $(\bar{1}\bar{1}1)$ и частично (111) . Трещинки при сильном увеличении имеют точечный характер и отвечают, как и упомянутая выше пористость в пределах зоны, выходам осей линейной или точечной дислокаций [4, 8], частично обусловленных включением в кристалл посторонних механических примесей. Кроме того, позже в кристалле вследствие деформации появляются параллельные $(\bar{1}01)$ и (011) трещинки, вдоль которых в массу магнетита проникает игольчатый гематит.

Описанный пример зонарного магнетита имеет аналогов и среди дашкесанских магнетитов, но в последних, как отмечалось выше, зонарность роста сохранялась лишь в виде отдельных реликтов среди зерен, которые испытали на себе метаморфизм и позже подверглись мартитизации.

Первым из дашкесанских руд рассмотрим магнетит, микрофотография которого представлена на рис. 2. На последнем сфотографирована часть кристалла, поверхность которого в отраженном свете кажет-

²⁾ В соответствии с положением рисунка по отношению первой и второй координатных осей, лежащих в плоскости фотографии.

Далее в магнетитах Дашкесана имеются и другие структурные осложнения. Так, на рис. 3а видно, что магнетит с блоковым строением, подобным на рис. 2, разбивается в аншлифе двумя системами тонких трещинок — плоскостей скольжения по $\{111\}$ I и II, которые в данном случае пересекаются под косым углом. На фотографии хорошо видна одна система параллельных трещин II, более или менее равноотстоящих друг от друга. Другая система параллельных линий — I рас-

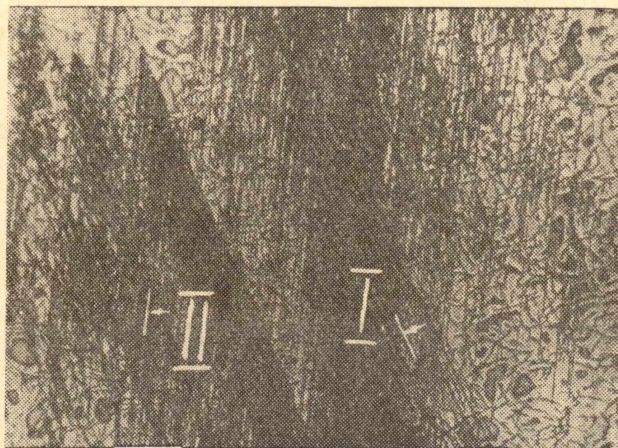


Рис. 3а. Кристалл магнетита, разбитый на блоки и частично перекристаллизованный, поражается в двух направлениях системой трещин скольжения по $\{111\}$. Система тонких линий I и II относительно друг друга распределяются неравномерно. Дашкесан. Увел. 36.

пределяется неравномерно, как бы отдельными сериями, что четко подчеркивается самой фотографией. В местах сопряжений линий I и II участки кажутся темными. Рис. 3б представляет собой деталь карти-

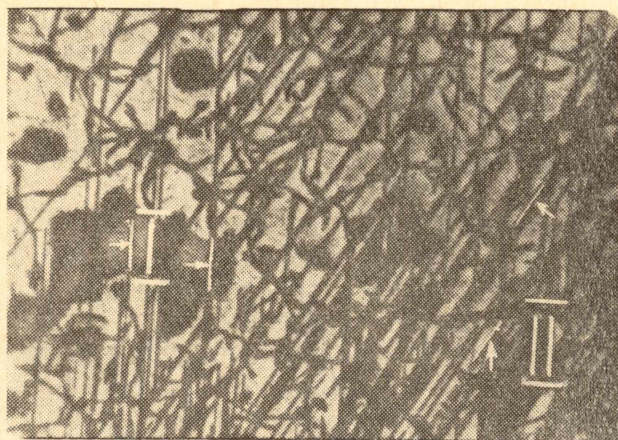


Рис. 3б. Деталь рис. 3а, иллюстрирующая соотношения систем линий скольжения I и II по отношению друг к другу. Дашкесан. Увел. 120.

ны, изображенной на рис. 3а при увеличении в 120 раз⁴⁾, из которой следует, что в одних случаях линии скольжения систем I и II, протяги-

⁴⁾ Рис. 3б по отношению к рис. 3а следует повернуть на 30° влево.

ваясь на сравнительно большом протяжении, взаимно пересекаются, в других — линии I являются как бы препятствием для развития отдельных линий скольжения системы II и, наоборот, линии I охотно развиваются в узких промежутках, ограниченных линиями II. Подобную картину можно часто наблюдать при образовании в результате деформации полисинтетических двойников в сфалеритах, плагиоклазах, кальцитах, каменной соли и других минералах.

Что касается толщины линий направлений I и II, то она измеряется в пределах 0,004—0,002—0,001 мм и тоньше, линия от линии отстоит редко в 0,1 мм, чаще в пределах 0,05—0,01 мм и довольно часто расположены друг от друга не ближе 0,008—0,005 мм.

Следует, наконец, отметить, что серия параллельных линий охотно поражает плотную часть магнетитовых блоков. Реликтовая часть блока рассекается плоскостями скольжения менее охотно. Примером подобного факта является фотография детали кристалла магнетита, изображенная на рис. 4. В случае проникновения плоскости скольжения в ре-

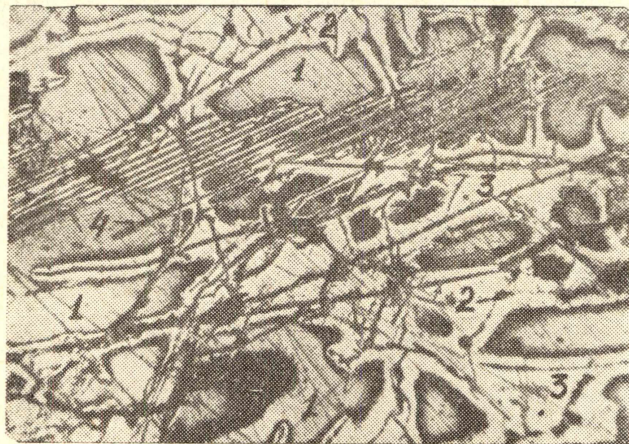


Рис. 4. Кристалл магнетита, разбитый на блоки: 1 — реликтовый магнетит; 2 — трещины, отделяющие один блок от другого; 3 — плотный магнетит, окружающий каймой реликтовую часть; 4 — следы скольжения, развивавшиеся в плотной части соседних блоков. Дашкесан. Увел. 260.

ликтовую часть блока обыкновенно происходит вместе с тем и уплотнение магнетита в узких пределах вдоль плоскости скольжения.

Дальнейшее изучение кристаллов магнетита при увеличениях в 300—500 раз помогает вскрыть новые детали. Так, широкое развитие в кристалле скольжений в двух направлениях приводит к тому, что его масса в срезе аншлифа при травлении разбивается на прямоугольники (рис. 5а). На рис. 5а видно, что кристалл частыми параллельными линиями разбивается на узкие полоски, ширина которых колеблется от 0,001 до 0,01—0,03 мм. В аншлифе в результате травления выявляется косоугольная сетка линий скольжения, которая разбивает кристалл на блоки. Внутри таких блоков сохраняются реликты магнетита, окруженные узкой каймой его плотной разности. В наиболее узких параллелепипедах реликты магнитного железняка в результате динамометаморфизма полностью перекристаллизуются. В аншлифе рис. 5б реликты первичного магнетита встречаются уже много реже. На рис. 5б также заметны две системы параллельных линий, которые в идеальном

случае должны пересекаться под прямым углом. В некоторых из них еще сохранились реликты первичного магнетита.

Изучение аншлифов, отдельные участки которых нашли свое отражение на фотографиях (рис. 5а; 5б), позволяет вскрыть ряд деталей, помогающих понять сущность наблюдаемой картины. Так, рис. 5б и другие фотографии ясно говорят о том, что мы имеем дело с кристаллами кубической сингонии, а сами линии, которые ясно видны на

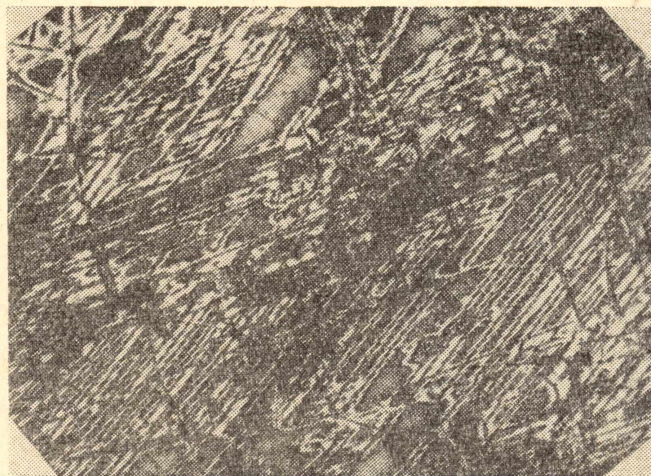


Рис. 5а. Деталь. Кристалл магнетита разбит двумя системами параллельных трещин, выкраивающих параллелепипедальные блоки с остатками в них реликтового магнетита. Дашкесан. Увел. 400.

рис. 3 и 4, являются линиями скольжения по плоскостям октаэдра. На рис. 5б хорошо заметно, что скольжения в микроучастках имеют



Рис. 5б. Деталь. Параллелепипедальные блоки в кристалле магнетита, имеющие явно прямоугольный характер. Дашкесан. Увел. 400.

часто ступенчатый и лестничный характер. Далее, еще раз подчеркнем, что скольжения охотнее развиваются в плотной части магнетита, а однотипность расположения линий скольжения говорит о том, что мы действительно имеем дело с монокристаллом. Наконец, изучение характера

самых линий скольжения при увеличениях в 700—800 раз говорит о том, что они в ряде случаев имеют точечное строение (рис. 5а; 7а; 7б), отдельные точки которых в 0,002—0,001 мм и менее в диаметре, будучи сближенными, кажутся сплошными линиями (рис. 2 и 3).

Описание собственно магнетитов из месторождения Дашкесан завершим кратким рассмотрением его зонарных кристаллов. Так рис. 6а

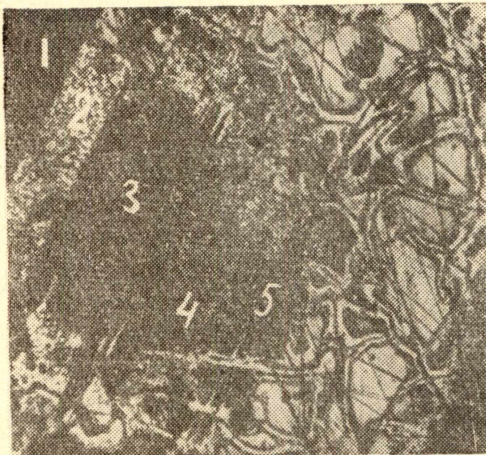


Рис. 6а. Реликты зонарного строения магнетита. Реликты зон роста — 1, 2, 3, 4 и 5, сохранившиеся в поле последующего развития метаморфической блоковой структуры. Дашкесан. Увел. 200.

иллюстрирует характер зонарного сложения магнетита и взаимоотношения структур роста с дислокациями. На рис. 6а цифрами 1, 2, 3 и 4 обозначены зоны различной ширины: первая (1) — в 0,5 мм ширины имеет весьма тонкополосчатое строение, различимое лишь при больших увеличениях; вторая (2) — в 0,1 мм является сильно пористой с беспорядочно расположенными черными точками (пустотки); следующая, третья зона (3) — тонкополосчатая, шириной в 0,6 мм; четвертая (4) — приблизительно в 0,35 мм снова пористая и частично поражена развитием поздней метаморфической блоковой структуры. Зонарный кристалл при последующей метаморфизации распадается на блоки первого разряда, подобные описанным на рис. 2, в массе которых сохраняются обрывки (реликты) зонарного магнетита. Затем развивается следующая стадия метаморфизации (рис. 6б), тесно связанная с пластической деформацией. Эта последняя в форме линий скольжения по $\{111\}$ разбивает кристалл на блоки — параллелепипеды второго порядка, внутри которых за счет реликтов магнитного железняка расширяется зона плотного магнетита. Таким образом, идет разрушение зонарного строения зерен магнетита путем последующего образования новых структур.

Преыдущие страницы были целиком посвящены рассмотрению микростроения магнетита, который в виде жилók в Дашкесанском месторождении сечет скарн. Наши исследования этого минерала начались с некоторого момента его существования, и мы попытались в известной мере восстановить историю его жизни, в течение которой он испытал на себе медленно, но неуклонно развивающиеся преобразования. Исследования застают кристалл на одной из стадий такого преобразования: зонарные кристаллы магнетита в результате метаморфизма разбиваются на блоки первого порядка, отделенные друг от друга трещинками. Внутри каждого блока в той или иной сте-

Рис. 6б. Деталь на протяжении реликтовой зоны, изображенной на рис. 6а. Реликты зонарного строения кристалла, который сначала приобрел блоковое строение, а в последующем подвергся скольжениям вдоль линий, параллельных $\{111\}$. 6 — реликтовый магнетит; 7 — плотный магнетит; 8 — гематит. Дашкесан. Увел. 200.

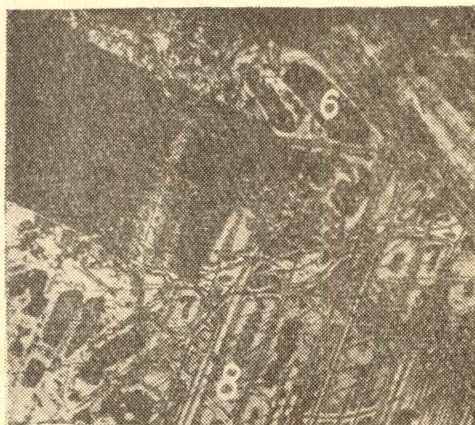


Рис. 6б. Деталь на протяжении реликтовой зоны, изображенной на рис. 6а. Реликты зонарного строения кристалла, который сначала приобрел блоковое строение, а в последующем подвергся скольжениям вдоль линий, параллельных $\{111\}$. 6 — реликтовый магнетит; 7 — плотный магнетит; 8 — гематит. Дашкесан. Увел. 200.

пени сохраняется реликт первичного магнитного железняка, окруженный различной толщины оболочкой плотного магнетита. Последующие пластические деформации обуславливают появление скольжений по $\{111\}$ и образование блоков второго порядка в форме параллелепипедов, в которых плотная часть продолжает развиваться за счет реликтов, первичного магнетита до полного их преобразования. Последующие, особенно хрупкие деформации способствуют появлению различно выраженных трещин раздробления.

Из сказанного выше естественно возникает вопрос, как в подобных образованиях развивается процесс мартитизации. По-видимому, дислокации кристаллов, которые выявляются в результате травления как поры и трещины различной природы, возникающие в минерале в результате метаморфизации и деформации, являются путями для проникновения в тело зерна магнетита кислорода.

Действительно, гематит и гидрогематит прежде всего в виде тонкозернистого и плотного агрегата развиваются в промежутках, отделяющих одно зерно магнетита от другого. Затем тонкие иголки гематита появляются вдоль отдельных трещинок, разделяющих блоки кристалла. При этом, как правило, образуются игольчатые кристаллы гематита⁵⁾, которые в своем относительном положении в магнетите строго подчиняются его структурным особенностям. В сечениях, параллельных $\{100\}$ и $\{111\}$, иголки располагаются параллельно ребрам куба.

Сначала в магнетите появляются отдельные иголки гематита, число которых увеличивается к периферии зерен или вдоль трещин, секущих кристалл. Увеличиваясь числом и в размерах, иголки гематита образуют различной плотности и сложности изящные каркасные постройки.

На рис. 7а кристалл магнетита состоит из реликта 1, сохранившегося среди плотной его разновидности 2, которая рассекается большим числом трещинок, выполненных плотным агрегатом гематита 3. Кроме

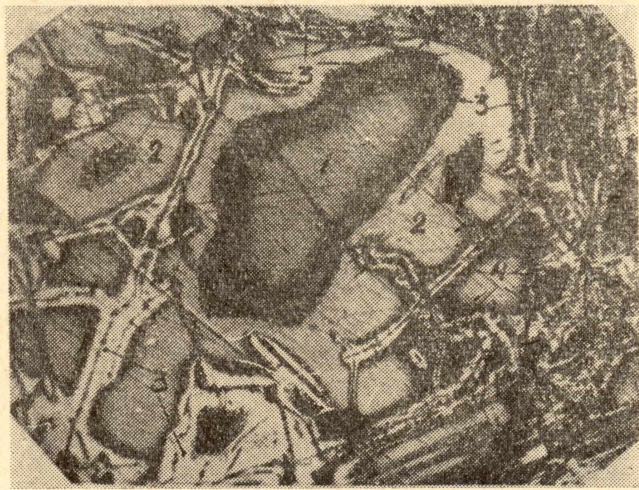


Рис. 7а. Мартитизация магнетита. Первоначальный зонарный кристалл. 1 — реликты первичного магнетита; 2 — зона плотного магнетита; 3 — гематит; 4 — четко игольчатый магнетит. Дашкесан. Увел. 400.

⁵⁾ Во всех сечениях кристаллы гематита в магнетите развиваются только как игольчатые. Подобные кристаллы в поляризованном свете анизотропны и обладают четко выраженным характерным для гематита рефлексом. Гематит не травится плавиковой кислотой и по цвету резко отличается от магнетита, что ясно видно на фотографиях.

того, вокруг реликтовой части магнетита в виде узкой оторочки появляются зернышки гематита или его зернистый агрегат почти нацело замещает отдельные реликты (рис. 7а). В правой части хорошо вырисовывается игольчатый гематит 4, который как по рельефу, цвету и морфологии отличается от плотного магнетита 2, так и от плотного гематита 3. На рис. 7б в сущности мы имеем ту же картину с более четким проявлением игольчатого гематита 4. Здесь хорошо видно, что игольчатый гематит, взаимно пересекаясь, пространственно ориентирован однозначно, как того требуют структурные особенности магнетита.

В данном случае (рис. 7а и 7б) и в ряде других шлифов при больших увеличениях можно было наблюдать по периферии реликтовых участков магнетита появление параллельно расположенных иголок или точек⁶⁾ гематита, или тех и других вместе. Также нередко можно наблюдать развитие гематита вдоль плоскостей скольжения, где он чаще появляется в виде пунктирных полосок, а сближение их приводило к об-



Рис. 7б. Мартитизация магнетита. 1 — реликты первичного магнетита; 2 — плотный магнетит; 3 — гематит; 4 — четко игольчатый гематит. Дашкесан. Увел. 400.

разованию сплошных линий гематита. Точечные формы гематита появляются по внешнему краю реликтового магнетита или на его месте в виде агрегата в отдельных участках вдоль трещин, ограничивающих блоки второго порядка, а затем по мере развития процесса окисления число точек и полосочек увеличивалось вплоть до образования отдельных гематитовых точечных линий, которые позже сливались в сплошную гематитовую линию.

Приведенными примерами мартитизации магнетита из Дашкесанского месторождения можно ограничиться.

В соответствии с указаниями Л. Н. Овчинникова [6], Н. В. Павлова [7], В. Г. Ньюхауза [10] и других исследователей была сделана попытка установить в исследованных рудах присутствие маггемита. Однако, несмотря на тщательные поиски, нам не удалось найти только что упомянутого минерала. Не подтвердили его наличие также и два рентгеновских анализа. Данные одного из них точно соответствовали магнетиту,

⁶⁾ Сечения, перпендикулярные к иголке.

⁷⁾ В приводимом ряду чисел первая цифра характеризует интенсивность (I), второе число после тире в A° определяет место в порошкограмме. Данные линии в скобках отвечают β линиям излучения.

а данные другого: 2—3,025; 4—2,965; 1—2,790; 7—2,581; 10—2,522; 1—2,137; 5—2,097; 2—1,709, 2—(1,631); 6—1,614; 8—1,485; 1—1,279; 1—(1,208)⁷; 1—1,122; 3—1,093; 1—1,048; 4—0,969 β скорее говорят о смеси в образце магнетита и гематита, что хорошо согласуется с данными аншлифа.

В заключение отметим, что метод травления плавиковой кислотой магнетитовых руд дает в руки исследователей возможность ясно представить себе внутреннюю морфологию последовательного развития минеральных зерен и решать вопросы их метаморфизма, как перекристаллизации самих зерен магнетита, так и вскрыть картину последовательности развития процесса мартитизации.

Метод травления в описываемых случаях позволяет наблюдать такие тонкости строения зерен, как зональность кристаллов, неоднородность зон, тонкую пористость, блоковость зерен, широкое развитие скольжений, параллельных граням {111}. Все только что указанные особенности — дислокации в кристаллах магнетита, нарушающие его однородность, являются вместе с тем путями, благоприятствующими развитию мартитизации магнетита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. П. Григорьев. Некоторые явления генезиса минералов в жилах. Зап. Всесоюз. мин. общ., ч. 83, вып. 3, стр. 176—197, 1954.
2. Дислокации в кристаллах. Библиографический указатель. Изд. АН СССР, 1960.
3. В. Л. Инденбом. Дислокации в кристаллах. Кристаллография, 3, вып. 1, стр. 113—132, 1958.
4. А. Х. Коттрелл. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. Металлургиздат, стр. 1—223, 1958.
5. А. М. Кузьмин. Плоскости спайности и скольжения у каменной соли. (О некоторых дислокациях кристаллов NaCl). Геология и геофизика, № 6, СО АН СССР, стр. 60—74, 1960.
6. Л. Н. Овчинников. О маггемите. Тр. горн.-геол. ин-та УФАН СССР, вып. 20, Мин. сб. № 2, стр. 3—12, 1953.
7. Н. В. Павлов. Магномагнетитовые месторождения района Тунгусской синеклизы Сибирской платформы. Тр. ин-та геол. рудн. ме-ий, петрогр., минер. и геохимии, вып. 52, стр. 3—222, 1961.
8. В. Т. Рид. Дислокации в кристаллах. Metallurgizdat, стр. 1—279, 1957.
9. И. И. Шаfranовский и Д. П. Григорьев. О поверхностях соприкосновения кристаллических индивидов. Зап. Всесоюз. мин. общ., ч. 77, вып. 3, стр. 185—193, 1948.
10. W. H. Newhouse and I. P. Llass. Some physical properties of certain iron oxides. Economic Geology, vol. 31, № 7, p. 699—711, 1936.