

PIETRO NATALE

## PRIMA SEGNALAZIONE DI STRUTTURE DI DEFORMAZIONE PLASTICA NELLA PIRITE

ABSTRACT. — Translation gliding structures have been found by means of electrolytic etching in the pyrite of some dynamometamorphosed pyrite deposits.

These structures commonly appear as single sets of lamellae alternatively well and poorly etched, which can cover grains as large as 1-2 mm, each lamella having usually a thickness of few microns. The slip lamellae — and less commonly the external faces of the crystal too — can show a pronounced bending. In some grains two or three different lamellar systems have been recognized. The same developes most commonly in different parts of the crystal, but can also interfere with one another.

The translation surface was often found to be parallel to (100): i.e. to the most densely populated plane in the pyrite lattice, while no data are available regarding the corresponding slip direction.

On the whole these observations show that under dynamometamorphic conditions the ductile behavior of pyrite is more common than one might expect in the light of the previous knowledge. In particular, it seems that pyrite can behave plastically already under conditions corresponding to the low greenschist facies.

RIASSUNTO. — Strutture di deformazione plastica imputabili a fenomeni di scorrimento interno («translation gliding») sono state riconosciute mediante attacco elettrolitico di superficie in pirite dinamometamorfiche di varia provenienza.

Tali strutture, che appaiono di solito come singoli sistemi di lamelle alternativamente più o meno corrose, interessano parzialmente o completamente granuli di pirite che mostrano in genere anche segni di deformazione elastica e le cui dimensioni possono raggiungere 1-2 mm. Le singole lamelle, il cui spessore supera raramente qualche micron, possono risultare sensibilmente incurvate. In qualche caso è stato possibile riconoscere due o tre distinti sistemi di lamelle sviluppati spesso in parti diverse del cristallo, ma a volte interferenti fra di loro.

L'unico piano di scorrimento fino ad ora accertato è il piano (100), cioè quello a maggior densità nel reticolo della pirite. Mancano invece elementi che consentano di precisare la corrispondente direzione di scorrimento.

In complesso tali osservazioni mostrano che in ambiente dinamometamorfico la deformazione plastica della pirite è un fenomeno meno eccezionale di quanto si potesse presumere alla luce delle precedenti conoscenze. In particolare, risulta che una sia pur debole attitudine plastica può già essere mostrata da questo minerale in condizioni corrispondenti alla bassa facies degli scisti verdi.

### 1. - Premessa.

La pirite, com'è noto, si comporta nei confronti delle sollecitazioni meccaniche come un materiale dotato di grande fragilità, tanto da potersi considerare un eccellente esempio di minerale a tipico comportamento elastico. Lo dimostrano, in primo luogo, le numerose testimonianze di tale comportamento, molto comuni soprattutto nella letteratura che riguarda i giacimenti dinamometamorfici, ed inoltre la totale mancanza — almeno nella letteratura anteriore al 1971 — di indizi che consentano di attribuire a questo minerale una sia pur limitata attitudine plastica (si veda Ramdhor, 1969 per le conoscenze anteriori a tale data).

Quest'ultima circostanza potrebbe anche indurre a ritenere la pirite del tutto incapace — almeno in condizioni naturali — di subire deformazioni di tipo plastico.

A conclusioni simili sembrerebbero, d'altra parte, condurre le più recenti conoscenze sperimentali. Basti ricordare in proposito i significativi risultati dei test di deformazione recentemente effettuati da Graf e Skinner (1970): risultati che confermano e completano quanto era già sperimentalmente noto sull'argomento.

Questi autori osservarono infatti che la pirite, da essi sottoposta a deformazione in condizioni molto impegnative e « prossime a quelle estreme che si possono realizzare nella crosta terrestre », mostrò sempre di reagire con grande fragilità, senza palesare alcuna tendenza apprezzabile verso il comportamento plastico.

In considerazione del fatto che in natura le velocità di deformazione possono essere anche minori delle velocità da essi sperimentalmente realizzate, Graf e Skinner non poterono assumere questi risultati come una prova definitiva dell'incapacità della pirite di deformarsi naturalmente in modo plastico. Essi ritennero comunque di poter concludere che in natura un tale comportamento è assai poco probabile.

In seguito, un primo esempio di pirite mostrante indizi di deformazione plastica, proveniente da un giacimento metamorfico canadese, è stato segnalato da Mookherjee (1971). Questo autore ha per altro espresso l'opinione che la deformazione plastica deve ritenersi un fenomeno eccezionale per la pirite, in quanto legato verosimilmente a condizioni ambientali che non si realizzano con facilità nella crosta terrestre.

Le osservazioni svolte dallo scrivente su pirite metamorfiche di varia provenienza, oltre a confermare pienamente la possibilità già messa in luce da Mookherjee, consentono di integrare la conoscenza di questo comportamento della pirite, il quale se non può di certo considerarsi molto comune, appare comunque meno eccezionale di quanto le precedenti conoscenze lasciassero supporre.



Fig. 1. — Relitti di una pirite zonata e in parte colloforme, presumibilmente premetamorfica, inclusi nella pirite relativamente omogenea di natura cristalloblastica. Calcopirite e blenda subordinate. Giacimento di Degtiarka, Urali.  
(attacco elettrolitico; luce riflessa; ingr. lin. 230)

## 2. - I campioni esaminati.

Le osservazioni in questione sono state svolte su una quindicina di campioni di minerale piriteico provenienti dai noti giacimenti di Sain Bel (Rodano, Francia), Kalwang (Stiria, Austria) e Degtiarka (Urali Centrali), oltre che da una piccola mineralizzazione di pirite racchiusa nelle formazioni cristalline paleozoiche di Paola, in Calabria <sup>(1)</sup>.

<sup>(1)</sup> I campioni dei giacimenti di Sain Bel e di Kalwang sono stati personalmente raccolti dall'autore, quelli del giacimento di Degtiarka sono stati trasmessi

Si tratta di giacimenti di tipo stratiforme, già noti attraverso la letteratura (Sain Bel: De Launay, 1913; Termier e Raguin, 1927; Routhier, 1963. Kalwang: Beck, 1927. Degtiarka: Zavaritsky, 1927; Zavaritsky, 1950), i quali, pur collocandosi in quadri geologici ben



Fig. 2. — Urto fra due cubi di pirite cristalloblastica in ganga prevalentemente quarzosa. Giacimento di Sain Bel, Rodano. La deformazione plastica, che è denunciata da lamelle di scorrimento ed altri indizi, risulta seguita da una locale intensa cataclasi. (attacco elettrolitico; luce riflessa; ingr. lin. 225)

distinti ed alquanto diversi, presentano tuttavia alcune comuni caratteristiche. Sono tutti racchiusi entro formazioni paleozoiche dinamometamorfiche ed associati — almeno i primi tre — a rocce ofiolitiche di geosinclinale, alle quali sembrano anche geneticamente legati. Sono essi stessi di età preerecinica ed hanno subito nel corso dell'orogenesi erecinica un metamorfismo regionale dinamico di intensità corrispondente a livelli diversi della facies degli scisti verdi.

---

all'autore dalla Miniera di Fragnè-Chialamberto S.p.A., che si ringrazia sentitamente; quelli infine di Paola sono stati gentilmente messi a disposizione dal Prof. A. Cavinato, cui si esprime un vivo ringraziamento.

Gli stessi campioni che si sono potuti esaminare mostrano diverse analogie. Gli aggregati metalliferi, costituiti da pirite predominante  $\pm$  calcopirite, blenda, quarzo e silicati metamorfici, appaiono fortemente rieristallizzati, come testimoniano alcune loro tipiche caratteri-

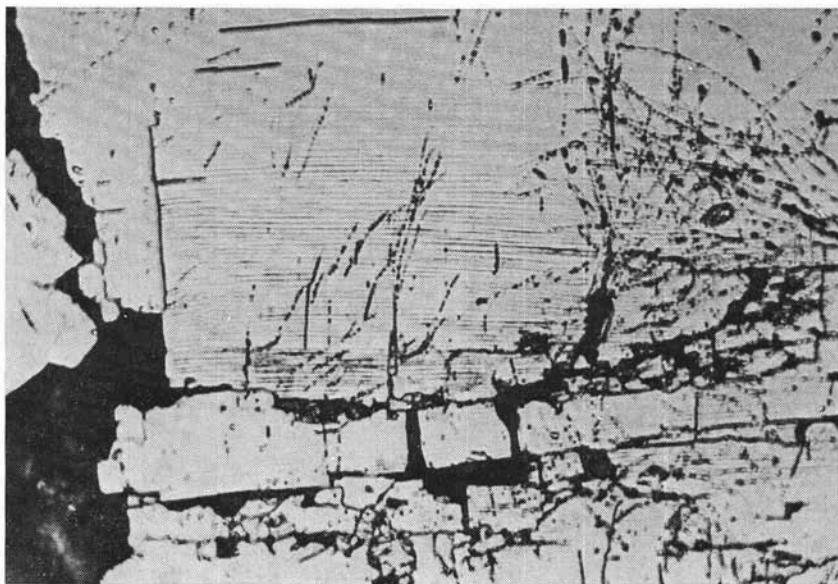


Fig. 3. — Sistema singolo di lamelle di scorrimento ben sviluppate nella pirite cristalloblastica del giacimento di Degtiarka, Urali. Microdiacasi diffuse; scarsa ganga quarzosa. (attacco elettrolitico; luce riflessa; ingr. lin. 640)

stiche cristalloblastiche. Ricontrata in tutti i campioni e degna di nota è in particolare la presenza di relitti della pirite premetamorfica, spesso di tipo colloforme, racchiusi nella pirite cubica di origine cristalloblastica (fig. 1): caratteristica questa già da tempo nota relativamente alle piriti di altri analoghi giacimenti metamorfici (Závaritsky, 1950; Natale, 1966 e 1969).

Tranne che nei campioni di Kalwang, questi aggregati mostrano inoltre pronunciate tessiture cataclastiche, spesso con chiara evidenza di un considerevole movimento relativo dei granuli di pirite. Come si osserva al microscopio, questi ultimi (e si tratta in genere di granuli di pirite cristalloblastica) risultano spesso fratturati e talvolta frantumati e milonitizzati.

E' interessante osservare che tale deformazione appare in genere seguita da una ricristallizzazione che ha interessato la stessa pirite, causando la cicatrizzazione delle microdiaciasi, la ricementazione parziale o totale delle fratture e la neoformazione di minute tessiture a

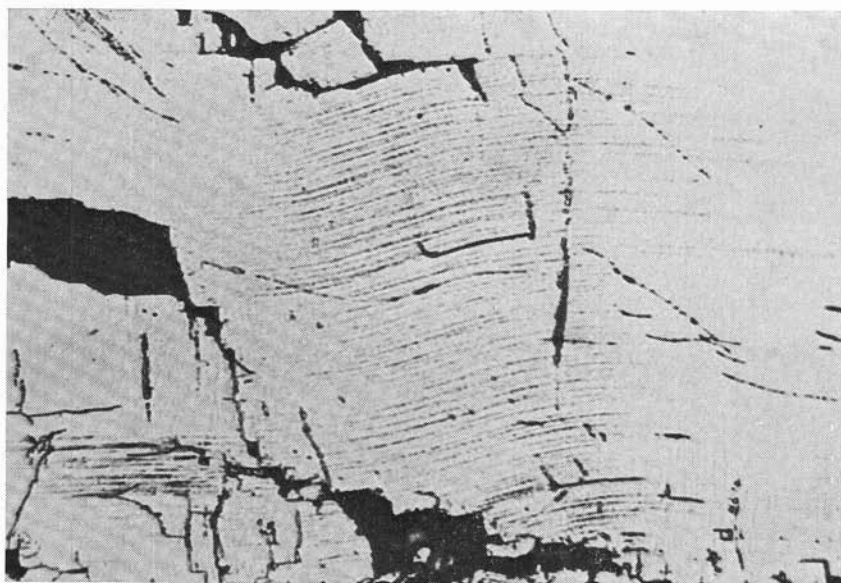


Fig. 4. — Sistema singolo di lamelle di scorrimento ben sviluppate e sensibilmente incurvate nella pirite cristalloblastica del giacimento di Degtiarka, Urali. Un secondo sistema perpendicolare al primo è appena accennato in basso a destra. Microdiaciasi diffuse; ganga quarzosa.

(attacco elettrolitico; luce riflessa; ingr. lin. 620)

mosaico nelle fasce di scorrimento milonitizzate. Nei campioni di Kalwang alla deformazione ha fatto seguito la neoformazione di orli di una pirite strutturalmente differenziata attorno agli stessi cristalloblasti cubici che hanno subito la deformazione.

In tutti i casi in esame parrebbe dunque che le azioni deformanti, sviluppatesi quando la cristallizzazione metamorfica era già largamente compiuta e forse conclusa, si siano svolte comunque in condizioni di temperatura e pressione sufficienti a determinare un'ulteriore ricristal-

lizzazione della pirite. In più di un caso appare anzi probabile che sia stata precisamente la deformazione a riattivare processi di cristallizzazione metamorfica, determinando anche, talvolta, una discreta rimobilizzazione della pirite.

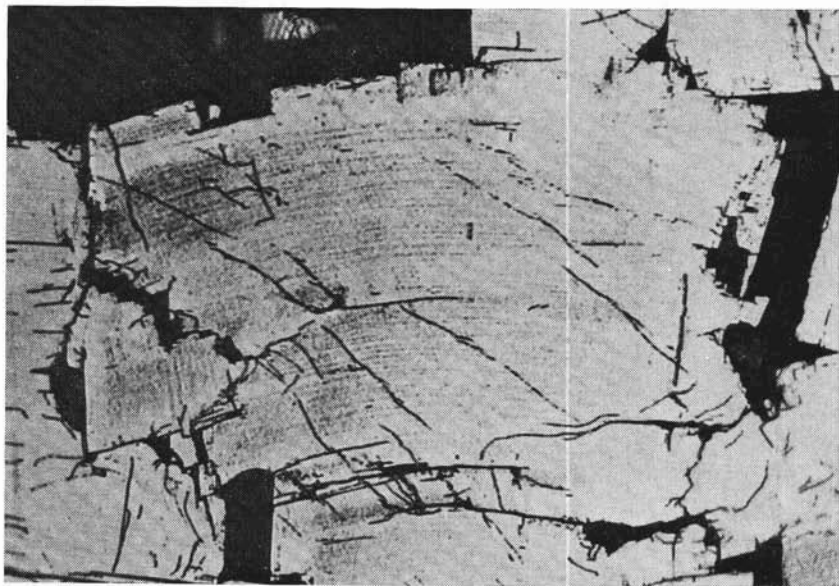


Fig. 5. — Sistema singolo di lamelle || (100), sensibilmente incurvate e congruenti con l'incurvamento delle facce in un cristalloblasto cubico di pirite del giacimento di Kalwang, Stiria. Microdiaciasi diffuse e con orientazione preferenziale; ganga in prevalenza quarzosa.

(attacco elettrolitico; luce riflessa; ingr. lin. 620)

### 3. - Strutture di deformazione plastica nella pirite.

Nella maggior parte dei campioni esaminati, e soprattutto laddove più vistosi appaiono gli effetti delle sollecitazioni tettoniche, un certo numero di granuli di pirite mostrano di aver reagito alla deformazione non solo in modo elastico, ma anche plasticamente. Ciò è ben dimostrato dalle strutture lamellari di scorrimento interno che si osservano in questi granuli ed anche a volte da un sensibile incurvamento delle superfici esterne degli stessi.

Le suddette strutture, così come molte delle anzidette caratteristiche della pirite, non sono direttamente osservabili in sezione lucida, ma divengono riconoscibili dopo un opportuno attacco elettrolitico di superficie <sup>(2)</sup>. Nel nostro caso si è fatto ricorso in particolare ad una

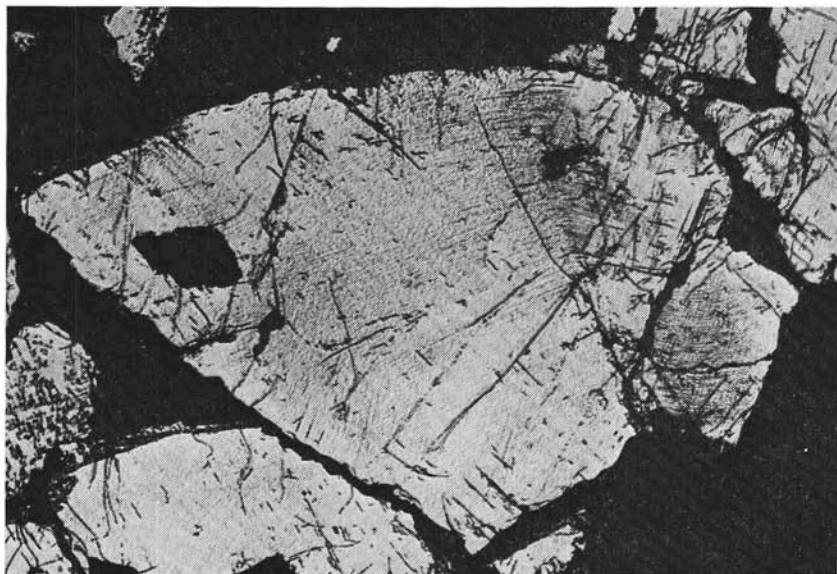


Fig. 6. — Sistema singolo di lamelle di scorrimento con forte incurvamento a S in un cristalloblasto cubico di pirite del giacimento di Kalwang, Stiria. E' visibile un accenno di struttura a «kink banding». Ganga prevalentemente quarzosa. (attacco elettrolitico; luce riflessa; ingr. lin. 230)

tecnica di attacco elettrolitico su piatto rotante già brevemente descritta dall'autore in una precedente occasione (Natale, 1966).

Tali strutture constano di solito di un singolo sistema di sottili lamelle che appaiono alternativamente più o meno corrose ed attraverso le quali vengono presumibilmente a manifestarsi l'elevata densità e la regolare distribuzione delle dislocazioni indotte nel reticolo dalla deformazione.

---

<sup>(2)</sup> Il metodo dell'attacco di struttura in sezione lucida si è già rivelato utile per mettere in evidenza strutture del tipo in esame in altri minerali, per esempio nella pirrotina (Graf e Skinner, 1971).

I singoli sistemi di lamelle interessano, spesso solo parzialmente, granuli le cui dimensioni possono raggiungere 1-2 mm, mentre lo spessore delle lamelle supera raramente qualche micron. Come appare nelle figure 4, 5 e 6, le lamelle possono essere anche notevolmente incurvate

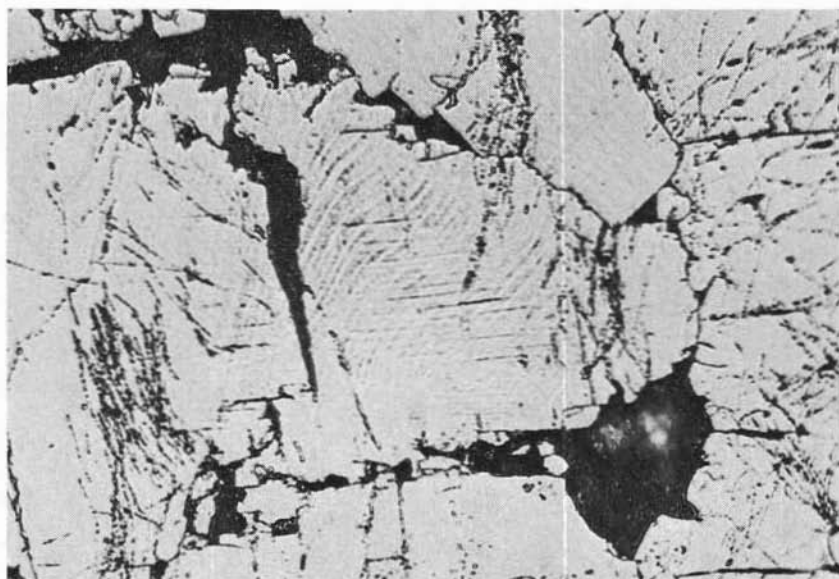


Fig. 7. — Due sistemi ortogonali (1) di lamelle di scorrimento, interferenti fra di loro, nella pirite, cristalloblastica del giacimento di Degtjarka, Urali. Abbondanti microdiacasi; ganga quarzosa e silicatica.

(attacco elettrolitico; luce riflessa; ingr. lin. 610)

e in qualche caso a tale incurvamento fa riscontro un congruente incurvamento delle facce del cristallo.

Non di rado però tali strutture appaiono costituite da due, e raramente anche tre, distinti sistemi di lamelle che si sviluppano spesso in parti diverse del cristallo, ma possono anche in varia misura interferire fra di loro (fig. 7).

Le lamelle, che in certi casi mantengono lungo l'intera struttura una ben definita individualità ed uno spessore costante, in altri casi appaiono irregolari, sfumate e più o meno evanescenti. Al limite la struttura può far passaggio a zone che appaiono uniformemente inte-

ressate dall'attacco (almeno a scala microscopica) o che mostrano tracce a mala pena riconoscibili di uno o più sistemi lamellari (figg. 8 e 10).

Raramente infine si può cogliere nell'andamento delle lamelle una discontinuità di orientazione che sembra compatibile con l'esistenza in

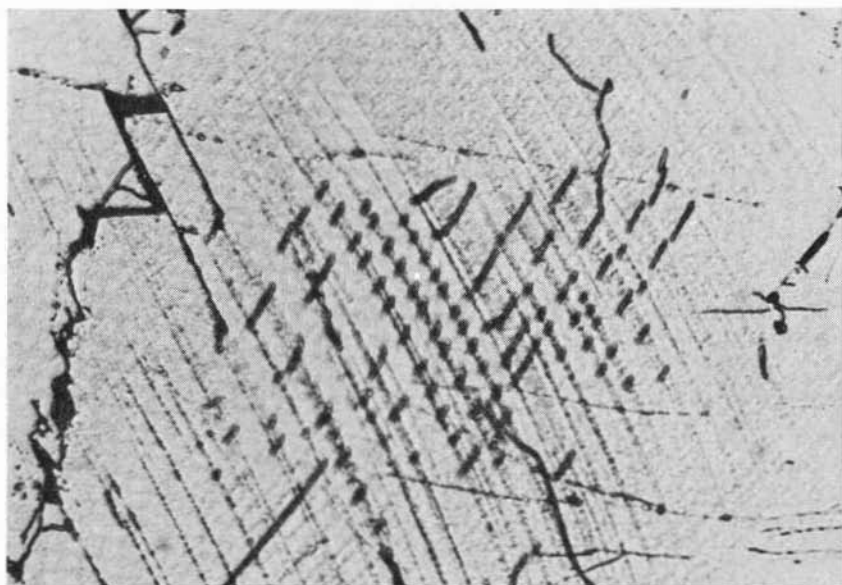


Fig. 8. — Lamelle di scorrimento leggermente incurvate nella pirite cristallo-  
blastica del giacimento di Degtiarka, Urali. La struttura lamellare tende a  
sfumare verso una struttura più uniforme, per coalescenza dei «piani» di  
scorrimento. Un secondo sistema di lamelle, probabilmente ortogonale al primo  
è a mala pena riconoscibile. Localmente i piani di scorrimento sembrano tra-  
dursi in piani di discontinuità e forse di tendenziale sfaldatura (particolar-  
mente in alto a sinistra). (attacco elettrolitico; luce riflessa, olio; ingr. lin. 1130)

seno al reticolo deformato di blocchi a orientazione leggermente di-  
versa, separati da superfici grosso modo perpendicolari alle lamelle  
stesse. Tale situazione, che è accennata nelle figure 9 e 10, richiama chia-  
ramente le strutture di tipo «kink banding», che sono note, in asso-  
ciazione con strutture di «translation gliding», in altri minerali  
(Grigor'ev, 1965; Raleigh, 1965).

Per l'insieme di tali caratteristiche le strutture in questione sem-  
brano quindi imputabili a fenomeni di scorrimento multiplo del tipo

« translation gliding », piuttosto che a fenomeni di poligeminazione del tipo « twin gliding ».

Come risulta evidente nelle figure 2, 3, 5 e 6, la superficie di scorrimento è in molti casi parallela al piano cristallografico (100), che



Fig. 9. — Sistema di lamelle di scorrimento nella pirite cristalloblastica del giacimento di Kalwang, Stiria. E' accennata una struttura a blocchi individuati da discontinuità nell'orientazione delle lamelle (« kink banding »). E' inoltre riconoscibile un secondo debole sistema lamellare ortogonale al primo.

(attacco elettrolitico; luce riflessa; ingr. lin. 640)

è piano di massima densità nel reticolo della pirite. Tale circostanza ben si accorda con la constatazione generale che in questo tipo di deformazione i piani di scorrimento sono appunto tendenzialmente i piani a più elevata densità reticolare. E' interessante osservare che alle strutture lamellari in questione risultano spesso associate sia microdiaclasi e fratture ad andamento irregolare, sia sfaldature a « cracks » disposti secondo (100) e quindi paralleli o perpendicolari alle lamelle (figg. 2, 3, 4, 8 e 9).

Per altro non è stato possibile, né precisare la direzione di scorrimento nel piano (100) (che teoricamente potrebbe essere la dire-

zione [100]), nè individuare la presenza di altri piani di scorrimento, l'esistenza dei quali è comunque apparsa nei casi esaminati poco probabile.

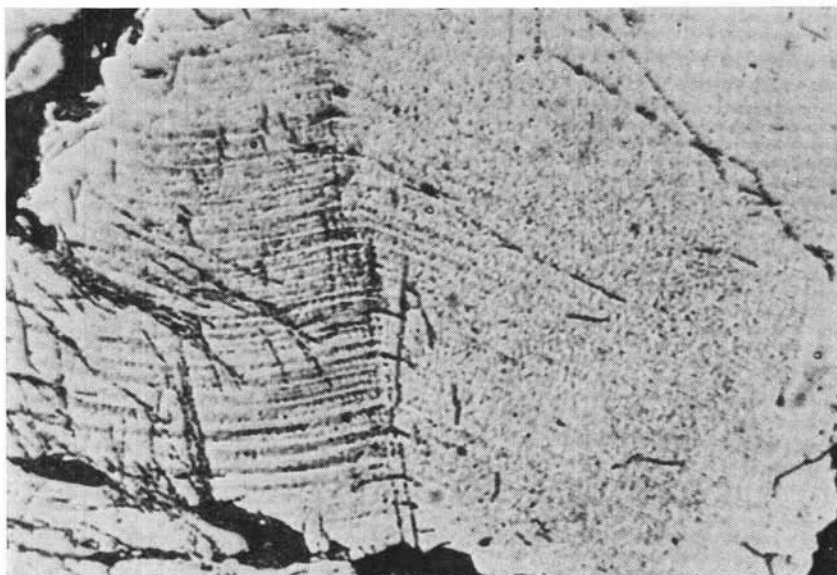


Fig. 10. — Sistema di lamelle di scorrimento ben espresse e con pronunciato incurvamento nella pirite cristalloblastica del giacimento di Degtiarka, Urali. E' evidente nella struttura l'individuazione di due blocchi separati da una netta discontinuità nell'orientazione delle lamelle. Queste ultime manifestano nei due blocchi caratteri strutturali sensibilmente diversi.

(attacco elettrolitico; luce riflessa; ingr. lin. 700)

#### **4. - Alcune considerazioni sulle condizioni ambientali favorevoli al comportamento plastico della pirite.**

Le osservazioni svolte indicano che le condizioni ambientali necessarie affinché la pirite possa comportarsi in modo plastico, pur essendo quasi certamente più impegnative di quelle che si richiedono per la deformazione plastica di molti altri minerali metallici, sono comunque meno impegnative e più comunemente realizzate in natura di quanto si potesse presumere alla luce delle precedenti conoscenze. In particolare risulta accertato che la pirite può deformarsi plasticamente

anche a livelli di metamorfismo notevolmente bassi. Significativo in tal senso è il caso della mineralizzazione di Paola, la cui pirite mostra deboli, ma chiari segni di deformazione plastica ed il cui grado di metamorfismo corrisponde alla subfacies meno profonda della facies degli scisti verdi.

E', d'altra parte, interessante osservare che, mentre le prove di una subita deformazione plastica sono risultate relativamente comuni nelle piriti dei citati giacimenti, per contro nessun indizio di tale comportamento è stato fino ad ora messo in luce nelle piriti di altre analoghe mineralizzazioni metamorfiche. Ciò vale in particolare per diversi giacimenti stratiformi di pirite associati alle pietre verdi mesozoiche della formazione piemontese dei calcescisti (Alagna, Ollomont, Chialamberto, ecc.).

Com'è noto, questi giacimenti hanno subito nel corso dell'orogenesi alpina un energico dinamometamorfismo, esplicatosi a livelli diversi ed anche abbastanza profondi dell'epizona. In particolare, come risulta dallo stato di intensa cataclasi che è spesso denunciato dai relitti della pirite premetamorfica (Natale, 1969), essi mostrano spesso di aver subito energiche azioni deformanti svoltesi prima della cristallizzazione metamorfica.

A differenza però di quanto si osserva nei minerali dei giacimenti citati in precedenza, nel caso dei giacimenti delle Alpi Occidentali, gli aggregati metalliferi, ed in particolar modo quelli a dominante piritica, non mostrano alcun indizio, o indizi assai deboli di deformazioni sin- o posteristalline. Inoltre i fenomeni di cataclasi della pirite cristalloblastica che sporadicamente ci è stato possibile osservare in questi aggregati non sono mai apparsi accompagnati o seguiti da processi di ricristallizzazione della pirite stessa.

Pur essendo prematuro trarre conclusioni al riguardo, sembra comunque lecito supporre che la deformazione plastica della pirite possa aver luogo in ambiente dinamometamorfico soltanto qualora un'attività tettonica di intensità sufficiente si sviluppi nel corso di determinate fasi dell'evoluzione metamorfica. In particolare sembrerebbero necessarie condizioni di ambiente capaci di determinare una penecontemporanea ricristallizzazione della pirite tettonizzata. E' peraltro possibile che tali condizioni debbano essere non inferiori a quelle corrispondenti alla bassa facies degli scisti verdi.

Va sottolineato, per concludere, che, in tutti i casi presi in esame l'entità della deformazione plastica subita dalla pirite, anche se non trascurabile a livello microscopico, appare assai modesta dal punto di vista dei suoi effetti macroscopici ed in complesso nettamente subordinata rispetto ai fenomeni di deformazione elastica. Sembra quindi poco probabile che questo comportamento della pirite, pur essendo verosimilmente non raro in determinati ambienti dinamometamorfici, possa assumere un ruolo importante nell'evoluzione tessiturale degli aggregati piritici sottoposti a metamorfismo dinamico.

*Torino, Istituto di Mineralogia, Geologia e Giacimenti Minerari del Politecnico, maggio 1971.*

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BECK H. (1927) - *Die schwefelkiesvorräte Oesterreichs*. In: Les réserves mondiales en pyrites, XIV Cong. Géol. Intern., Madrid, 1926.
- DE LAUNAY L. (1913) - *Gîtes minéraux et métallifères*. Vol. I. Béranger, Paris, 1913.
- GRAF J. L. and SKINNER B. J. (1970) - *Strength and deformation of pyrite and pyrrhotite*. Econ. Geol., 65, 206-215.
- GRIGOR'EV D. P. (1965) - *Ontogeny of minerals*. IPST, Jerusalem.
- MOOKHERJEE A. (1971) - *Deformation of pyrite*. Econ. Geol., 66, 200-201.
- NATALE P. (1966) - *Sulla pirite di alcuni giacimenti piritoso-cupriferi stratiformi delle Alpi Occidentali*. Boll. Ass. Min. Subalpina, III, 3-4, 355-363.
- NATALE P. (1969) - *Recrystallization and remobilization in some stratiform pyrite deposits of the Western Alps*. In: Remobilization of ores and minerals, P. Zuffardi ed., Cagliari, 1969; pp. 129-148.
- RALEIGH C. B. (1965) - *Glide mechanisms in experimentally deformed minerals*. Sci., 150, 739-741.
- RAMDOHR P. (1969) - *The ore minerals and their intergrowths*. Pergamon Press, Oxford, 1969.
- ROUTHIER P. (1963) - *Les gisements métallifères*. Vol. I, Masson, Paris, 1963.
- TERMIER P. et RAGUIN E. (1927) - *Les réserves de pyrites de France*. In: Les réserves mondiales en pyrites, XIV Cong. Géol. Intern., Madrid, 1926.
- ZAVARITSKY A. (1927) - *Les gisements de pyrite de l'Oural*. In: Les réserves mondiales en pyrites, XIV Cong. Géol. Intern., Madrid, 1926.
- ZAVARITSKY A. N. (1950) - *Metasomatism and metamorphism in the pyrite deposits of the Urals*. XVIII Int. Geol. Cong., London, 1948, Sect. B, p. III, 102-108.