NUMERO: 2383A ANNO: 2018

A P P U N T I

STUDENTE: Pirro Giulia

MATERIA: Pirro Giulia -Technology of Construction Material - Prof. Matteis Serrapede

Steel production

World steel production (2016):

≈ 1630 million tons / year

≈ 210 kg /person / year

All other metals together:

less than 100 million tons / year

Steel production by country (2016):

China (1st): ≈ 803 million tons / year

Italy (11th): ≈ 23 million tons / year

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 3 di 384

Steel grades - examples

Eutectoid wire steels

- YS ≈ 1800 Mpa
- Fine pearlite
- Homogeneous
- Anisotropic

Rebar steels

- YS ≈ 450 Mpa
- Inhomogeneous
  - Tempered martensite (Bainite)
  - Ferrite & pearlite
- Isotropic

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 5 di 384

6.03.18

lunedì 5 marzo 2018 17:32

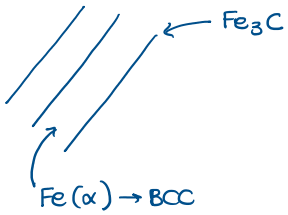
1) EUTECTOID WIRE STEEL (0,8 carb) ϕ 1 mm
↳ suspended structures, cables

σ_s = 1800 MPa

limit of elastic behaviour (yielding stress)

MICROSTRUCTURE
- Fine pearlite
- Homogeneous
- Not isotropous

~ microstructure: distribution of phases at the dimension of a micro
~ pearlite: very fine "lamelle" in two phases

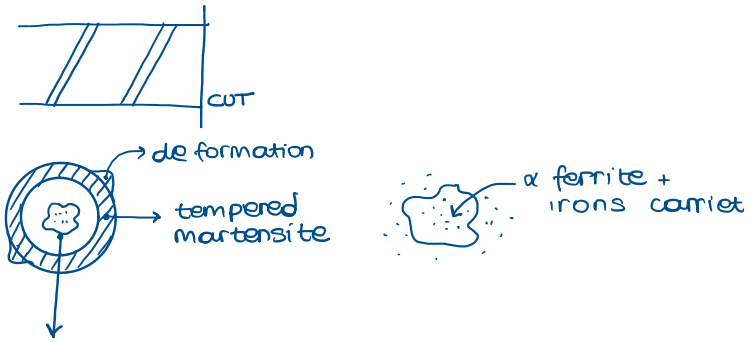


~ Not isotropous: because lamelles are oriented in only one direction (parallel to each other)

2) REINFORCEMENT BARS (0,2 carbon)

σ_s = 450 MPa (in Italy)
↳ different in other countries

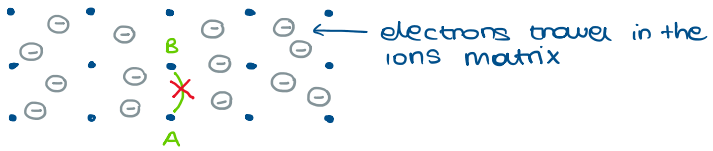
- NOT HOMOGENEOUS (in the most common case, in other cases it is homogeneous)



ferrite-perlite
(more rough than before so distance between lamelle is larger than 1 μm so larger than before ~fine perlite) + isotropous because lamelles are oriented in a random way

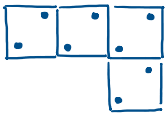
TENSILE TEST

LATTICE CRYSTAL (set of points)



METALLIC BOND: not direction (each ion isn't directly linked to only one of another: A isn't only linked to B, it's a combination of effect)
~ high stiff
~ high strength

To obtain the lattice we built a cell and repeat it in space



Metals (including **pure metals and alloys**) consist of **atoms** and are characterized by **metallic bonding** (i.e., the valence electrons of each atom are delocalized and shared among all the atoms).

Most of the elements in the Periodic Table are metals.

Alloys are classified according to their main element. The main classes of alloys are:
- **iron-based alloys** for structures;
- **copper-based alloys** for piping, thermal & electrical conduction, etc.;
- **aluminum-based alloys** for lightweight structures.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 11 di 384

Usually **metals** are:

- Stiff => strength of the metallic chemical bond

- Conductors of electricity and heat => presence of mobile electrons inside metallic chemical bond

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 13 di 384

METALS

Most metallic materials have these crystal structures:

•body-centered cubic (BCC) or

•face-centered cubic (FCC) or

•hexagonal close-packed (HCP)

These structures are very common because they have:

high packing

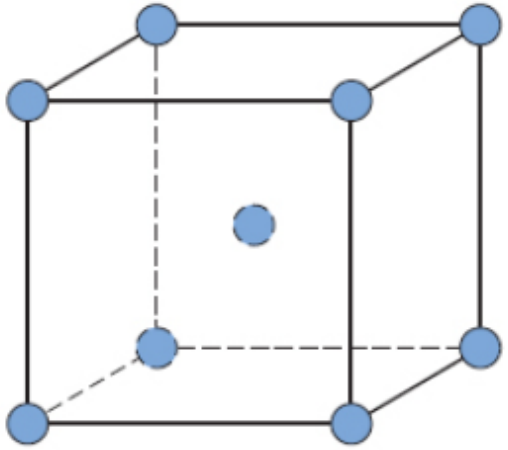
if atoms are tightly packed, the free energy of the crystal is low and thus the crystal is thermodynamically stable

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 15 di 384

Body-centered cubic crystal structure (BCC)

Calculations

Unit cell contains:
1 + 8 x 1/8
= 2 atoms/unit cell

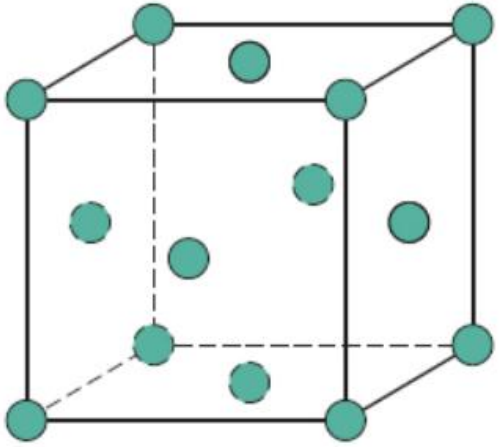


$$\text{Atomic packing factor (APF)} = \frac{\dfrac{\text{atoms}}{\text{unit cell}} \cdot \dfrac{\text{volume}}{\text{atom}}}{\dfrac{\text{volume}}{\text{unit cell}}} = \frac{2 \cdot \frac{4}{3}\pi\left(\frac{\sqrt{3}a}{4}\right)^3}{a^3}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 17 di 384

Face-centered cubic (FCC) crystal structure

calculations



Unit cell contains:

6 x 1/2 + 8 x 1/8

= 4 atoms/unit cell

Atomic packing factor (APF):

= volume of four atoms ÷ volume of cube

$= 4\times(4\pi r^3/3) \div (16\sqrt{2}\,r^3) = \pi\sqrt{2}/6 = 74.05\%$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 19 di 384

Stacking of close-packed planes in FCC and HCP crystals

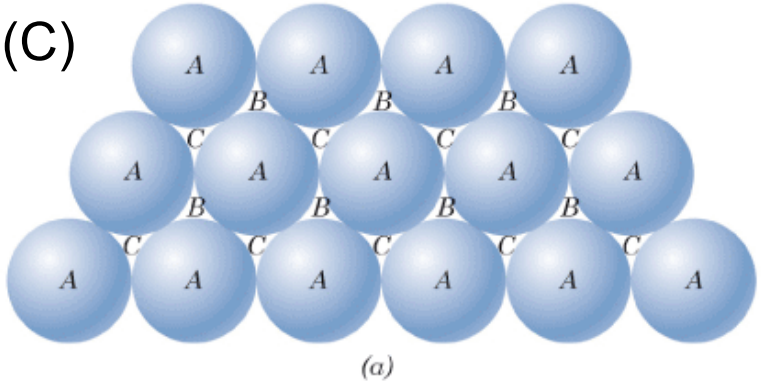
2nd plane - B:

- Each 2nd-plane atom touches three 1st-plane atoms
- 50% of 1st-plane voids are used in the 2nd plane

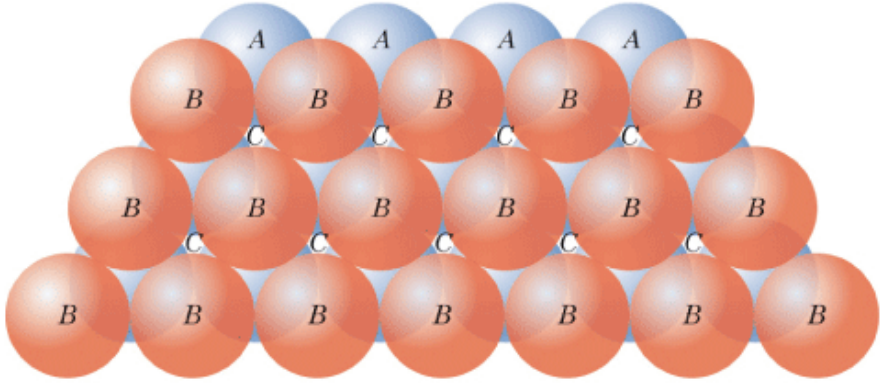
3rd plane - 2 possibilities, C or A:

- on 1st plane voids not used by 2nd plane (C)
- or straight on 1st plane spheres (A)

2 different spatial arrangements:
ABCABC sequence → FCC lattice
ABABAB sequence → HCP lattice

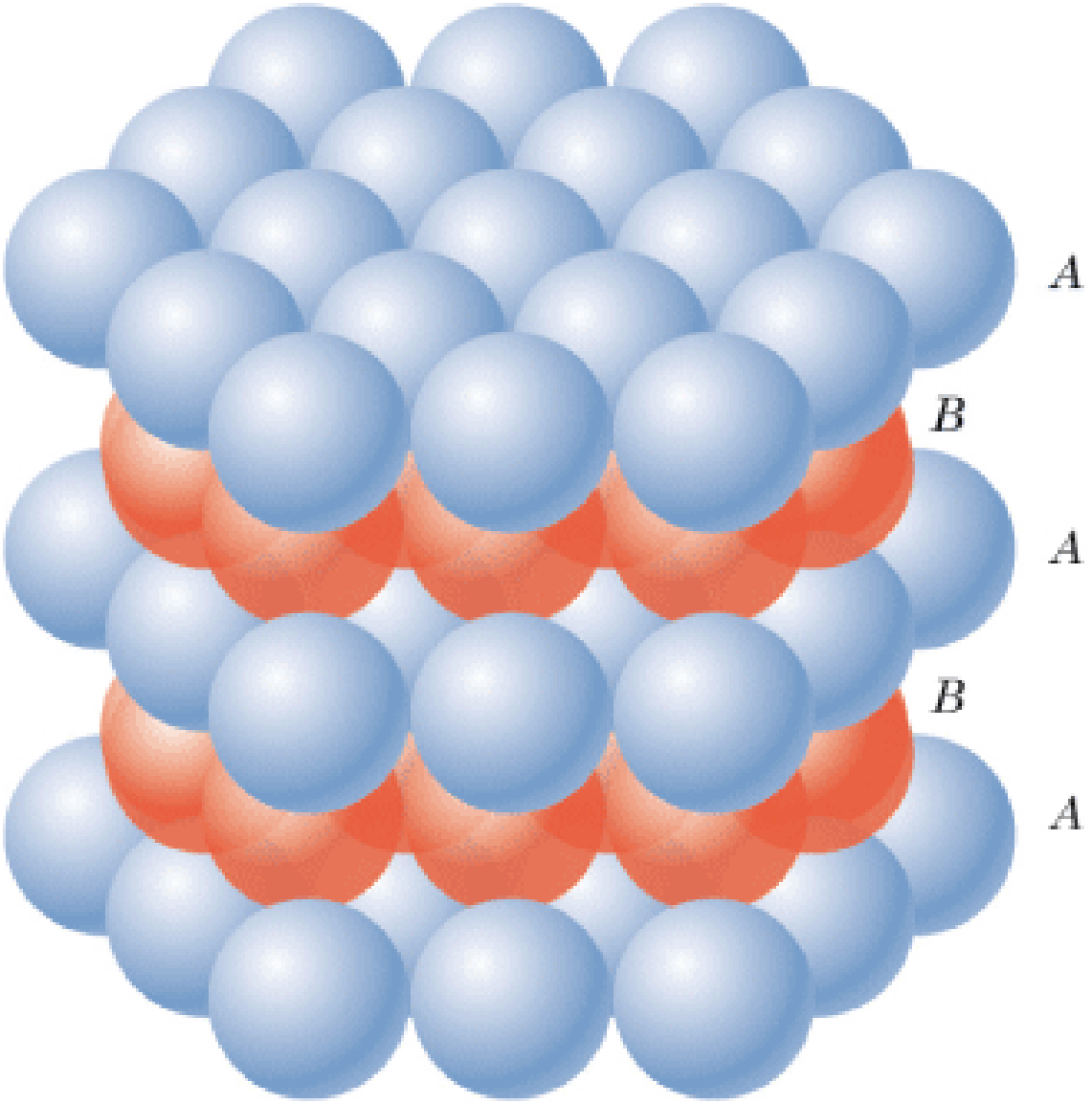


(a)



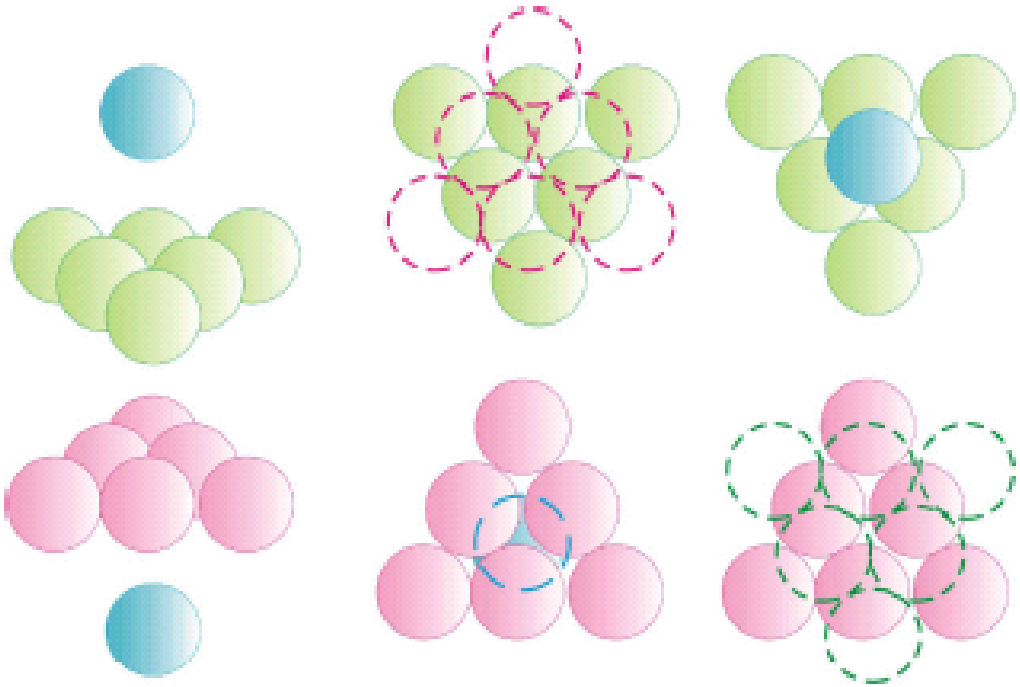
(b)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 21 di 384

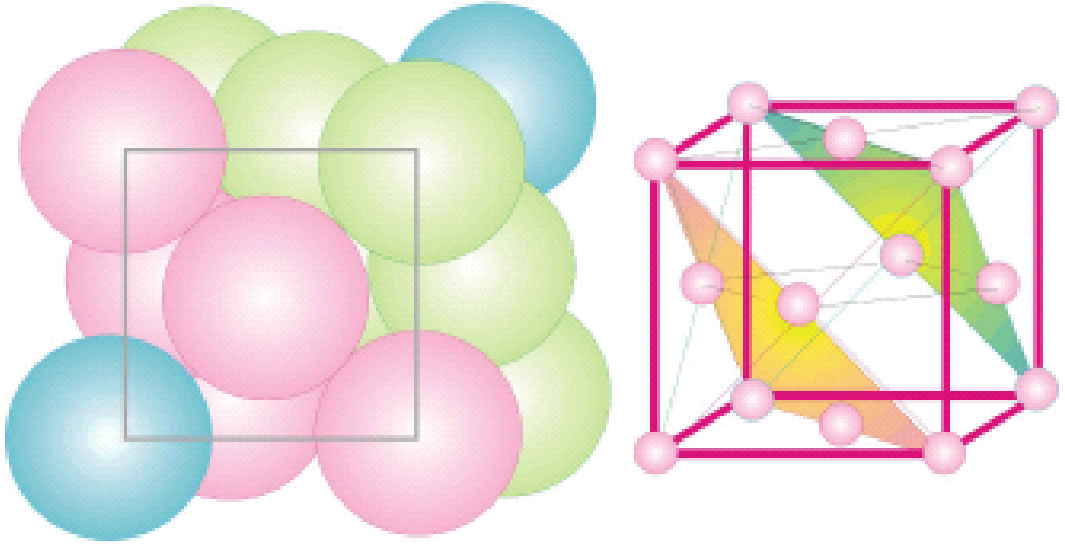


Close-packed plane stacking sequence for the HCP structure

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 23 di 384

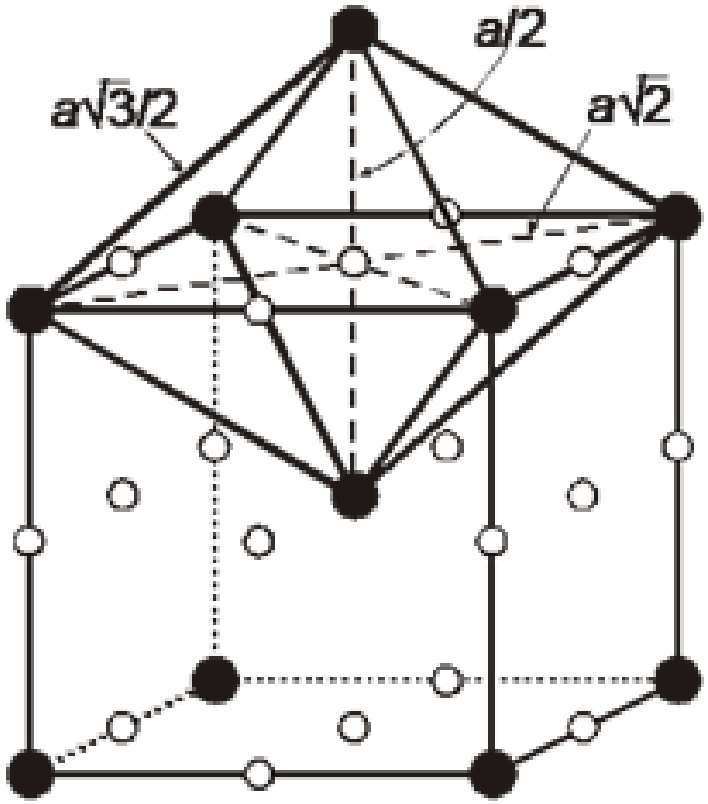


Close-packed stacking sequence for the face-centered cubic structure.



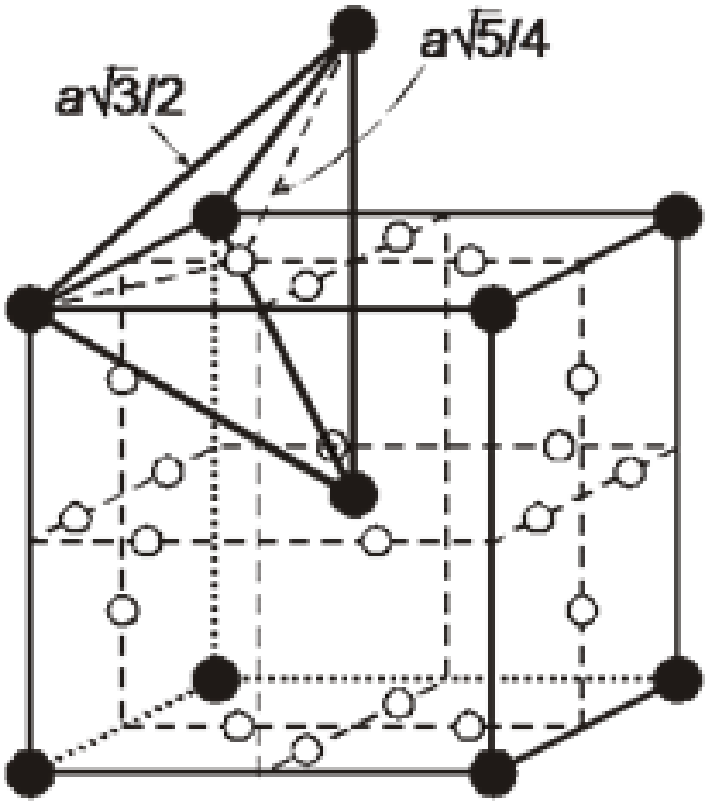
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 25 di 384

Interstitial sites (voids) in the BCC crystal structure



● Metal atoms

○ Center-points of octahedral (irregular) interstitial sites



● Metal atoms

○ Center-points of tetrahedral interstitial sites

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 27 di 384

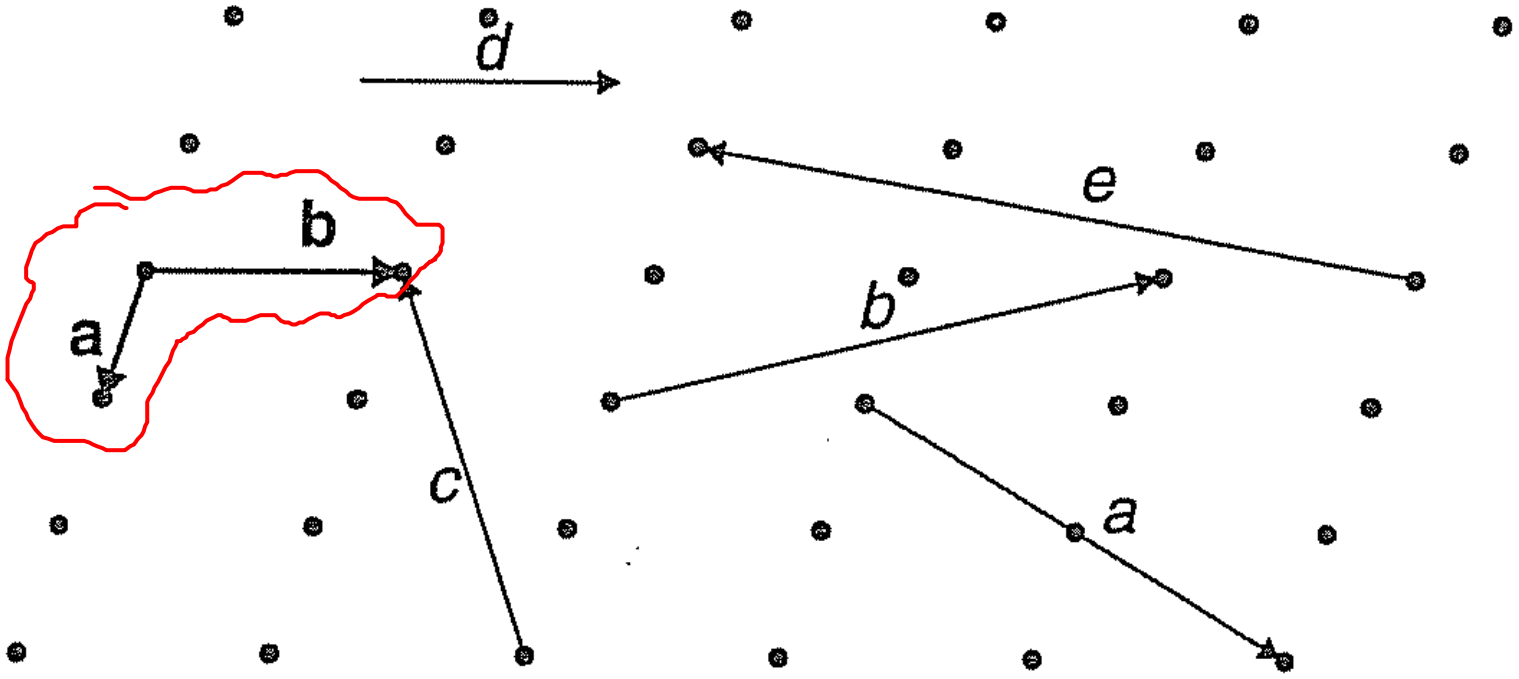
CRYSTAL STRUCTURES of METALS

II

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 29 di 384

Problem 1

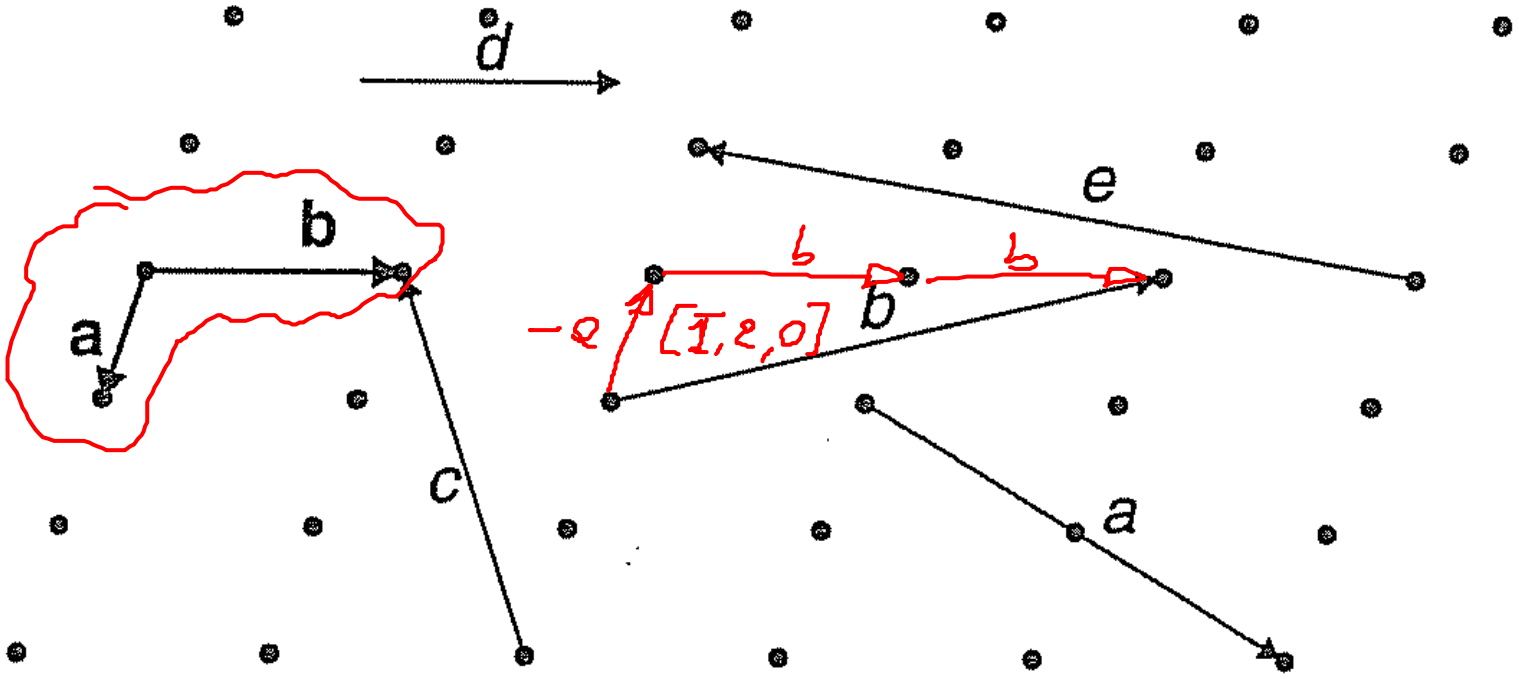
Give the indices of the directions marked on the figure below. In all cases the axis not shown is perpendicular to the plane of the paper and hence the index w is 0 in all cases.



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 31 di 384

Problem 1

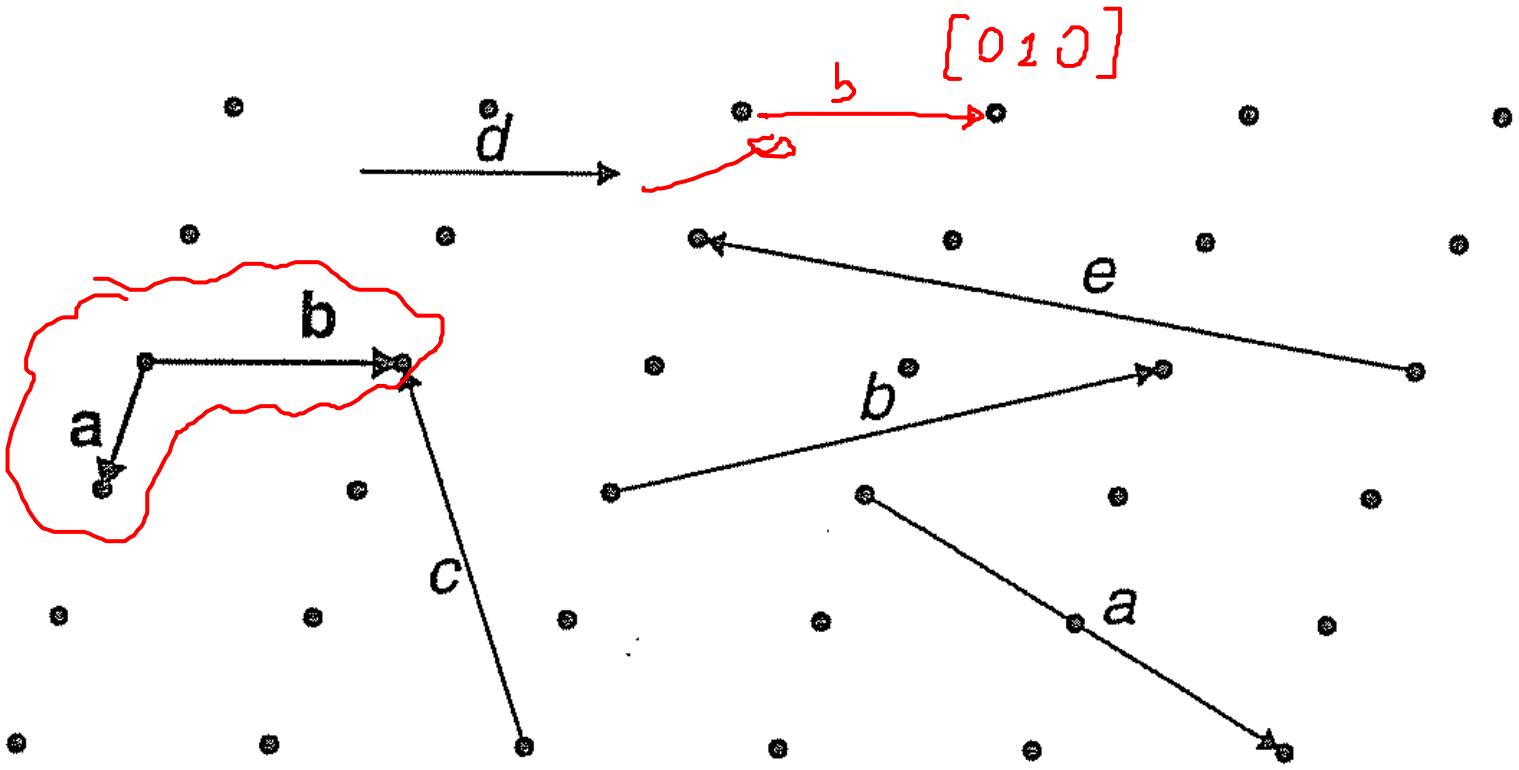
Give the indices of the directions marked on the figure below. In all cases the axis not shown is perpendicular to the plane of the paper and hence the index w is 0 in all cases.



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 33 di 384

Problem 1

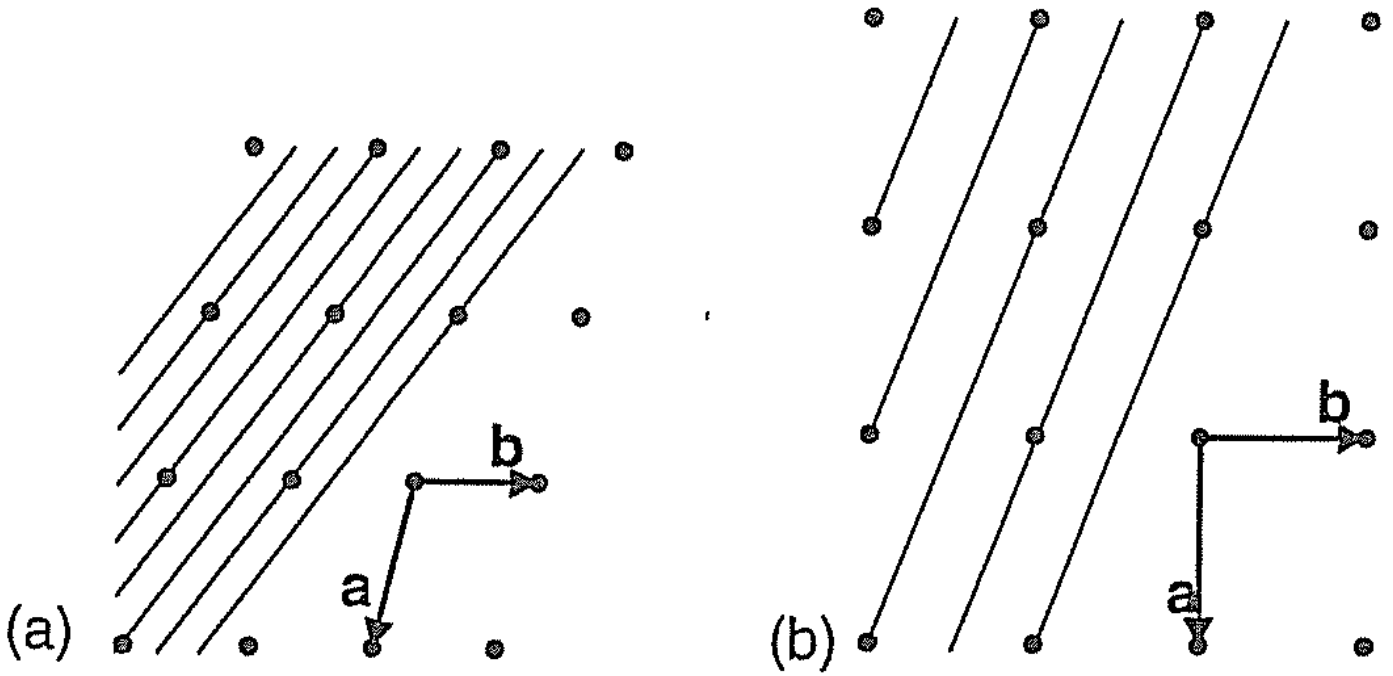
Give the indices of the directions marked on the figure below. In all cases the axis not shown is perpendicular to the plane of the paper and hence the index w is 0 in all cases.



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 35 di 384

Problem 2

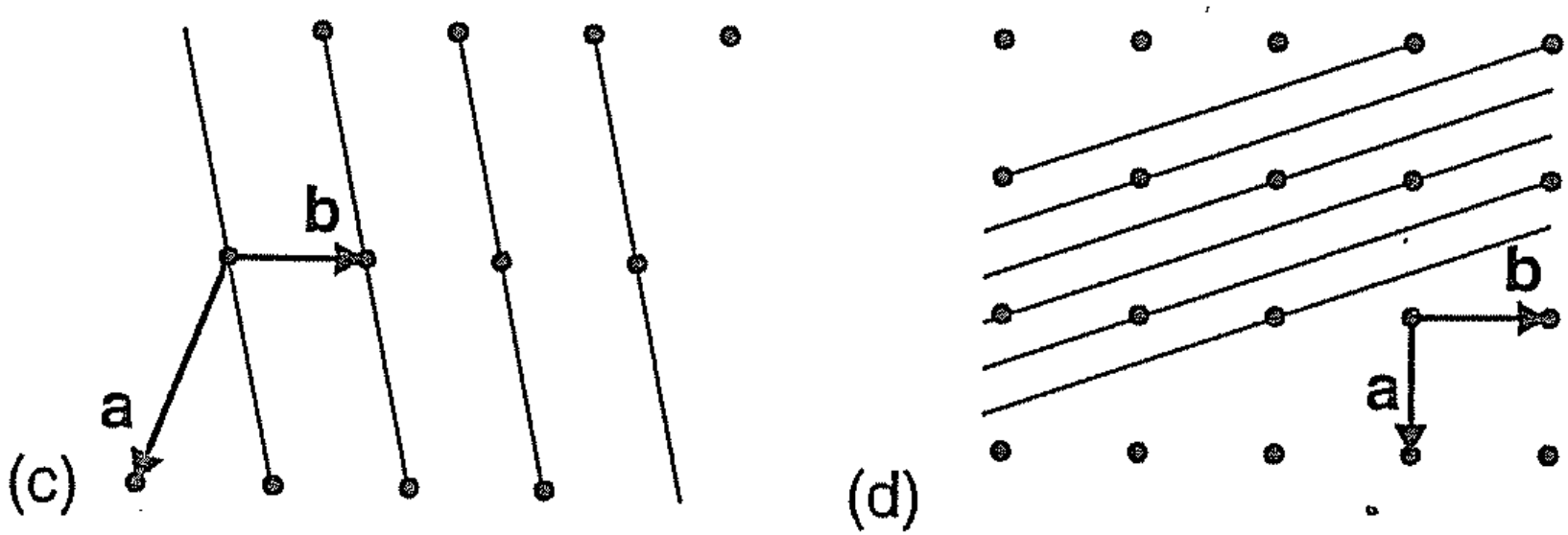
Index the lattice planes drawn in the figure below. The **c**-axis in all lattices is normal to the plane of the page and hence the index *l* is 0 in all cases.



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 37 di 384

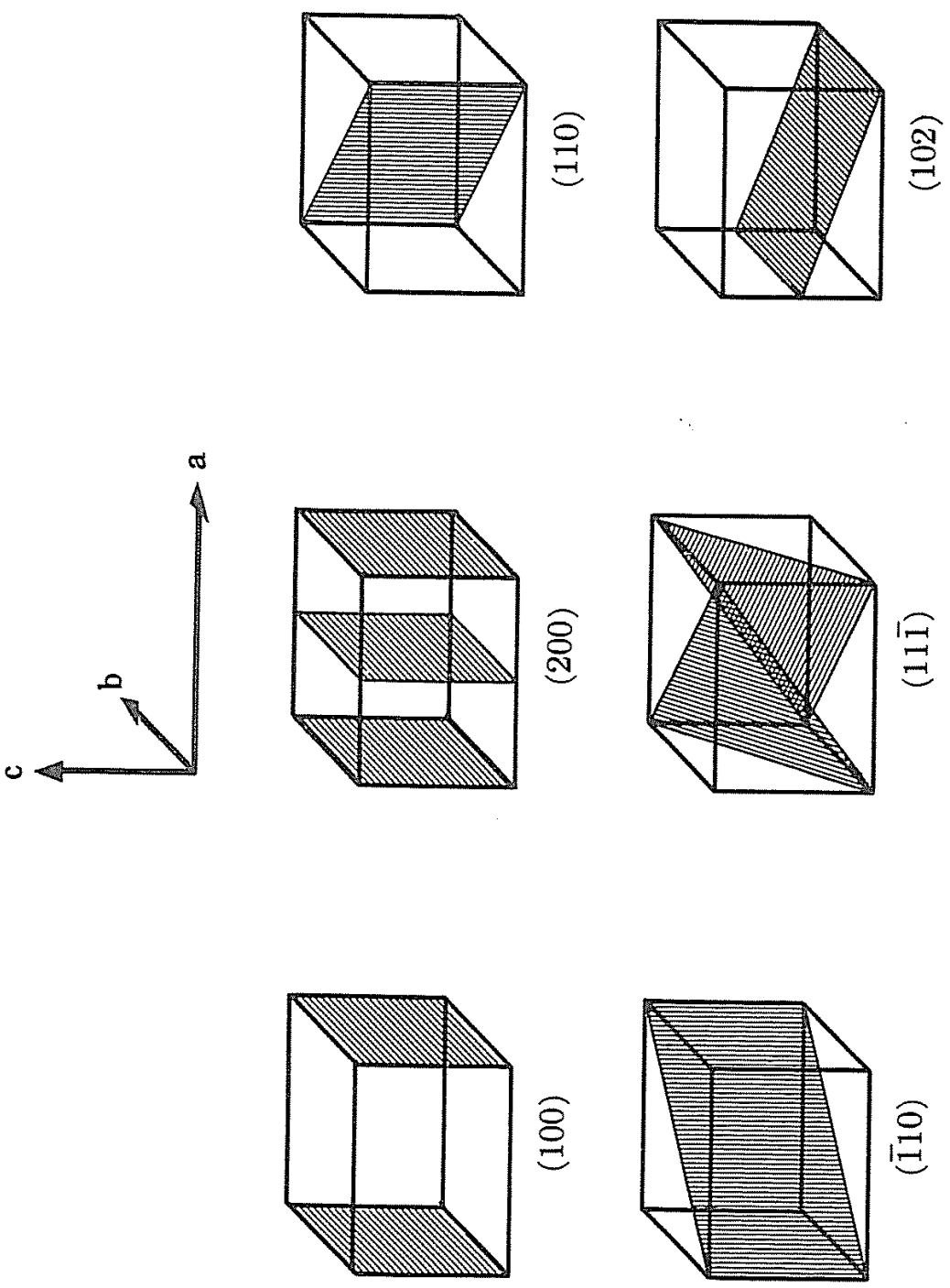
Problem 3

Index the lattice planes drawn in the figure below. The **c**-axis in all lattices is normal to the plane of the page and hence the index *l* is 0 in all cases.



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 39 di 384

Planes - examples



Planes and directions in cubic crystals (1)

The unit of lenght is the side of the unit cell

Lattice	Cartesian space
vectors $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$	versors $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ in the *Oxyz* cartesian space
directions $[hkl]$	$\vec{r} = h\vec{i} + k\vec{j} + l\vec{k}$
planes (h, k, l)	$hx + ky + lz = n$ with $n \in \mathbb{N}$

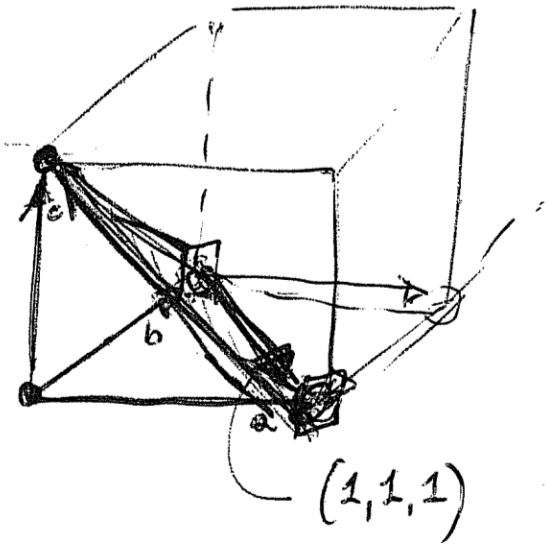
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 43 di 384

Planes and directions in cubic crystals (3)

Does $[1\,\bar{1}\,0]$ belong to $(1,1,1)$?

Yes, because: $[1,\bar{1},0]\cdot[1,1,1] = 1\cdot1 + 1\cdot(-1) + 0\cdot1 = 0$

And also:



$[10\bar{1}]\cdot[1,1,1] = 0$

$[01\bar{1}]\cdot[1,1,1] = 0$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 45 di 384

DEFECTS IN CRYSTALS – I

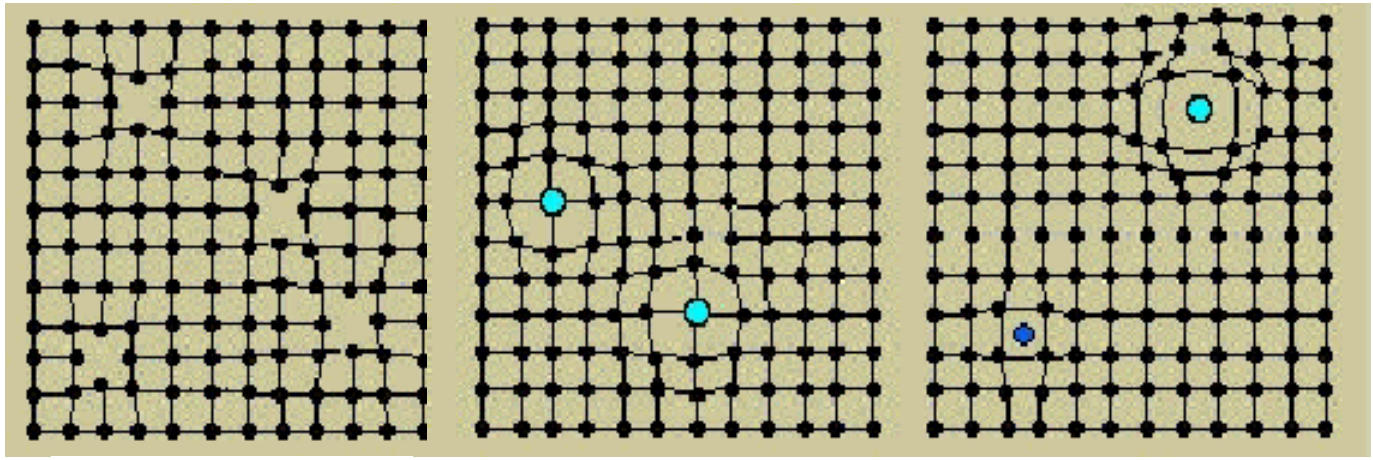
Point defects & line defects

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 47 di 384

POINT DEFECTS...

... are lattice defects of atomic size (1 atom)

A part of the crystal about 100 atomic radii wide around the defect is perturbed



vacancies

Substitutional atoms

Interstitial atoms

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 49 di 384

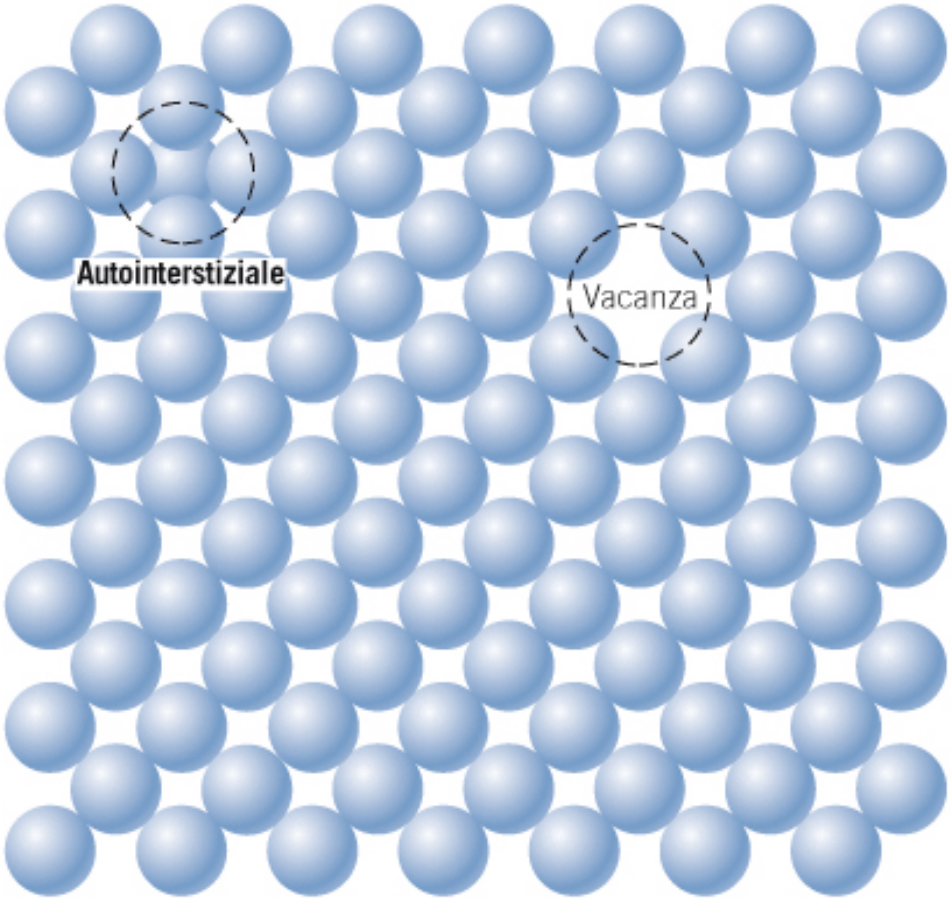


Figura 4.1 Rappresentazione bidimensionale di una vacanza e di un autointerstiziale. (Da W.G. Moffatt, G.W. Pearsall, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, p. 77. Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York. Riprodotta con il permesso della John Wiley & Sons Inc.).

Callister, Rethwisch
Scienza e Ingegneria dei Materiali
EdiSES

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 51 di 384

INTERSTITIAL ATOMS

atom	H	O	N	C	B
atomic radius (in A)	0,30	0,66	0,71	0,77	0,87

Knowing sites size is necessary to understand interstitial solid solutions.

Fe , BCC a = 2,866 A radius of octahedral site = 0,192 A
radius of tetrahedral site = 0,364 A

Fe , FCC a = 3,646 A radius of octahedral site = 0,536

Interstitial elements show atomic radius bigger than the radius of the lattice holes, except for hydrogen.

The introduction of an interstitial atom causes stress in the crystal (atoms around it are displaced from their equilibrium positions).

The crystal can accept only a limited amount of stress and distorsion.

Not all interstitial sites can be occupied by interstitial atoms.

There is a limit of solubility of the interstitial atom in each lattice, related to the maximum stress accepted by the crystal

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 53 di 384

The introduction of some % fractions of substitutional atoms cause the substitutional solid solutions

Solubility limit between two elements or two compounds depends on:

- atomic size factor
- electronegativy
- crystal structure of the two pure elements
- element valences

Hume – Rothery laws

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 55 di 384

Line defects: DISLOCATIONS

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 57 di 384

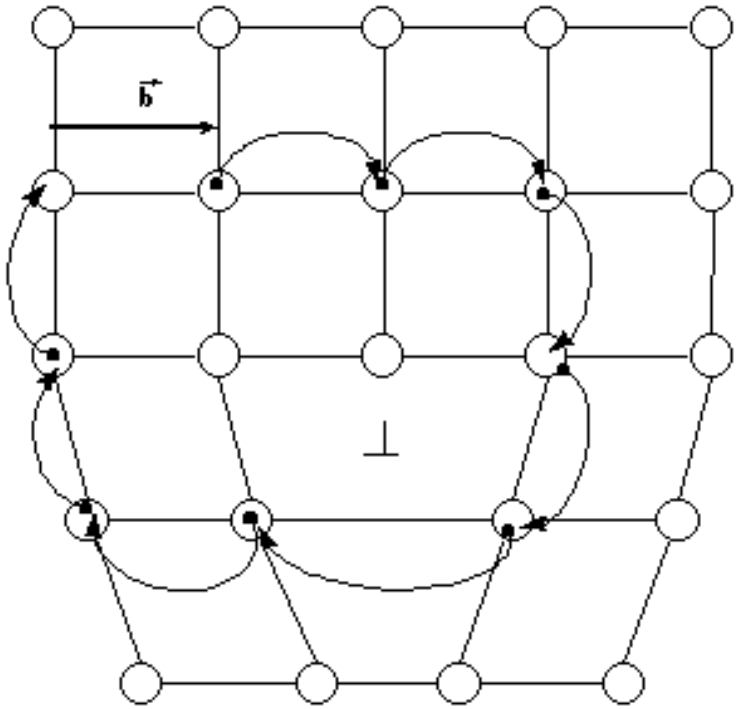
BURGERS VECTOR:

It indicates magnitude, direction and versus of atoms displacement around the dislocation

It can be calculated by using the Burgers' path method:

A clockwise path in each direction with the same step number is sketched: the connecting line is Burgers vector .

Perfect crystal: you go back to the starting atom ⇒ Burgers vector is 0;

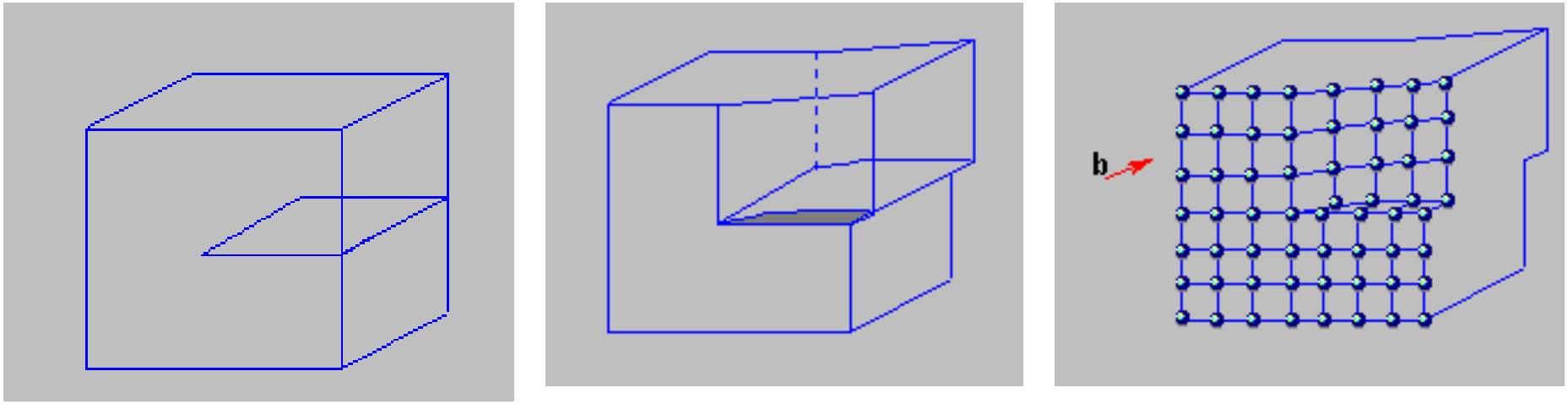


In the case of edge dislocations, the Burgers vector is perpendicular to the dislocation line

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 59 di 384

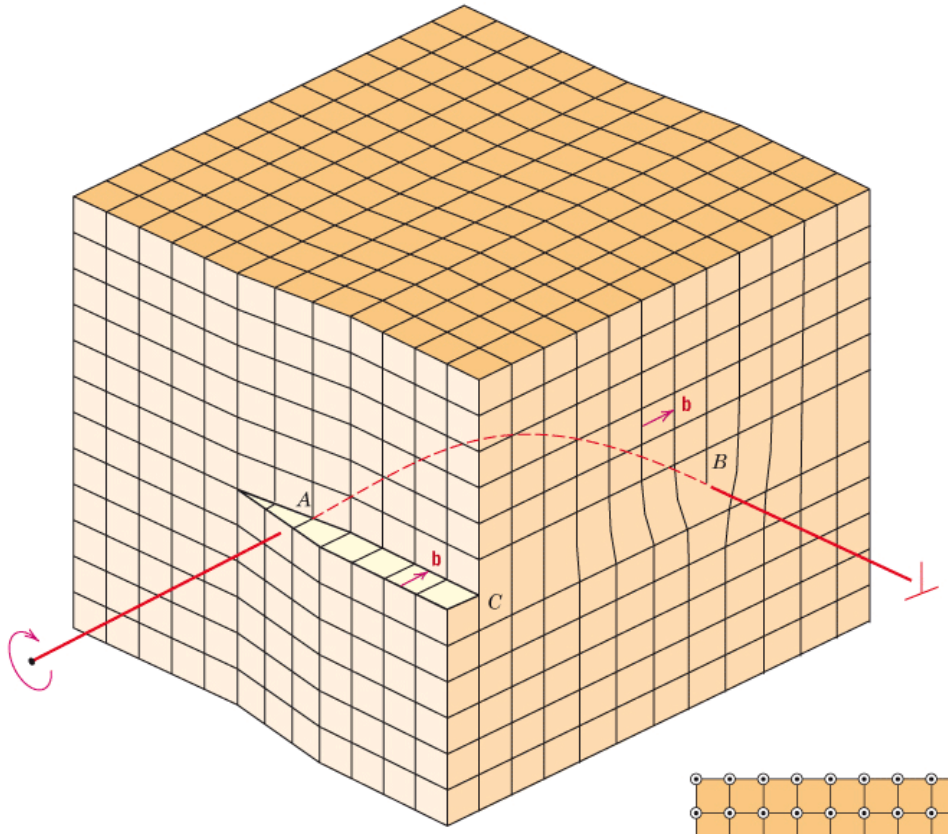
SCREW DISLOCATIONS

It can be immagined that a screw dislocation is formed by shear stress



the Burgers vector b is parallel to the dislocation line

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 61 di 384



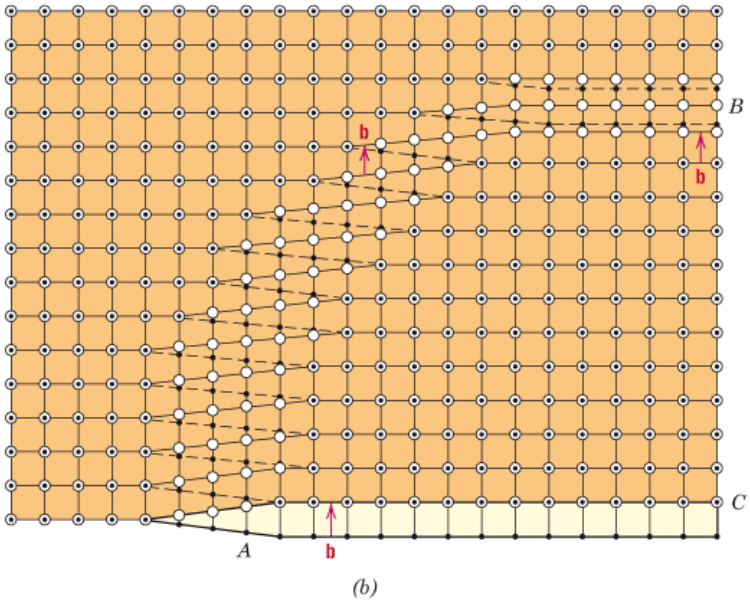
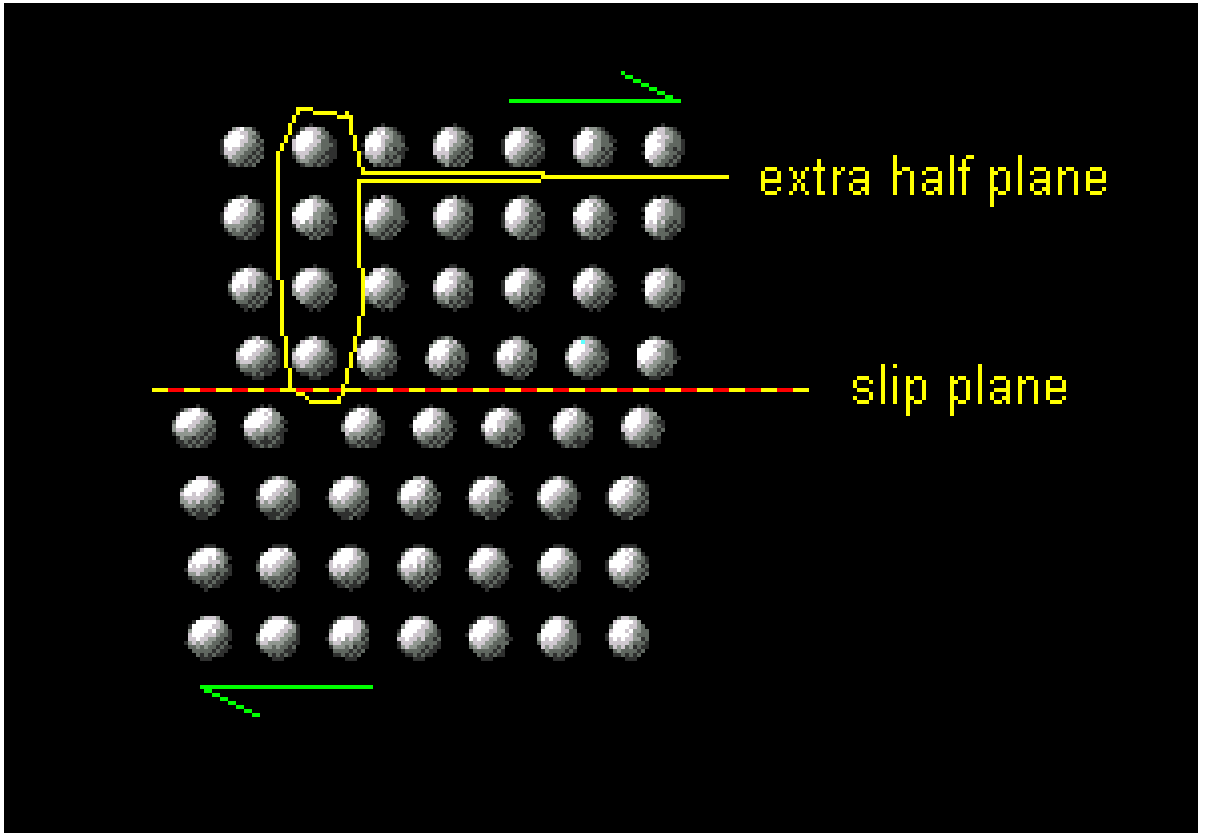


Figura 4.5 (*a*) Rappresentazione schematica di una dislocazione che assume configurazioni a spigolo, a vite e mista. (*b*) Vista dall'alto, dove i cerchi vuoti rappresentano posizioni atomiche localizzate al di sopra del piano di scorrimento e i cerchi pieni le posizioni atomiche localizzate al di sotto. Nel punto *A*, la dislocazione è puramente a vite, mentre nel punto *B* è puramente a spigolo. Per le zone della dislocazione comprese tra questi due punti dove l'asse di dislocazione è incurvato, il carattere della dislocazione è di tipo misto. [Figura (*b*) da W.T. Read, Jr., *Dislocations in Crystals*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1953].

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 63 di 384

MOVEMENT OF DISLOCATIONS:

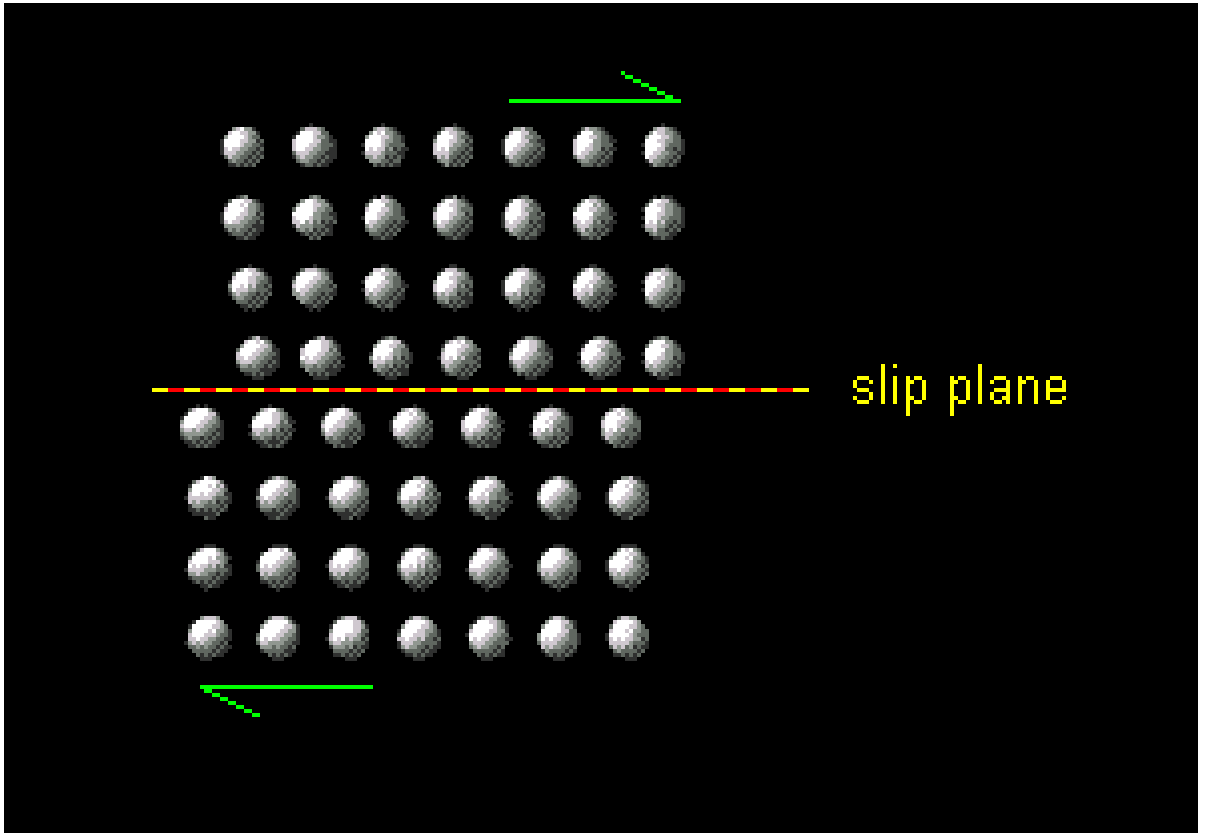
edge dislocations (Burgers vector perpendicular to dislocation line) move along a plane defined by the Burgers vector and by the dislocation line and in a direction perpendicular to the dislocation line.



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 65 di 384

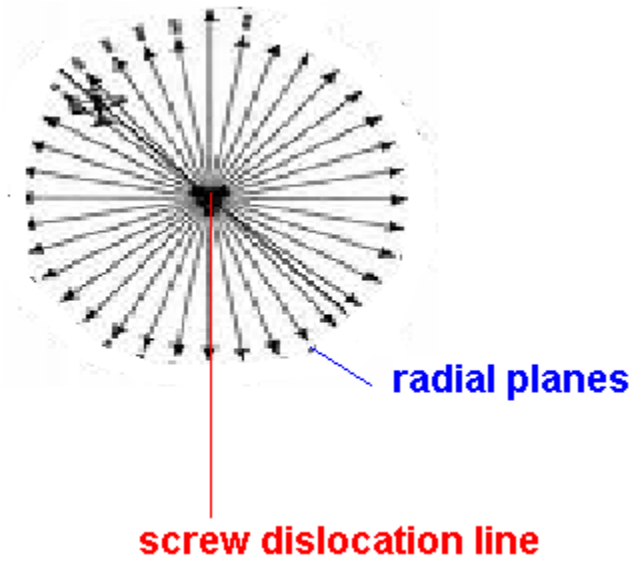
MOVEMENT OF DISLOCATIONS:

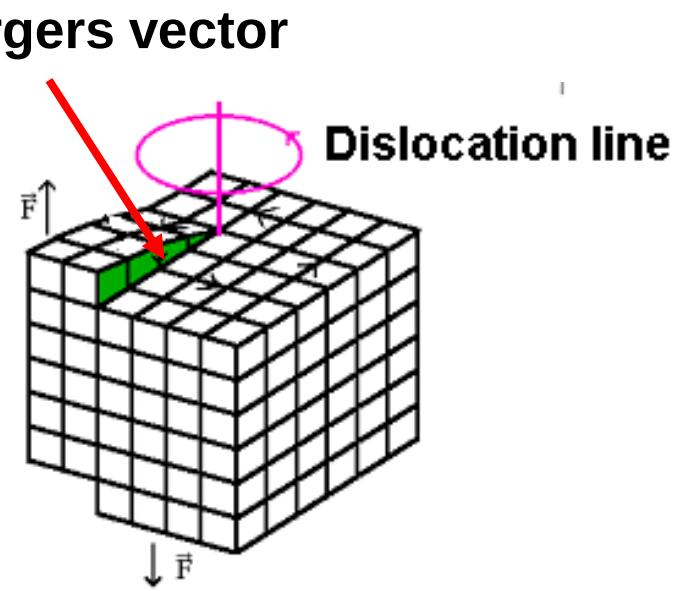
edge dislocations (Burgers vector perpendicular to dislocation line) move along a plane defined by the Burgers vector and by the dislocation line and in a direction perpendicular to the dislocation line.



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 67 di 384

Screw dislocations (the Burgers vector is parallel to the dislocation line) move along one of the radial planes.
Moreover, a screw dislocation can shift to another plane





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 69 di 384

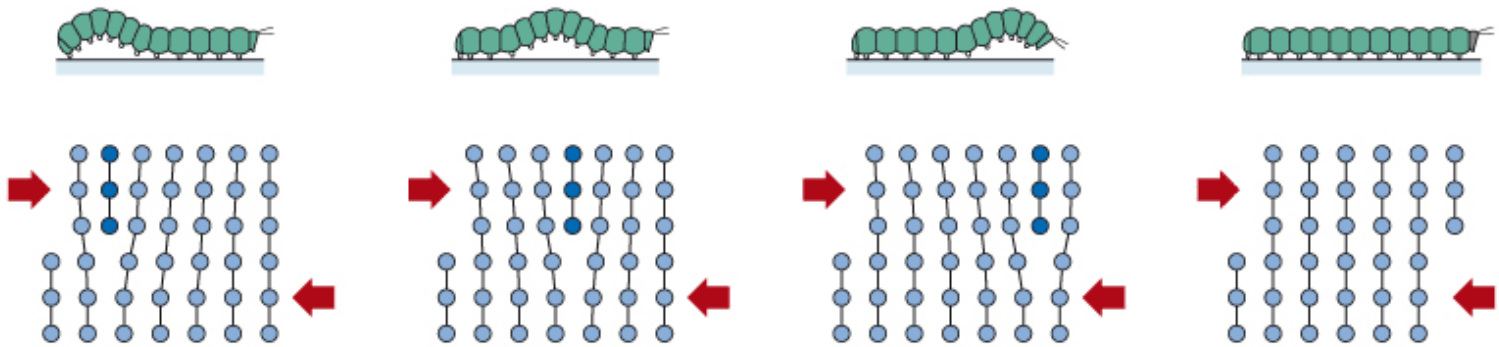


Figura 7.3 Analogia tra il moto di un bruco e quello di una dislocazione.

Callister, Rethwisch
Scienza e Ingegneria dei Materiali
EdiSES

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 71 di 384

Tabella 7.1 **Sistemi di scorrimento per metalli cubico a facce centrate, cubico a corpo centrato ed esagonale compatto**

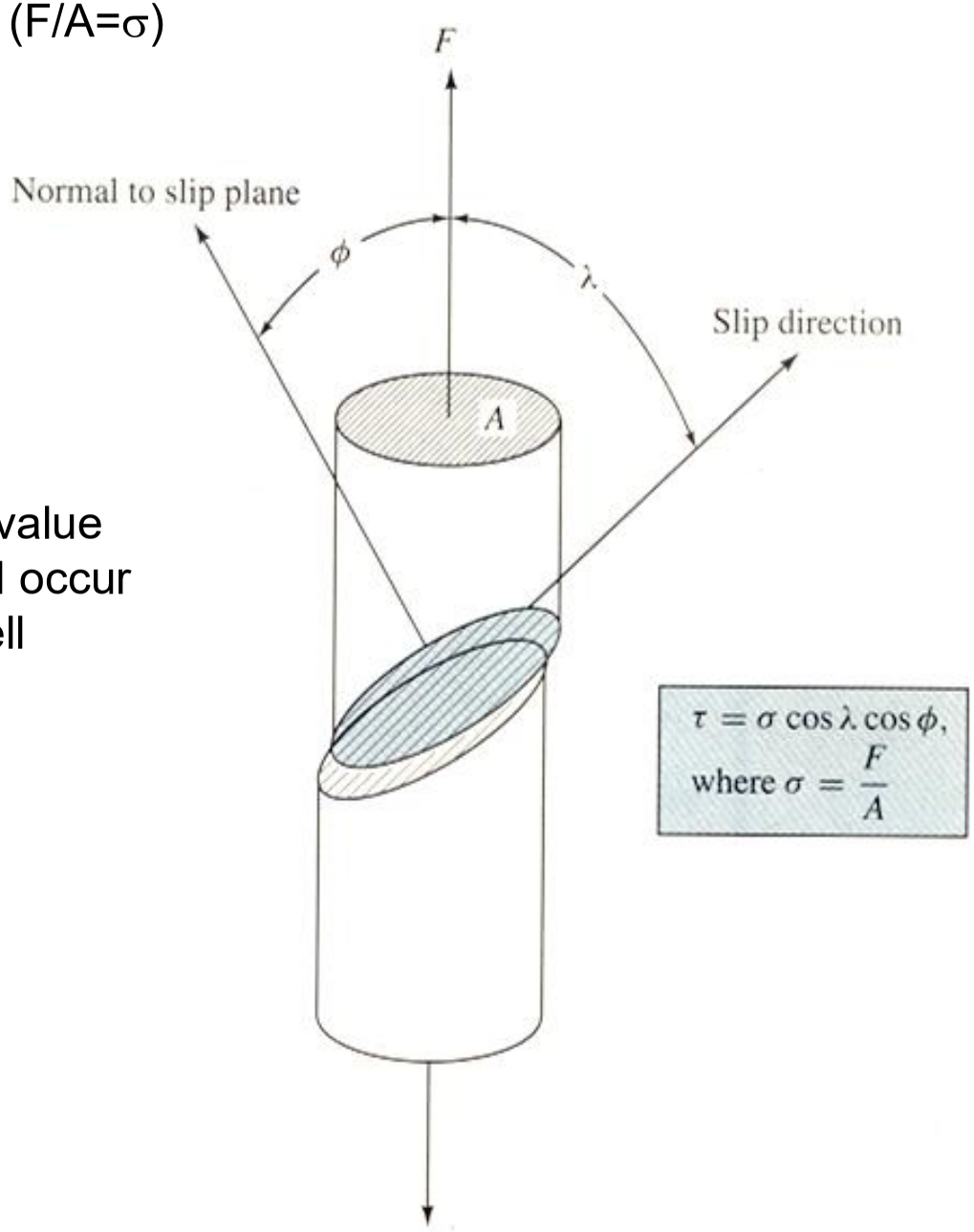
Metalli	*Piano di scorrimento*	*Direzione di scorrimento*	*Numero di sistemi di scorrimento*
	Cubico a facce centrate		
Cu, Al, Ni, Ag, Au	{111}	$\langle 1\bar{1}0 \rangle$	12
	Cubico a corpo centrato		
Fe α, W, Mo	{110}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
Fe α, W	{211}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
Fe α, K	{321}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	24
	Esagonale compatto		
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	{0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg, Zr	$\{10\bar{1}0\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg	$\{10\bar{1}1\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	6

Callister, Rethwisch
Scienza e Ingegneria dei Materiali
EdiSES

BCC lattice doesn't show an atomic packing as dense as FCC → BCC has lower plastic deformation than FCC, even if it has a relatively large number of slip systems.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 73 di 384

effective shear strength operating on a slip plane when the material is submitted to macroscopic tensile force (F/A=σ)



If τ exceeds a critical value plastic deformation will occur with the slips of the well oriented dislocations.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 75 di 384

Libri

Callister: cap. 4.2, 4.3, 4.5, 6.2, 7.2 – 7.6

Cigada & Pastore: cap. 1.3 (parte)

Barella & Gruttadauria: cap. 1.5.3, 2.1, 2.2

Bertolini: cap. 3.2.1, 3.2.2

Reardon: cap. 2 (parte)

Smallman: cap. 4 (parte)

Campbell: cap. 1 e 2 (parti)

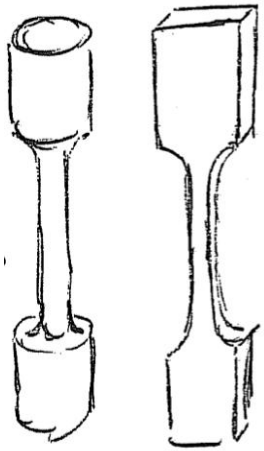
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 77 di 384

The tensile test

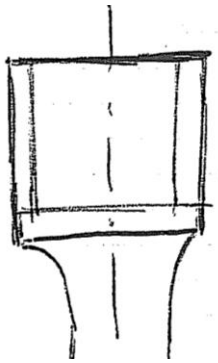
Tests on:

whole component (e.g.: rebar)

machined samples (round, flat)

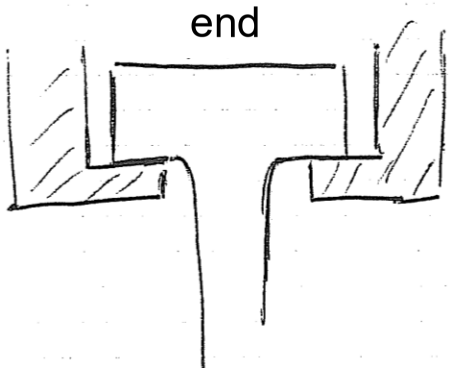


Grips

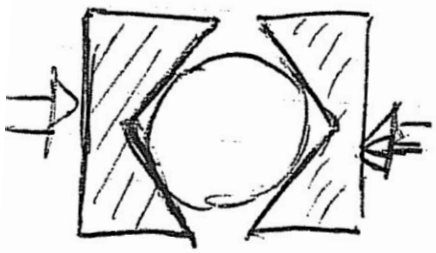


Threaded end

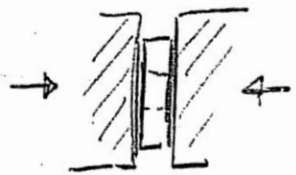
Shoulder end



V - grip

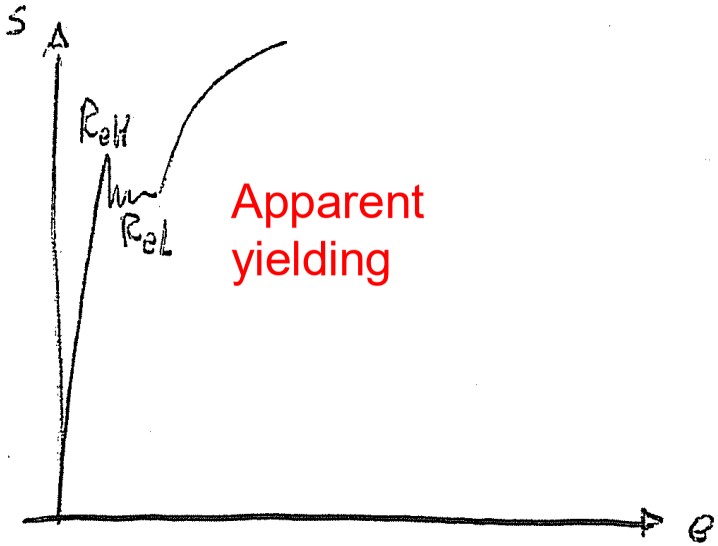


Flat grip

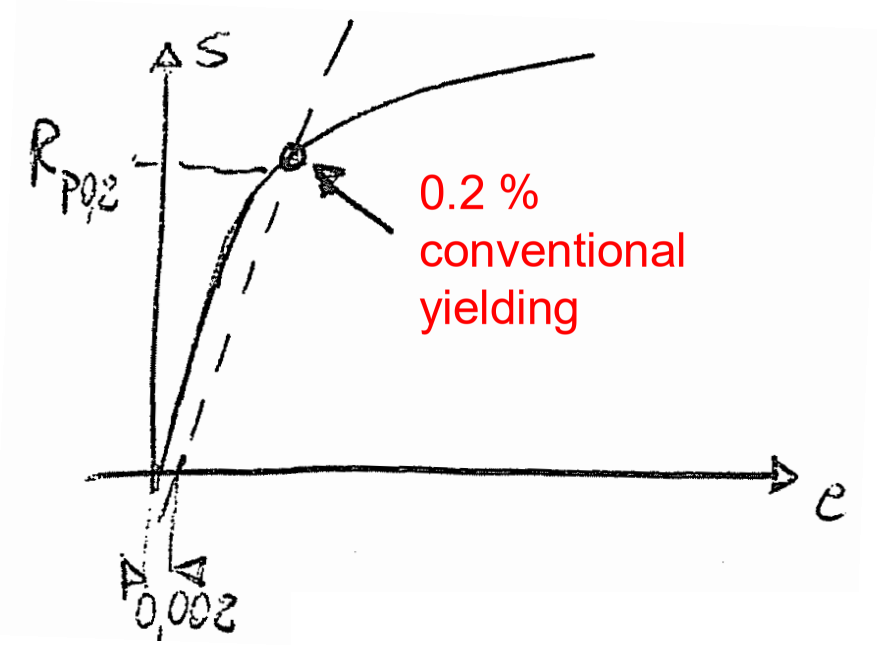


© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 79 di 384

Yielding



Apparent yielding



0.2 % conventional yielding

In metals, the elastic (reversibile strain) limit and the linear limit are almost the same

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 81 di 384

Elongation

Uniform elongation:

must be measured with an extensometer
is independent from the specimen geometry
is used in some standards, including Italian national standard for rebar steel

Fracture elongation:

can be measured after fracture
is the most commonly used measure of ductility

includes the elongation due to necking
for the latter reason, it depends on the initial lenght L_0
(if L_0 is greater, necking is comparatively less relevant, and the fracture elongation is smaller)

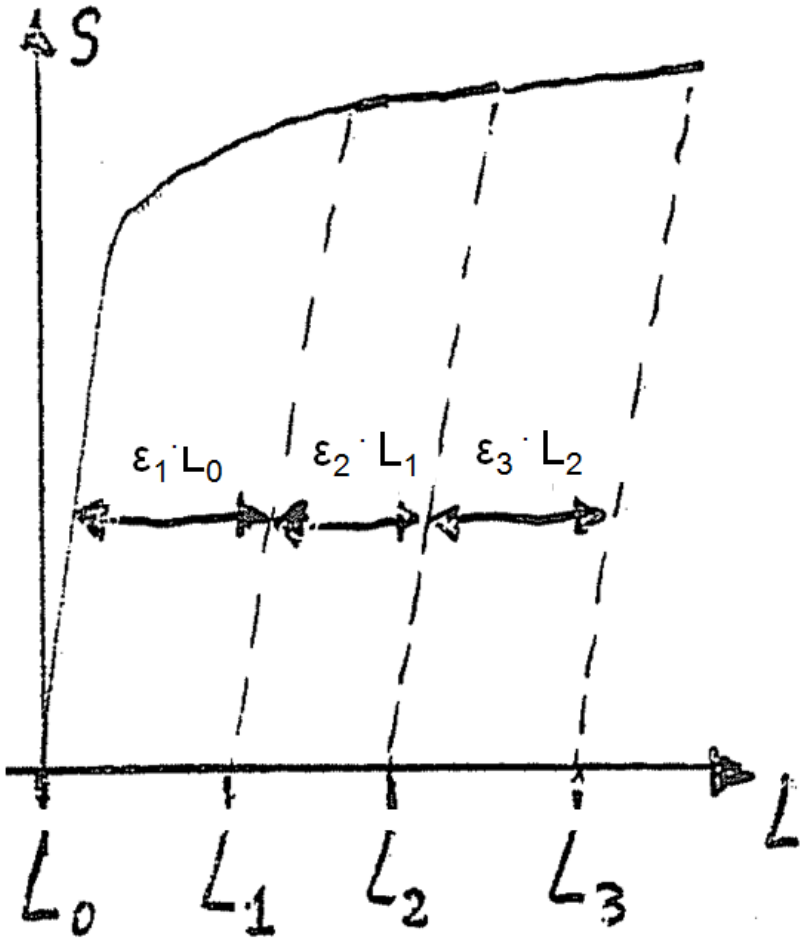
in European standards, for round specimens, standard values A_5 or A_{10} are measured with L_0 = 5 D or 10 D (D being the diameter)

in European standards, for other cross sections, A_5 is measured with $L_0 = 5.65 \sqrt{S_0}$

in other cases, standard values are measured over fixed L_0 .

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 83 di 384

True strain



$$L_0 \rightarrow L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3$$

$$\Delta\varepsilon_1 = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \qquad \Delta\varepsilon_2 = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \qquad \Delta\varepsilon_3 = \frac{L_3 - L_2}{L_2}$$

$$\varepsilon = \Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2 + \Delta\varepsilon_2 + \ldots$$

$$= \frac{L_1 - L_0}{L_0} + \frac{L_2 - L_1}{L_1} + \frac{L_3 - L_2}{L_2} + \ldots$$

$$= \int_{L_0}^{L} \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 85 di 384

Necking

During the test, the variation of the force, dF, is due to the variations of the cross section, dS, which is negative, and of the flow stress (or true stress), dσ, which is positive (due to the strain hardening) .

$$F = s \cdot S = \sigma \cdot S \qquad dF = \sigma\, dS + S\, d\sigma$$

Before the maximum load, the force increases because the increase of the flow stress prevails over the decrease of the cross section; after the maximum load, the opposite holds.

Before the maximum load, if a portion of the sample deforms more that the rest, it becomes stronger (because the increase of its flow stress more than compensates the reduction of its cross section); as a consequence, its deformation stops until the whole sample reaches the same strain level (i.e., the strain is homogeneous, or uniform).

After the maximum load, if a portion of the sample deforms more that the rest, it becomes weaker (because the increase of its flow stress cannot compensate the reduction of its cross section anymore); as a consequence, it deforms even more. Therefore, a macroscopic local deformation, or neck, is readily formed (i.e., a plastic instability occurs).

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 87 di 384

Books

Callister: chapters 7.6 and 7.7 (parts)

Campbell: chapter 7.3 (parts)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 89 di 384

Methods of strengthening:

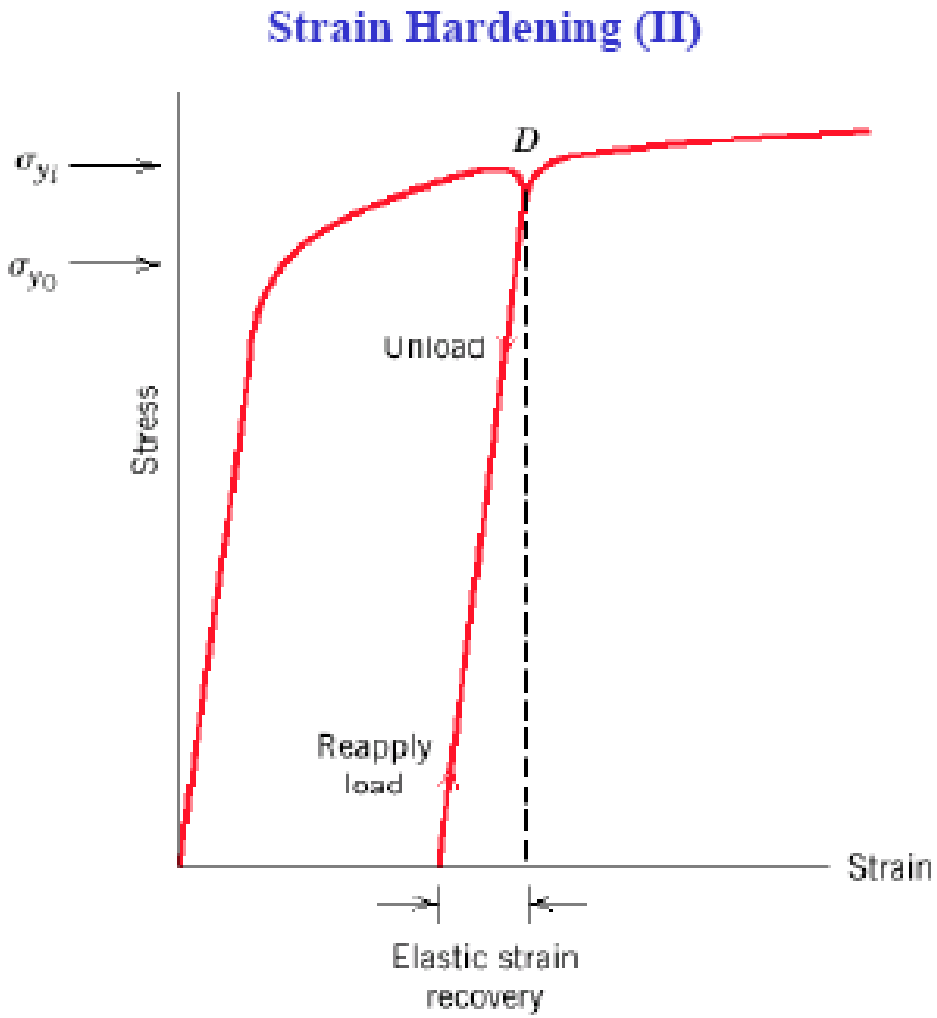
Dislocation move easily in undeformed pure metals => low yielding strength => need of strengthening

=> Strenghtening methods are generally based on the idea of making the dislocations movement more difficult.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 91 di 384

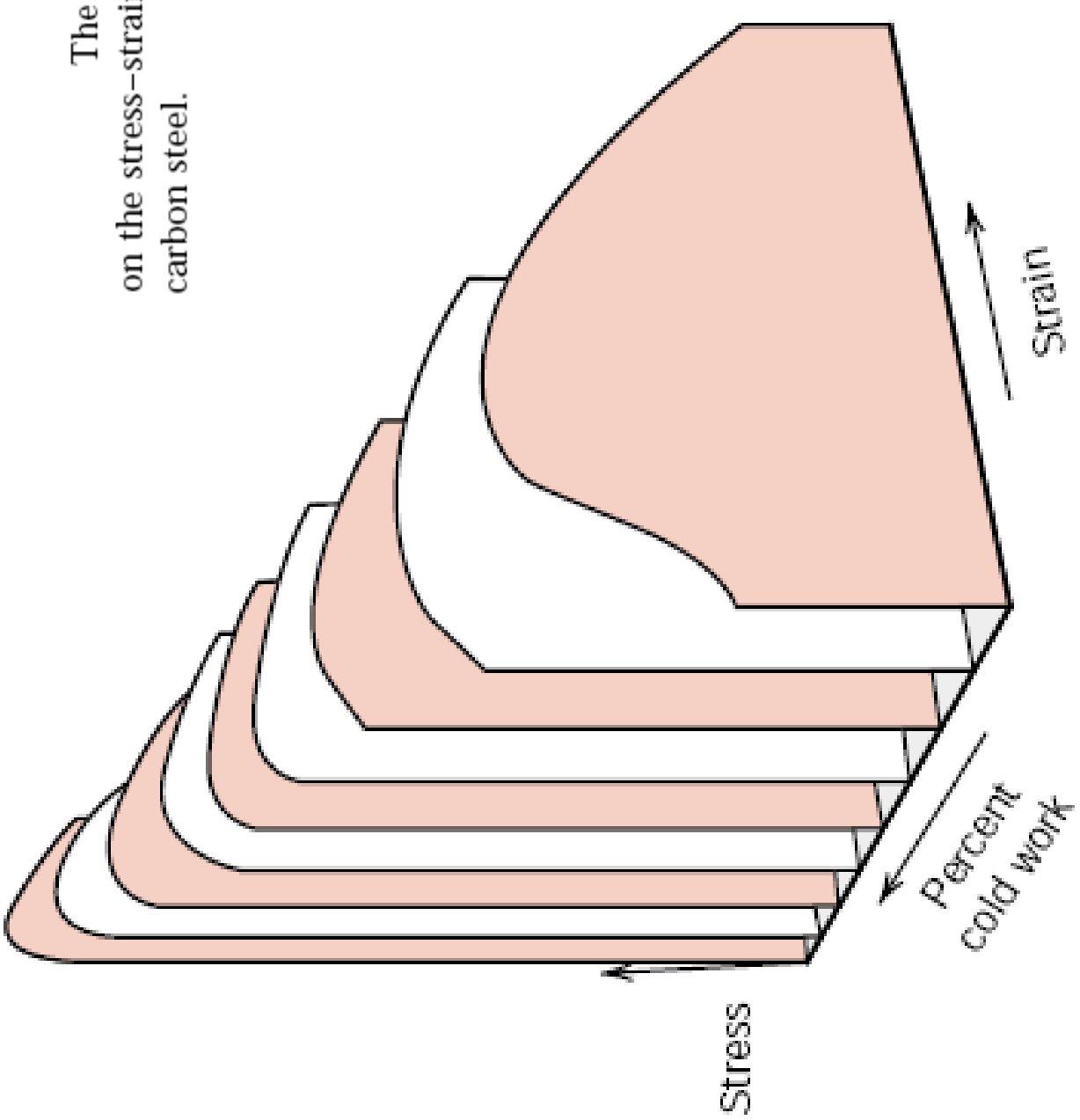
High dislocations density (strain hardening)

Dislocation density increases with plastic deformation and the motion of dislocation is hindered and stopped.



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 93 di 384

The influence of cold work on the stress–strain behavior for a low-carbon steel.



STRENGTHENING – I

solid solution

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 97 di 384