

METALLOGRAFIA ELETTRONICA DI ALCUNE OTTAEDRITI

Riassunto. — Si riportano 12 micrografie, di cui 9 ottenute con il microscopio elettronico, relative a tre ferri meteorici appartenenti alla classe delle ottaedriti. La documentazione, oltre a mostrare vari aspetti della struttura fine delle ottaedriti, mette in evidenza per la prima volta in maniera diretta che la plessite in tutte le sue varietà è costituita da una mescolanza di kamacite e taenite. La mescolanza di queste fasi rivela inoltre un ordinamento del tutto simile a quello che, in scala macroscopica, presiede alla formazione delle figure di Widmanstätten.

Facendo seguito ad una nota (1) in cui si mette a punto la tecnica di osservazione, al microscopio elettronico, dei ferri meteorici, si presenta una documentazione della struttura delle ottaedriti.

Questa classe di meteoriti, la quale comprende circa 80% delle meteoriti ferrose (sideriti) conosciute (2), si presenta piena di interesse metallografico per la presenza delle caratteristiche figure di Widmanstätten. Queste figure, osservabili anche in scala macroscopica, risultano costituite da lamelle di kamacite, eventualmente affiancate da lamelle di taenite, che si intersecano secondo certe ben definite direzioni; in aggiunta a questi due costituenti si ritrova in certe zone la plessite ovvero una mescolanza più o meno intima di kamacite e taenite, di aspetto variabile, non sempre risolvibile al microscopio metallografico (3).

In ciascuna delle fasi sopra menzionate si possono poi trovare, come costituenti accessori, inclusioni di sostanze a carattere non metallico come solfuri, fosfuri e carburi.

Le figure riportate nella presente nota dimostrano che la struttura della plessite conserva in condizioni opportune l'aspetto delle figure di Widmanstätten anche se in scala molto ridotta (v. figg. 5, 8).

I campioni di ottaedriti studiati, esistenti nel Museo di Mineralogia della Università di Napoli, vengono designati nel catalogo di Prior-Hey (4):

Glorieta Mountain, New Mexico, USA;	Ni % = 10,4
Kingston, Sierra County, New Mexico, USA;	6,98
Gibeon (Mukerop), Great Namaqualand, SW Africa.	8,0

Sempre secondo lo stesso catalogo, le prime due appartengono alla sottoclasse delle ottaedriti a lamelle medie mentre la terza a quella delle ottaedriti a lamelle sottili. Questa classifica viene fatta in base allo spessore delle lamelle di kamacite, il quale dipende sia dal tenore di Ni della lega sia dalla velocità di raffreddamento della stessa, come sarà chiarito in seguito.

Le leghe Fe-Ni, così come il ferro puro, si presentano in tre modificazioni α , γ , δ . In esse gli atomi di Ni possono sostituire un qualsiasi

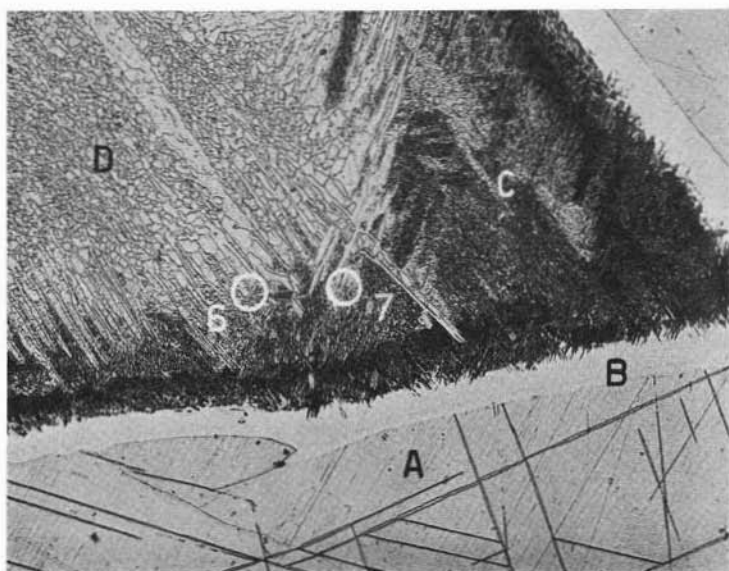


Fig. 1. — GLORIETA, fotomicrografia per riflessione, X 100.

atomo di Fe nel reticolo cristallino; la presenza di Ni abbassa progressivamente le temperature di trasformazione. Per quel che riguarda le meteoriti, hanno importanza le leghe Fe-Ni nelle forme α e γ , la fase δ non essendo stabile che a temperatura molto elevata.

La fase γ , con reticolo cubico a facce centrate, prende il nome di taenite ed è relativamente più ricca di Ni. Il contenuto di Ni può oscillare tra il 13% ed il 48% (5) anche se da taluni autori è stato fissato al valore medio 30% (6).

La fase α con reticolo cubico a corpo centrato, stabile a temperatura

ambiente, prende il nome di kamacite ed è relativamente più povera di Ni. La percentuale di Ni si aggira comunemente sul 5,5% e comunque è sempre compresa tra il 5% ed il 7% (7).

La trasformazione della taenite in kamacite durante il processo di raffreddamento, può decorrere fino al completamento, oppure può arrestarsi dando luogo ad un sistema bifasico (taenite + kamacite).

Le meteoriti appartenenti alla classe delle esaedriti, sono costituite da sola kamacite, in quanto la trasformazione ha avuto la possibilità di

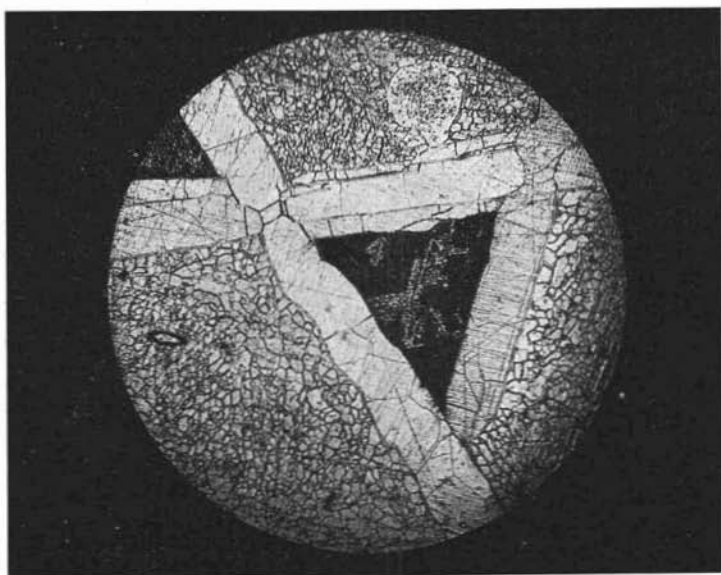


Fig. 2. — GIBEON, fotomicrografia per riflessione, X 25.

decorrere completamente; il loro contenuto di Ni si aggira quindi sul 5,5% (8).

Quando la trasformazione non è completa si ha la formazione delle ottaedriti oppure delle atassiti in dipendenza della velocità di raffreddamento e del contenuto di Ni. Nelle ottaedriti il contenuto globale medio è compreso tra il 6% ed il 13% (9).

Se il raffreddamento è lento, la fase α comincia a formarsi preferenzialmente lungo i piani (111) della fase γ a causa della relazione esistente tra le strutture cristalline delle due fasi. Poichè i piani (111)

rappresentano le facce di ottaedro del reticolo γ , i cristalli di kamacite si dispongono sotto forma di lamelle che individuano le varie facce di un ottaedro. In queste condizioni pertanto il sistema si presenta formato da lamelle di kamacite affiancate a lamelle di taenite non ancora trasformata. Questi gruppi di lamelle, intersecandosi, costituiscono la base di quelle figure di Widmanstätten che caratterizzano le ottaedriti.

Con il diminuire della temperatura la trasformazione continua nel senso che le lamelle di kamacite si accrescono a spese di quelle di tae-

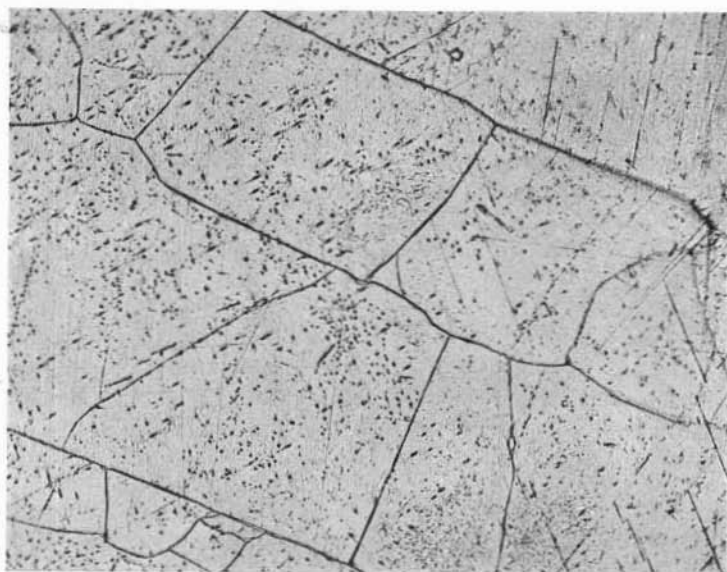


Fig. 3. — KINGSTON, fotomicrografia per riflessione, X 75.

nite le quali diventano sempre più ricche di Ni. La kamacite, una volta formata, non subisce ulteriori alterazioni di struttura.

La trasformazione della taenite in kamacite comporta una continua migrazione del Ni perchè la fase in corso di accrescimento è relativamente più povera di Ni. Essa quindi procede fino a quando la diffusione del Ni in seno alle fasi solide non risulta ostacolata dall'abbassarsi della temperatura. In questo modo si spiega come l'ammontare della trasformazione sia dipendente: 1) dalla velocità di raffreddamento e cioè dal tempo che la lega permane a temperatura sufficientemente ele-

vata da consentire la diffusione del Ni; 2) dal contenuto di Ni il quale regola l'intervallo termico in corrispondenza del quale avviene la trasformazione $\gamma \rightarrow \alpha$. Un maggiore contenuto di Ni come pure un raffreddamento più rapido, comporta non solo una maggiore quantità di taenite non trasformata, ma questa a causa della diminuita mobilità del Ni viene segregata in lamelle molto più vicine. Entrambe queste condizioni hanno quindi la loro parte nel determinare lo spessore delle lamelle di kamacite nelle ottaedriti, spessore che viene usato per definire la loro

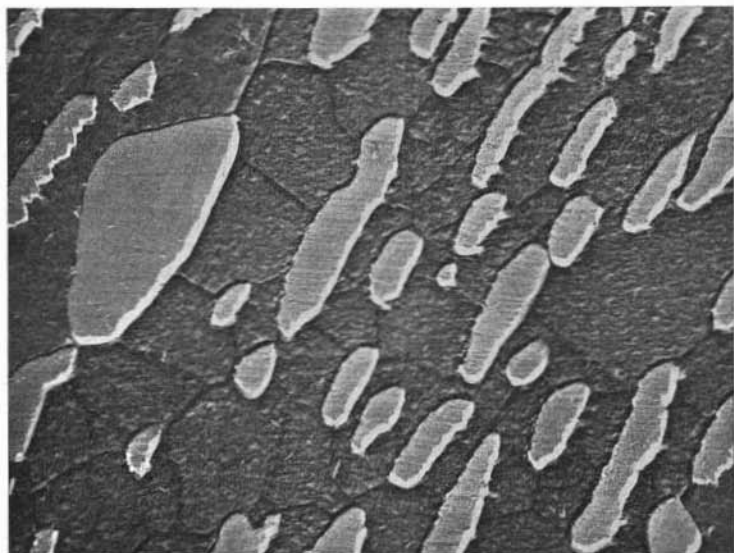


Fig. 4. — GLORIETA, micrografia elettronica.

sottoclasse, come si è detto. Oltre a ciò, queste stesse condizioni possono portare alla formazione della plessite.

Quando la trasformazione $\gamma \rightarrow \alpha$ non può avvenire ordinatamente lungo i piani (111) per il sopraggiungere di una o di entrambe le nominate condizioni, si può verificare una formazione di cristalli α in seno alla fase γ . Questo aggregato di kamacite più taenite, quando il mescolamento è molto intimo, si presenta, alla osservazione metallografica, come un campo più o meno scuro e prende appunto il nome di plessite. Naturalmente il grado di suddivisione delle due fasi varia con le condi-

zioni di formazione, tanto da poter formare la così detta plessite densa, i cui granuli hanno dimensioni tanto piccole da non poter essere risolte al microscopio metallografico (10). In certi casi la kamacite e la taenite anche se disperse l'una nell'altra molto intimamente, si ordinano in lamelle orientate che, osservate sotto forti ingrandimenti, conservano l'aspetto delle figure di Widmanstätten (11). Di solito le zone di plessite sono circondate da una fascia più o meno larga di taenite. Questo avviene perchè le bande di taenite nel trasformarsi in kamacite si ar-

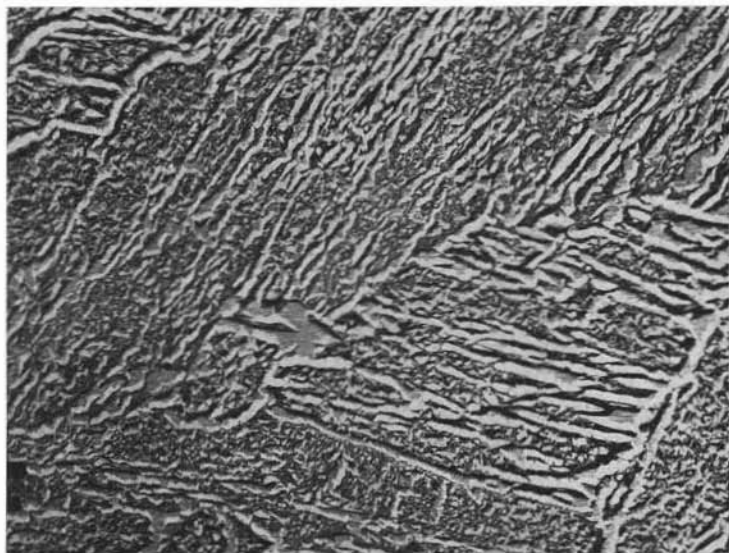


Fig. 5. — GLORIETA, micrografia elettronica.

ricchiscono di Ni maggiormente in corrispondenza dei bordi. Quando avviene la trasformazione in plessite, si trasformano più facilmente le zone centrali che hanno un contenuto di Ni relativamente minore mentre le zone ai bordi restano non trasformate.

La sopraesposta premessa, compilata con l'intenzione di condensare le informazioni sul sistema Fe-Ni indispensabili alla interpretazione della struttura delle ottaedriti, permette di illustrare tutte le micrografie riportate ed anche di giustificare il fatto che, delle tre ottaedriti studiate, la Glorieta Mountain, pur avendo un contenuto di Ni supe-

riore, presenta bande di kamacite di spessore maggiore di quelle della Gibeon, ammettendo per quest'ultima una maggiore velocità di raffreddamento.

Parte sperimentale.

Per quel che riguarda la lucidatura dei campioni, la preparazione delle repliche e la loro osservazione, si è seguita la tecnica già messa a

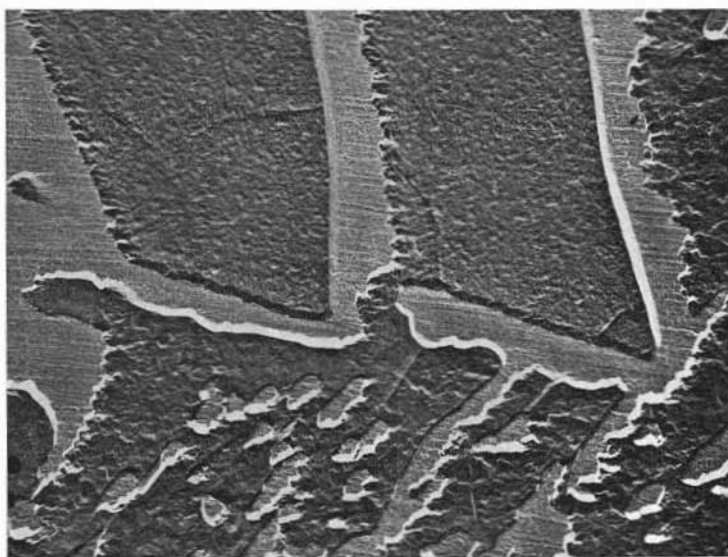


Fig. 6. — GLORIETA, micrografia elettronica.

punto per i ferri meteorici e descritta in una precedente nota (12). L'attacco chimico è stato eseguito con « Nital » (5 cc di acido nitrico fumante in 100 cc di alcool etilico) per 15 sec a temperatura ambiente. Nel caso delle figure 1 e 2 la durata dell'attacco è stata prolungata a 40 sec per aumentare il contrasto tra le differenti fasi.

Per la metallizzazione delle repliche è stato adottato costantemente un angolo di 25°.

Discussione delle fotografie.

La fig. 1 riproduce una zona tipica della ottaedrite Glorieta. In essa sono visibili la fase kamacite indicata con la lettera A, la fase taenite, lievemente più chiara, indicata con la lettera B, plessite densa (o microplessite) e plessite normale indicate, rispettivamente, con le lettere C e D. Si tenga presente che in questa figura, così come in quelle che seguono, la taenite va considerata in rilievo rispetto alla kamacite

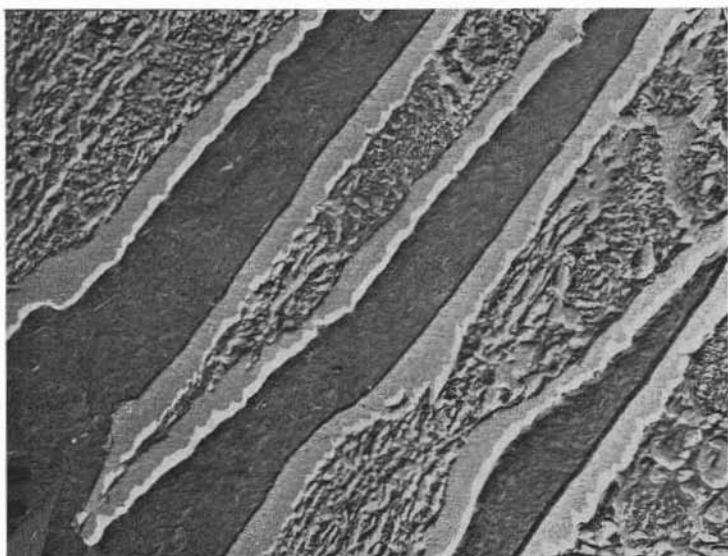


Fig. 7. — GLORIETA, micrografia elettronica.

in quanto, contrariamente a quest'ultima, è insolubile negli acidi diluiti. La figura mostra nel suo complesso come la plessite sia circondata da taenite non trasformata a causa del citato arricchimento di Ni nelle zone periferiche della taenite durante la trasformazione in kamacite. Si noti, nella fase kamacite indicata con la lettera A, la presenza di abbondanti bande di Neumann le quali non si propagano nella taenite. Si noti anche che nella zona di plessite normale indicata con la lettera D, la mescolanza di taenite e kamacite mostra una disposizione ottaedrica che ricorda quella osservabile in scala macroscopica. La ples-

site normale è stata riportata a più forti ingrandimenti nella fig. 4. La plessite densa, risolta nei suoi dettagli, è stata riportata in fig. 5. Le aree limitate dai cerchi segnati con i numeri 6 e 7 sono state osservate a più forti ingrandimenti: le corrispondenti micrografie elettroniche sono riportate nelle fig. 6 e 7.

La fig. 2 riproduce un particolare delle figure di Widmanstätten relativo alla meteorite Gibeon. Sono chiaramente visibili tre lamelle di kamacite, di spessore sensibilmente eguale, le quali si intersecano deli-

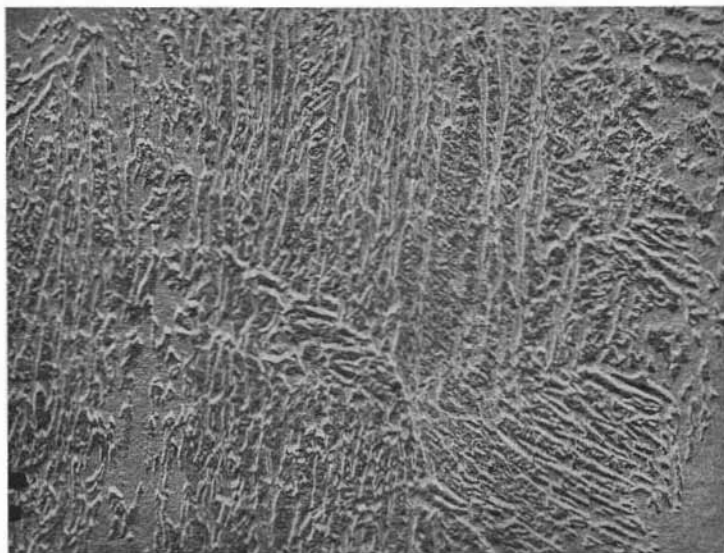


Fig. 8. — GIBEON, micrografia elettronica.

mitando un triangolo praticamente equilatero, costituito da plessite. Ciascuna delle lamelle di kamacite è fiancheggiata da sottili lamelle di taenite; la fig. 9 rappresenta una di queste lamelle fortemente ingrandita. All'esterno della figura triangolare sono presenti tre campi di kamacite granulare contenente taenite intergranulare come è visibile nella fig. 10. La plessite contenuta nella zona a forma di triangolo è della qualità più densa, ma mostra alcune zone meno scure in corrispondenza delle quali il sistema bifasico è meno suddiviso; queste zone, chiaramente orientate in direzione parallela ai lati del triangolo, imi-

tano, in scala minore, la struttura di Widmanstätten. La fig. 8 mostra un particolare di questo campo di plessite a più forte ingrandimento.

La fig. 3 riproduce una micrografia relativa alla ottaedrite Kingston. Questa figura, rappresentativa dell'insieme del campione in nostro possesso, mostra l'aspetto granulare delle bande di kamacite la quale costituisce la fase largamente predominante. Probabilmente a causa del contenuto di Ni relativamente basso, la taenite è presente solo in piccole quantità, sotto forma di «taenite intergranulare», appena per-

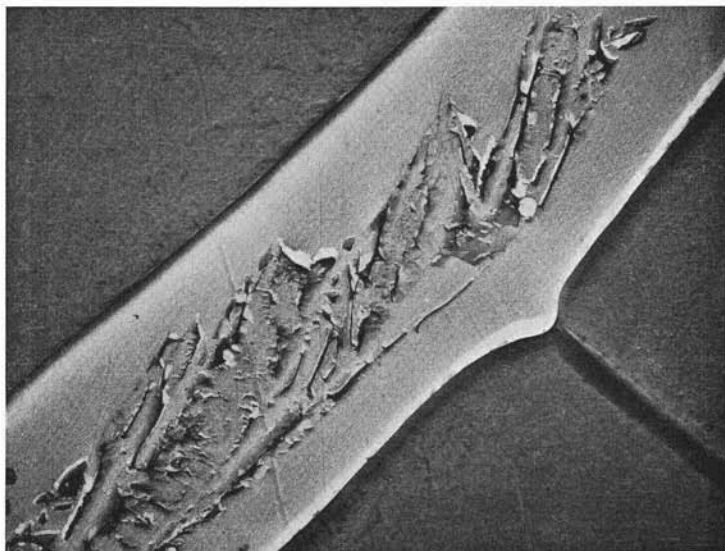


Fig. 9. — GIBEON, micrografia elettronica.

cettibili nella presente figura; la plessite è praticamente assente. Le figg. 11 e 12 rappresentano particolari, opportunamente ingranditi, di questa stessa ottaedrite.

La fig. 4, come si è già detto, riproduce l'aspetto della plessite normale presentata in fig. 1. In essa, così come in tutte le micrografie elettroniche riportate, le zone più chiare rappresentano la taenite, quelle più scure la kamacite. E' chiaramente visibile la granulazione della kamacite ed il fatto che la taenite presenta un certo orientamento. Questo orientamento, nelle immagini meno ingrandite, in cui i parti-

colari non sono risolti dettagliatamente, dà la sensazione della struttura ottaedrica di cui si è fatto cenno a proposito della fig. 1.

In fig. 5 si riporta una micrografia elettronica che riproduce con chiarezza la struttura fine della qualità più densa di plessite. Questa immagine mostra con chiarezza la struttura bifasica della plessite densa e mette altresì in evidenza come la struttura a lamelle orientate, caratteristica delle ottaedriti, possa prendere il sopravvento anche in scala estremamente ridotta.

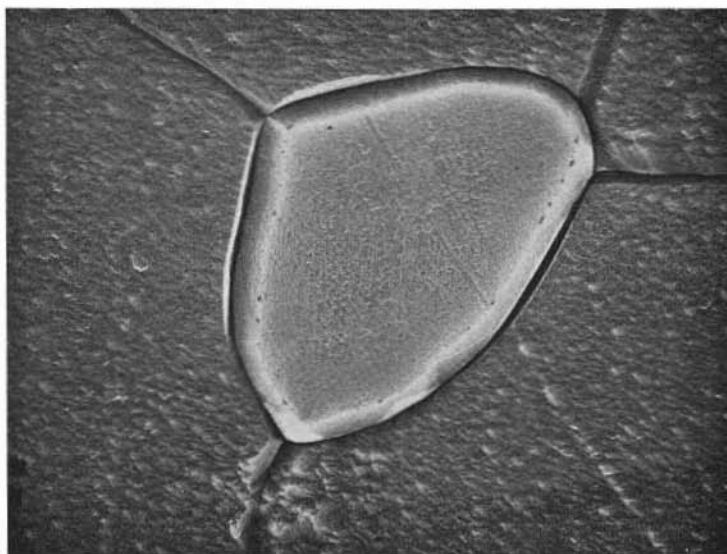


Fig. 10. — GIBEON, micrografia elettronica.

La fig. 6 corrisponde all'area segnata con il numero 6 nella fig. 1 e rappresenta gli estremi di due lamelle di kamacite separate da lamelle di taenite di spessore minore, in un campo di plessite tipica. Questa figura, così come la successiva, può essere facilmente localizzata sulla fig. 1 perchè contiene dei particolari di dimensioni tanto grandi da poter essere riconosciuti anche ad un ingrandimento più basso.

La fig. 7, corrispondente all'area segnata con il numero 7 in fig. 1, rappresenta ancora un insieme di lamelle di kamacite e taenite affiancate; la taenite nelle zone più interne, cioè quelle meno ricche di Ni,

si è trasformata parzialmente in kamacite dando luogo alla plessite. Si può pertanto concludere che la citata osservazione secondo la quale la plessite si trova spesso circondata da un bordo di taenite, può essere verificata sia in seno alle grosse lamelle di taenite — come in fig. 1 — sia in seno a quelle molto più piccole, come nella presente fig. 7.

In fig. 8 si riporta una micrografia elettronica che riproduce la struttura fine della plessite densa contenuta nella zona triangolare della fig. 2. A proposito di questa struttura possono essere ripetute le considerazioni svolte a proposito della fig. 5; l'analogia tra le figg. 8

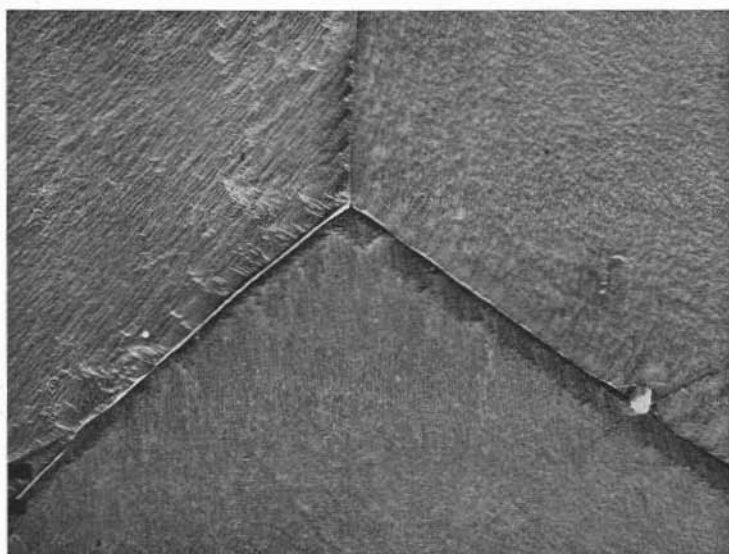


Fig. 11. — KINGSTON, micrografia elettronica.

e 5 è ancora più significativa se si pensa che le due ottaedriti appartengono a sottoclassi diverse.

La fig. 9 rappresenta una delle lamelle di taenite menzionate nella descrizione della fig. 2 e precisamente una di quelle che si trovano al limite della kamacite granulare. Nella parte interna della lamella è visibile un principio di trasformazione in kamacite. Se si paragonano le lamelle di taenite che compaiono nella fig. 7 con quella della fig. 9, ne risulta che in corrispondenza delle prime la trasformazione in kamacite nella zona centrale ha raggiunto uno stadio ben più avanzato.

La fig. 10 si riferisce, come si è già detto, al campo di kamacite granulare della fig. 2. Si osserva un relitto di taenite non trasformata, situato tra i granuli di kamacite.

La fig. 11 rappresenta il punto di incontro tra tre granuli di kamacite. E' interessante notare dal punto di vista metallurgico (13) che i tre angoli diedri sono sensibilmente eguali tra loro. Questa particolare situazione è stata riscontrata un notevole numero di volte durante lo studio della ottaedrite Kingston, come è possibile verificare anche osservando la fig. 3.

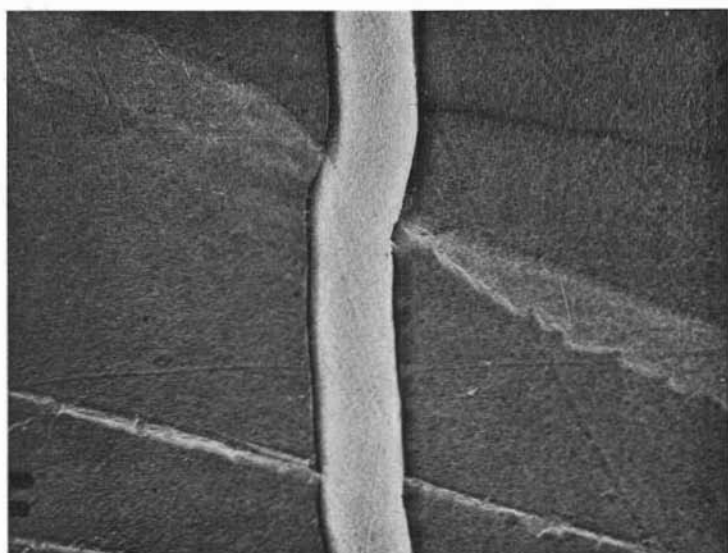


Fig. 12. — KINGSTON, micrografia elettronica.

La fig. 12 rappresenta un aspetto interessante delle bande di Neumann nelle ottaedriti. Una di queste bande, la fascia disposta quasi secondo una diagonale della figura, interseca una sottile lamella di taenite. La deformazione del reticolo di kamacite, corrispondente alla banda di Neumann, non si propaga nella taenite; la banda prosegue oltre la taenite, lievemente traslata. Si può osservare un tentativo di accomodamento da parte del sistema mediante una deformazione a zig-zag della taenite, la quale risulta possibile grazie alla duttilità della taenite stessa.

Le micrografie riprodotte nelle accluse tavole sono state scelte, tra le molte eseguite, come rappresentative delle ottaedriti studiate. Non sono state riportate immagini nè dei tabloidi di Schreibersite sempre più o meno presenti nelle meteoriti studiate, nè dei noduli di Troilite presenti nella Gibeon. Relativamente ai primi è parsa sufficiente la abbondante documentazione già fornita nel citato lavoro (1); quanto alla Troilite, la documentazione riesce di cattiva qualità a causa della fragilità di questo materiale durante la lucidatura.

La valutazione dell'ingrandimento per le micrografie elettroniche può essere fatta tenendo conto che la distanza interna tra i due tratti a sinistra ed in basso equivale a 10^{-4} cm. Quanto alle micrografie ottiche, figg. 1, 2 e 3, l'ingrandimento è stato riportato per ciascuna di esse.

Gli A.A. ringraziano i Proff. Scherillo ed Onorato per l'incoraggiamento ed i consigli ricevuti.

Napoli, Istituto di Chimica Generale dell'Università.

BIBLIOGRAFIA

- (1) P. GIORDANO ORSINI e N. MAGGI, *Gazz. Chim. It.*, 88, 482 (1958).
- (2) F. C. LEONARD, *Astr. Pap.*, 4 (2), 21 (1957).
- (3) H. H. UHLIG, *Geoch. et Cosmoch. Acta*, 6, 282 (1954).
- (4) *Catalogue of Meteorites*, British Museum, London 1953.
- (5) S. H. PERRY, *U. S. Natl. Museum Bull.*, 184, 10.
- (6) H. C. UREY, *Geoch. et Cosmoch. Acta*, 2, 269 (1952).
- (7) loc. cit. in 5).
- (8) loc. cit. in 5).
- (9) loc. cit. in 5).
- (10) loc. cit. in 3).
- (11) loc. cit. in 3).
- (12) loc. cit. in 1).
- (13) A. H. COTTRELL, *Theoretical structural metallurgy*, Arnold pub., London 1955, pag. 42.
- (14) loc. cit. in 3).