



# UNIVERSITÀ DI PISA

## INGEGNERIA DEI MATERIALI

---

### MASSIMO DE SANCTIS

Anno accademico	2022/23
CdS	INGEGNERIA AEROSPAZIALE
Codice	1069I
CFU	6

Moduli	Settore/i	Tipo	Ore	Docente/i
INGEGNERIA DEI MATERIALI	ING-IND/21	LEZIONI	60	MASSIMO DE SANCTIS

#### Obiettivi di apprendimento

##### *Conoscenze*

Lo studente dovrà conoscere i principali strumenti di verifica delle caratteristiche meccaniche di un materiale, essere in grado di analizzare le cause di cedimento di un organo meccanico e saper selezionare in modo appropriato i materiali in funzione del loro impiego.

##### *Modalità di verifica delle conoscenze*

la verifica delle conoscenze si condurrà mediante prova orale.

##### *Capacità*

Conoscenza delle proprietà e delle tecniche di produzione e lavorazione delle diverse classi di materiali (metallici, polimeri, ceramici, compositi). Comprensione delle relazioni tra microstruttura e proprietà meccaniche nei materiali e capacità di selezione e trattamento (solo metallici strutturali) in ragione dell'applicazione prevista.

##### *Modalità di verifica delle capacità*

la verifica delle capacità si condurrà attraverso una prova orale della durata media di 40 minuti. Le domande poste allo studente volgeranno alla verifica non solo dello studio degli argomenti del corso, ma anche della capacità di selezione e trattamento dei materiali strutturali in ragione dell'applicazione ed impiego proposto.

##### *Comportamenti*

capacità di comprendere le proprietà richieste ad un materiale per un'applicazione reale e capacità di selezionare il materiale più idoneo al servizio.

##### *Prerequisiti (conoscenze iniziali)*

Termodinamica e cinetica chimica. Diagrammi di stato. Equilibri in soluzione acquosa. Elettrochimica.

##### *Programma (contenuti dell'insegnamento)*

1 - **Panoramica sui materiali** strutturali esistenti e principali proprietà fisico-meccaniche: metallici, polimerici, ceramici, compositi. Relazione struttura-trattamenti termomeccanici- proprietà. Materiali avanzati: semiconduttori, biomateriali, smart materials, nanomateriali.

2 - **Prove meccaniche**: statiche, impulsive, cicliche, a carico costante. Prova di trazione. Curva sforzo-deformazione ingegneristica e curva sforzo reale - deformazione reale. Modulo elastico, carico unitario di snervamento, carico di rottura e allungamento percentuale a rottura. Duttilità e tenacità a frattura dei materiali. Effetti della temperatura. Prova di durezza Brinell (HB), Rockwell (HR), Vickers (HV).

3 - **Struttura dei cristalli**: Ordinamento a corto e lungo raggio. Solidi cristallini e solidi amorfi. Cristallografia: celle unitarie e reticoli, sistemi cristallini e reticoli di Bravais. Strutture c.c.c., c.f.c., e.c.. Numero di coordinazione, numero di atomi per cella, fattore di impacchettamento. Indici di Miller e di Miller-Bravais per piani e direzioni cristallografiche. Densità planari e lineari. Calcolo della densità teorica. Sequenza di impilamento del c.f.c. ed e.c.. Allotropia. Isotropia e anisotropia. Solidi non cristallini. Legge di Bragg e determinazione parametri cristallini e distanze interplanari mediante diffrattometria. Microscopia ottica ed Elettronica a scansione (SEM) e a trasmissione (TEM)

4 - **Difetti nei cristalli**. Difetti di punto, di linea, di superficie, di volume. Teoria delle dislocazioni: sforzi associati alle dislocazioni. Dislocazioni a spigolo, a vite, miste. Moti di scorrimento per glide. Geminazione. Interazione tra dislocazioni (kinks e jogs). Dimensione del grano e numero ASTM. Diffusione allo stato solido: movimento di vacanze reticolari e movimento di interstiziali. Prima e seconda legge di Fick.

5 - **Meccanismi di deformazione plastica**. Movimento delle dislocazioni: sistemi di scorrimento per c.f.c, c.c.c., e.c. sforzo critico di taglio. Moti conservativi (cross-slip) e non conservativi (climb). Intersezione tra dislocazioni: kinks e jogs. Legge di Schmid e sforzo critico di taglio risolto (snervamento monocristallo e materiale policristallino). Movimento e moltiplicazione delle dislocazioni (sorgenti di Frank-Read).

Fenomeno dell'incrudimento e teoria della foresta di dislocazioni. Snervamento: atmosfere di Cottrell e formazione delle bande di Luders negli

## UNIVERSITÀ DI PISA

acciai dolci da stampaggio. Relazioni microstruttura-resistenza dei metalli: Relazione di Hall-Petch. Indurimento per soluzione solida, per deformazione plastica, per precipitazione e per riduzione del grano cristallino. Ricristallizzazione. Fattori influenzanti la temperatura di ricristallizzazione. Recovery, ricristallizzazione primaria e secondaria.

6 - **Meccanismi di rottura.** Meccanismo della rottura duttile e fragile (clivaggio, intergranulare) dei materiali. Aspetto delle superfici di frattura. Microscopia elettronica a scansione (SEM). Autotensioni: di origine termica, deformazione plastica, di origine fasica. Meccanica della frattura: intensificazione degli sforzi all'apice di un difetto. Criterio di frattura di Griffith e di Irvin. Criterio basato sul raggiungimento di  $K_{Ic}$ . Modalità di apertura di una cricca. Stato piano di tensioni e stato piano di deformazioni all'apice di una cricca. Prova di  $K_{Ic}$ . Progettazione con l'uso della meccanica della frattura.

7 - **Diagrammi di stato e diagramma Fe-Fe3C.** Regola delle fasi di Gibbs. Sistemi binari isomorfi. Liquidus, solidus, sulvus. Tie-line e regola della leva. Raffreddamento di equilibrio e di non equilibrio per una lega binaria isomorfa. Micro- e macro segregazione di soluto. Trasformazione eutettica, peritettica, eutettoidica. Diagramma di stato eutettico e meccanismo di solidificazione eutettica. Diagramma di stato Ferro-Carbonio. Acciai e ghise. Ferrite, austenite, cementite, temperature e curve di trasformazione. Trasformazione peritettica e eutettoidica. Raffreddamento e trasformazione acciaio ipo- e iper- eutettoidico. Proprietà meccaniche delle leghe Fe-C. Trasformazioni isoterme e curve TTT. Trasformazione perlitica, bainitica, martensitica. Struttura e caratteristiche della martensite negli acciai. Curve CCT di raffreddamento anisotermo. Fattori che influenzano le curve di Bain. Applicazioni pratiche.

8 - **Rottura per fatica:** prova di flessione rotante e curve di Wohler (S/N). Meccanismi di innesco, propagazione sub-critica e rottura di schianto. Curve di avanzamento di una cricca a fatica da/dN - D KI. Progettazione a vita infinita e damage tolerant: effetto finitura superficiale, autotensioni, dimensioni e geometria del pezzo, temperatura, intaglio e ambiente corrosivo. Trattamenti superficiali: carbocementazione, nitrurazione, pallinatura.

9 - **Scorrimento viscoso (creep).** Effetti dello sforzo e della temperatura. Prove di creep a carico costante: creep primario, secondario, terziario. Espressione della velocità di creep stazionario in funzione dello sforzo e della temperatura. Stima della vita a rottura per creep. Parametro di Larson-Miller e metodi previsionali. Cenni sulle mappe dei meccanismi di deformazione e frattura. Criteri di progettazione a creep.

10 - **Produzione degli acciai.** Solidificazione delle leghe. Micro e macrosegregazioni. Ciclo integrale produzione ghisa: Altoforno, convertitore, forni elettrici. Colata continua, laminatoi sbazzatori e finitori. Gli elementi degli acciai: impurezze, aggiunte standard, elementi di lega ed effetto sulla composizione e temperatura eutettoidica. Classificazione degli acciai UNI EN 10027-1. Acciai designati in base alla composizione chimica. Esempi. Normativa AISI degli acciai inossidabili. Classificazione pratica e composizione chimica/trattamenti di: Acciai da costruzione per uso generale, acciai speciali da costruzione (da bonifica, HSLA, da cementazione, da nitrurazione, per molle, per cuscinetti, da stampaggio innovativi AHSS (DP, TRIP), acciai per utensili rapidi e superrapidi. Processi tecnologici: laminazione a caldo, a freddo, estrusione, fucinatura, saldatura, metallurgia delle polveri, additive manufacturing. Ghise bianche, grigie, nodulari, malleabili e altoleghe: caratteristiche, composizione chimica, trattamenti e classificazione.

11 - **Acciai inox:** diagramma di stato Fe-Cr e Fe-Ni. Diagramma di Shaeffler. Classificazione, composizione chimica e caratteristiche: inox austenitici, ferritici, martensitici, duplex e indurenti per precipitazione (PH). Caratteristiche meccaniche e resistenza a corrosione. Lavorabilità alle macchine utensili.

12 - **Acciai maraging** al cobalto e al titanio. Caratteristiche microstrutturali e meccaniche. Trattamenti termici.

13 - **Leghe non ferrose.** Leghe di Alluminio: Classificazione Aluminium Association e CEN. Principali famiglie di leghe e loro caratteristiche generali. Leghe di alluminio da fonderia e da lavorazione plastica. Trattamento termico di solubilizzazione, tempra di soluzione e invecchiamento artificiale. Struttura di sottoinvecchiamento, di picco e sovrainvecchiamento. Evoluzione microstrutturale durante invecchiamento artificiale ed effetto della temperatura. Rame e sue leghe: classificazione americana e codice alfanumerico ISO 1190-1. Rame puro. Ottoni monofasici rossi e gialli, ottoni binari, bronzi al fosforo, bronzi al silicio, bronzi all'alluminio. leghe cupronickel. Titanio e sue leghe. Microstruttura e proprietà meccaniche. Magnesio e sue leghe. Superleghe per alte temperature: base cobalto e base nickel. Indurimento per soluzione solida e per precipitazione fase gamma primo e fase gamma secondo. Leghe base nickel per palettature turbina a grano colonnare e monocristalline.

14 - **Trattamenti termici acciai.** Ricottura completa, normalizzazione, tempra e rinvenimento. Temprabilità acciaio e prova Jomini. Austempering e Martempering. Ricotture sub-critiche di lavorabilità. Trattamenti termochimici: carbocementazione e nitrurazione. Tempra superficiale. Applicazioni pratiche

15 - **Materiali polimerici.** Caratteristiche generali e proprietà. Polimerizzazione per addizione e condensazione. Grado di polimerizzazione, funzionalità. Forma delle molecole e struttura (omopolimeri, copolimeri). Isomerie di posizione, struttura, steriche. Peso molecolare ponderale e numerale. Polimeri termoplastici. Modulo elastico vs. temperatura, temperatura di fusione e di transizione vetrosa. Teflon, PVC, PP, LDPE, HDPE, PET. Solidificazione termoplastici e grado di cristallinità. Modelli morfologici termoplastici semicristallini. Deformazione termoplastici elastica e plastica. Stiramento. Deformazione dipendente dal tempo e viscoelasticità. Polimeri termoindurenti. Reticolazione resine epossidiche e poliesteri. Elastomeri, molle entropiche. Vulcanizzazione. Metodi di produzione materiali polimerici.

16 - **Materiali ceramici.** Caratteristiche generali. Ceramiche tradizionali e innovativi. Disposizioni ioniche e strutture cristalline. Silicati, vetri, carbonio. Meccanismi di deformazione plastica. Viscosità. Proprietà meccaniche, prova a flessione e influenza porosità. Prodotti argillosi: strutturali (mattoni, piastrelle) e porcellane. Ceramiche refrattari e abrasivi. Preparazione manufatti ceramici: formatura per colaggio e formatura idroplastica. Il vetro: sodio-calcico, al borosilicato, al piombo, siliceo. Variazione della viscosità con la temperatura: fusione, punto di lavorazione, rammollimento, ricottura, deformazione. Vetro rafforzato per tempra o chimicamente. Vetrocereamici. Malte aeree e idrauliche. Meccanismo di presa dei cementi (Portland). Calcestruzzo.

17 - **Materiali compositi.** Caratteristiche generali. Rinforzati con particelle di grandi o piccole dimensioni. Regola delle miscele. Rinforzati con fibre. Fibre corte e lunghe, lunghezza critica. Disposizione delle fibre. Curva sforzo-deformazione fibre continue e allineate: modulo elastico e carico di rottura nel caso di comportamento elastico con carico longitudinale e con carico trasversale. Fibre discontinue casualmente orientate. Fibre di rinforzo: whiskers, fibre, fili. Caratteristiche matrici. Compositi a matrice polimerica (PMC) con fibre di vetro, fibre di carbonio, fibre aramidiche. Compositi a matrice metallica e ceramica. Processi produttivi: poltrusione, prepreg, filament winding. Laminati e Glare. Applicazioni in campo aeronautico.

18 - **Corrosione materiali metallici:** corrosione ad umido e a secco. Aspetti termodinamici. Areazione differenziale. Aspetti cinetici: relazione tra sovratensione e correnti elettrodeiche, equazioni di Tafel, curve di Evans. Potenziale e corrente di corrosione. Fenomeno della passività. Curva di polarizzazione anodica di un metallo a comportamento attivo-passivo. Corrosione uniforme: velocità di corrosione e penetrazione media. Corrosione localizzata: pitting e indice PREN, c. interstiziale, c. galvanica, tensocorrosione (SCC), infragilimento da idrogeno (HE). Corrosione selettiva: sensibilizzazione, corrosione intergranulare acciai inox austenitici e rimedi.



## UNIVERSITÀ DI PISA

---

### Bibliografia e materiale didattico

W.D.Callister, D.G. Rethwisch "Materiali per l'Ingegneria Civile e Industriale", Ed. EDISES S.r.l. Napoli, 2015.  
Slides proiettate a Lezione su piattaforma e-learning CdL Ing. Areospaziale.

### Modalità d'esame

Prova orale della durata media di 40 minuti.

*Ultimo aggiornamento 31/07/2022 09:01*