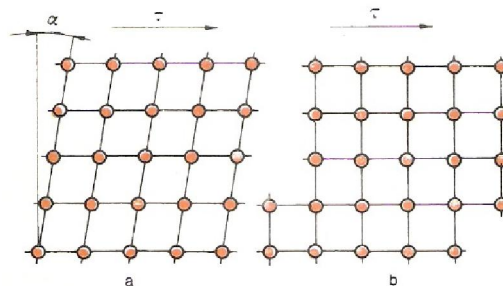


Difformazioni del reticolo cristallino e difetti

Figura 1.8 Reticolo cristallino a) sottoposto a deformazione elastica; b) sottoposto a deformazione plastica (τ è la tensione di taglio indotta dalle forze applicate esternamente al reticolo cubico elementare).



1.2.1 Deformazioni del reticolo

Se un singolo cristallo è sottoposto all'azione di forze esterne il suo reticolo cristallino subisce una deformazione che può essere *temporanea* o *permanente* secondo l'intensità delle forze applicate.

Nella figura 1.8a è rappresentata una deformazione temporanea: la forza applicata è di intensità tale che gli atomi subiscono uno spostamento dalle loro posizioni originarie di così piccola entità che ritornano nel loro stato di equilibrio non appena cessa l'azione della forza applicata: si ha di conseguenza una *deformazione elastica*.

Nella figura 1.8b è rappresentata una deformazione permanente: la forza applicata è di intensità tale che sul piano del reticolo si ha un duplice spostamento di atomi uguale ad una distanza interatomica o ad un multiplo di essa: si ha di conseguenza una *deformazione plastica* cosicché, anche eliminando la forza esterna che ha provocato la deformazione, il reticolo non riprende la disposizione primitiva, poiché le nuove posizioni sono tutte di equilibrio; pertanto il cristallo rimane permanentemente deformato.

Per quanto detto la deformazione permanente è quindi causata dallo scorrimento di blocchi di piani atomici che conferiscono ai metalli una plasticità più o meno accentuata. In generale si ha scorrimento lungo i piani i cui atomi sono più vicini l'uno all'altro e la direzione di scorrimento è la direzione di minima distanza tra gli atomi. Questo significa che il valore critico dello sforzo di taglio per questi piani è molto più basso che per gli altri piani cristallografici.

Per effetto dello scorrimento dei piani in cui si trovano geometricamente allineati e disposti gli atomi cambia la forma esterna del grano, ma la forma e le dimensioni delle celle del reticolo cristallino rimangono inalterate.

Nella figura 1.9 è stata indicata con cerchietti la disposizione degli atomi di un reticolo cristallino c.c.c. non sottoposto all'azione di forze esterne. Le linee aa - bb - cc - ecc. indicano le linee preferenziali di scorrimento poiché nella direzione di queste linee gli atomi si trovano fra loro a distanza minore di quelli disposti ad esempio lungo l'asse 00.

Qualora si sottoponga il reticolo ad una sollecitazione di trazione F lungo l'asse 00, di intensità sufficiente a superare le forze coesive interatomiche ed a causare una deformazione plastica, si manifestano scorrimenti di blocchi di piani atomici secondo i piani preferenziali aa - bb - cc - ecc. (fig. 1.10) con cambiamenti d'orientazione del reticolo cristallino*.

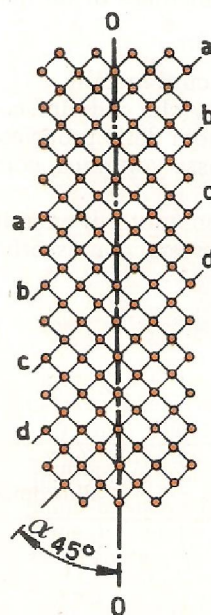


Figura 1.9 Reticolo cristallino c.c.c. non sottoposto all'azione di forze esterne (la posizione degli atomi nel reticolo è mantenuta dall'equilibrio delle forze di attrazione esercitate dagli elettroni e dai nuclei degli atomi stessi).

* L'esperienza dimostra che all'inizio della sollecitazione le prime e sensibili deformazioni avvengono là dove si trova una quantità

di grani aventi inclinazioni prossime a 45° , propagandosi in direzioni tali da formare un angolo di 45° con l'asse di sollecitazione.

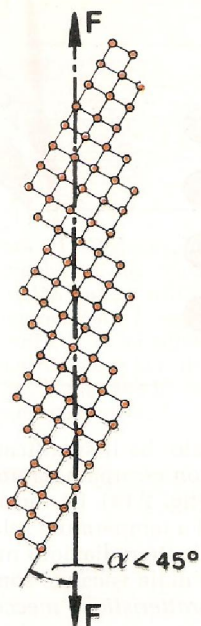


Figura 1.10 Deformazione plastica per scorrimento dei blocchi di piani atomici secondo piani preferenziali e cambiamenti d'orientazione del reticolo cristallino nella direzione dello sforzo.

Il processo è simile alla deformazione di un mazzo di carte da gioco quando le carte slittano un poco l'una sull'altra.

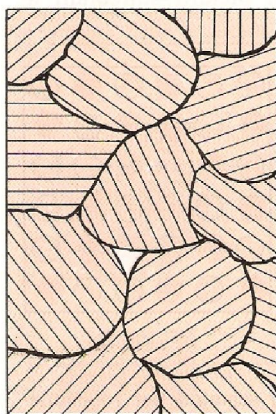


Figura 1.11 Le linee parallele indicano i piani preferenziali di scorrimento di ciascun grano.

Contemporaneamente il grano subisce un allungamento nella direzione dello sforzo e pertanto, oltre allo scorrimento dei blocchi di piani, si ha anche la tendenza ad un orientamento preferenziale dei piani secondo la direzione dello sforzo. Dalla figura 1.10 si può rilevare che il reticolo si è allungato, ma la distanza fra due atomi contigui del reticolo è rimasta inalterata.

È facilmente comprensibile che quando un grano è sottoposto all'azione di una forza esterna le sue caratteristiche meccaniche (carico unitario di rottura, allungamento, modulo di elasticità, ecc.) sono considerevolmente diverse secondo il tipo di reticolo e il variare della direzione della sollecitazione, poiché lo scorrimento dei piani atomici si manifesta preferibilmente in corrispondenza dei piani di massima densità atomica. Ne consegue che, se le caratteristiche di ogni grano sono diverse secondo le direzioni, il comportamento di ogni grano è *anisotropo*.

I cristalli a reticolo cubico a facce centrate hanno una densità atomica maggiore di quella dei cristalli a reticolo cubico a corpo centrato. Poiché i cristalli c.f.c. possiedono più piani di scorrimento dei cristalli c.c.c. risultano più deformabili.

I metalli, in generale, sono *policristallini*, cioè costituiti da un numero grandissimo di grani i cui piani atomici sono orientati in tutte le direzioni possibili, cosicché in scala macroscopica si ha una compensazione statistica e pertanto i metalli si comportano globalmente come *isotropi*, cioè con proprietà praticamente identiche in tutte le direzioni (fig. 1.11). Di conseguenza, quando un metallo viene sottoposto ad una sollecitazione esterna (di trazione o di compressione) progressivamente crescente, lo scorrimento dei piani risulta ostacolato dai piani adiacenti che risultano orientati in direzioni diverse, poiché ciascun grano cerca di deformarsi nel modo a lui più congeniale ma la sua deformazione è ostacolata da quelli adiacenti. Pertanto si avrà inizialmente uno slittamento dei piani atomici dei grani che presentano una più favorevole orientazione nella direzione dello sforzo. Con l'aumentare dello sforzo si raggiunge il valore critico di slittamento anche di altri grani. Quando la maggioranza dei grani avrà manifestato lo scorrimento dei propri piani atomici e si sarà orientata nella direzione della sollecitazione, il materiale non consentirà altre deformazioni plastiche. Se la sollecitazione aumenta ulteriormente fino a superare la forza di coesione si avrà la rottura.

Può succedere che anche i metalli policristallini si comportino anisotropicamente qualora si manifesti un orientamento preferenziale dei grani derivato, ad esempio, da un procedimento tecnologico (laminazione, trafilatura, ecc.).

1.2.2 Imperfezioni del reticolo

La struttura cristallina di un reticolo metallico reale che si forma durante la solidificazione differisce da quella ideale finora concepita per le *imperfezioni* che a livello atomico ne alterano la periodicità e che nascono:

- dal *disordine* con cui gli atomi si vengono a disporre nel reticolo creando una discontinuità nella loro disposizione periodica con formazione di *difetti reticolari puntiformi* (vacanze) e *lineari* (dislocazioni);
- dalla presenza di *atomi estranei* in siti reticolari (impurezze sostituzionali) o in interstizi tra gli atomi della matrice (impurezze interstiziali) (fig. 1.12).

Le caratteristiche meccaniche e le proprietà elastiche e plastiche dei materiali solidificati nonché la spiegazione di molti fenomeni metallurgici sono generalmente condizionati dalle imperfezioni (a cui si dà il nome di *difetti reticolari*).

Figura 1.12 Difetti reticolari puntiformi: 1. impurezza sostituzionale; 2. impurezza interstiziale.

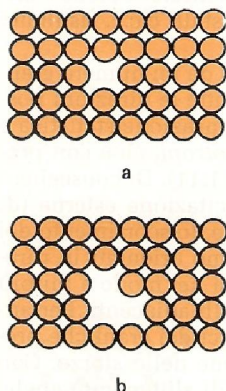
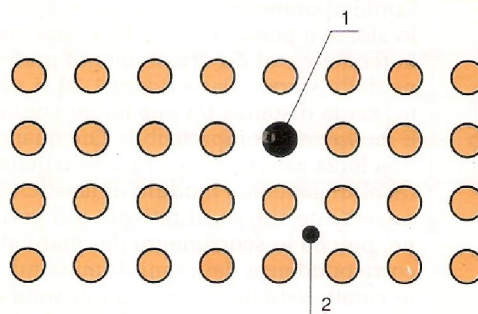


Figura 1.13 Esempi simbolici di vacanze. Difetti reticolari puntiformi costituiti da un atomo vacante (a) o da un gruppo di atomi vacanti (b) nella struttura ordinata di un cristallo.

La *vacanza reticolare* è un difetto puntiforme localizzato: ha il significato di *manca* ed indica in un cristallo reale un posto non occupato da uno o più atomi in una determinata posizione nel reticolo (fig. 1.13). Le vacanze possono essere introdotte nei metalli in modi diversi a temperatura relativamente bassa (mediante deformazione plastica, mediante radiazioni nucleari e mediante tempra rapida). Alcune conseguenze delle vacanze sono la *diffusione*, la *precipitazione* e la *variazione delle caratteristiche meccaniche*.

Il fenomeno della *diffusione** nei metalli puri o nelle soluzioni solide si può avere per migrazione di atomi all'interno di un reticolo. Tale movimento di atomi avviene attraverso i difetti puntiformi, le dislocazioni e i bordi dei grani per effetto delle vibrazioni termiche. Ne consegue che la velocità di diffusione allo *stato solido* aumenta con il crescere della temperatura. Come si nota nella figura 1.14 un atomo in una certa posizione reticolare è in grado, in particolari condizioni termodinamiche, di trasferirsi in una posizione adiacente. Risulta evidente l'importanza del fenomeno della diffusione in molti trattamenti termici e meccanici.

Anche i fenomeni di *riprecipitazione* del soluto nelle fasi omogenee ottenute per tempra rapida (vedi bonifica dell'alluminio) si possono agevolmente spiegare con la soprassaturazione delle vacanze.

La *variazione delle caratteristiche meccaniche* si può giustificare formulando varie ipotesi: la creazione di tensioni interne per la deformazione del reticolo intorno alla vacanza e l'opposizione al movimento delle dislocazioni**. Anche le rotture per fatica dei metalli sollecitati a

* *Diffusione*: mobilità di atomi nell'ambito delle singole posizioni da essi occupati nel reticolo cristallino.

** In generale la resistenza meccanica di un materiale metallico è tanto maggiore quanto più alta è la densità delle dislocazioni presenti e più complesse sono le reciproche interazioni che ne impediscono il movimento.

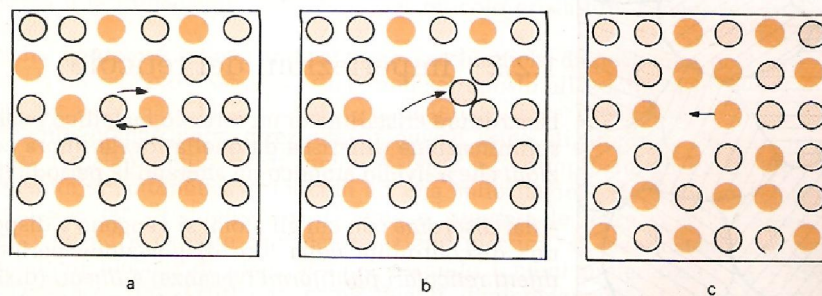


Figura 1.14 Meccanismi principali per la diffusione: a) scambio per rotazione attorno al punto di mezzo; b) migrazione in posizione interstiziale (comprende una vacanza reticolare e un interstiziale poiché un atomo, diverso o dello stesso tipo del materiale base, si sposta dalla sua posizione normale e occupa un interstizio nel reticolo fra gli altri atomi); c) degli atomi si scambiano di posto con posti reticolari vacanti.

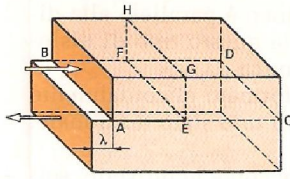


Figura 1.15 Dislocazione a spigolo E-F nel piano di scorrimento ABCD. La figura mostra la regione ABEF, che ha subito lo scorrimento e la regione FECD, che non ha subito lo scorrimento.

* In E-F (fig. 1.16: centro della dislocazione) esiste un'energia potenziale minima (buca di energia) poiché tale spazio non è occupato da nessun atomo. Se gli atomi adiacenti alla buca di energia sono sollecitati a compiere uno slittamento di un passo reticolare, cosa che avviene con un consumo di energia da 100 a 1000 volte inferiore a quella teorica necessaria agli atomi lontani dalla dislocazione o agli atomi di un cristallo perfetto, essi, quando traslano nella dislocazione, lasciano libera la loro posizione. Ne consegue che la dislocazione trasla nel cristallo in direzione opposta allo slittamento degli atomi giustificando la dizione di *movimento delle dislocazioni*.

sforzi periodici si possono imputare alle vacanze in quanto si ritiene che il concentramento di tensioni in determinati punti del reticolo formi le microcavità che costituirebbero l'innescò per la successiva diffusione della rottura attraverso i cristalli.

La *dislocazione* è una alterazione della struttura del reticolo cristallino che ne altera la regolarità per effetto di uno sforzo applicato (di taglio); è generata dallo scorrimento di una parte del cristallo lungo una superficie che termina all'interno del cristallo stesso con una linea ideale chiamata *linea di dislocazione*; nella parte di reticolo attorno alla linea di dislocazione gli atomi vengono a trovarsi in posizioni non esattamente corrispondenti a quelle reticolari.

La dislocazione si può formare durante la crescita dei cristalli per combinazione di vacanze oppure in seguito a deformazione plastica del cristallo in modo tale che una parte di esso scivola come una parte sola sulla parte adiacente o per tensioni di natura termica durante la solidificazione o dovute a disomogeneità di composizione, ecc. La superficie su cui avviene lo slittamento è spesso un piano ed è noto come *piano di scorrimento*.

La figura 1.15 illustra una *dislocazione a spigolo* nella quale in un cristallo si è avuto uno slittamento pari ad almeno una distanza atomica nella metà di sinistra del piano di scorrimento, ma non sulla metà di destra. Il confine E-F tra la regione slittata e quella non slittata viene chiamato *dislocazione**. In scala atomica e nella sezione verticale la dislocazione può essere rappresentata idealmente con lo schema di figura 1.16: il piano degli atomi G-E, detto *piano degli atomi extra*, è come se fosse spostato dalla sua posizione iniziale.

Il ruolo di una deformazione a spigolo nella deformazione di un reticolo metallico può essere paragonato allo spostamento di qualche decina di centimetri di un grande tappeto sul pavimento di una stanza. Se si tira il tappeto afferrandolo da un lato occorre una forza notevole. Se invece lungo un estremo si forma una piega (corrispondente alla dislocazione) quest'ultima può essere fatta avanzare con facilità e con minore sforzo fino all'estremo opposto.

Si può quindi concludere che il passaggio della piega attraverso il tappeto consente di ottenere lo stesso spostamento che si avrebbe tirando l'intero tappeto sul pavimento, con il vantaggio che la piega si muove più facilmente dell'intero tappeto.

Il reticolo risulta distorto (fig. 1.17a) e ciò a causa di instabilità cosicché, all'applicazione di uno stato tensionale, il reticolo tende a «riassstarsi» assumendo una posizione di maggiore stabilità (fig. 1.17b).

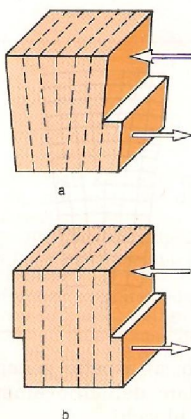


Figura 1.16 Struttura di una dislocazione a spigolo in scala atomica (sezione del cristallo di figura 1.15 nella direzione perpendicolare ad E-F). La deformazione può essere considerata come prodotta dall'inserimento di un semipiano di atomi parzialmente inserito nel reticolo e che ne causa l'instabilità in quanto gli atomi della metà superiore sono compressi dall'inserimento mentre quelli della metà inferiore sono in tensione.

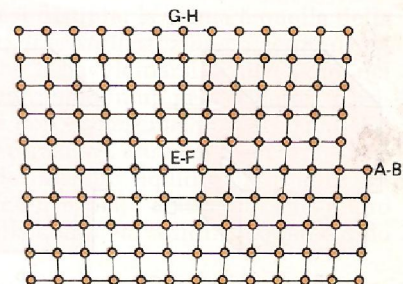


Figura 1.17 Dislocazione a spigolo: a) all'inizio dell'applicazione di uno stato tensionale; b) alla fine.

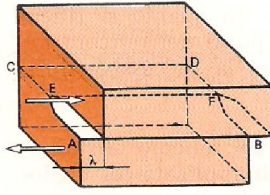


Figura 1.18 Dislocazione a vite: una parte ABEF del piano di scorrimento è mossa in direzione parallela alla linea della dislocazione E-F.

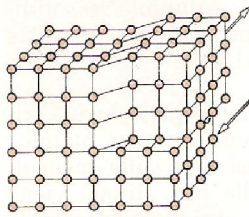


Figura 1.19 Dislocazione a vite in scala atomica.

*L'incrudimento (o indurimento per deformazione) modifica le caratteristiche meccaniche dei materiali metallici, causa inoltre variazioni nelle proprietà fisiche e diminuisce la resistenza alla corrosione. Il reticolo deformato o distorto di un materiale incrudito ha un maggiore contenuto energetico di quello non deformato, cioè non è un reticolo stabile, ma ha la tendenza a trasformarsi di nuovo in un reticolo «perfetto» (non deformato). Questa trasformazione è possibile mediante la ricottura di ricristallizzazione.

La *dislocazione a vite* si ha quando il confine rettilineo è parallelo alla direzione dello scorrimento. La figura 1.18 rappresenta questo tipo di dislocazione e la figura 1.19 mostra lo stesso in scala atomica.

Come si nota il reticolo si trova originariamente deformato elicoidalmente (fig. 1.20a) e anche in questo caso, all'applicazione di uno stato tensionale, il reticolo tende a «riassestarsi» (fig. 1.20b).

Osservando le figure 1.17 e 1.20 è interessante notare come le provette, sottoposte allo stesso stato tensionale, tendono ad assumere la stessa configurazione finale.

Lo sforzo richiesto per muovere una dislocazione non è molto elevato e pertanto le dislocazioni stesse possono conferire ai materiali metallici un comportamento plastico.

Componendo la dislocazione a spigolo con quella a vite si ottiene la *dislocazione mista*, la cui linea di dislocazione è curva.

Il movimento delle dislocazioni giustifica molti fenomeni metallurgici tra cui il principale è la *deformazione plastica a freddo*. Infatti le dislocazioni, essendo distorsioni del reticolo cristallino, e come tali alterandone l'equilibrio atomico, sono concentrazioni di tensioni e quindi riserve di energia potenziale. Ne consegue che, sottoponendo un materiale ad una forza esterna di adeguata intensità, le dislocazioni presenti, per la loro elevata energia potenziale, sono facilmente movibili e pertanto sono la causa del moto e dell'entità della deformazione del reticolo cristallino e quindi del prodotto metallico. La deformazione plastica avviene quindi solo se le dislocazioni sono libere di muoversi sotto l'azione di una sollecitazione e può proseguire grazie all'insorgere di nuove dislocazioni. Nel loro movimento esse, incontrando altri difetti e/o ostacoli di varia natura (vacanze, contorni di grani, impurezze, fasi metalliche, ecc.), richiedono sollecitazioni di intensità sempre maggiore per poter proseguire il loro cammino. Se le dislocazioni si *bloccano*, ciò vuol dire che è subentrato l'*incrudimento**. Aumentando ancora la sollecitazione si determina un aumento della deformazione o distorsione del reticolo, con conseguente aumento dell'energia potenziale degli atomi che tende ad opporsi sempre più ad ulteriori deformazioni (e quindi causa un incremento delle caratteristiche meccaniche). Contemporaneamente i grani, come pure le pellicole periferiche di impurezze che li circondano, possono innescare dei cedimenti che provocano la rottura del pezzo.

Ancora una conseguenza delle dislocazioni è la *struttura a mosaico* (fig. 1.21): l'edificio cristallino, costituente il cristallo, è formato da un insieme di *blocchi atomici* ciascuno dei quali ha un orientamento leggermente diverso. I blocchi sono separati da allineamenti di dislocazioni.

Dal punto di vista strutturale anche i bordi dei grani si possono interpretare come una sequenza di dislocazioni a spigolo.

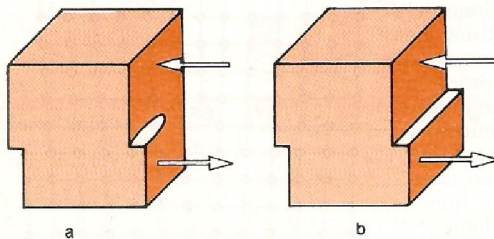


Figura 1.20 Dislocazione a vite: a) all'inizio dell'applicazione di uno stato tensionale; b) alla fine.

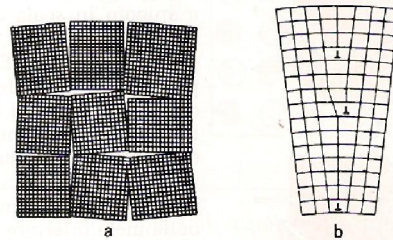


Figura 1.21 Struttura a mosaico: a) aspetto generale dei blocchi atomici; b) particolare dell'allineamento delle dislocazioni nei giunti dei blocchi.

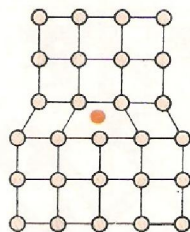


Figura 1.22 Atomo estraneo interstiziale localizzato in una dislocazione il cui movimento è ostacolato.

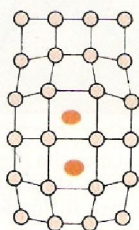


Figura 1.23 Atomi estranei interstiziali in reticolo deformato; il movimento delle dislocazioni viene bloccato.

L'*interstiziale* è un difetto puntiforme che si genera in un reticolo cristallino quando un atomo si colloca in una posizione reticolare che normalmente non è occupata da alcun atomo. L'interstiziale può essere formato dallo stesso atomo costituente il reticolo o da un atomo diverso. Gli *atomi estranei interstiziali* sono pertanto atomi eterogenei, estranei agli atomi della matrice ospite, costituiti da impurezze metalliche e/o non metalliche; se trovano collocazione nei pressi delle dislocazioni ne ostacolano il movimento con diminuzione dell'attitudine alla deformazione plastica (figg. 1.22 e 1.23).

Gli *atomi estranei sostituzionali* sono atomi eterogenei, estranei alla composizione del metallo, dovuti ad impurezze metalliche e/o non metalliche, i quali sostituiscono atomi della matrice in posizioni normali nel reticolo. Si può concludere che la plasticità è una caratteristica dello stato metallico in quanto un metallo, sottoposto a sollecitazioni meccaniche, si deforma più o meno facilmente (resistenza alla deformazione) e più o meno profondamente (capacità di deformazione). La plasticità dei metalli deriva dal fatto che i piani atomici che costituiscono il reticolo cristallino (piani reticolari), possono scorrere più o meno liberamente gli uni sugli altri in funzione della natura del metallo, della forma del cristallo, della distanza fra un piano e l'altro, delle impurezze e della eventuale presenza di atomi estranei (interstiziali e/o sostituzionali).

La natura dei legami fra gli atomi e fra i piani reticolari è la conseguenza delle forze di attrazione e di repulsione orientate in particolari direzioni. Queste forze, equilibrandosi reciprocamente, determinano la disposizione ordinata degli atomi dando origine alla natura reticolare del cristallo.

È evidente che la presenza di atomi estranei disturba lo stato di equilibrio e crea distorsioni nei piani atomici o reticolari rendendo più difficoltoso lo scorrimento dei piani reticolari gli uni sugli altri, diminuendo di conseguenza la plasticità ed aumentando la durezza.