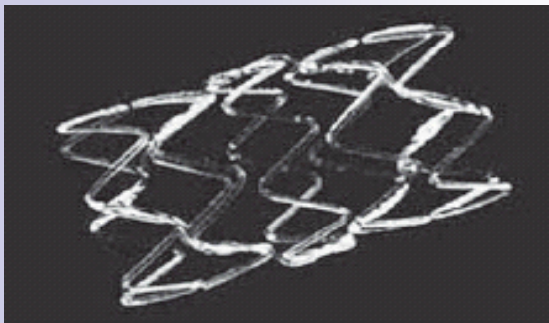




# ***Metallic Biomaterials***

بیومواد فلزی و کاربرد آن

زمستان ۱۳۸۸



***Winter 2010***



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

### ❖ نقص بلوری Imperfections in Solids:

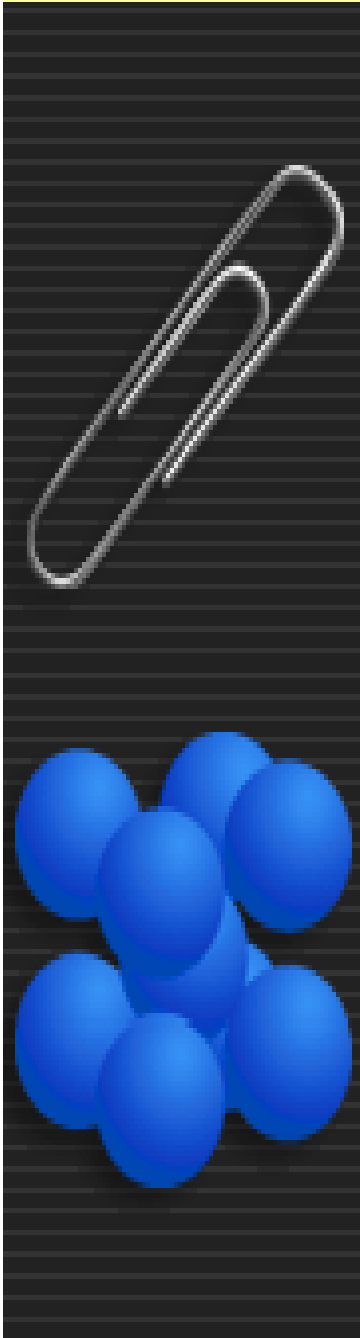
بطور کلی بلور با نظم و ترتیب کامل در آرایش اتمها وجود ندارد و تمام بلورها دارای تعداد زیادی نقص در ساختار بلوریشان می باشند

No crystal is totally, 100%, pure and perfect

➤ برخی از خواص مواد به حضور این نواقص در ساختار بلوری مربوط می باشند

### ➤ انواع نقص در بلورها

- نقص نقطه ای Point Defects: مربوط به موضع یک یا دو اتم
- نقص خطی Linear Defects (یک بعدی)
- نقص بین فازی Interfacial Defects (دو بعدی)



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

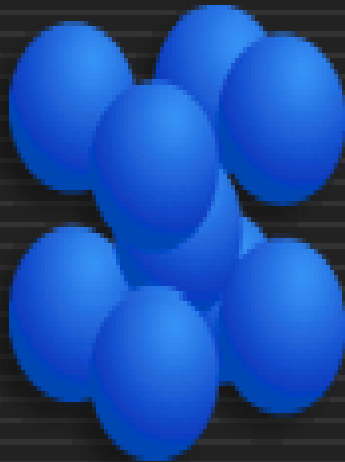
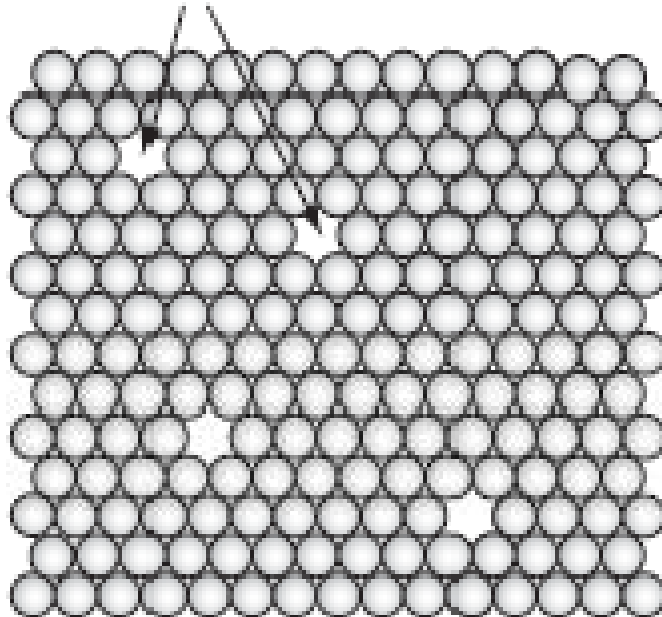
### ❖ نقص نقطه ای Point Defects:

- ساده ترین نقص بلوری که در آن فضای یک اتم خالی vacancy می باشد
- تعداد فضاهای خالی با افزایش دما افزایش می یابد (اکسیژننشیالی)

$$N_v = N \exp\left(-\frac{Q_v}{kT}\right)$$

**N** تعداد کل اتمها؛ **Q<sub>v</sub>** انرژی لازم برای تشکیل vacancy و **k** ضریب بولتزمن

Vacancies



# Chapter One:

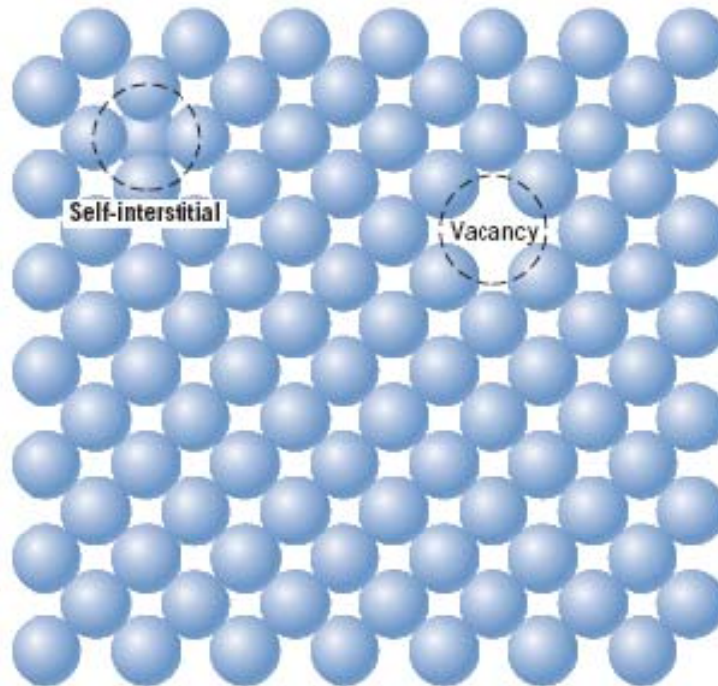
## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### ❖ نقص نقطه ای Point Defects:

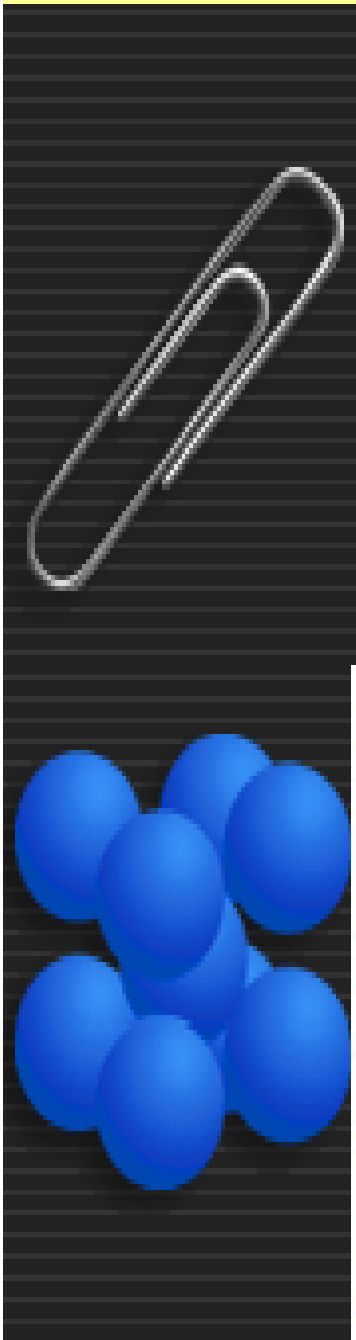
- ساده ترین نقص بلوری که در آن فضای یک اتم خالی vacancy می باشد
- تعداد فضاهای خالی با افزایش دما افزایش می یابد (اکسیپوننشالی)

$$N_v = N \exp\left(-\frac{Q_v}{kT}\right)$$

N تعداد کل اتمها؛  $Q_v$  انرژی لازم برای تشکیل vacancy و k ضریب بولتزمن



- Self-interstitial بین فضائی
- باعث انحراف شدید در شبکه اطراف میشود (اندازه بزرگتر از فضای موجود)
- به میزان بسیار کمتر از vacancy





# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

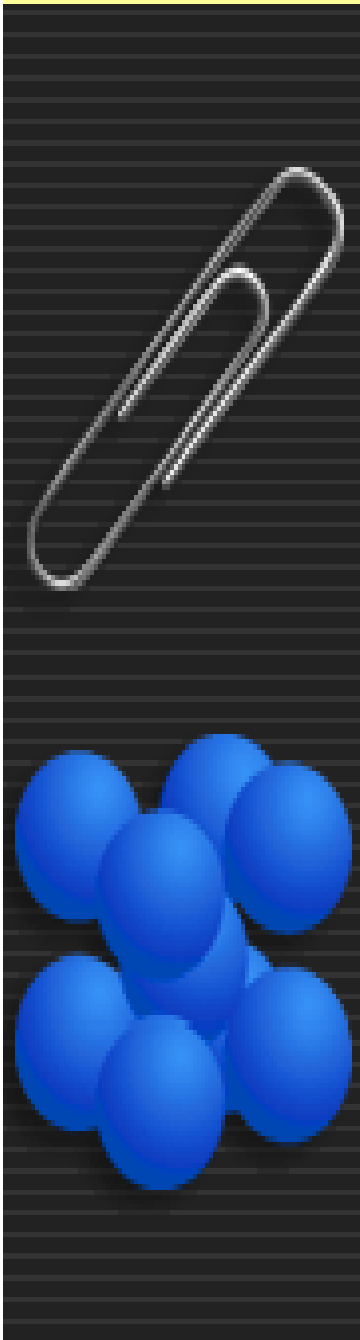
---

### :Point Defects ❖

#### Exercise:

۱- تعداد فضاهای خالی بر متر مکعب برای اتم مس در  $1000$  درجه سانتیگراد را محاسبه نمایید. انرژی لازم جهت تشکیل فضای خالی  $0.9 \text{ eV/atom}$  و وزن اتمی و دانسیته در دمای مورد نظربه ترتیب  $63.5 \text{ g/mol}$  و  $8.40 \text{ g/cm}^3$  می باشد

$$k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/atom K}$$



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

### ❖ ناخالصی در فلزات IMPURITIES IN METALS:

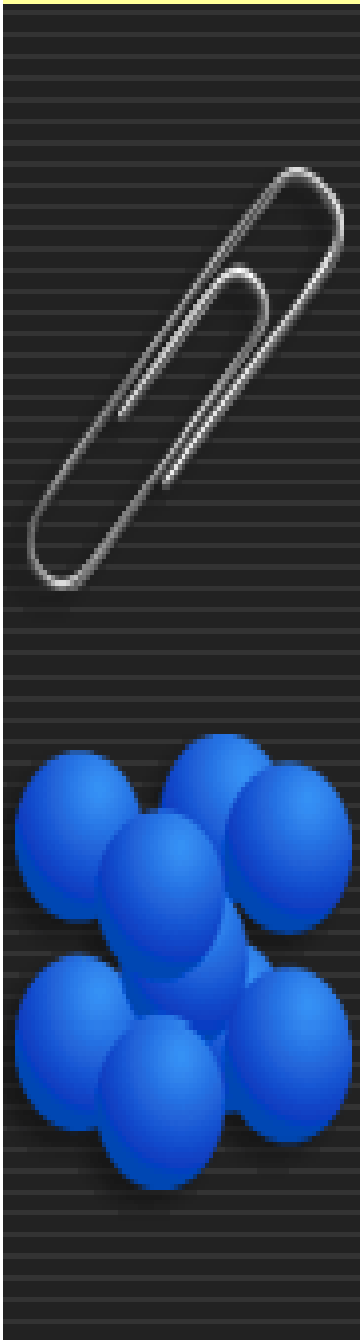
➤ خالص سازی فلز به نحوی که تنها یک نوع اتم در ساختار کریستالی حاضر باشد امکان پذیر نمی باشد

➤  $10^{22}$  Impurity atom/m<sup>3</sup> در ساختار فلز با خلوص 99.9999%

➤ افزایش ناخالصی intentionally جهت بهبود خواص نظیر استحکام و خوردگی

➤ محلول جامد Solid Solution با افزایش ناخالصی جهت تشکیل فاز دوم

➤ مقدار Concentration، نوع ناخالصی و دما



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### ❖ محلول جامد SOLID SOLUTIONS:

➤ دو نوع نقص نقطه ای در محلول جامد: جایگزینی و بینابینی

■ جایگزینی **Substitutional**: ناخالصی جایگزین اتم اصلی host می‌گردد

■ میزان حل شدن ناخالصی وابسته به عوامل زیر میباشد:

۱- سایز اتمی Atomic size: تفاوت شعاع اتمها کمتر از 15% lattice distortion

۲- ساختار کریستالی یکسان

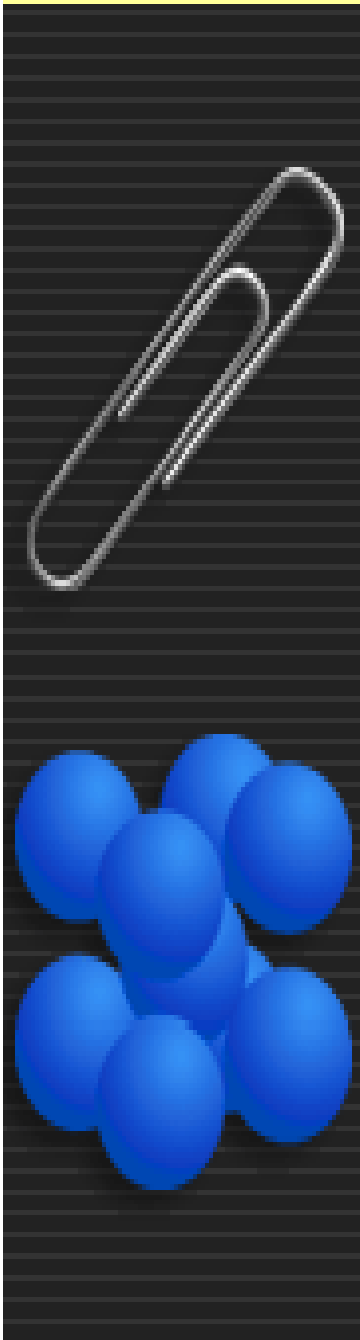
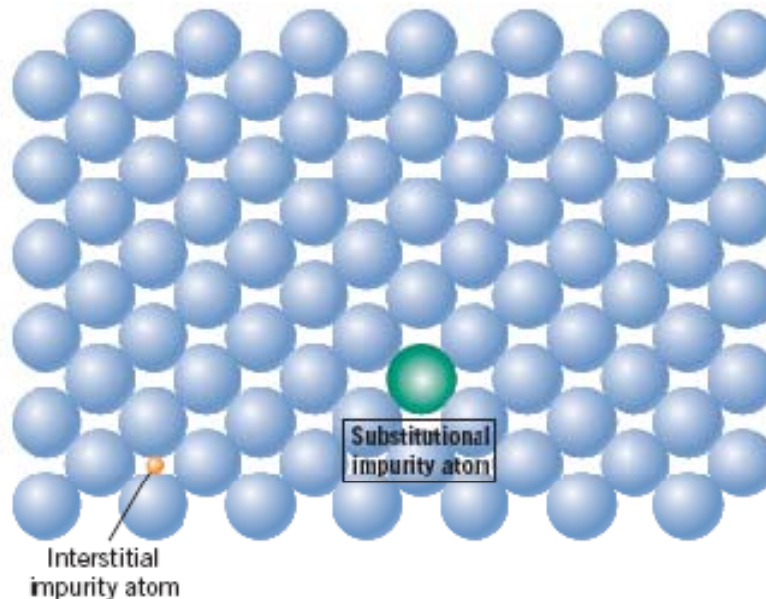
۳- الکترونگاتیوتی: اختلاف کمتر انحلال

بیشتر

۴- ظرفیت: ترجیحا اتم ناخالصی

با ظرفیت valence بالاتر بهتر حل

می‌گردد



# Chapter One:

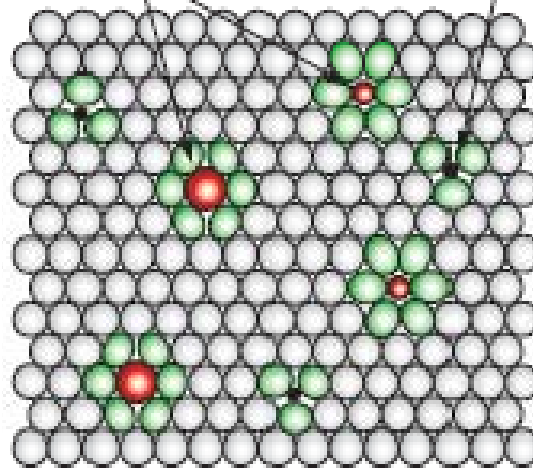
## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### ❖ محلول جامد SOLID SOLUTIONS:

➤ دو نوع نقص در محلول جامد: جایگزینی و بینابینی

■ مس و نیکل: شعاع اتمی 0.128 and 0.125 nm؛ ساختار FCC

الکترونگاتیوی 1.8 and 1.9؛ ظرفیت 1 در برابر 2  
Substitutional solute      Interstitial solute



### ■ بینابینی Interstitial:

○ اتم ناخالصی در فضاهای خالی void و یا مابین اتمهای فلز

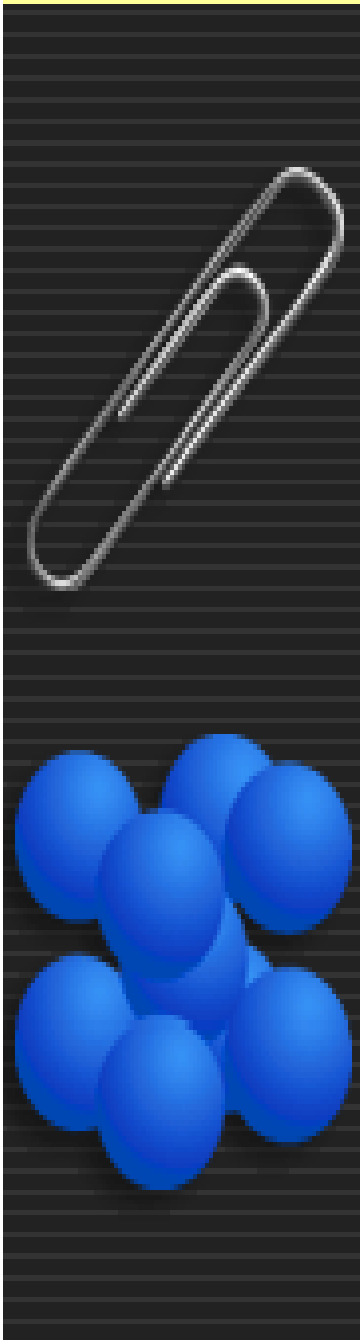
○ بدلیل فشردگی closed packed structure ساختار فلزات فضای بین اتمی کم

○ اتم ناخالصی کوچکتر از اتمهای host

○ Max میزان اتم ناخالصی interstitial کمتر از 10%

○ Max انحلال کربن در آهن در حدود 2% می باشد،

شعاع اتمی 0.071 (C) nm versus 0.124 nm (Fe)



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### :DISLOCATIONS- LINEAR DEFECTS ❖

➤ نابجایی Dislocation یک نوع نقص خطی یا یک بعدی است که در اطراف آن آرایش منظم اتمها جابجا می گردد misaligned

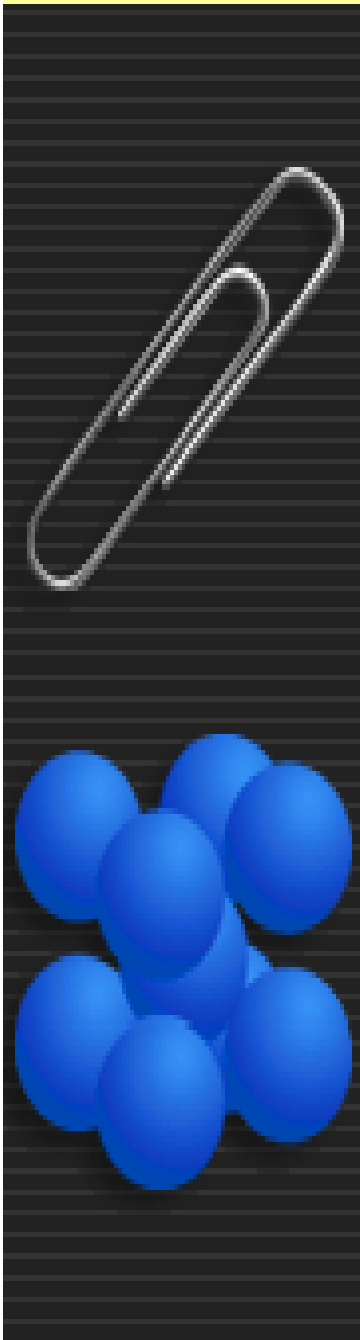
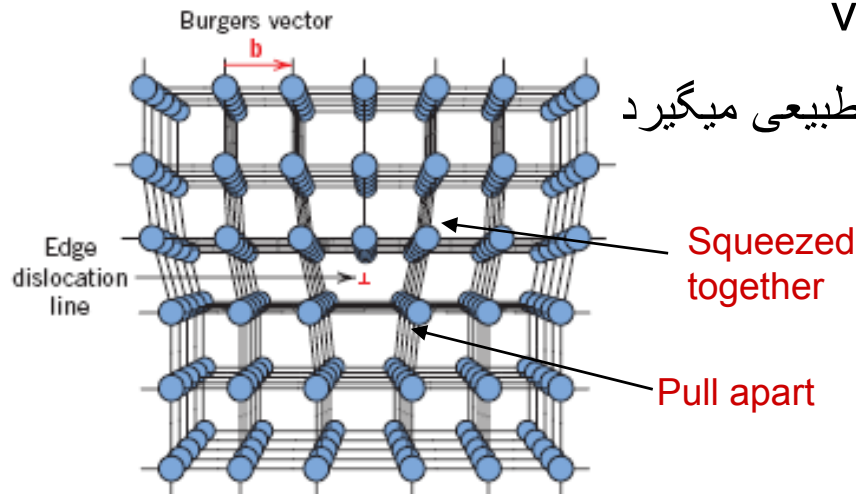
▪ جابجایی لبه ای Edge dislocation: بخشی از یک صفحه یا نیم صفحه در میان آرایش منظم اتمها قرار میگیرد

▪ dislocation line عمود بر صفحه و با علامت  $\perp$  نشان داده میشود

▪ Lattice distortion در اطراف خط جابجایی

▪ انحنا در صفحات عمودی vertical

▪ با افزایش فاصله شکل بلور حالت طبیعی میگیرد



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### :DISLOCATIONS- LINEAR DEFECTS ❖

#### :Screw dislocation ➤

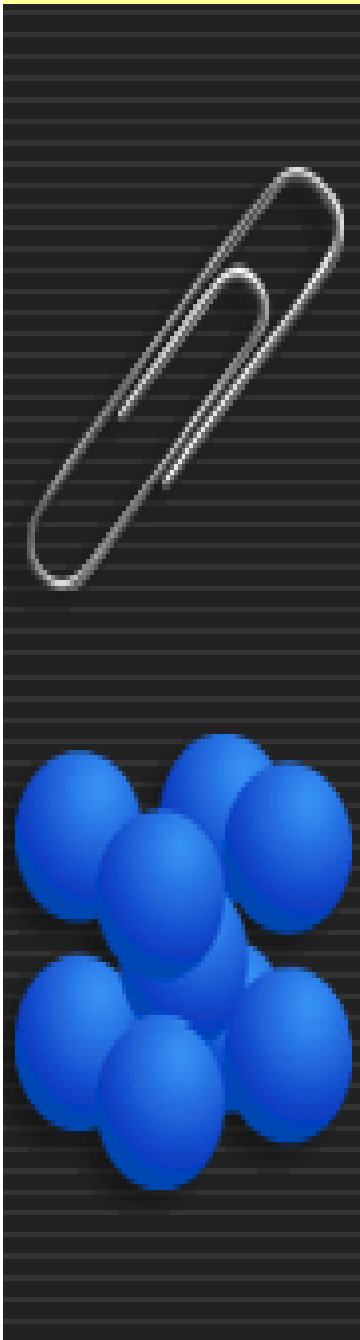
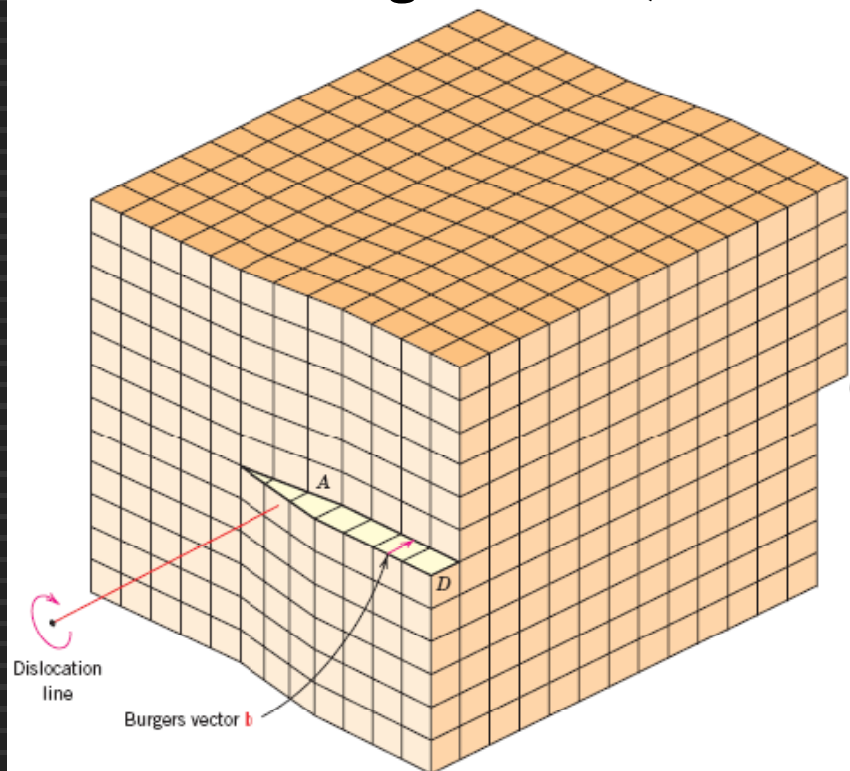
■ بوسیله Shear Stress ایجاد میگردد

■ جابجایی خطی در امتداد dislocation line یک فاصله اتمی

■ بوسیله علامت ↻

■ نام بر اساس انحراف اتمی اطراف

خط جابجایی helical path





# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

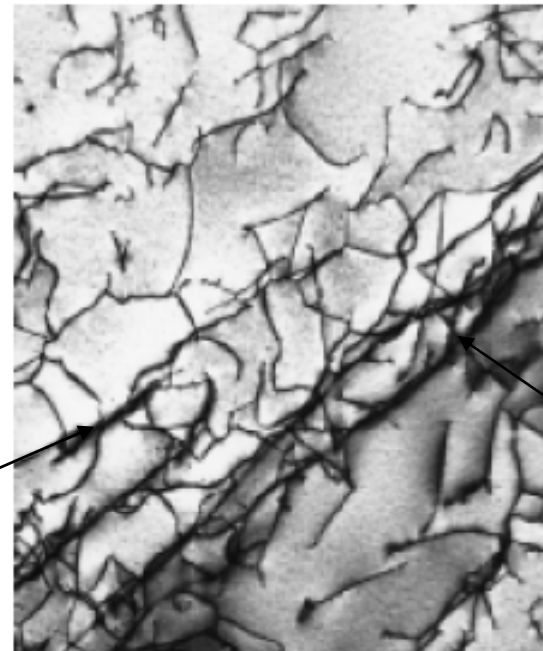
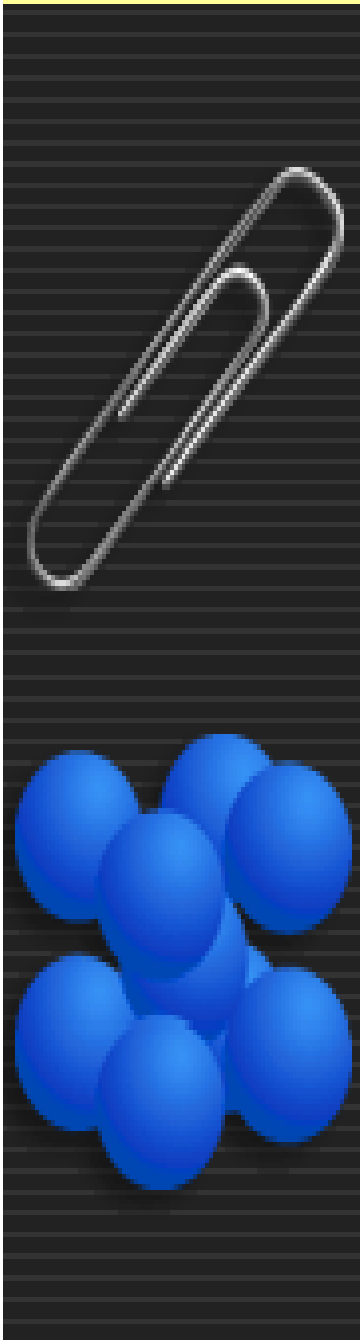
---

---

### :DISLOCATIONS- LINEAR DEFECTS ❖

➤ جابجایی به وسیله تکنیکهای میکروسکوپی نظیر TEM قابل مشاهده می باشد

■ Dislocations در طی فرایندهای انجماد Solidification، تغییر شکل پلاستیکی Plastic Deformation، و شوک ناشی از عملیات حرارتی rapid cooling



**Dislocations**



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

### ❖ نقص فصل مشترک :INTERFACIAL DEFECTS

➤ نواحی مرزی دوبعدی بوده و فازهای مختلف Crystal structures و یا جهت‌های کریستالوگرافی Crystallographic orientation را از یکدیگر جدا میکند

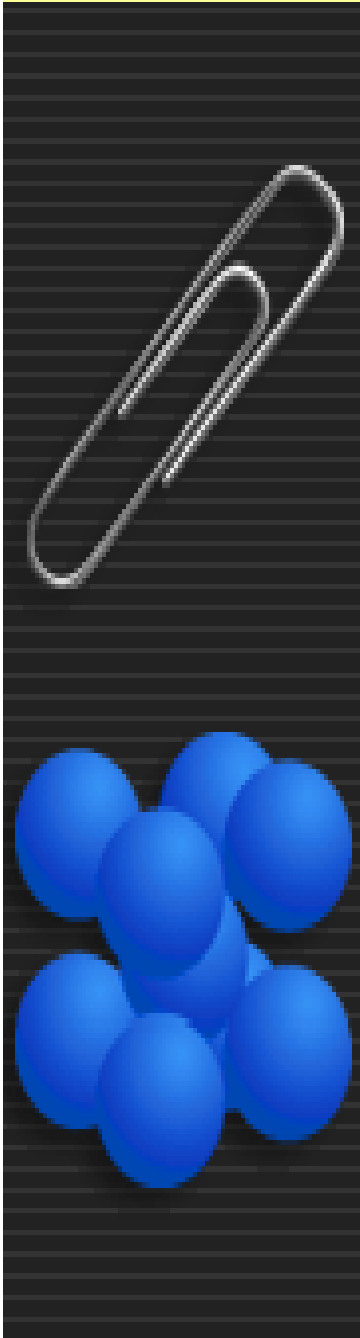
▪ Interfacial imperfections are included:

External surfaces, Grain boundaries, Twin boundaries,  
Stacking faults, and Phase boundaries

### ➤ :EXTERNAL SURFACES

- سطح خارجی surface atoms محل به پایان رسیدن ساختمان بلوری فلز
- اتمهای سطحی اشباع نشده و در سطح بالاتر انرژی not bonded to the max number of neighboring atoms
- تمایل به کاهش انرژی سطحی (کاهش سطح-قطره آب)

Minimize the surface area



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

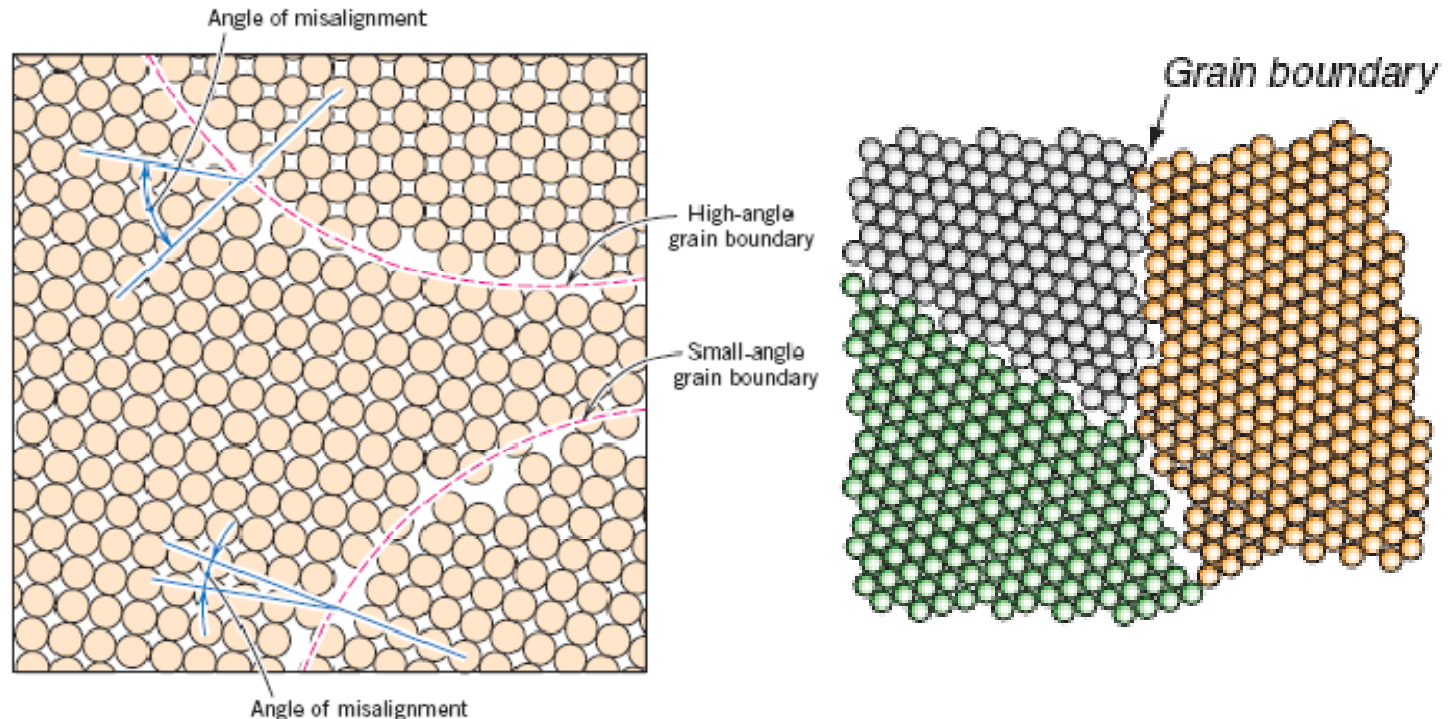
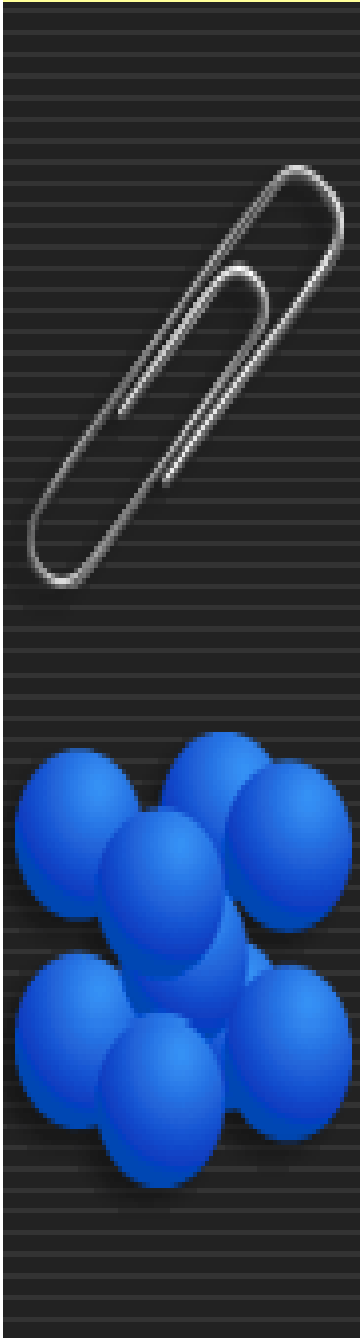
### ❖ نقص فصل مشترک :INTERFACIAL DEFECTS

#### ➤ :GRAIN BOUNDARIES

جدا کننده دو کریستال Grain با جهت بلوری متفاوت crystallographic Orientations

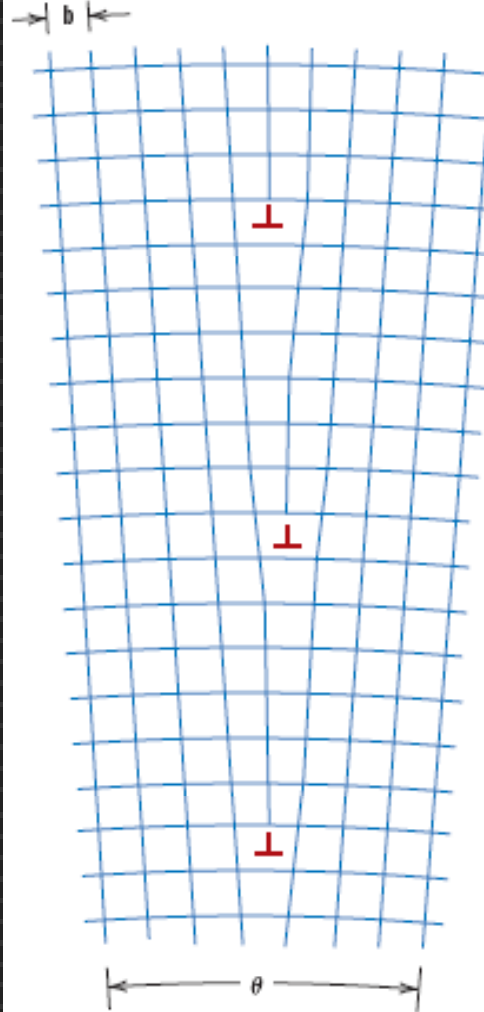
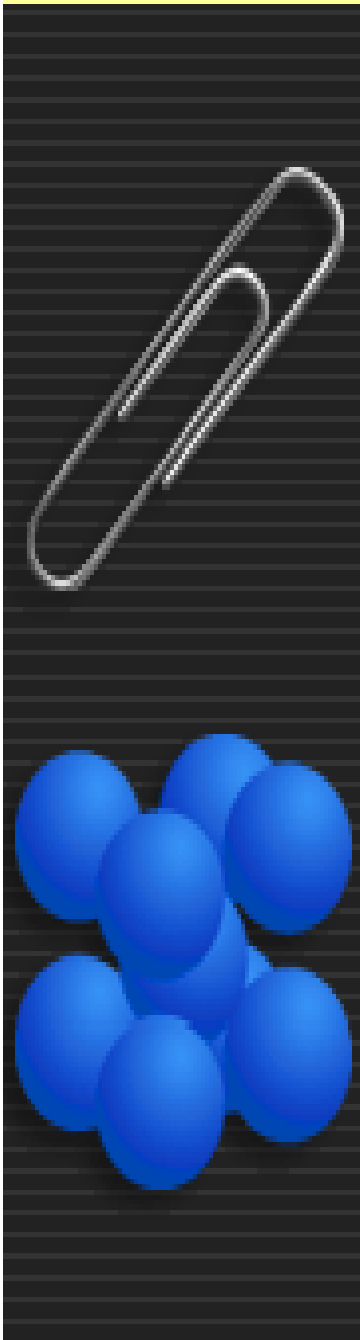
➤ در ناحیه مرز دانه از یک دانه به کریستال مجاور از نظر آرایش اتمی ناهماهنگی مشاهده می گردد Atomic mismatch

➤ Low (small) angle & High angle grain boundaries



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures



**:INTERFACIAL DEFECTS ❖**

**:GRAIN BOUNDARIES ➤**

➤ **Low (small) angle** در اثر جابجایی لبه ای ایجاد میگردد

***Tilt Boundary***

➤ **بدلیل بی قاعدگی در ساختار** آنها در مرز دانه انرژی بالاتر

atoms are bonded **less regularly** like **surface atoms**

➤ **اندازه این انرژی وابسته به** Degree of

**misorientation**

(**high-angle boundaries** بالاتر در خصوص)

➤ **مرز دانه ها از نظر شیمیایی** فعالیتراز دانه

➤ **بدلیل انرژی بالاتر** تجمع ناخالصی ها **segregate**

# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

❖ نقص فصل مشترک INTERFACIAL DEFECTS:

➤ GRAIN BOUNDARIES

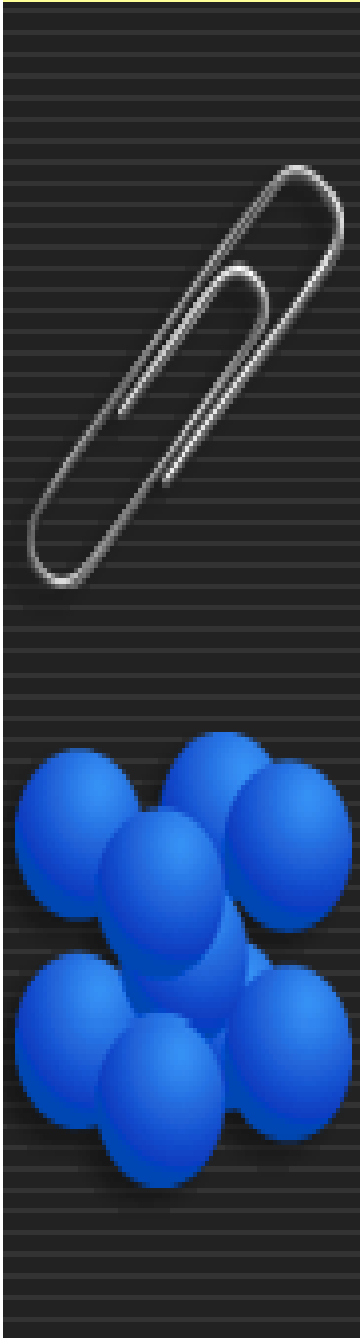
➤ انرژی فصل مشترک interfacial energy در دانه های بزرگ-coarse-grained materials کمتر از fine-grained (فصل مشترک Boundary area)

➤ رشد دانه در دمای بالاتر جهت کاهش مرز دانه ها Grain Growth

➤ Stacking fault: در بلور فلزات FCC و اختلال در ترتیب *ABCABCABC*

➤ Phase Boundaries: در فلزات دارای چند فاز و تغییر خواص فیزیکی و یا

شیمیایی فازها



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

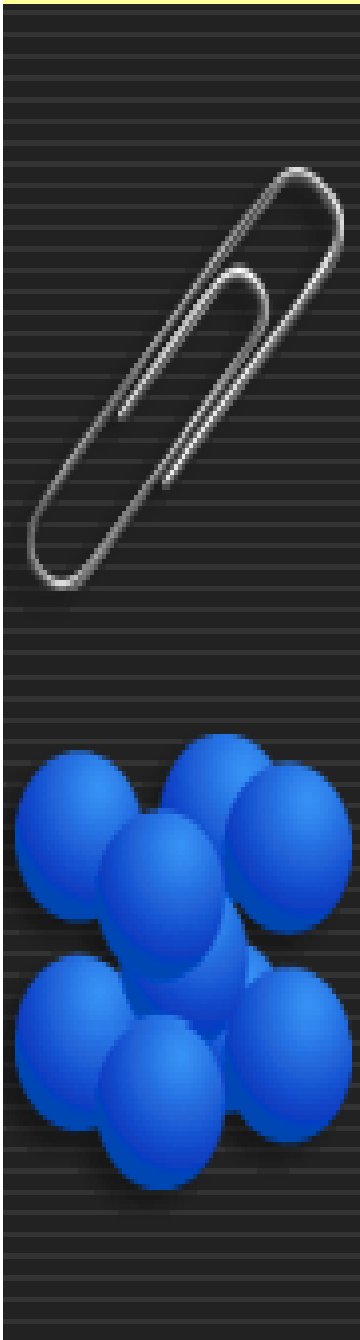
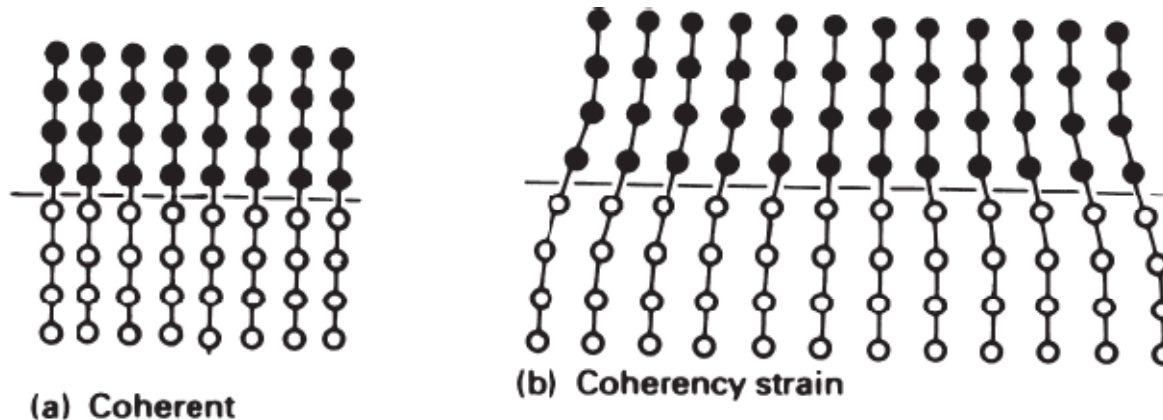
### PHASE BOUNDARIES ➤

➤ در صورتی که میزان فلز حل شده در حد مشخصی باشد فلز یک فاز به دو فاز تفکیک Split می گردد که بوسیله **Phase Boundaries** از هم متمایز می گردند

- دو فاز same crystal structure but different chemical composition
- crystals match up at boundaries (Coherent)

➤ Low energy (typically  $0.05 \text{ J m}^{-2}$ )

- در صورتی که Two crystals have slightly different lattice spacing, boundary is still coherent but has some strain (and more energy)



# Chapter One:

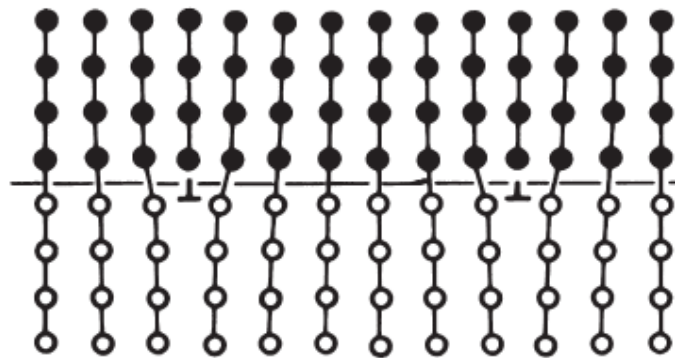
## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### PHASE BOUNDARIES ➤

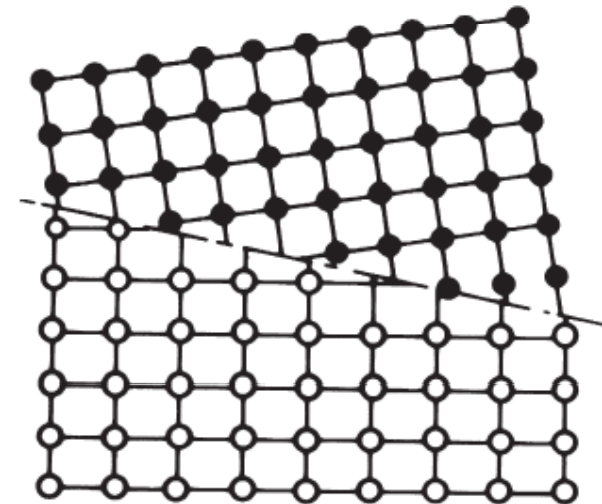
In presence of small particles of second phase and their ■ در زمانی که growth strain builds up till injection of dislocation (semi-coherent )

Two phases which meet at the boundary are large, and differ in ■ both chemical composition *and* crystal structure (*incoherent*)

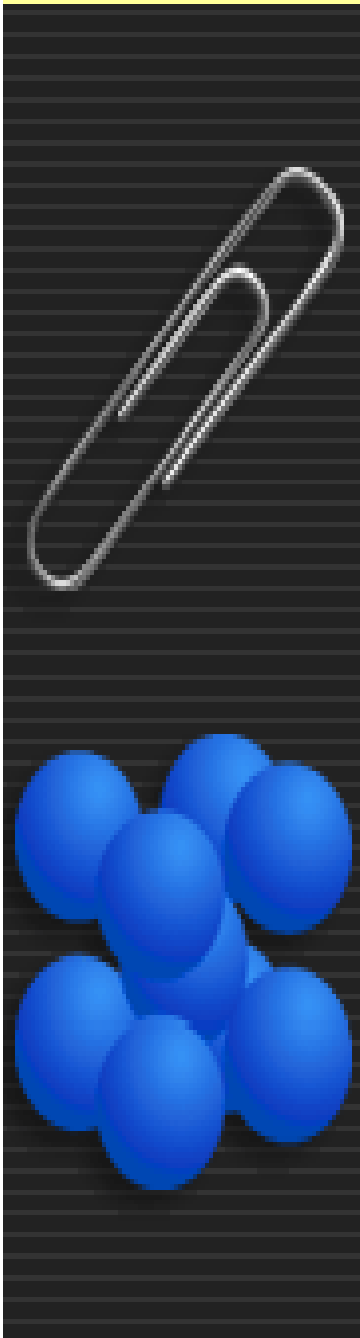
➤ high energy - around  $0.5 \text{ J m}^{-2}$



(c) Semi-coherent



(d) Incoherent



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### ❖ نقص فصل مشترک :INTERFACIAL DEFECTS

#### ➤ TWIN BOUNDARIES

➤ نوع خاصی از مرزدانه که در اطراف آن اتمها تقارن آینه ای نشان می دهند

➤ The region of materials between these boundaries called **TWIN**

▪ **Mechanical Twin**: در اثر جابجایی اتمها در تحت تاثیر نیروهای وارده مکانیکی mechanical shear forces

▪ **Annealing Twin**: در اثر تغییر شکل در عملیات حرارتی Heat Treatment

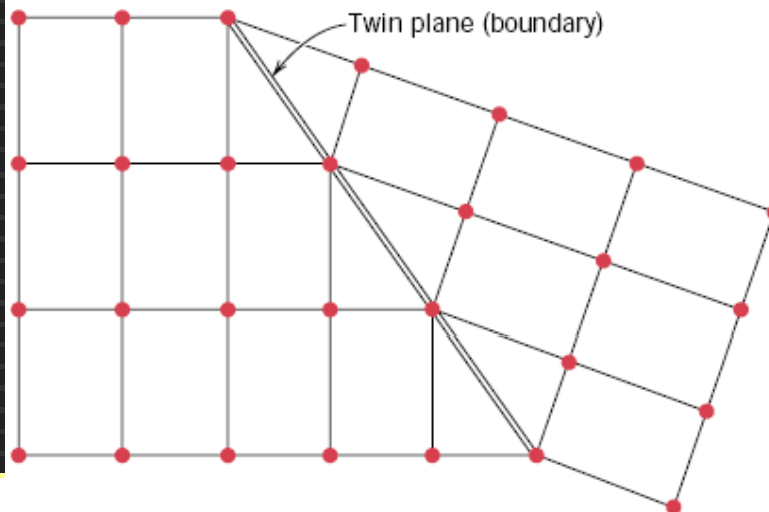
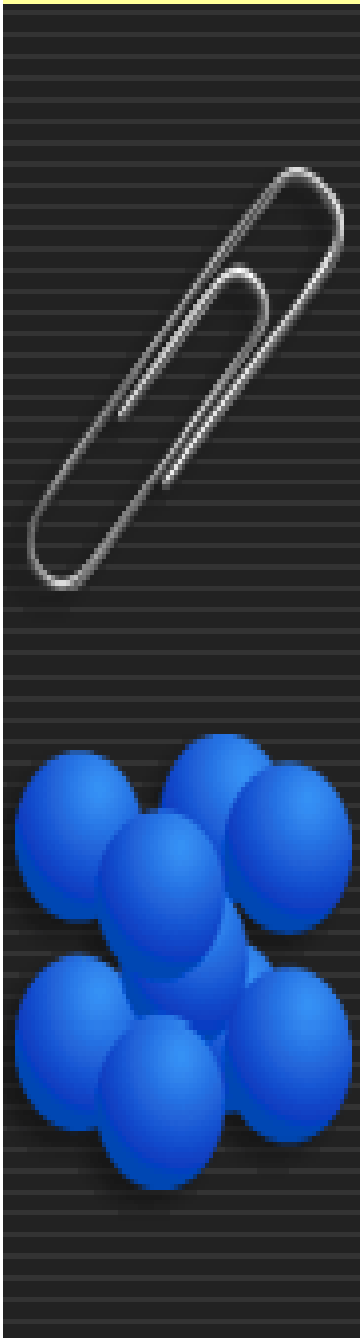
▪ **Twining**: بلوری صفحات کریستالی خاص و در جهت خاص تشکیل میگردد بسته به ساختار بلوری Crystal Structure

Definite crystallographic Plane

Specific Direction

➤ FCC در Annealing Twin

➤ HCP و BCC در Mechanical Twin



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

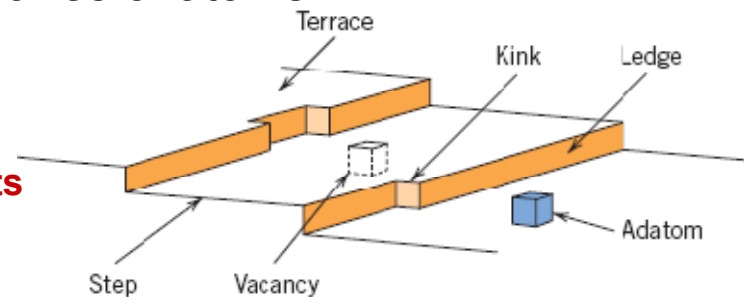
---

---

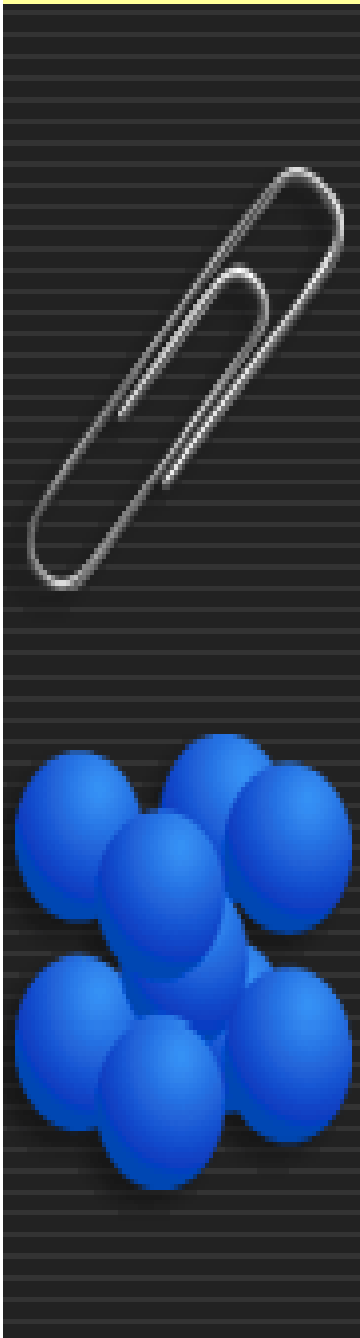
### :Catalysts (and Surface Defects) ❖

- A *catalyst* is a substance that speeds up the rate of a chemical reaction without participating in the reaction itself
- Solid catalysts adsorb liquid or gas on the surface and by the interactions promote the rate of reaction
- Adsorption sites on a catalyst are normally surface defects associated with planes of atoms

**Schematic of several types of surface defects**



- Converters on automobiles, which reduce the emission of exhaust gas pollutants such as (CO), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and unburned hydrocarbons
  - NO dissociate to N and O form N<sub>2</sub>
  - CO oxidized to CO<sub>2</sub> and Hydrocarbons are oxidized to H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>





# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

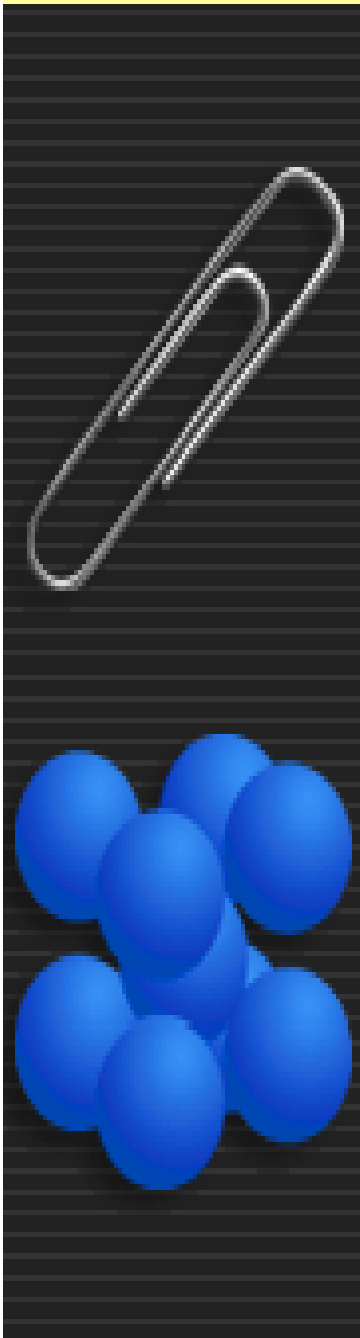
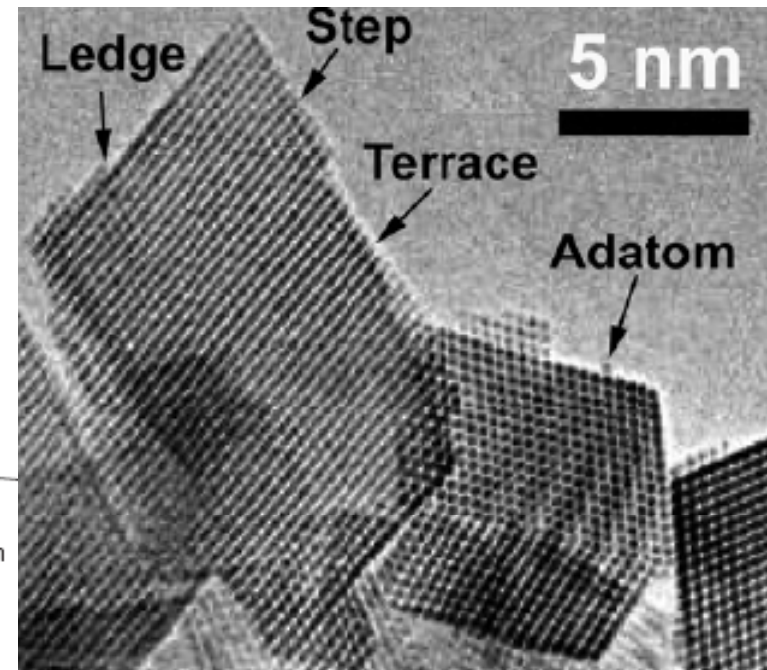
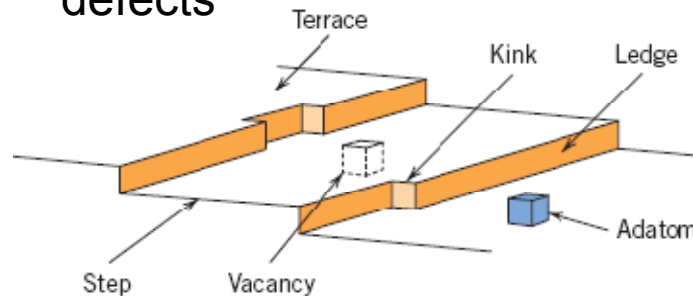
---

### :Catalysts (and Surface Defects) ❖

- $(\text{Ce}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})\text{O}_2$  is used in this application
- These surface defects act as adsorption sites for the atomic and molecular species (CO, NO<sub>x</sub>, and unburned hydrocarbons)
- Dissociation, combination, and oxidation reactions involving these species are facilitated and pollution are reduced

#### High resolution TEM

Several single crystals showing individual atoms and defects



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### :Microscopic Examination ❖

➤ بدلیل تاثیر structural elements بروی خواص مواد بررسی آنها حائز اهمیت می باشد

➤ Grain Structure درخصوص polycrystalline metals

➤ Macroscopic grain in Aluminum streetlights posts

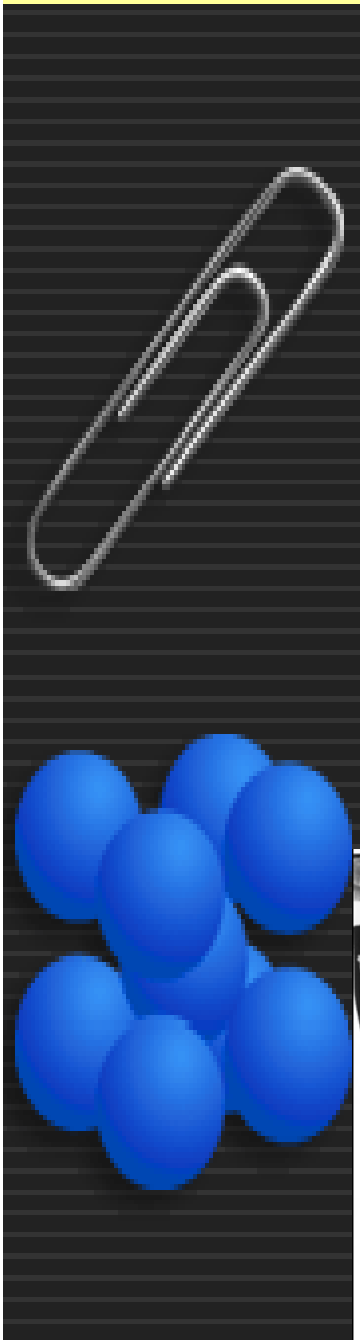
➤ اکثر فلزات دارای microscopic dimension in  $\mu\text{m}$  بوده جهت بررسی نیاز به microscope دارند

➤ Microstructure: Grain size and shape

➤ Optical, electron, and scanning probe microscopes are commonly used in **microscopy**.

➤ The photograph on which the image is recorded called a **photomicrograph**  
Many microstructural images are computer generated and/or enhanced.

Large grains having different textures



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

### :Microscopic Techniques ❖

#### Optical Microscopy ➤

Light microscope is used for microstructure study ➤

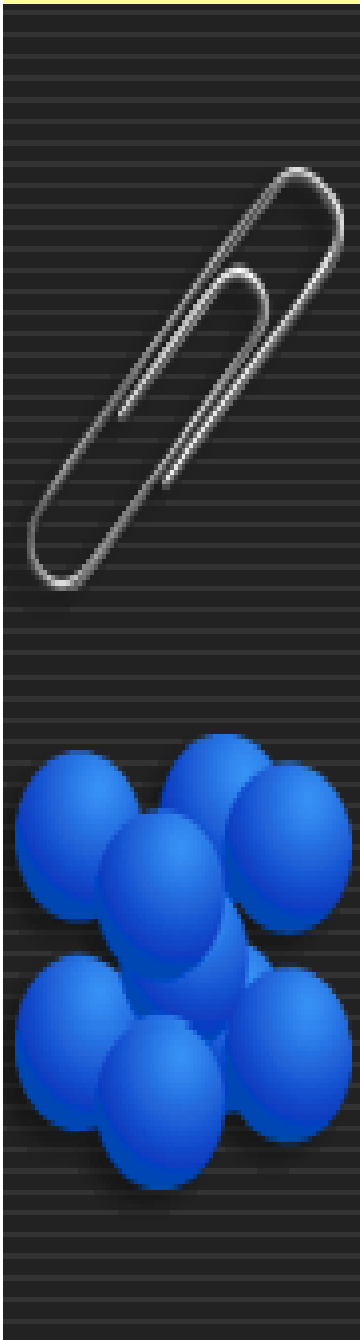
➤ برای فلزات reflecting mode و بر اساس contrast ناشی از تفاوت در reflectivity بخشهای مختلف در microstructure تصویر شکل می گیرد

Metallography: Careful and special surface preparation ➤

Grounding and Polishing ➤

Mirror polish by successive smoother (finer) abrasive ➤

Microstructure revealed by using appropriate chemical ➤  
reagent in a procedure called **etching**



# Chapter One:

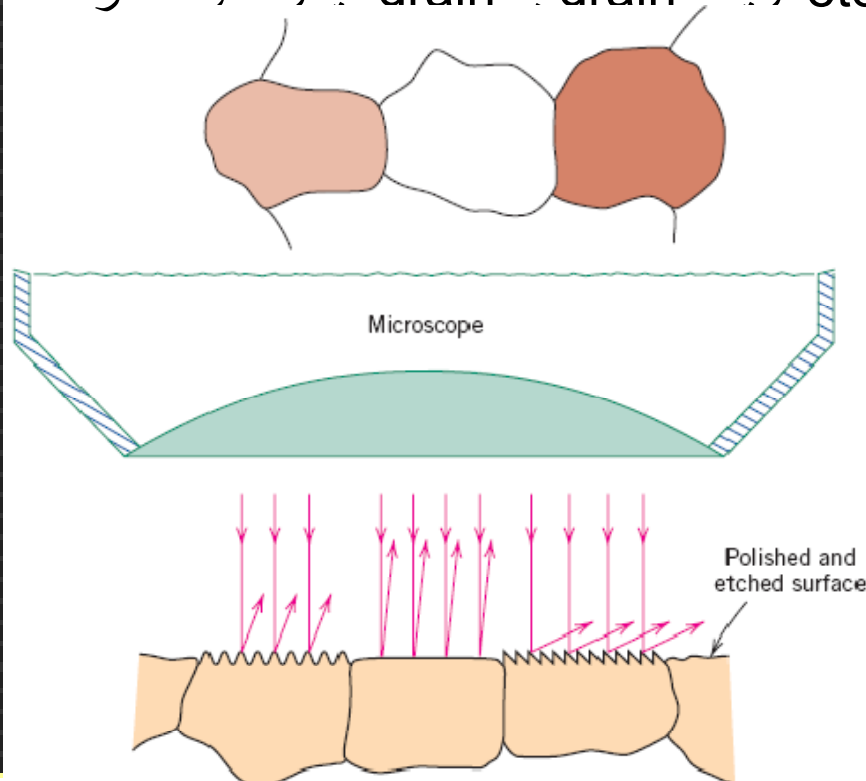
## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### :Microscopic Techniques ❖

#### Optical Microscopy ➤

The **chemical reactivity** of the grains of some single-phase materials depends on crystallographic orientation

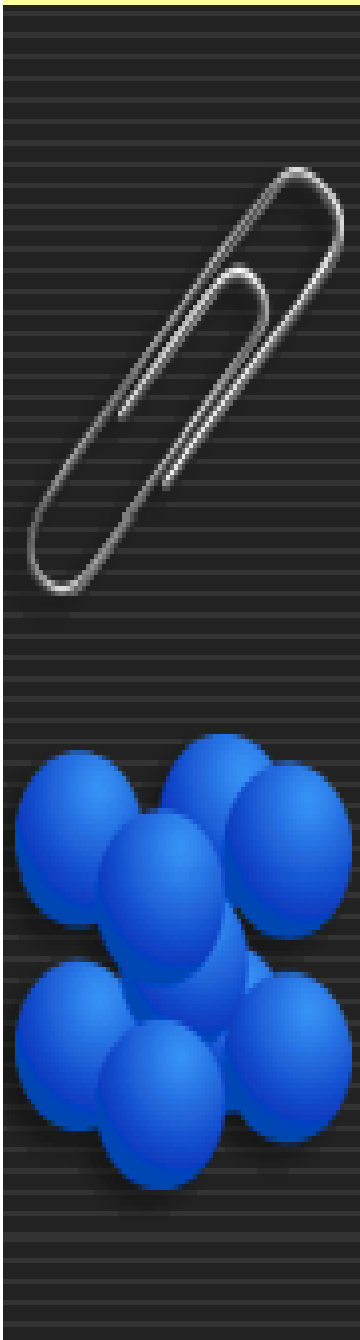
نتیجتا etching characteristics از یک grain به grain دیگر تفاوت دارد ➤



Difference in orientation cause different reflection



Photomicrograph of Brass Alloy



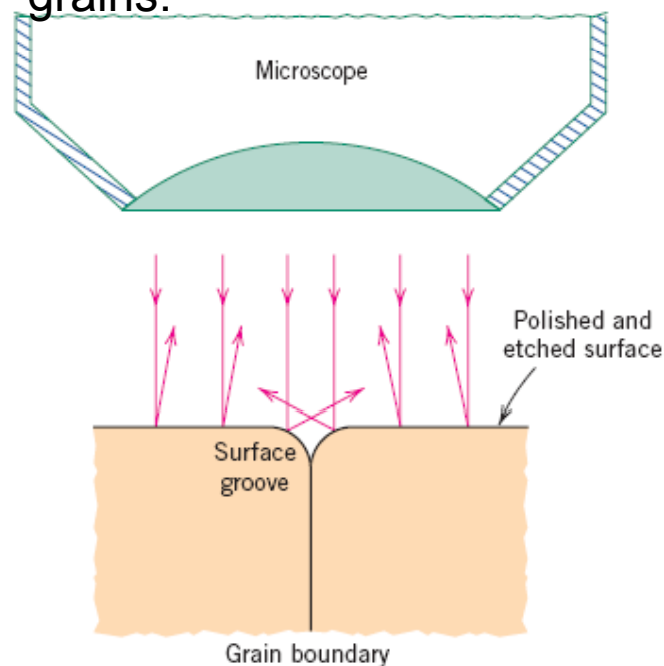
# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

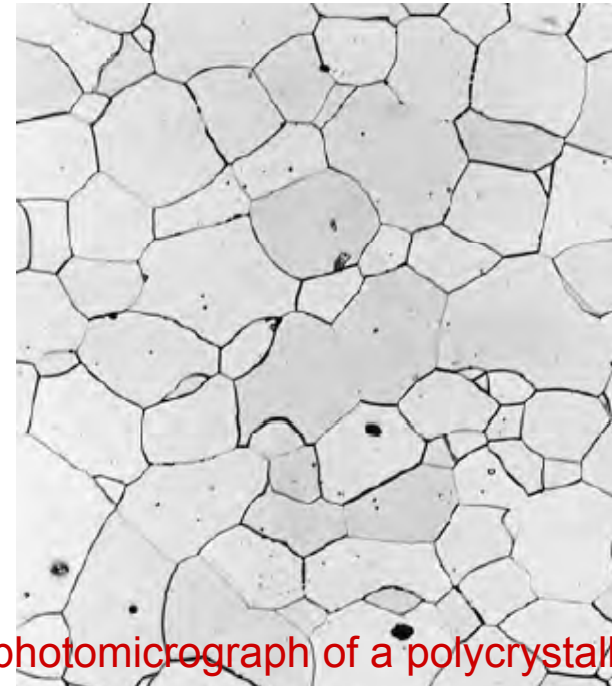
### :Microscopic Techniques ❖

#### Optical Microscopy ➤

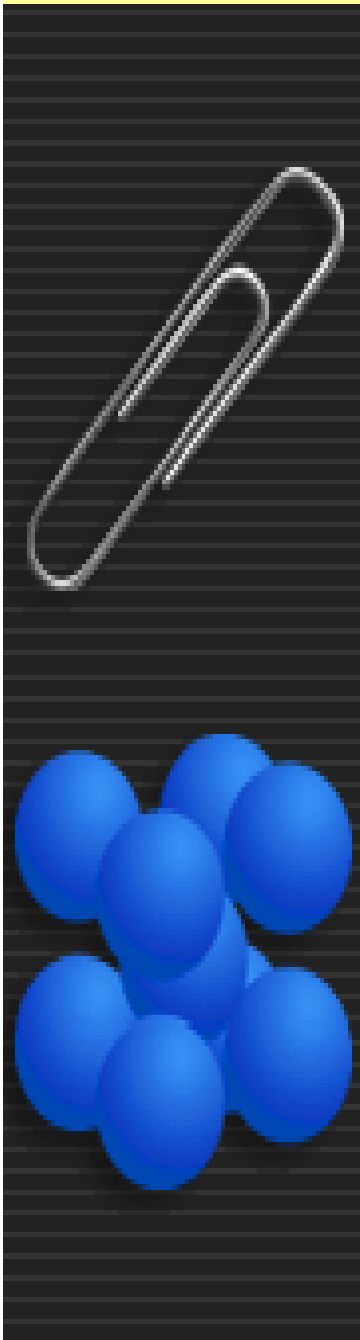
- Small grooves form along grain boundaries as a consequence of etching
- Atoms along grain boundary regions are more chemically active, they dissolve at a greater rate than those within the grains.



Grain boundaries reflect light at an angle different from the grains themselves



photomicrograph of a polycrystalline specimen in which the grain boundary grooves are clearly visible as dark lines



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

### :Microscopic Techniques ❖

#### Electron Microscopy ➤

Optical microscope is **2000 times** بزرگنمایی ➤

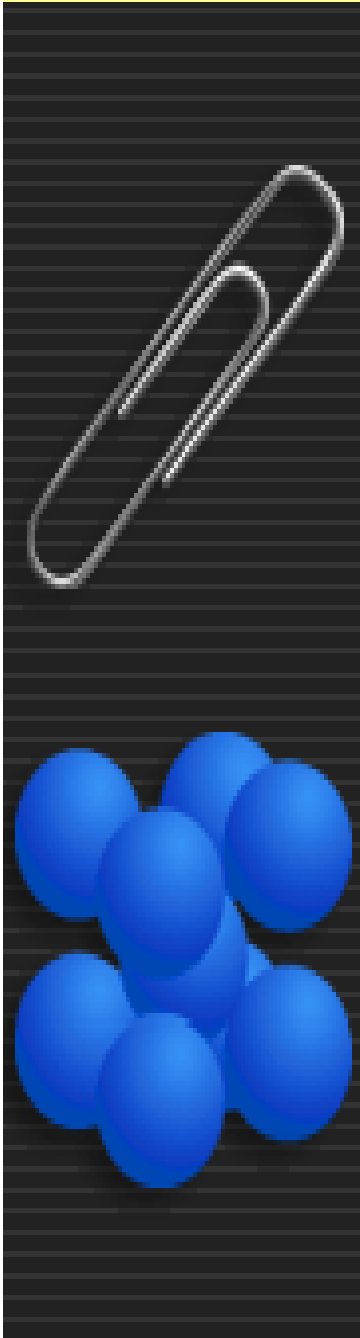
برای Fine structural elements از electron microscope استفاده می شود که ➤

از electron beam به جای light استفاده می شود

➤ Across large voltages, electrons can be made to have wavelengths on the order of 0.003 nm (3 pm). High magnifications and resolving powers of these microscopes are consequences of the short wavelengths of electron beams.

➤ The electron beam is focused and the image formed with magnetic lenses; otherwise the geometry of the microscope components is essentially the same as with optical systems.

➤ Both transmission and reflection beam modes of operation are possible for electron microscopes.



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

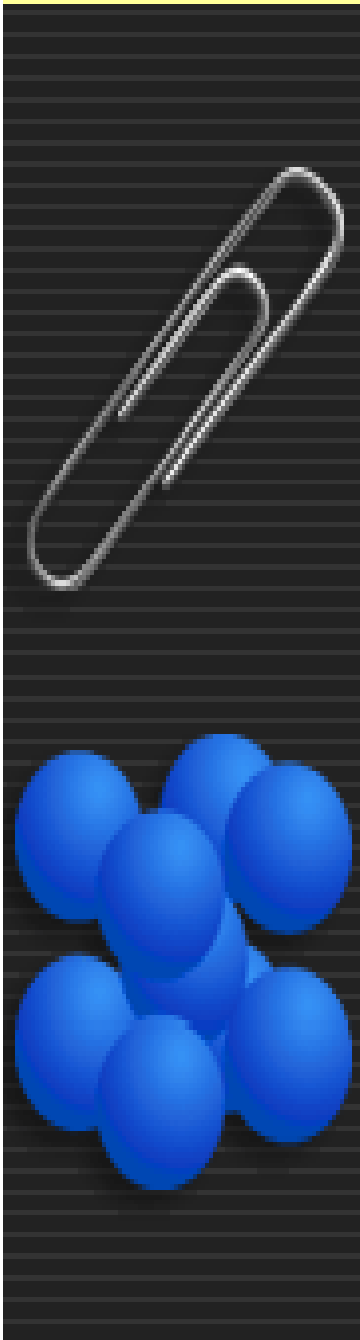
---

### :Microscopic Techniques ❖

#### Electron Microscopy ➤

#### *Transmission Electron Microscopy (TEM)* ■

- The electron beam passes through the specimen
- Contrasts in the image are produced by differences in beam scattering or diffraction produced between various elements of the microstructure or defect
- Solid materials are highly absorptive to electron beams, samples must be prepared in the form of a very thin foil
- Magnifications approaching are possible with TEM, which is utilized in the study of dislocations



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

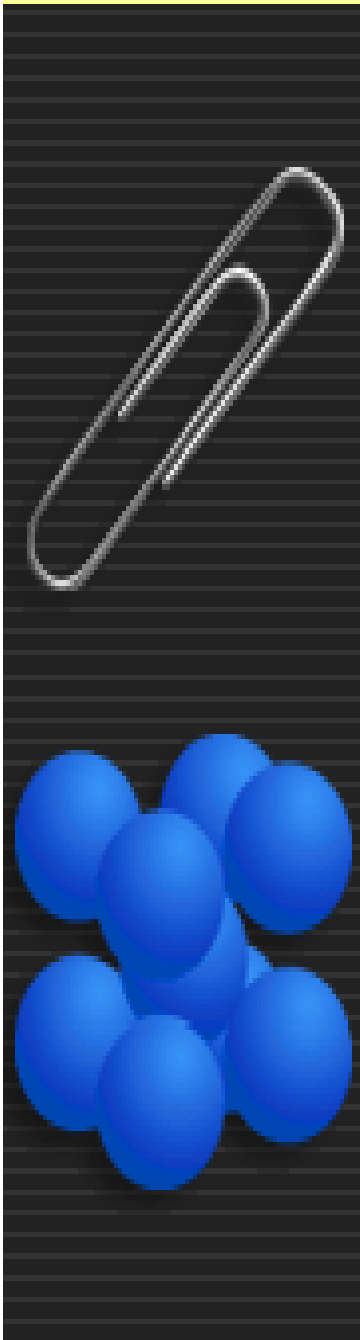
---

### :Microscopic Techniques ❖

#### Electron Microscopy ▶

#### *Scanning Electron Microscopy (SEM) ■*

- The surface of a specimen to be examined is scanned with an electron beam, and the reflected (or back-scattered) beam of electrons is collected
- The surface may or may not be polished and etched
- Magnifications ranging from **10 to 50,000** times are possible
- Accessory equipment permits qualitative and semi-quantitative analysis of the elemental composition of very localized surface areas



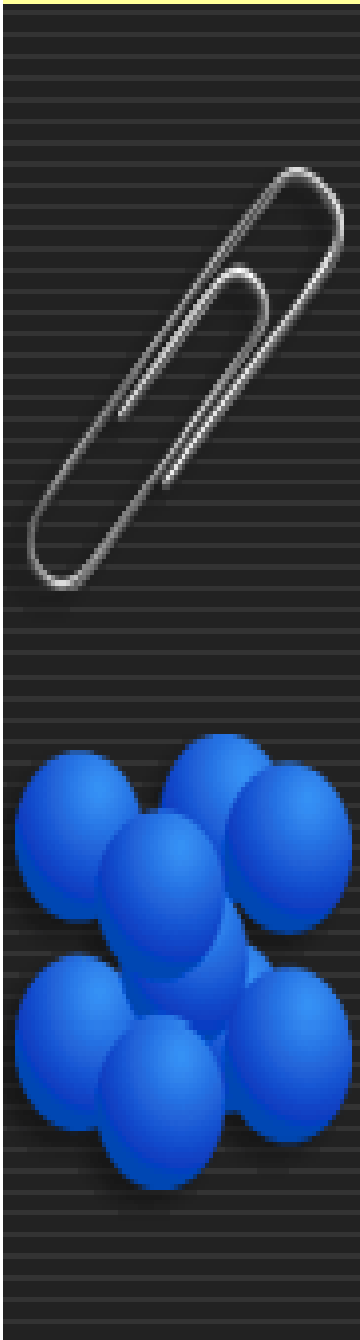


# Chapter One:

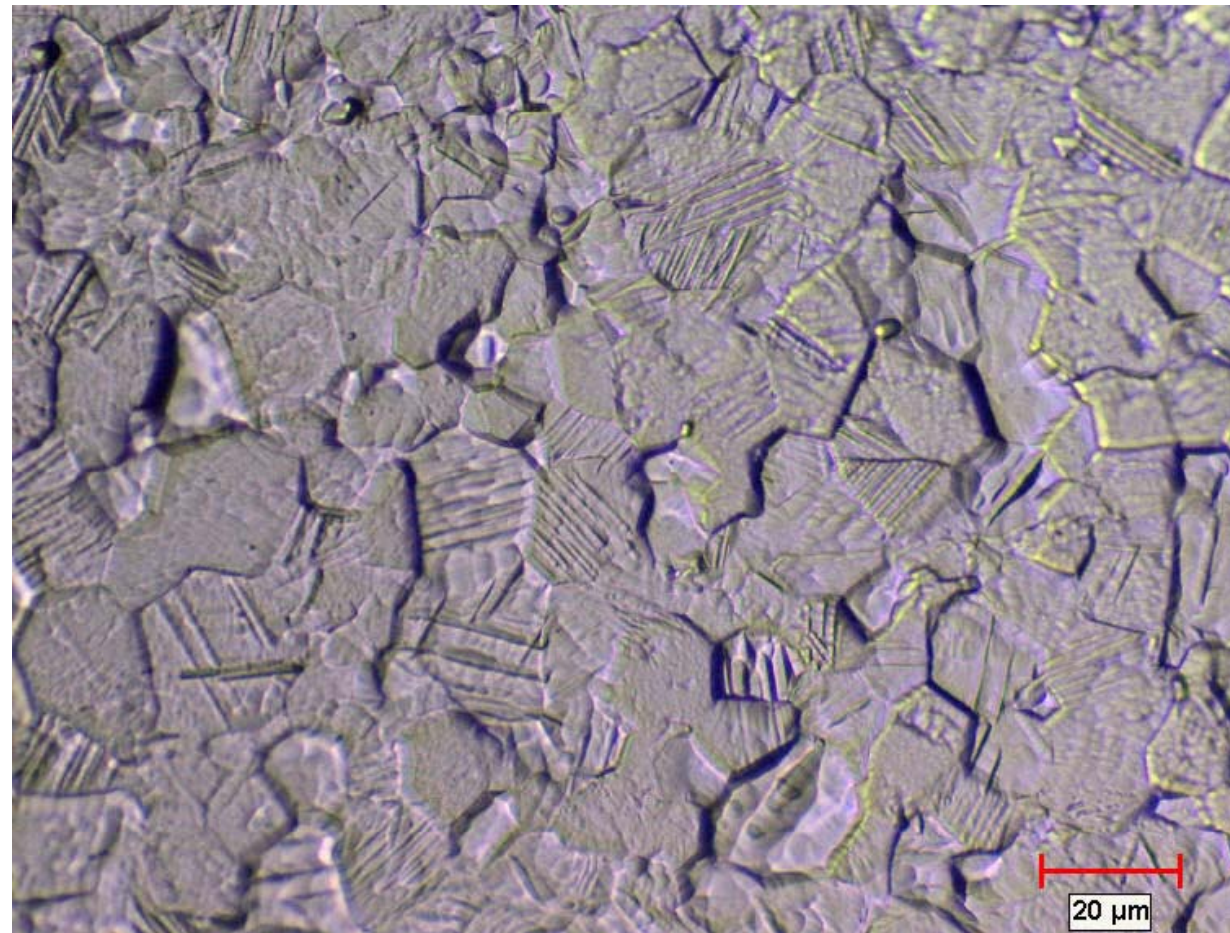
## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---



Sheet CP-Ti: 500x 10%HF- 45%H2O- 45%HNO3

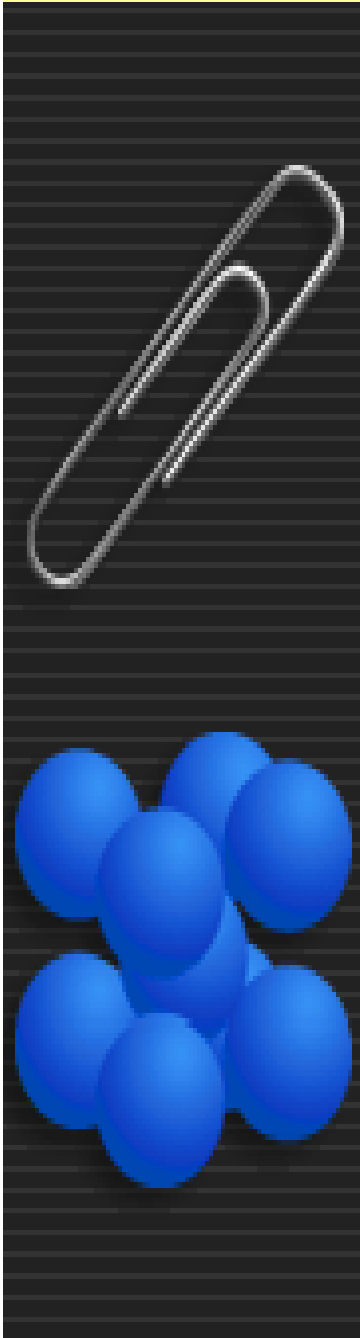


# Chapter One:

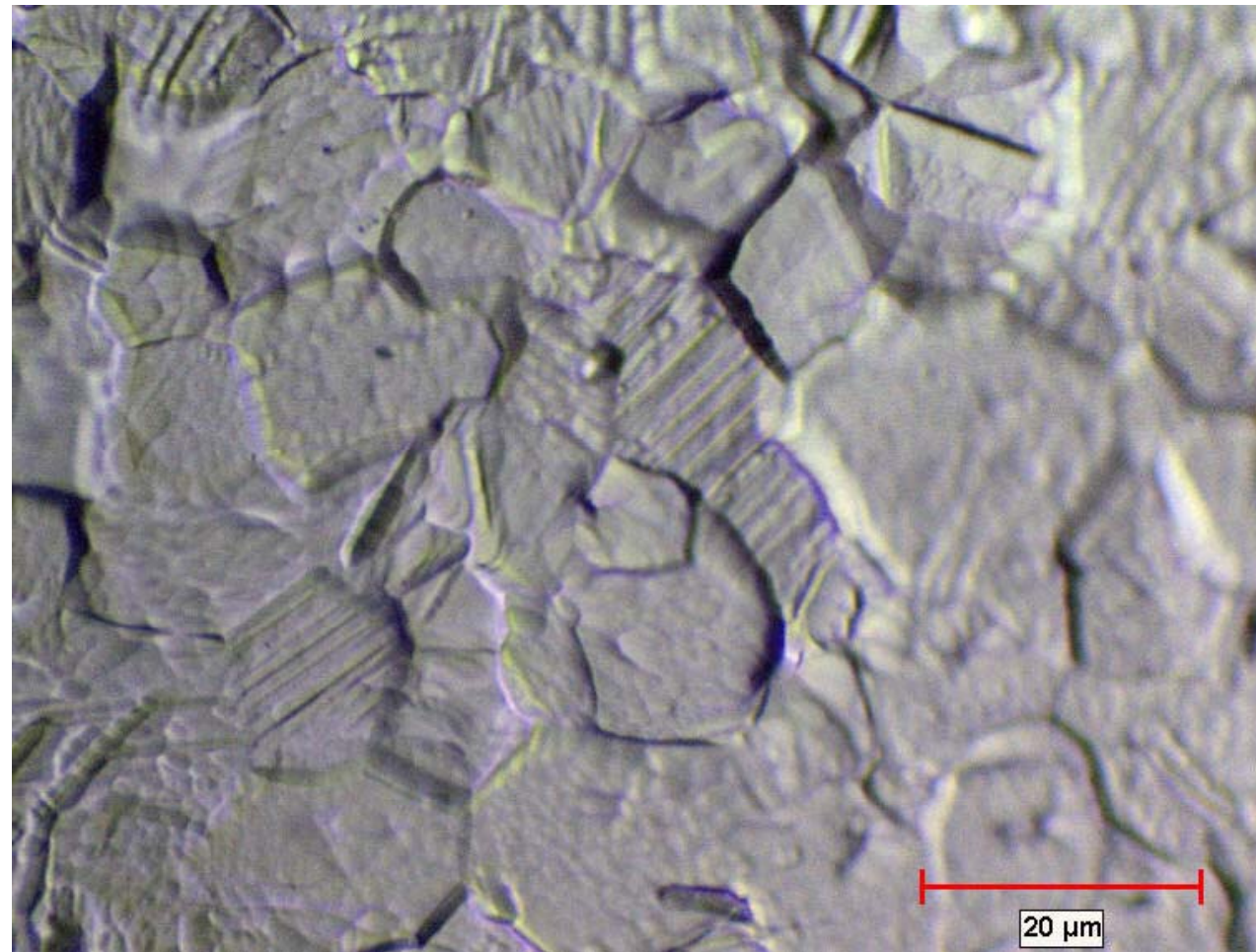
## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---



Sheet CP-Ti: 1000x 10%HF- 45%H<sub>2</sub>O- 45%HNO<sub>3</sub>



# Chapter One:

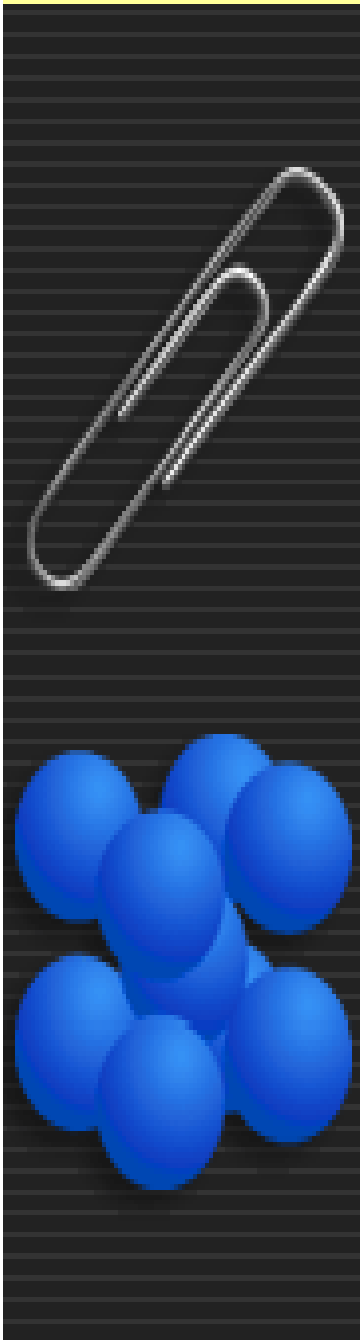
## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

### :Microscopic Techniques ❖ Scanning Probe Microscopy ▶

- ▶ The microscope generates a topographical map, on an atomic scale, that is a representation of surface features and characteristics of the specimen being examined
- ▶ The Advantages of SPMs are:
  - Examination on the nanometer scale is possible magnifications as high as **10<sup>9</sup> X** are possible; much better than with other microscopic techniques.
  - Three-dimensional magnified images are generated that provide topographical information about features of interest
  - Some SPMs may be operated in a variety of environments (e.g., vacuum, air, liquid); thus, a particular specimen may be examined in its most suitable environment.



# Chapter One:

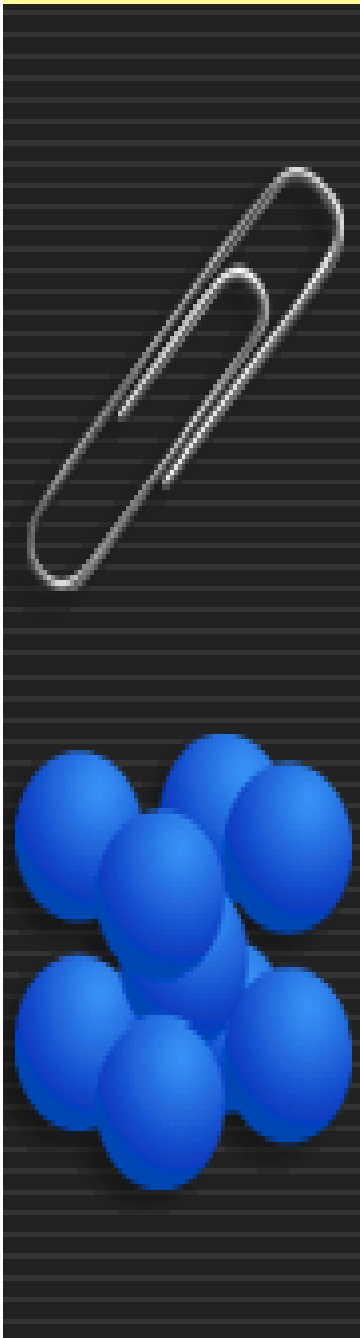
## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

### :Microscopic Techniques ❖ Scanning Probe Microscopy ➤

- SPM employ a tiny probe with a very sharp tip that is brought into very close proximity (i.e., to within on the order of a nanometer) of the specimen surface
- This probe scan across the surface and deflection perpendicular to this plane is collected
- The motions of the probe are controlled by piezoelectric ceramic components that have nanometer resolutions
- Probe movements are monitored electronically, and transferred to in a computer, which then generates the three-D surface image
- The SPMs, which allow examination of the surface of materials at the atomic and molecular level, have provided a wealth of information about materials, biological molecules
- Indeed, the advent of the SPMs has helped to usher in the era of nanomaterials—materials whose properties are designed by engineering atomic and molecular structures



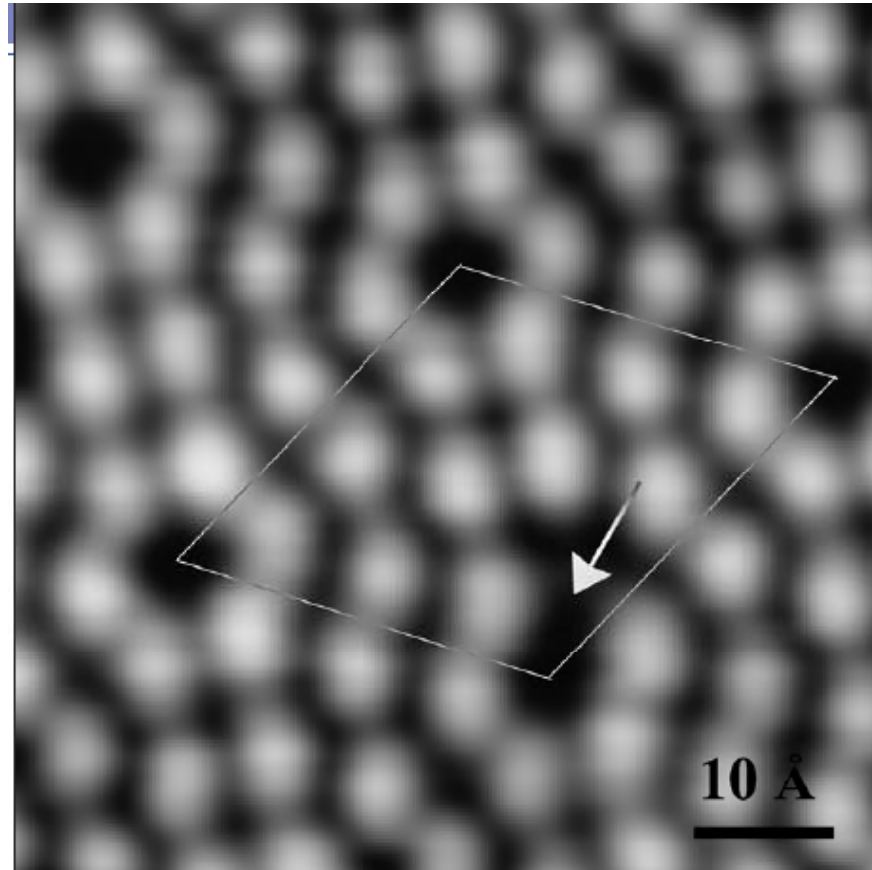
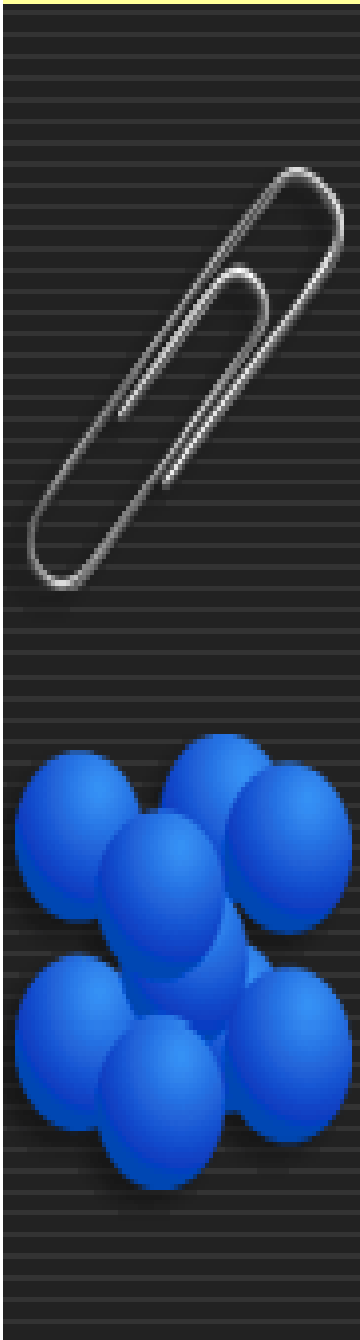


# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

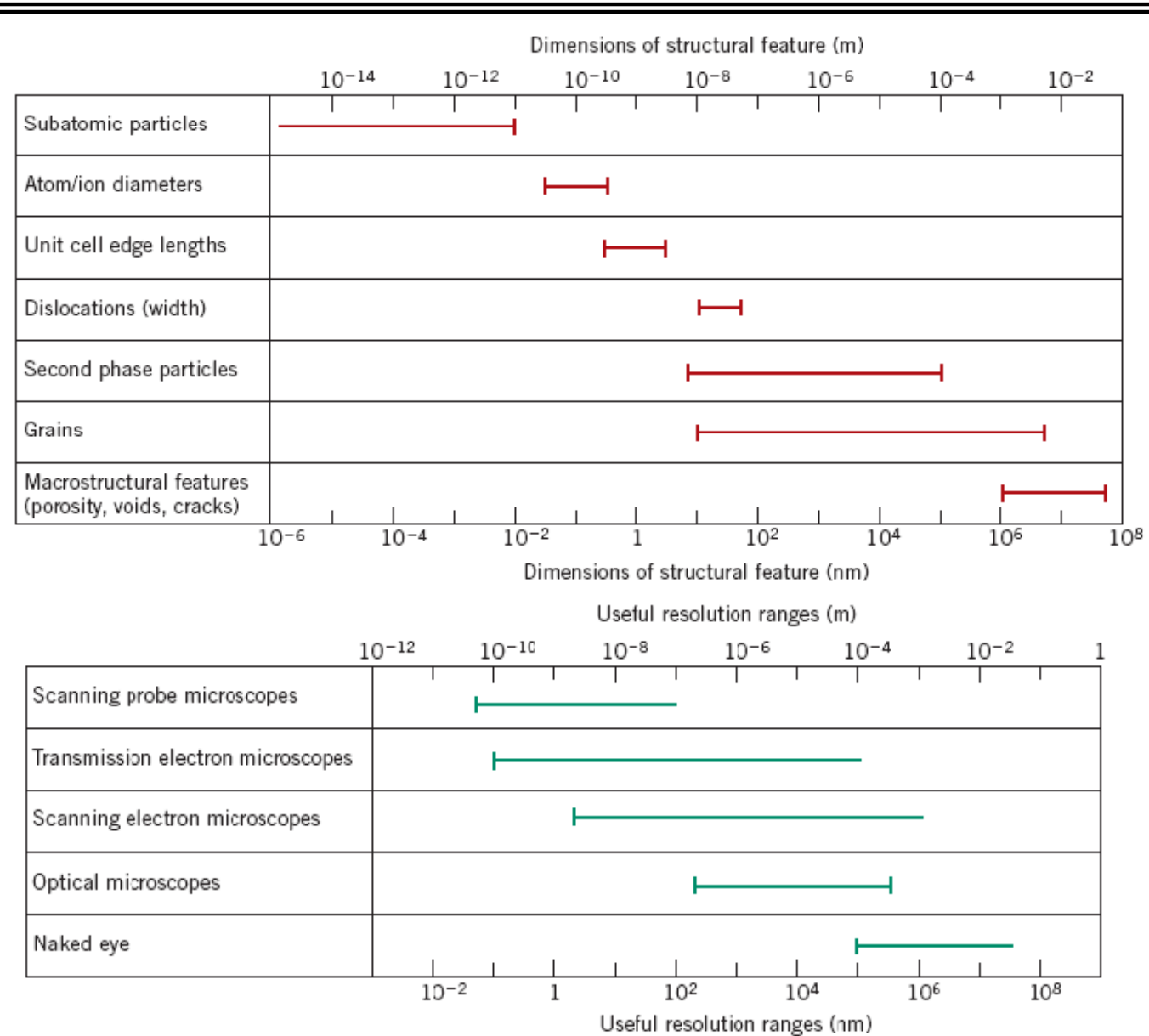
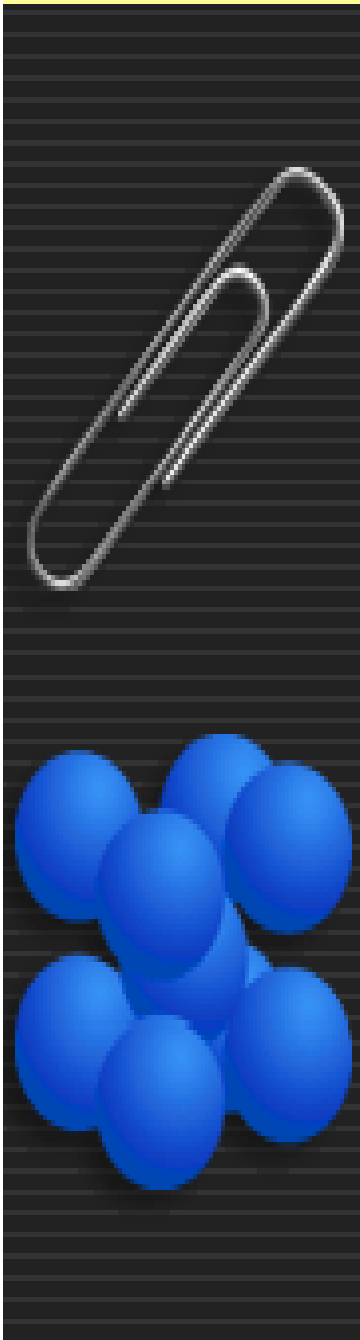
---



A scanning probe micrograph that shows a (111)-type surface plane for **silicon**. The arrow points to the location of a silicon atom that is missing. This site from which an atom is missing is the **surface analogue of a vacancy defect**— that is, a vacant lattice site within the bulk material. **Approximately 20,000,000 X.**

# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

### ❖ خواص مکانیکی *Mechanical Properties*

➤ مواد در معرض بار و نیرو قرار دارند (بال هواپیما Al، محور در اتومبیل Steel)

➤ اطلاع از خواص جهت طراحی صحیح not to deform and fracture

➤ Mechanical Properties: Response or Deformation to a load

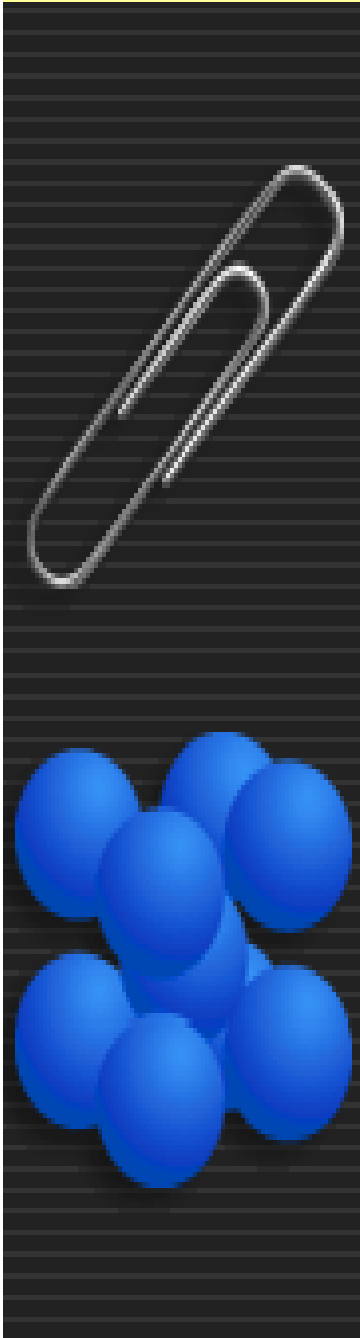
➤ مهمترین خواص مکانیکی: Strength, Hardness, Ductility, and Stiffness

➤ نیروهای وارده Tensile, Compressive, or Shear

➤ American Standard for Materials and Testing (ASTM)

➤ طراحی و ساخت قطعات فلزی نیازمند ارتباط خواص داخلی *Microstructure*

و خواص مکانیکی *Mechanical Properties* می باشد



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### *CONCEPTS OF STRESS AND STRAIN* ❖

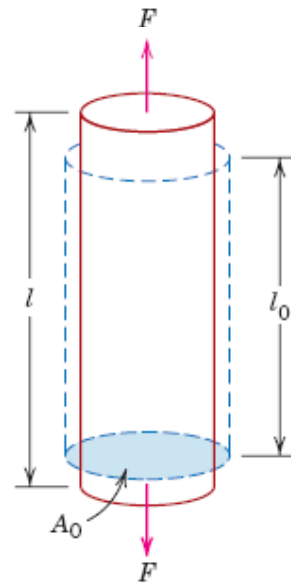
➤ درحالتی که load ثابت یا به آهستگی به مقطع یا سطح مشخصی از فلز وارد می گردد خواص مکانیکی را می توان براساس تست stress-strain ارزیابی نمود

### TENSION TEST\*

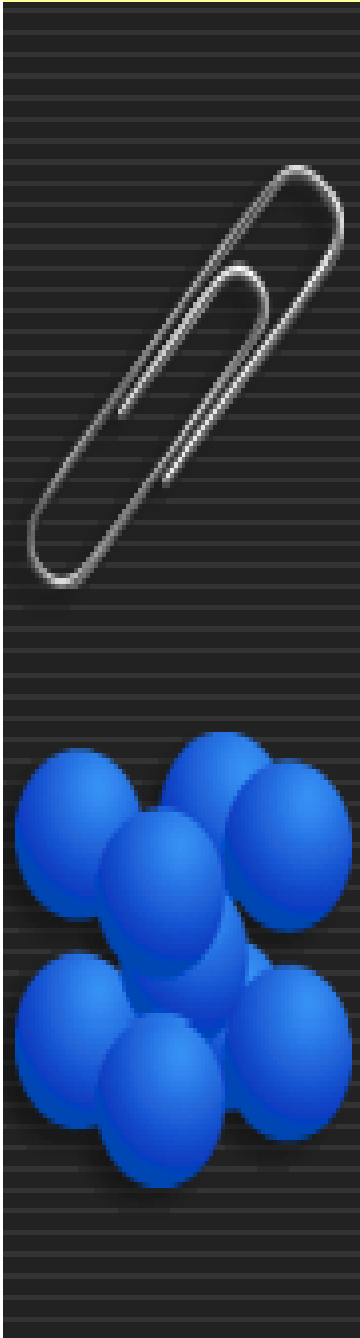
➤ بوسیله این تست خواص مکانیکی فلز مورد نظر بررسی می گردد

➤ معمولا قطعه تحت کشش تدریجی در راستای محور طولی

قرار گرفته تا شکستگی fracture حاصل گردد



\* ASTM Standards of E 8 and E 8M





# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

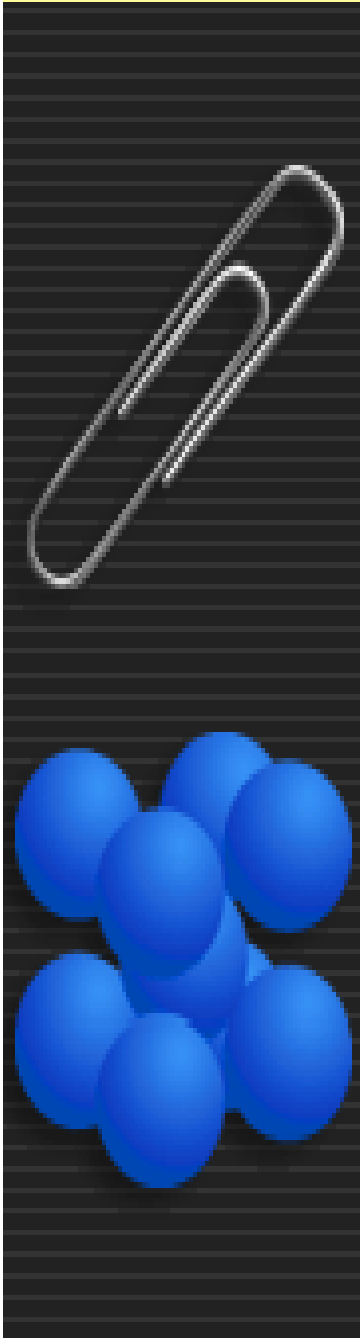
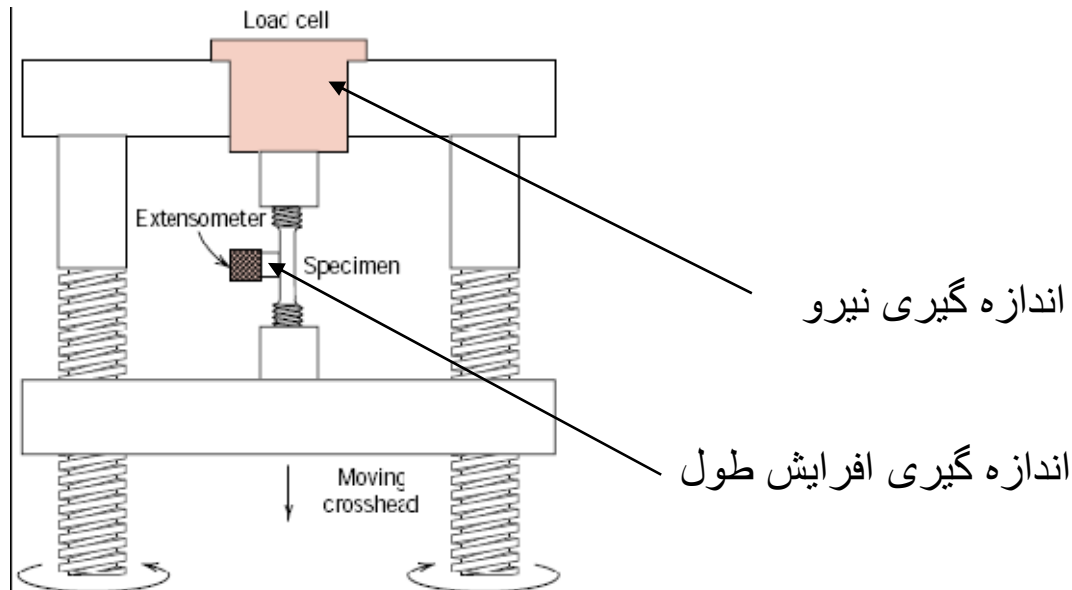
### *CONCEPTS OF STRESS AND STRAIN* ❖

#### TENSION TEST

➤ قطعه در دستگاه قرار گرفته و تحت نیروی کششی در هر لحظه نیرو و افزایش طول آن اندازه گیری می‌گردد

➤ زمان تست معمولاً در حد چند دقیقه تا تغییر شکل دائمی یا شکست قطعه می باشد

قرار گرفته تا شکستگی fracture حاصل گردد



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

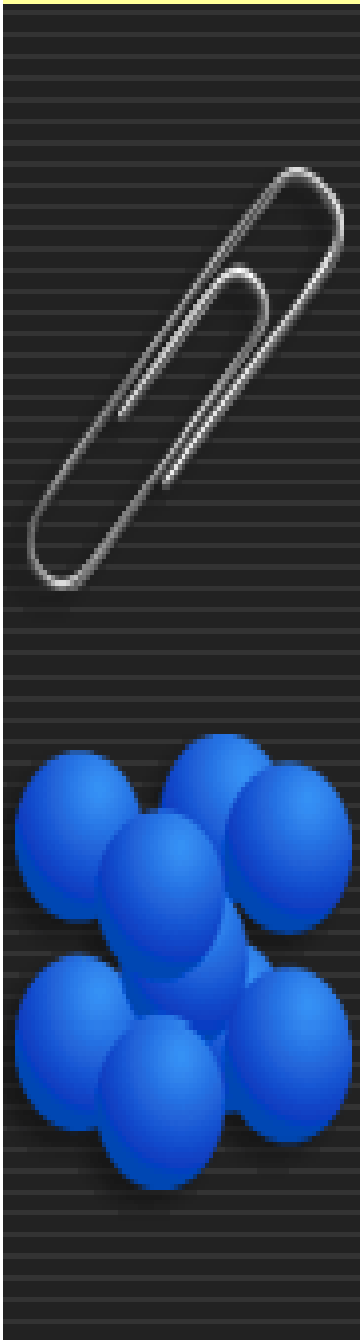
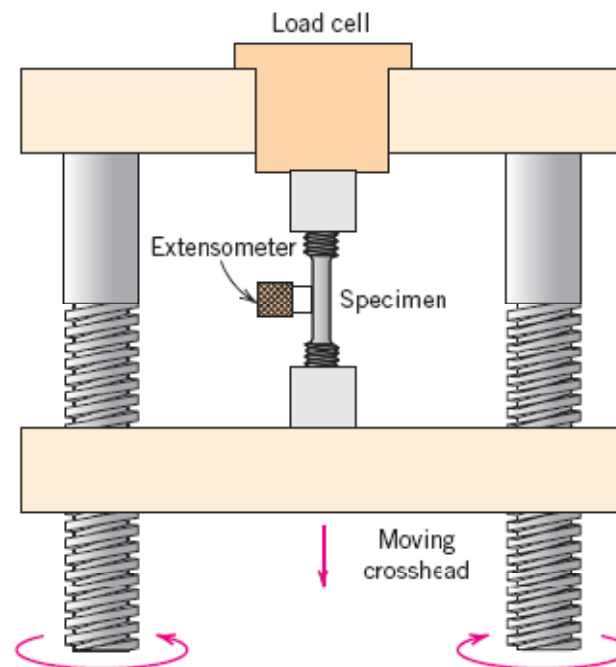
### *CONCEPTS OF STRESS AND STRAIN* ❖

#### TENSION TEST

➤ داده های مربوط در منحنی load بر حسب Elongation رسم میگردد

➤ بسته به سایز قطعه

(دو برابر نیرو با سطح مقطع دو برابر)



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### *CONCEPTS OF STRESS AND STRAIN* ❖

#### TENSION TEST

- جهت Min کردن Sample Size داده ها Normalize میگرد
- $F$  نیرو بر حسب نیوتن یا پوند و  $A_0$  سطح مقطع اولیه بر حسب متر یا اینچ مربع
- واحد Stress مگا پاسکال (SI)  $(1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ N/m}^2)$  و یا psi

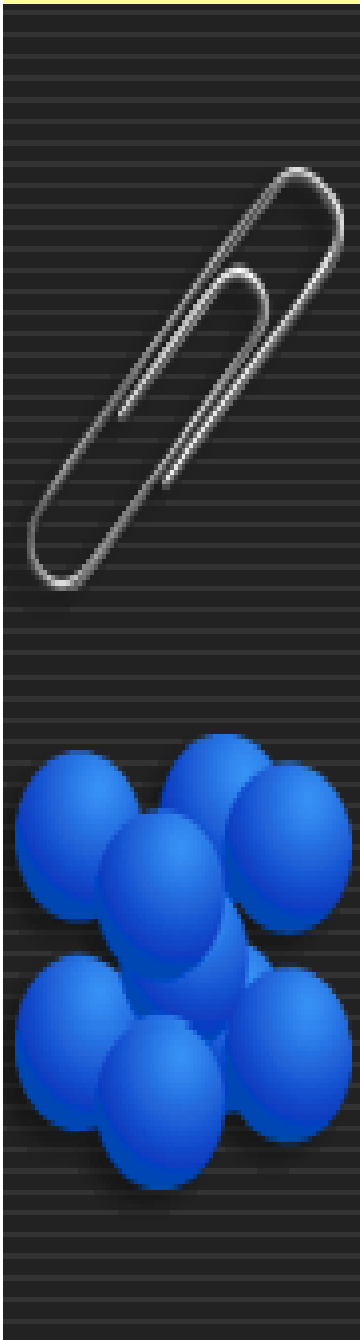
$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

- Strain بر اساس تغییر طول به طول اولیه تعریف می گردد

$l_0$  طول اولیه و  $l_i$  طول در هر لحظه instantaneous

**Strain** بدون واحد میباشد m/m و یا inch/inch

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

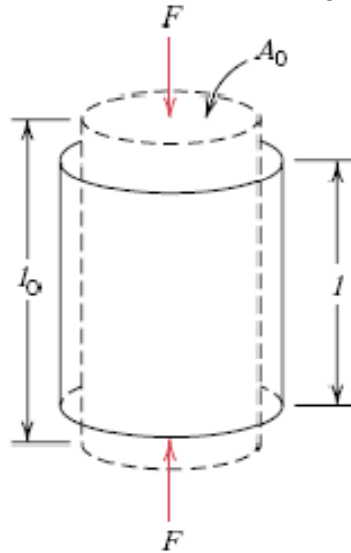
### *CONCEPTS OF STRESS AND STRAIN* ❖

#### COMPRESSION TEST\*

compressive فشاری tensile test با نیروی کششی ➤

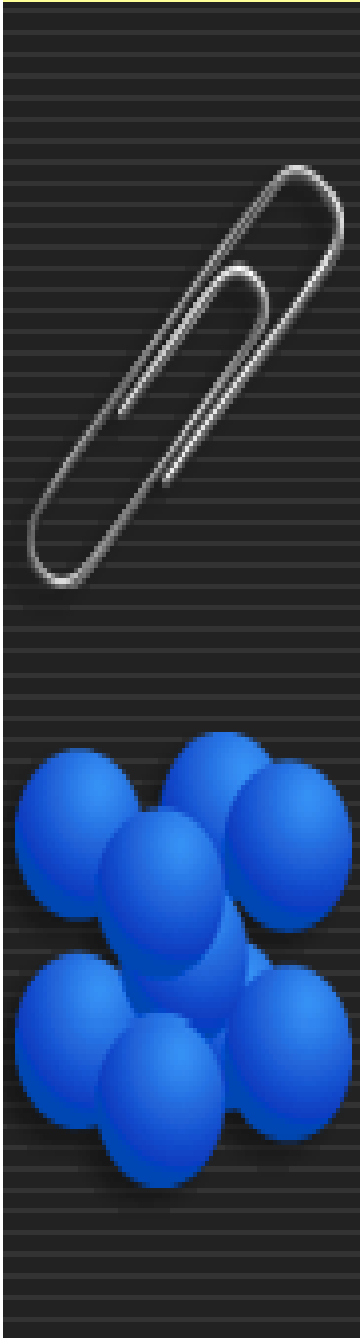
stress – strain معادلات مشابه ➤

Tensile test is more common؛ برای قطعات شکننده در کشش ➤



---

\* ASTM Standards of E 9

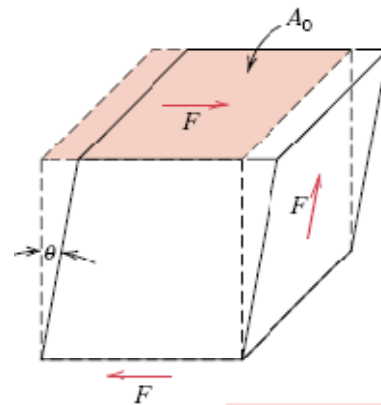


# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### *CONCEPTS OF STRESS AND STRAIN* ❖ SHEAR AND TORSIONAL TESTS\*

➤ نیرو موازی سطوح بالا و پائین با سطح  $A_0$

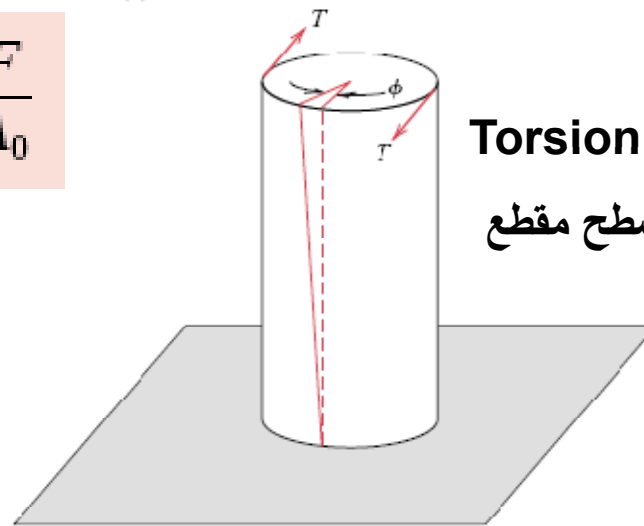


Shear stress

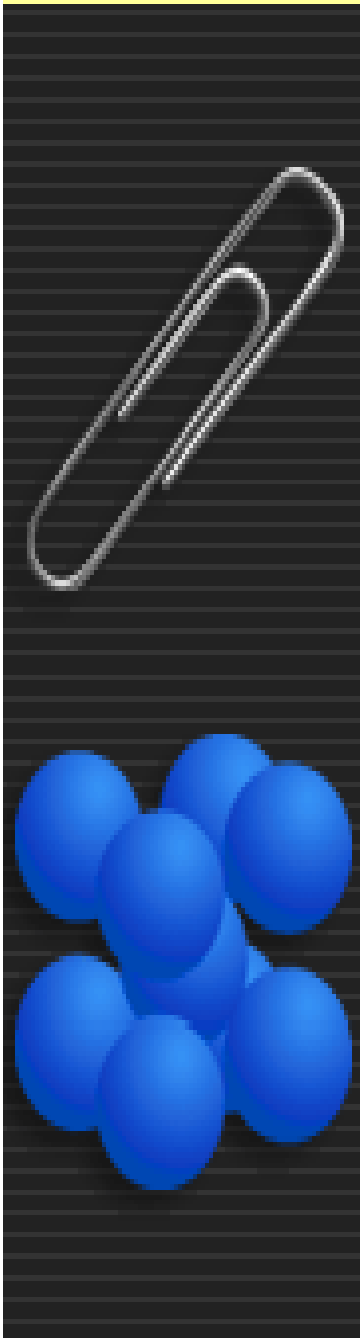
$$\tau = \frac{F}{A_0}$$

➤ Torsion is Twisted Shear

➤ معمولاً بروی قطعات با سطح مقطع دایره



\* ASTM Standards of E 143



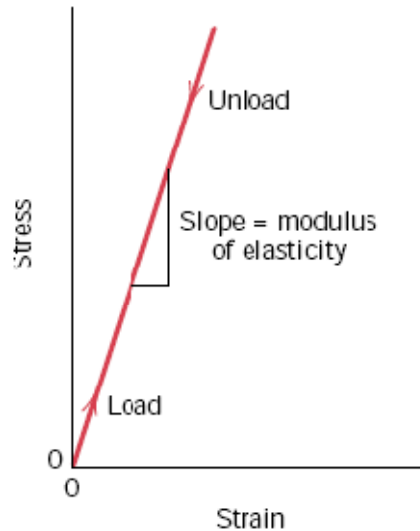
# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

❖ تغییر شکل الاستیک *ELASTIC DEFORMATION* :

❖ *STRESS–STRAIN BEHAVIOR*

➤ میزان تغییر شکل فلز strain بسته به بزرگی نیرو stress که در اکثر فلزات



$$\sigma = E\epsilon$$

**Hooke's law**

➤ بخش خطی در نمودار stress-strain که نیرو و تغییر شکل

متناسب می باشند *Elastic Deformation*

➤ شیب این نمودار (**E**) Modulus of Elasticity

➤ Tungsten برای 407 GPa و Magnesium برای 45 GPa

➤ **Stiffness** مرتبط با **E**؛ مقاومت فلز در برابر elastic deformation

➤ **The Greater the E the Stiffer the material**

# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

❖ تغییر شکل الاستیک *ELASTIC DEFORMATION* :

❖ *STRESS–STRAIN BEHAVIOR*

➤ در تغییر شکل الاستیک با برداشتن نیرو و قطع به شکل و حالت اولیه بر میگردد

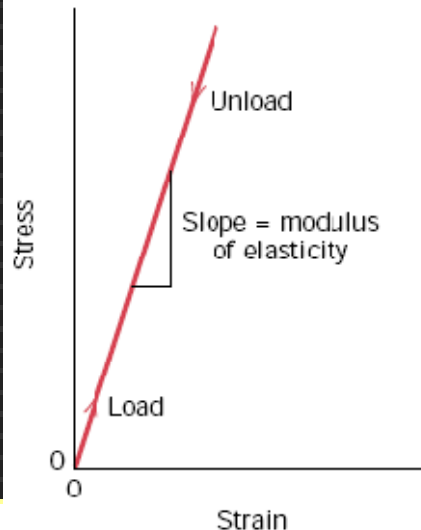
➤ در مقیاس اتمی Elastic Deformation به نیروی بین اتمی Interatomic Bonding بستگی دارد

➤ بزرگی  $E$  بسته به میزان آزادی و تحرک اتمها نسبت به هم

(Stretching- Springs)

$$\sigma = E\epsilon$$

Hooke's law



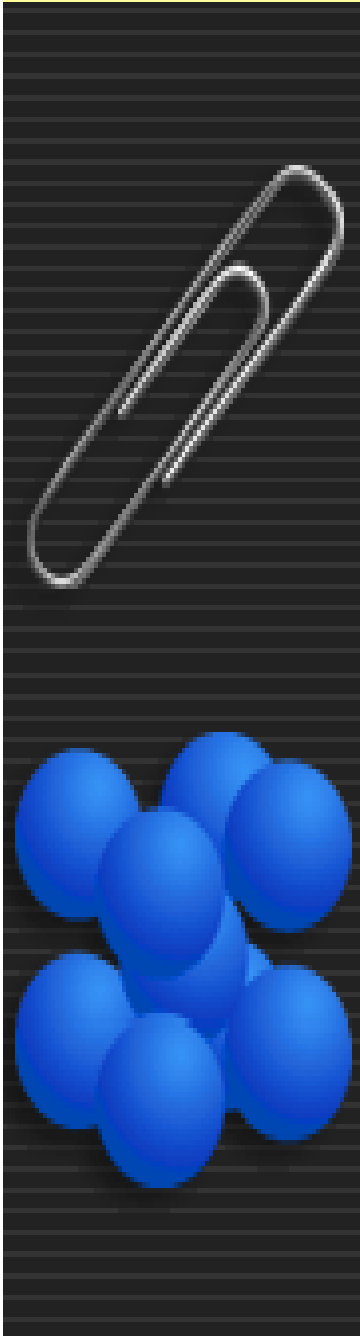
❖ *ANELASTICITY*

تغییر شکل الاستیکی پس از قطع *stress* ادامه می یابد و

همچنین برگشت به حالت اولیه زمان مشخص نیاز دارد

➤ *Time dependent elastic behavior*

➤ *For Metals is small and is neglected*





# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### MECHANICAL BEHAVIOR OF METALS ❖

➤ در اکثر فلزات Elastic deformation تا strain 0.005

➤ تغییر شکل دائمی Plastic Deformation

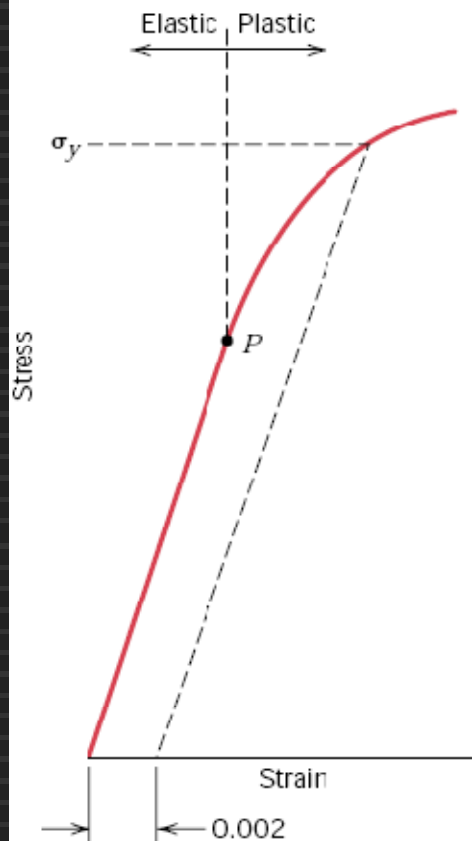
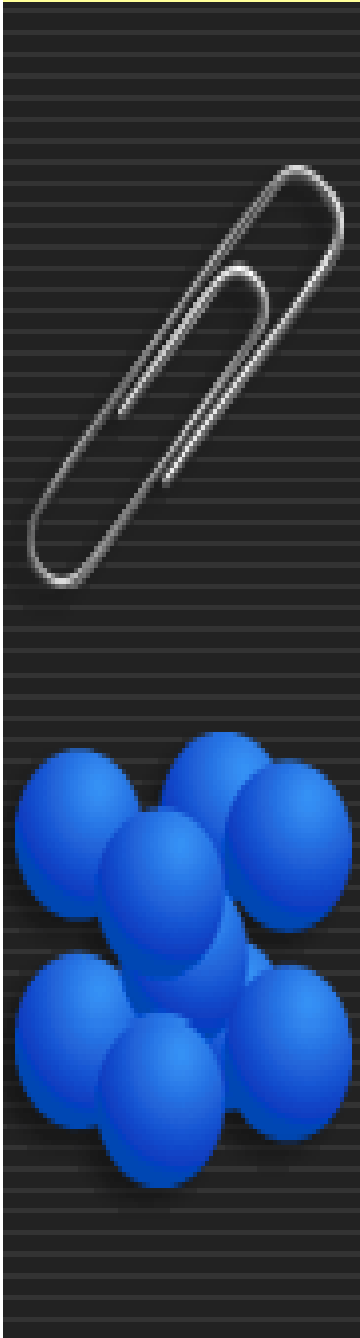
➤ تبدیل تغییر شکل الاستیک به پلاستیک تدریجی است

➤ ازدید اتمی پیوندها شکسته و با اتمهای جدید

➤ new neighbors تشکیل میگردد و با برداشتن stress

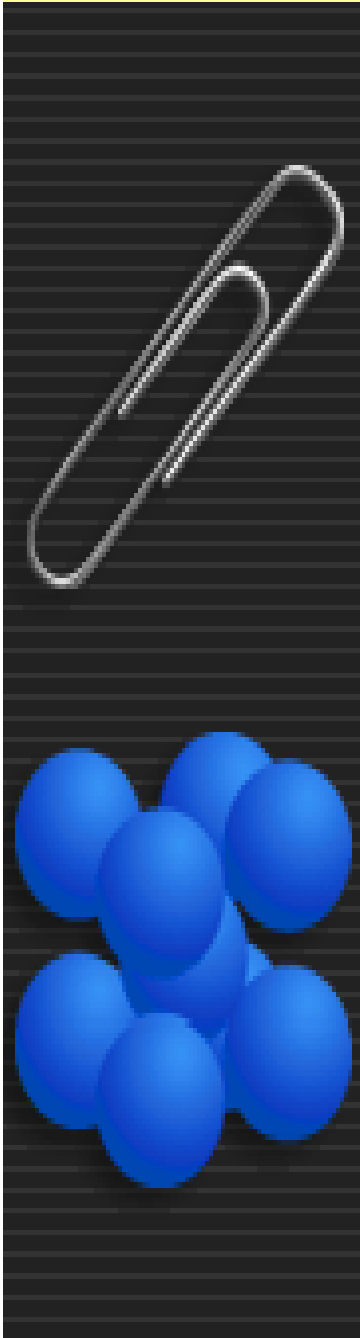
➤ به جای خود باز نمیگردند

(Slip Process)



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures



### MECHANICAL BEHAVIOR OF METALS ❖

#### *YIELDING AND YIELD STRENGTH* ❖

Elastic Deformation طراحی material جهت ➤

Elastic-plastic Deformation تبدیل Yielding ➤

(proportional limit) linearity در منحنی انتهای ➤

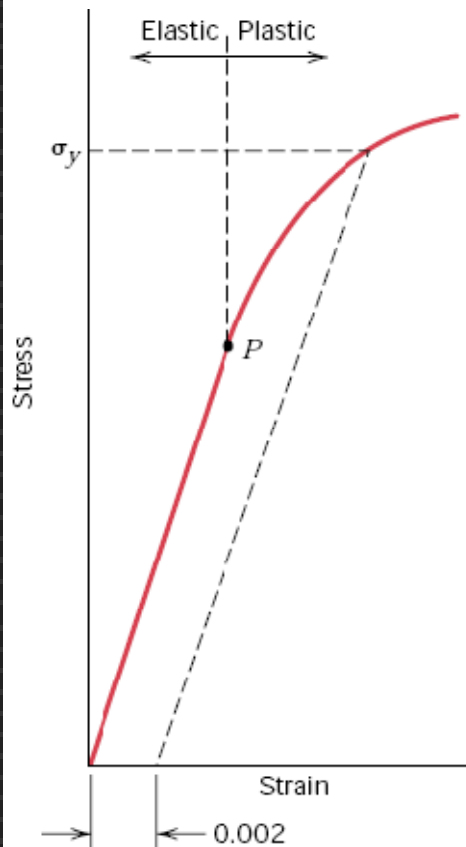
strain 0.002 معادل stress (**Yield Strength**) ➤

بزرگی  $\sigma_y$  نشانگر مقاومت فلز در برابر ➤

**plastic deformation**

واحد  $MPa$  ➤

*35 MPa Al and over 1400 MPa for Steel* ➤



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### MECHANICAL BEHAVIOR OF METALS ❖

#### **TENSILE STRENGTH** ❖

*Max Stress* در منحنی (MPa) ➤

شکست قطعه در این *stress* ➤

تغییر شکل *deformation* یکنواخت قبل از *TS* ➤

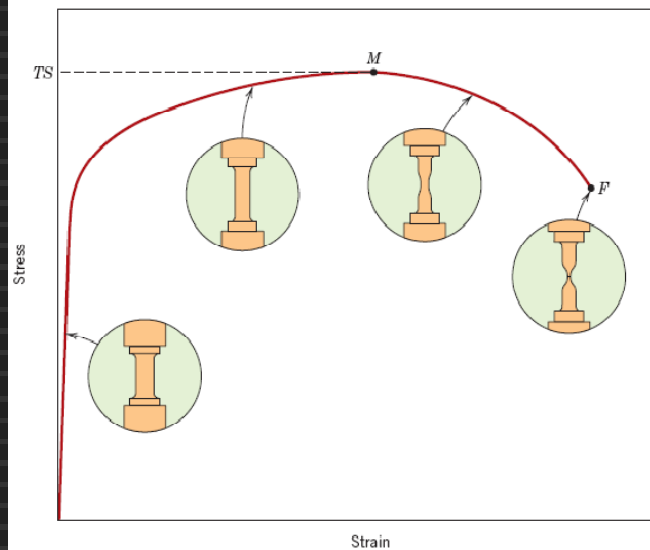
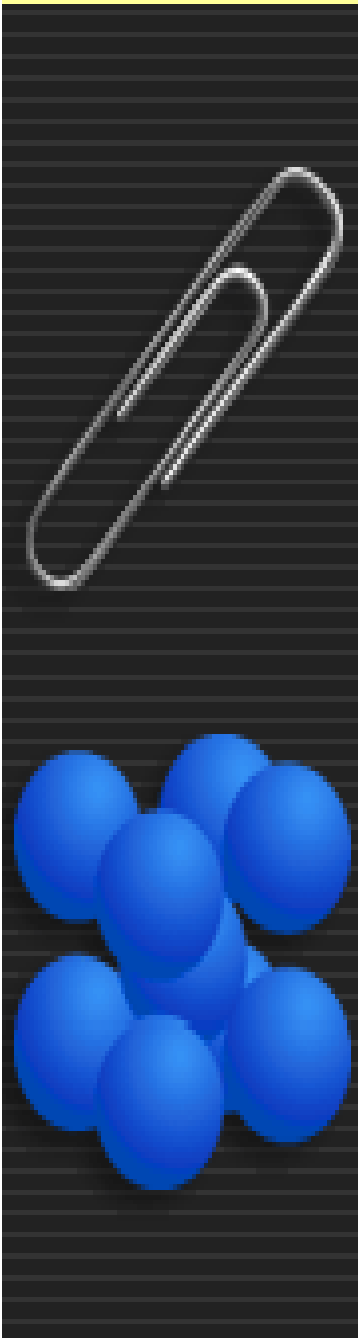
*Necking* ➤

Fracture در Neck (*Fracture Strength*) ➤

*Tensile Strength 50 MPa for Al* ➤

*3000 For Steel*

در طراحی قطعات **Yield Strength** ➤



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### MECHANICAL BEHAVIOR OF METALS ❖

#### DUCTILITY ❖

➤ میزان Plastic deformation در زمان شکست

➤ Brittle: تغییر شکل اندک تا شکست

➤ بر اساس درصد افزایش طول Elongation

➤ moderate Ductility for most Metals

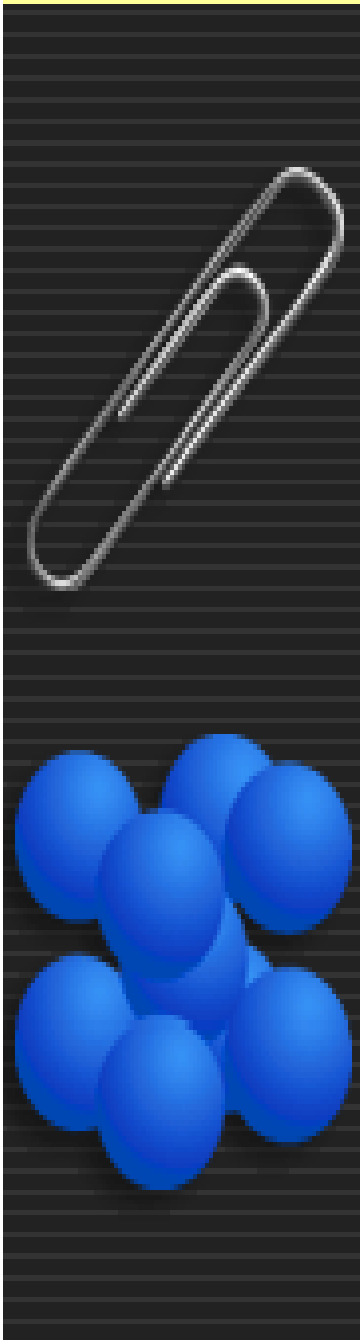
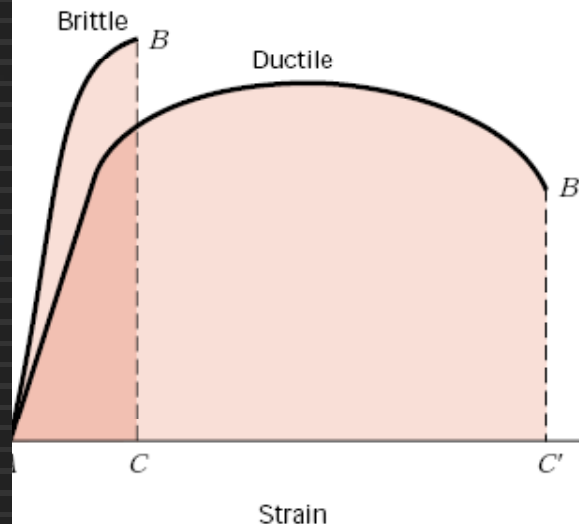
➤ اطلاع از Ductility مفید در:

■ اطلاع به طراح در خصوص تغییر شکل پلاستیک

■ در طی ساخت نشانگر میزان مجاز deformation

➤ فلزات با fracture strain کمتر از 5% brittle

$$\%EL = \left( \frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100$$



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### MECHANICAL BEHAVIOR OF METALS ❖

#### **TOUGHNESS** ❖

➤ توانائی فلز در جذب انرژی تا fracture

➤ شکل هندسی **Geometry** و نحوه اعمال **load** در تعیین toughness اهمیت دارند

➤ سطح زیر نمودار stress-strain تا fracture

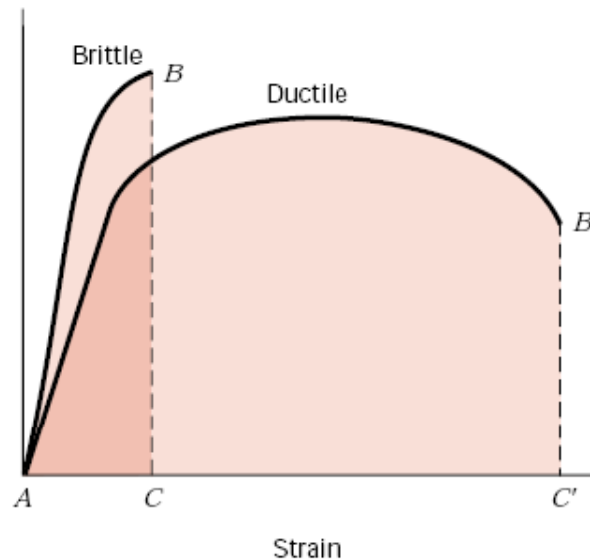
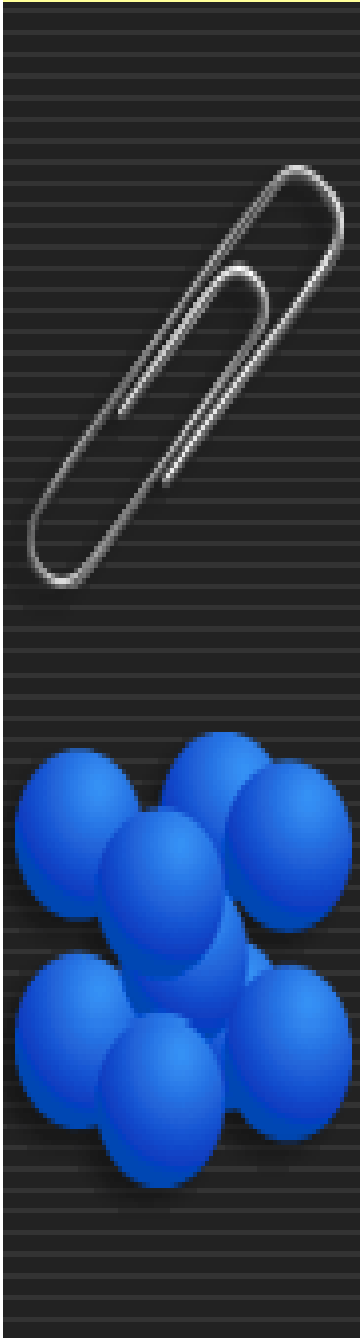
■ واحد: انرژی بر واحد حجم ماده

➤ ductility و strength نیاز است:

■ مواد Ductile معمولاً Tougher

■ با وجود yield and tensile strength بالاتر

فلزات brittle (ABC compare with AB'C')



# Chapter One:

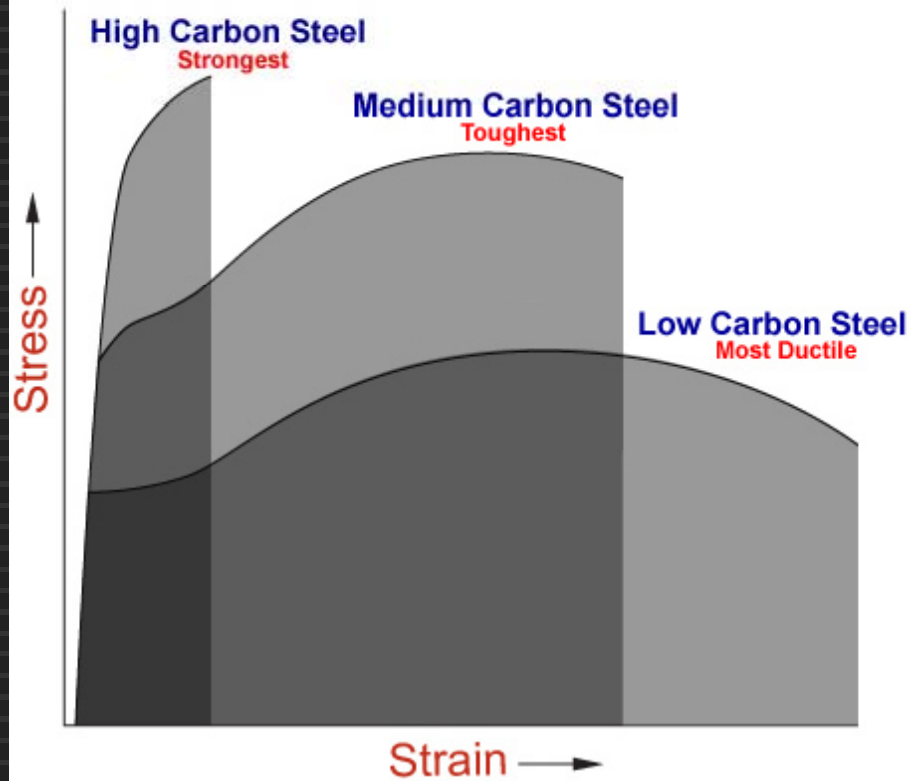
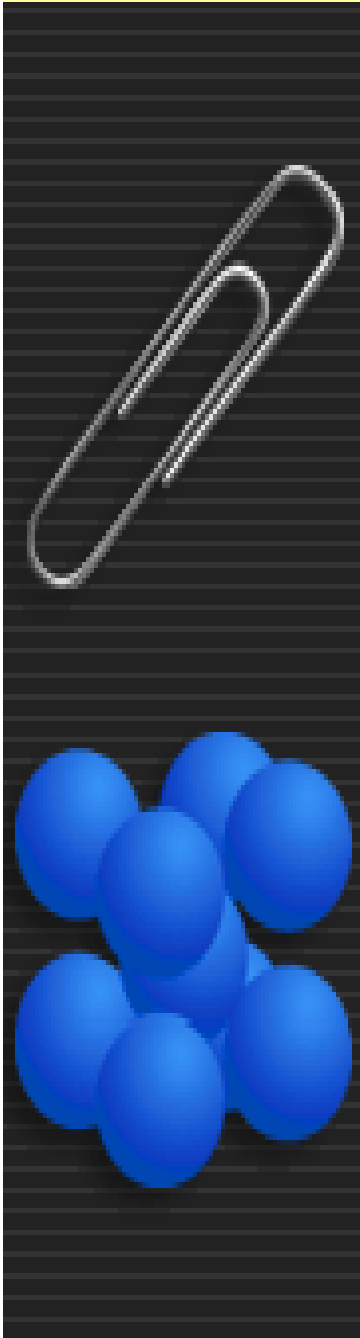
## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### MECHANICAL BEHAVIOR OF METALS ❖

#### *TOUGHNESS* ❖

: strength و ductility ➤

مواد Ductile معمولاً tougher ■



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### MECHANICAL BEHAVIOR OF METALS ❖

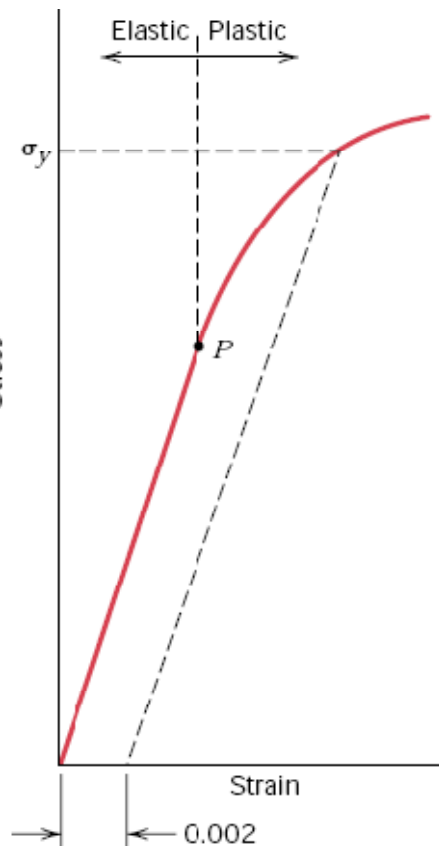
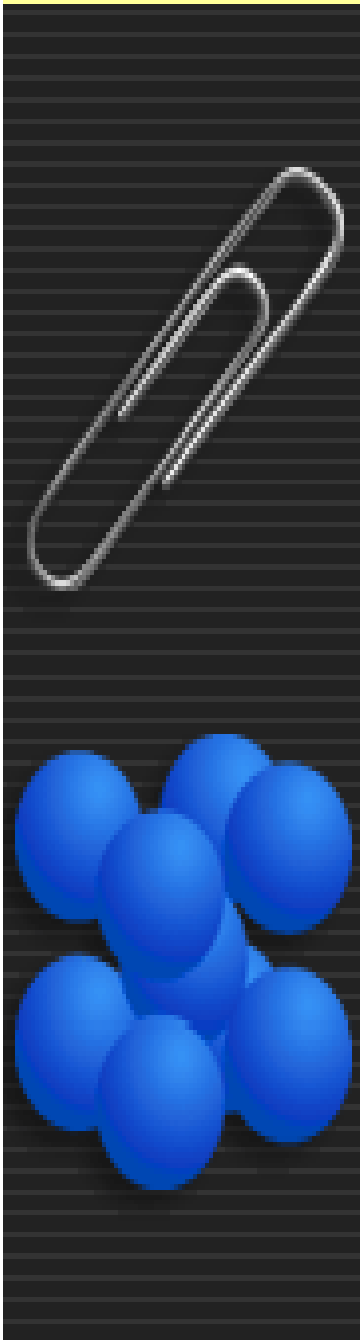
### *COMPRESSIVE, SHEAR, AND TORSIONAL DEFORMATION* ❖

Plastic deformation تحت تاثیر نیروهای

Compressive, shear, torsion

رفتار مشابه با Tensile

No max for compressive since no necking





# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### MECHANICAL BEHAVIOR OF METALS ❖

#### *(ASTM E 18 Rockwell test) HARDNESS* ❖

➤ از خواص مکانیکی مهم فلزات که نشانگر مقاومت در برابر localized plastic (Scratch ; Dent) deformation

➤ واحد Mohs از 1-10 برای talc (کلسیم سیلیکات) و Diamond

➤ روش جدید بر اساس میزان فرورفتگی indenter در ماده مورد آزمایش تحت controlled load and apply rate

➤ depth or size فرورفتگی اندازه گیری و عدد مربوط اختصاص داده میشود

➤ The softer the larger and deeper the indentation and the lower is the hardness index

➤ تست سختی بسیار متداول است :

■ بدلیل سادگی و کم هزینه بودن دستگاه و تست

■ در اثر تست قطعه از بین نمی رود (nondestructive) خراش یا فرورفتگی جز

■ امکان تخمین خواص مکانیکی دیگر نظیر tensile strength



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### DEFORMATION MECHANISMS FOR METALS ❖

#### *BASIC CONCEPTS OF DISLOCATIONS* ❖

Plastic Deformation: net movement of large number of ➤  
in response to an applied stress atoms

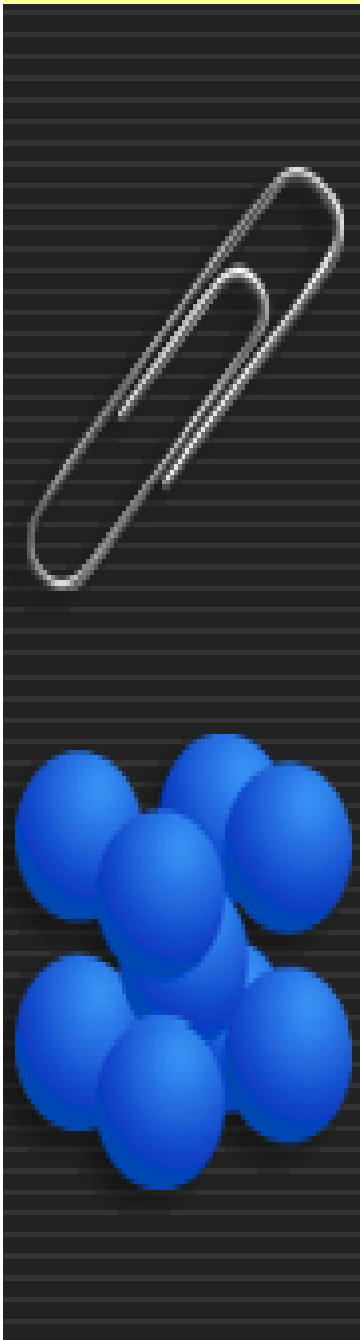
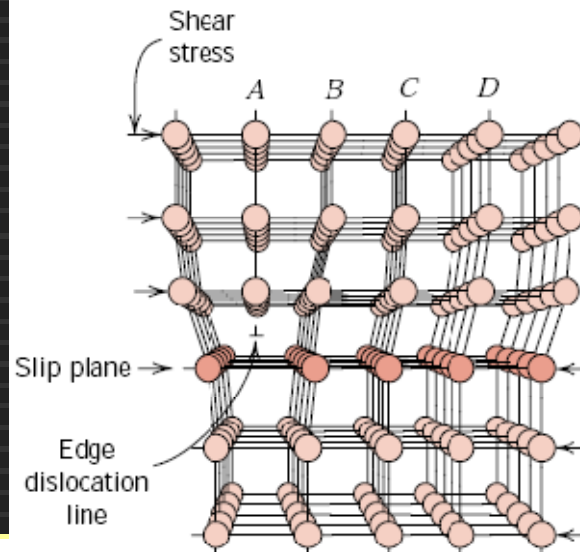
Linear crystal defects (dislocation) motion بر اساس ➤

Edge dislocation ➤ تحت تاثیر perpendicular shear stress حرکت میکند

➤ در زمانی که نیروی shear کافی باشد پیوندهای اتمی شکسته و باصفحه مجاور تشکیل میشود (B plane)

➤ با تکرار مراحل، صفحه A از چپ به راست

One atomic distance wide

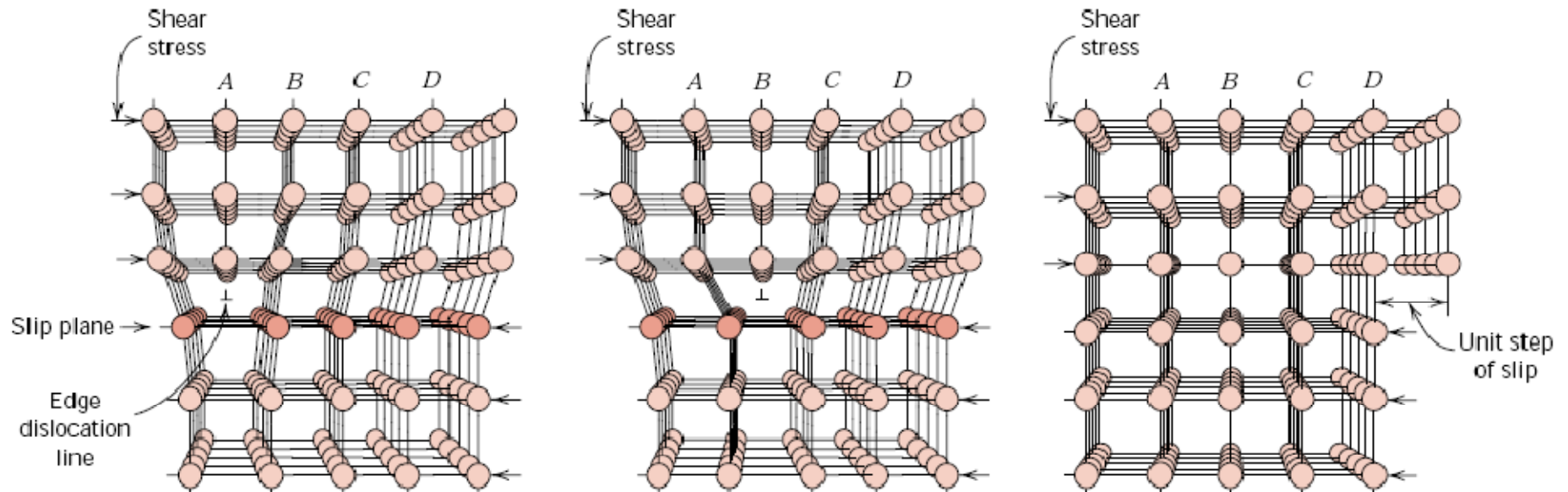


# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### DEFORMATION MECHANISMS FOR METALS ❖

### *BASIC CONCEPTS OF DISLOCATIONS* ❖



➤ به پروسه plastic deformation که بر اساس حرکت dislocation رخ می دهد **Slip** گویند

➤ صفحه کریستالی crystallographic plane که در طول آن dislocation حرکت میکند **Slip Plane**

# Chapter One:

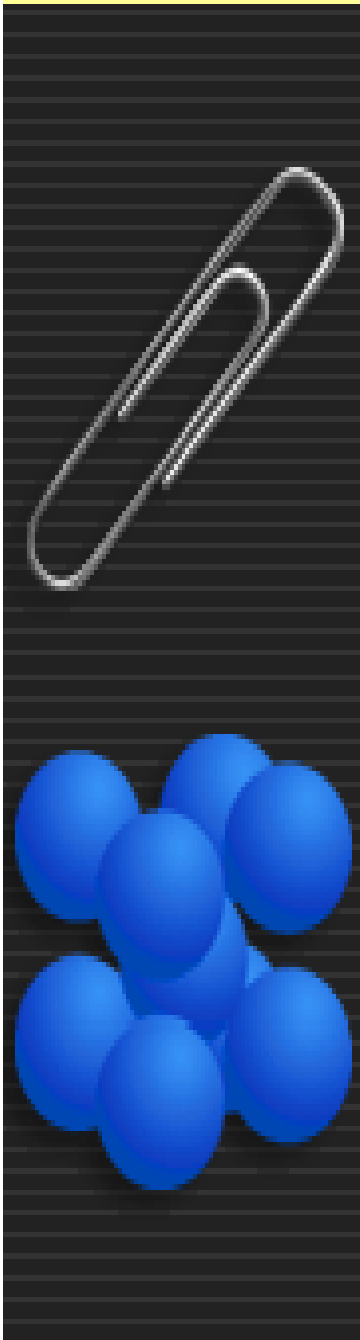
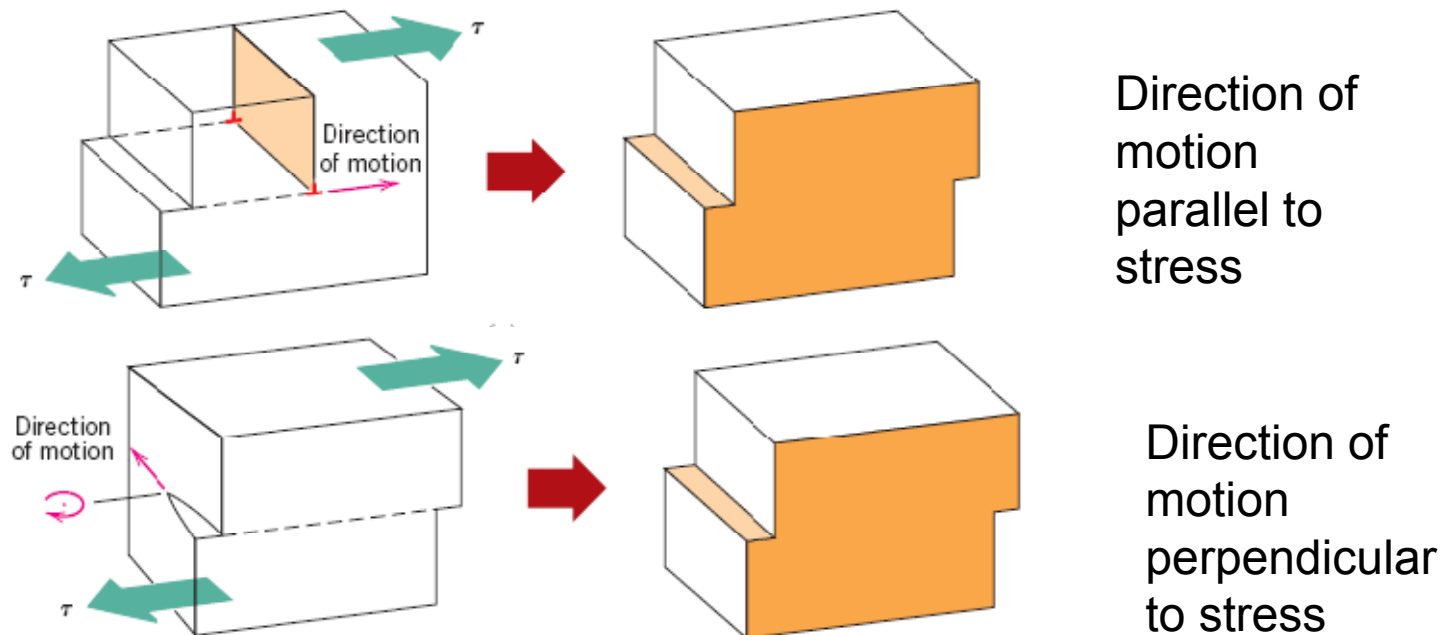
## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### DEFORMATION MECHANISMS FOR METALS ❖

#### *BASIC CONCEPTS OF DISLOCATIONS* ❖

از دید ماکروسکوپی plastic deformation تغییر شکل دائمی در اثر حرکت  
dislocations و تحت تاثیر shear stress

The net plastic deformation for both screw and edge  
motion is the same



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

DEFORMATION MECHANISMS FOR METALS ❖

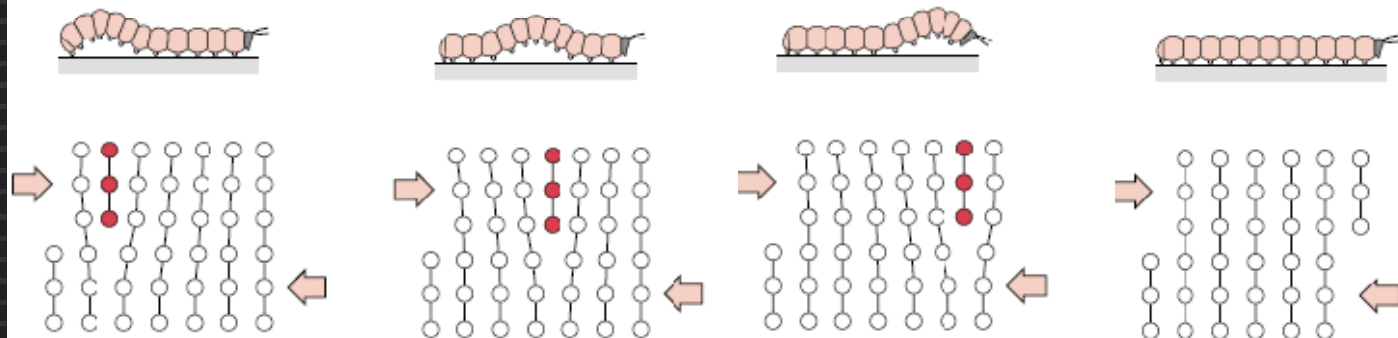
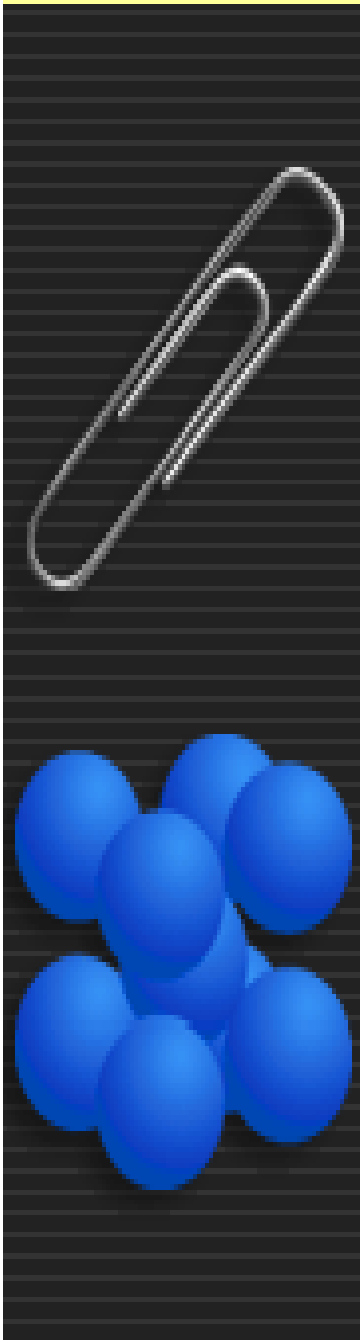
***BASIC CONCEPTS OF DISLOCATIONS*** ❖

*caterpillar* مشابه با حرکت ➤

*Form hump by pulling in the last pair of legs* ➤

*One leg distance* ➤

*The hump is the half plane* ➤



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

### DEFORMATION MECHANISMS FOR METALS ❖

#### ***BASIC CONCEPTS OF DISLOCATIONS*** ❖

dislocations در اکثر فلزات در اثر فرایندهای انجماد *solidification*، در حین تغییر شکل پلاستیک *plastic deformation* و عملیات حرارتی (*rapid cooling*)

➤ ***Dislocation Density***: طول dislocation ها در واحد حجم

*Millimeters of Dislocation per cubic millimeter*

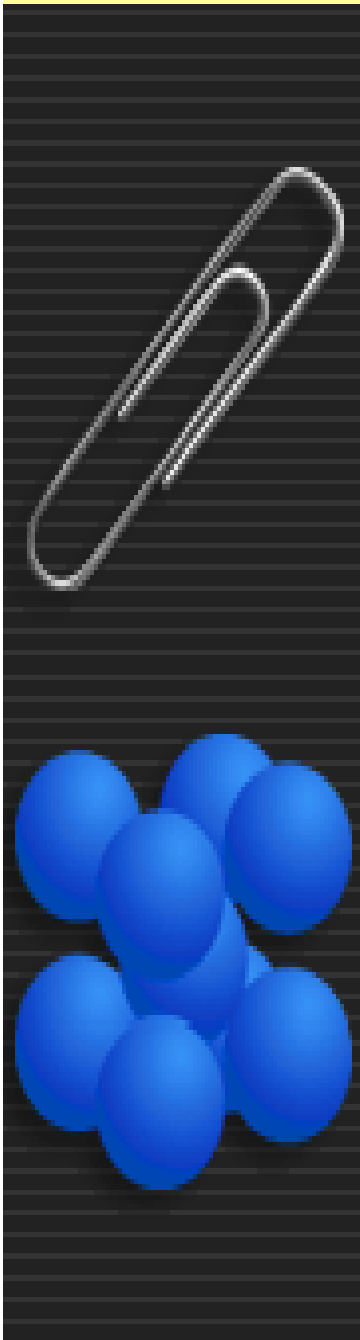
➤ ***Carefully Solidified Metals*** :  $10^3 \text{ mm}^{-2}$

➤ ***Heavily Deformed Metals*** :  $10^9 - 10^{10} \text{ mm}^{-2}$

➤ بوسیله عملیات حرارتی می توان density را به  $10^5 - 10^6$  کاهش داد

➤ **Ceramic materials**  $10^2 - 10^4 \text{ mm}^{-2}$

➤ **Silicon single crystals**  $0.1 - 1 \text{ mm}^{-2}$



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

### DEFORMATION MECHANISMS FOR METALS ❖

#### ***SLIP SYSTEMS*** ❖

Dislocations don't move with the same degree of ease on all crystallographic planes and directions

ترجیحا یک صفحه کریستالی *Slip plane* و یک جهت کریستالوگرافی *Slip Direction*

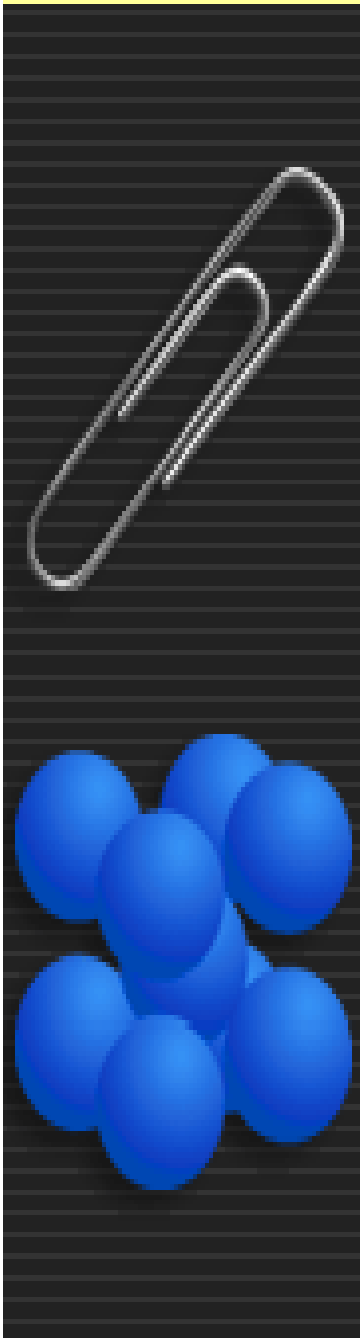
*The combination is called "Slip system"*

Slip system بستگی به Crystal Structure دارد:

Slip plane دارای بالاترین دانسیته dense atomic packing میباشد  
(Highest Planar Density)

Slip direction correspond with this plane that is the most closely packed with atoms

(Highest Linear Density)





# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### DEFORMATION MECHANISMS FOR METALS ❖

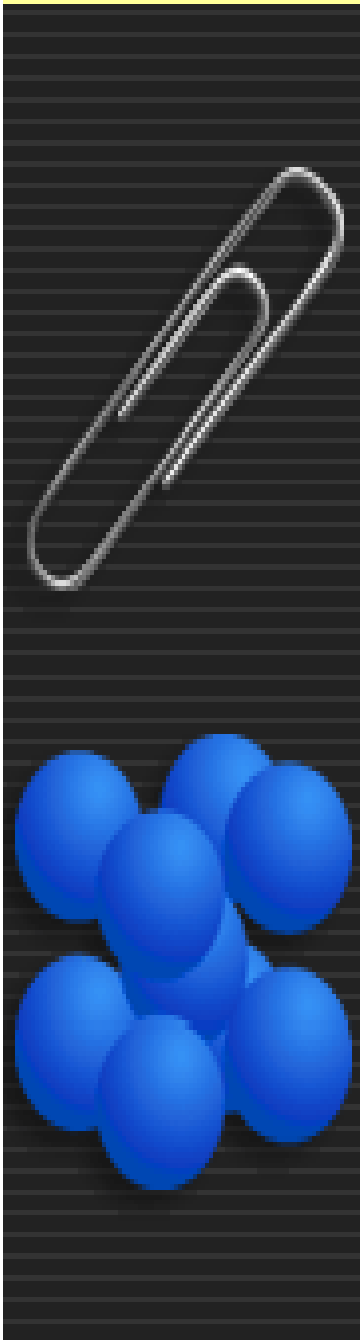
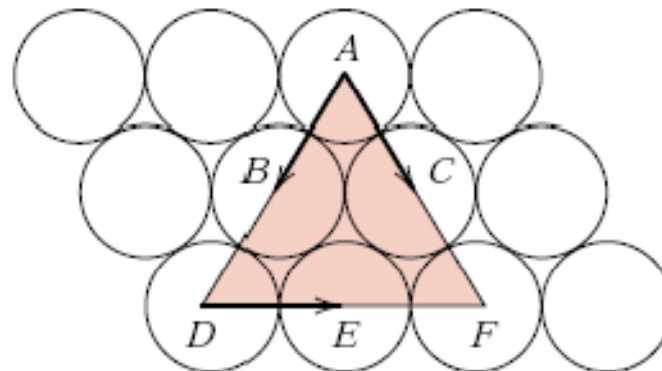
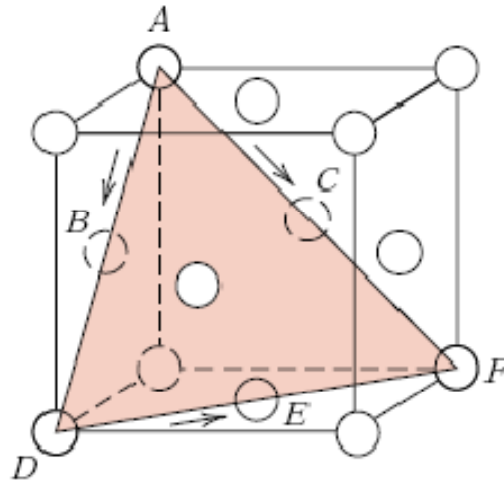
#### **SLIP SYSTEMS** ❖

*FCC* بعنوان مثال در ➤

*Slip* در صفحات  $\{111\}$  ➤

در راستای  $\langle 110 \rangle$  ➤

Slip system for FCC  $\{111\}\langle 110 \rangle$  ➤



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### DEFORMATION MECHANISMS FOR METALS ❖

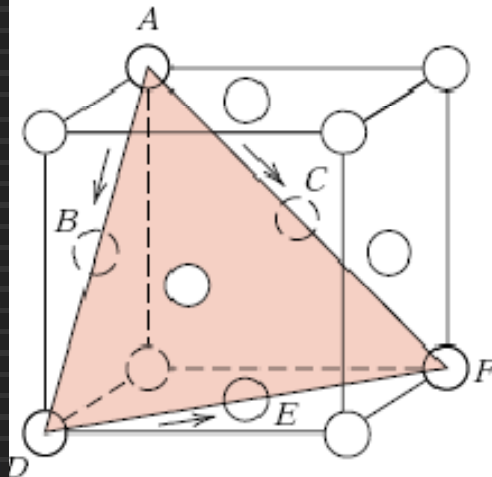
#### **SLIP SYSTEMS** ❖

➤ برای یک صفحه خاص بیشتر از یک slip direction وجود دارد *arrows*

➤ بیشتر از یک Slip system برای یک ساختار کریستالی وجود دارد

➤ (4 plane and 3 direction) 12 for FCC

➤ برای BCC و HCP بیش از یک صفحه برای **Slip** وجود دارد (110, 211, and 321 for BCC).

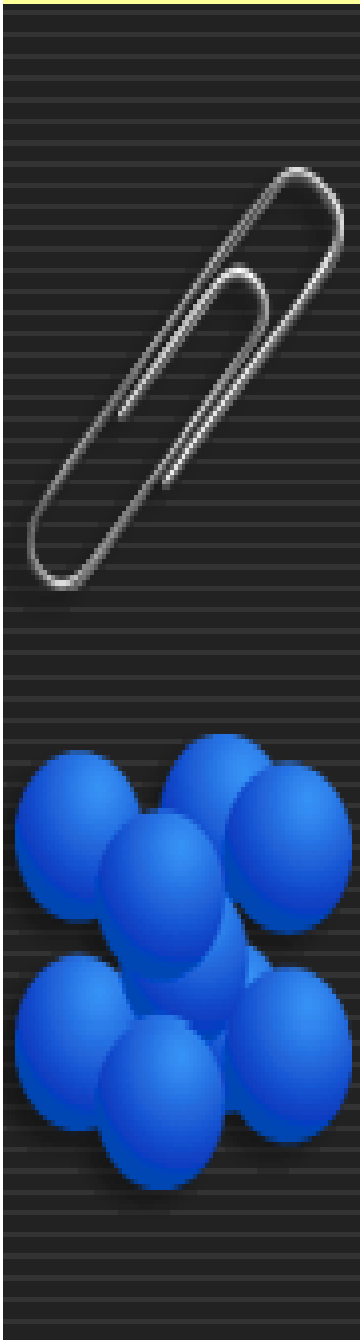


➤ بسته به شرایط (دما) Slip system خاصی عمل میکند

some slip systems operate only at elevated temperature

➤ ساختارهای مکعبی **FCC, BCC** تعداد زیادی slip system داشته **Ductile**

در حالی که HCP تعداد کم slip system داشته و **Brittle**

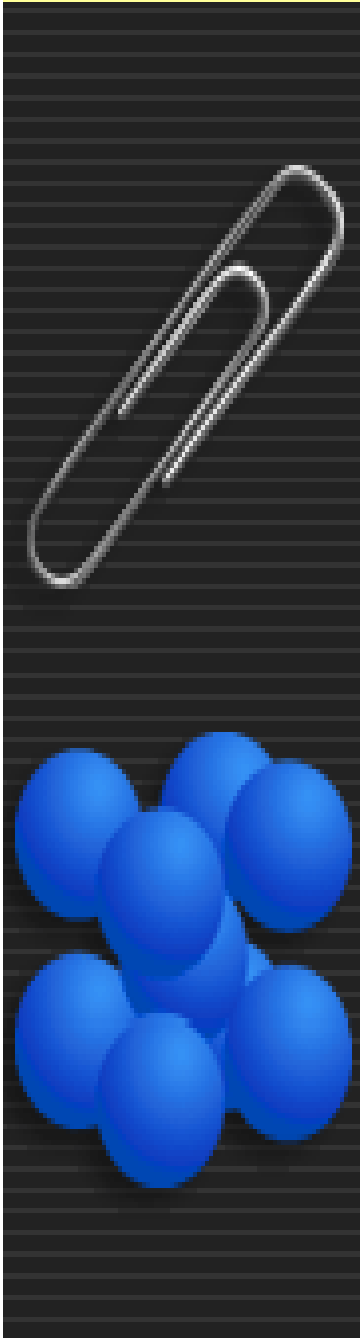


# Chapter One:

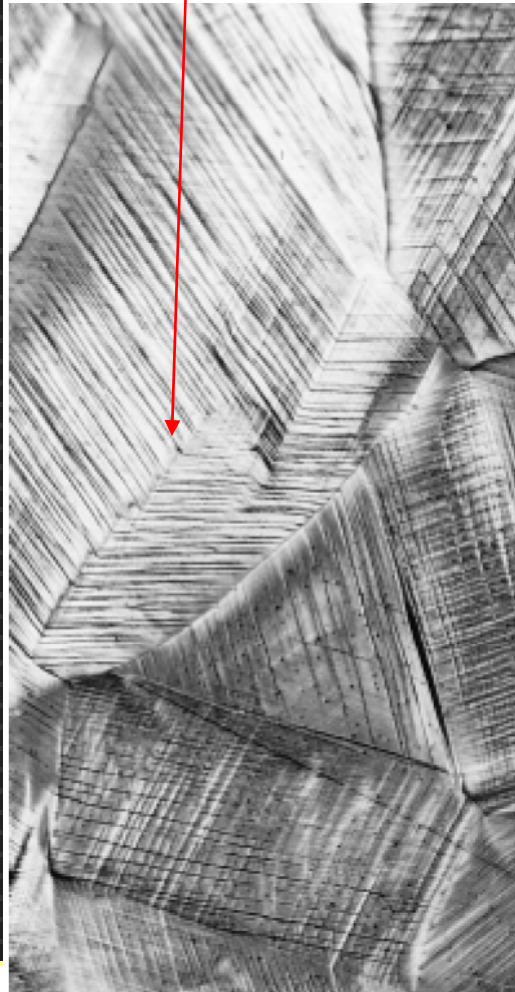
## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---



Two set of slip lines



DEFORMATION MECHANISMS FOR METALS ❖

***PLASTIC DEFORMATION OF*** ❖

***POLYCRYSTALLINE METALS***

در polycrystalline جهت گیری متفاوت ➤

random crystallographic orientation

از grain به grain Different slip

Dislocation motion occur along the slip ➤

system with most favorable orientation

***polished surface of deformed copper***

***two slip system (intersect slip lines)*** ➤

***Different orientation*** ➤

***(alignment of slip lines of different grains)***

# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

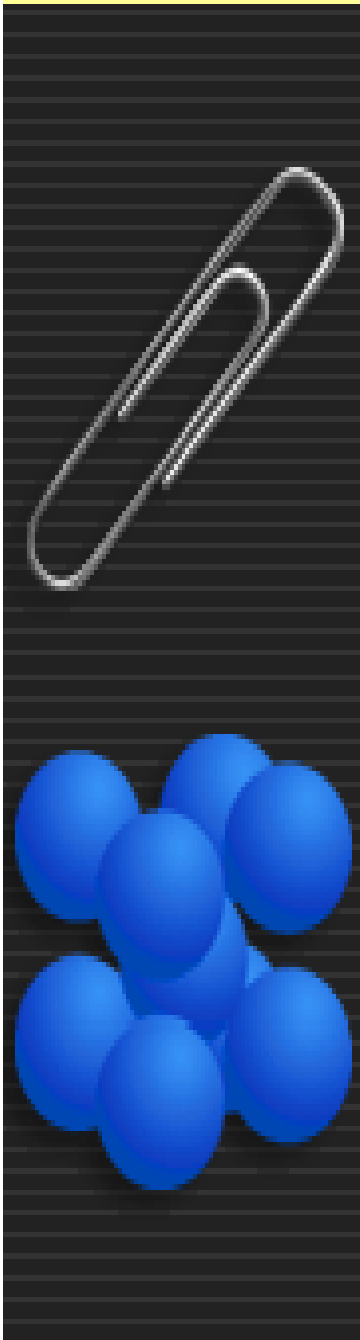
### ***PLASTIC DEFORMATION OF POLYCRYSTALLINE METALS*** ❖

نتیجه کلی gross plastic deformation بستگی به برآیند نهایی distortion  
تک تک دانه ها در اثر slip دارد

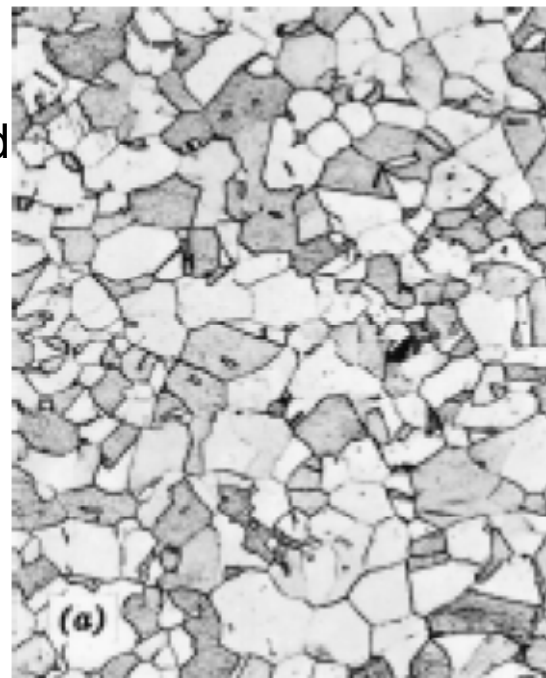
Grains maintain their integrity and coherency at boundaries ➤

بنابراین دانه ها از نظر شکل تاحدی تحت تاثیر دانه مجاور قرار نمیگیرند

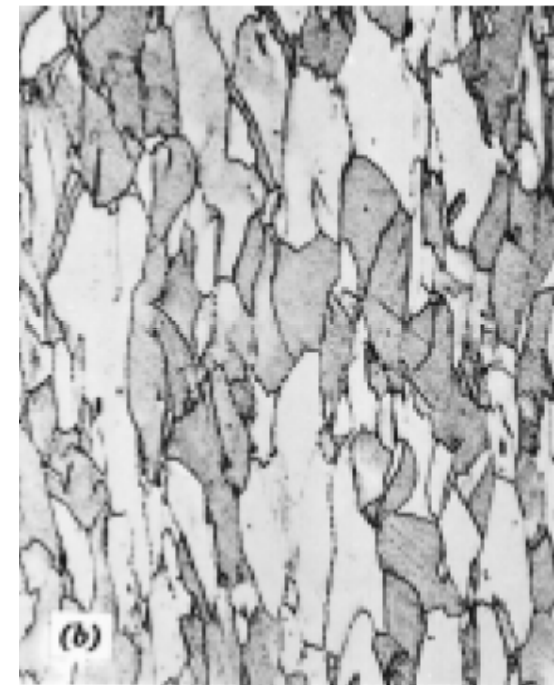
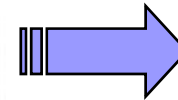
The grains are constrained in the shape by its neighbor grain



equiaxed



elongated  
along the  
direction  
extended



# Chapter One:

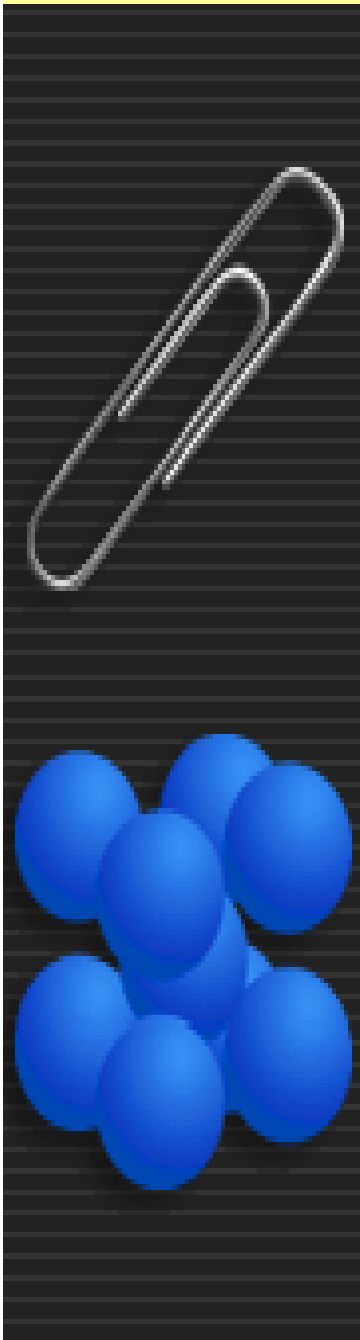
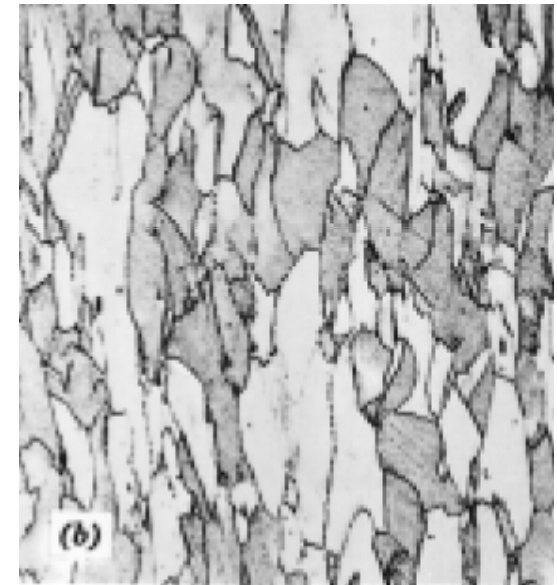
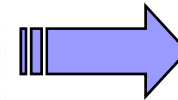
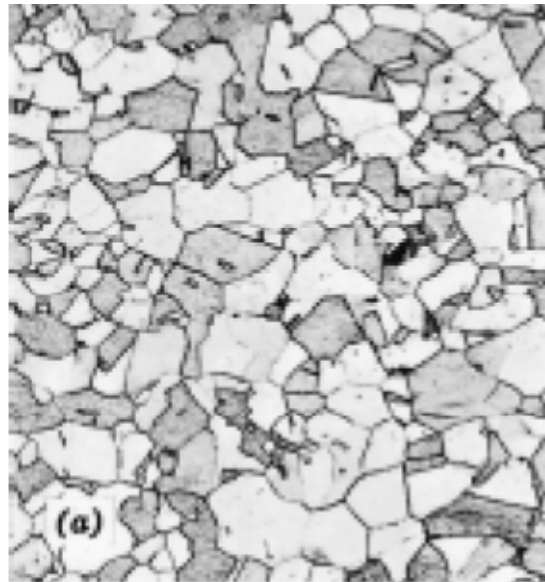
## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### *PLASTIC DEFORMATION OF POLYCRYSTALLINE METALS* ❖

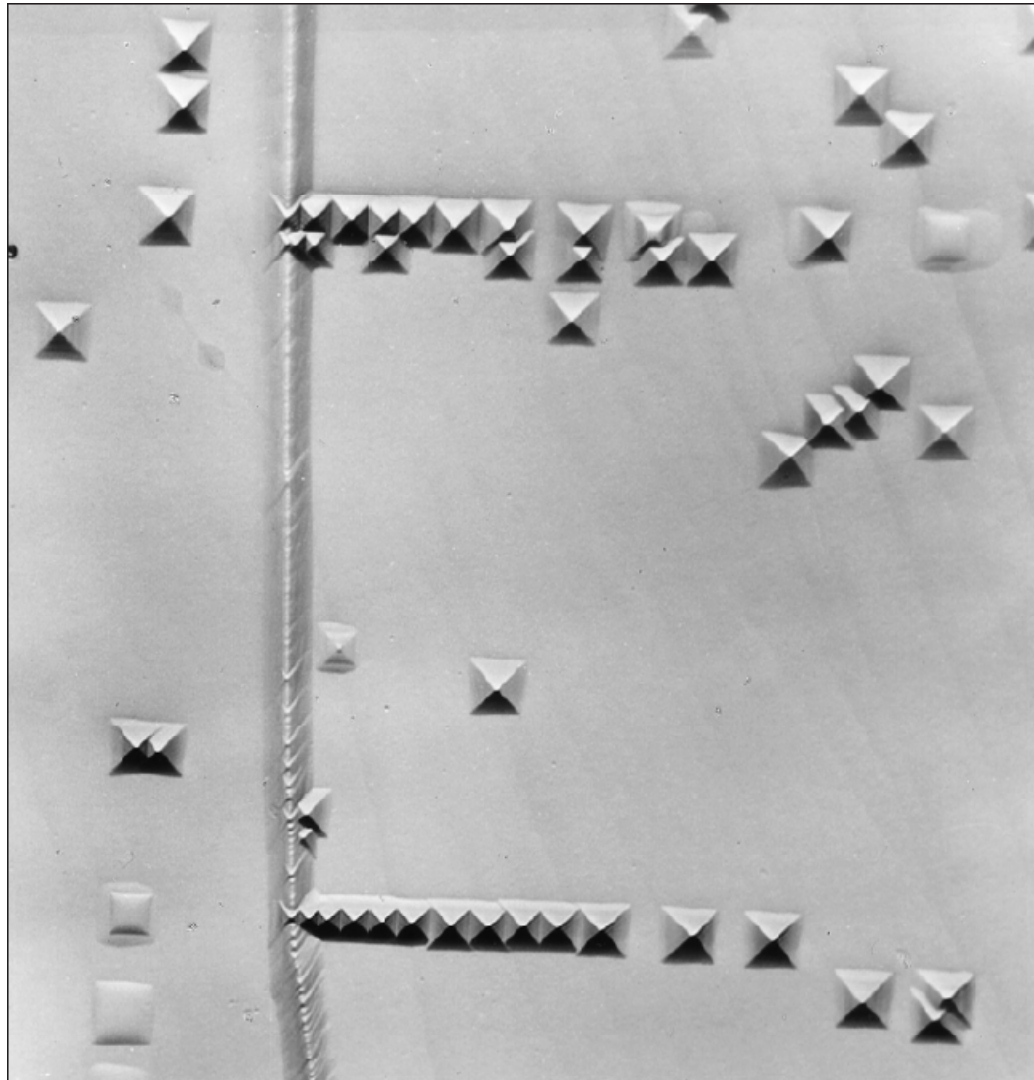
فلزات polycrystalline از single crystal سخت ترند ➤

Stress بالاتری جهت plastic deformation نیاز دارند ➤

➤ Even though a single grain may be favorably oriented with the applied stress for slip, it cannot deform until the adjacent and less favorably oriented grains are capable of slip also; this requires a higher applied stress level.







In this photomicrograph of a lithium fluoride (LiF) single crystal, the small pyramidal pits represent those positions at which dislocations intersect the surface. The surface was polished and then chemically treated; these "etch pits" result from localized chemical attack around the dislocations and indicate the distribution of the dislocations. 750X. (Photomicrograph courtesy of W. G. Johnston, General Electric Co.)



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SCIENCE @ DIRECT®

Biomaterials 27 (2006) 3532–3539

---

---

**Biomaterials**

---

---

[www.elsevier.com/locate/biomaterials](http://www.elsevier.com/locate/biomaterials)

## The significance of crystallographic texture of titanium alloy substrates on pre-osteoblast responses

Shahab Faghihi<sup>a,e</sup>, Fereshteh Azari<sup>b</sup>, Huolong Li<sup>c</sup>, Mohammad R. Bateni<sup>c</sup>, Jerzy A. Szpunar<sup>c</sup>,  
Hojatollah Vali<sup>b</sup>, Maryam Tabrizian<sup>a,d,e,f,\*</sup>

<sup>a</sup>*Department of Biomedical Engineering, McGill University, Montreal, Que., Canada H3A 2B4*

<sup>b</sup>*Department of Anatomy and Cell Biology, McGill University, Montreal, Que., Canada H3A 2B2*

<sup>c</sup>*Department of Mining, Metals and Materials Engineering, McGill University, Montreal, Que., Canada H3A 2B2*

<sup>d</sup>*Faculty of Dentistry, McGill University, Montreal, Que., Canada H3A 2B2*

<sup>e</sup>*Centre for Biorecognition and Biosensors, McGill University, Montreal, Que., Canada H3A 2B2*

<sup>f</sup>*McGill Institute for Advanced Materials, McGill University, Montreal, Que., Canada H3A 2B2*

Received 16 September 2005; accepted 6 February 2006

Available online 20 March 2006

# Implant Failure

- 2 million hip implantation procedure
- 9 percent of replacement
- 10 -15 years implant durability

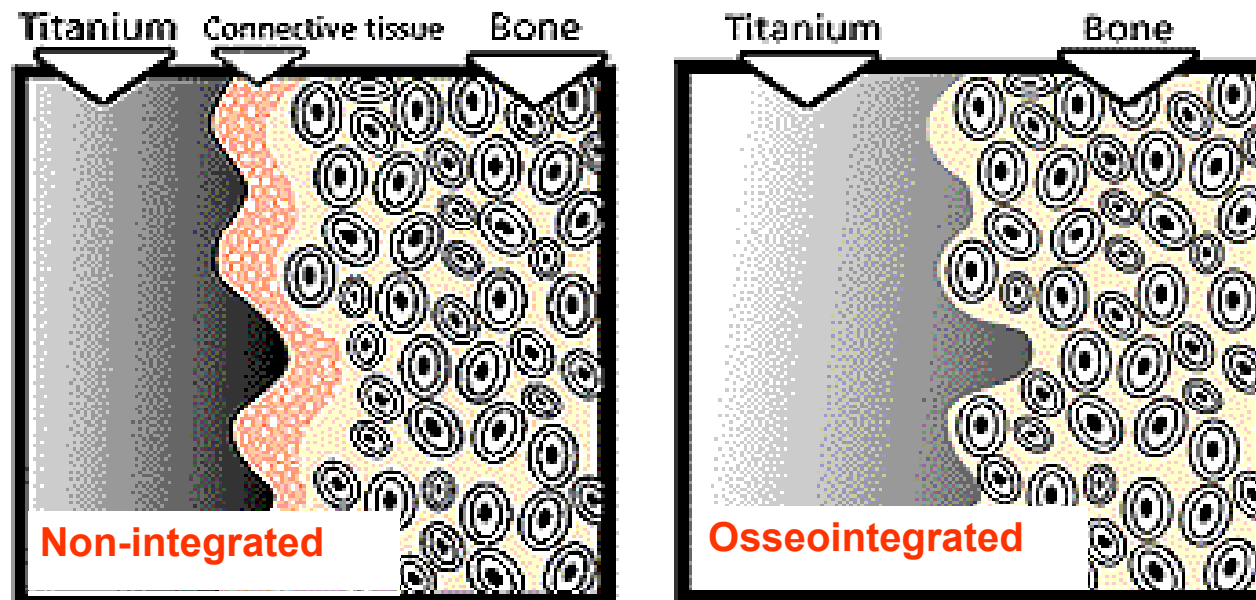
| * Reason for Failure            | 1986-1991 | 1992-1996 | 1997-2001 |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Aseptic loosening               | 38%       | 33%       | 24%       |
| Instability                     | 9%        | 35%       | 42%       |
| Infection                       | 15%       | 15%       | 13%       |
| Polyethylene wear or osteolysis | 4%        | 6%        | 4%        |
| Painful hemiarthroplasty        | 28%       | 8%)       | 16%       |
| Periprosthetic fracture         | 6%        | 3%        | 1%        |



□ To investigate the effects of crystallographic texture of titanium based materials on the cell-substrate interactions

# Instability of Implants

Bone density and soft tissue balance



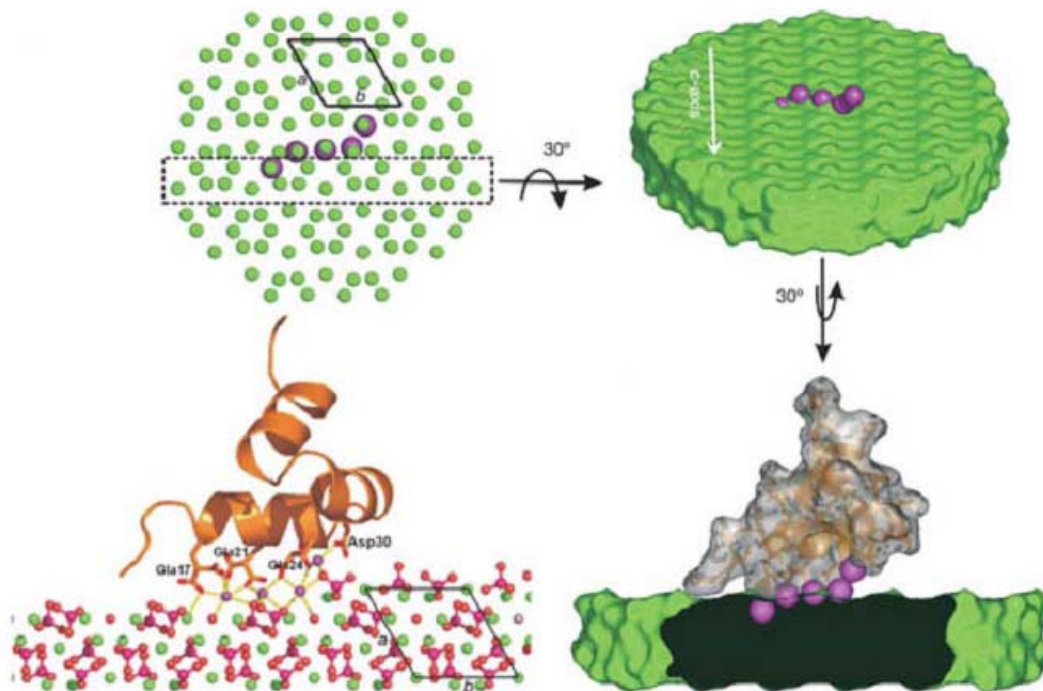
Two type of integration:

- Fibro-osseous integration
- Direct bone-implant integration (Osseointegration)

**In calcium phosphate**

# Concept

- Recognition of crystal structure by functional groups of biomolecules can lead to:
  - ❖ nucleation of minerals<sup>1</sup>
  - ❖ polymerization\organized structure of proteins<sup>2</sup>



1- Falini et al. Science 1996; 271: 67-69  
2- Hoang et al. Nature 2003; 425: 977-980

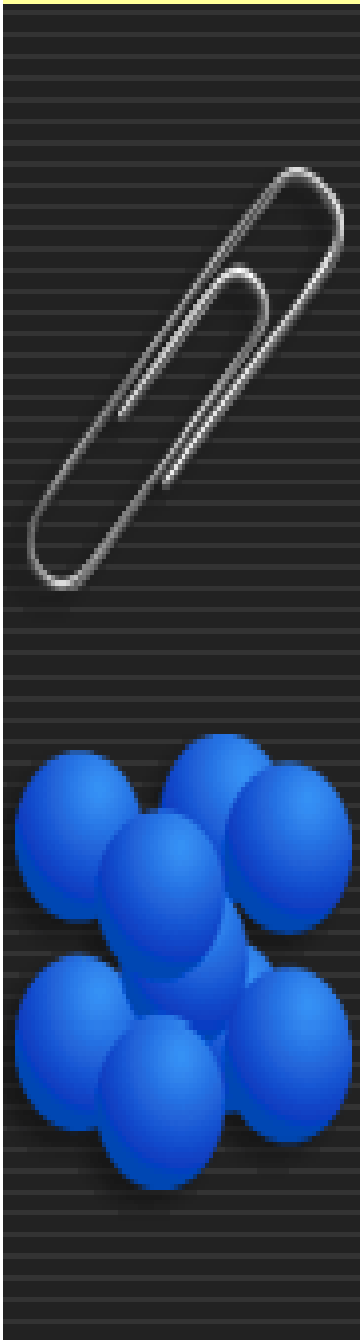
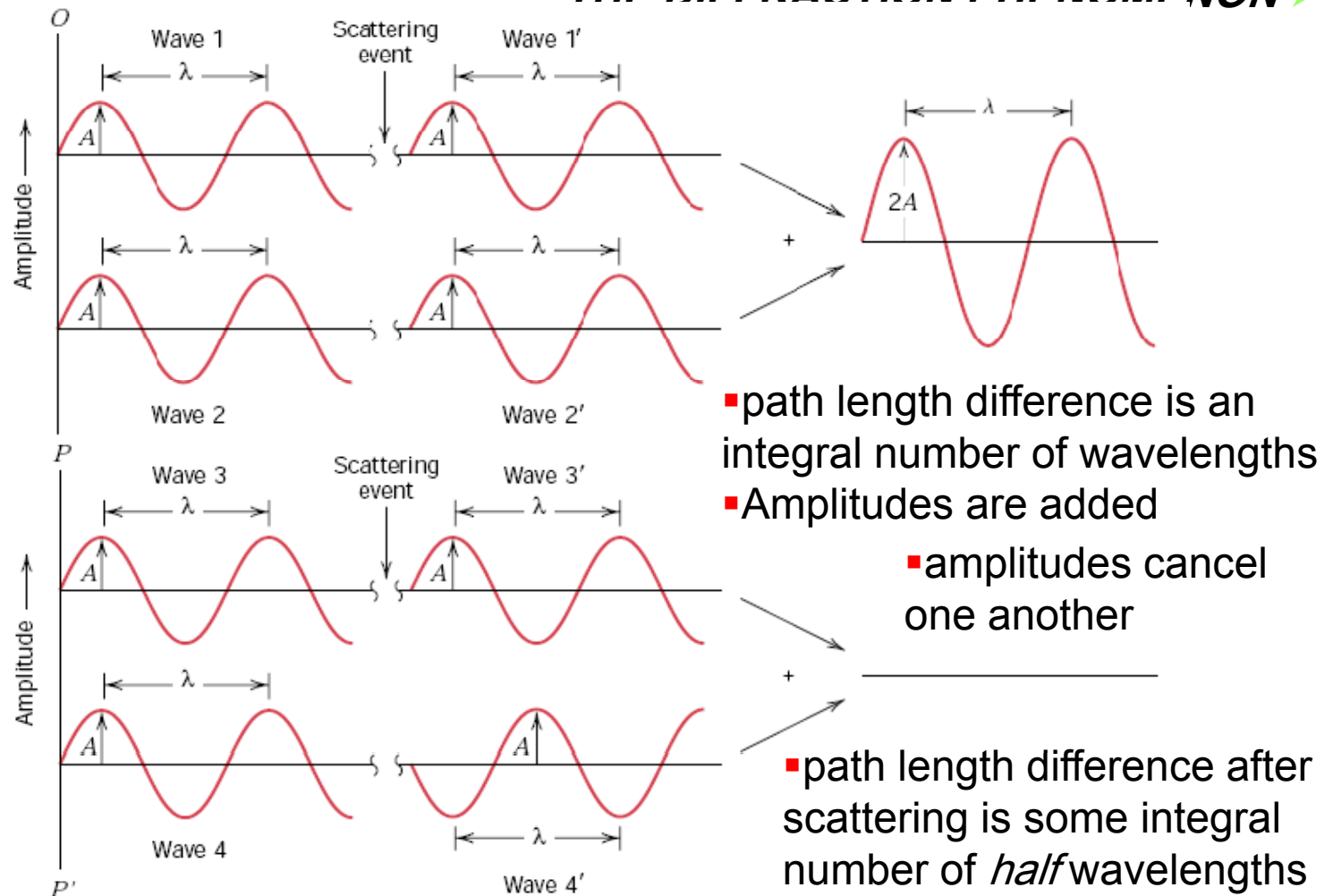
# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### *X-RAY DIFFRACTION: DETERMINATION OF CRYSTAL STRUCTURES*



#### *THE DIFFRACTION PHENOMENON* ➤



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

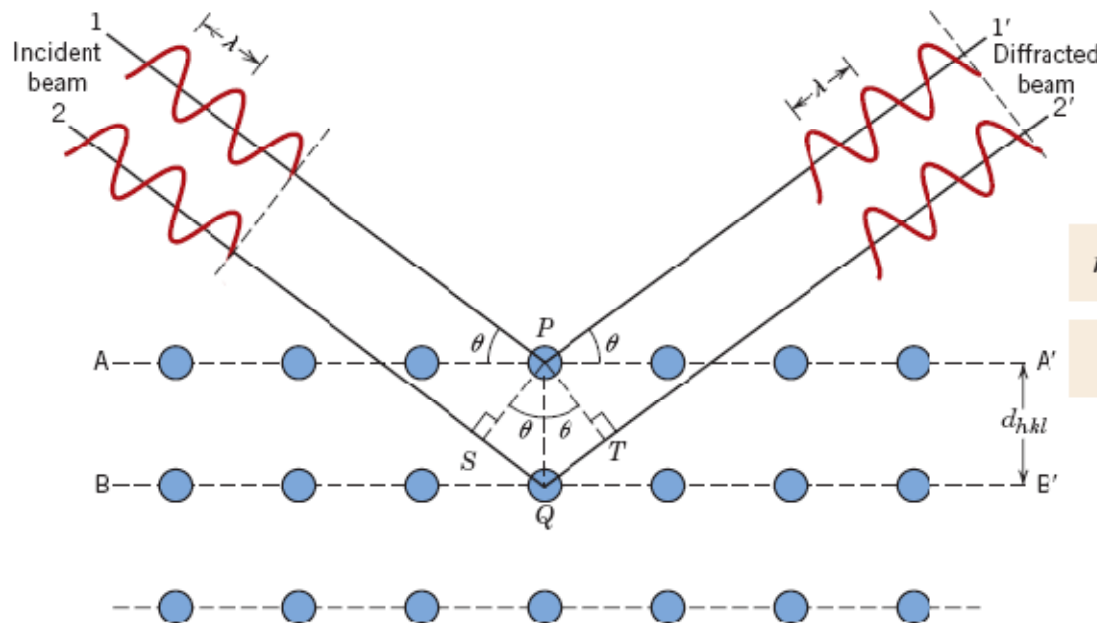
### ***X-RAY DIFFRACTION: DETERMINATION OF CRYSTAL STRUCTURES***



#### ***X-RAY DIFFRACTION AND BRAGG'S LAW*** ➤

➤ دو مشخصه x-ray: طول موج کوتاه (انرژی بالا) و طول موج در مقیاس فواصل اتمی  
atomic spacings for solids

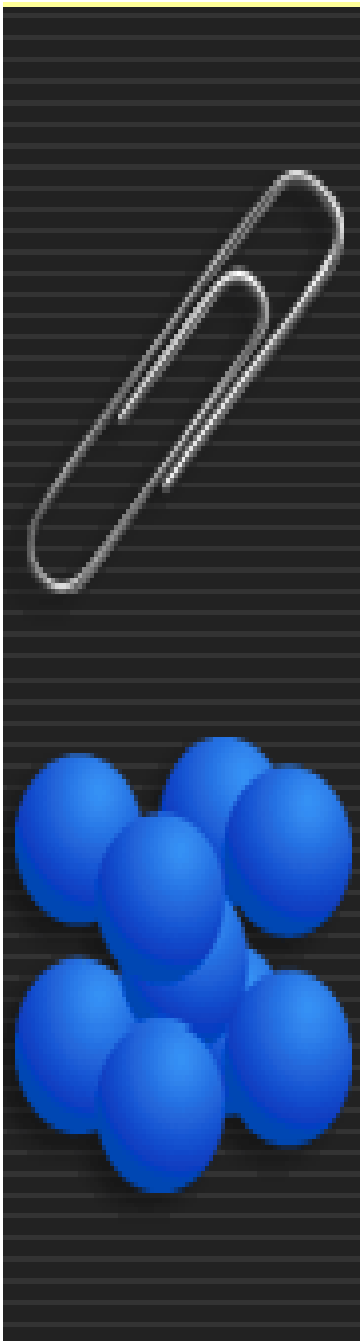
➤ اشعه ایکس تحت زاویه  $\theta$  تابیده (نسبت به صفحات) و با زاویه  $\theta$  پراش کرده  
اگر اختلاف مسیر اشعه یعنی  $2Q2'$  و  $1P1'$  مضرب صحیح طول موج  $\lambda$  باشد  
( $SQ+QT$ )



$$n\lambda = SQ + QT$$

$$n\lambda = d_{hkl} \sin \theta + d_{hkl} \sin \theta$$

$$= 2d_{hkl} \sin \theta$$



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### X-RAY DIFFRACTION: DETERMINATION OF CRYSTAL STRUCTURES



#### X-RAY DIFFRACTION AND BRAGG'S LAW

$$n\lambda = SQ + QT$$

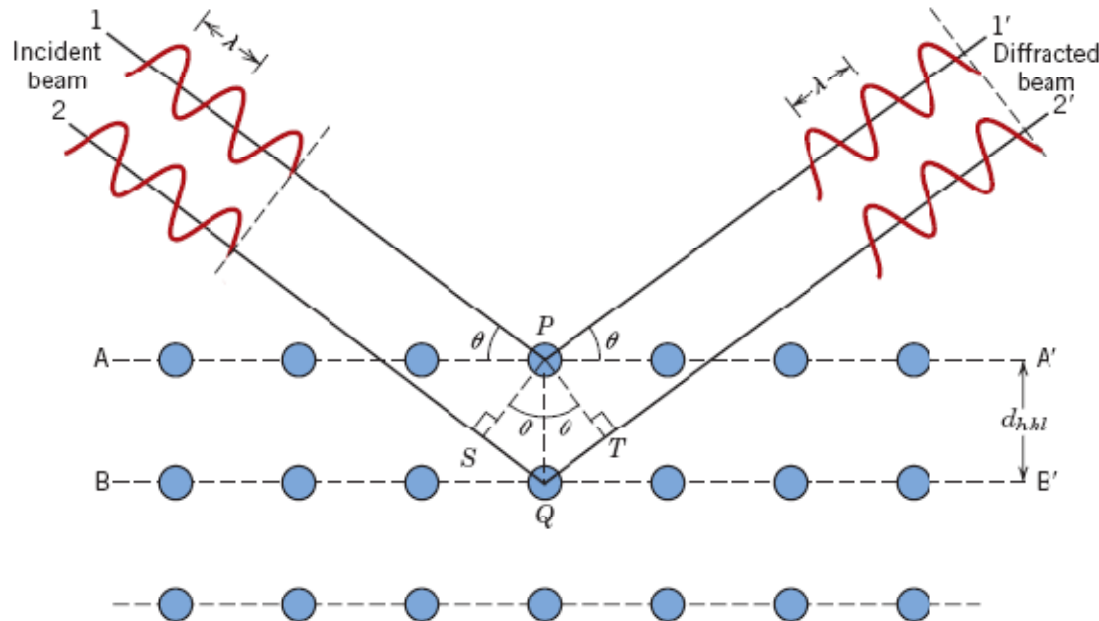
بنابر این شرط پراش و تقویت دو موج:

$$n\lambda = d_{hkl} \sin \theta + d_{hkl} \sin \theta = 2 d_{hkl} \sin \theta$$

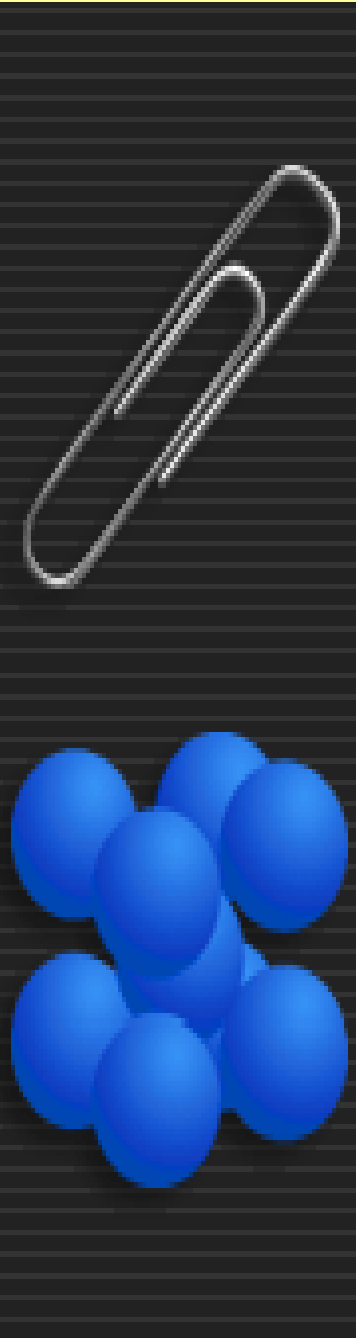
در صورتی که شرط براگ صادق باشد موج

پراشیده تقویت می‌گردد (constructive)

**Bragg's law;**



**hkl  
similar**



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### *X-RAY DIFFRACTION: DETERMINATION OF CRYSTAL STRUCTURES*



#### *X-RAY DIFFRACTION AND BRAGG'S LAW* ➤

$$n\lambda = SQ + QT$$

➤ بنابراین شرط پراش و تقویت دو موج:

$$n\lambda = d_{hkl} \sin \theta + d_{hkl} \sin \theta = 2 d_{hkl} \sin \theta$$

➤ در صورتی که شرط براگ صادق باشد موج

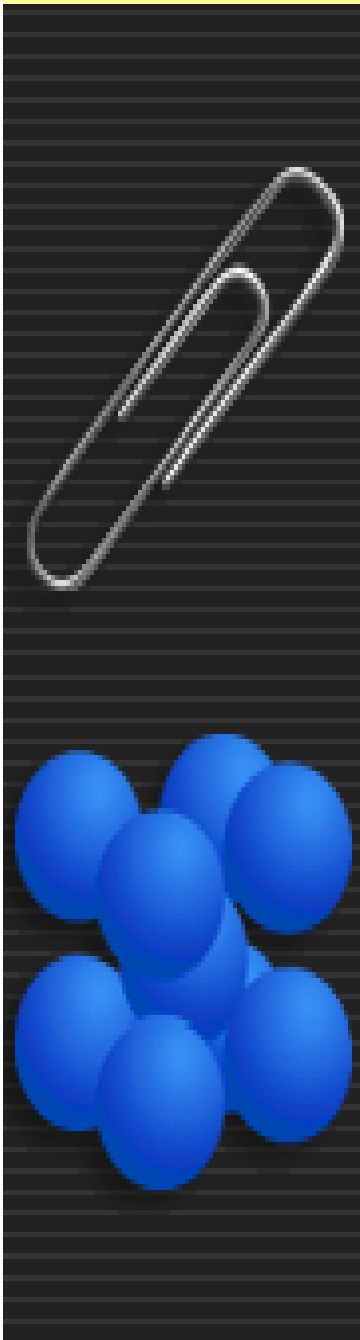
**Bragg's law;**

پراشیده تقویت می‌گردد (constructive)

➤ فاصله بین صفحات موازی  $d_{hkl}$  spacing تابعی از اندیسه‌های میلر و پارامترهای

شبكة بلور می باشد مثلا در سیستم مکعبی:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### *X-RAY DIFFRACTION: DETERMINATION OF CRYSTAL STRUCTURES*



#### *THE DIFFRACTION TECHNIQUES* ➤

➤ نمونه Powder و یا polycrystalline با تعداد زیاد دانه با جهت گیری متفاوت

➤ نمونه S در diffractometer قرار گرفته و حول محور O قابلیت گردش دارد

➤ اشعه از محل T ساطع و در C (counter) شمارش می‌گردد

➤ **x-ray source, sample and counter are all coplanar**

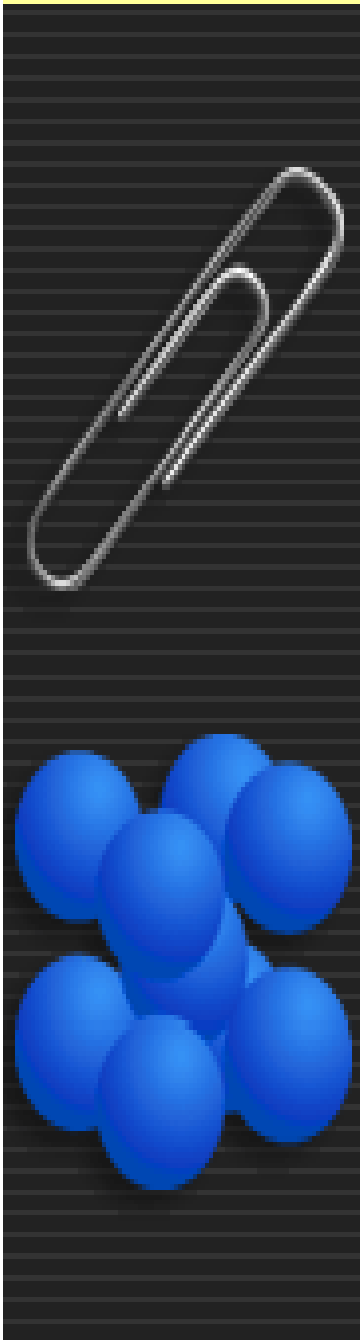
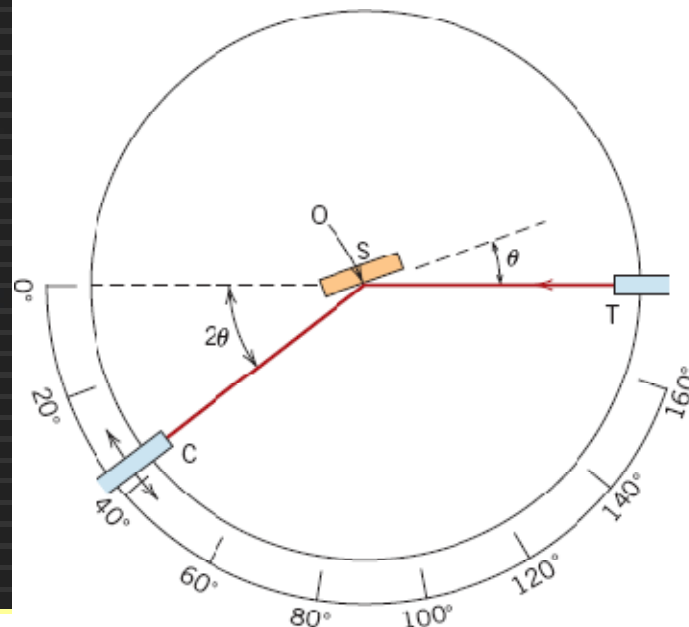
➤ Counter در حول محور O و تحت زاویه  $2\theta$

گردش می‌نماید و محل آن بروی صفحه مدرج مشخص است

➤ اشعه bean از collimator عبور کرده تا پرتوی متمرکز focused به detector برسد

➤ Counter تحت سرعت ثابت حرکت کرده و شدت

intensity اشعه پراش یافته را ثبت می‌نماید





# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### *X-RAY DIFFRACTION: DETERMINATION OF CRYSTAL STRUCTURES*



#### *THE DIFFRACTION PHENOMENON* ➤

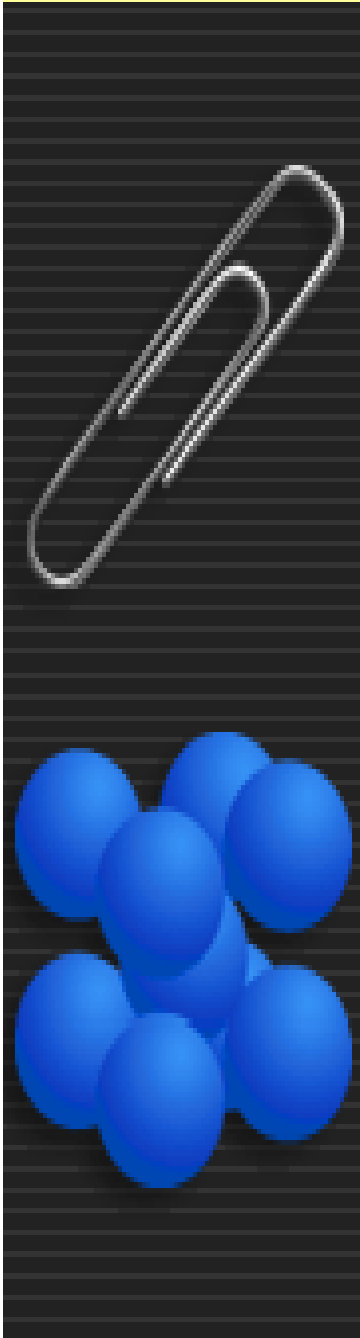
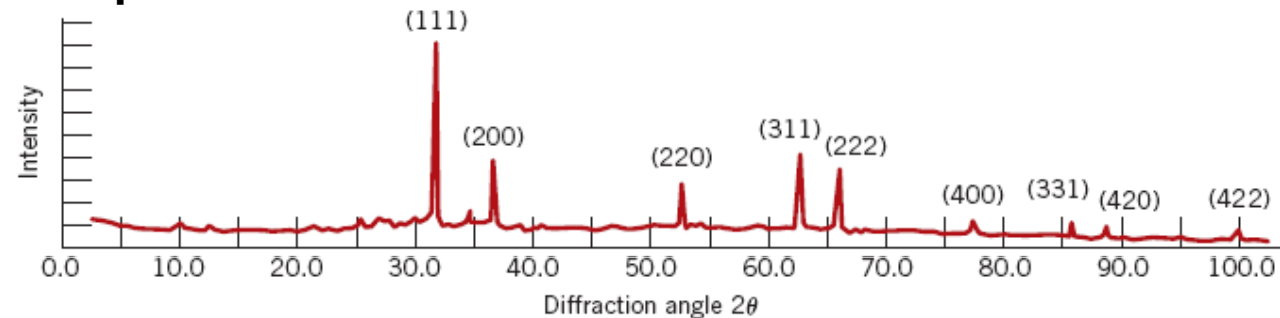
➤ پیکهای با شدت بالا در اثر فراهم شدن شرایط Bragg's diffraction از صفحات کریستالی مربوطه ظاهر میشوند

➤ کاربرد اولیه x-ray diffractometry تعیین ساختار کریستالی میباشد

شکل سلول واحد بر اساس موقعیت  $\theta$  peak

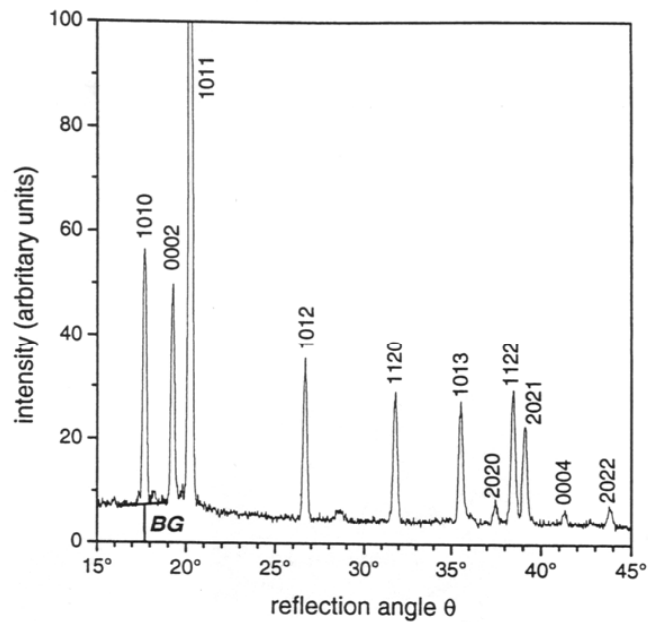
موقعیت اتمها atomic arrangement بر اساس شدت peak intensity

**Plane indexed- powder lead**

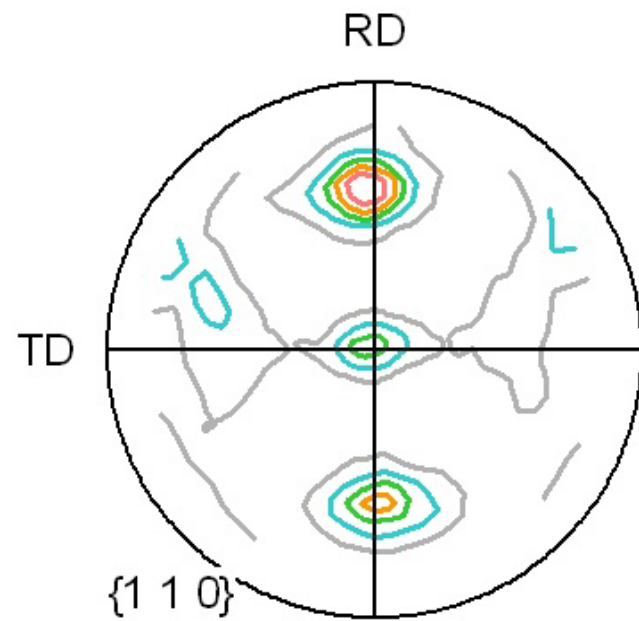


# Texture Measurement

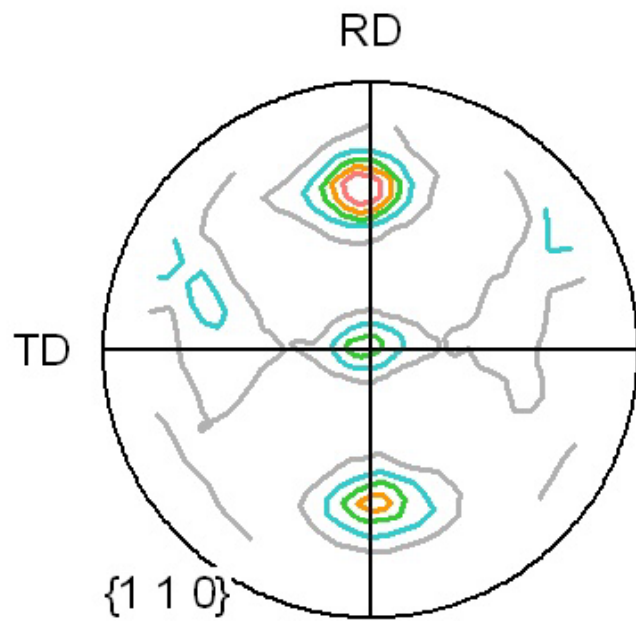
X-ray Diffraction



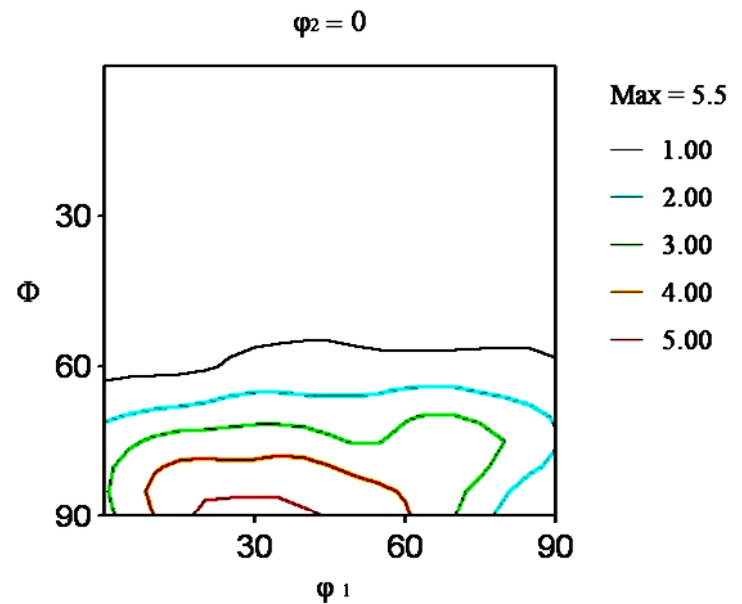
Pole Figure-*TexTools* Software



Pole Figure- TexTools Software



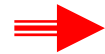
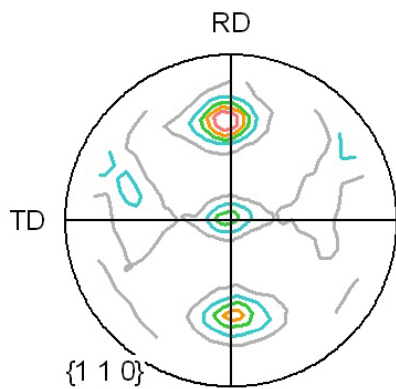
Orientation Distribution Function (ODF)- TexTools Software



# METHOD

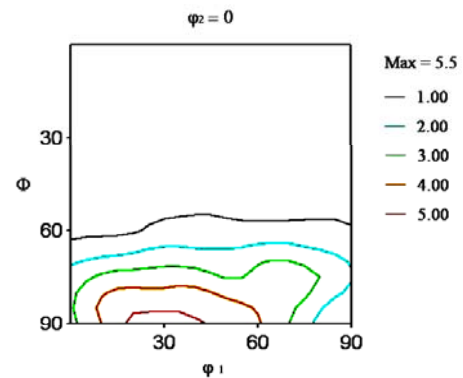
**X-ray Diffraction**

**Pole Figure**



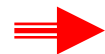
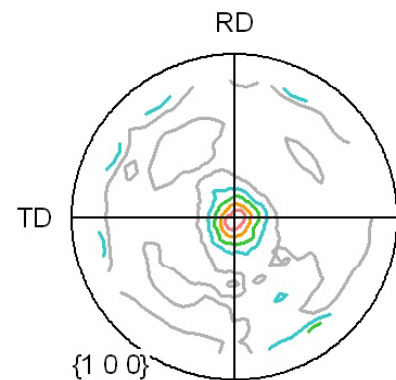
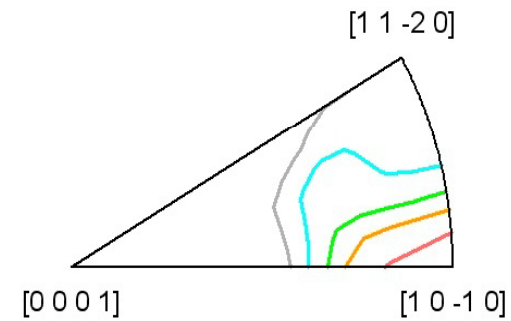
**TexTools software**

**ODF**



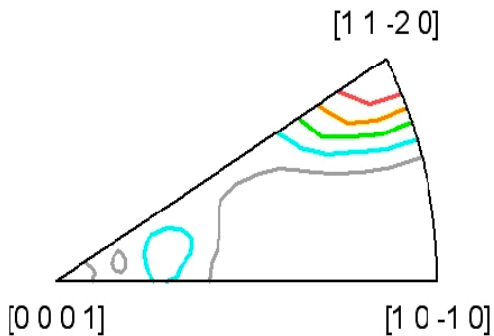
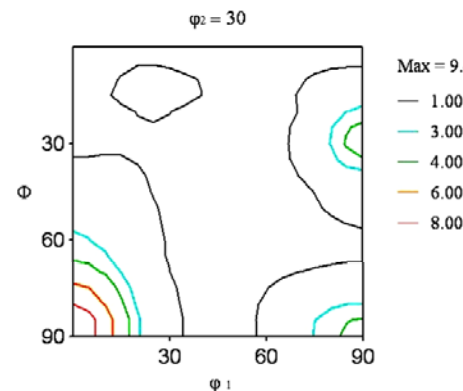
**TexTools software**

**Inverse Pole Figure**

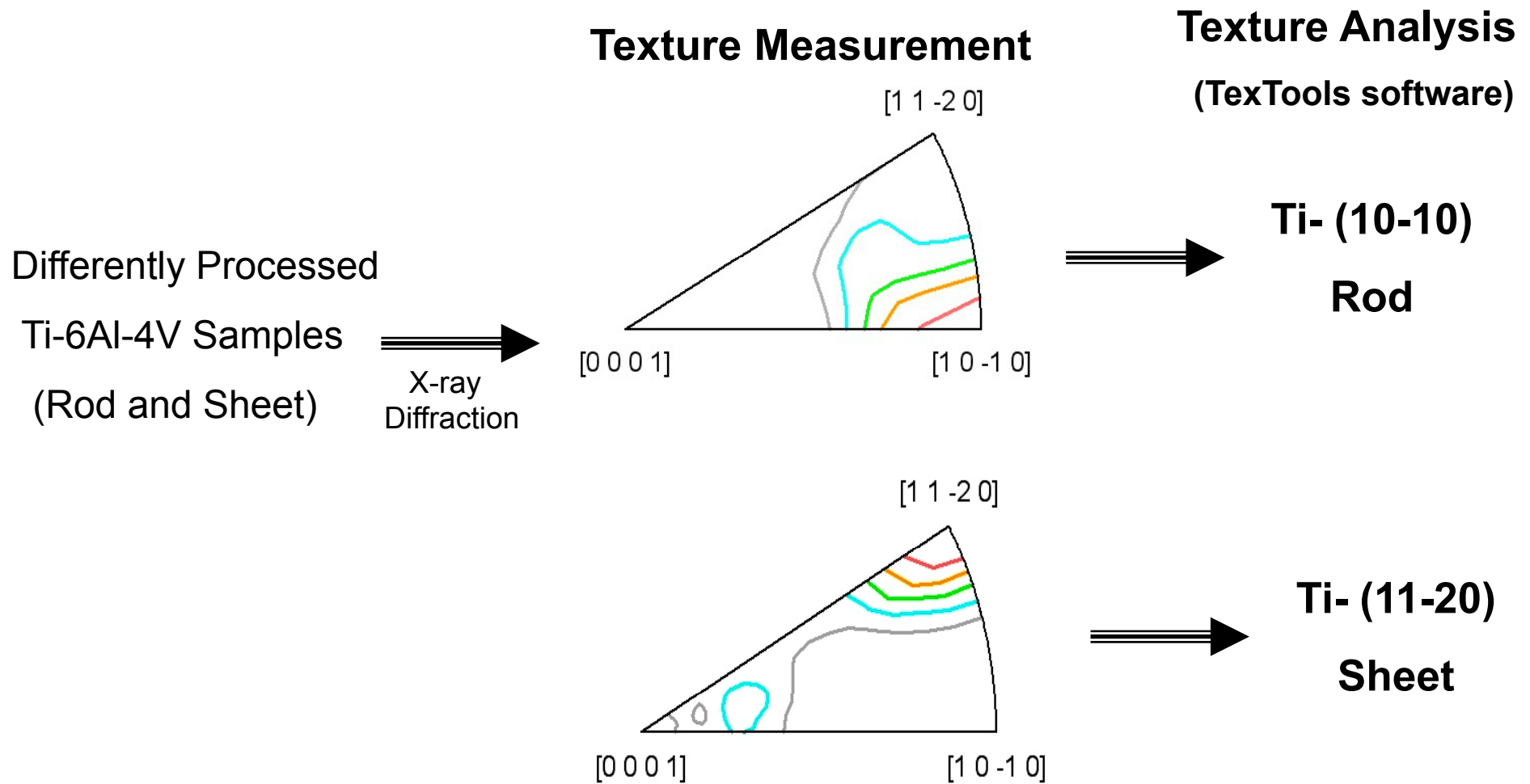


**TexTools software**

**ODF**



# Texture Measurement



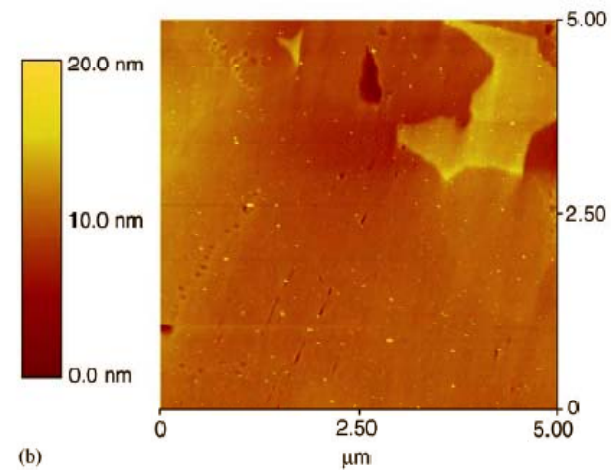
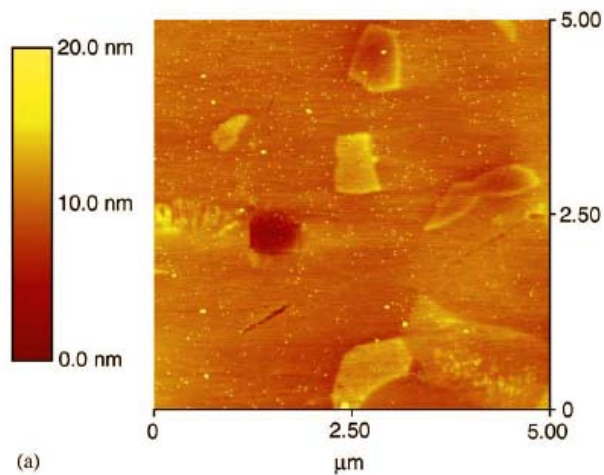
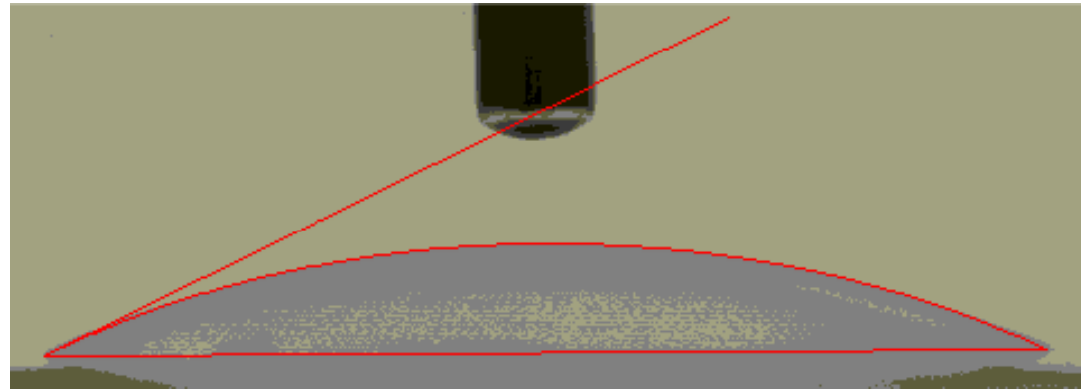
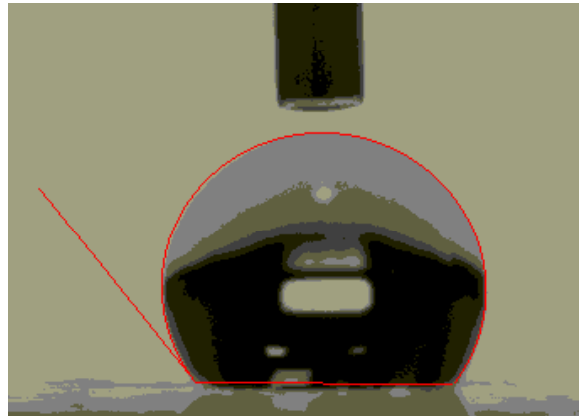
Preparation and surface characterization  
of Ti alloy substrates (Rod & Sheet)

- ❑ AFM
- ❑ Contact Angle Measurement
- ❑ Crystallographic texture analysis; *X-ray Diffraction*

Cell growth and behavior on  
Ti-6Al-4V substrates

- ❑ Cell attachment
- ❑ Cell proliferation
- ❑ Alkaline phosphatase activity
- ❑ Total protein content
- ❑ Cell morphology- *SEM*

# Characterization



Aqueous contact angles values were calculated by image analyzer software.  
Values are mean  $\pm$  SD;  $n=5$ . \*  $P<0.01$  compared to the Ti-(11-20)

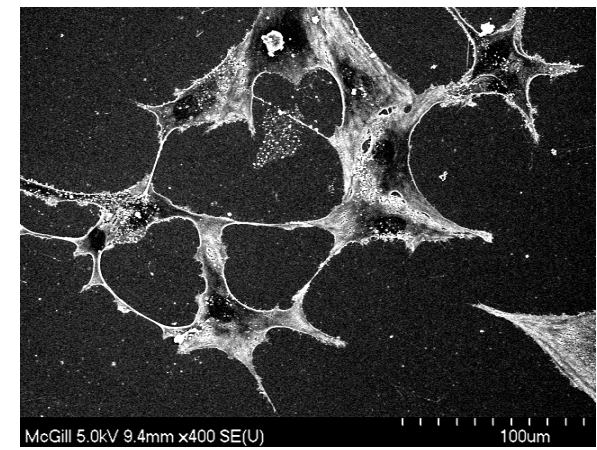
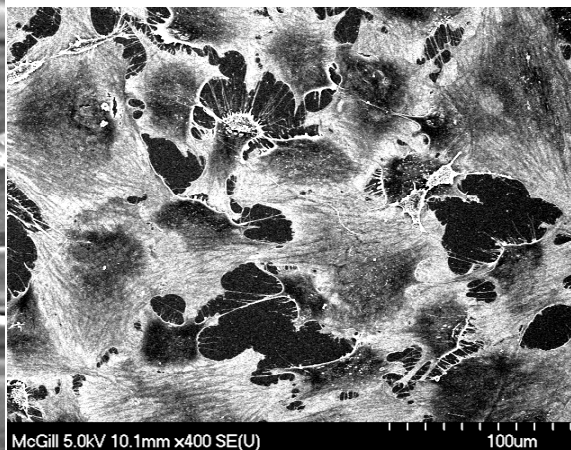
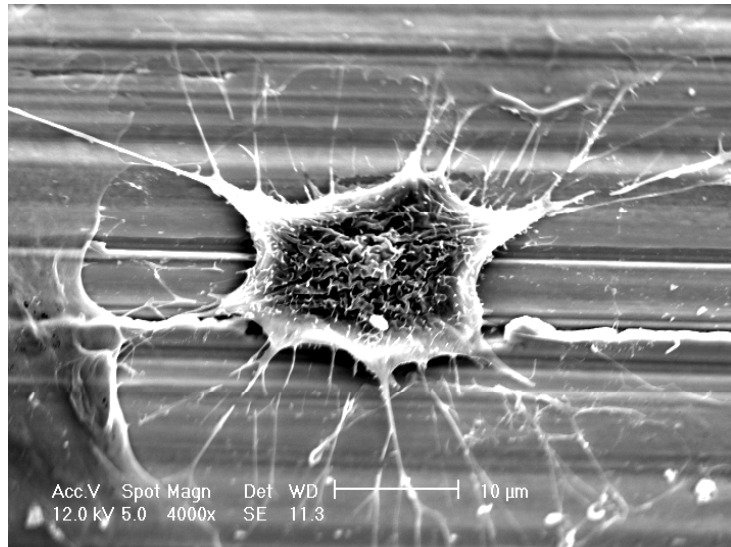
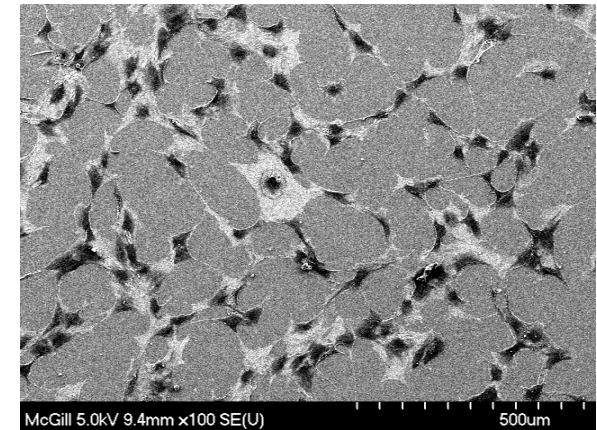
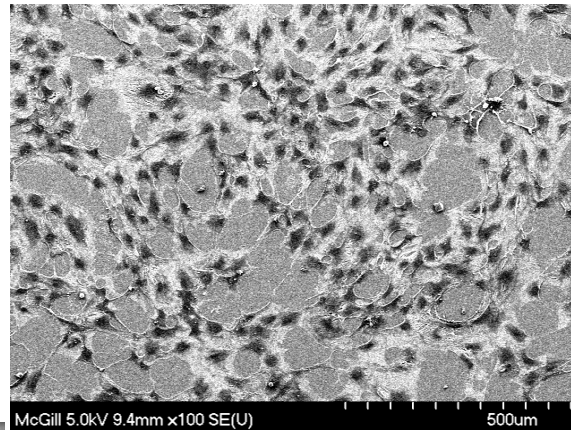
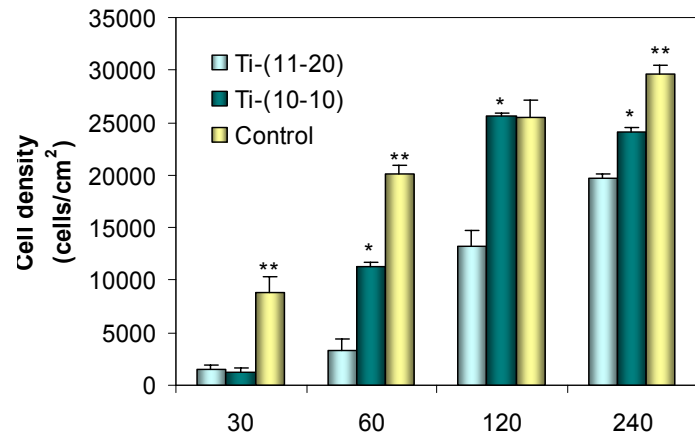


# Cell Attachment

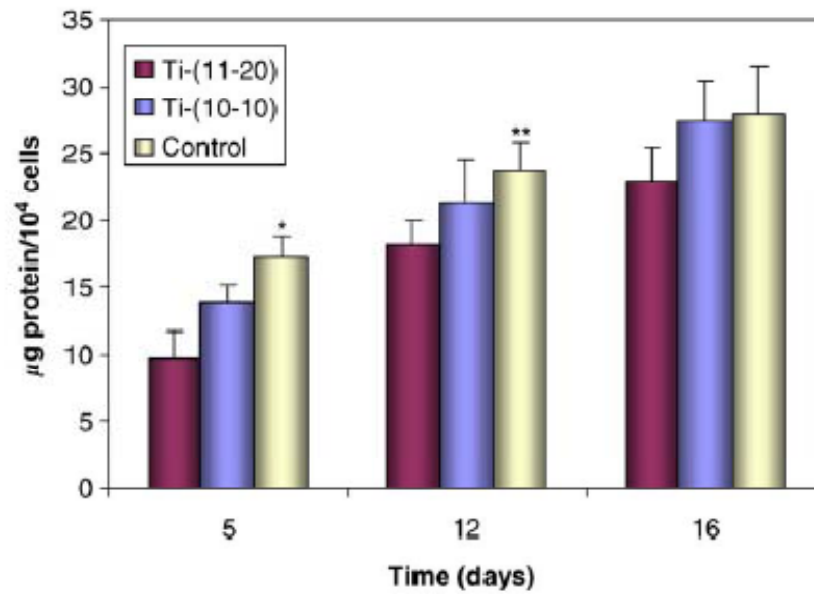
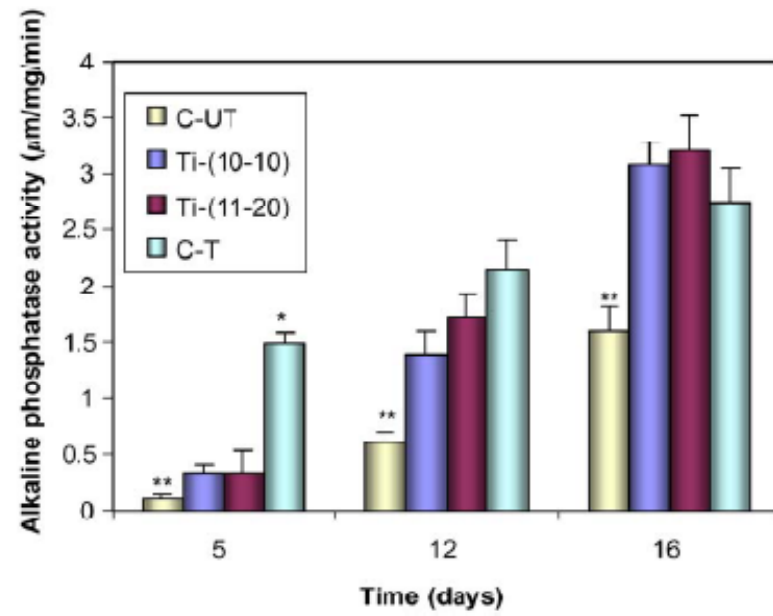
SEM- After 3 Days

(10-10)

(11-20)







# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

### MECHANISMS OF STRENGTHENING IN METALS □

در علم مواد طراحی فلزات با strength بالا به همراه toughness and ductility

معمولا Ductility قربانی می گردد

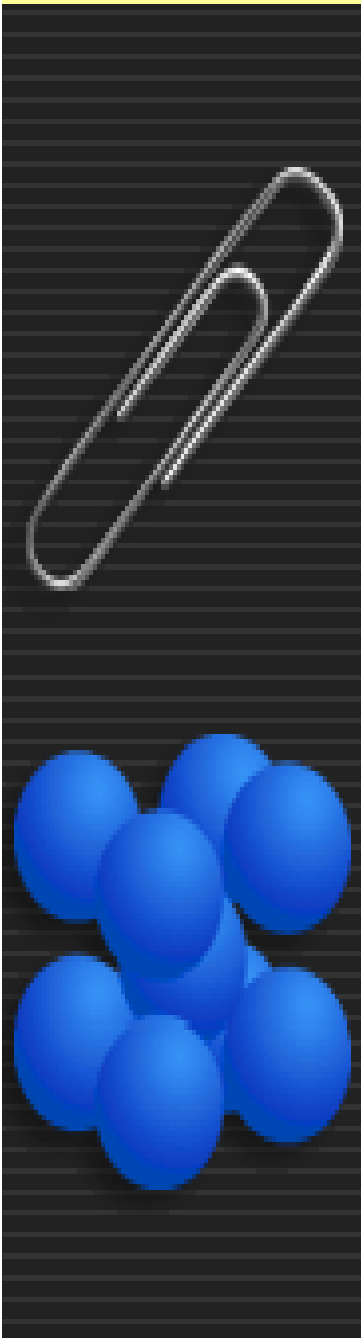
بنابراین انتخاب فلز بر اساس خواص مکانیکی برای کاربرد مورد نظر صورت میگیرد

رابطه بین mechanical properties و dislocation motion در فهم مکانیسم strengthening

➤ ***The ability of a metal to plastically deform depends on the ability of dislocations to move***

➤ **Since hardness and strength are related to the ease with which plastic deformation can be made to occur**

➤ **Reducing the mobility of dislocations, the mechanical strength may be enhanced; that is, greater mechanical forces will be required to initiate plastic deformation**



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

### MECHANISMS OF STRENGTHENING IN METALS □

➤ همچنین بالعکس هرچه dislocations motion راحتتر باشد ماده آسانتر تغییر شکل میدهد و softer and weaker

➤ بنابراین مکانیسم و تکنیکهای strengthening بر اساس این قاعده می باشد:

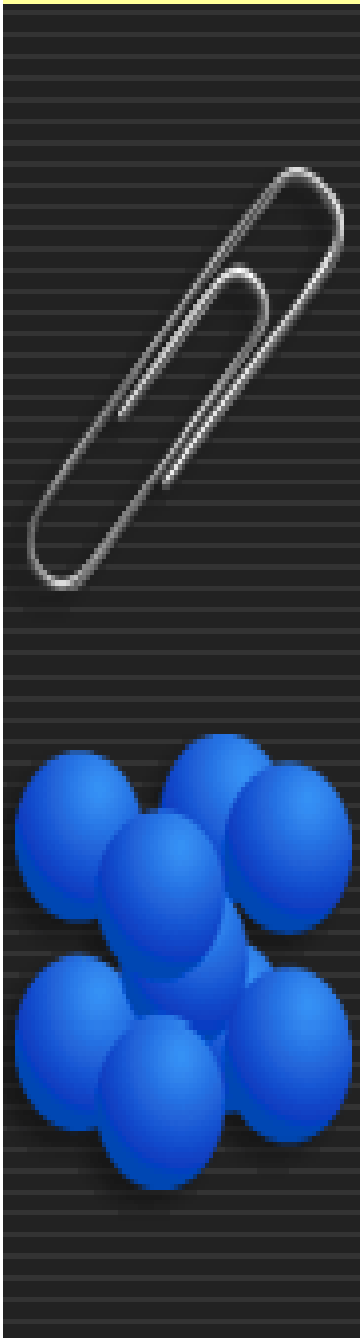
➤ ***Restricting or hindering dislocation motion renders a material harder and stronger***

➤ سه روش برای Strengthening فلزات تک فازی عبارتند از:

▪ ***Grain Size Reduction***

▪ ***Solid Solution Alloying***

▪ ***Strain Hardening***



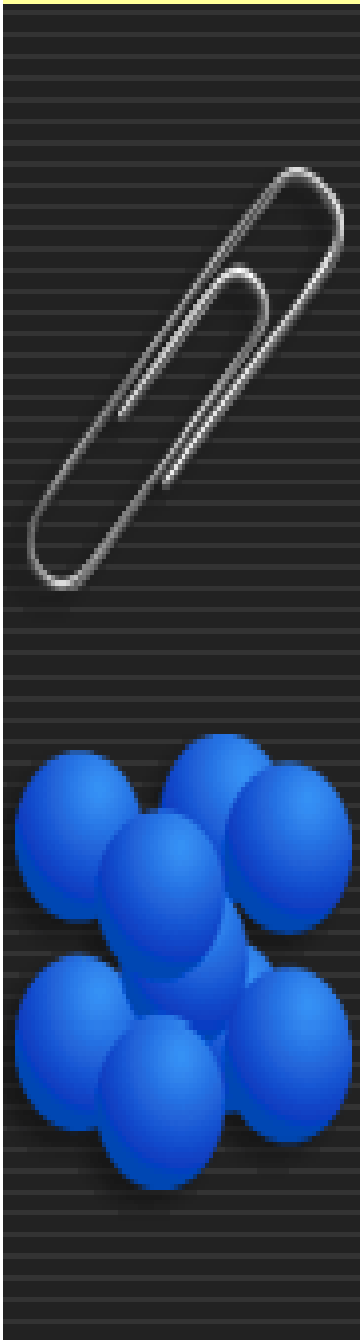
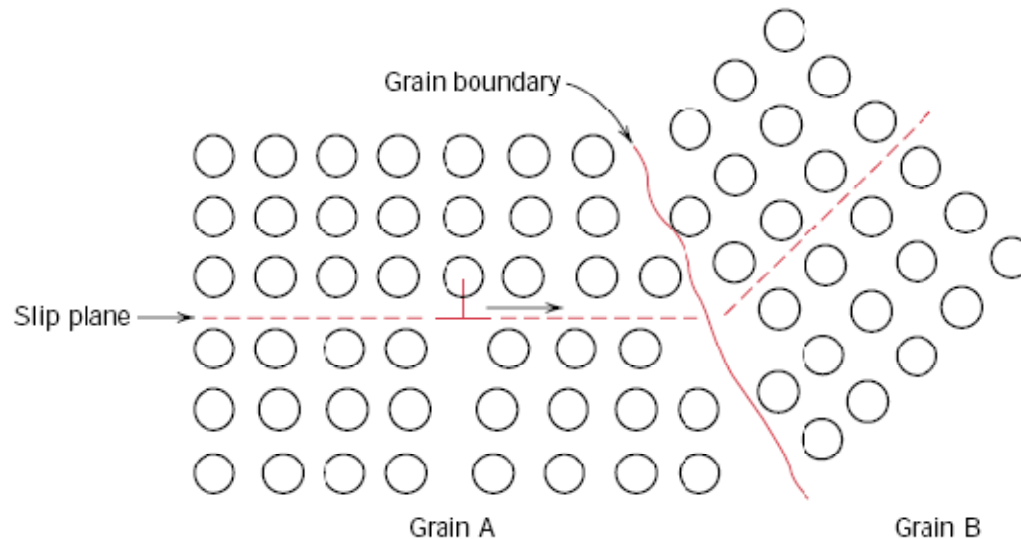
# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### MECHANISMS OF STRENGTHENING IN METALS □

#### ***STRENGTHENING BY GRAIN SIZE REDUCTION*** ❖

- اندازه دانه فلزات (grain size) بروی خواص مکانیکی تاثیر می گذارد؟
- در فلزات polycrystalline دانه های مجاور دارای جهت گیری orientation متفاوت بوده با grain boundaries
- slip و dislocation باید از این مرز مشترک عبور نماید *Grain A to B*



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

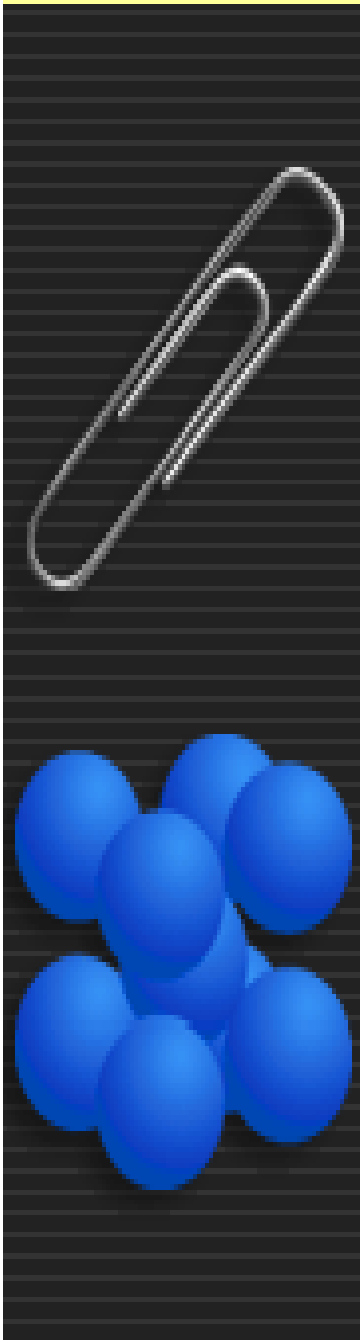
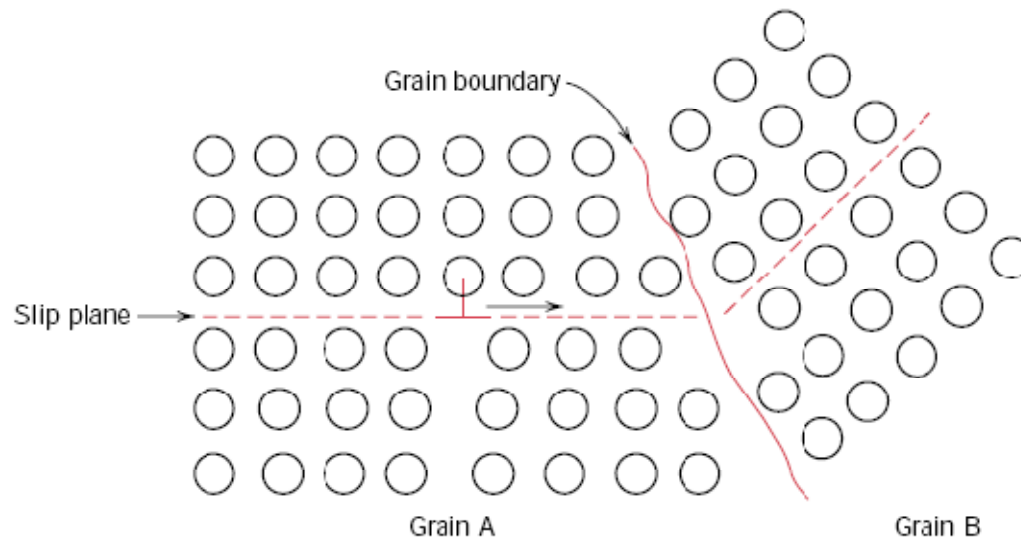
### MECHANISMS OF STRENGTHENING IN METALS □

#### ***STRENGTHENING BY GRAIN SIZE REDUCTION*** ❖

➤ grain boundary به دو دلیل مانع حرکت dislocations می باشد:

۱- بدلیل جهت گیری متفاوت different orientation دانه های مجاور حرکت dislocation باید تغییر مسیر (direction of motion) دهد (با افزایش *misorientation* مشکل تر میگردد)

۲- در هم ریختگی اتمها atomic disorder در مرز دانه باعث قطع *Slip plane* میگردد (بین دو دانه مجاور)



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### MECHANISMS OF STRENGTHENING IN METALS □

#### ***STRENGTHENING BY GRAIN SIZE REDUCTION*** ❖

➤ در *High-angle grain boundaries* عبور dislocation صورت نگرفته و در عوض با تجمع stress در نوک ahead of slip plane تشکیل dislocation جدید در دانه مجاور adjacent grain فراهم می آید

➤ فلزات با دانه های ریز Fine-grained دارای استحکام بیشتری از Coarse-grained می باشند ؟

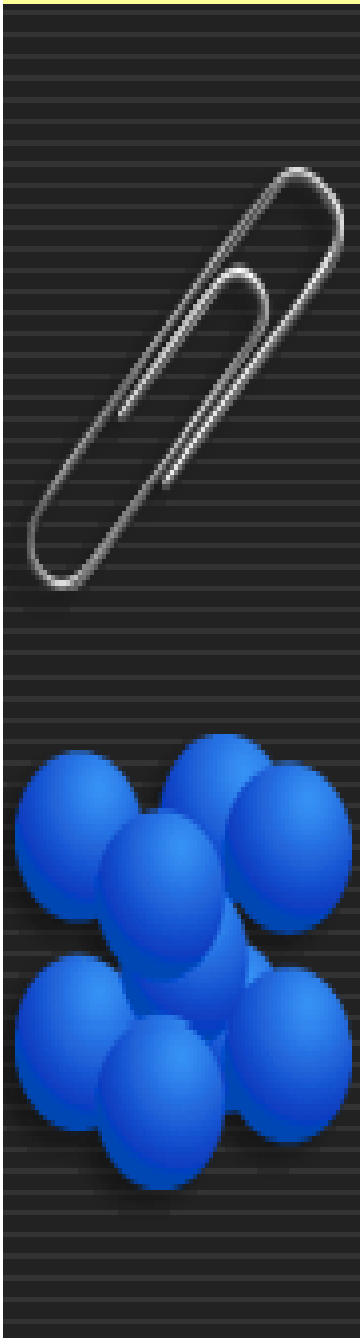
***greater total grain boundary area to impede dislocation motion***

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$

Yield  
strength

*Hall-Petch equation*

**Not valid for extremely fine or coarse grains**



# Chapter One:

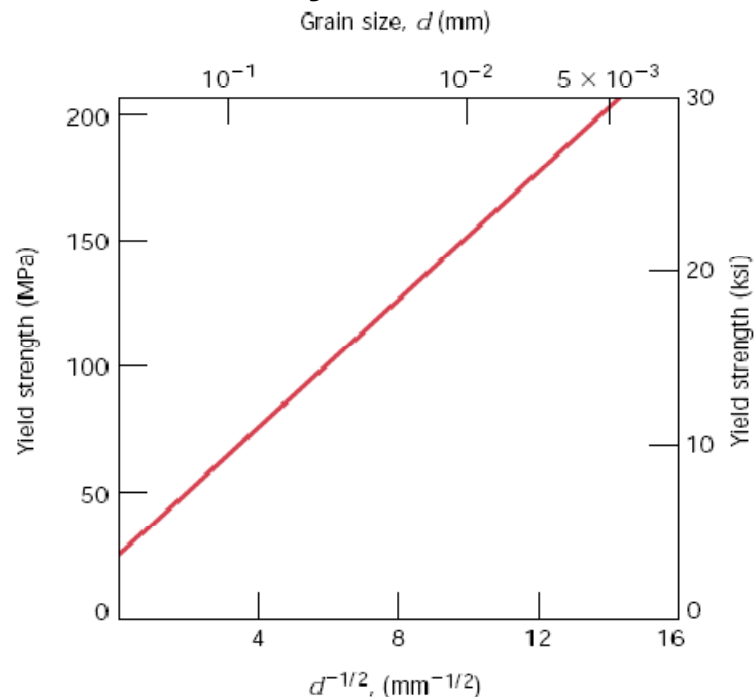
## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### MECHANISMS OF STRENGTHENING IN METALS □

#### ***STRENGTHENING BY GRAIN SIZE REDUCTION*** ❖

- Reduce grain size by: Solidification and Deformation followed by heat treatment

#### Brass alloy: 70% Cu: 30% Zn



*Low angle grain boundaries* ➤

مزاحمت کمتری در slip process دارد

*(slight misalignment)*

*Twin* ➤ به میزان قابل توجه باعث استحکام

➤ مرزبین دانه های دو فاز جلوگیری از slip

(مهم در استحکام آلیاژها)

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$

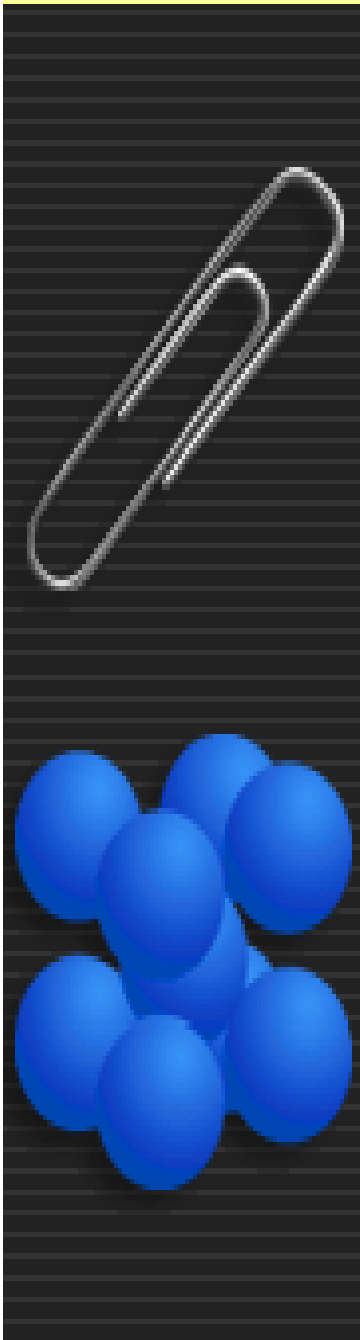
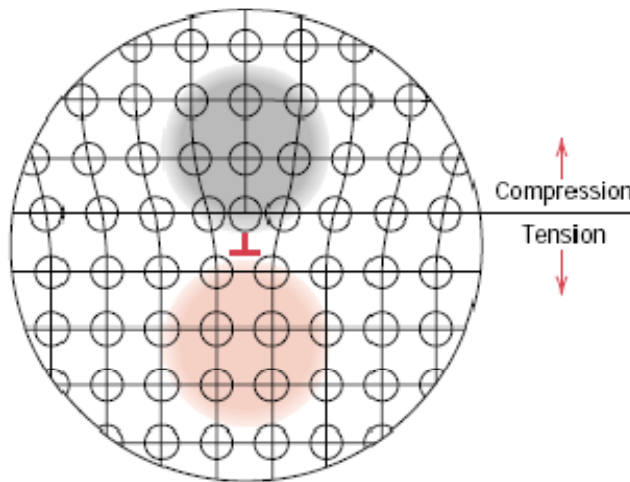
# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### MECHANISMS OF STRENGTHENING IN METALS □

#### **CHARACTERISTICS OF DISLOCATIONS** ❖

- در اثر plastic deformation تقریباً 5% انرژی در فلز بصورت strain energy مربوط به dislocations باقی می ماند (مابقی بشکل گرما)
- نواحی شامل **lattice strain** compressive, tensile and shear در اتمهای اطراف dislocation ها وجود دارد
- اتمها در بالای dislocation line بهم فشرده squeezed و در پایین خط از هم فاصله می گیرند (edge dislocation)
- Compressive strain در بالا و
- Tensile strain در اتمهای پایین
- Shear strain در screw dislocation





# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### MECHANISMS OF STRENGTHENING IN METALS □

#### CHARACTERISTICS OF DISLOCATIONS ❖

- این strain ها بصورت میدان (strain field) در اطراف اطراف dislocation line در نظر گرفته میشود و بزرگی آن بسته به فاصله از dislocation دارد
- strain fields in close proximity با یکدیگر interact کرده مثلا در دو edge dislocation

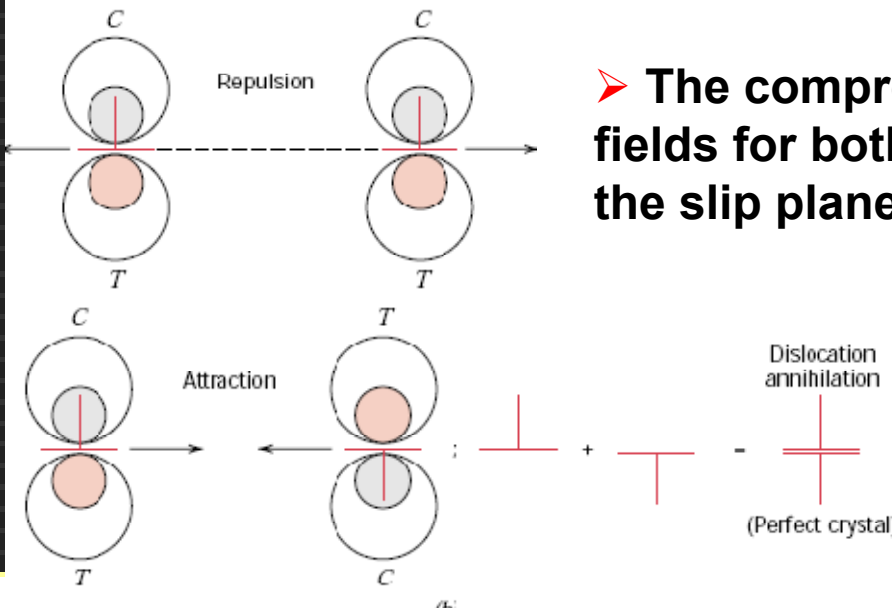
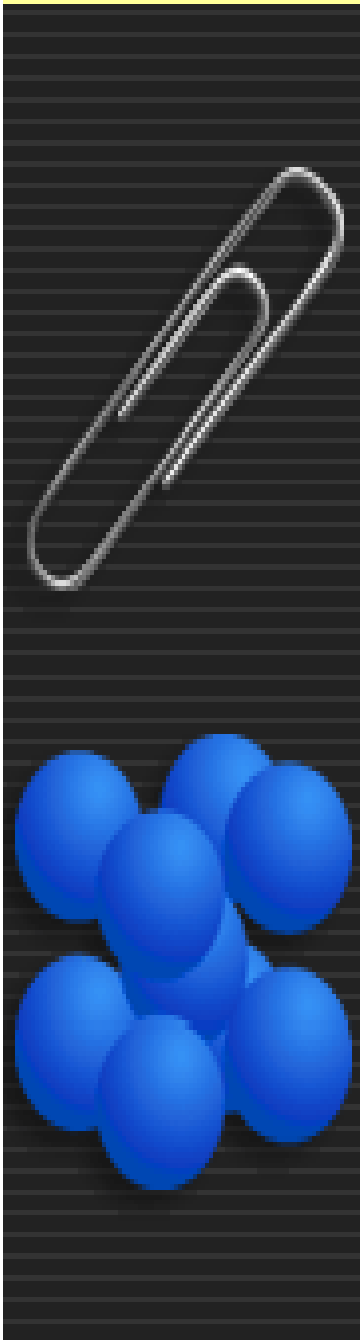
➤ Repulsion در dislocation ها با علامت یکسان

➤ **The compressive and tensile strain fields for both lie on the same side of the slip plane**

➤ جاذبه در dislocation ها با علامت مخالف with same slip plane

➤ **Dislocation Annihilation**

➤ دو نیم صفحه کامل می شوند



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### MECHANISMS OF STRENGTHENING IN METALS □

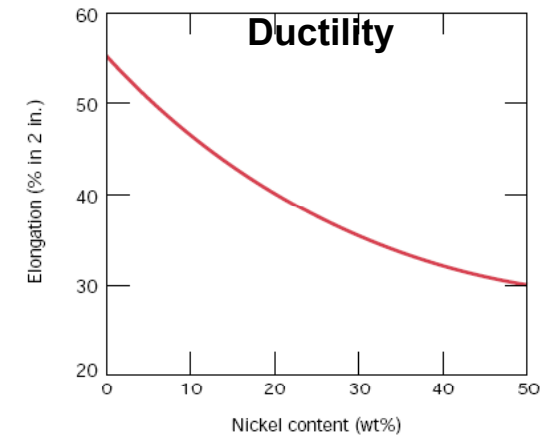
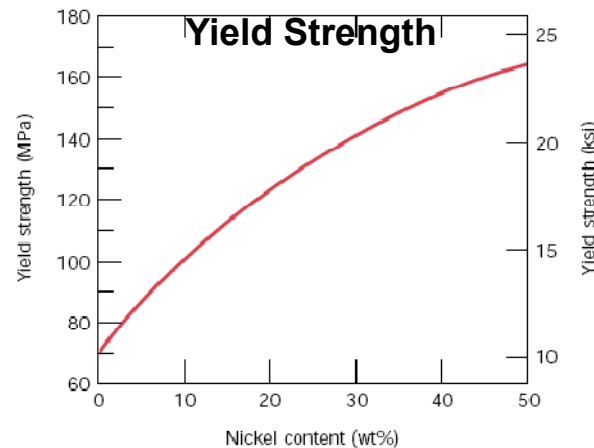
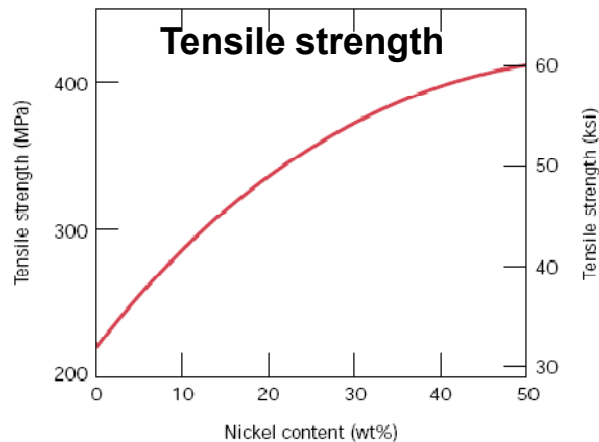
#### **SOLID-SOLUTION STRENGTHENING** ❖

➤ افزایش ناخالصی جهت ایجاد *Substitutional or Interstitial solid solution*

➤ فلزات خالص از آلیاژها نرمتر و ضعیفتر می باشند (*Softer and Weaker*)

➤ اتمهای ناخالصی باعث ایجاد lattice strain و در نتیجه تقابل بین impurity atoms و dislocations حرکت dislocation ها محدود می گردد

تاثیر افزایش نیکل بروی فلز مس



# Chapter One:

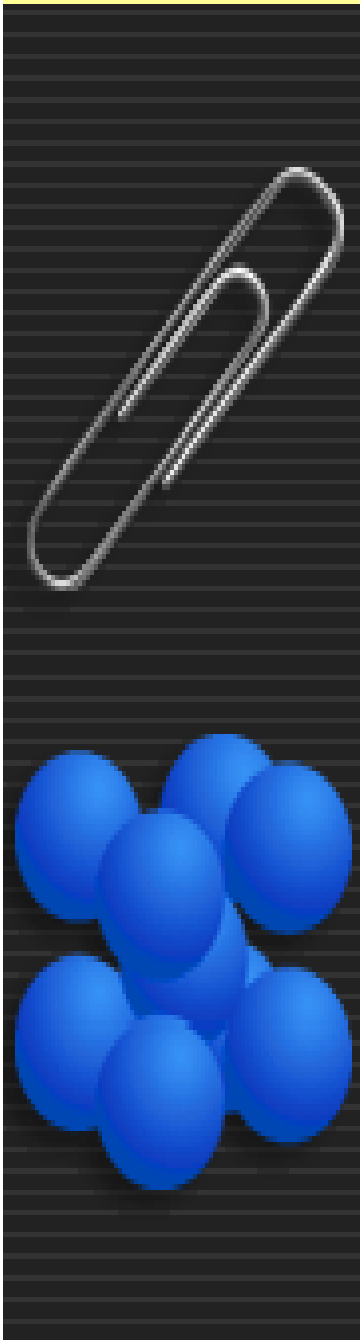
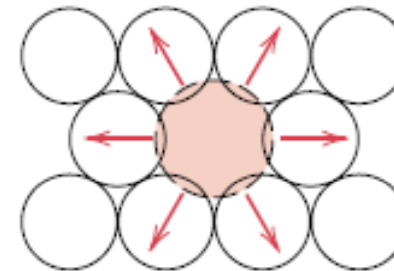
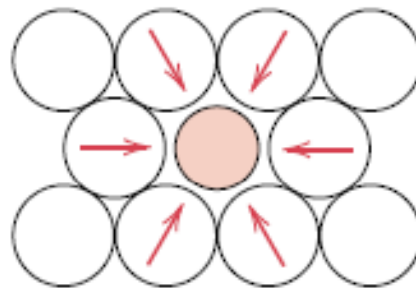
## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### MECHANISMS OF STRENGTHENING IN METALS □

#### **SOLID-SOLUTION STRENGTHENING** ❖

- *impurity* کوچکتر از *host* ایجاد *Tensile Strain* در ساختار بلوری مینماید
- *impurity* بزرگتر از *host* ایجاد *Compressive Strain* در ساختار بلوری مینماید

➤ *اتمهای ناخالصی در اطراف dislocations قرار میگیرند* to reduce overall strain energy of the lattice around the dislocations



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### MECHANISMS OF STRENGTHENING IN METALS □

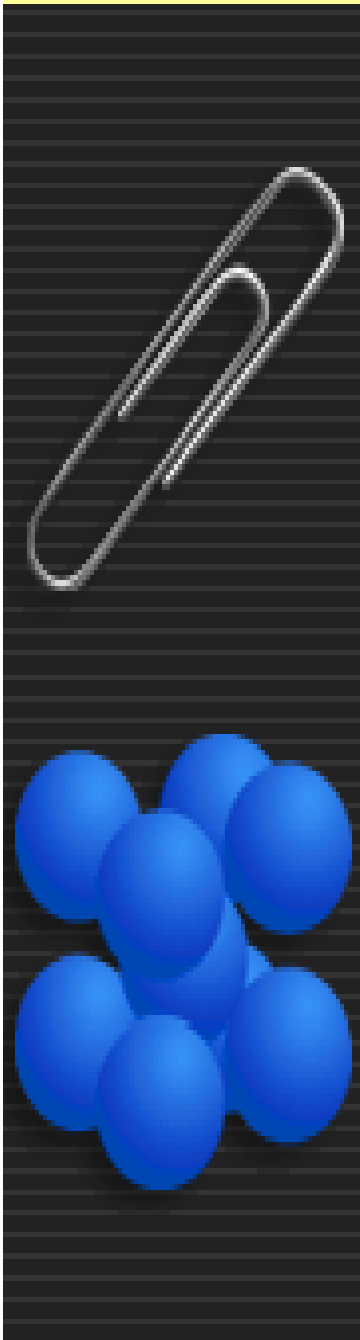
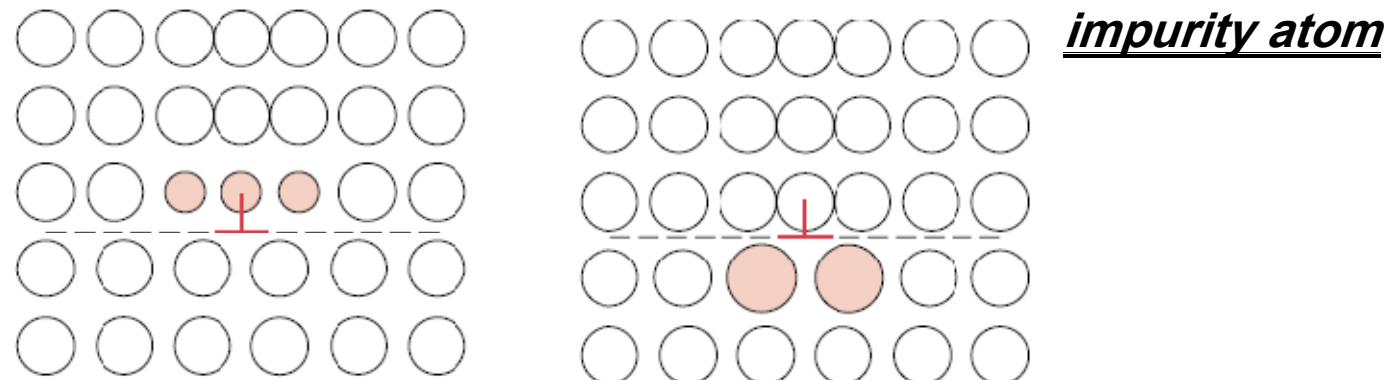
#### **SOLID-SOLUTION STRENGTHENING** ❖

➤ اتم کوچکتر در محلی قرار می گیرد که tensile strain آن بخشی از compressive strain اطراف dislocation را خنثی نماید

➤ در خصوص edge dislocation این مکان در بالای slip plane و کنار dislocation line میباشد (بالعکس در خصوص اتم بزرگتر)

➤ مقاومت در برابر slip در زمانی که اتم ناخالصی حضور دارد بیشتر است بدلیل بالاتر بودن lattice strain و نتیجتاً نیاز به applied stress بیشتری است تا ابتدا slip آغاز و سپس ادامه یابد (عامل بالا بودن strength and hardness)

Lattice strain interaction between ***dislocation in motion*** and



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### MECHANISMS OF STRENGTHENING IN METALS □

#### **STRAIN HARDENING** ❖

➤ در طی فرایند فلز Ductile در اثر plastic deformation become harder and stronger

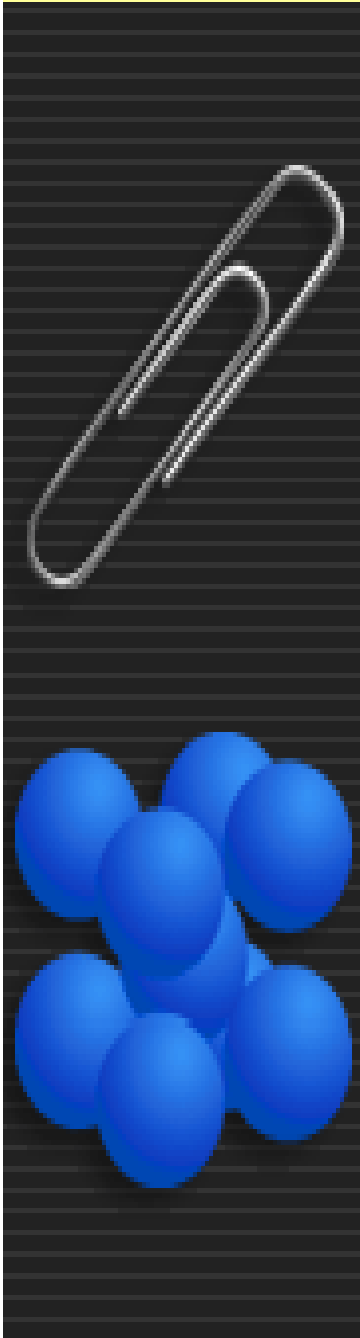
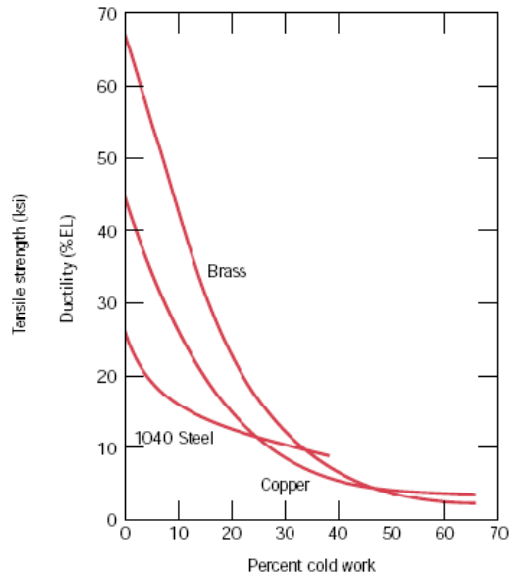
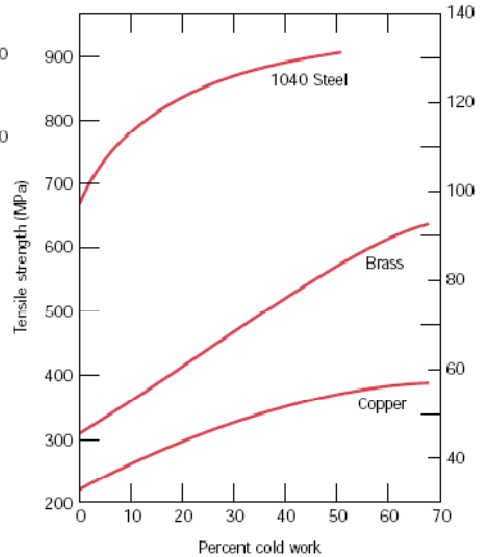
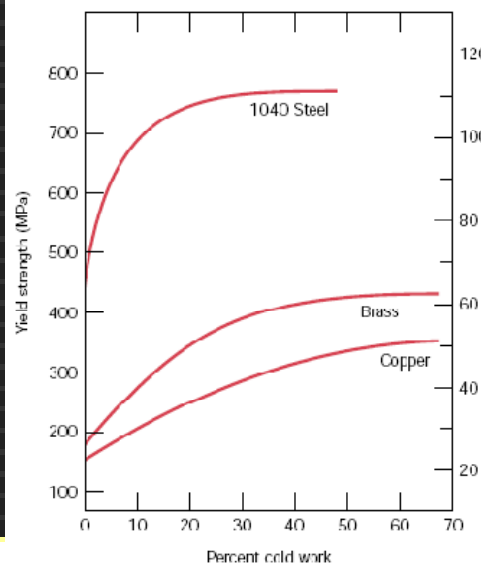
$$\%CW = \left( \frac{A_0 - A_d}{A_0} \right) \times 100$$

$A_0$  = سطح مقطع اولیه

$A_d$  = سطح مقطع بعد از تغییر شکل

➤ Cold work در دمای اتاق (نسبت دمای ذوب)

➤ بر اساس میزان کار سرد % cold work بیان می گردد:



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### MECHANISMS OF STRENGTHENING IN METALS □

#### **STRAIN HARDENING** ❖

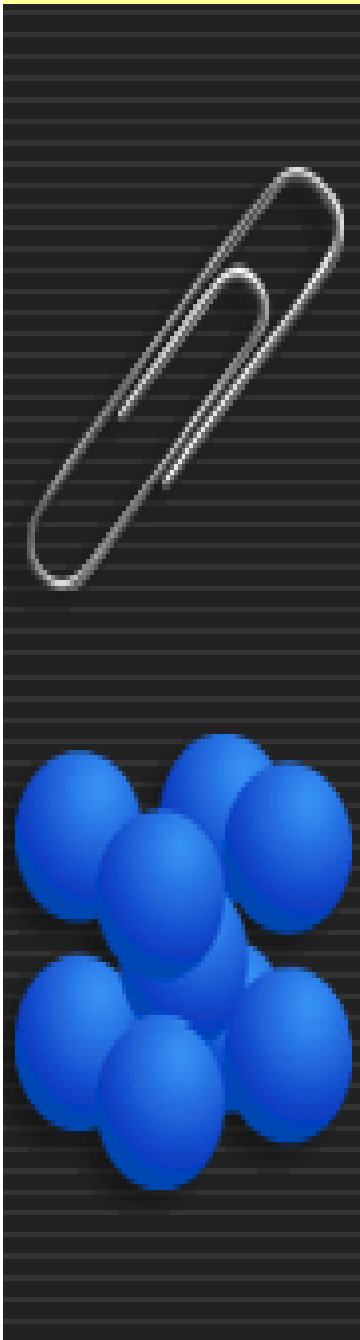
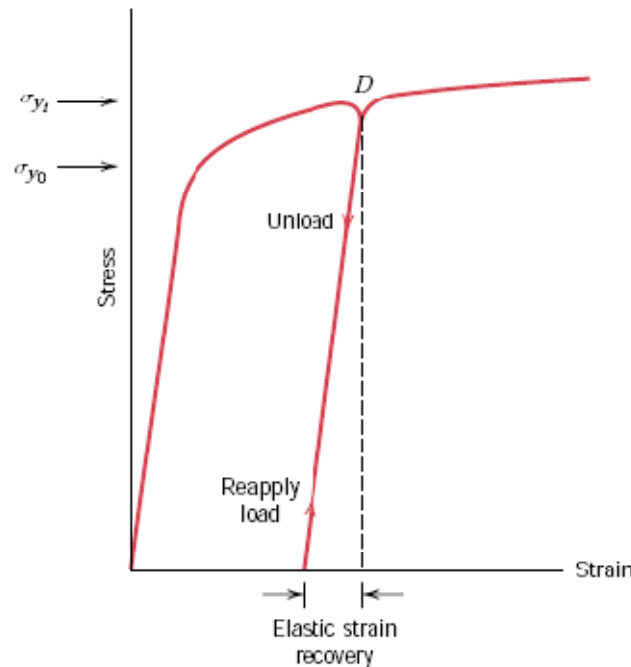
➤ مکانیسم Strain hardening بر اساس elastic recovery می باشد

➤ در اثر load and reload بعد از plastic deformation میزان yield strength افزایش مییابد

➤ شیب دو ناحیه خطی یکسان است (E)

➤ در اثر reloading در واقع yielding مجدداً

و در میزان stress بالاتر اتفاق می افتد



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

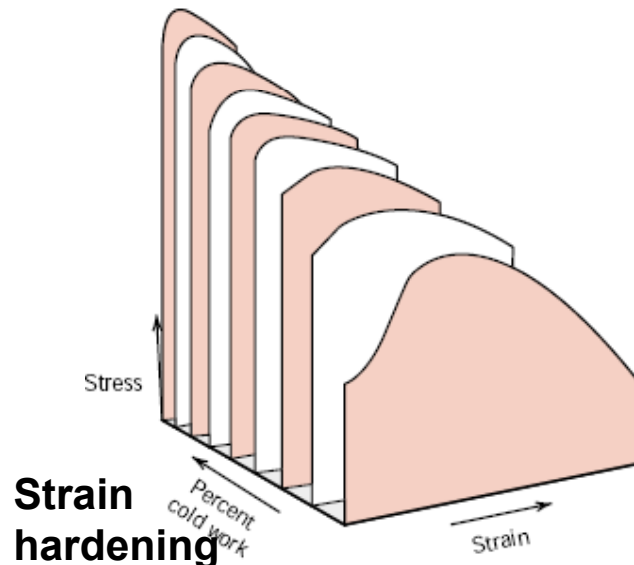
### MECHANISMS OF STRENGTHENING IN METALS □

#### **STRAIN HARDENING** ❖

➤ دانسیته dislocations با افزایش cold work افزایش می یابد:

در اثر dislocation multiplication و یا تشکیل new dislocations

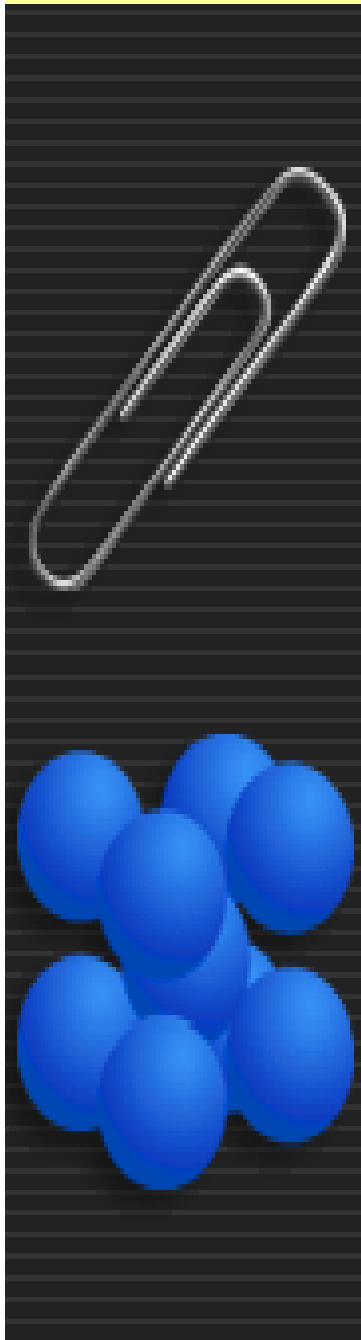
➤ بصورت کلی با افزایش تعداد dislocation ها و در اثر تقابل آنها (که بطور متوسط بیشتر repulsive می باشند) مقاومت در برابر dislocation motion بیشتر شده و stress بالاتری جهت حرکت deformation نیاز است (**higher strength**)



**Strain  
hardening  
on steel**

➤ **Strain hardening is often utilized commercially to enhance the mechanical properties of metals during fabrication procedures.**

➤ تاثیر strain hardening را می توان  
بوسیله hear treatment (Annealing)  
تا حدودی برطرف نمود



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

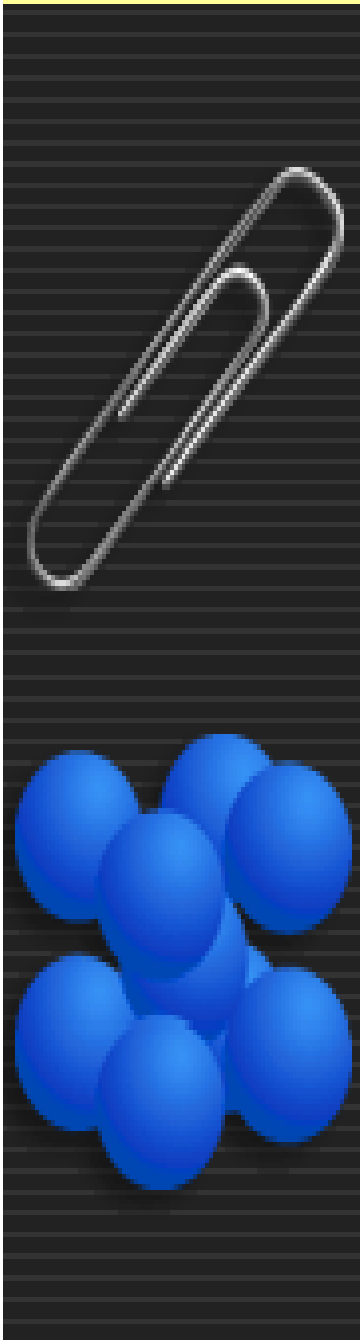
---

---

### RECOVERY, RECRYSTALLIZATION, AND GRAIN GROWTH □

#### *RECOVERY* ❖

- در recovery بخشی از strain energy ذخیره شده در داخل فلز به شکل dislocation motion (بدون فشار stress خارجی) آزاد می گردد:
- در اثر بالا رفتن نفوذ اتمی Atomic diffusion در درجه حرارت بالاتر
  - تعداد dislocation ها کمتر و یا تغییر configuration انجام می گردد که به نحوی که strain energy کاهش می یابد
  - خواص هدایت الکتریکی و گرمایی نیز به حالت قبل از cold work بر می گردد





# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

### RECOVERY, RECRYSTALLIZATION, AND GRAIN GROWTH □

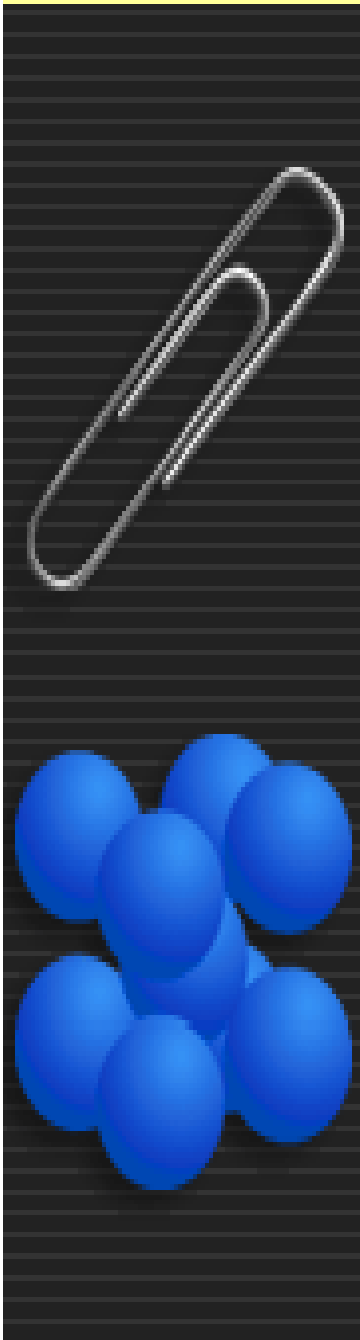
#### *RECRYSTALLIZATION* ❖

➤ بعد از recovery هنوز strain energy بالا می باشد: تشکیل دانه های Equiaxed strain free grains جدید که دارای low dislocation density میباشند

➤ نیروی محرک تشکیل دانه های جدید اختلاف internal strain energy بین دو حالت strained and unstrained می باشد

➤ دانه های جدید به صورت هسته های کوچک در اثر short-range diffusion شکل می گیرند

➤ چندین مرحله در عمل recrystalization وجود دارد و بعنوان grain refinement برای cold worked metals می توان از آن استفاده کرد



# Chapter One:

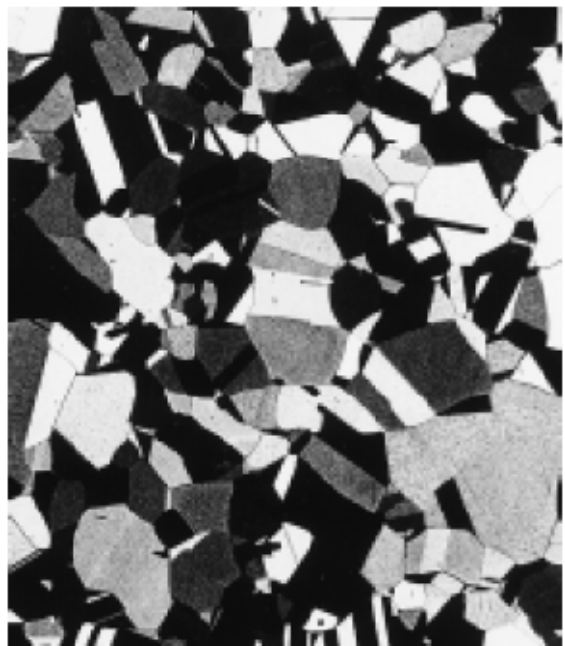
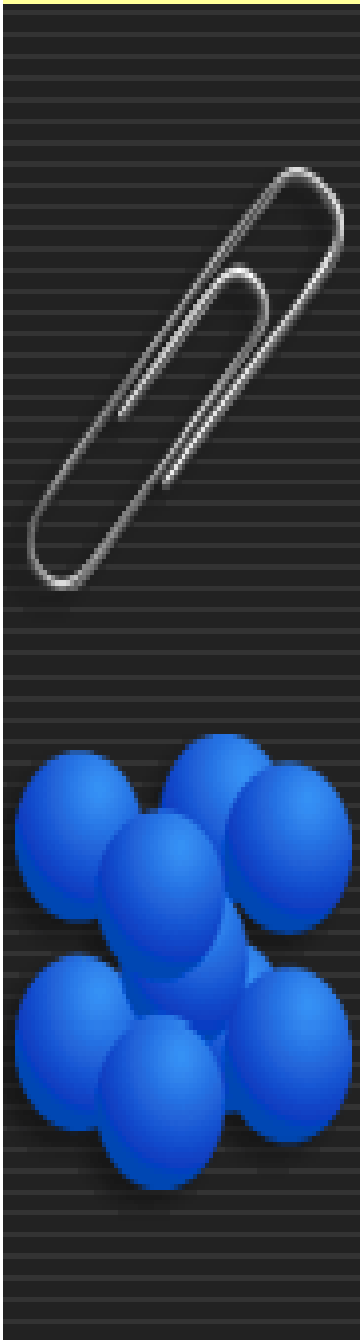
## Metals: Crystal Structures and Microstructures

RECOVERY, RECRYSTALLIZATION, AND GRAIN GROWTH □

### *RECRYSTALLIZATION* ❖

more ductile می گردد : Mechanical properties restored  
فلز نرمتر و ضعیف تر و

درجه extent فرایند recrystallization بسته به دو عامل زمان و دما دارد

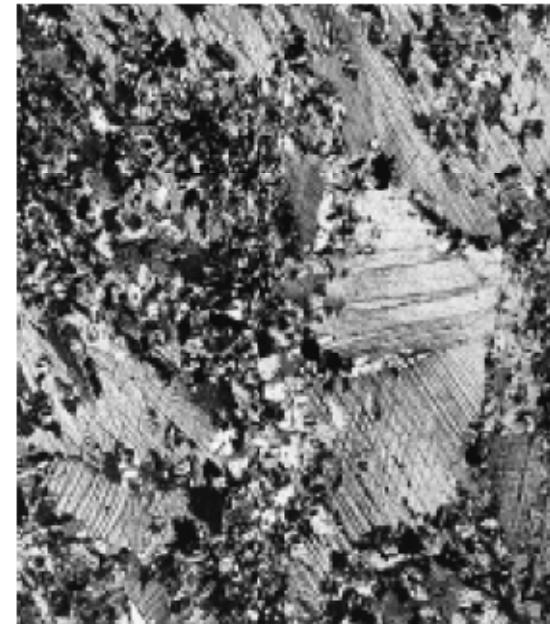




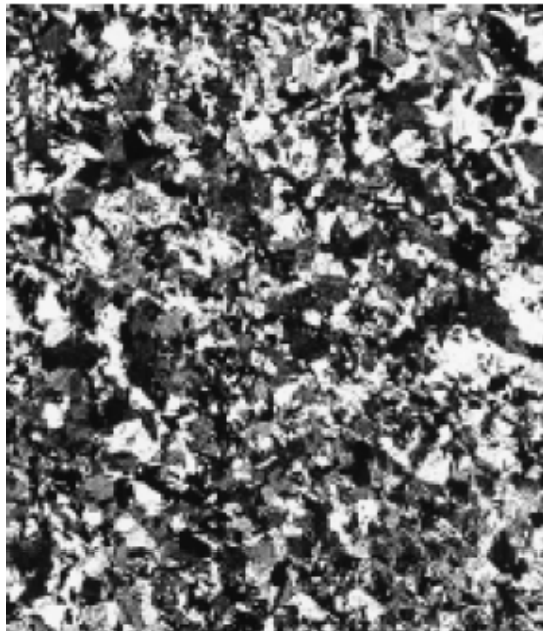
Cold-worked (33%CW)



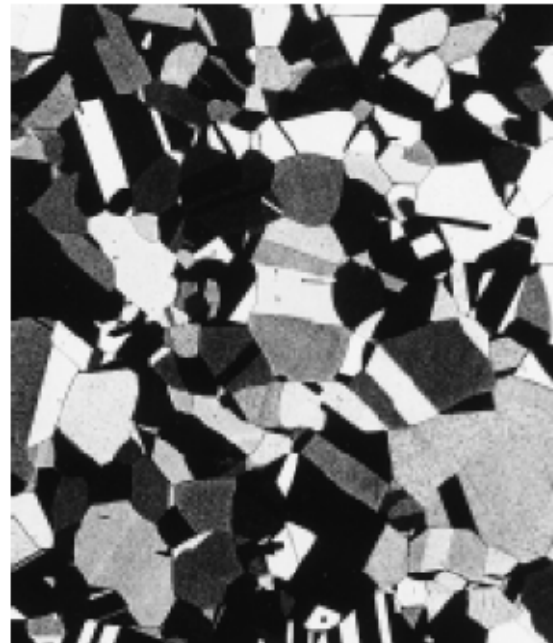
3 s at 580C



(4 s at 580C)



Complete recrystallization  
(8 s at 580C).



Grain growth  
15 min at 580C



Grain growth  
10 min at 700C

# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### RECOVERY, RECRYSTALLIZATION, AND GRAIN GROWTH □

**Brass-1h heat treatment** تاثیر دما

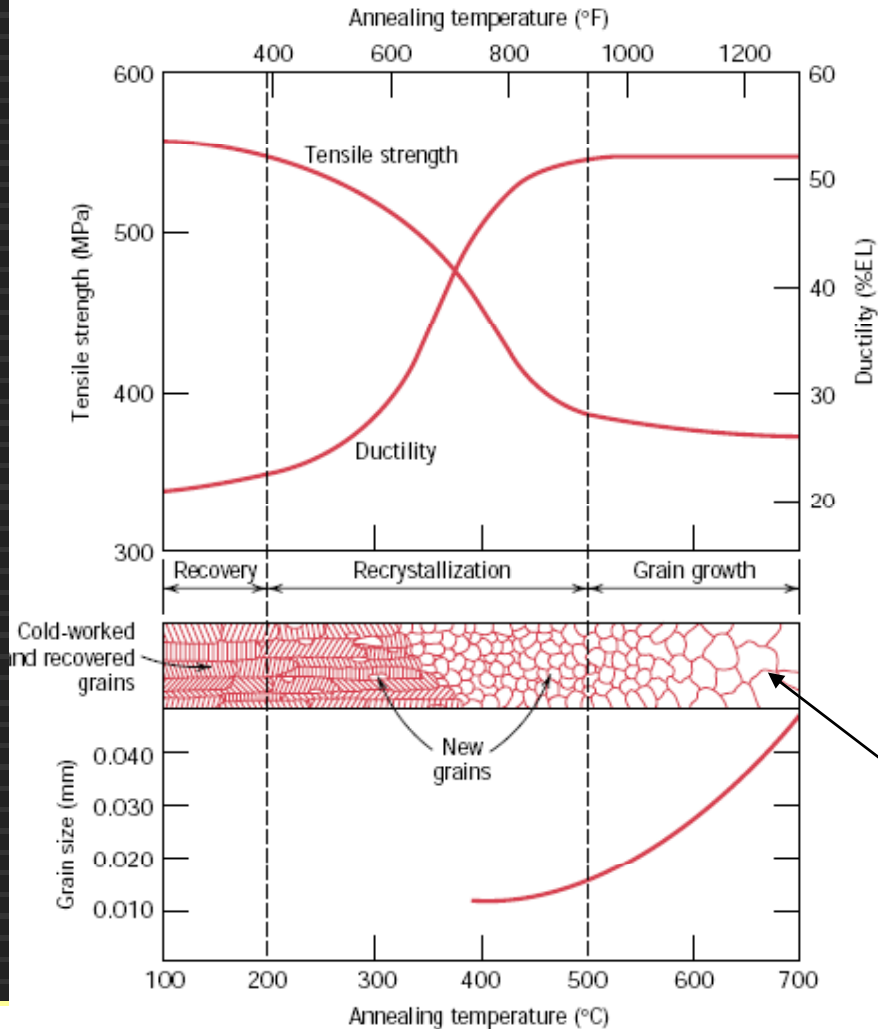
**RECRYSTALLIZATION** ❖

دمای خاص برای هر فلز معمولاً در حدود ۲/۱ الی ۳/۱ دمای ذوب فلز

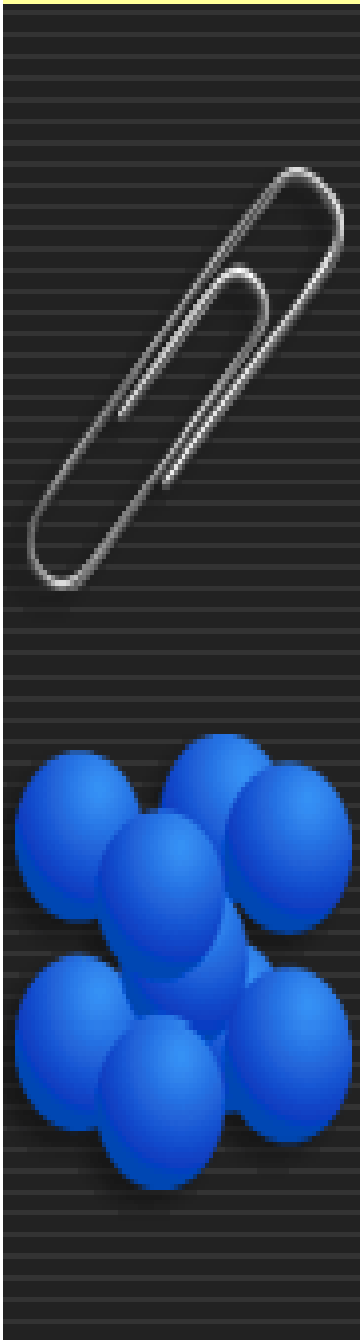
دمای recrystallization وابسته به:

▪ میزان کار سرد *cold work*

▪ میزان خلوص فلز یا آلیاژ



**Grain Structure**



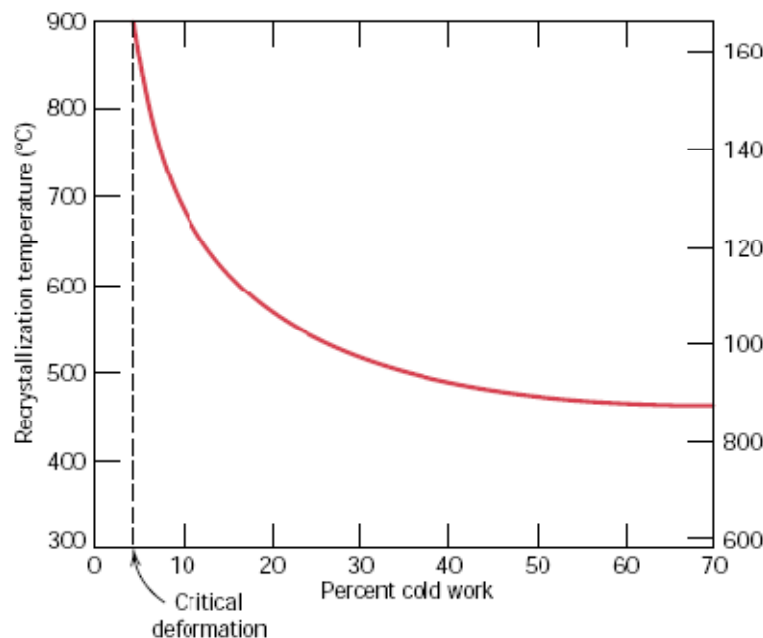
# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### RECOVERY, RECRYSTALLIZATION, AND GRAIN GROWTH □

#### **RECRYSTALLIZATION** ❖

- Increasing the percentage of cold work enhances the rate of recrystallization, results in lowered recrystallization temperature
- **Critical deformation:** degree of cold work below which recrystallization cannot be made to occur (**2-20% cold work**)



➤ فرایند recrystallization در فلزات  
خالص سریعتر از آلیاژها اتفاق می افتد:

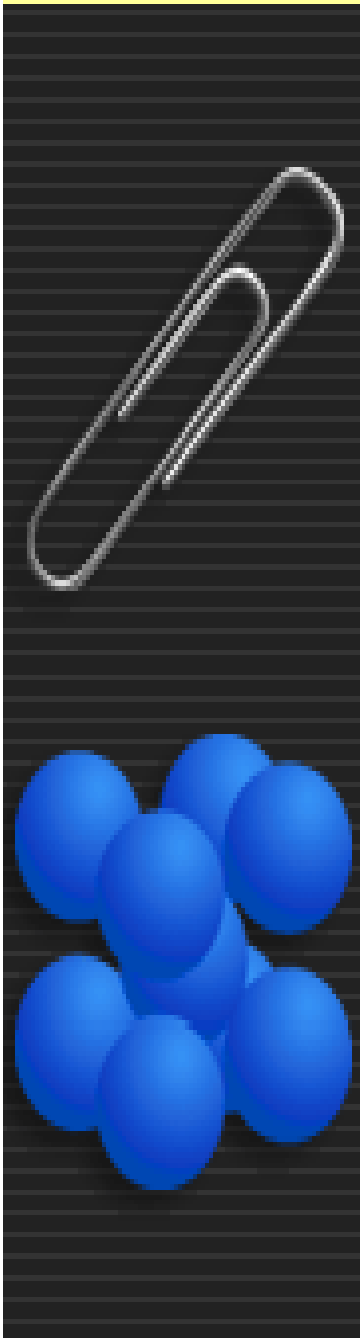
■ معمولا  $0.3 T_m$  برای فلزات

■ گاهی تا  $0.7 T_m$  برای آلیاژها

➤ **Hot working:** تغییر شکل پلاستیکی

در بالای دمای recrystallization که  
فلز نرم و شکل پذیر (soft & ductile) باقی  
می ماند بدلیل امکان deformation بالا

**(not strain harden)**



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### RECOVERY, RECRYSTALLIZATION, AND GRAIN GROWTH

#### **GRAIN GROWTH**

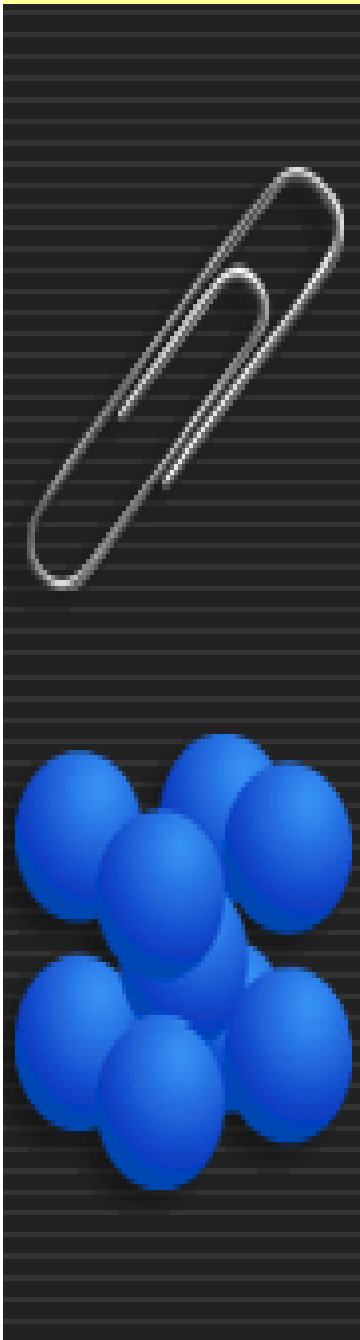
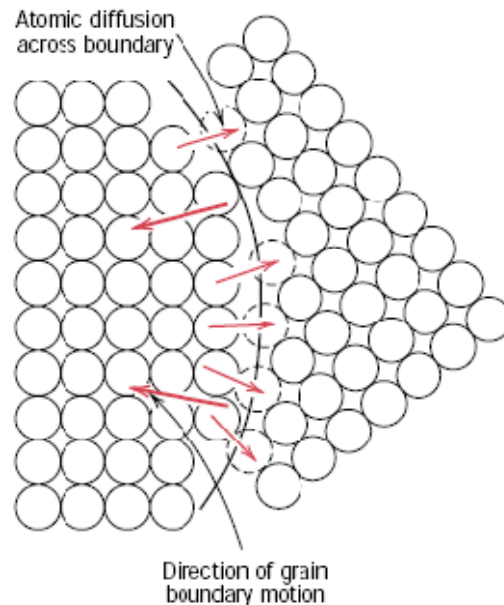
➤ بعد از recrystallization دانه های strain free به رشد ادامه می دهند در صورتی که دردمای بالا نگه داشته شوند (*Grain Growth*)

➤ هر یک از فرایندهای recovery, recrystallization, grain growth می توانند به صورت مستقل انجام پذیرند

➤ نیروی محرکه driving force برای grain growth کاهش boundary area که باعث کاهش انرژی کلی می گردد

➤ بوسیله short range diffusion اتمها و boundary در جهات مخالف حرکت کرده که نهایتاً دانه های کوچک به دانه های بزرگتر تبدیل می شوند

➤ سایز دانه ها به صورت متوسط رشد کرده و average grain size بزرگ می شود



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### RECOVERY, RECRYSTALLIZATION, AND GRAIN GROWTH □

#### GRAIN GROWTH ❖

➤ در خصوص اکثر فلزات سایزدانه با دما بر اساس رابطه

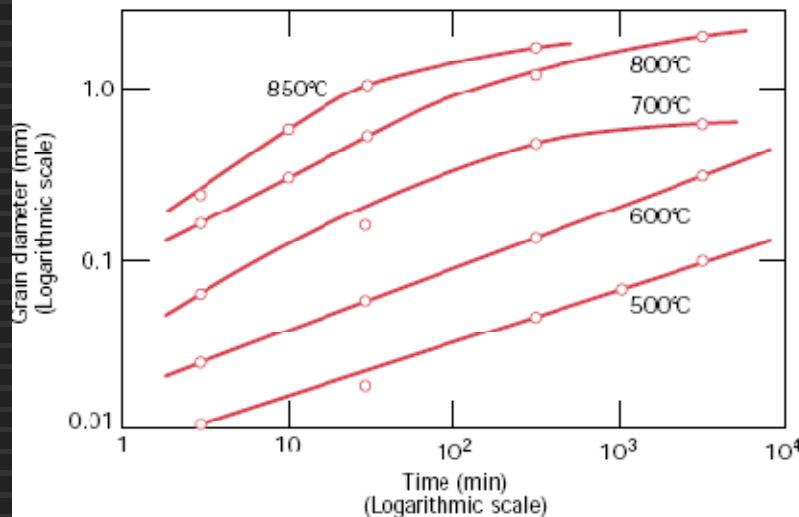
$$d^n - d_0^n = Kt$$

n and K constant

➤ رابطه دما و زمان با grain size (Brass alloy):

➤ در دمای پائین رابطه خطی

➤ با افزایش دما grain growth سریعتر پیش میرود به سمت larger grains



▪ Rapid diffusion in higher temp

▪ : Grain Refinement

بوسیله plastic deformation و

سپس recrystallization می توان

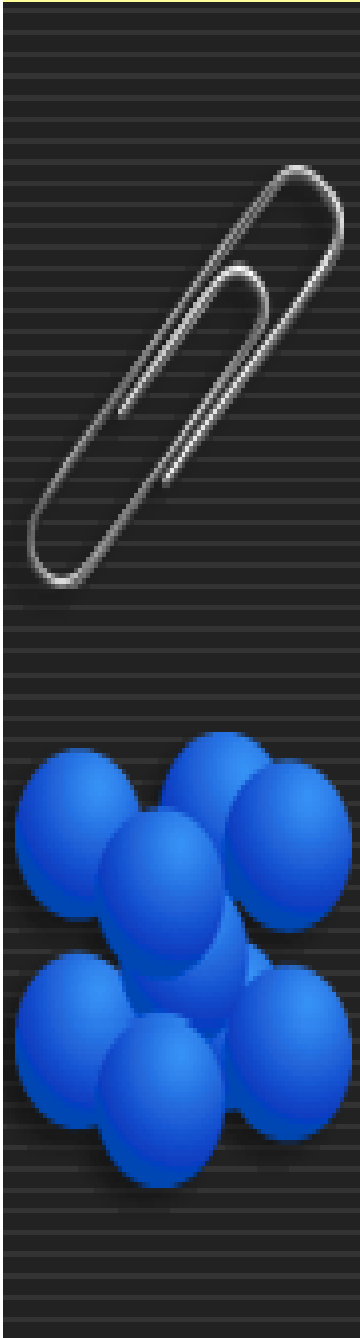
دانه ها را ریزتر و در نتیجه خواص

مکانیکی را بهبود بخشید

(فلز با دانه ریز دارای خواص مکانیکی

بالاتری از فلزات coarse-grained

می باشد)





DOI: 10.1002/adma.200602276

## **Nanostructuring of a Titanium Material by High-Pressure Torsion Improves Pre-Osteoblast Attachment\*\***

By *Shahab Faghihi, Alexander P. Zhilyaev, Jerzy A. Szpunar, Fereshteh Azari, Hojatollah Vali, and Maryam Tabrizian\**



DOI: 10.1002/adma.200602276

# **Nanostructuring of a Titanium Material by High-Pressure Torsion Improves Pre-Osteoblast Attachment\*\***

By *Shahab Faghihi, Alexander P. Zhilyaev, Jerzy A. Szpunar, Fereshteh Azari, Hojatollah Vali, and Maryam Tabrizian\**

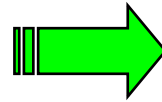


# Objective

- To investigate the effects of grain size and grain boundaries on cell –substrate interactions

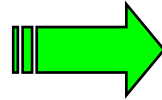
# Methods

- High Pressure Torsion (HPT)



**Grain Refinement**  
(Nano range grain size)

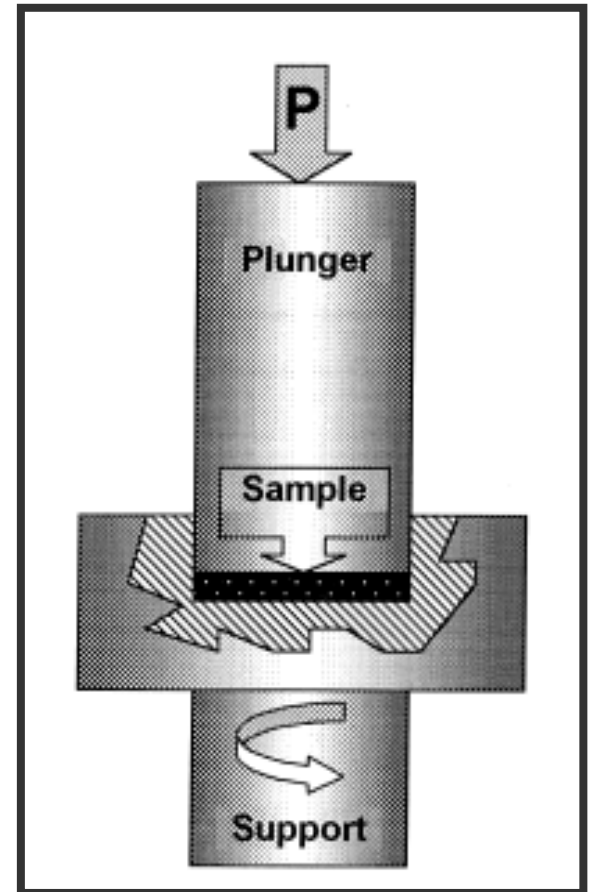
- Heat treatment/  
Annealing



**Grain Growth**  
(Micron range grain size)

# Methods

- **High Pressure Torsion (HPT)**
- Ti Disks with diameters of ~12 mm, thicknesses of ~0.3 mm
- Pressure (P) of 6 GPa at room temperature
- The Rotation of lower holder deforms the disk



# Methods

## □ Grain Growth

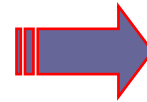
- Ti Disks with diameters of ~12 mm
- Tube furnace
- At 800°C for 12 hours
- Ultra pure argon atmosphere
- Furnace cooled ⇒



**Microstructure**

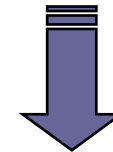
# Methods

- High Pressure torsion (HPT)
- Heat Treated (Annealed)
- Untreated

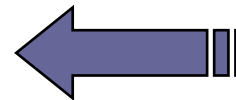


**Polishing**

(Mechanically, Vibratory)



**Cleaning**



**Characterization**

- AFM
- Contact Angle Measurement
- Grain Size Measurement
- Texture Measurement

# Metallography



# VIBRATORY POLISHER

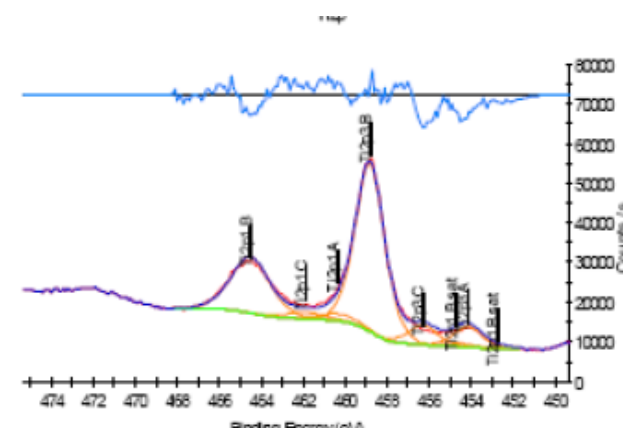
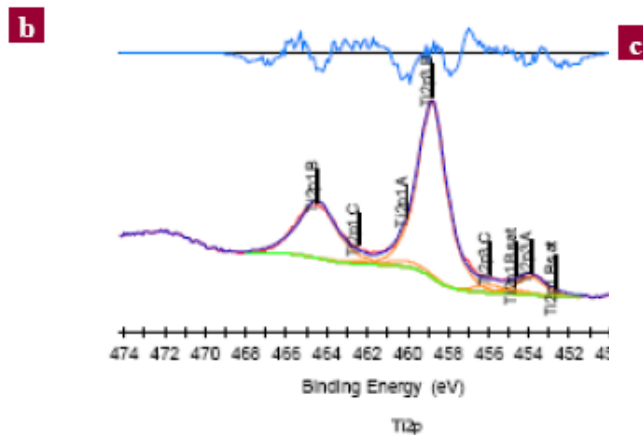
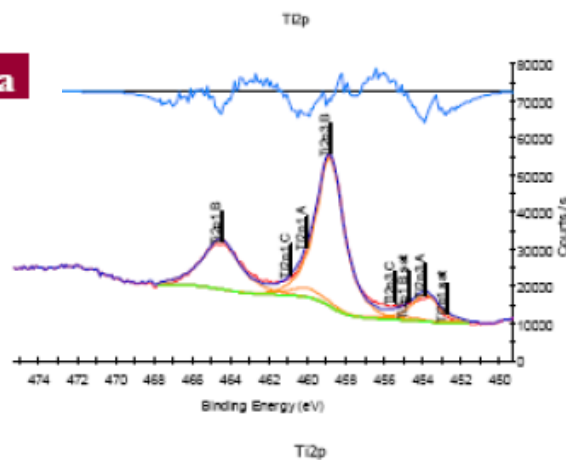


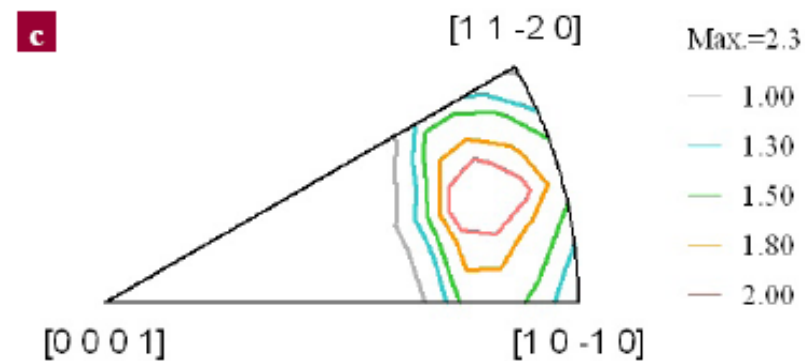
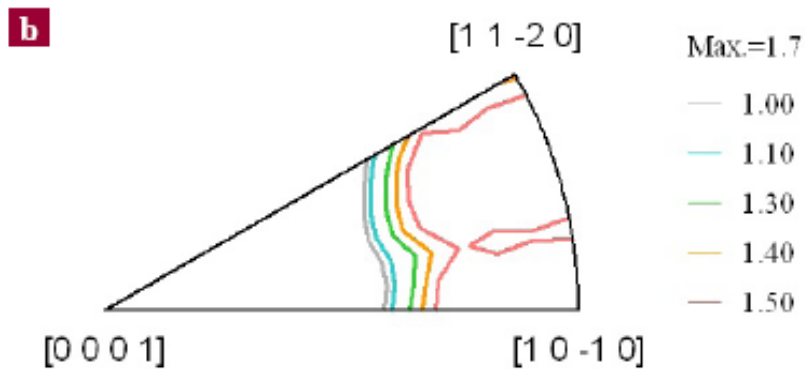
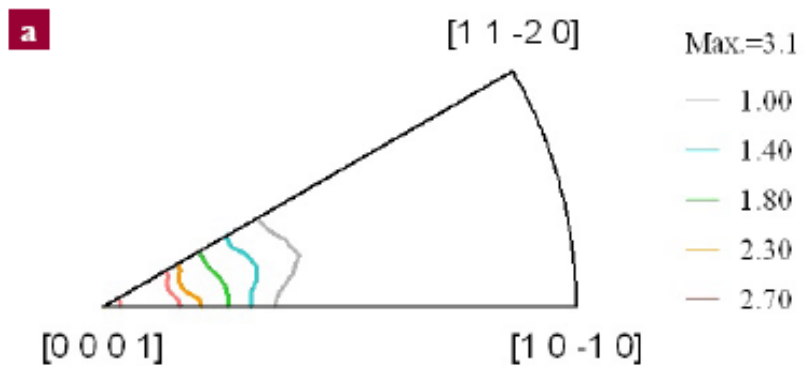


# XPS (X-ray Photoelectron spectroscopy)

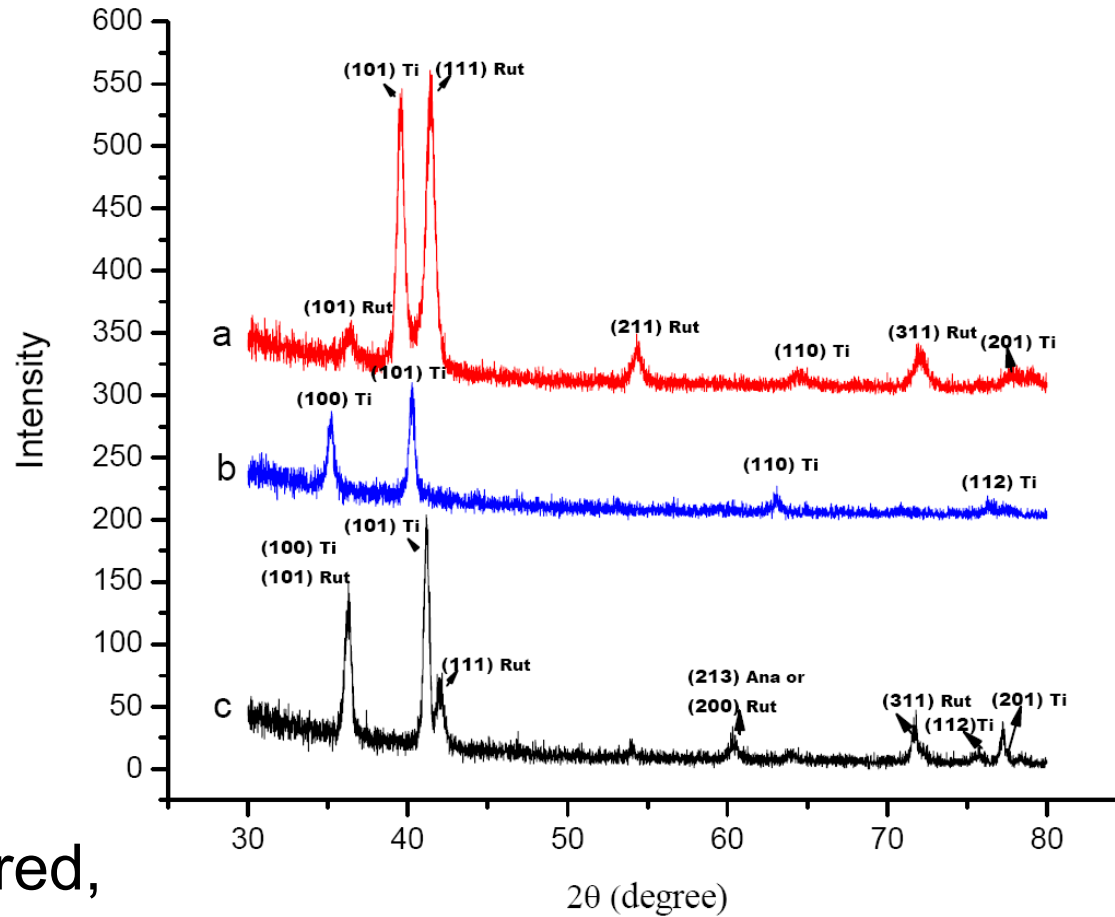
| Name    | Binding energy | Identification     | Atomic weight %  |              |             |
|---------|----------------|--------------------|------------------|--------------|-------------|
|         |                |                    | HPT processed Ti | Untreated Ti | Annealed Ti |
| C1s A   | 285.0          | C-C                | 30.0             | 25.1         | 27.5        |
| C1s B   | 286.7          | C-O                | 2.4              | 3.1          | 1.9         |
| C1s C   | 288.7          | C=O                | 2.3              | 2.6          | 1.9         |
| O1s A   | 530.4          | Ti-O               | 33.4             | 31.2         | 31.8        |
| O1s B   | 532.1          | C=O                | 11.7             | 8.8          | 9.1         |
| O1s C   | 533.4          | C-O                | 3.4              | 2.3          | 1.9         |
| Ti2p3 A | 453.9          | Ti metal           | 4.7              | 2.4          | 2.8         |
| Ti2p3 B | 458.8          | TiO <sub>2</sub>   | 12.7             | 23.5         | 22.6        |
| Ti2p3 C | 455.9          | Intermediate oxide | 0.2              | 1.1          | 1.3         |

**a**, Nanostructured, **b**, untreated **c**, annealed





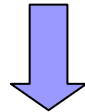
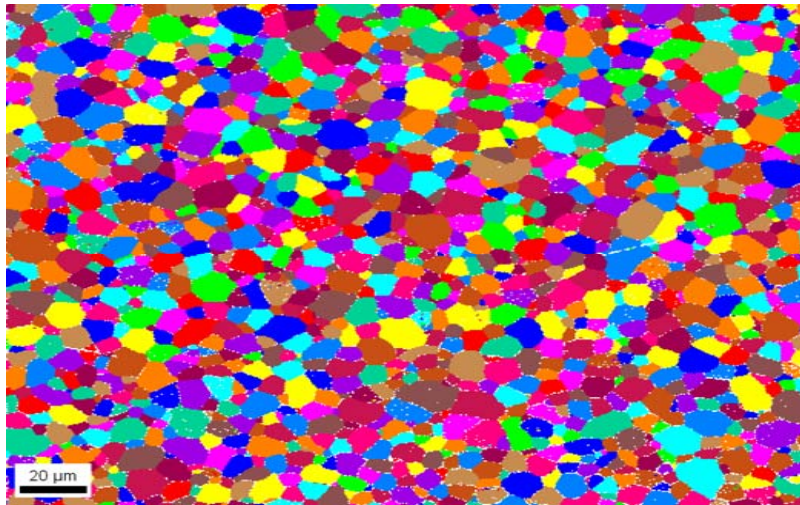
# Low angle XRD



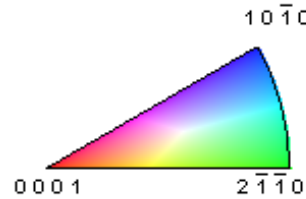
**a, Nanostructured,**  
**b, untreated**  
**c, annealed**

# Grain size measurements, EBSD

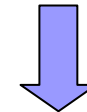
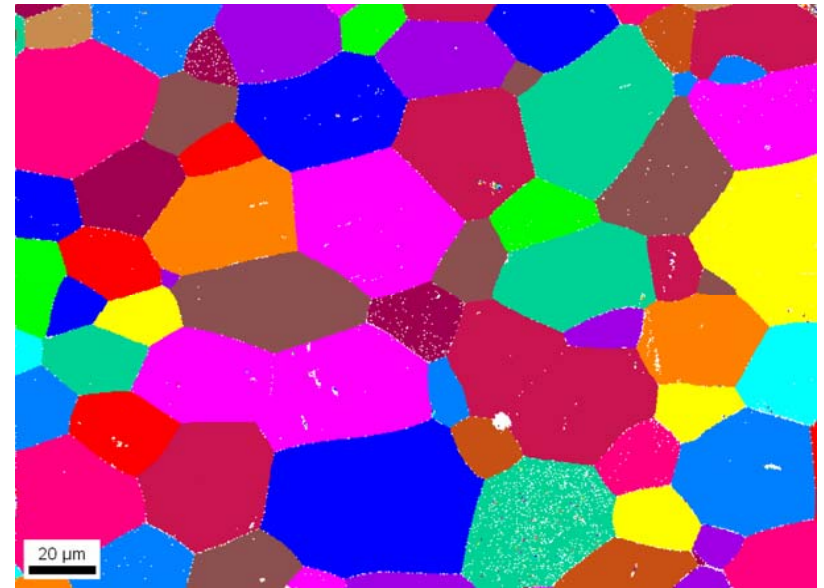
Untreated



Average grain size  $\approx 10 \mu\text{m}$



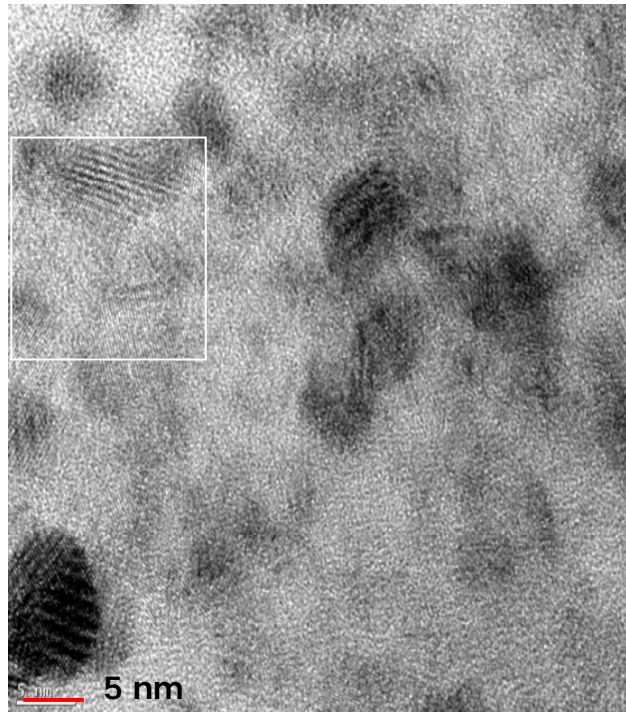
Annealed



Average grain size  $\approx 50 \mu\text{m}$

# Grain size measurement

- TEM; Thin section by FIB; 5-10 nm



# Chapter One:

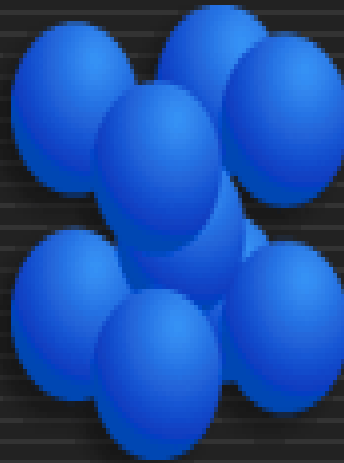
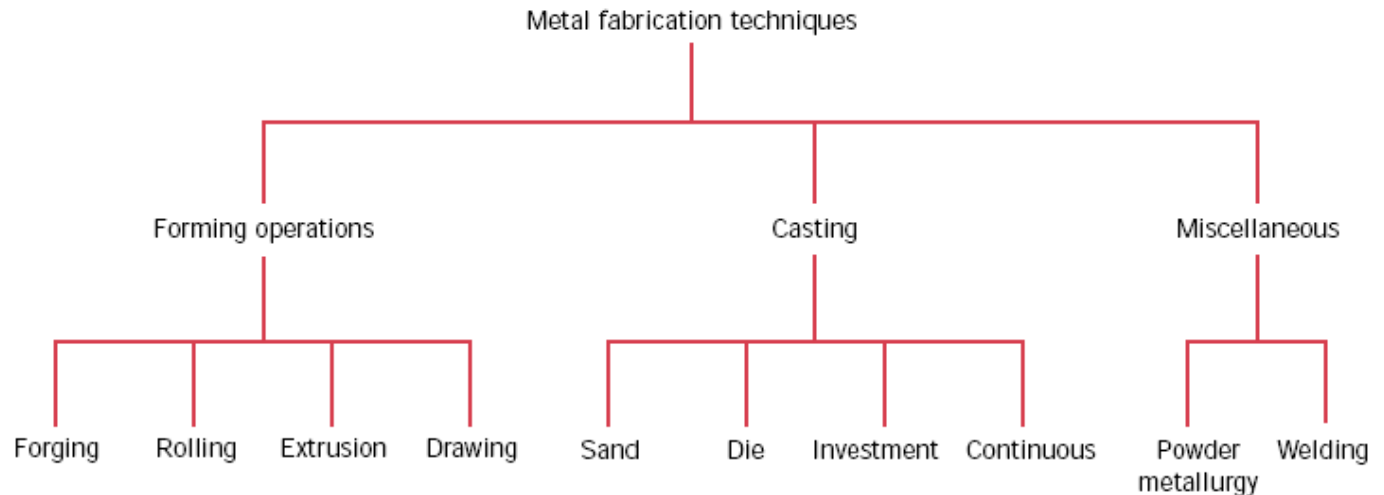
## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### FABRICATION OF METALS □

➤ پیش از بکارگیری روشهای ساخت قطعات فلزی اعمال خالص سازی refining، آلیاژ سازی alloying و یا عملیات حرارتی Heat treatment جهت دستیابی به خواص مورد نظر desired characteristics انجام میگردد

➤ fabrication methods جهت ساخت قطعات فلزی شامل روشهای شکل دهی forming ریخته گری Casting، متالورژی پودر Powder Metallurgy و جوشکاری welding می باشد

➤ انتخاب روش بسته به خواص فلز، سایز و شکل قطعه و هزینه (2 or more methods)





# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

FABRICATION OF METALS □

**FORMING OPERATIONS** ❖

➤ تغییر شکل قطعه فلزی در اثر plastic deformation نظیر:

▪ Forging, Rolling, Extrusion, Drawing

➤ نیروی وارده جهت تغییر شکل پلاستیک باید بالاتراز Yield strength باشد

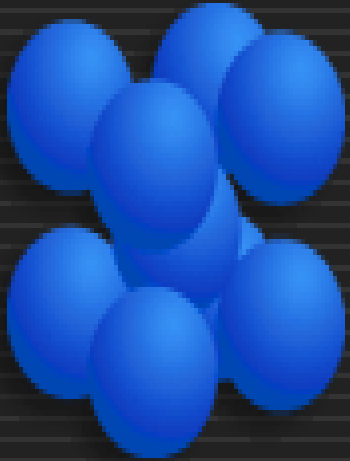
➤ فرایندهای شکل دهی (forming): بصورت Hot and Cold working

➤ در فرایند Hot working (در دمای بالاتراز Recrystalization)

▪ میزان بالاتری از plastic deformation امکان پذیر است (Higher Ductility)

▪ انرژی لازم جهت تغییر شکل (deformation energy) پائین تر

▪ تشکیل اکسید سطحی (materials loss – Poor surface finish)



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### FABRICATION OF METALS

#### **FORMING OPERATIONS**

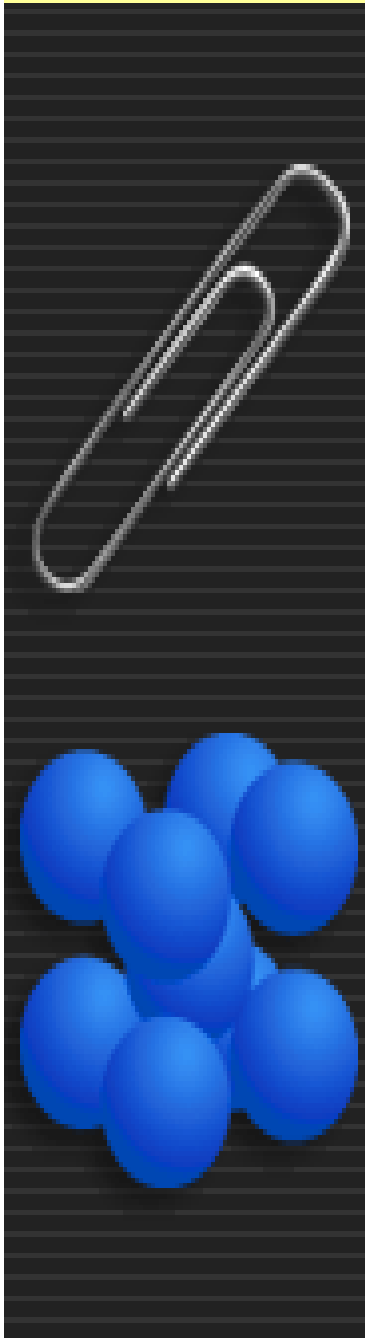
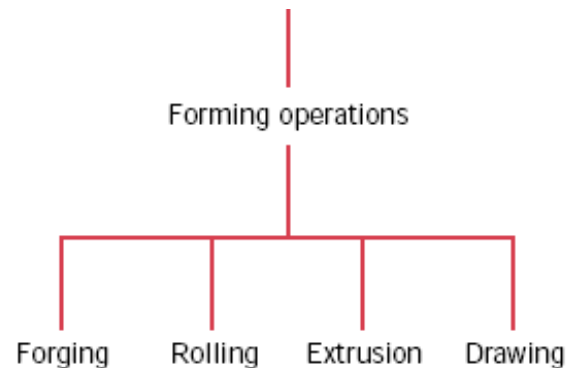
➤ در فرایند Cold working: کاهش ductility به همراه افزایش مقاومت strength (بدلیل strain hardening)

■ کیفیت بهتر سطح higher quality of surface finish

■ خواص مکانیکی بهتر و متنوع variety of mechanical properties

■ کنترل بهتر در سایز قطعه closer dimensional control of piece

■ در طی چند مرحله متوالی انجام و نهایتاً قطعه تحت عملیات حرارتی قرار میگیرد





# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures


FABRICATION OF METALS 

**FORMING OPERATIONS** 

**FORGING** 

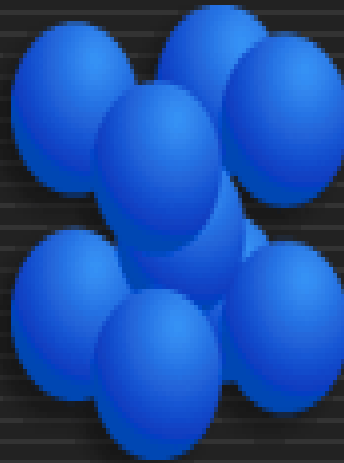
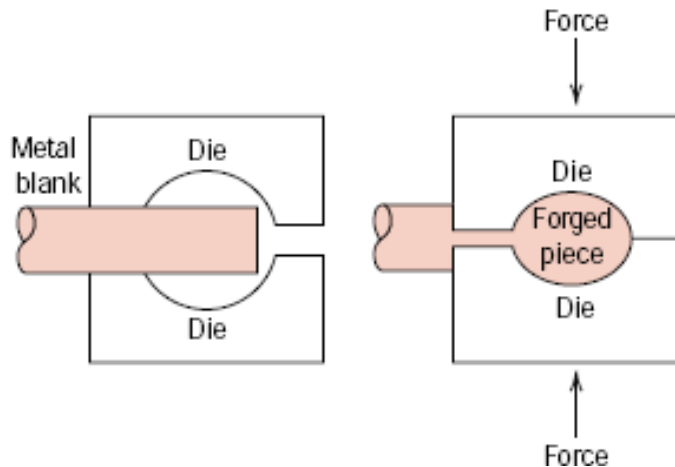
تغییر شکل فلز (usually hot) بر اساس نیروی فشاری compressive strength

جهت ساخت قطعاتی که بوسیله روشهای دیگر دیگر نظیر casting امکانپذیر نمی باشد  
یا هزینه بالا در بر دارد

قطعه دارای Outstanding grain structure 

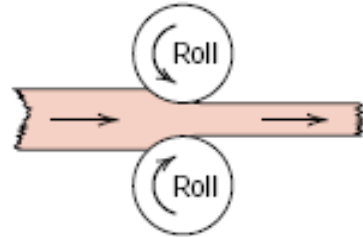
Best combination of mechanical properties 

معمولا بروی قطعات بزرگ 



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures



FABRICATION OF METALS □

**FORMING OPERATIONS** ❖

**ROLLING** ➤

شامل رد کردن قطعه فلزی از بین دو استوانه (most widely used technique)

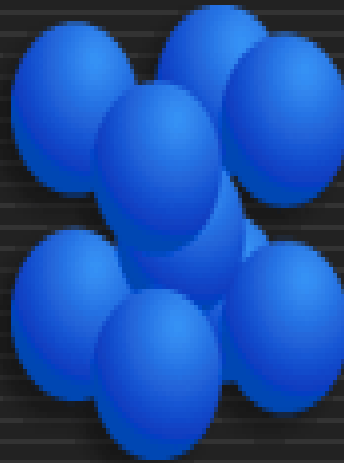
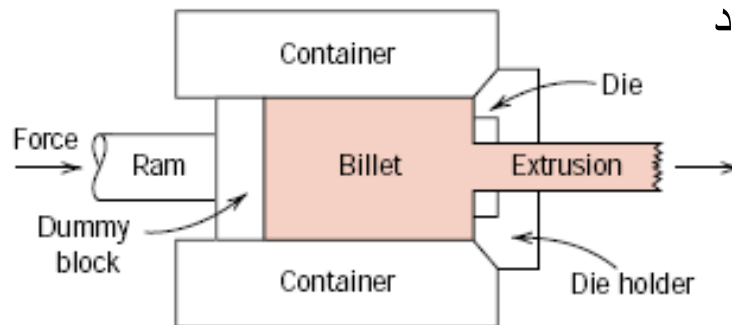
➤ کاهش ضخامت در قطعه فلزی در اثر نیروی فشاری اعمال شده بوسیله rolls

➤ Cold rolling جهت تولید ورق sheets و فویل با High quality surface finish

**EXTRUSION** ➤

➤ در طی فرایند extrusion قطعه فلزی در اثر فشار و عبور از die شکل مورد نظر به همراه کاهش سطح مقطع حاصل می گردد

➤ جهت تولید rods and tube



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

FABRICATION OF METALS □

**FORMING OPERATIONS** ❖

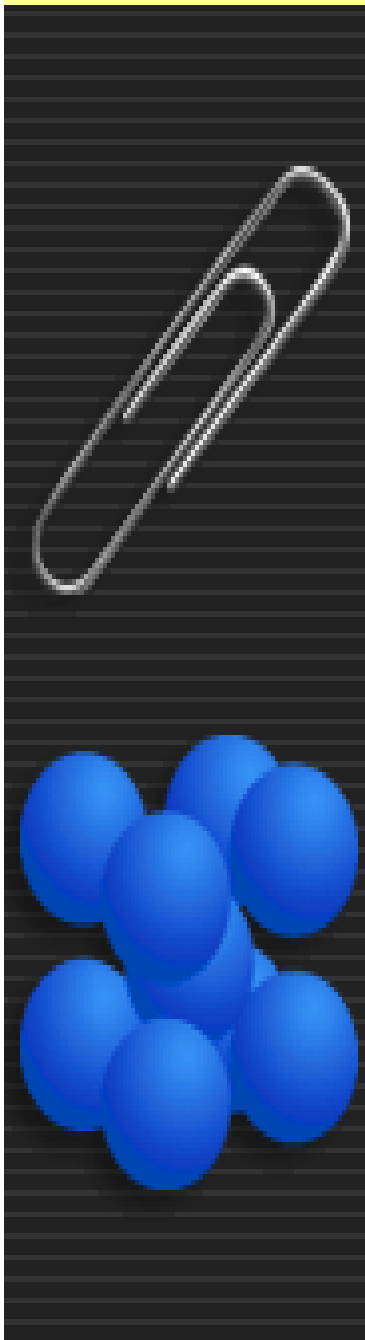
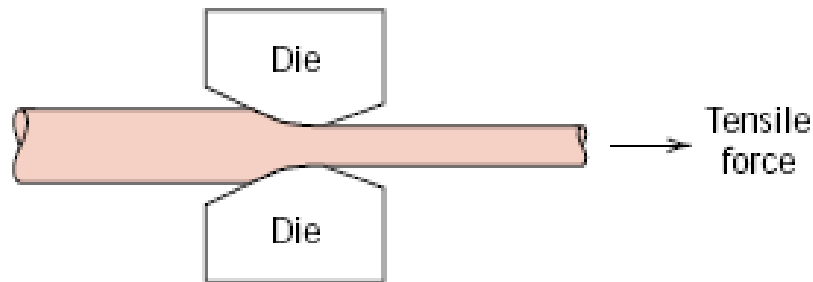
**DRAWING** ➤

کشیدن قطعه فلزی بوسیله نیروی کششی ➤ tensile strength on the exit site

کاهش سطح مقطع و افزایش طول ➤

عملیات کلی می تواند شامل تعدادی die متوالی in a series sequence ➤

Rod, wire, and tubing products ➤



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

FABRICATION OF METALS □

**FABRICATION TECHNIQUES** ❖

**CASTING** ➤

➤ یکی از روشهای ساخت که در آن فلز مذاب Molten در داخل قالب mold با شکل مورد نظر ریخته میشود

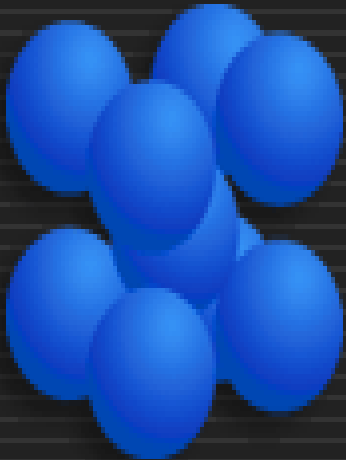
■ در خصوص قطعاتی که دارای شکل پیچیده و اندازه بزرگ هستند و روشهای دیگر عملی نمی باشند (Complicated or large piece)

■ در خصوص فلزات و یا آلیاژهایی که دارای ductility یائین بوده بطوری که hot or cold working مشکل می باشد

■ casting روشی اقتصادی economical می باشد

➤ روشهای مختلف casting عبارتند از:

■ sand, die, investment, and continuous casting



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### FABRICATION TECHNIQUES ❖

#### SANDCASTING ➤

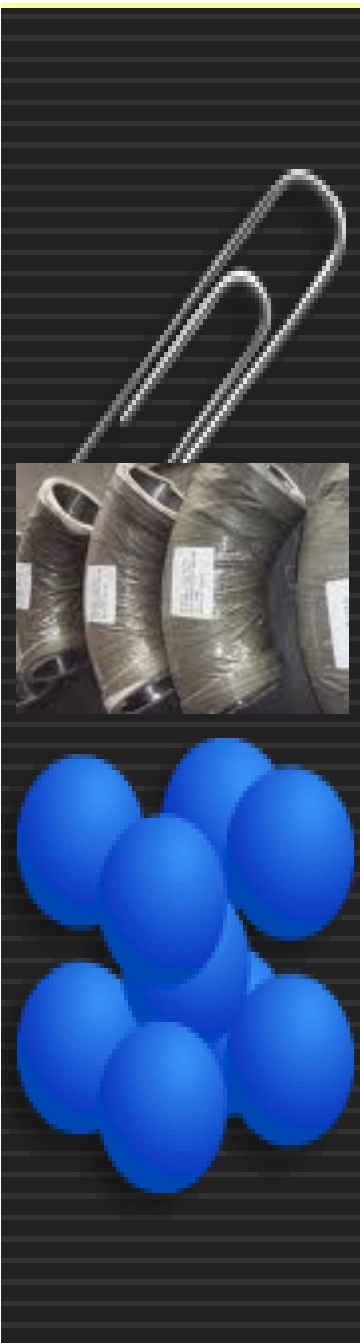
- در این روش از ماسه معمولی sand جهت ساخت قالب مورد نظر استفاده می گردد
- قالب دو تکه با استفاده از sand با شکل مورد نظر تهیه می گردد
- یک سیستم قیف مانند *gating system* جهت تسهیل ورود فلز مذاب و کاهش نقص داخلی قطعه
- Sand-cast parts include automotive cylinder, fire hydrants, and large pipe fittings

#### DIE CASTING ➤

- در این روش فلز مذاب تحت فشار در داخل قالب ریخته می شود و با سرعت و تحت فشار جامد *solidified* می گردد
- قالب دو تکه از جنس Steel بوسیله گیره *clamp* شکل مورد نظر را بدست میدهد
- پس از انجماد قالب باز و قطعه بدست می آید:

■ سرعت بالا، و هزینه کم می باشد (قالب مورد استفاده مجدد قرار می گیرد)

■ معمولاً برای قطعات کوچک و فلزات با نقطه ذوب کم نظیر Zn, Al, Mg



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

FABRICATION OF METALS 

***FABRICATION TECHNIQUES*** 

**INVESTMENT CASTING** 

➤ در این روش شکل مورد **pattern** نظربوسیله پلاستیک یا **wax** با دمای ذوب کم تهیه و در اطراف **Slurry** ریخته می شود تا شکل قالب **mold** حاصل گردد

➤ در اثر حرارت **pattern** ذوب و قالب بدست می آید

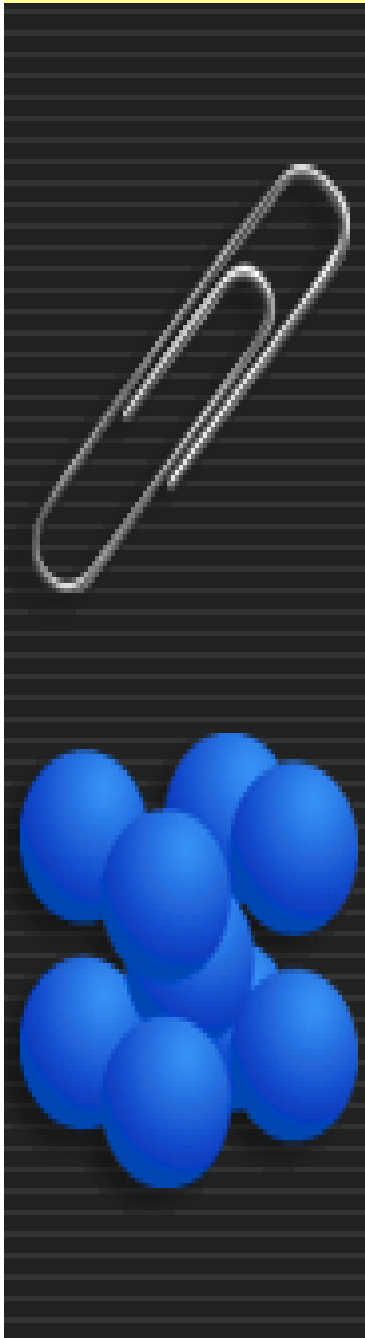
➤ مطلوب جهت:

▪ high dimensional accuracy

▪ reproduction of fine detail

▪ excellent finish are required

▪ در ساخت جواهرات، تاج دندان، پره های موتور هواپیما و توربین گاز



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures



FABRICATION OF METALS □

**FABRICATION TECHNIQUES** ❖

**CONTINUOUS CASTING** ➤

➤ در فرایند ریخته گری محصول نهایی بصورت شمش ingot قالب ریزی شده که در مراحل بعد تحت hot rolling قرار می گیرد (sheet or slab)

➤ محصولات نظیر sheet or slabs به عنوان نقطه اولیه جهت دیگر فرایندهای شکل دهی قرار می گیرند (forging, extrusion, drawing)

➤ در فرایند *continuous casting* دو مرحله casting and rolling ترکیب می گردد

➤ در طی این فرایند فلز مذاب molten بصورت مستقیم در قالب با شکل cross section دلخواه (circular or rectangular) cast می گردد و سپس بوسیله آب solidified می گردد

▪ راندمان (efficiency)، کیفیت (Quality)، و هزینه ها (Cost) در این فرایند بهبود می یابد

▪ More uniform chemical composition and mechanical properties throughout



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

FABRICATION OF METALS □

MISCELLANEOUS TECHNIQUES ❖

POWDER METALLURGY ➤

➤ در این روش پودر فلز مورد نظر فشرده و پرس می گردد سپس تحت عملیات حرارتی واقع می گردد

P/M ➤

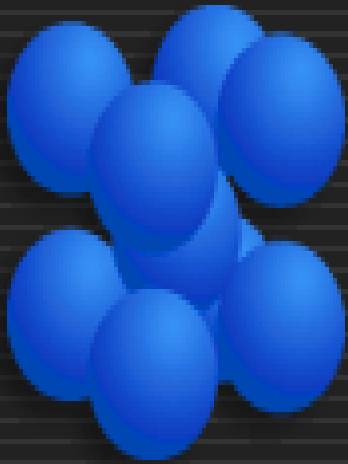
➤ تولید نمونه های تقریباً dense با این روش در اثر عملیات حرارتی

➤ عملیات حرارتی نقش اصلی در تولید نمونه های dense را دارا می باشد

■ مناسب در خصوص فلزات با ductility کم (small deformation)

■ فلزات با دمای ذوب بالا که ذوب و casting آنها با مشکلات همراه می باشد بوسیله روش P/M تهیه می گردند

■ قطعاتی که نیاز به ساخت با اندازه بسیار دقیق دارند (e.g., bushings and gears)





# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

FABRICATION OF METALS □

MISCELLANEOUS TECHNIQUES ❖

WELDING ➤

➤ در این روش دویا بیشتر قطعه به یکدیگر جوش داده شده جهت تشکیل یک قطعه واحد  
(one part fabrication is inconvenient)

➤ امکان اتصال joining فلزات یکسان و غیر یکسان وجود دارد

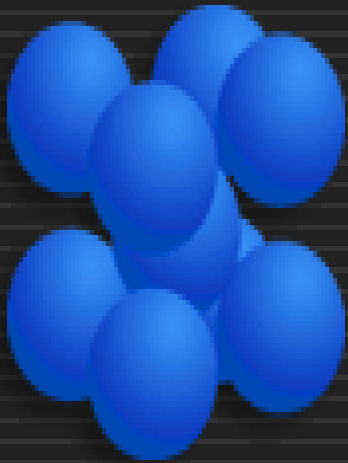
➤ روشهای مختلف جهت اتصال قطعات work pieces وجود دارد:

■ دو قطعه work pieces و پرکننده filler تا دمای بالا حرارت داده شده بطوری که هر دو بخش ذوب شده و پس از solidification تشکیل fusion joint بین دو قطعه

• در این روش تغییرات خواص و microstructure در ناحیه weld مشاهده میگردد  
**heat-affected zone (HAZ)**

■ در روش جدید از لیزر بعنوان heat source استفاده وبدون نیاز به filler قطعات مورد نظربه یکدیگر جوش داده میشوند

highly focused and intense laser beam



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

FABRICATION OF METALS □

MISCELLANEOUS TECHNIQUES ❖

WELDING ➤

➤ مزایای این روش عبارتند از:

■ فرایند noncontact بوده و معایب مکانیکی ایجاد نمیگردد mechanical distortion of the workpieces

■ امکان اتوماسیون وجود دارد و روش سریع می باشد

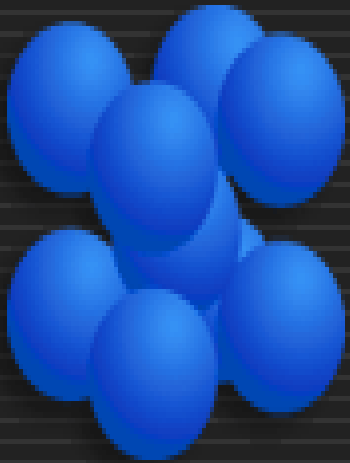
■ انرژی لازم کم و در نتیجه HAZ ناچیز می باشد energy input to the workpiece

■ امکان جوشکاری قطعات ریز وجود داشته و در نتیجه روش بسیار دقیق است

■ large variety of metals and alloys بوسیله welding امکان اتصال دارند

➤ Laser welding در صنایع الکترونیک و اتومبیل که نیاز به کیفیت و ظرافت بالا و

همچنین سرعت دارند کاربرد وسیع دارد



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

---

---

### THERMAL PROCESSING OF METALS

#### ANNEALING PROCESSES

The term **annealing** refers to a heat treatment in which a material is exposed to an elevated temperature for an extended time period and then slowly cooled

➤ فرایند Annealing به چند منظور انجام می گردد:

▪ Stress relieve

▪ Increase ductility

▪ Produce specific microstructure

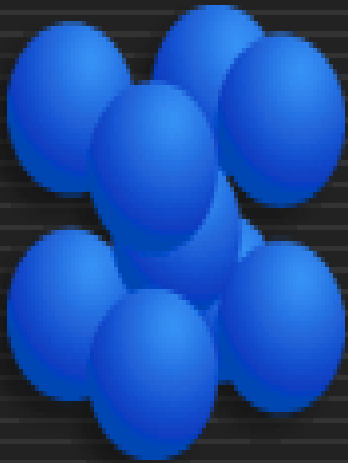
➤ انواع فرایند حرارتی annealing امکان پذیر است که بر اساس تغییر در خواص مکانیکی فلز و تغییر در microstructure شناسائی می گردد

➤ سه مرحله در هر پروسه annealing وجود دارد:

▪ Heating to the desired temperature

▪ Holding at that temperature

▪ Cooling (معمولاً به دمای محیط)



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### THERMAL PROCESSING OF METALS

#### ANNEALING PROCESSES

زمان عامل بسیار مهمی در فرایند annealing میباشد

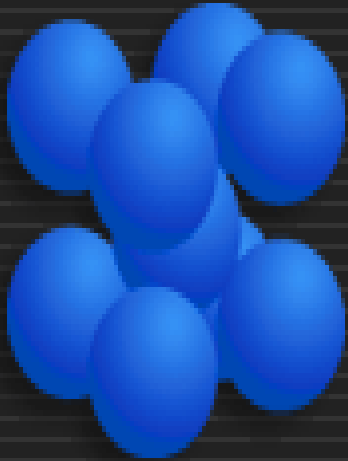
■ در حین heating و cooling اختلاف دما بین داخل و خارج قطعه وجود دارد (بسته به سایز و شکل قطعه)

■ اگر این تغییرات دمایی بزرگ باشد می تواند باعث internal stress و نهایتاً تغییر شکل و ترک در قطعه گردد

■ همچنین زمان annealing باید به میزان کافی اجازه تغییرات transformation reaction را بدهد

➤ دمای annealing دیگر فاکتور مهم می باشد:

■ امکان سرعت بخشی به فرایند با افزایش دما وجود دارد (در اثر افزایش diffusion)



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### THERMAL PROCESSING OF METALS □

#### PROCESS ANNEALING ❖

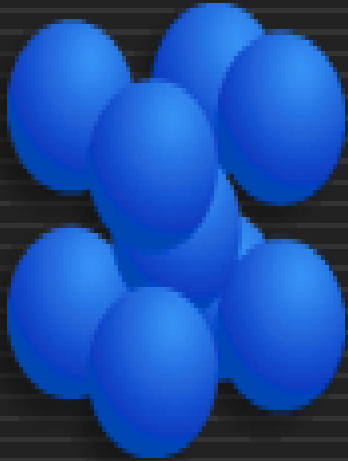
جهت خنثی کردن اثرات کار سرد و increase ductility قطعه که قبلاً strain harden شده است مورد استفاده قرار می گیرد

این فرایند معمولاً در حین ساخت قطعه fabrication procedure که همراه با میزان قابل توجهه plastic deformation همراه است بکار می رود

■ اجازه ادامه deformation را در ساخت قطعه می دهد (بدون شکست و ترک)

بدلیل نیازه fine grained microstructure فرایند process annealing قبل از میزان قابل توجهی از grain growth متوقف می شود

جهت جلوگیری و یا کاهش اکسیداسیون سطحی فرایند annealing در دمای یائین (بالای دمای recrystalization) و یا در محیط nonoxidizing انجام می گردد



# Chapter One:

## Metals: Crystal Structures and Microstructures

### THERMAL PROCESSING OF METALS □

#### STRESS RELIEF ❖

➤ در فلزات و در اثر عوامل مختلف internal stress ایجاد میگردد:

■ تغییر شکل پلاستیک plastic deformation در حین ساخت بوسیله machining و grinding

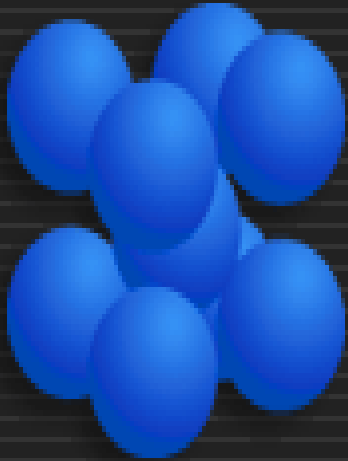
■ non-uniform cooling of a piece that processed or fabricated in casting or welding

■ تبدیلات فازی phase transformation ناشی از فرایند cooling (phase with different density than parent material)

➤ در صورت عدم رفع اینگونه stress ها تغییر شکل و ترک قطعه امکان پذیر است

➤ جهت رفع اینگونه stress عملیات stress relief annealing که قطعه در recommended temperature برای مدت مشخصی که دما بصورت یکنواخت در قطعه توزیع شده و سپس به دمای اتاق و در هوا air خنک می گردد

➤ دمای annealing معمولاً پائین بوده تا اثرات ناشی از فرایندهای کار سرد cold work و یا دیگر عملیات حرارتی heat treatment تحت تاثیر قرار نگیرد



# Exercise:

Two previously undeformed cylindrical specimens of an alloy are to be strain hardened by reducing their cross-sectional areas (while maintaining their circular cross sections).

For one specimen, the initial and deformed radii are 16 mm and 11 mm, respectively. The second specimen, with an initial radius of 12 mm, must have the same deformed hardness as the first specimen; compute the second specimen's radius after deformation.



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



---

**Biomaterials**

---

Biomaterials 28 (2007) 3887–3895

[www.elsevier.com/locate/biomaterials](http://www.elsevier.com/locate/biomaterials)

## Cellular and molecular interactions between MC3T3-E1 pre-osteoblasts and nanostructured titanium produced by high-pressure torsion

Shahab Faghihi<sup>a,b</sup>, Fereshteh Azari<sup>a,b,c</sup>, Alexander P. Zhilyaev<sup>d</sup>, Jerzy A. Szpunar<sup>e</sup>,  
Hojatollah Vali<sup>b,c,f</sup>, Maryam Tabrizian<sup>a,b,f,g,\*</sup>

<sup>a</sup>*Department of Biomedical Engineering, McGill University, Montreal, QC, Canada H3A 2B4*

<sup>b</sup>*Centre for Biorecognition and Biosensors, McGill University, Montreal, QC, Canada H3A 2B2*

<sup>c</sup>*Department of Anatomy and Cell Biology, McGill University, Montreal, QC, Canada H3A 2B2*

<sup>d</sup>*Department of Physical Metallurgy, Centro Nacional de Investigaciones Metallúrgicas (CENIM), CSIS 28040 Madrid, Spain*

<sup>e</sup>*Department of Mining, Metals and Materials Engineering, McGill University, Montreal, QC, Canada H3A 2B2*

<sup>f</sup>*McGill Institute for Advanced Materials, McGill University, Montreal, QC, Canada H3A 2B2*

<sup>g</sup>*Faculty of Dentistry, McGill University, Montreal, QC, Canada H3A 2B2*

Received 1 February 2007; accepted 17 May 2007

Available online 25 May 2007



# Biological assays

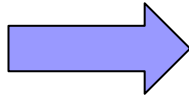
## Characterization

➤ **AFM**

➤ **Contact Angle Measurement**

➤ **Grain Size Measurement**

➤ **Texture Measurement**



❖ Cell attachment: Pre-osteoblast vs. Fibroblast

❖ Growth rate: DNA content

❖ Immunofluorescence of:

➤ Fibronectin

➤ Actin

➤ Vinculin

❖ Immunoblotting of :

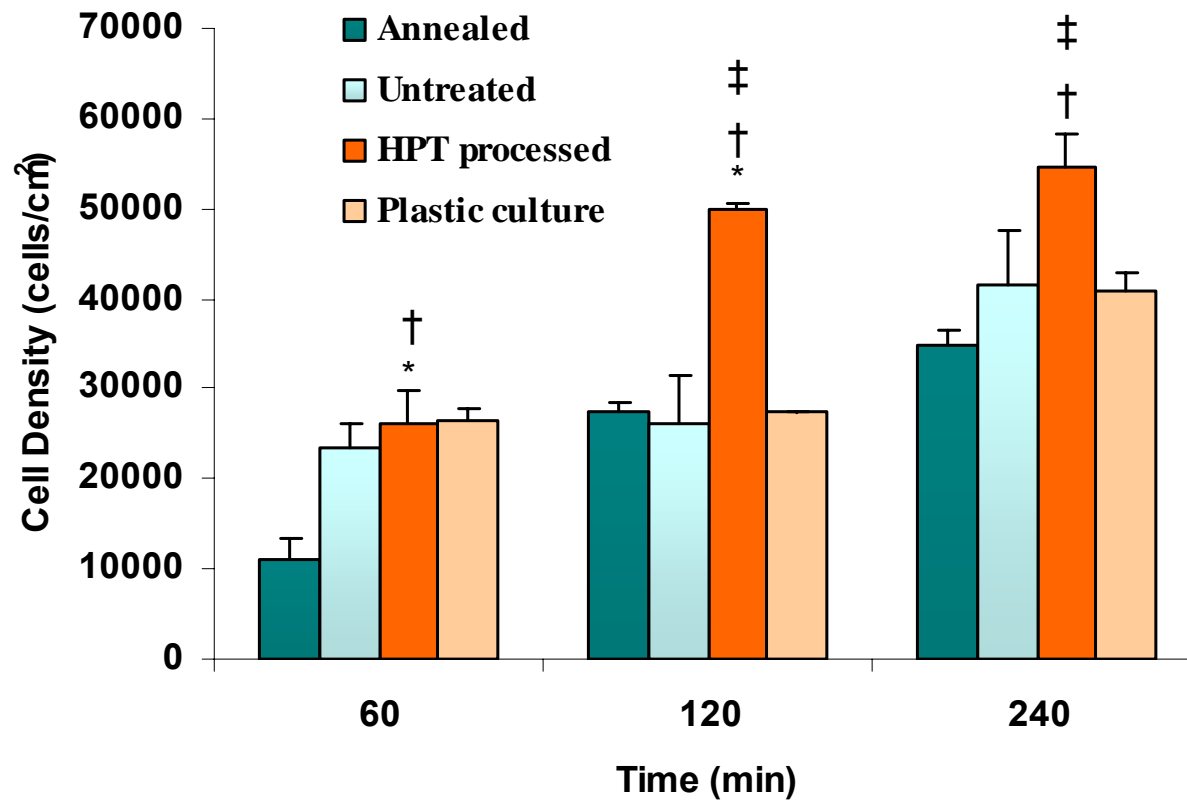
➤ Fibronectin

➤ Actin

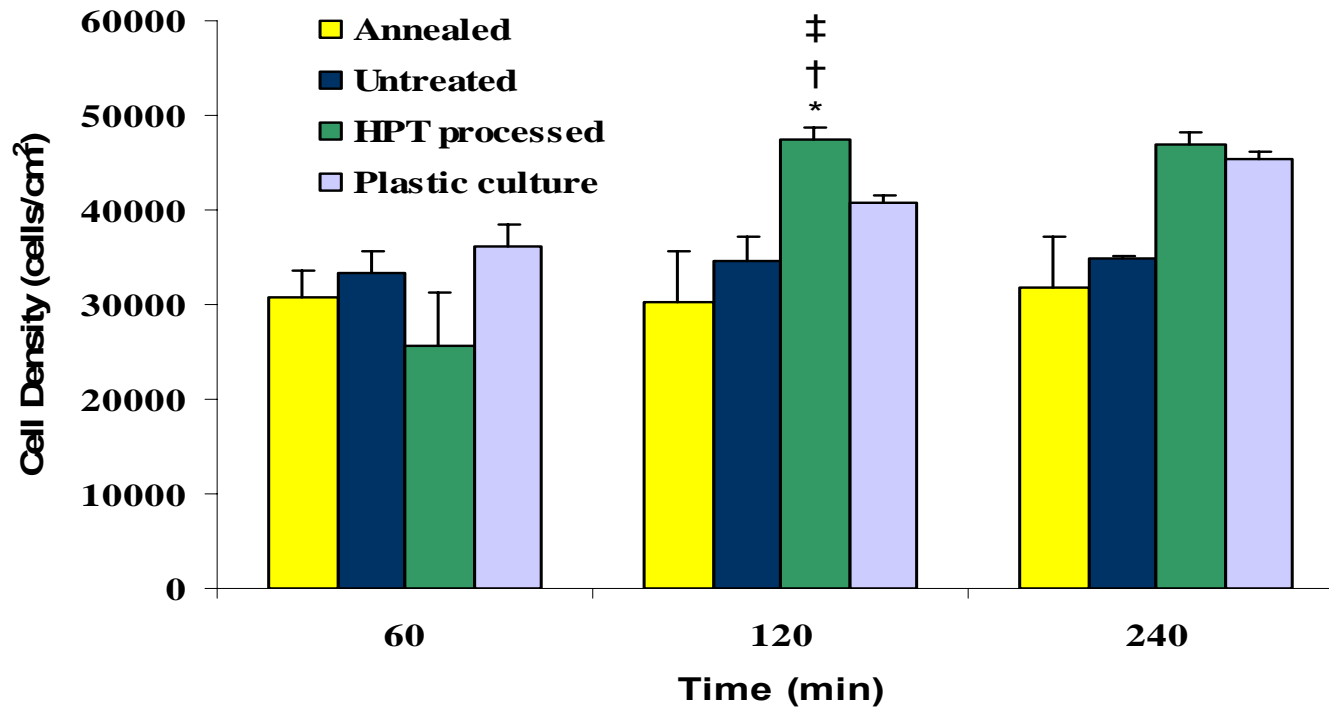
➤ Vinculin

❖ SEM: cell morphology

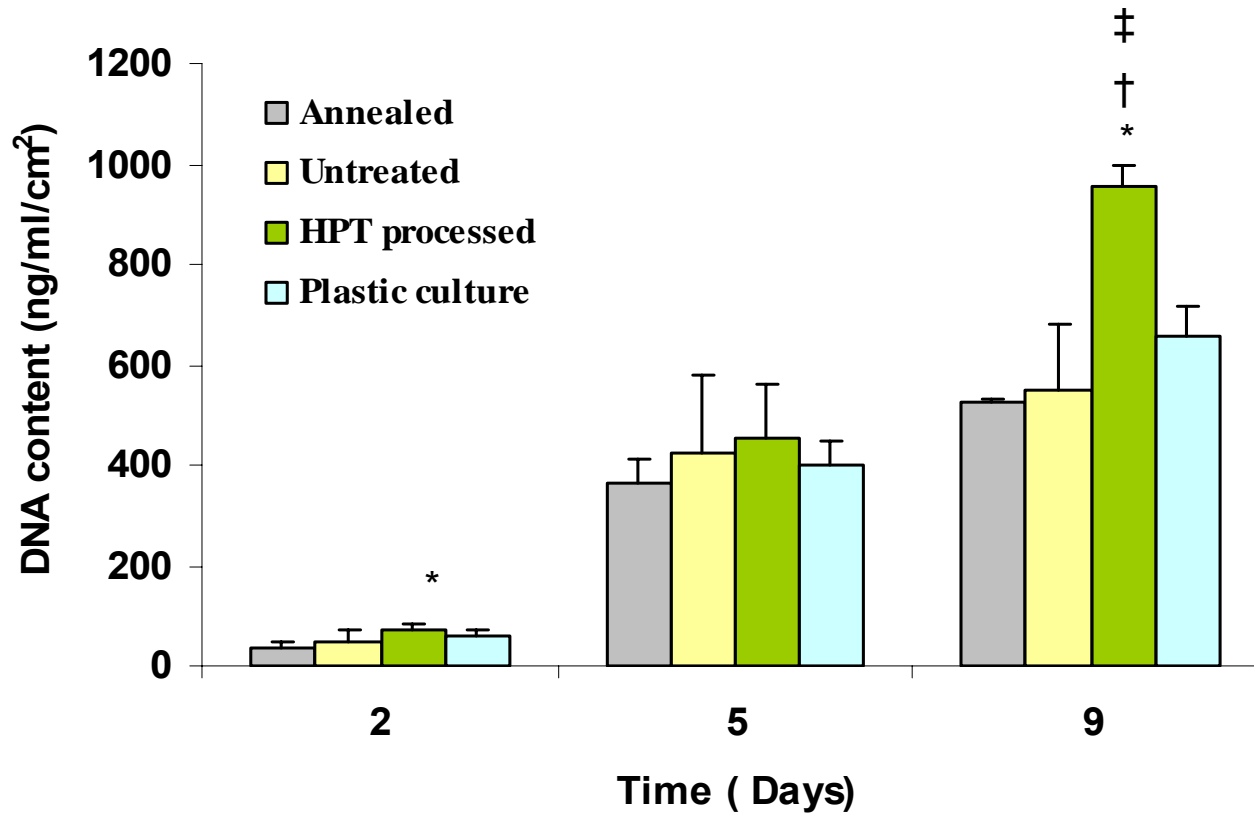
# Cell Attachment (MC3T3-E1)



# Cell Attachment (Fibroblast)



# MC3T3-E1 DNA Content (Growth)



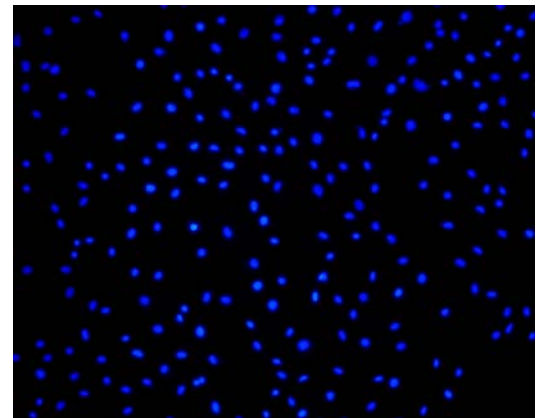
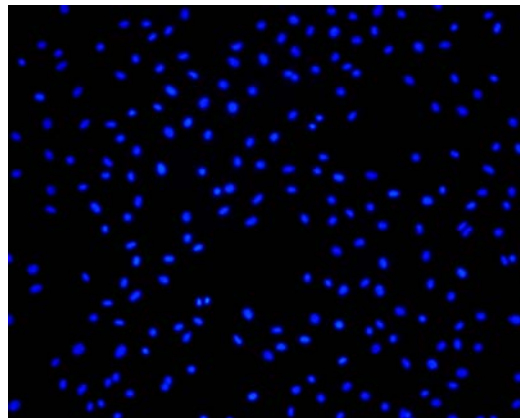
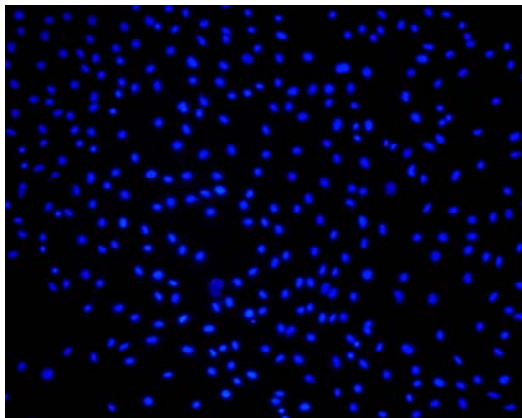
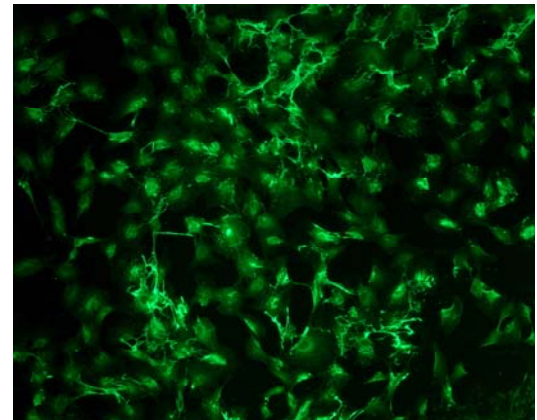
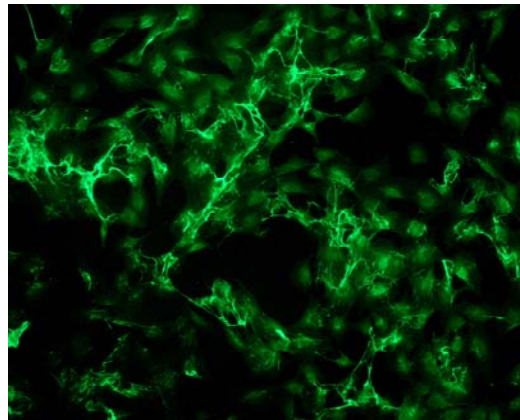
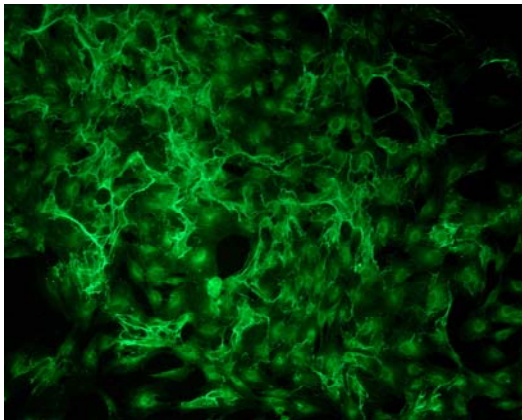
# Immunofluorescence- Fibronectin

Monoclonal anti-fibronectin antibody, 48 hrs

**HPT-Ti**

**Untreated-Ti**

**Annealed-Ti**



# Immunofluorescence; Actin & Vinculin

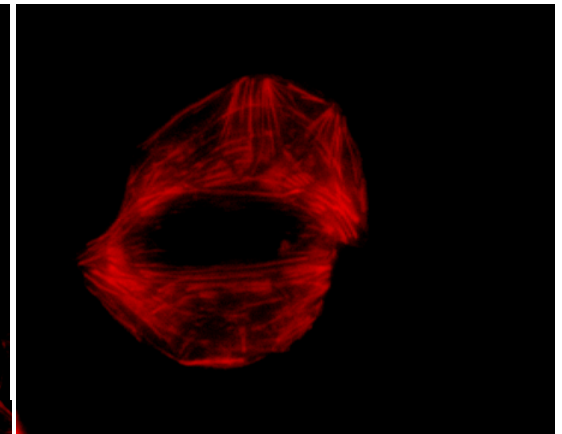
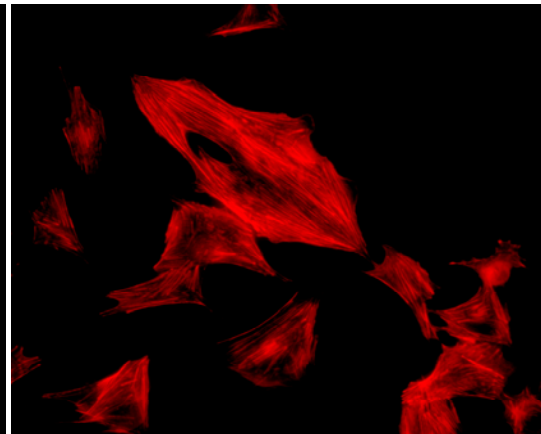
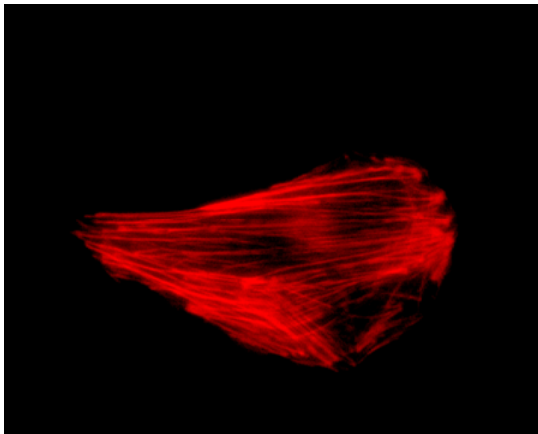
Primary anti-vinculine, goat-anti-mouse FITC conjugated secondary antibody in combination with TRITC-conjugated phalloidin

**HPT-Ti**

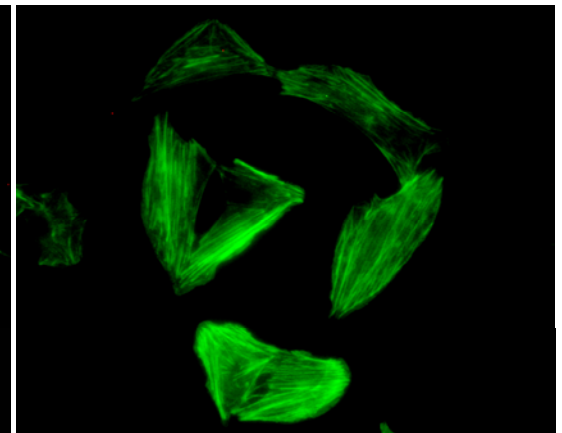
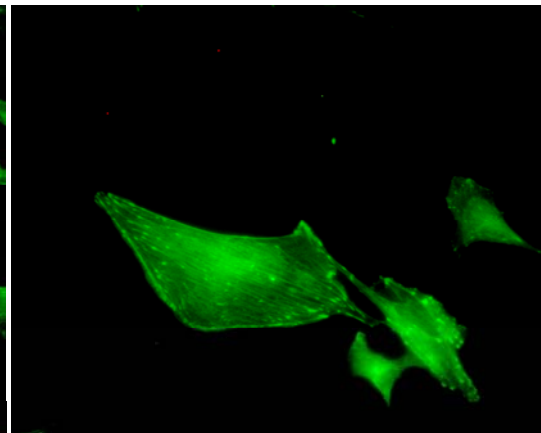
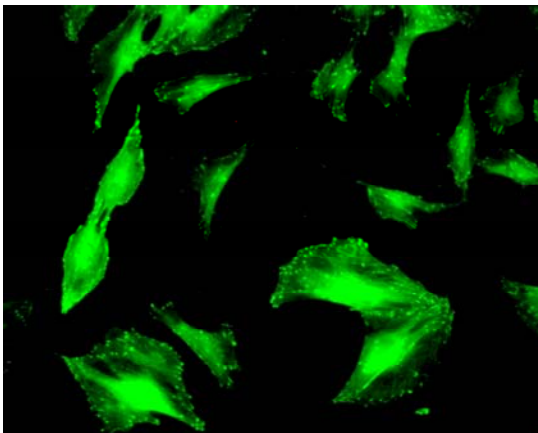
**Untreated-Ti**

**Annealed-Ti**

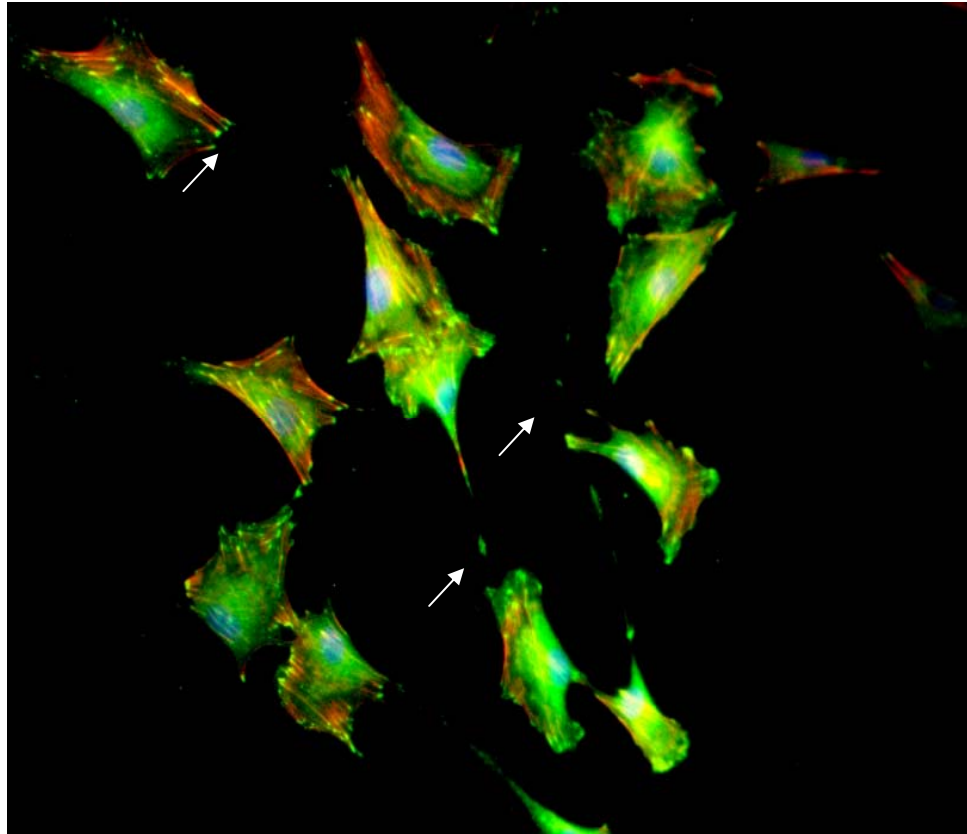
**Actin**



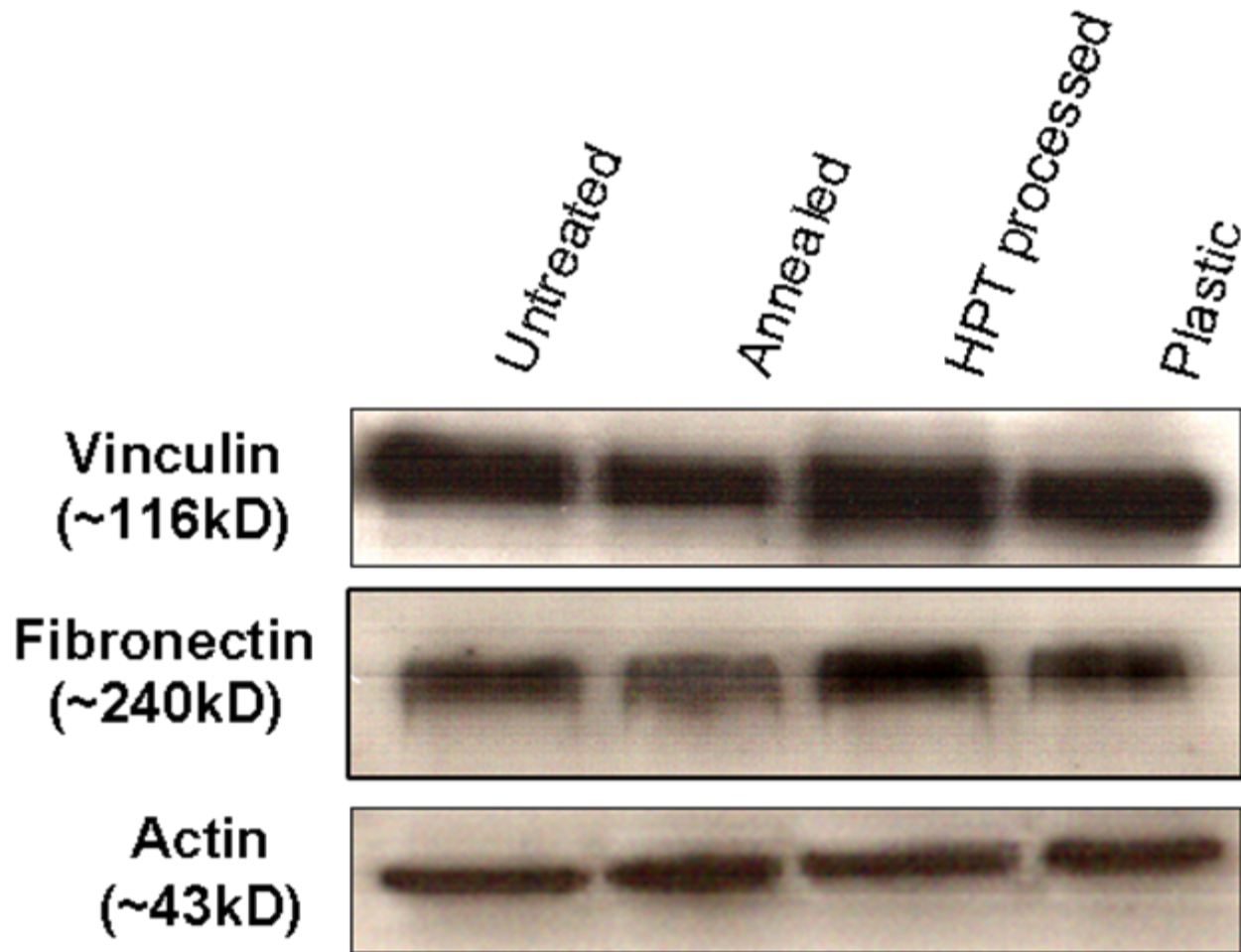
**Vinculin**



# Focal contact



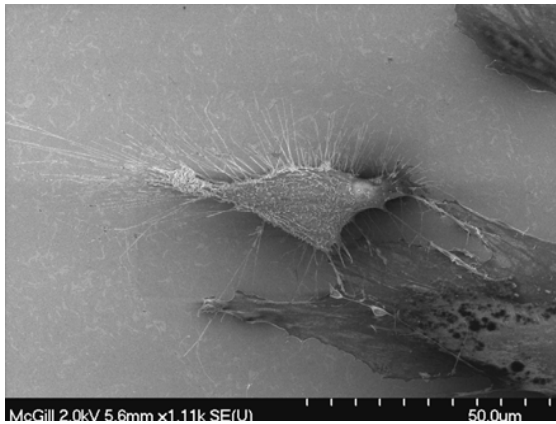
# Western blot



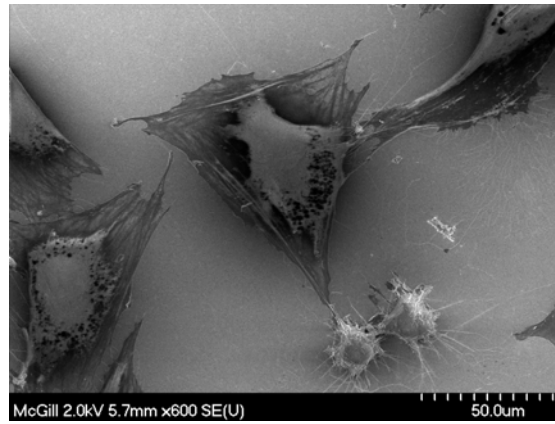


# Cell morphology-SEM

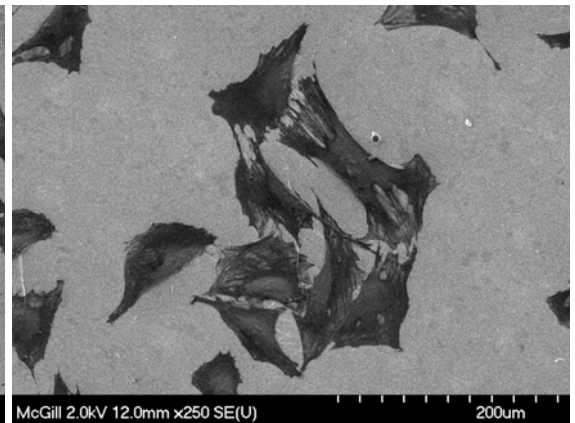
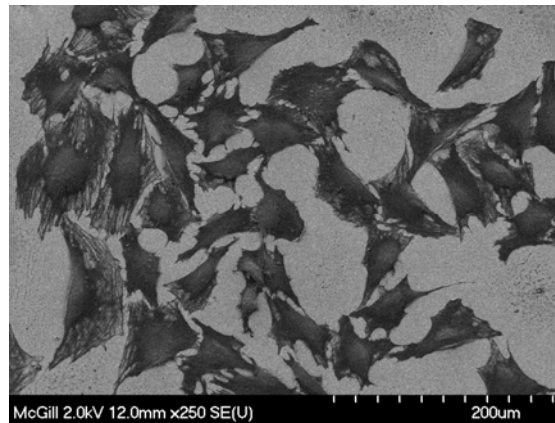
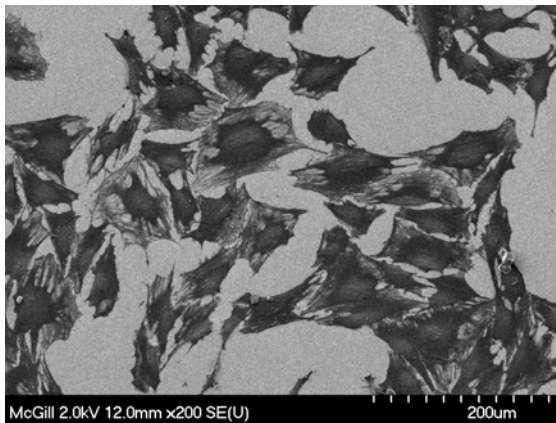
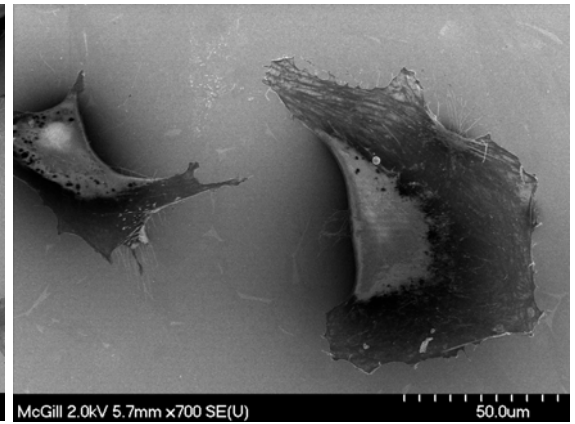
## HPT-Ti



## Untreated-Ti



## Annealed-Ti



# Exercise:

---

**1-**Two previously undeformed cylindrical specimens of an alloy are to be strain hardened by reducing their cross-sectional areas (while maintaining their circular cross sections). For one specimen, the initial and deformed radii are 16 mm and 11 mm, respectively. The second specimen, with an initial radius of 12 mm, must have the same deformed hardness as the first specimen; compute the second specimen's radius after deformation.

**2-**Compute the ductility (%EL) of a cylindrical copper rod if it is cold worked such that the diameter is reduced from 15.2 mm to 12.2 mm (0.60 in. to 0.48 in.).

# Chapter Two:

## Metallic Biomaterials

---

---

### Introduction

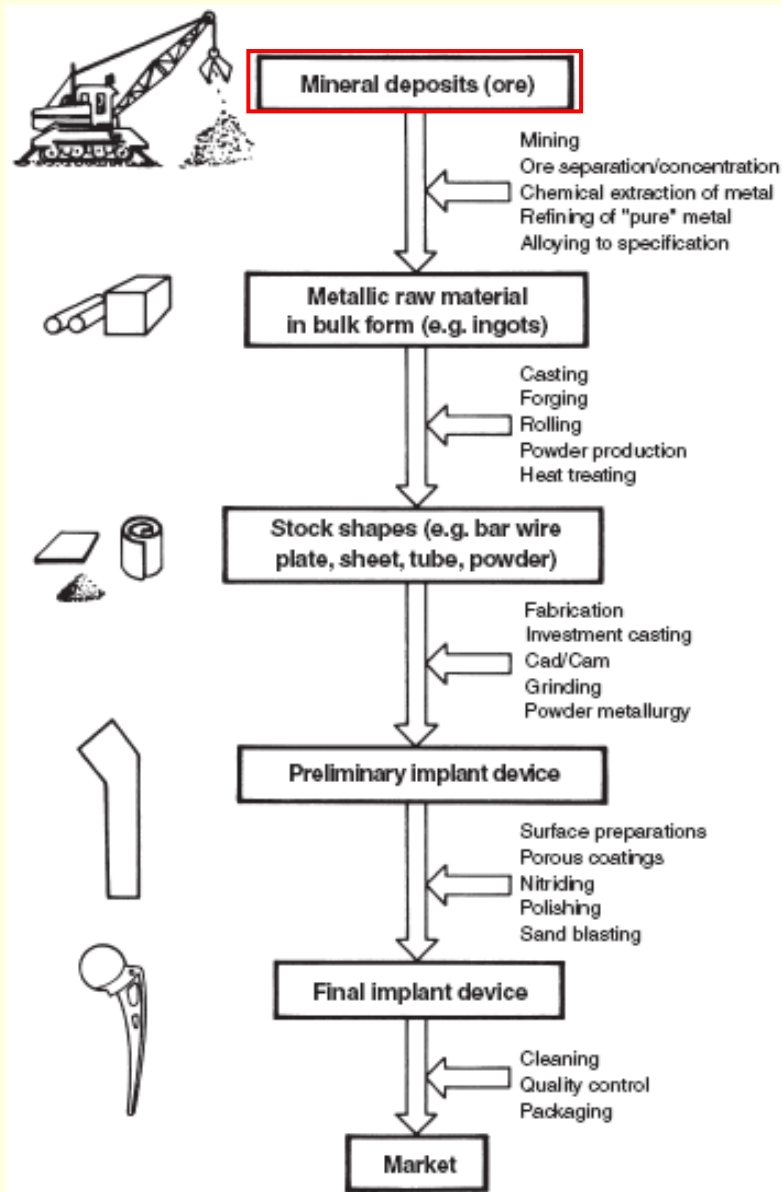
- The biomaterials market has been ~ \$9 billion for the year 2000, with a growth rate of about 20% per year Only in USA
- **3.6 million** orthopedic operations per year in the United States, four of the 10 most frequent involve metallic implants:
- About 11 million Americans (about **4.6%** of the civilian population) have at least one implant (most of them Metallic)

### **FABRICATION OF IMPLANTS**

- Structure and properties of metallic implant materials need understanding of the metallurgical processing and history of the materials

➤ بطور کلی روش استخراج و ساخت هر نوع از metallic device متفاوت بوده ولی عموماً از روش عمومی پیروی می شود:

# Chapter Two: Metallic Biomaterials



➤ Metals exist in the in mineral form and chemically combined with other elements, like metal oxides.

➤ These minerals must be located and separated and refined and processes into pure metal or alloys:

■ e.g. Titanium:

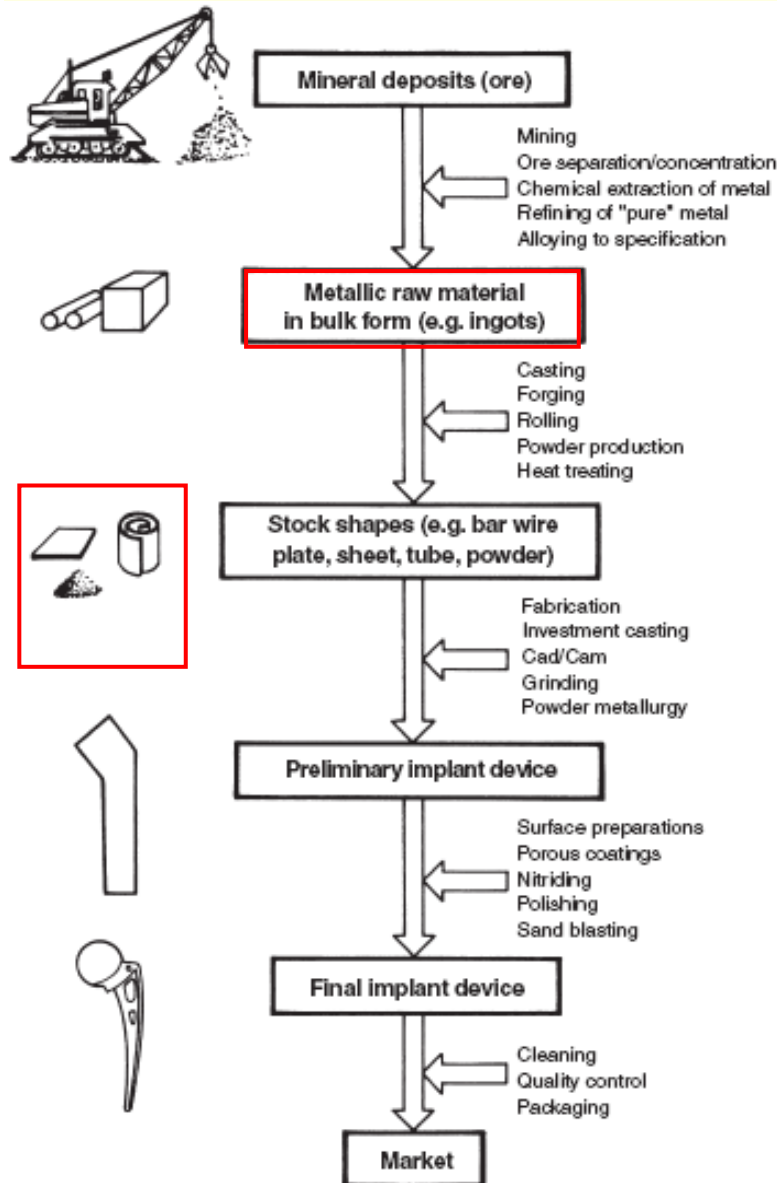
✓ in mines of southeast of US

✓ Sandy mixture of metal containing of: rutile ( $\text{TiO}_2$ ) and ilmenite ( $\text{FeTiO}_3$ )

✓ Further processing specific for each metal (**Kroll process**)

✓ Depending to the purity grade for final product, further refining (vacuum furnace), and additional steps: difference in  $\text{O}_2$  content of Cp-Ti

# Chapter Two: Metallic Biomaterials



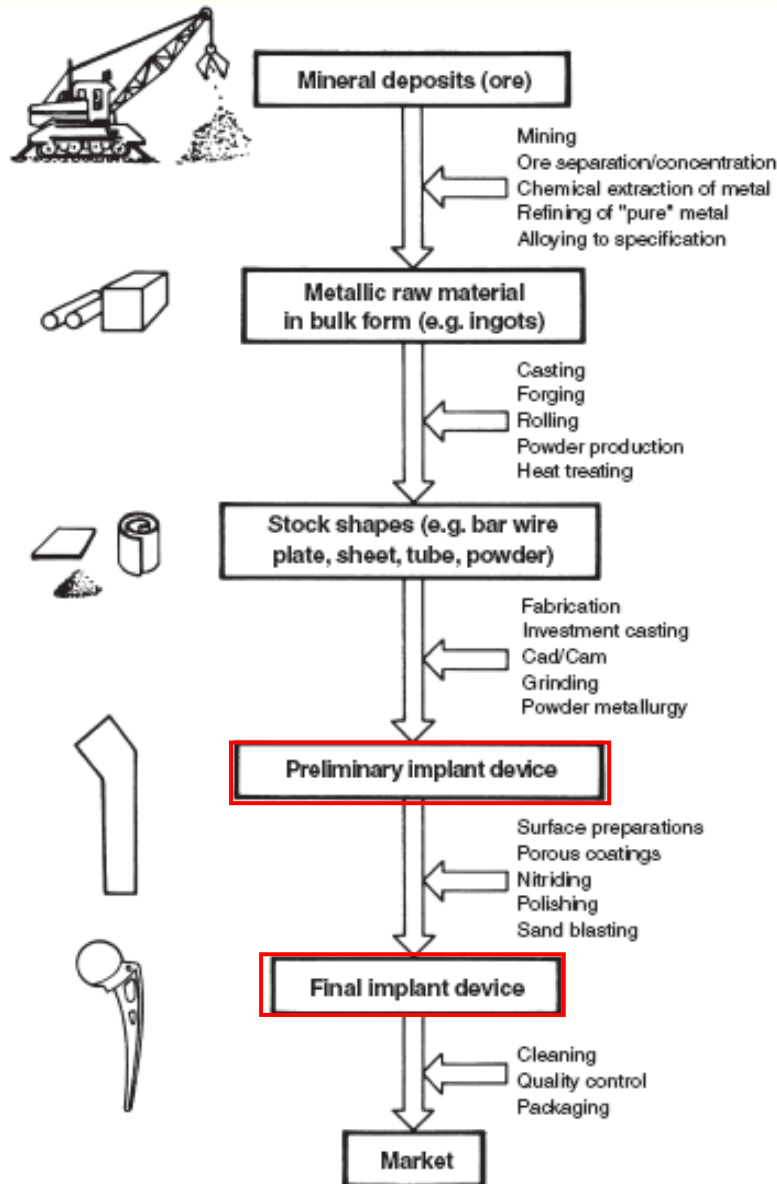
➤ From extraction steps to resulting raw metal product eventually results in some type of bulk form: ingots, and supplied to metal supplier

➤ A metal supplier further processes the bulk raw metal into "stock" bulk shapes, like: bars, wire, sheet, rods, plates, tubes, or powders

➤ **Manufacturers** based on the final shape of their product buy the closest form (rod: dental implants)

➤ For specific metallic implant alloy raw metal processed further by remelting and adding elements and controlled solidification (Ti-6Al-4V)

# Chapter Two: Metallic Biomaterials



➤ Normally an implant manufacturer buy stock material and fabricate preliminary and final forms of device

➤ Factors involve in specific steps:

- Final geometry of the implant
- Forming and machining properties of the metal
- Costs of fabrication methods:
  - ✓ Investment casting
  - ✓ Conventional and computer based machining
  - ✓ Forging
  - ✓ Power metallurgy (HIP)

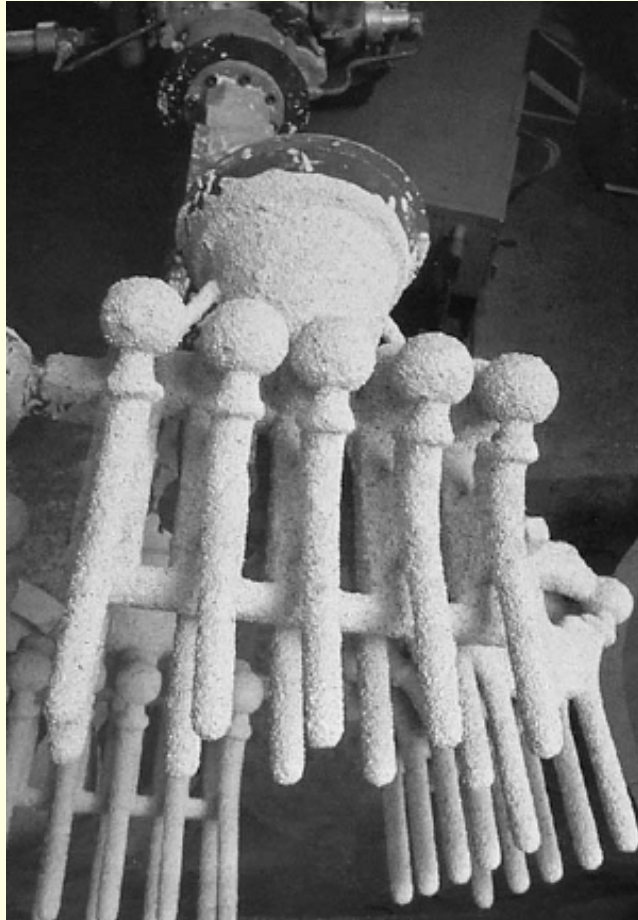
➤ Not all implant alloy can be made in a similar way (both method and cost) e.g. cobalt-based alloy difficult for machining in complicated shape (investment casting or P/M)



# Chapter Two:

## Metallic Biomaterials

---



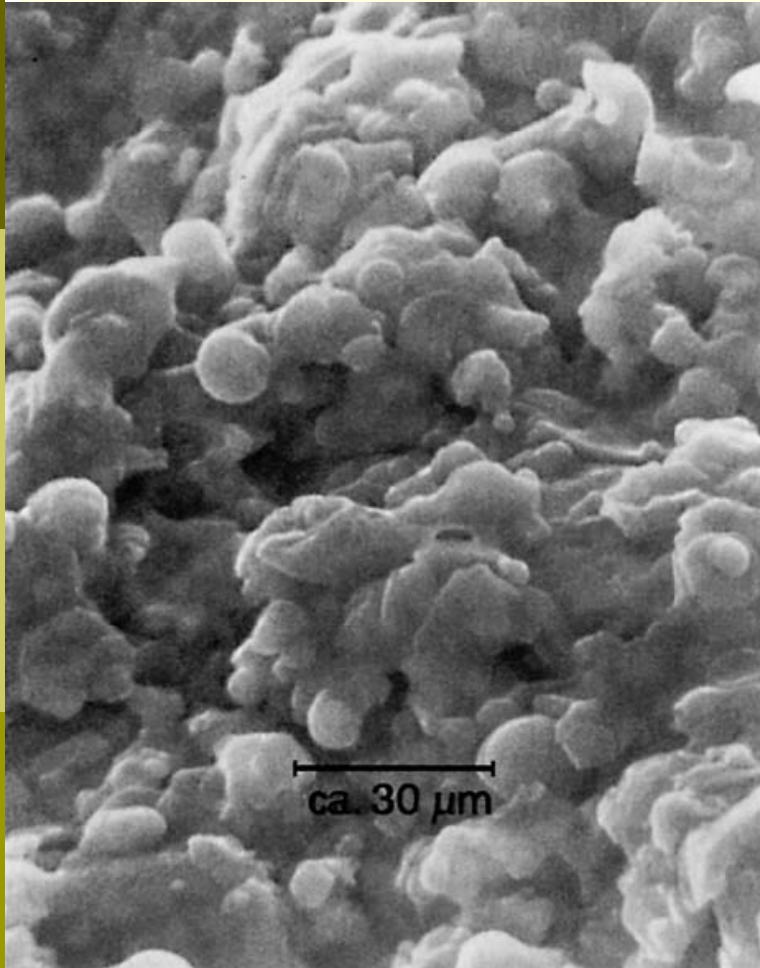
Rack of hip stems made by investment casting by **ceramic molds**

- Titanium is difficult to cast and usually machined even though not easily machinable
- Applying the Macro/ microporous coating on the surface of the implant (create surface roughness)
- Different forms and technologies:
  - Can be applied to specific region of the implant (proximal of femoral stem)
  - Can be involved with high-tem sintering (one half of the melting point of the metal):
    - ✓ Diffusive mechanism forms necks that join the beads to each other and the metallic substrate
    - ✓ Such temperatures can change the microstructure of underlying metals

# Chapter Two:

## Metallic Biomaterials

---



and to the substrate.  
**Scanning electron micrograph  
of a titanium plasma spray  
coating on an oral implant.**

- Another method is **plasma spraying**:
  - the powder of desired coating particles are melted and sprayed onto the desired region of the implant
  - After solidification it forms rough coating
- Other surface treatments are possible:
  - Ion implantation, Nitriding, etc,...
- Finally manufacturer do some finishing steps (different with company and metals)
  - ✓ Usually include the chemical cleaning (to remove impurities) and passivation (in a appropriate acid or other methods)
  - ✓ According to Good Manufacturing Practice (GMP) or ASTM



# Chapter Two:

## Metallic Biomaterials

---

➤ Overall, these steps are extremely important to biological performance of the implant because they can affect the surface properties of the medical device, which is in direct contact with the blood and other tissues at the body

➤ بطور کلی خواص بیومواد باید در حد امکان با خواص بافت مورد نظر که مورد بررسی و درمان قرار دارد هماهنگی داشته باشد

➤ در خصوص **Bone Tissue** به عنوان مثال فلزات the primary material مورد استفاده در ترمیم قرار داشته اند. (بدلیل خاصیت **Load bearing**)

➤ در عمل سه دسته از فلزات با primary elements شامل آهن Fe، کبالت Co، و تیتانیوم Ti، مورد استفاده در ساخت انواع بیومواد فلزی قرار گرفته اند

➤ در کاربردهائی که مقاومت strength مورد نیاز می باشد نظیر کاربرد ارتوپدی alloys در نظر گرفته می شوند بطور کلی فلزات به سه دسته شامل:

▪ **Stainless steels**

▪ **Co-based alloys**

▪ **Ti -based alloys**

# Chapter Two:

## Metallic Biomaterials

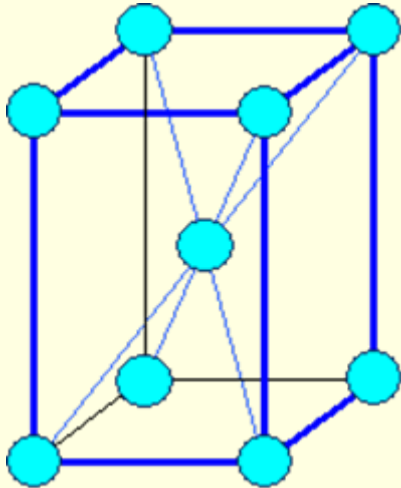
---

### Stainless Steel (SS) □

- فولاد زنگ نزن اساساً آلیاژ آهن می باشد که حاوی ۱۰/۵ درصد یا بیشتر فلز کرم **Cr** می باشد
- تشکیل اکسید کرم به ضخامت حدود  $\sim 2\text{nm}$  بروی سطح خاصیت ضد زنگی **stainless** را به این آلیاژ می دهد
- کربن دیگر عنصر مهم در ساختار **SS** بوده که میزان آن در گستره ۰.۰۳-۱٪
- از کل میزان و توناژ فولاد زنگ نزن حدود ۱٪~ آن تحت مصارف **Biomedical** قرار می گیرد
- بخش عمده وسایل جراحی و دندانپزشکی **non-implant medical devices** از فولاد زنگ نزن **commercially grade** تهیه می گردد

# Chapter Two:

## Metallic Biomaterials



### STAINLESS STEEL CLASSIFICATIONS □

#### Martensitic Stainless Steel ❖

➤ آلیاژهای Fe-Cr-C می باشند

➤ دارای ساختار کرسطالی Body centered tetragonal می باشند

➤ از نظر مقاومت در برابر خوردگی در حد متوسط Mildly corrosion resistant

➤ در ترکیب شیمیایی دارای Cr:10.5-18%, C:  $\geq 1.2\%$

➤ میزان درصد کرم و کربن توازن گشته تا ساختار کریستالی martensitic structure را برقرار و حفظ نماید

#### Body Centered Tetragonal

$$a = b \neq c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

# Chapter Two:

## Metallic Biomaterials

### STAINLESS STEEL CLASSIFICATIONS □

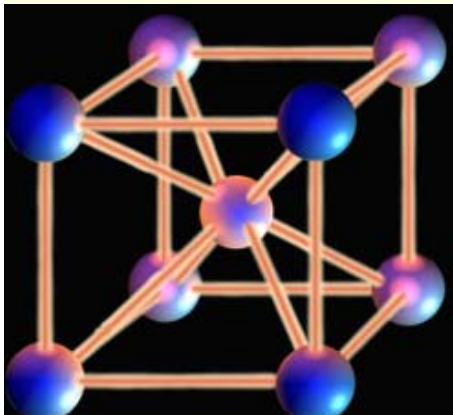
#### Ferritic Stainless Steel ❖

➤ آلیاژهای Fe-Cr می باشند

➤ دارای ساختار کرسطالی Body Centered Cubic (BCC) می باشند

➤ در ترکیب شیمیائی دارای Cr:11-30%

➤ این آلیاژها قابل مقاوم سازی **Strengthening** بوسیله عملیات حرارتی و یا کار سرد را ندارند (به ترتیب ساختار کریستالی و ductility آنها تحت تاثیر قرار میگیرد)



**Body Centered Cubic (BCC)**

$$a = b = c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

# Chapter Two:

## Metallic Biomaterials

---

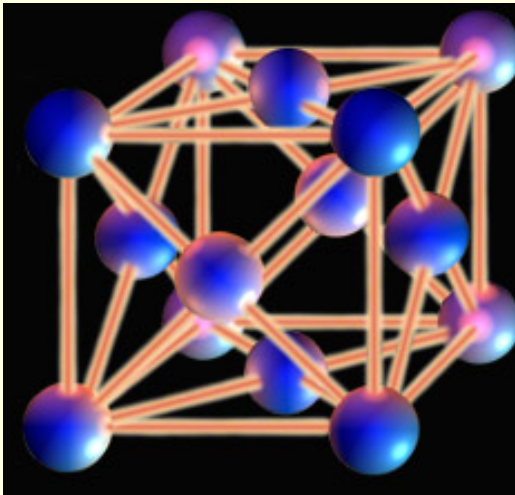
### STAINLESS STEEL CLASSIFICATIONS □

#### Austenitic Stainless Steel (316L) ❖

➤ بزرگترین دسته از فولاد های زنگ نزن را تشکیل می دهند

➤ دارای ساختار کرسطالی Face Centered Cubic (FCC) می باشند

➤ در ترکیب شیمیائی دارای **Fe:60-65%, Cr:17-19%, Ni: 12-14%, C: <0.03%**



#### Face Centered Cubic (FCC)

$$a = b = c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

# Chapter Two: Metallic Biomaterials

## STAINLESS STEEL CLASSIFICATIONS □

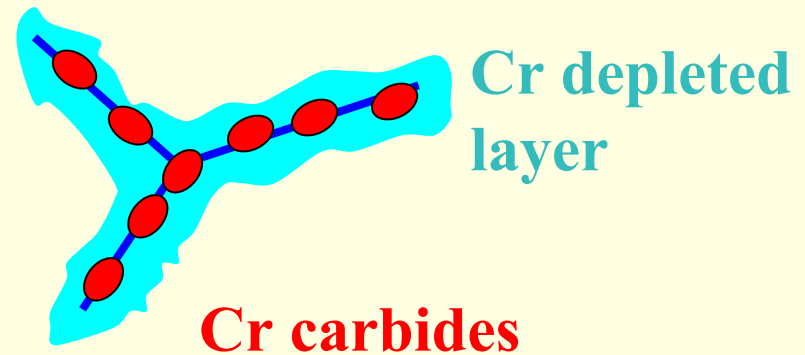
### Austenitic Stainless Steel (316L) ❖

➤ افزایش **Cr** جهت تشکیل  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  و بهبود Corrosion resistance که معمولاً باعث پایداری **(BCC)** over **(FCC)**

➤ بدین جهت افزایش نیکل **Ni** جهت پایداری **(FCC)** Austenitic phase می باشد

➤ **C > 0.03%** باعث تشکیل کاربیدهای کرم نظیر  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  می گردد

Prone to fracture assisted by **intergranular** corrosion at weakened grain boundaries



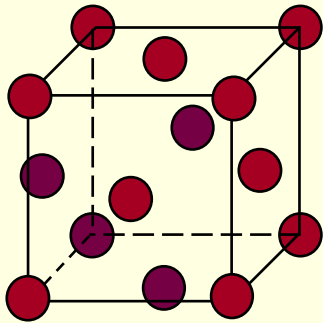
# Chapter Two: Metallic Biomaterials

---

---

## CRYSTALLOGRAPHY OF COBALT □

High Tem  $>419^{\circ}\text{C}$   
FCC

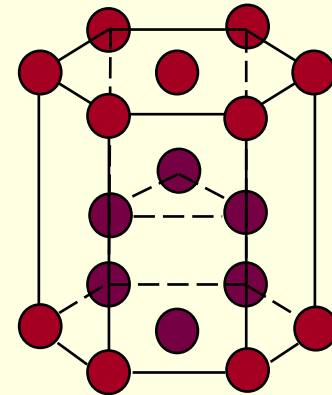


Isothermal  
transformation



Strain-induced  
transformation

Low tem  $<419^{\circ}\text{C}$   
HCP



# Chapter Two:

## Metallic Biomaterials

---

### **COBALT- BASED ALLOY** □

Haynes-Stellite 21 or **ASTM F75** ❖

Haynes-Stellite 25 or **ASTM F90** ❖

Forged Co-Cr-Mo; **ASTM F799** ❖

Multiphase (MP) alloy MP35N; **ASTM F562** ❖

**As cast and wrought**



| Material       | ASTM designation | Common/trade names  | Composition (wt %)  | Notes  |
|----------------|------------------|---|---|--|
| Co–Cr–Mo       | F75              | Vitallium<br>Haynes-Stellite 21<br>Protasul-2<br>Micrograin-Zimaloy | 58.9–69.5 Co<br>27.0–30.0 Cr<br>5.0–7.0 Mo<br>max 1.0 Mn<br>max 1.0 Si<br>max 1.0 Ni<br>max 0.75 Fe<br>max 0.35 C                                   | Vitallium is a trademark of Howmedica, Inc.<br>Haynes-Stellite 21 (HS 21) is a trademark of Cabot Corp.<br>Protasul-2 is a trademark of Sulzer AG, Switzerland.<br>Zimaloy is a trademark of Zimmer USA. |
| Co–Cr–Mo       | F799             | Forged Co–Cr–Mo<br>Thermomechanical Co–Cr–Mo<br>FHS                 | 58–59 Co<br>26.0–30.0 Cr<br>5.0–7.00 Mo<br>max 1.00 Mn<br>max 1.00 Si<br>max 1.00 Ni<br>max 1.5 Fe<br>max 0.35 C<br>max 0.25 N                      | FHS means “forged high strength” and is a trademark of Howmedica, Inc.   |
| Co–Cr–W–Ni     | F90              | Haynes-Stellite 25<br>Wrought Co–Cr                                 | 45.5–56.2 Co<br>19.0–21.0 Cr<br>14.0–16.0 W<br>9.0–11.0 Ni<br>max 3.00 Fe<br>1.00–2.00 Mn<br>0.05–0.15 C<br>max 0.04 P<br>max 0.40 Si<br>max 0.03 S | Haynes-Stellite 25 (HS25) is a trademark of Cabot Corp.  |
| Co–Ni–Cr–Mo–Ti | F562             | MP 35 N<br>Biophase<br>Protasul-10                                  | 29–38.8 Co<br>33.0–37.0 Ni<br>19.0–21.0 Cr<br>9.0–10.5 Mo<br>max 1.0 Ti<br>max 0.15 Si<br>max 0.010 S<br>max 1.0 Fe<br>max 0.15 Mn                  | MP35 N is a trademark of SPS Technologies, Inc.<br>Biophase is a trademark of Richards Medical Co.<br>Protasul-10 is a trademark of Sulzer AG, Switzerland   |

# Chapter Two: Metallic Biomaterials

## ASTM F75; Co-Cr-Mo Cast □

### Microstructure and Properties ❖

➤ خاصیت اصلی این آلیاژ مقاومت در برابر خوردگی می باشد (بدلیل حضور  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )

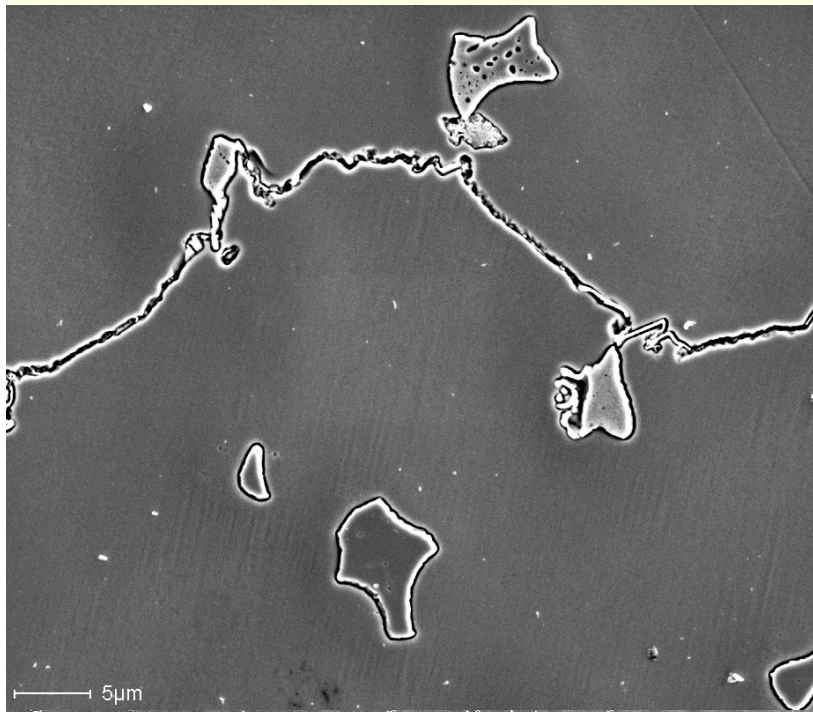
➤ بوسیله Casting فلز مذاب در قالب سرامیکی تهیه می گردد (melt at  $1350-1450^\circ\text{C}$ )

- Cr-depleted regions
  - interdendritic carbides
  - Relatively large grain size
- Decrease yield strength

### HALL-PETCH EQN

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$

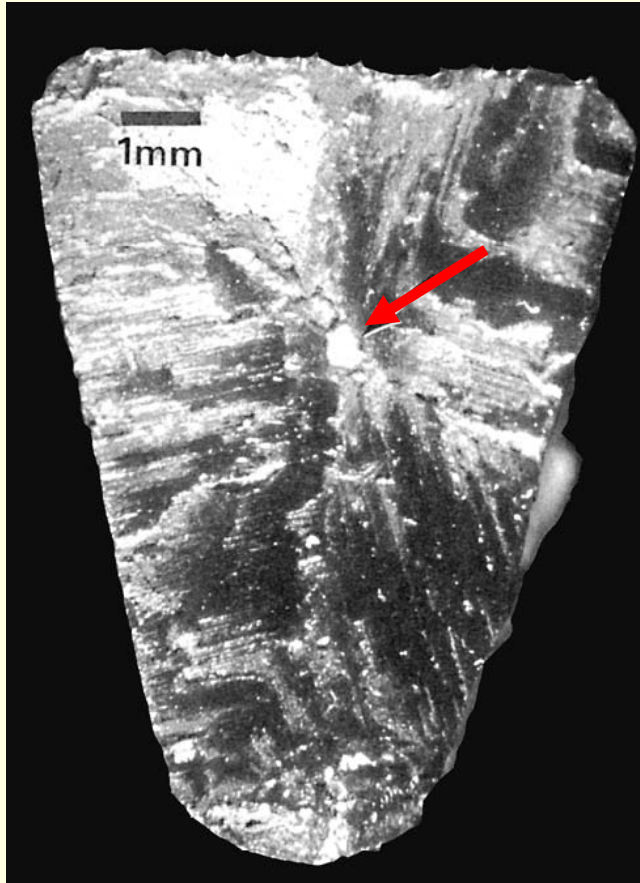
Grain size (diameter) in  $\mu\text{m}$



As-cast

# Chapter Two: Metallic Biomaterials

---



## ASTM F75; Co-Cr-Mo Cast □

### Microstructure and Properties ❖

احاطه شدن تکه های قالب سرامیک در حین فرایند جامد سازی در داخل قطعه ▶

Inclusion of ceramic mold  
during solidification

Contribute in fatigue fracture  
*in vivo*

# Chapter Two:

## Metallic Biomaterials

### ASTM F75; Co-Cr-Mo Cast □

#### Hot Isostatic Pressing (HIP) ❖

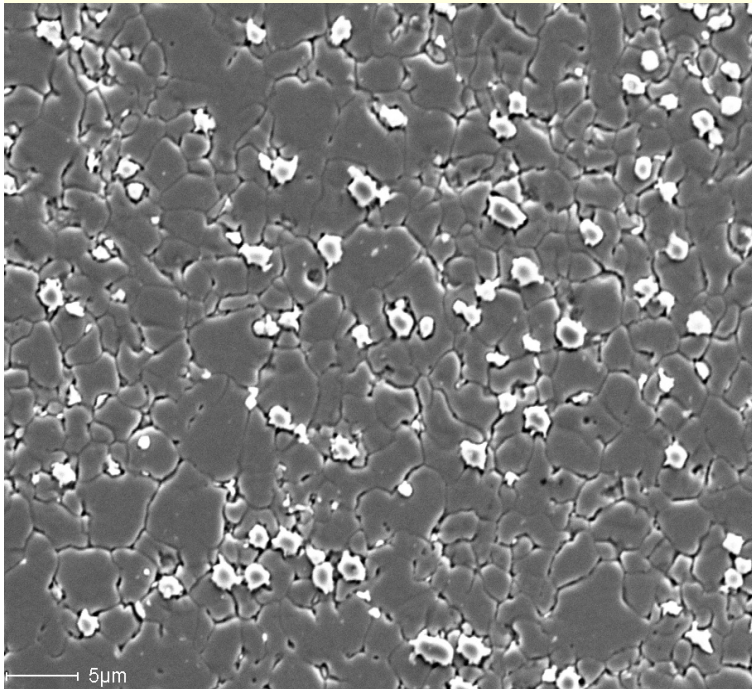
➤ جهت جلوگیری از این مشکل از روش HIP و یا همان powder metallurgy استفاده می شود

➤ پودر آلیاژ F75 تهیه و تحت فشار و دمای مناسب sinter می گردد (100 MPa at 1100°C for 1 h)

➤ نمونه تهیه شده نهایتاً به شکل نهایی forge می گردد

➤ نمونه های HIP دارای سایز دانه ریزتر می باشند

➤ نتیجه دارای Higher yield and fatigue properties (both for **finer grain size** and distribution of **carbides** )



# Chapter Two:

## Metallic Biomaterials

---

### ASTM F799

- آلیاژ F75 که پس از casting بشکل گرم دردمای  $800^{\circ}$  hot forge می گردد
- دارای فاز HCP می باشد که حاصل تبدیل از FCC بوسیله نیروهای Shear می باشد  
**shear induced transformation of FCC to HCP platelets**
- خواص فیزیکی این آلیاژ نظیر **yield, fatigue and ultimate tensile strength** دو برابر F75 می باشد

# Chapter Two:

## Metallic Biomaterials

---

### ASTM F90- Wrought

➤ آلیاژ F90 آلیاژی از Co-Cr-W-Ni می باشد

➤ Wrought آلیاژ می باشد

➤ عناصر نیکل Ni و تنگستن W افزوده می شوند جهت بهبود خواص machinability and fabrication properties

➤ **Co: 45.5-56.2 Cr: 19.0-21.0 W: 14.0-16.0 Ni: 9.0-11.0**

➤ در حالت Annealed دارای خواص مکانیکی مشابه با F75 می باشد

➤ بوسیله کار سرد 44% cold work می توان خواص مکانیکی این آلیاژ را به دو برابر بهبود بخشید



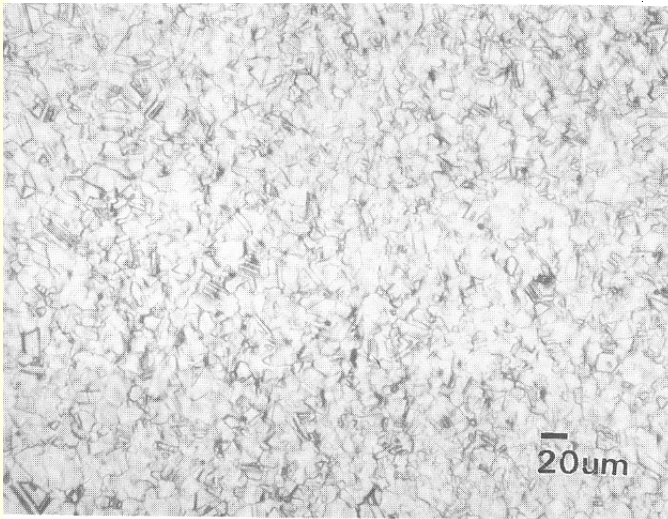
# Chapter Two: Metallic Biomaterials

## ASTM F562- MP35N; Wrought □

- آلیاژ F562 آلیاژی از Co-Ni-Cr-Mo-Ti می باشد
- Wrought و آلیاژ چند فازی می باشد (precipitation like  $\text{Co}_3\text{Mo}$ )
- بوسیله کار سرد و عملیات حرارتی microstructure قابل کنترل به آلیاژ مقاومت بالا high-strength مییابد
- کار سرد driving force جهت تبدیل FCC به HCP می باشد (به دلیل کندی تبدیل)
- HCP platelets حرکت dislocations را کند و مانع شده و عامل افزایش strength مییابد

Co-Ni-Cr-Mo-Ti

F562



MP 35 N

Biophase

Protasul-10

29–38.8 Co

33.0–37.0 Ni

19.0–21.0 Cr

9.0–10.5 Mo

max 1.0 Ti

max 0.15 Si

max 0.010 S

max 1.0 Fe

max 0.15 Mn

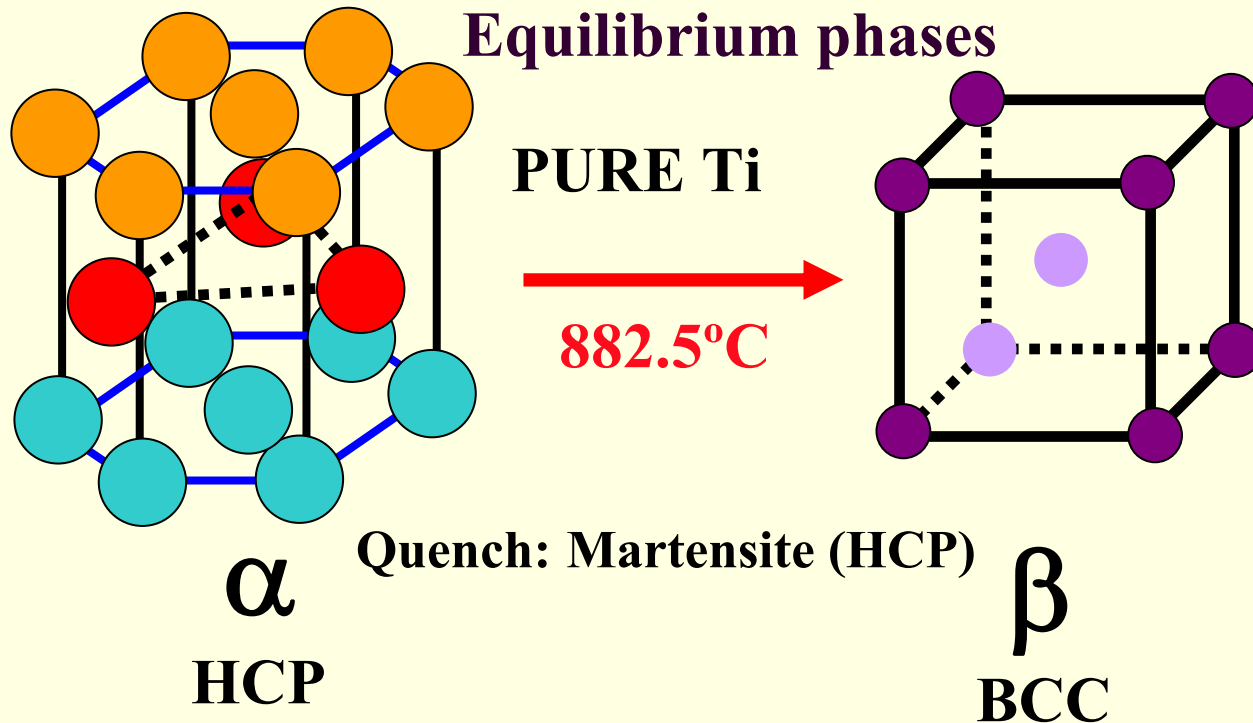
➤ **Strongest alloy because of presence of both FCC and HCP**

# Chapter Two: Metallic Biomaterials

## TITANIUM - BASED ALLOY □

Commercially pure Titanium (CP-Ti) **ASTM F67** ▶

Ti-6Al-4V **ASTM F136** ▶





# Chapter Two: Metallic Biomaterials

---

## TITANIUM - BASED ALLOY □

### Microstructure and Properties ❖

$\alpha$  Stabilizers: **increase** the  $\beta$  transus temperature  
(i.e. stabilize the  $\alpha$  to higher temperatures)....

**aluminum,** oxygen and nitrogen

$\beta$  Stabilizers: generally transition metals that are similar to Ti

molybdenum, iron, **vanadium,** chromium and manganese.

3 types of alloy

$\alpha$

$\beta$

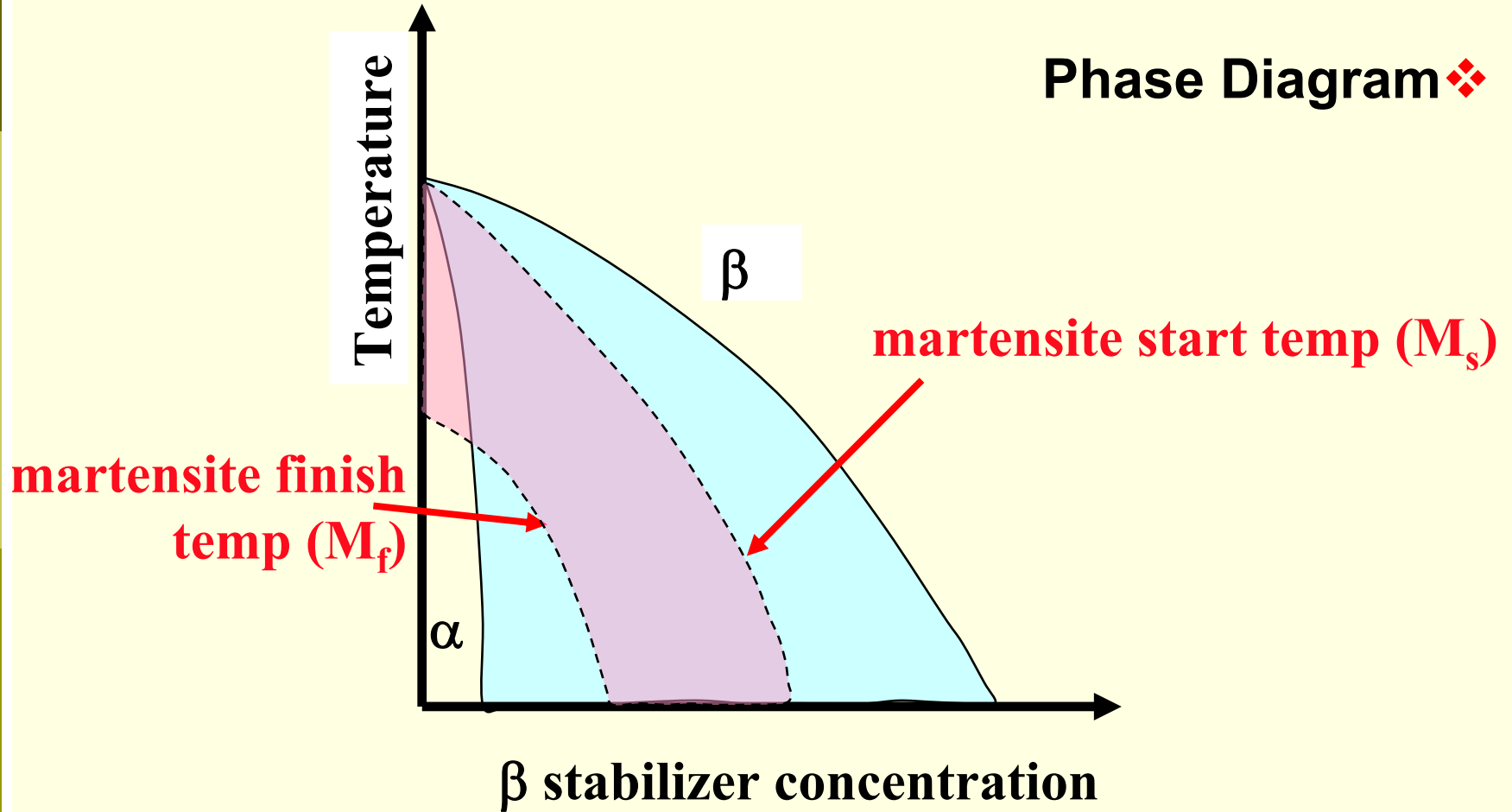
$\alpha+\beta$

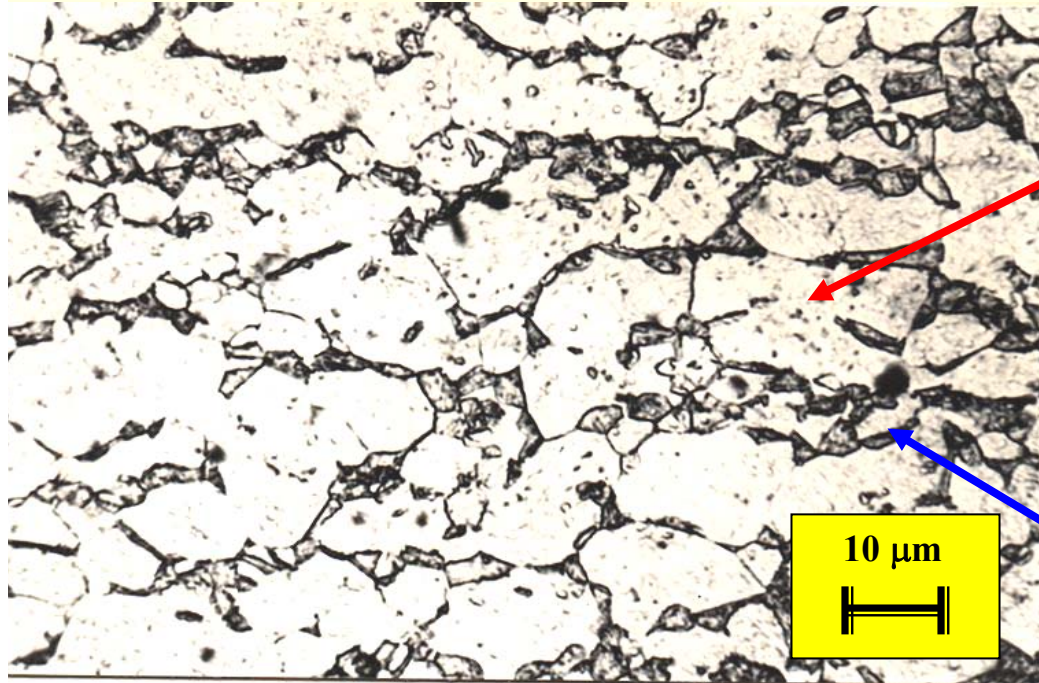
**Ti-6-4:Ti-6Al-4V**

# Chapter Two: Metallic Biomaterials

TITANIUM - BASED ALLOY ◻

Phase Diagram ❖





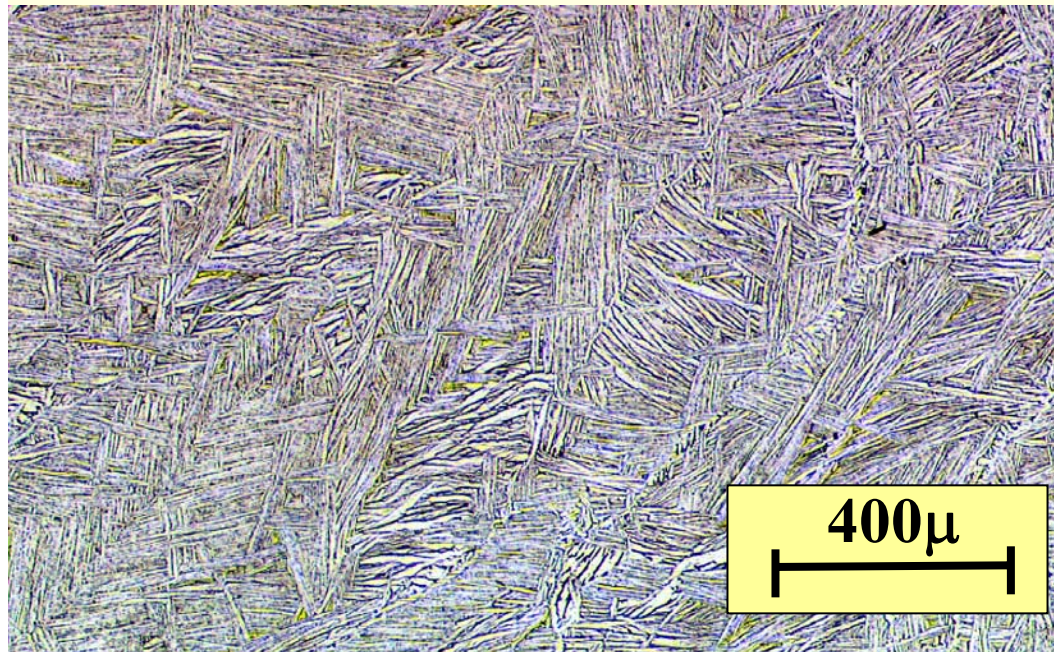
**Equiaxed  $\alpha$**

**MILL ANNEALED**

**(Cooled down from the  $\beta$  phase slowly)**

حرارت تا 1000 درجه و بالای  $\beta$

$\beta$



**$\beta$  ANNEALED**

**(Quench: cooled from single phase  $\beta$ )**

**Transformed  $\beta$   
( $\alpha$  plates with  $\beta$  interplate)**



**Equiaxed  $\alpha$**



**Transformed  $\beta$**   
**( $\alpha$  plates with  
 $\beta$  interplate)**

**Bimodal or duplex**

**(heat treat mill annealed... or hot work high in 2 phase region)**

# Chapter Two: Metallic Biomaterials

## TITANIUM - BASED ALLOY

### Microstructure and Properties

➤ بطورکلی تغییرات microstructure در آلیاژهای Ti تاثیر زیادی در مقاومت strength ندارد

➤ Ductility بوسیله grain refinement بهبود می یابد

| Materials             | Elastic modulus (Gpa) | Ultimate strength (MPa)        |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Bone                  | 10-30                 | 90-140 or 150-400 <sup>a</sup> |
| cp-Ti (pure titanium) | 105                   | 785                            |
| Co-Cr alloys          | 210-253               | 600-1795                       |
| Ti-6Al-4V             | 110                   | 960-970                        |
| Stainless steel 316L  | 200                   | 465-950                        |

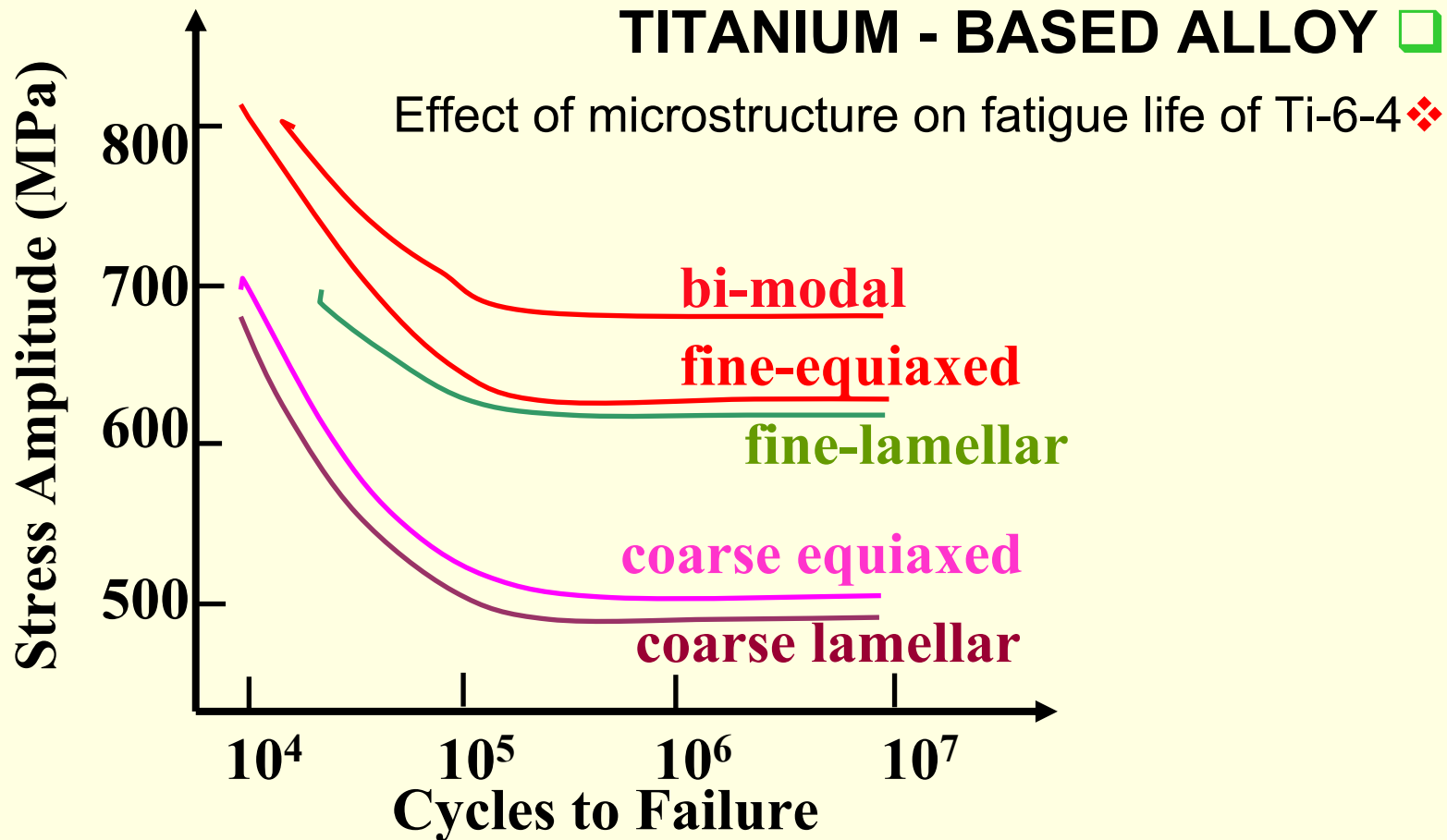
➤ Modulus of elasticity of Ti  $\approx$  **100 GPa**

(Co and SS  $\approx$  200 GPa)

➤ Advantage in minimizing bone resorption

**Bone  $\sim$ 20 GPa**

# Chapter Two: Metallic Biomaterials



Lütjering, G. and Gysler, A., 5<sup>th</sup> International Conf. on Ti, Munich, Germany, 1984, p.2065

**Equiaxed structure** Prevents initiation

**lamellar structure** Resists propagation

# Chapter Two: Metallic Biomaterials

---

## TITANIUM - BASED ALLOY

➤ بطور کلی wear resistance آلیاژهای Ti کمتر از Co-Cr-Mo (Wear 'inferior')

➤ اکسید تیتانیم ضعیفتر از اکسید تشکیل شده بروی آلیاژهای Co می باشد  $\text{Cr}_2\text{O}_3$

➤ در مقابل آلیاژهای تیتانیم دارای Fatigue بهتری از آلیاژهای Co-Cr-Mo می باشند

➤ بدلیل بالا بودن Fatigue آلیاژهای تیتانیم کاربرد در ارتوپدی که نیاز به Fatigue بالا دارند

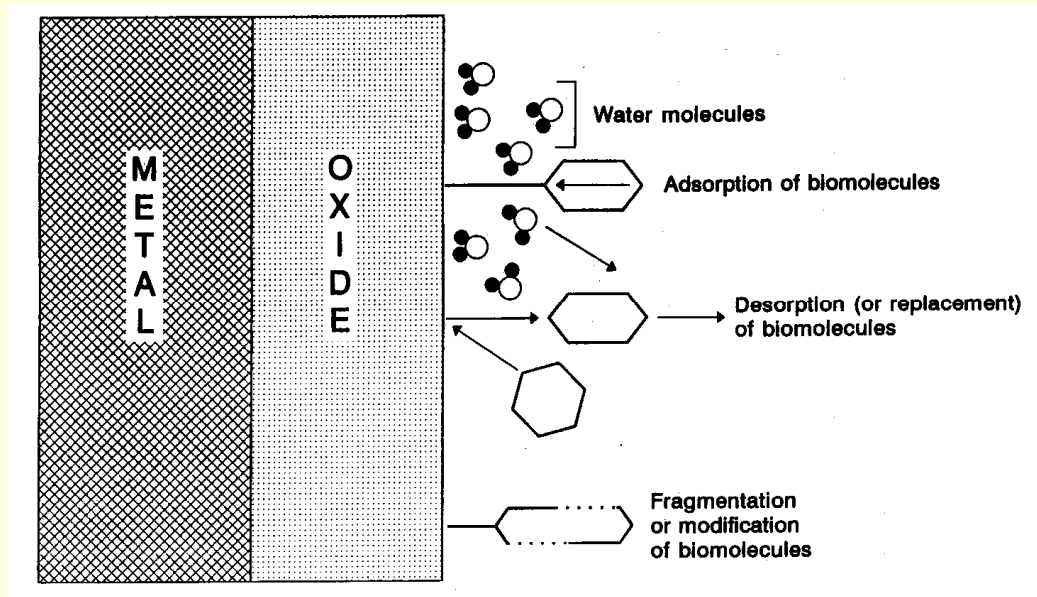
➤ تیتانیم دارای Fatigue Limit می باشد

(theoretical fatigue limit below which there is no failure under cyclic loads)

# Chapter Two: Metallic Biomaterials

## TITANIUM - BASED ALLOY □

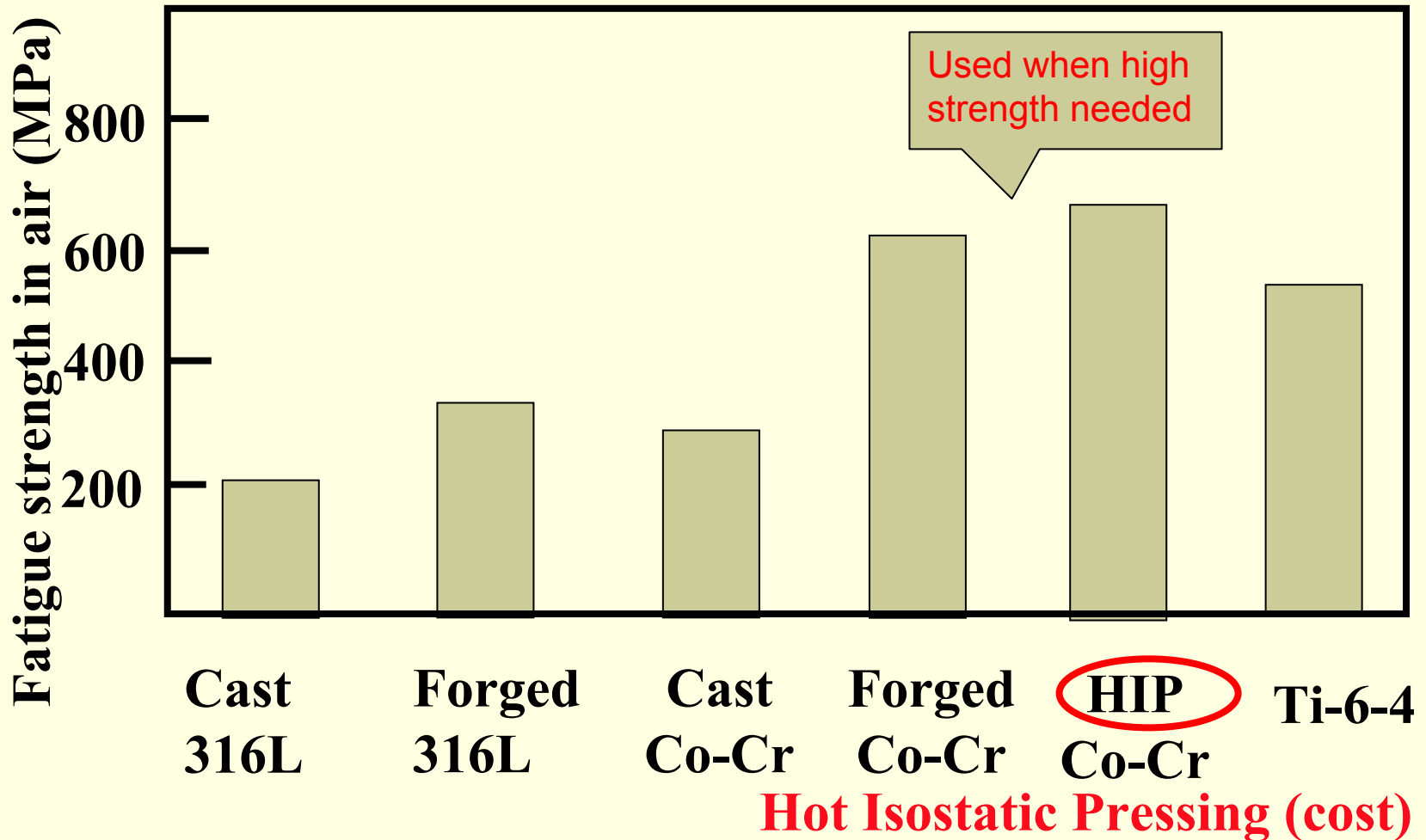
➤ اکسید سطحی تیتانیم  $TiO_2$  مسئول خواص مقاومت در برابر خوردگی و زیست سازگاری آلیاژهای تیتانیم محسوب می گردد



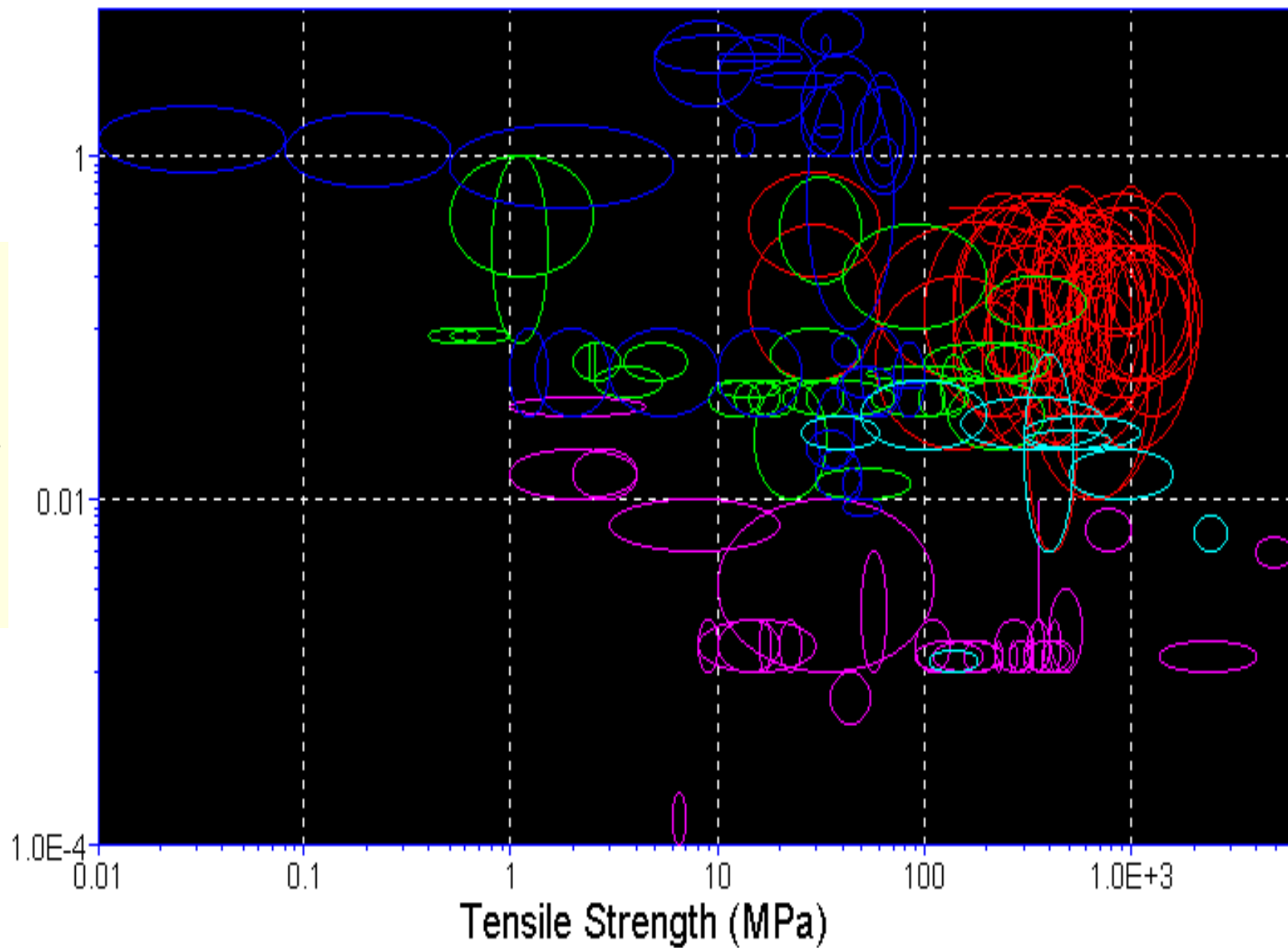


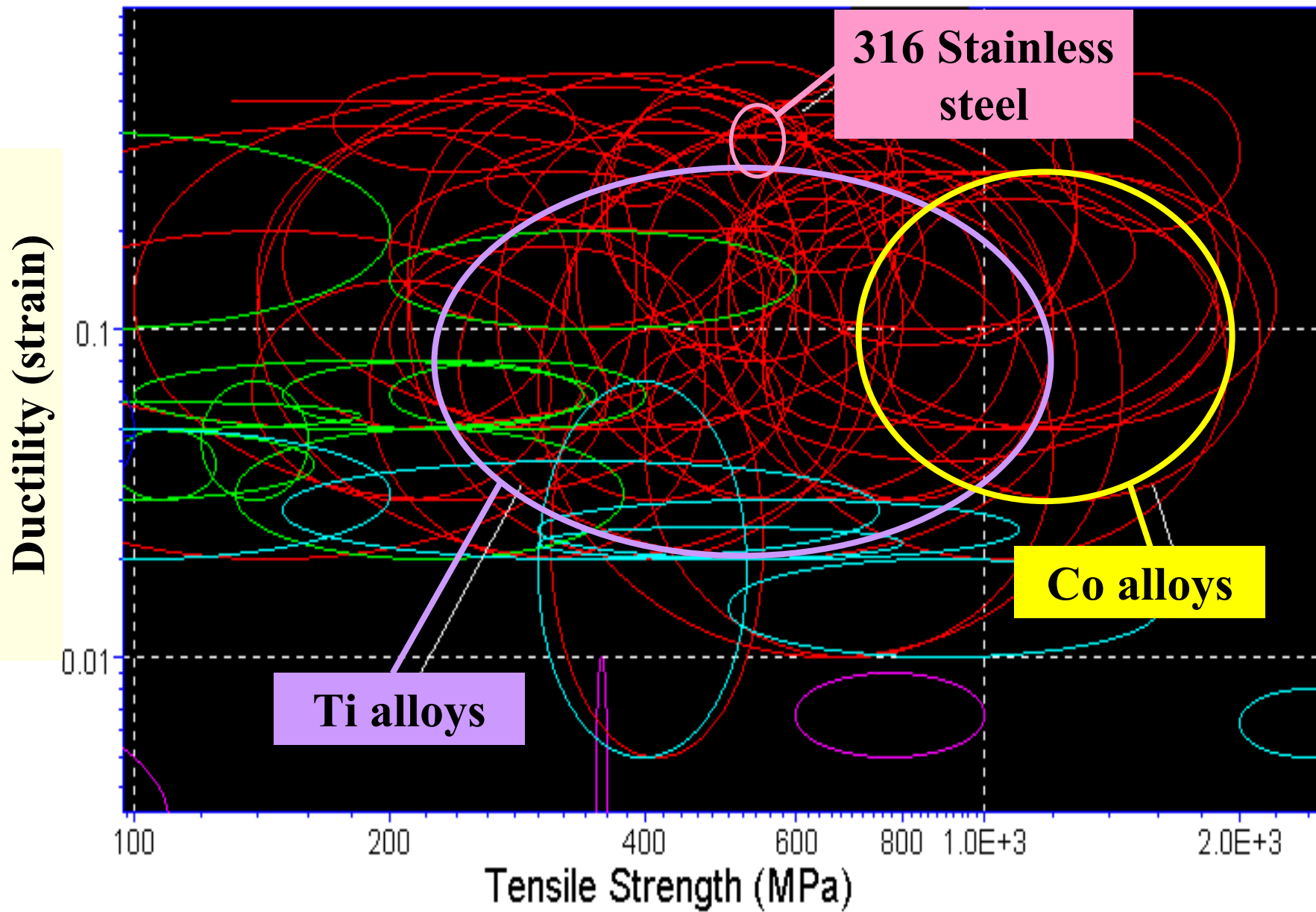
# Chapter Two: Metallic Biomaterials

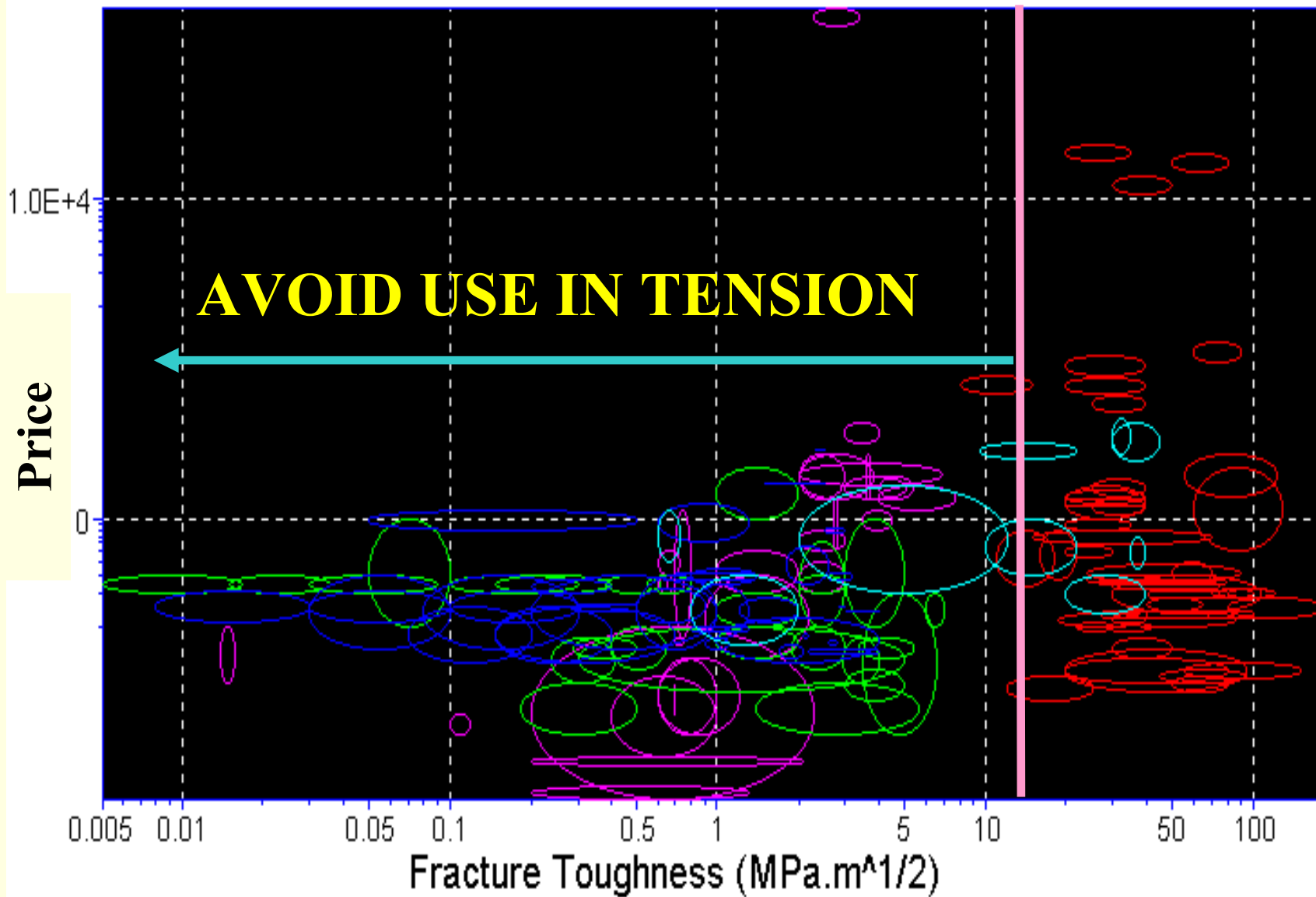
## Cast VS Wrought

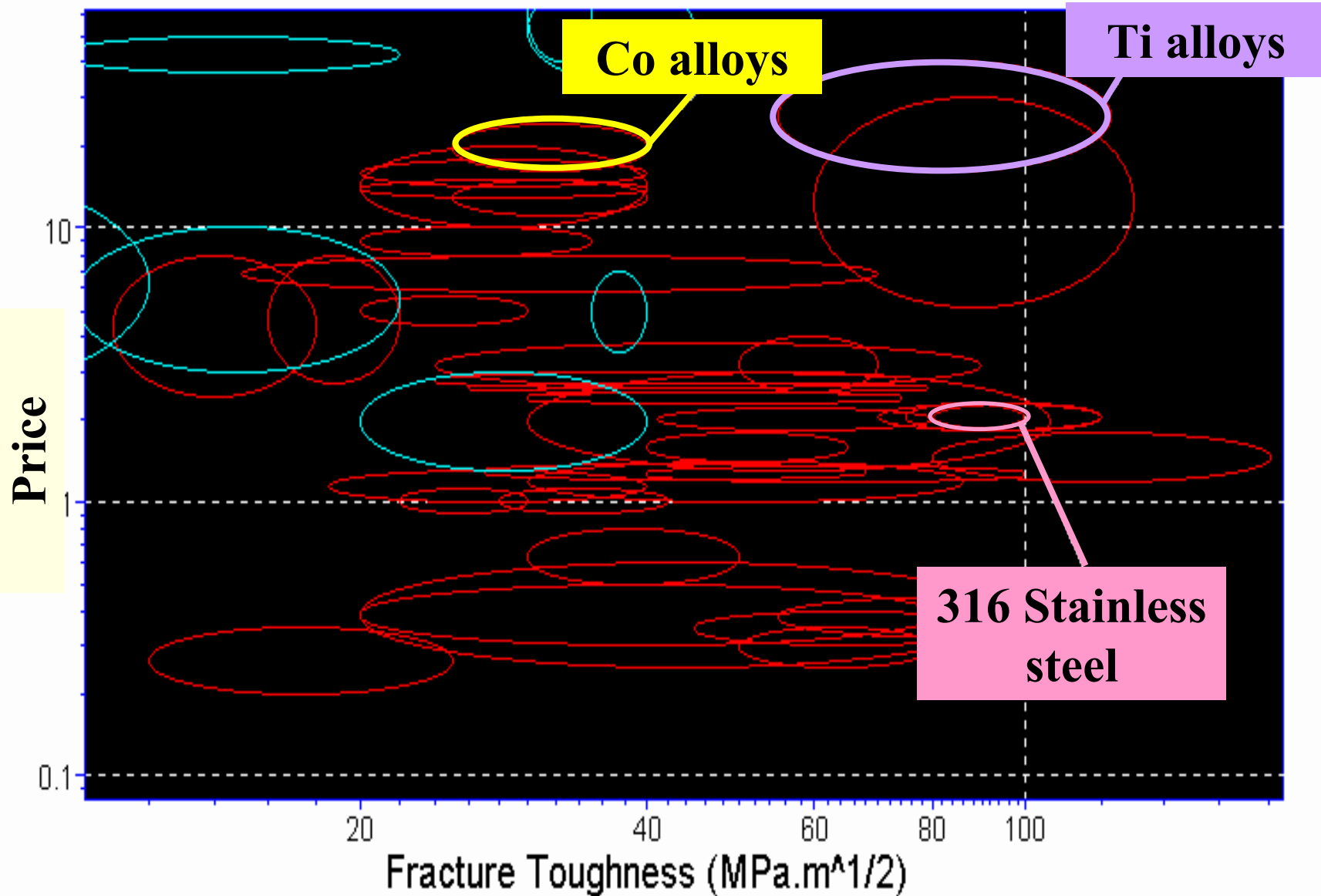


Ductility (strain)









# Chapter Three:

## Corrosion

### CORROSION OF METALS □

➤ حمله و تخریب ناخواسته unintentional الکتروشیمیائی فلز می باشد که معمولاً از سطح surface شروع می گردد

➤ از بزرگترین مشکلات از نظر اقتصادی بوده به نحوی که حدود ۵٪ در آمد صنعتی جهان صرف جلوگیری از خوردگی، برطرف کردن مشکلات ناشی از خوردگی (تعمیر و تعویض بخشهای از بین رفته) میگردد

➤ امکان بهره برداری از فرایند خوردگی نیز وجود دارد (etching، و در باطری ها)

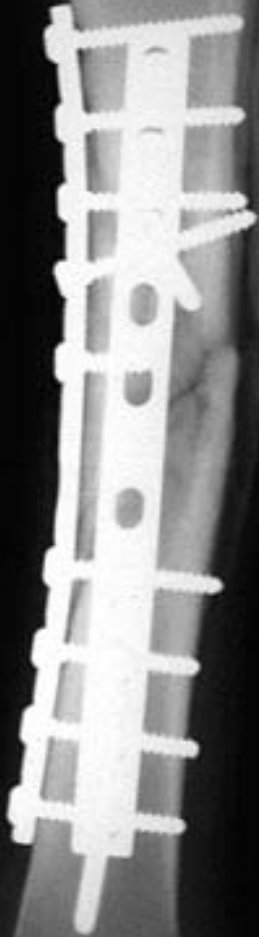
### ELECTROCHEMICAL CONSIDERATIONS □

➤ در خصوص فلزات واکنش خوردگی انتقال الکترون از یک جزء به جزء دیگر می باشد  
Electron transfer from one to another

➤ فلزات ذاتاً تمایل به از دست دادن الکترون داشته در واکنش Oxidation شرکت میکنند



➤ فلز با n valence در واکنش شرکت کرده:



# Chapter Three:

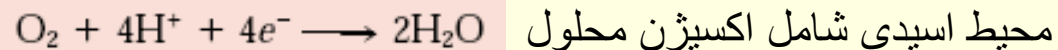
## Corrosion

### ELECTROCHEMICAL CONSIDERATIONS □

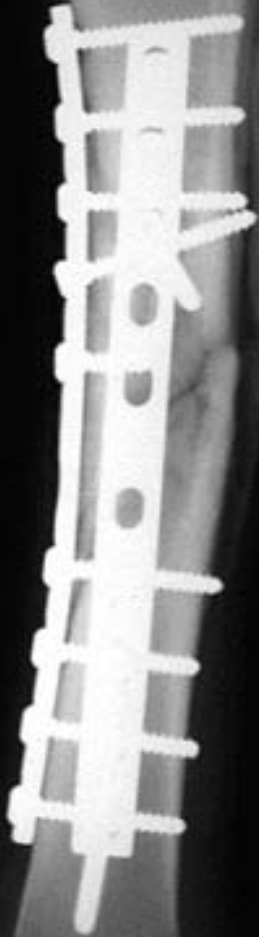
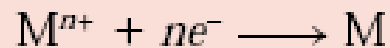
- واکنش اکسیداسیون در Anode و بوسیله anodic reaction رخ می دهد
- الکترونها ایجاد شده در آن انتقال یافته و باعث واکنش reduction می گردند



بسته به نوع محلولی که فلز در آن قرار دارد دیگر واکنشها می تواند رخ دهد



- امکان reduction فلزات نیز وجود دارد به valence کمتر با جذب الکترون و یا احیای کامل به فلز:

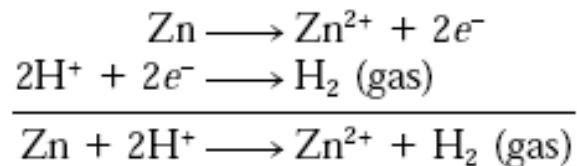
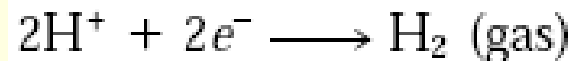
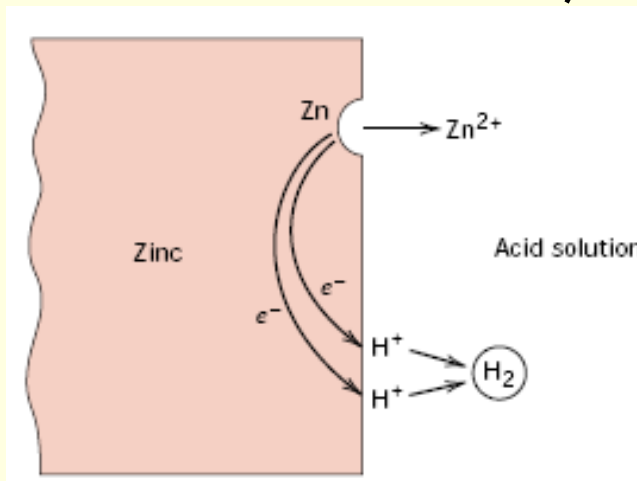


# Chapter Three: Corrosion

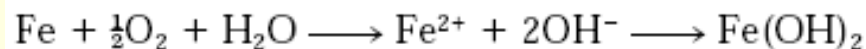
## ELECTROCHEMICAL CONSIDERATIONS □

➤ معمولاً واکنشهای اکسایش و کاهش به نحوی رخ دهند که الکترونها تولیدی در واکنشهای اکسایش در واکنشهای کاهش مصرف می شوند

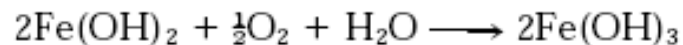
➤ فلزروی در محیط اسیدی خورده (اکسید) شده و چون هادی جریان بوده در محل دیگر حاوی یونها هیدروژن



➤ زنگ زدن اکسیداسیون ویا rusting آهن در محلول آبی شامل اکسیژن محلول در دو مرحله انجام می گردد:



اکسیداسیون به  $Fe^{2+}$



اکسیداسیون به  $Fe^{3+}$  و تشکیل rust

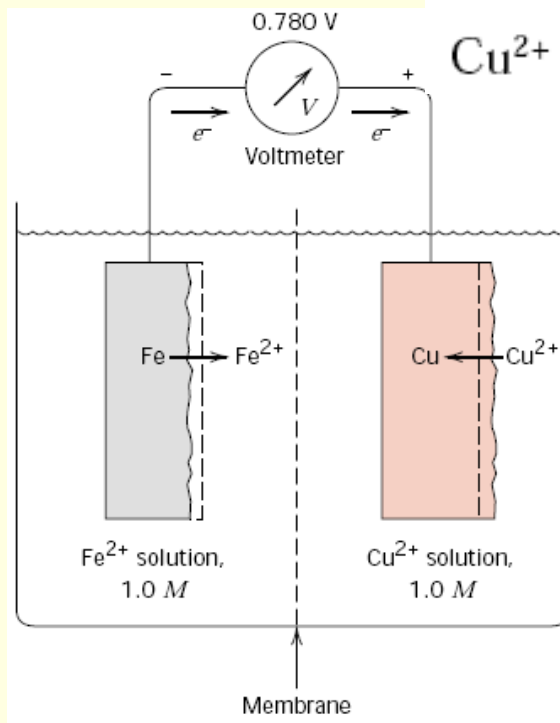
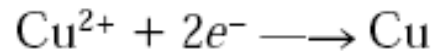
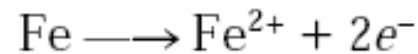


# Chapter Three: Corrosion

## ELECTRODE POTENTIALS □

تمامی فلزات با درجه یکسان اکسید نمی شوند:

در صورت اتصال الکتریکی الکترود مس Cu در محلول کترولیت 1M به الکترود آهن Fe در محلول مشابه اکسیداسیون آهن و کاهش در مس



الکترونهاى ایجاد شده در الکترود آهن بوسیله wire به الکترود مس جهت انجام واکنش کاهش منتقل میگردد



Galvanic Couple: دوفلز در محلول الکترولیت های مربوط تشکیل آند و کاتد

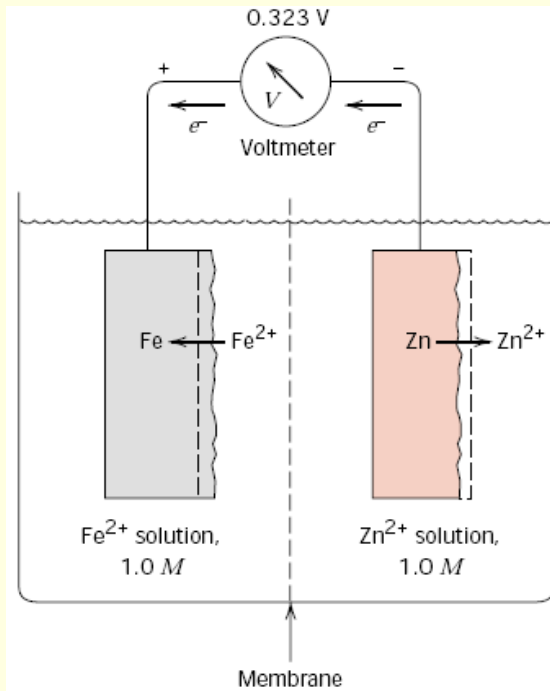
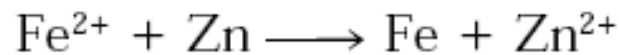
پتانسیل الکتریکی یا ولتاژ حاصل قابل اندازه گیری بوسیله ولت متر voltmeter می باشد (0.78 V در مورد مس و آهن)

# Chapter Three: Corrosion

## ELECTRODE POTENTIALS □

➤ در صورت اتصال اکتروود آهن به روی Zn

➤ در صورت اتصال الکتریکی اکتروود روی Zn در محلول 1M به اکتروود آهن Fe در محلول مشابه روی تشکیل آند و آهن تشکیل کاتد را می دهد و واکنش بصورت:



➤ The potential associated with this cell reaction is **0.323 V**.

➤ زوجهای مختلف اکتروود ولتاژهای متفاوت نشان می دهند که بزرگی ان نشان دهنده تمایل driving force جهت انجام واکنش اکسایش-کاهش می باشد

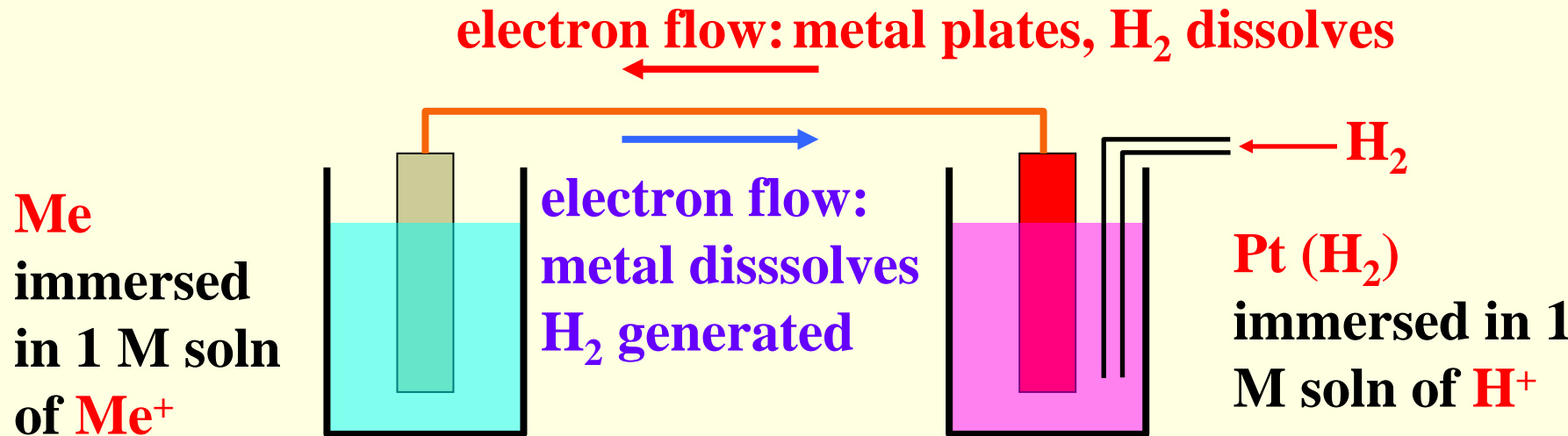
➤ فلزات را بر اساس تمایل آنها به اکسیداسیون tendency to oxidation در زمانی که با فلزات دیگر زوج می شوند دسته بندی میشوند

➤ نیم سلول Standard Half-Cell به اکتروود فلزی در محلول 1M الکترولیت مربوط (حاوی یون فلز) و در دمای 25 C اطلاق می شود

# Chapter Three: Corrosion

## THE STANDARD EMF SERIES □

- جهت مقایسه نیم سلولها half cells با یکدیگر نیاز به تعریف یک سلول استاندارد می باشد
- الکتروود استاندارد هیدروژن (an inert platinum electrode in a 1M H ions saturated with H<sub>2</sub> gas at 1 atm and 25° C) به عنوان استاندارد
- الکتروود پلاتین در واکنش الکتروشیمیایی شرکت ندارد تنها به عنوان سطحی برای واکنش های اکسید و احیای هیدروژن عمل می نماید



# Chapter Three:

## Corrosion

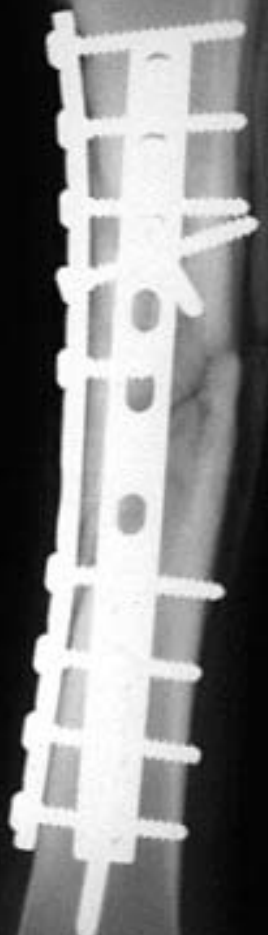
### THE STANDARD EMF SERIES □

**Electromotive force (emf) series** ▶ نشانگر ولتاژ اندازه گیری شده فلزات مختلف در مقابل الکتروود استاندارد هیدروژن می باشد

|  | <i>Electrode Reaction</i>  | <i>Standard Electrode Potential, V<sup>0</sup> (V)</i> |
|--|--|--|
|  | $\text{Au}^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow \text{Au}$                          | +1.420   |
|  | $\text{O}_2 + 4\text{H}^{+} + 4e^{-} \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$    | +1.229   |
|  | $\text{Pt}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Pt}$                          | ~+1.2  |
|  | $\text{Ag}^{+} + e^{-} \longrightarrow \text{Ag}$                            | +0.800   |
|  | $\text{Fe}^{3+} + e^{-} \longrightarrow \text{Fe}^{2+}$                      | +0.771   |
|  | $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^{-} \longrightarrow 4(\text{OH}^{-})$ | +0.401   |
|  | $\text{Cu}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Cu}$                          | +0.340   |
|  | $2\text{H}^{+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{H}_2$                          | 0.000  |
|  | $\text{Pb}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Pb}$                          | -0.126   |
|  | $\text{Sn}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Sn}$                          | -0.136   |
|  | $\text{Ni}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Ni}$                          | -0.250   |
|  | $\text{Co}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Co}$                          | -0.277   |
|  | $\text{Cd}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Cd}$                          | -0.403   |
|  | $\text{Fe}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Fe}$                          | -0.440   |
|  | $\text{Cr}^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow \text{Cr}$                          | -0.744   |
|  | $\text{Zn}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Zn}$                          | -0.763   |
|  | $\text{Al}^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow \text{Al}$                          | -1.662   |
|  | $\text{Mg}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Mg}$                          | -2.363   |
|  | $\text{Na}^{+} + e^{-} \longrightarrow \text{Na}$                            | -2.714   |
|  | $\text{K}^{+} + e^{-} \longrightarrow \text{K}$                              | -2.924   |

↑  
Increasingly inert  
(cathodic)

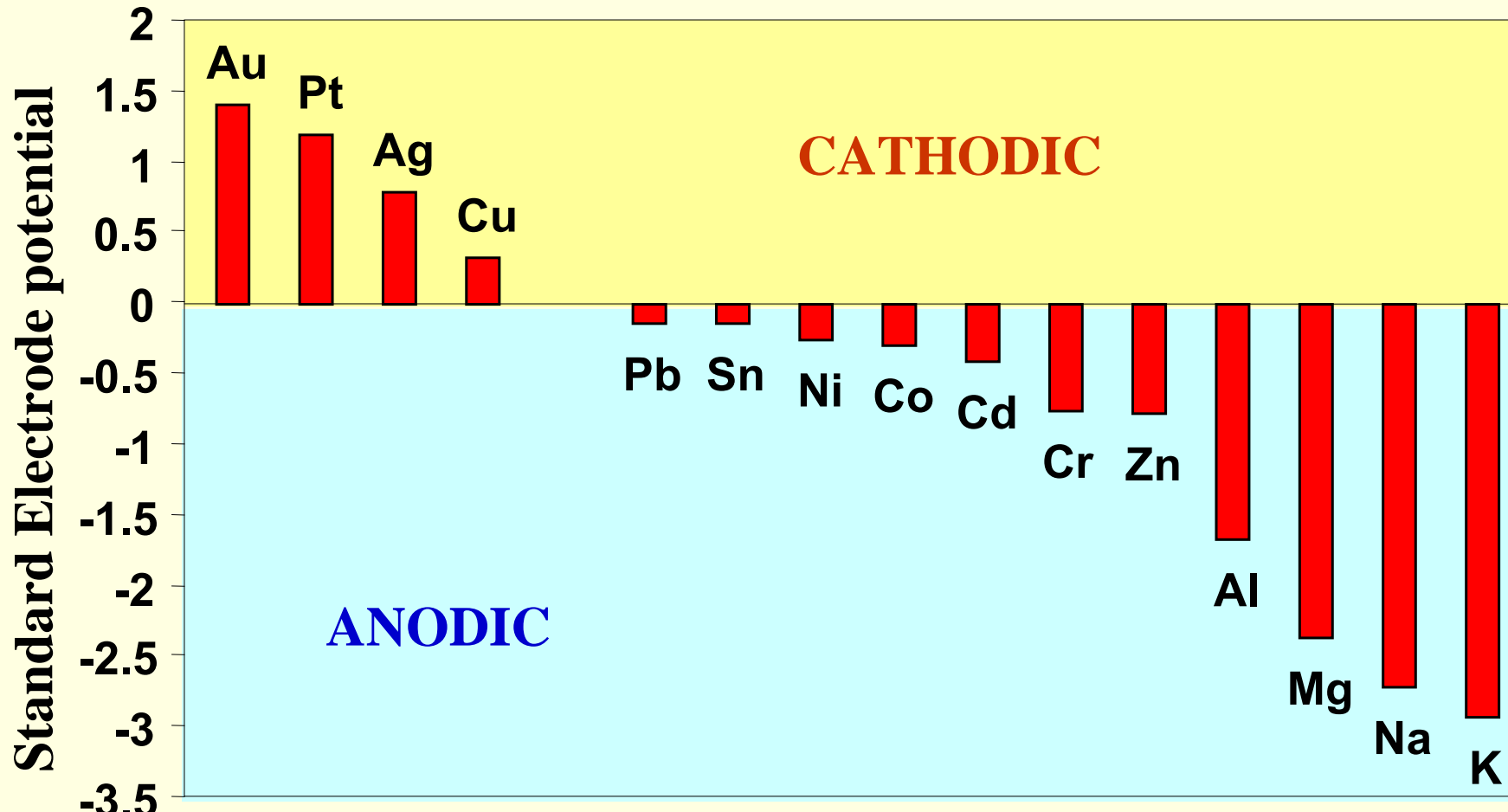
↓  
Increasingly active  
(anodic)



# Chapter Three: Corrosion

THE STANDARD EMF SERIES 

SUSCEPTIBILITY OF A METAL TO CORROSION

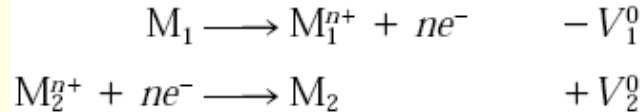


# Chapter Three:

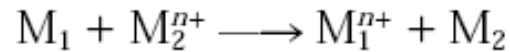
## Corrosion

### THE STANDARD EMF SERIES □

▶ ولتاژهای emf نشانگر واکنش کاهش reduction می باشند (electron on left) برای اکسیداسیون جهت واکنش و علامت ولتاژ معکوس می گردند بعنوان مثال



▶ چون فلز M1 اکسید می گردد علامت ولتاژ معکوس می گردد (از emf series)

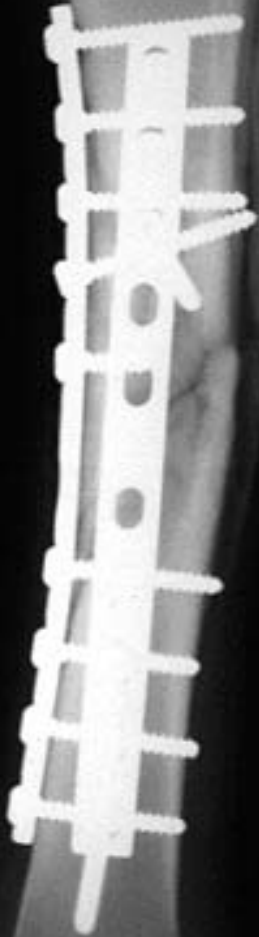


$$\Delta V^0 = V_2^0 - V_1^0$$

پتانسیل کلی واکنش

▶ واکنش بطور خودبخودی spontaneously پیش میرود در صورتی که  $V^0$  مثبت و در صورت منفی بودن واکنش عکس خود بخودی خواهد بود

▶ جهت زوج کردن فلزات در جدول emf فلزات پائین تر اکسید می شوند (Corrosion) و فلز بالاتر در سری کاهش می یابد



# Chapter Three:

## Corrosion

### INFLUENCE OF CONCENTRATION AND TEMPERATURE ON $\square$ CELL POTENTIAL

**emf series** در شرایط ایده آل می باشد (فلزات خالص و محلولهای 1M در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  بکارگیری الکترودهای غیرخالص و آلیاژها و تغییر غلظت محلول الکتروولیتها میتواند باعث تغییر پتانسیل سلول و جهت خود بخودی واکنش اکسید و کاهش گردد

$$\Delta V = (V_2^0 - V_1^0) - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[M_1^{n+}]}{[M_2^{n+}]}$$

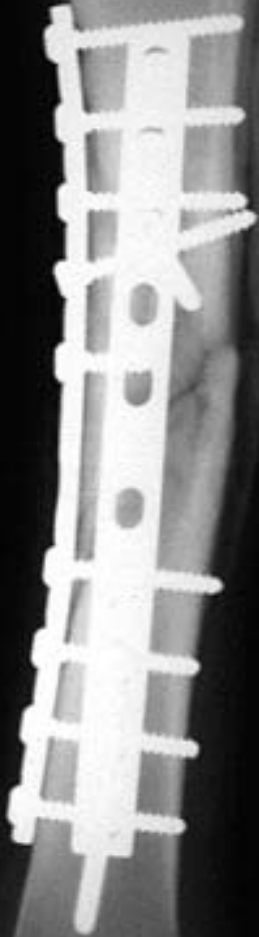
معادله نرنست

$R$  is the gas constant,  $n$  is the number of electrons participating in either of the half-cell reactions, and  $F$  is the Faraday constant, 96,500 C/mol

$$\Delta V = (V_2^0 - V_1^0) - \frac{0.0592}{n} \log \frac{[M_1^{n+}]}{[M_2^{n+}]}$$

در دمای اتاق  $25^{\circ}\text{C}$

برای واکنشهای خودبخودی  $\Delta V$  باید مثبت باشد



# Chapter Three: Corrosion

## THE GALVANIC SERIES □

در Galvanic Series واکنش پذیری نسبی فلزات و آلیاژها در محیط خاص نظیر آب دریا sea water بیان می گردد

آلیاژ بالای جدول کاتدی inert و فلزات پائین جدول آندی می باشند

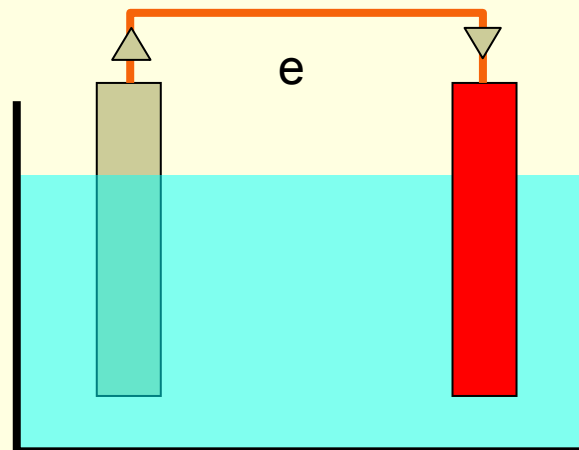
Galvanic Series در واقع واکنش پذیری دو فلز در زمانی که در محلول الکترولیت قرار گرفته و اتصال الکتریکی برقرار است نشان می دهد (فلز فعال تر متحمل خوردگی می شود)

بطور کلی اکثر فلزات در معرض خوردگی و اکسیداسیون بوده چون دارای پایداری بیشتری در حالت یونی (اکسید) می باشند (ترمودینامیکی کاهش انرژی آزاد)

فلزات اکثرا بصورت ترکیب oxides, hydroxides, carbonates, silicates, sulfates وجود دارند

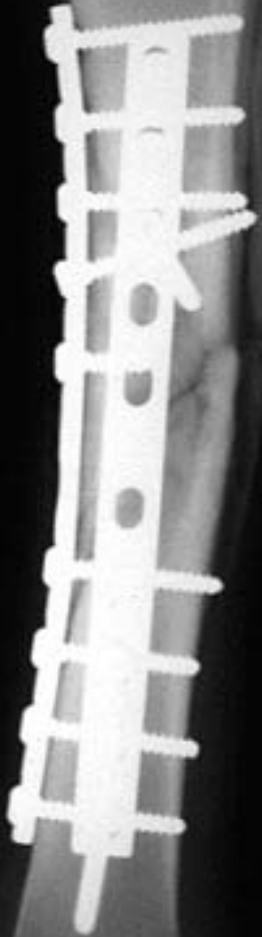
طلاونقره استثنا میباشند

واکثرا بصورت فلزی میباشند



Metal anode  
(corroding)

Metal cathode  
(inert)





# Chapter Three: Corrosion



## THE GALVANIC SERIES

|  |                                    |
|--|------------------------------------|
|  | Platinum                           |
|  | Gold                               |
|  | Graphite                           |
|  | Titanium                           |
|  | Silver                             |
|  | [316 Stainless steel (passive)     |
|  | [304 Stainless steel (passive)     |
|  | [Inconel (80Ni-13Cr-7Fe) (passive) |
|  | [Nickel (passive)                  |
|  | [Monel (70Ni-30Cu)                 |
|  | Copper-nickel alloys               |
|  | Bronzes (Cu-Sn alloys)             |
|  | Copper                             |
|  | [Brasses (Cu-Zn alloys)            |
|  | [Inconel (active)                  |
|  | [Nickel (active)                   |
|  | Tin                                |
|  | Lead                               |
|  | [316 Stainless steel (active)      |
|  | [304 Stainless steel (active)      |
|  | [Cast iron                         |
|  | [Iron and steel                    |
|  | Aluminum alloys                    |
|  | Cadmium                            |
|  | Commercially pure aluminum         |
|  | Zinc                               |
|  | Magnesium and magnesium alloys     |

↑  
Increasingly inert (cathodic)

↓  
Increasingly active (anodic)

# Chapter Three:

## Corrosion

### PASSIVITY □

➤ برخی از فلزات تحت شرایطی خاص واکنش پذیری خود را از دست داده و inert می گردند

➤ خصلت passivity بوسیله chromium, iron, nickel, titanium, ...

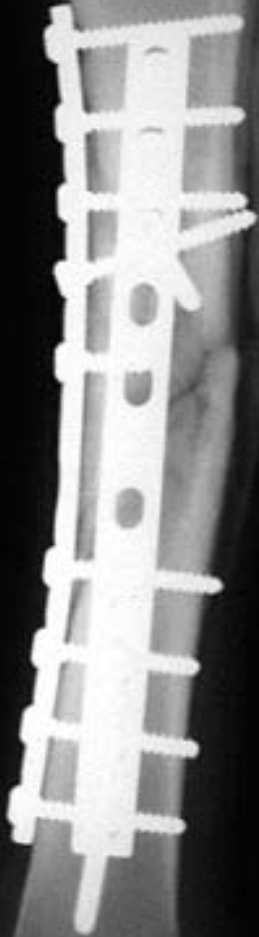
➤ در اثر تشکیل لایه اکسید سطحی بسیار چسبنده و نازک (thin and adherent) بروی فلز بعنوان محافظ از خوردگی بیشتر

➤ Stainless steel با داشتن حداقل 11% کرم در بسیاری از محیط ها مقاوم در برابر خوردگی می باشد

➤ Al نیز passive می باشد در بسیاری از محیط ها

➤ در صورت صدمه به فیلم اکسید سطحی مجددا و به سرعت تشکیل می گردد

➤ تغییر در غلظت و نوع محیط خورنده می تواند فلز passive را به حالت فعال برگرداند و ایجاد خوردگی نماید



# Chapter Three: Corrosion

## THE GALVANIC SERIES

### Metals and alloys in seawater

**Stainless steel (active)**  
**Cast iron**  
**Steel or Iron**  
**Al alloys**  
**Cadmium (Cd)**  
**Al pure (commercially)**  
**Zinc (Zn)**  
**Magnesium -Mg alloys**

**INCREASINGLY  
ACTIVE  
(ANODIC)**



# Chapter Three: Corrosion

## THE GALVANIC SERIES

### Metals and alloys in seawater

Bronzes (Cu-Sn)

Copper (Cu)

Brasses (Cu-Zn)

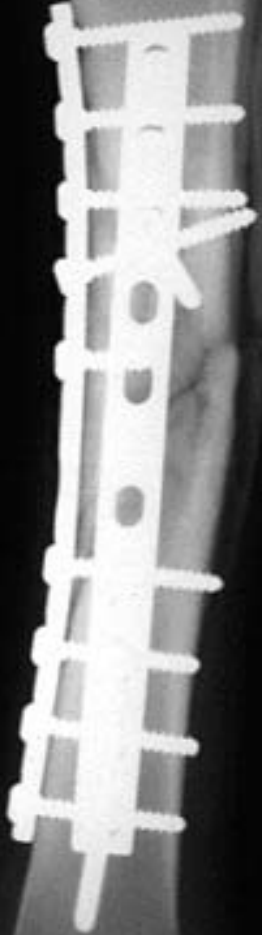
Inconel (**active**)

Ni (**active**)

Tin (Sn)

Lead (Pb)

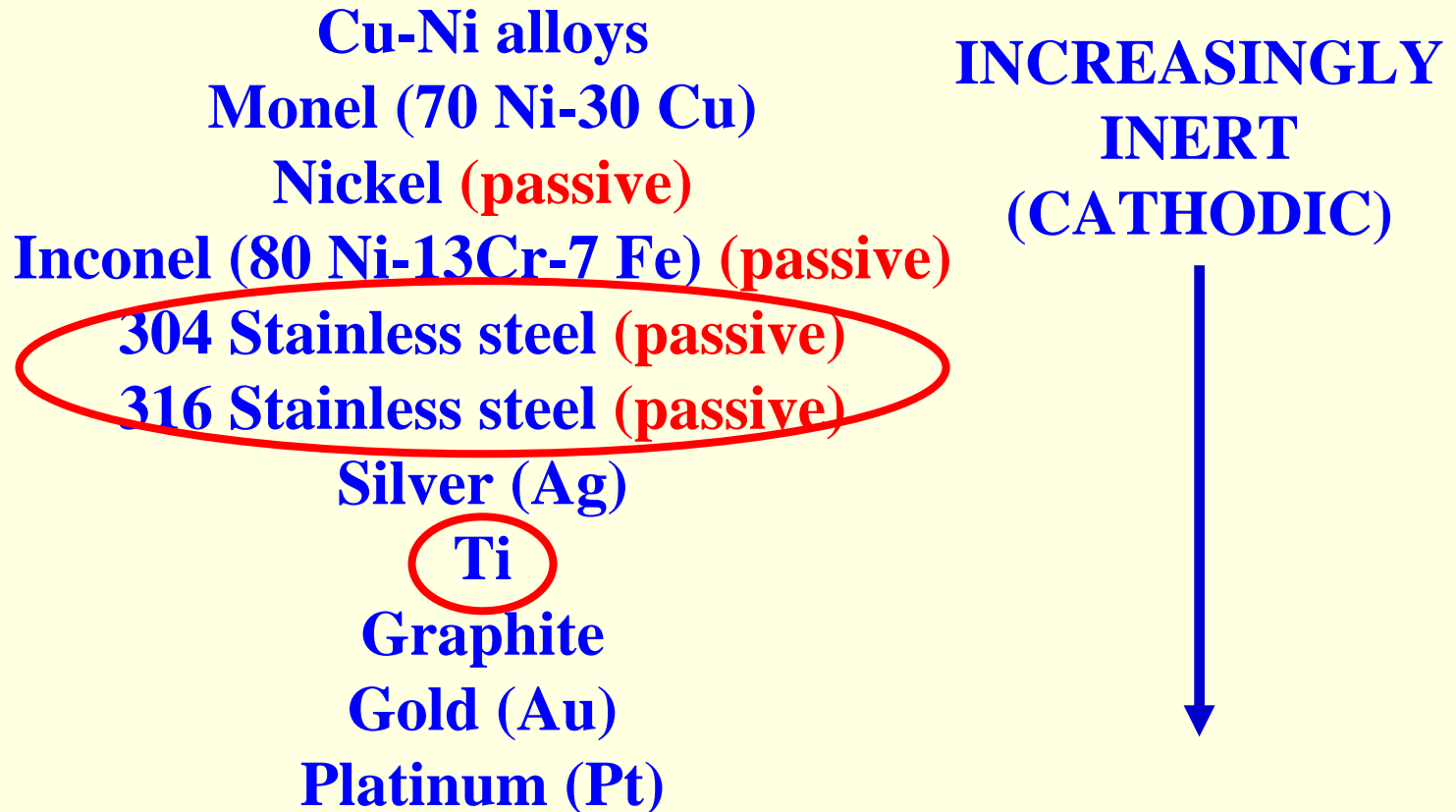
“NEUTRAL”



# Chapter Three: Corrosion



## THE GALVANIC SERIES



# Chapter Three:

## Corrosion

### CORROSION RATES □

▶ پتانسیلهای نیم سلولها تمایل به انجام واکنش driving force, or the tendency را نشان می دهند و اطلاعاتی از چگونگی و سرعت انجام این واکنشها بدست نمی دهند  
corrosion rate

▶ با وجود  $\Delta V$  مثبت و بزرگ، واکنش اکسیداسیون و خوردگی می تواند در یک بازه زمانی طولانی و کند انجام گیرد slow rate

▶ از دید مهندسی پیش بینی سرعت واکنش خوردگی اهمیت دارد بنابراین پارامترهای دیگر باید مورد توجه قرار گیرند predicting the rate system corrode

▶ از بین رفتن فلز در اثر خوردگی rate of material removal به عنوان پارامتری جهت تعیین سرعت خوردگی بکار میرود:

Corrosion Penetration Rate (CPR) به عنوان کم شدن ضخامت فلز بر واحد زمان تعریف می گردد

$$CPR = \frac{KW}{\rho At}$$

▶ واحد CPR بر حسب (mpy). mils/y

و یا (where 1 mil 0.001 in.)mm/yr

$W$  weight loss after exposure  
time  $t$ ;  $\rho$  density and  $A$  exposed  
specimen area,  $K$  is a constant,

# Chapter Three:

## Corrosion

### ENVIRONMENTAL EFFECTS □

➤ متغیرهای محیطی environment variables در خصوص خوردگی: سرعت مایع fluid velocity، دما temperature، و ترکیب شیمیایی composition که بروی خوردگی فلز تاثیر گذار میباشند

➤ بطور کلی افزایش fluid velocity باعث افزایش rate of corrosion میگردد

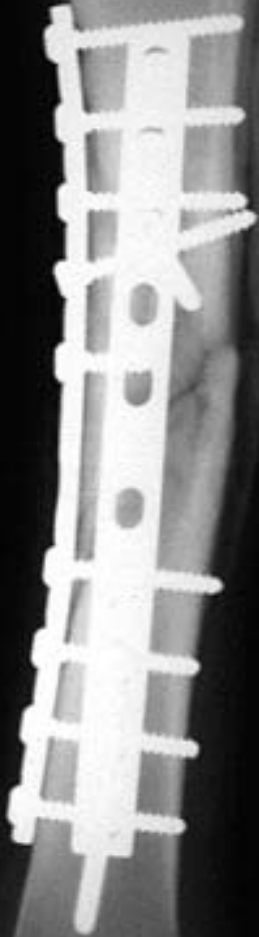
➤ اکثر واکنشهای شیمیایی با افزایش دما افزایش سرعت خواهند داشت که شامل واکنشهای خوردگی نیز می گردد

➤ افزایش غلظت corrosive species محیط خورنده (H ions in acids) معمولاً باعث افزایش rate of corrosion می گردد

➤ با افزایش غلظت مواد خورنده امکان passive شدن فلزاتی که قابلیت passivity دارند وجود دارد (active-to-passive transition: کاهش خوردگی)

➤ فلزات cold work شده (برای افزایش مقاومت) بیشتر در معرض خوردگی می باشند more susceptible to corrosion از فلزات heat treated

➤ در زمانی که قطعه فلزی در محیط های خورنده مورد استفاده واقع می گردد cold working باید مورد توجه واقع گردد



# Chapter Three:

## Corrosion

### FORMS OF CORROSION □

خوردگی فلزات بسته به نحوهء وقوع به هشت دسته تقسیم می گردد:

Uniform ■

Galvanic ■

Crevice ■

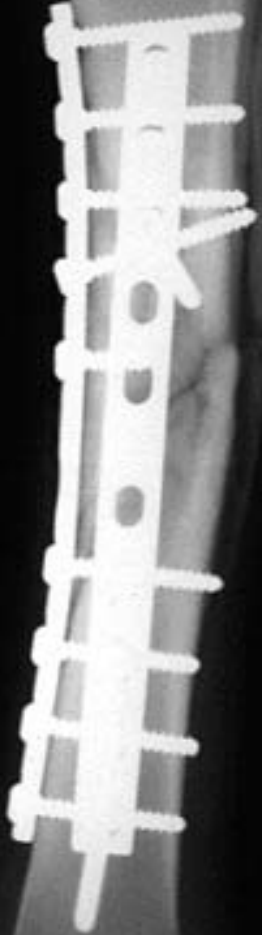
Pitting ■

Intergranular ■

Selective leaching ■

Erosion-Corrosion ■

Stress corrosion ■





# Chapter Three:

## Corrosion

### FORMS OF CORROSION □

#### *Uniform Attack* ❖

➤ یک نوع خوردگی الکتروشیمیائی بوده که با شدت یکسان و یکنواخت intensity در تمامی سطح رخ می دهد و اغلب باقیمانده از خود بجا می گذارد

➤ از نظر میکروسکپی واکنش oxidation و reduction بصورت random بروی سطح اتفاق می افتد

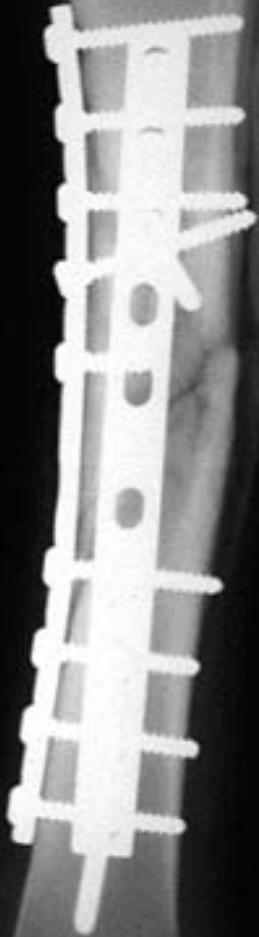
➤ مثالهای معمول زنگ زدن آهن و فولاد و سیاه شدگی silverware

➤ متداول ترین نوع خوردگی می باشد

#### *Galvanic Corrosion* ❖

➤ در خصوص دو فلز مختلف که بصورت الکتریکی اتصال دارند در محلول الکترولیت

➤ فلز less noble خورده میشود (مثال: خوردگی پیچهای فولادی در تماس با Brass در کشتی)



# Chapter Three:

## Corrosion

### FORMS OF CORROSION □

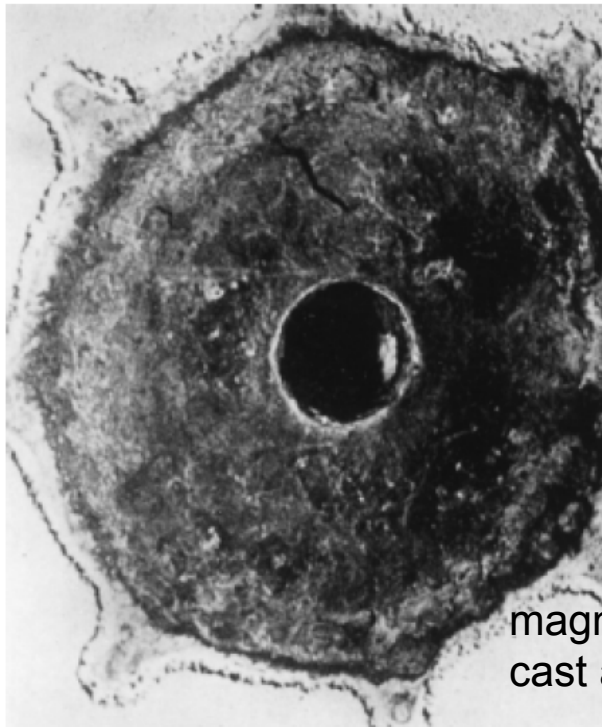
#### Galvanic Corrosion ❖

میزان خوردگی بسته به سطح آند و کاتد cathode-to anode surface area که در مجاورت الکترولیت قرار دارند بستگی دارد: برای یک کاتد مشخص هرچه آند کوچکتر خوردگی آن سریع تر خواهد بود (وابستگی خوردگی به دانسیته جریان به سطح current density per unit area)

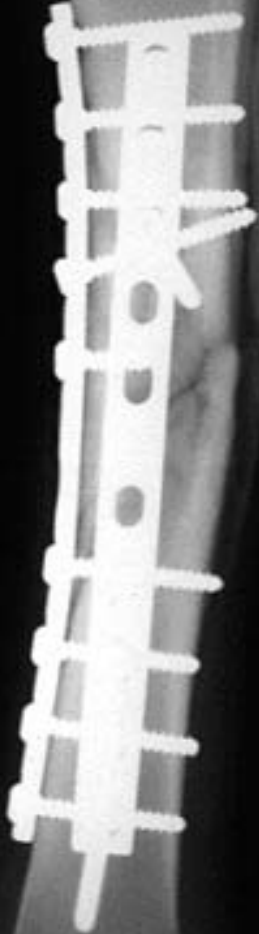
دانسیته جریان بالاتری در سطح آند کوچکتر (برای کاتد مشخص) برقرار می گردد

جهت کاهش خوردگی Galvanic:

- در صورت نیاز به جفت کردن فلزات با یکدیگر، دوفلزنزدیک بهم در سری انتخاب گردد
- سطح آند تا حد امکان بزرگ انتخاب گردد
- از عایق الکتریکی مابین زوج فلزات استفاده شود
- بصورت الکتریکی الکتروود آندی سوم, third, anodic metal را به دو الکتروود دیگر متصل گردد



magnesium  
cast around a steel



# Chapter Three:

## Corrosion

### FORMS OF CORROSION □

#### Crevice Corrosion ❖

➤ نوعی خوردگی الکتروشیمیایی که در اثر اختلاف غلظت یونها و یا گازهای حل شده در محلول الکترولیت و یا در دو محل مختلف یک فلز رخ می دهد two regions of the same metal piece

➤ این نوع خوردگی در درز و شکافها، فرو رفتگی ها، درزیر محل دفع dirt، و یا محصولات خوردگی در مکانی که محلول راکد stagnant و تخلیه اکسیژن depletion می گردد رخ می دهد

➤ درز و شکاف باید به اندازه کافی جهت نفوذ محلول وسیع و برای راکد شدن کوچک و narrow باشد

➤ مکانیسم این نوع خوردگی :

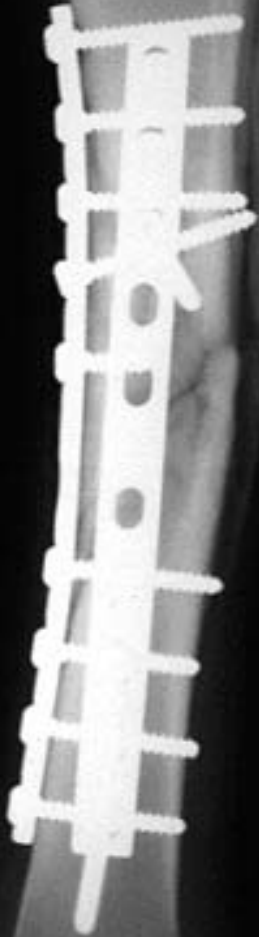
➤ در محل depletion اکسیژن فلز اکسید می گردد

$$M \longrightarrow M^{n+} + ne^{-}$$

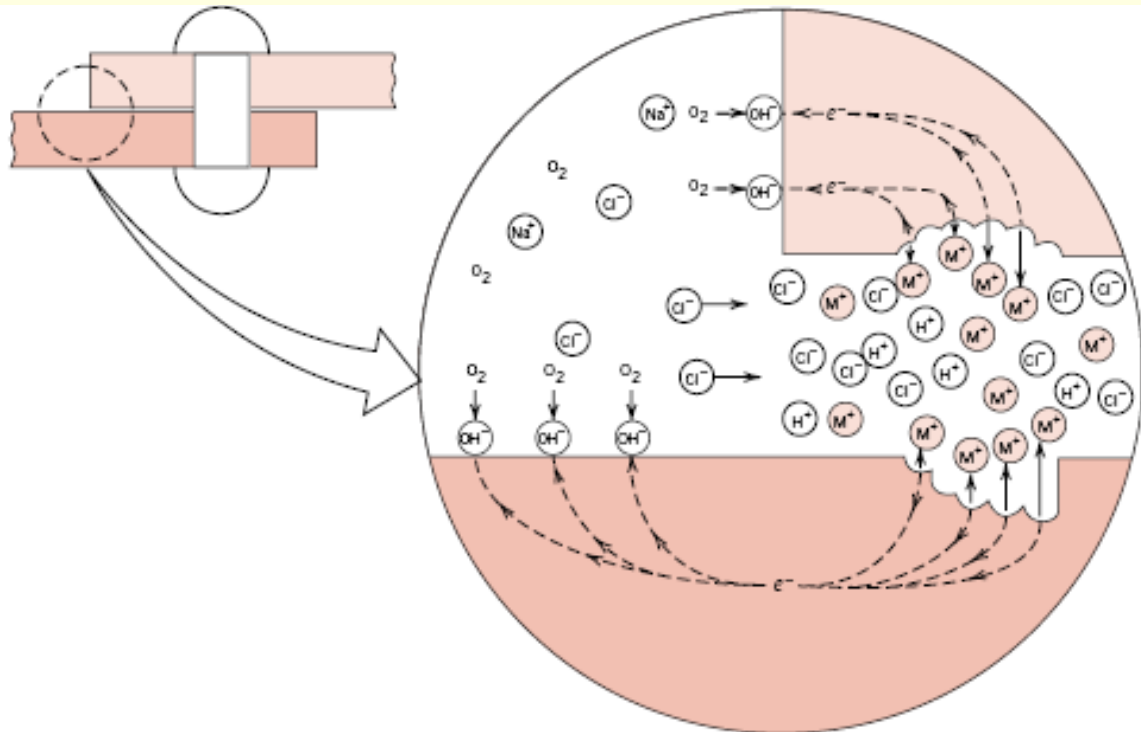
➤ الکترونها آزاد شده از طریق فلز به محل adjacent هدایت و مصرف در واکنش کاهش می گردند



➤ در اکثر محلولهای آبی و در محل درز crevice ایجاد یونهای H و Cl می گردد که خورنده corrosive می باشند



# Chapter Three: Corrosion



## FORMS OF CORROSION □

### Crevice Corrosion ❖

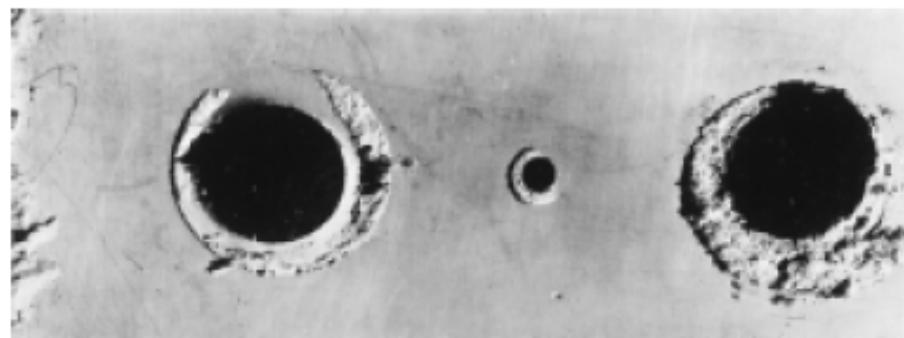
➤ فلزاتی که قابلیت passive شدن دارند معمولاً دچار این نوع خوردگی می شوند بدلیل از بین رفتن فیلم و اکسید سطحی بوسیله یونهای H و Cl

➤ روشهای کاهش Crevice corrosion:

■ استفاده از welding بجای پرچ و یا پیچ و مهره

■ در صورت امکان از nonabsorbing و اشرا استفاده گردد

■ طراحی سیستم به نحوی که راکد شدن رخ ندهد و تخلیه صورت گیرد drainage

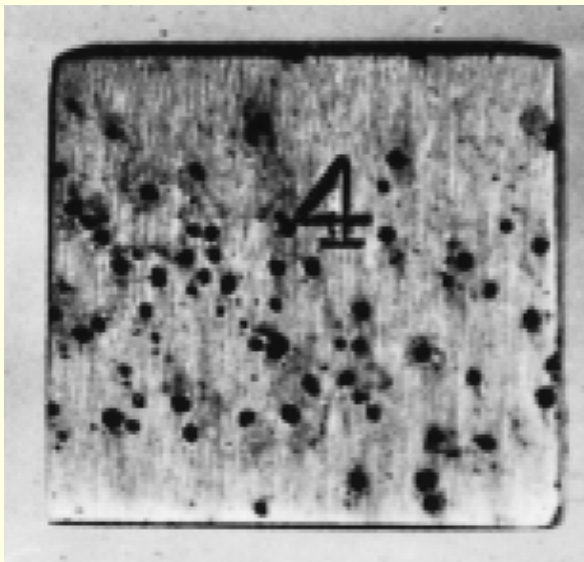


# Chapter Three:

## Corrosion

### PITTING ❖

- نوعی خوردگی موضعی localized که در نتیجه سوراخ و چاله های کوچک ایجاد میگردد small pits and holes
- این نوع خوردگی materials loss کمی دارد و اغلب تا شکست failure فلز مشخص نمی گردد undetected
- مکانسیم این نوع خوردگی مشابه با crevice می باشد: اکسیداسیون در سوراخ pit انجام می گردد و احیا در سطح surface
- در اثر نیروی gravity و نفوذ از بالا به پائین pit به سمت باین downward رشد می نماید



314 SS in HCl

- Pit معمولاً از نقایص سطحی نظیر خراش ها scratch و یا تغییرات جزئی در ترکیب ایجاد میشود
- سطوح polish شده pitting کمتری نشان می دهند
- Stainless Steel در معرض این نوع خوردگی است (افزودن 2% مولیبدن افزایش مقاومت)

# Chapter Three:

## Corrosion

### INTERGRANULAR CORROSION ❖

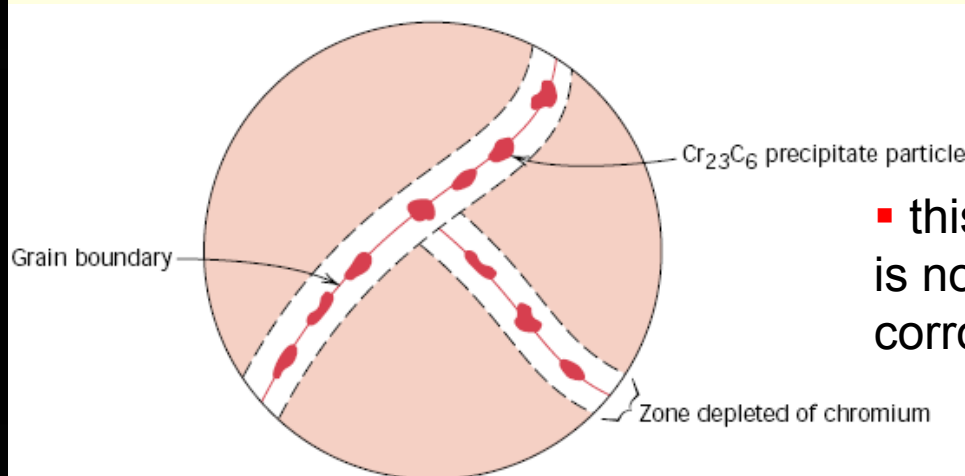
➤ خوردگی در ناحیه grain boundaries در خصوص برخی آلیاژها در محیط های خورنده خاص

➤ در اثر این نوع خوردگی نمونه از محل مرز دانه از هم پاشیده و متلاشی می گردد disintegrate

➤ در خصوص stainless steel بویژه در زمانی که در دمای  $500-800^{\circ}\text{C}$  حرارت داده شود sensitize می گردد و مستعد این نوع خوردگی

➤ در اثر حرارت کربن و کرم به ناحیه مرز دانه diffuse کرده و تولید کاربید هائی نظیر  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  می نماید

➤ نفوذ کرم باعث ایجاد ناحیه chromium-depleted zone در مجاورت مرز دانه می گردد



▪ this grain boundary region is now highly susceptible to corrosion



# Chapter Three:

## Corrosion

### FORMS OF CORROSION □

### INTERGRANULAR CORROSION ❖

مشکل حاد بویژه در خصوص weld SS  
(Weld Decay)

روشهای کاهش این نوع خوردگی در SS :

■ عملیات حرارتی در دمائی بالاتر به نحوی که رسوبات کاربید کرم مجدداً حل گردد  
redissolved

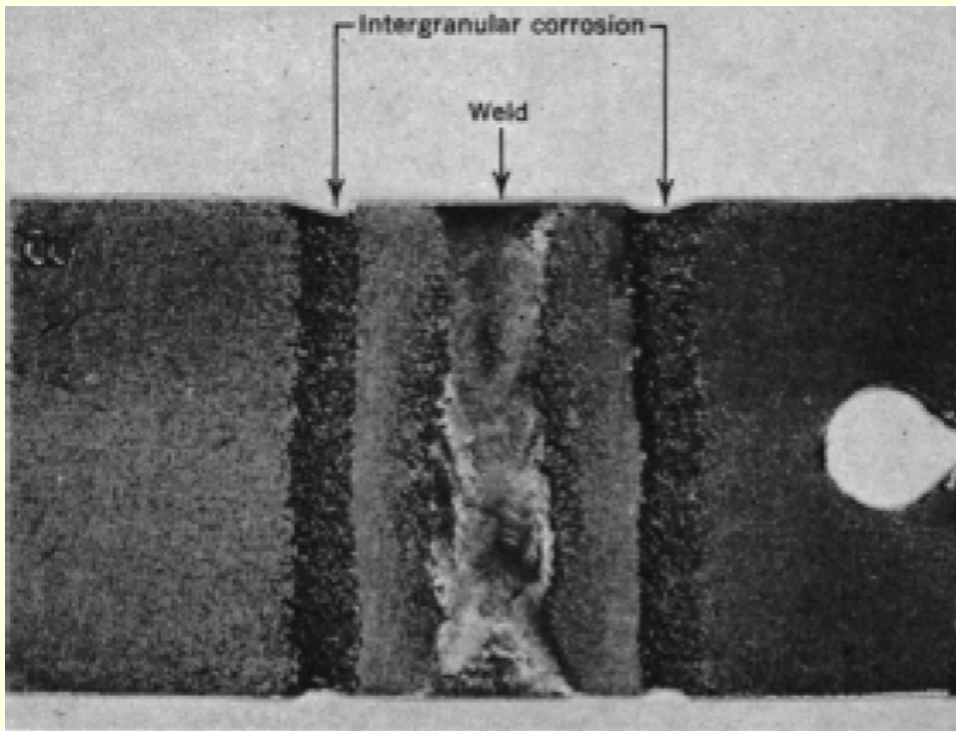
■ کاهش میزان کربن به کمتر از 0.03 wt%

■ آلیاژ سازی stainless steel با عنصری

نظیر Ti یا Nb نیوبیم که تمایل بالاتری جهت

ترکیب با کربن و تشکیل کاربید داشته و نتیجتاً

کرم در محلول جامد solid solution باقی بماند



Weld Decay in SS

# Chapter Three:

## Corrosion

### FORMS OF CORROSION □

#### **SELECTIVE LEACHING** ❖

➤ خوردگی آلیاژها در زمانی که یکی از عناصر خاص preferentially در معرض خوردگی واقع می گردد

➤ معمول ترین مثال خوردگی dezincification of brass می باشد که در ضمن این خوردگی روی Zn از آلیاژ شسته می شود copper-zinc brass alloy

➤ تاثیر منفی بروی خواص مکانیکی بدلیل خارج شدن روی و باقی ماندن مس در ناحیه خورده شده porous mass of copper

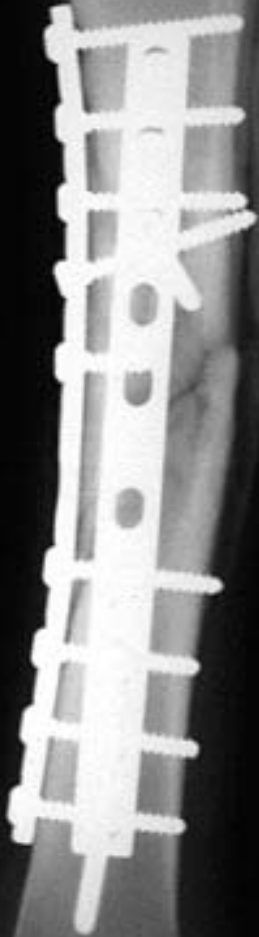
➤ رنگ ماده از زرد به قرمز (رنگ مس تغییر می یابد)

➤ در خصوص آلیاژهای دیگر شامل aluminum, iron, cobalt, chromium, احتمال preferential removal وجود دارد نیز رخ می دهد

#### **EROSION-CORROSION** ❖

➤ این نوع خوردگی در اثر حرکت مایع خورنده دربرگیرنده حمله شیمیائی chemical attack و خوردگی مکانیکی Mechanical abrasion or wear

➤ تمامی فلزات و آلیاژها در معرض این نوع خوردگی قرار دارند بویژه فلزاتی که قابلیت passive شدن و تشکیل فیلم سطحی را دارا می باشند





# Chapter Three:

## Corrosion

### EROSION-CORROSION ❖

➤ Abrasive action فیلم سطحی را از بین برده و فلز را در معرض خوردگی قرار میدهد

➤ در صورتی که فیلم سطحی قابلیت تشکیل مجدد و سریع رانداشته باشد خوردگی میتواند شدید باشد

➤ این نوع خوردگی با شیارها و خطوط موج surface grooves روی سطح که مشخصه حرکت مایع می باشد شناسائی می گردد

➤ مایع خورنده می تواند تاثیرات قابل توجهی بروی خوردگی داشته باشد: افزایش سرعت یا خوردگی مایع **(fluid velocity and being more erosive)**

➤ مایعات حاوی حباب bubbles و یا ذرات معلق جامد باعث تشدید خوردگی می شوند

➤ معمول در لوله کشی ها piping بویژه در نقاط اتصال نظیر زانو و خمیدگی ها bends, elbows

■ جهت کاهش این نوع خوردگی طراحی مسیر گردش مایع به نحوی که تلاطم و ضربه کمتری داشته باشد turbulence and impingement

■ مواد مقاومتر در برابر erosion resistant materials و خارج سازی particulates or bubbles



# Chapter Three:

## Corrosion

### FORMS OF CORROSION □

### STRESS CORROSION ❖

➤ نوعی خوردگی که نتیجه ترکیب tensile stress و محیط خورنده corrosive environment می باشد

➤ فلزاتی inert در برخی از محیطهای خورنده در تحت stress در معرض خوردگی واقع می شوند

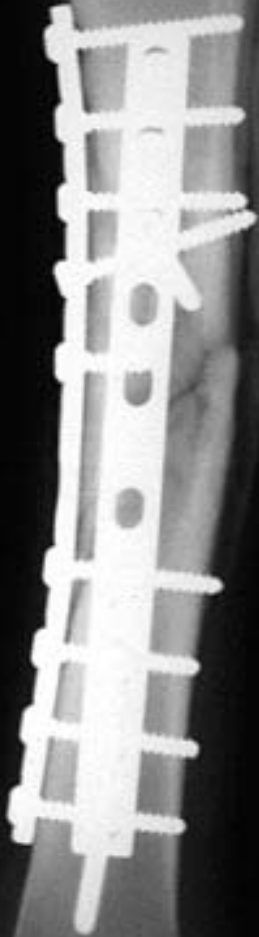
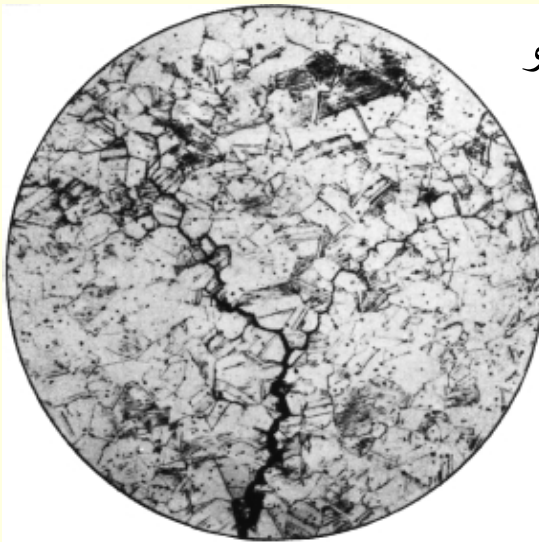
➤ ترک کوچک ایجاد و در مسیر عمود بر stress پیشرفت propagate کرده و نهایتاً به شکست failure قطعه منجر می گردد

➤ در خصوص فلزات brittle مشکل حاد تر بوده به نسبت فلزات ductile

➤ اکثر فلزات و آلیاژها تحت تاثیر moderate stress و در محیط خاص دچار این خوردگی میگردند:

■ Stainless steel در محیط حاوی یونهای کلراید و Brass در محیط آمونیاکی

Stress corrosion  
cracking in Brass



# Chapter Three:

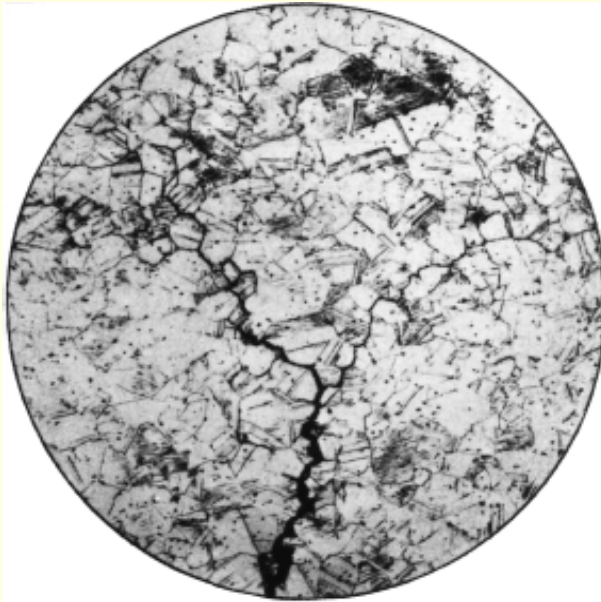
## Corrosion

### FORMS OF CORROSION □

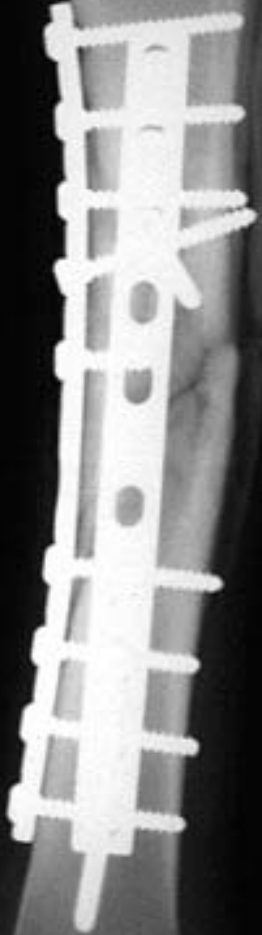
### STRESS CORROSION ❖

➤ Stress که تولید این نوع خوردگی را می نماید الزاما external نمی باشد و می تواند باقیمانده residual در اثر عوامل:

- تغییرات دمائی سریع و انقباض
- در آلیاژهای دو فازی که فازهای مختلف coefficient of expansion
- محصولات خوردگی که تولید gas و یا ذرات جامد می نمایند در داخل قطعه entrap شده can give rise to internal stress
- جهت کاهش این نوع خوردگی قاعدتا باید stress را کاهش داد:



- کاهش بار و نیروی وارده reducing the external load
- افزایش سطح مقطعی که نیرو بر آن عمود است cross-sectional area perpendicular to the applied stress
- عملیات حرارتی مناسب جهت خارج کردن stress

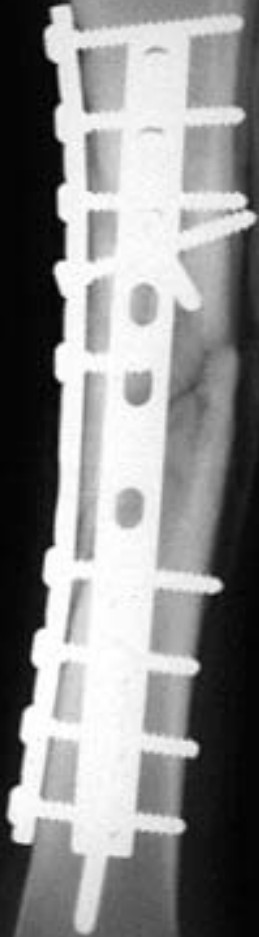


# Chapter Three:

## Corrosion

### HYDROGEN EMBRITTLEMENT □

- کاهش ductility و tensile strength در اثر نفوذ اتم H به داخل فلز
- نوعی failure در نتیجه applied or residual tensile stress که باعث رشد ترک می گردد
- هیدروژن در شکل اتمی به داخل شبکه بلوری crystal lattice نفوذ و با وجود غلظت بسیار کم باعث ایجاد ترک crack می گردد
- مکانیسمهای پیشنهادی اکثرا بر اساس interference of dislocation motion بوسیله dissolved hydrogen می باشد
- جهت وقوع hydrogen embrittlement نیاز به منبع هیدروژن و همچنین امکان تشکیل فرم اتمی آن میباشد
- نظیر تمیزکاری pickling فولاد در اسید سولفوریک، آبکاری electroplating، محیطهای حاوی بخار آب و دمای بالا (در فرایندهای welding and heat treatment)، حضور سولفور  $\text{H}_2\text{S}$  و ترکیبات آرسنیک
- فلزات با ساختار FCC (Austenitic SS) مقاومت بالاتری نشان می دهند بدلیل بالا بودن ductility ذاتی این فلزات (strain hardening باعث افزایش susceptibility to embrittlement می گردد)
- روشهای کاهش: عملیات حرارتی جهت افزایش ductility، از بین بردن منبع H، baking alloy در دمای بالا جهت dissolve کردن H

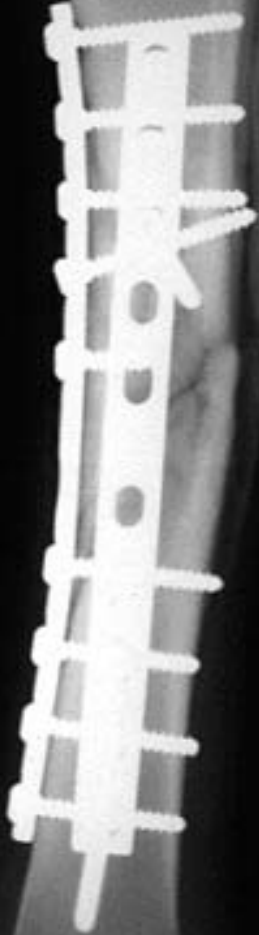


# Chapter Three:

## Corrosion

### CORROSION ENVIRONMENTS □

- محیط های خورنده شامل هوا atmosphere، محلول های آبی، خاک soils، حلالهای معدنی، نمک ها، و بدن انسان می باشد
- بر مبنای atmosphere هوا tonnage بالاترین میزان خوردگی را ایجاد میکند
- اکسیژن محلول در moisture عامل و agent اصلی خوردگی می باشد
- Fresh water شامل اکسیژن محلول و همچنین مینرالها می باشد
- Sea water شامل 3.5% salt می باشد همچنین مینرالها و مواد آلی (معمولا خورنده تر از fresh water باعث pitting and crevice)
- Cast iron, steel, aluminum, copper, brass, and some stainless steels are generally suitable for freshwater use
- Titanium, brass, some bronzes, copper–nickel alloys, and nickel–chromium–molybdenum alloys are highly corrosion resistant in seawater
- خاک در برگیرنده گستره وسیعی از مواد خورنده می باشد:
- تغییرات در ترکیب compositional variables شامل رطوبت، اکسیژن، نمک، مواد اسیدی و قلیایی و اشکال مختلف باکتریها
- Cast iron and carbon steels اقتصادی ترین فلزات برای سازه های زیرزمینی می باشند





# Chapter Three:

## Corrosion

### BIODEGRADATION OF METALS □

#### *General issues and concerns* ❖

در محیط های بیولوژیک فلزات اعم از noble or passivated در معرض خوردگی قرار دارند

برای اینکه یک فلز در بدن به عنوان Corrosion resistance در نظر گرفته شود  
corrosion rate  $< 0.00025$  mm/yr

Stress نقش مهمی در فرایند خوردگی degradation فلزات دارا می باشد

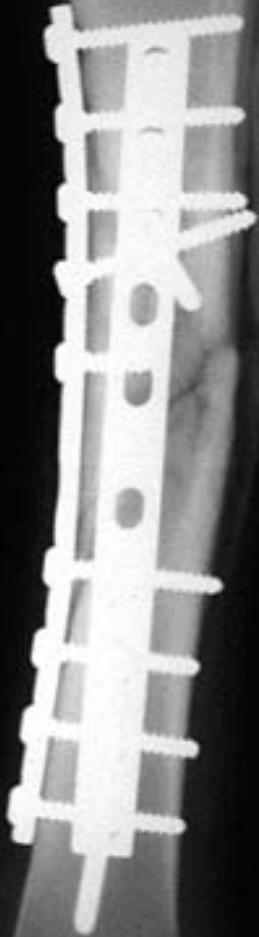
محیط های بیولوژیک از نظر ترکیب شیمیایی ثابت نبوده و دائما در حال تغییر بوده:

■ میزان اکسیژن variations in oxygen content

■ در دسترس بودن رادیکالهای آزاد و یونها availability of free radicals and ions

■ فعالیتهای سلولی cellular activity

■ فرایند خوردگی در بدن steady-state نبوده و بسته به شرایط می تواند خفته quiescent و مجددا به حالت فعال active و یا passive تبدیل گردد



# Chapter Three:

## Corrosion

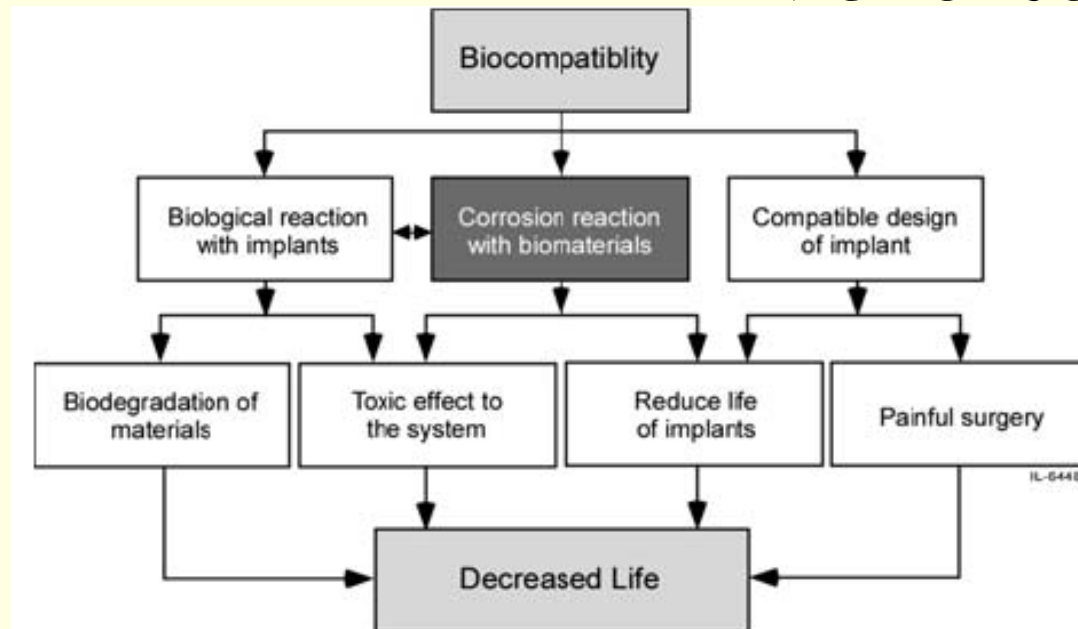
### BIODEGRADATION OF METALS □

#### General issues and concerns ❖

➤ *Biocompatibility* نیاز اولیه برای هر biomaterial می باشد وابسته به عوامل مختلفی می باشد:

➤ طراحی نامناسب implant، خوردگی و degradation of implant، و واکنش نامناسب بافت مورد نظر با implant می توانند منجر به failure implant گردند

➤ زمانی که یک ماده خارجی در نتیجه خوردگی وارد بدن می گردد، بافت به روشهای مختلف به آن واکنش نشان میدهد



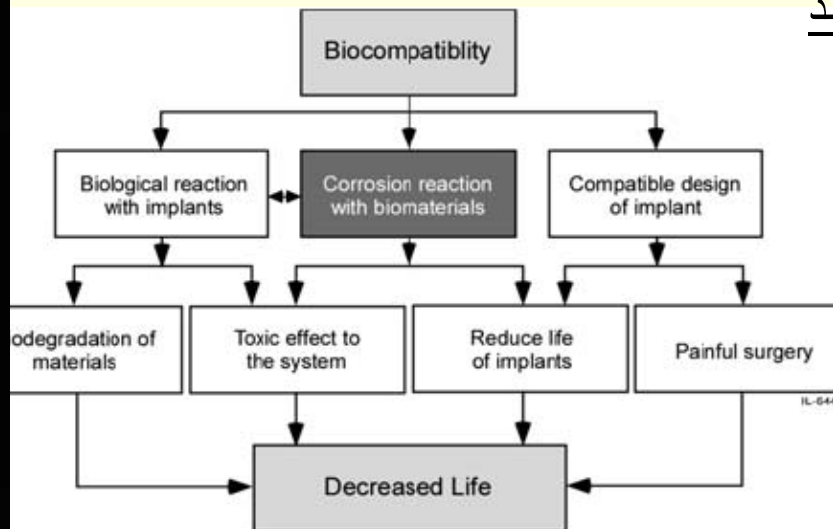
# Chapter Three:

## Corrosion

### BIODEGRADATION OF METALS ❑

#### *General issues and concerns* ❖

- این واکنشها ناخواسته بوده و می توانند باعث inflammation and or hypersensitivity گردند
- Hypersensitivity پاسخ immediate or delayed به تماس با فلزات، محصولات خوردگی و یا نمکهای فلزی metallic salts می باشد
- یونهای فلزی می توانند باعث cytotoxicity, genotoxicity, carcinogenicity گردند
- عناصر فلزی می توانند بعنوان sensitizers برای مشکلات مذکور عمل نمایند بنابراین نباید از حد مشخصی فراتر روند



➤ Most metal ions have ability to form complexes with proteins, such **metallo-organic** complexes can induce allergy in the body.



# Chapter Three:

## Corrosion

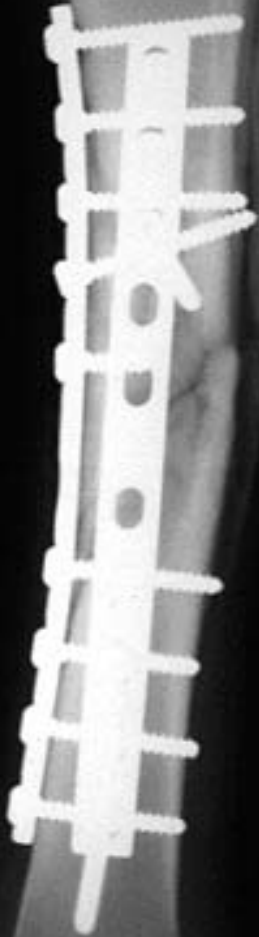
### BIODEGRADATION OF METALS

#### *General issues and concerns*

- این فلزات شامل V, Ti, Ta, Be و لی معمول ترین sensitizer نیکل Ni و سپس به ترتیب Co و Cr می باشند
- اغلب این فلزات در biomedical alloys در حال حاضر مورد استفاده میباشند:

**stainless steel**, Ni: 13–15%, Cr: 17–19%, and Mo: 2–4%;  
**Co–Cr alloy**, Ni~1%, Co: 62–67%, Cr: 27–30%, and Mo: 5–7 %;  
**Ti alloys**: Ti: 89–91%, Al: 5.5–6.5%, and V: 3.5–4.5%

- نیکل Ni برای toxicity و تمایل به ایجاد allergies شناخته شده است
- Cytotoxicity اثرات سمی بروی سلول ها می باشد که باعث مرگ سلولی ، تغییر در غشا membrane ، و جلوگیری از فرایند های آنزیمی سلول
- Genetic toxicity (genotoxicity) ایجاد جهش های ژنی می نماید که باعث تغییرات بروی ژن ها و یا کروموزومها می گردد
- Carcinogenic elements کمک به ایجاد تومور در بدن می نمایند
- در خصوص فلزات خاصیت Carcinogenic آنها بستگی به oxidation state, solubility, concentration دارد

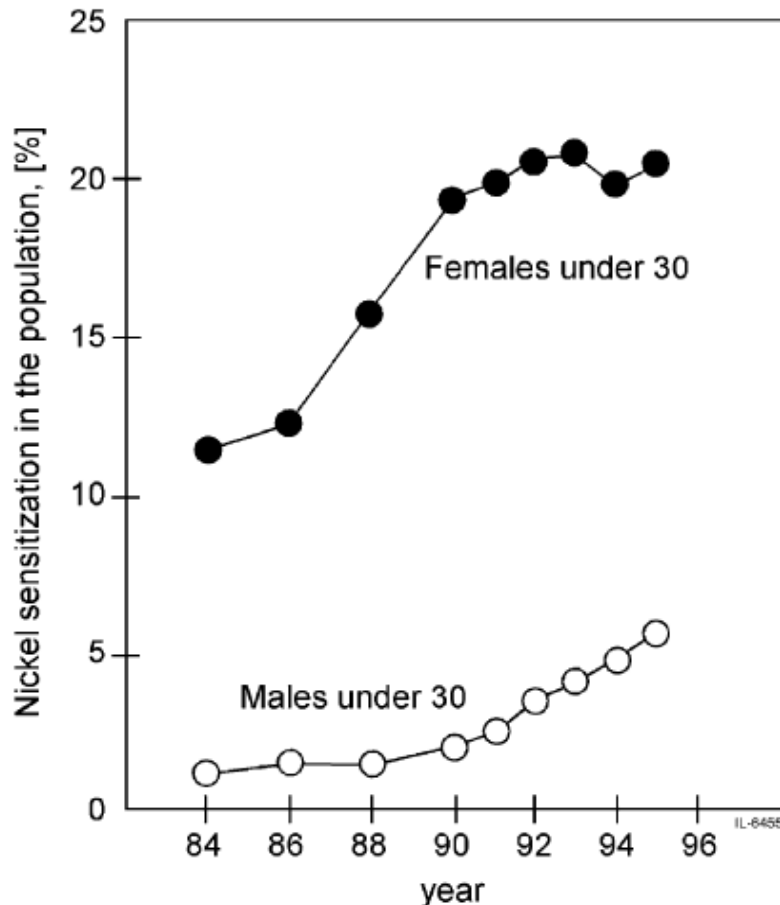


# Chapter Three: Corrosion

## BIODEGRADATION OF METALS ▣

### *General issues and concerns* ◆

➤ اطلاع از نوع و مکانیسم واکنش foreign elements with tissue جهت انتخاب مواد برای ساخت biomaterials الزامی می باشد (مکانیسم اکثر واکنشها دقیقا مشخص نمیباشد)



➤ Electrochemical wear, fatigue, pitting/ crevice and galvanic corrosion are the most observed forms of corrosion in the body.

# Chapter Three:

## Corrosion

### BIODEGRADATION OF METALS □

*Corrosion of metallic material in physiological environment* ❖

➤ physiological solution (body fluid) بعنوان یکی از محیط‌های خورنده شدید to metallic biomaterials در نظر گرفته می‌شود

➤ خوردگی metallic implants در محیط بدن از راه‌های مختلف تاثیرگذار است:

▪ از طریق ایجاد یونهای فلزی non-biocompatible

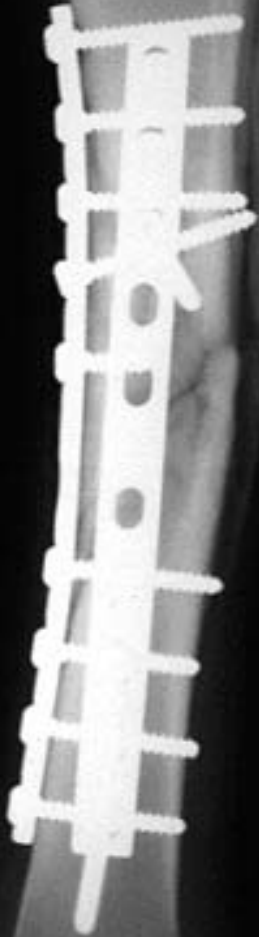
▪ از طریق کاهش عمر قطعه فلزی implant life و نتیجتاً اعمال جراحی مجدد (costly and painful)

▪ نهایتاً کاهش طول عمر انسان

➤ بعنوان مثال خوردگی stainless steel تولید یونهای Fe, Cr, Ni تیتانیم و آلیاژهای آن تولید یونهای Al, V و آلیاژهای Co تولید یونهای Cr, Co مینماید

➤ Release یونهای فلزی به میزان success implant نیز بستگی دارد: (بیمار با well functioning Ti-alloy total joint replacement components تا 3 برابر یون Ti در Serum دارد و بیمار با failed implant تا 50 برابر)

➤ یونهای فلزی در بافت اطراف implant تجمع کرده و یا به بخشهای دیگر بدن transport می‌گردد و در طول زمان ایجاد مشکل می‌نمایند (اندازه‌گیری یونها در بیماران دارای implant و مقایسه با افراد کنترل)



# Chapter Three:

## Corrosion

### BIODEGRADATION OF METALS ❑

*Corrosion of metallic material in physiological environment* ❖

عملکرد biomaterials در بدن بصورت قابل توجهی وابسته به ترکیب chemistry آب میان بافتی body fluid در اطراف implant دارد

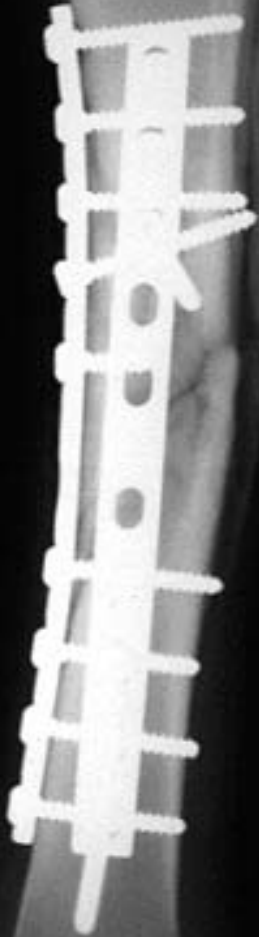
Body fluid (biofluid) شامل مایع داخل سلولهای بافت (intracellular fluid) و خارج از سلول های بافت (extracellular fluid) می باشد

Extracellular fluid شامل خون (blood plasma) و لنف lymph می باشد و به لحاظ شیمیایی متمایز از intracellular fluid می باشد

body fluid از نظر ترکیب شیمیایی بسیار پیچیده و شامل salts, trace metals, amino acids, sugars, proteins, cells, می باشد

این مواد تولید کننده آنیون ها نظیر: chloride ( $\text{Cl}^-$ ), phosphate ( $\text{PO}_4^-$ ), bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ), و کاتیونها نظیر sodium  $\text{Na}^+$  (potassium  $\text{K}^+$ ), calcium (Ca), and magnesium (Mg) می نمایند

Body fluid یک نوع buffer می باشد که pH آن 7.35–7.45 می باشد



# Chapter Three:

## Corrosion

### BIODEGRADATION OF METALS ❑

#### *Corrosion of metallic material in physiological environment* ❖

➤ حضور پروتئینها و ماکرومولکولها در محیط بدن از طریق دخالت در واکنشهای anodic or cathodic در فرایند خوردگی دخیل می گردند:

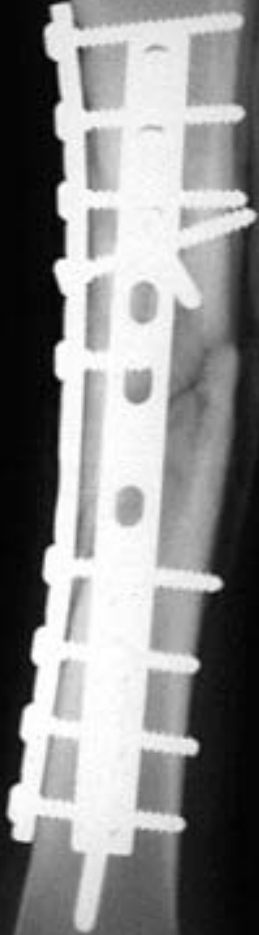
➤ پروتئینها می توانند واکنشهای تعادلی خوردگی را برهم بزنند از طریق مصرف محصولات واکنشهای اکسایش یا کاهش

➤ در خصوص فلزات passive پایداری فیلم و اکسید سطحی وابسته به دو عامل electrode potentials and the pH of the solution می باشد:

➤ پروتئینها می توانند در نقش حامل الکترون electron carrying roles بروی پتانسیل الکتروود electrode potential تاثیر بگذارند

➤ باکتریها می توانند بشکل موضعی بروی pH تاثیر گذار باشند از طریق واکنشهای متابولیکی که تولید محصولات اسیدی می نماید

➤ پایداری اکسید سطحی فلزات همچنین به میزان و در دسترس بودن اکسیژن بستگی دارد: جذب پروتئین ها بروی سطح biomaterial باعث محدود شدن اکسیژن و ایجاد oxygen-deficient areas می نماید



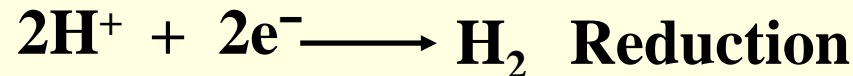
# Chapter Three:

## Corrosion

### BIODEGRADATION OF METALS ❑

*Corrosion of metallic material in physiological environment* ❖

➤ واکنش کاتدی معمولاً تولید هیدروژن می نماید



➤ تجمع این محصولات می تواند واکنشهای کاتدی را محدود سازد و در نتیجه واکنش خوردگی را کاهش دهد

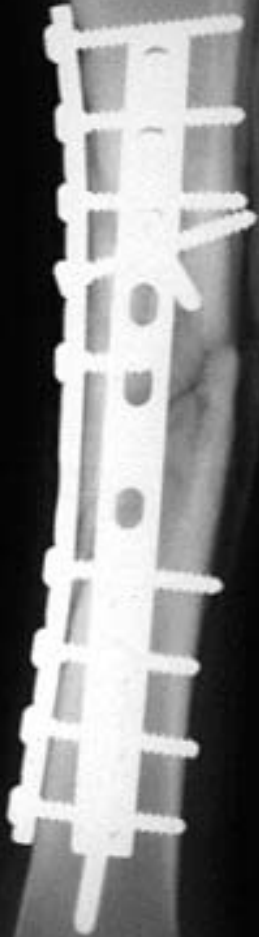
➤ از طرف دیگر bacteria امکان مصرف هیدروژنهای تولیدی را داشته و نقش مهمی در فرایند خوردگی ایفا می نمایند

➤ دو راه اصلی و کلی برای مقابله با مشکل خوردگی فلزات در بدن در نظر گرفته شده است :

➤ استفاده از Noble metals (Au, Ag, Pt, Pd, Ir, Rh)

➤ استفاده از Passivated metals: Cr containing metal

(stainless steels, Co-Cr alloys), Ti and Ti alloy





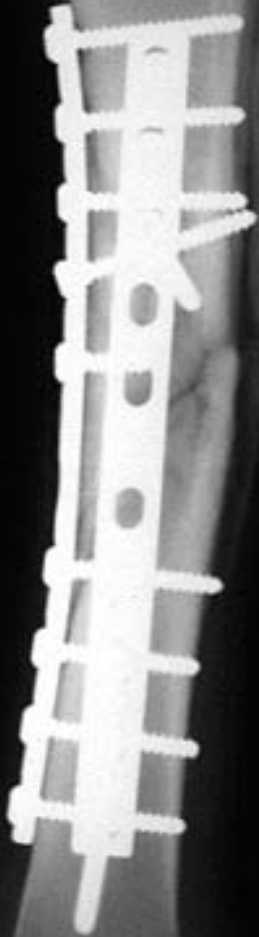
# Chapter Three:

## Corrosion

### BIODEGRADATION OF METALS ❑

#### *Corrosion of metallic material in physiological environment* ❖

- در میان آنیون‌ها یون کلراید  $\text{Cl}^-$  بیشتر از مابقی یونها باعث تشدید خوردگی در implants می‌گردد
- نتیجتاً باعث ایجاد یونهای فلزی و اختلال در trace metal ions می‌گردد
- اختلال در trace metal ions باعث تغییر در واکنشهای بیوشیمیایی بدن می‌گردد
- مثلاً تغییرات آهن Fe می‌تواند باعث کم‌خونی anemia در low dosage و صدمه به کار کبد high dosage می‌گردد
- بخش عمده تحقیقات in vitro در خصوص خوردگی در محلولهای سنتزی که با افزودن انواع نمکهای حاوی کلراید انجام می‌گردد
- مطالعات و تحقیقات بوسیله محلولهای حاوی بخش آلی نظیر پروتئین‌ها بروی خوردگی metallic implants نشان داده است که تغییرات بسیار کوچک در خوردگی implant تاثیر قابل توجهی در طول عمر device دارد
- بنابراین جهت افزایش طول عمر device اطلاع از عملکرد آنها در محیط بدن بیمار ضروری می‌باشد



# Chapter Three:

## Corrosion

### BIODEGRADATION OF METALS ❑

*Corrosion of metallic material in physiological environment* ❖

➤ مطالعات خوردگی در خصوص orthopedic implants معمولاً در محیط Hank's, Ringer's solution, and artificial saliva

➤ Hank's solution is a salt solution that is made from  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , and glucose

➤ Ringer's solution contains  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{KCl}$ , and  $\text{NaHCO}_3$  in de-ionized water

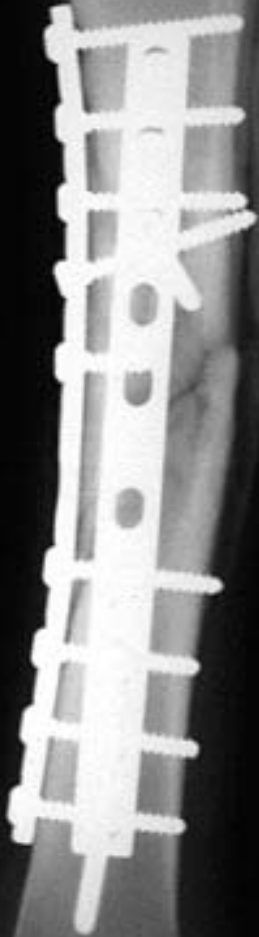
➤ در خصوص مواد دندانی فلزات در synthetic saliva مورد تحقیق و بررسیهای خوردگی قرار می گیرند

➤ مواد اصلی در artificial saliva عبارتند از:

$\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{P}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SCN}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , and the pH is near neutral

بعلاوه مواد آلی organic نظیر glucoproteins که نقش در حفظ viscosity دارد

➤ بطور کلی مکانیسم خوردگی biomaterials و نقش یونهای مختلف در بدن بصورت واضح مشخص نمی باشد





| Characteristics                    | Stainless steels   | Cobalt-base alloys  | Ti and Ti-base alloys   |
|------------------------------------|--|---|---|
| Designation                        | ASTM F-138 (316 LDVMO)   | ASTM F-75 ASTM F-799 ASTM F-1537 (cast and wrought)                                 | ASTM F-67 (ISO 5832/II) ASTM F-136 (ISO 5832/II) ASTM F-1295 (cast and wrought)                           |
| Principal alloying elements (wt %) | Fe (balance) Cr (17–20) Ni (10–14) Mo (2–4)                                | Co (balance) Cr (19–30) Mo (0–10) Ni (0–37)   | Ti (balance) Al (6) V (4) Nb (7)  |
| Advantages                         | cost, availability, processing   | wear resistance, corrosion resistance, fatigue strength                             | Biocompatibility corrosion resistance minimum modulus fatigue strength                                    |
| Disadvantages                      | long-term behavior, high modulus   | high modulus  | low wear resistance, low shear resistance   |
| Application                        | temporary devices (fracture plates, screws, hip nails) used for THRs stems | dentistry casting, prostheses stems load-bearing components in TJR (wrought alloys) | in THRs (with modular Co-Cr-Mo or ceramic) femoral heads, long-term permanent devices (nails, pacemakers) |

## Artificial Saliva ترکیب شیمیایی

| Ca <sup>++</sup> | CO <sub>3</sub> | Mg <sup>++</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | Cl <sup>-</sup> | SCN <sup>-</sup> | P     | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | pH  |
|------------------|-----------------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|-------|------------------------------|-----|
| 5.80             | 000             | 00e              | 58.60          | 14.64           | 32.19           | 00               | 16.79 | 00                           | 6.7 |
| 00               | 7.10            | 00               | 00             | 27.14           | 29.80           | 2.5              | 4.70  | 4.10                         | 6.8 |
| 00               | 00              | 00               | 25.74          | 28.16           | 29.84           | 2.24             | 4.7   | 4.1                          | –   |
| 00               | 17.85           | 00               | 21.48          | 33.49           | 28.07           | 3.4              | 2.98  | 00                           | 6.7 |
| 1.43             | 6.45            | 00               | 20.5           | 11.55           | 23.22           | 2.3              | 5.1   | 4.35                         | –   |
| 1.5              | 15.00           | 00               | 00             | 37.5            | 3.00            | 00               | 15.00 | 00                           | –   |
| 1.0              | 17.86           | 00               | 00             | 51.14           | 37.08           | 00               | 1.0   | 00                           | –   |