

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Relazione per la prova finale

***Effetto della temperatura di rinvenimento sulla struttura  
e le proprietà meccaniche di alcune tipologie di acciai***

Relatore: Prof.ssa Brunelli Katya

Laureando: *Bizzotto Nicolò* 2042753

Padova, 14/11/2025

I **trattamenti termici** sono uno strumento fondamentale per regolare le proprietà meccaniche degli acciai. In particolare, il **rinvenimento** consente di ridurre la fragilità residua della martensite, formata durante la tempra, attraverso la decomposizione della martensite e la precipitazione dei carburi.

Lo scopo di questa tesi è:

- studiare i diversi stadi di trasformazione microstrutturale
- il fenomeno critico della fragilità da rinvenimento
- l'influenza degli elementi di lega, i quali possono portare al fenomeno della durezza secondaria

In dettaglio, sarà effettuata una ricerca bibliografica per valutare la microstruttura e le proprietà meccaniche (resistenza, durezza, allungamento e tenacità) in funzione della temperatura di rinvenimento di diversi tipi di acciaio.

Il **rinvenimento** è un trattamento termico che consiste nel riscaldamento controllato di un acciaio temprato a una temperatura inferiore al punto critico inferiore, seguito da un raffreddamento lento (ad aria o in forno) o rapido (in olio o acqua). Insieme alla tempra costituisce la **bonifica**, e l'acciaio trattato viene detto bonificato.

Durante il rinvenimento, il calore favorisce il rilassamento delle **tensioni interne** e la trasformazione graduale della **martensite** in strutture più stabili, con precipitazione e coalescenza dei carburi, riduzione della tetragonalità e, a temperature più alte, parziale ricristallizzazione.

L'effetto complessivo è una diminuzione di durezza e resistenza, accompagnata da un aumento di duttilità, tenacità e stabilità dimensionale.

Lo scopo del trattamento è ottenere un equilibrio ottimale tra **resistenza** e **tenacità** in base all'applicazione richiesta.

Le proprietà di un **acciaio rinvenuto** dipendono fondamentalmente dalla temperatura di rinvenimento, che presenta vari stadi dai limiti non rigidamente definiti.

## Primo stadio

80° - 250° C

Nel primo stadio si formano **carburi transitori** e la martensite si stabilizza, aumentando la tenacità senza variazioni significative di durezza

## Secondo stadio

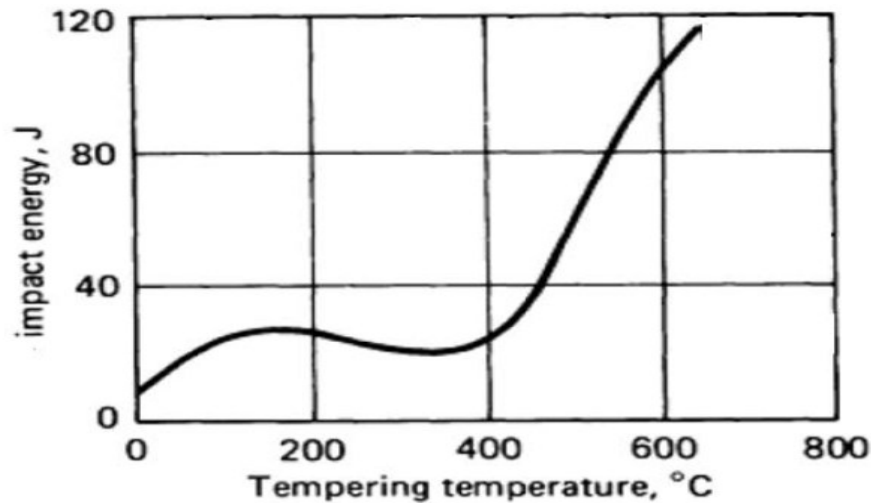
400° - 450° C

Il rinvenimento intermedio produce una struttura **troostite-martensitica**, conferendo all'acciaio elevato limite elastico e ottima resistenza a fatica

## Terzo stadio

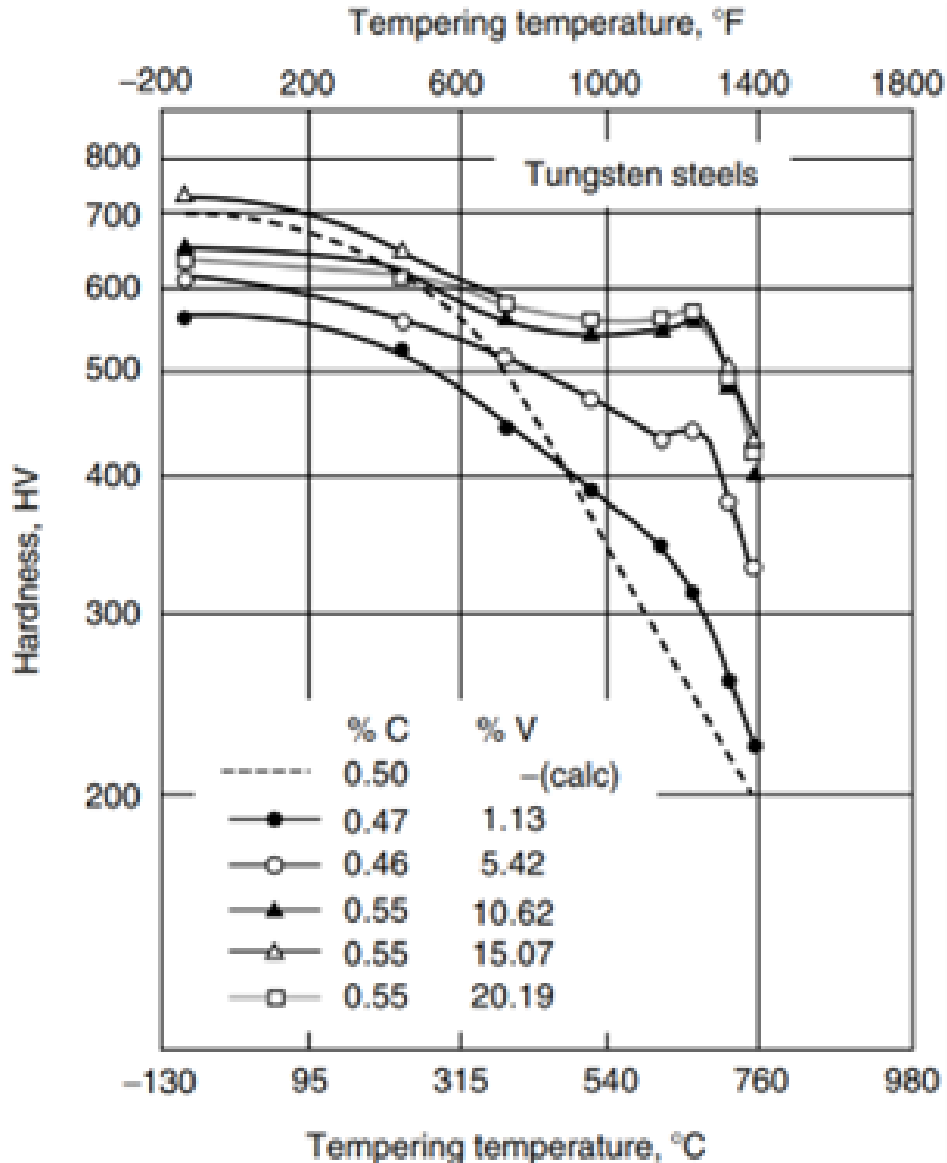
500° - 650° C

Nel terzo stadio si forma la **sorbite di rinvenimento**, costituita da ferrite e sferoidi di cementite, garantendo un ottimo equilibrio tra resistenza e tenacità



La **fragilità da rinvenimento** è un fenomeno rilevante che si manifesta tra 250 °C e 400 °C, causando una riduzione anomala della **tenacità** degli acciai e compromettendo la resistenza a fatica dei componenti sollecitati.

La **fragilità da rinvenimento** deriva dalla **trasformazione disomogenea** dell'austenite residua e dalla **precipitazione di carburi** ai bordi di grano, che generano tensioni interne, microcricche e fratture intergranulari, riducendo la resilienza del materiale.



Gli **elementi di lega** influenzano il rinvenimento attraverso la loro solubilità nella **ferrite** e la tendenza a formare **carburi**. Il *Ni* e *Si* si dissolvono nella ferrite senza formare carburi propri, mentre *Cr*, *Mo*, *W* e *V* mostrano forte affinità per il carbonio, generando precipitati che rallentano la diffusione e la crescita dei carburi. Ciò stabilizza la **martensite**, permettendo al materiale di mantenere durezza e resistenza anche a temperature elevate.

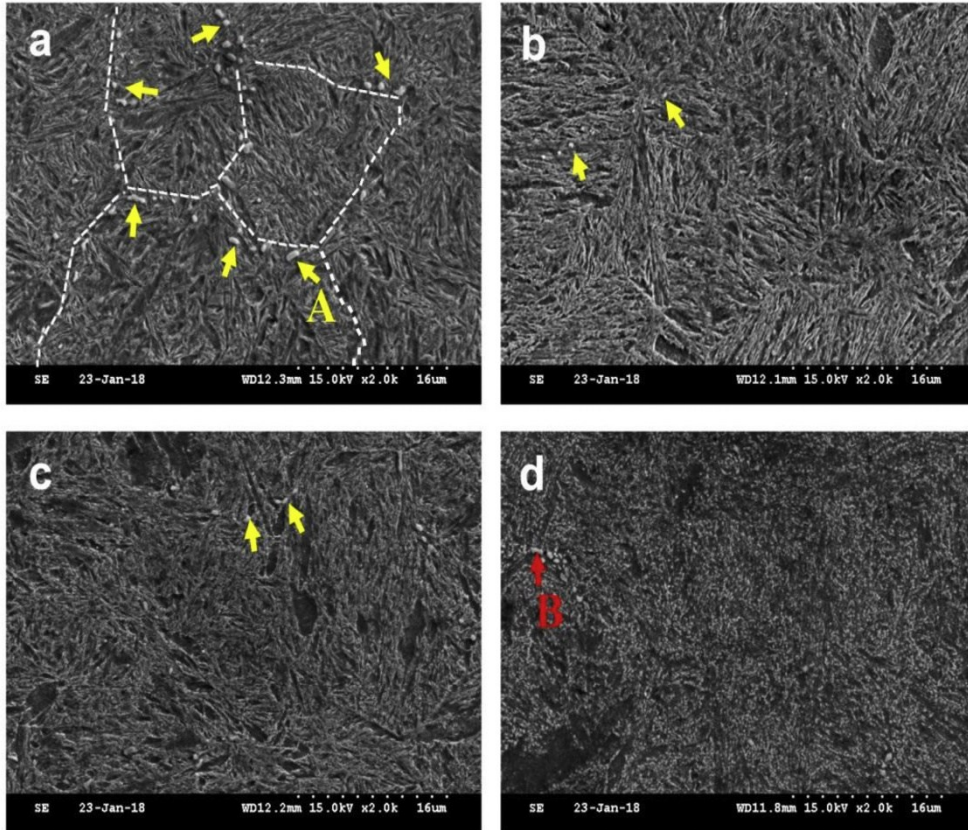
Nel primo stadio del rinvenimento, sotto circa 200 °C, l'effetto degli elementi di lega è limitato, mentre nella fase successiva, fino a 500 °C, rallentano la crescita dei carburi e prolungano la sovrasaturazione della ferrite, rafforzando i legami interatomici e ritardando la perdita di durezza.

A temperature superiori a 500 °C si forma **carburi speciali**, come  $Mo_2C$ ,  $W_2C$  e  $VC$ , generando il fenomeno della **durezza secondaria**, con un nuovo incremento della durezza, tipico degli acciai rapidi e da utensili da lavoro a caldo.

Analizziamo come le **temperature di rinvenimento** influenzino la microstruttura e le proprietà meccaniche dell'acciaio per molle  $65Si_2MnWE$ . L'obiettivo è quello di comprendere come le temperature di rinvenimento influenzino la microstruttura e le proprietà meccaniche, al fine di individuare il trattamento termico ottimale che migliori simultaneamente resistenza e tenacità. In particolare il trattamento termico effettuato prevedeva:

Riscaldamento + Mantenimento	Tempra	Temperatura di rinvenimento (°C)	Raffreddamento
850°C + 30 min	Tempra in olio	200°, 250°, 300°, 350°, 380°, 400°, 420°, 435°, 450°, 470°, 500°, 525°, 550°, 575°, 600° + 2 h	Raffreddamento ad aria

Durante il **rinvenimento** si verificano trasformazioni fondamentali quali decomposizione dell'austenite residua, riduzione delle tensioni residue, diffusione del carbonio, riorganizzazione delle dislocazioni e precipitazione dei carburi. Un controllo accurato di questi processi consente di bilanciare resistenza, duttilità e capacità di deformazione plastica.

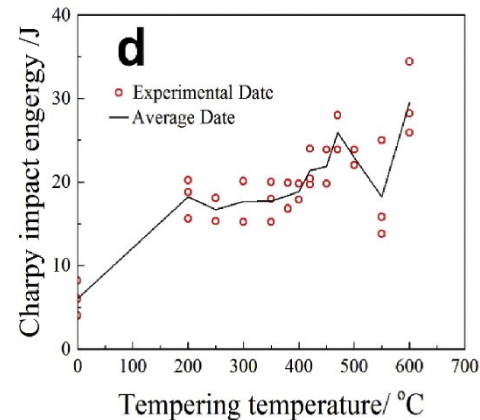
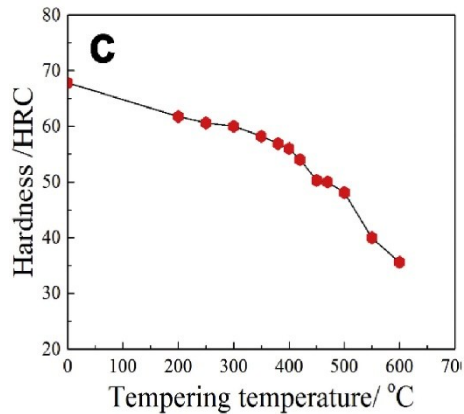
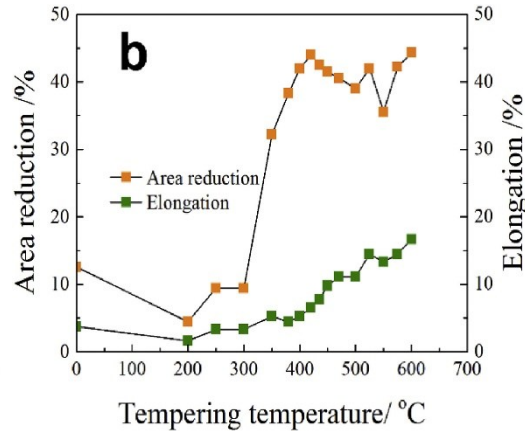
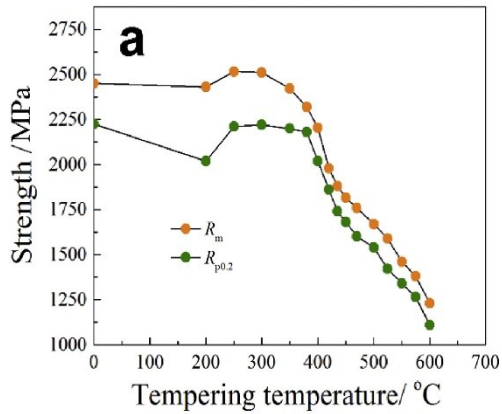


La **microstruttura dell'acciaio**  $65Si_2MnWE$ , dopo tempra e rinvenimento a  $200^{\circ}C$ ,  $420^{\circ}C$ ,  $500^{\circ}C$  e  $600^{\circ}C$ , è stata esaminata mediante **microscopia elettronica a scansione (SEM)** e mostra una marcata evoluzione microstrutturale con l'aumento della temperatura.

A  $200^{\circ}C$  prevale la martensite di rinvenimento inferiore, con precipitati  $\epsilon$ -carburo a bastoncino lungo i bordi lamellari, duri ma fragili, che riducono la tenacità. Con l'aumentare della temperatura, la densità dei precipitati diminuisce per dissoluzione nel reticolo ferritico.

Tra  $420^{\circ}C$  e  $500^{\circ}C$ , gli  $\epsilon$ -carburi si trasformano in cementite sferoidale e la martensite si parzialmente decompone, generando una struttura più omogenea e bilanciata tra durezza e tenacità.

A  $600^{\circ}C$  la decomposizione è completa e si ottiene una microstruttura di ferrite e cementite finemente sferoidizzata, stabile e tenace.



L'andamento delle **proprietà meccaniche** dell'acciaio  $65Si_2MnWE$  varia con la temperatura di rinvenimento

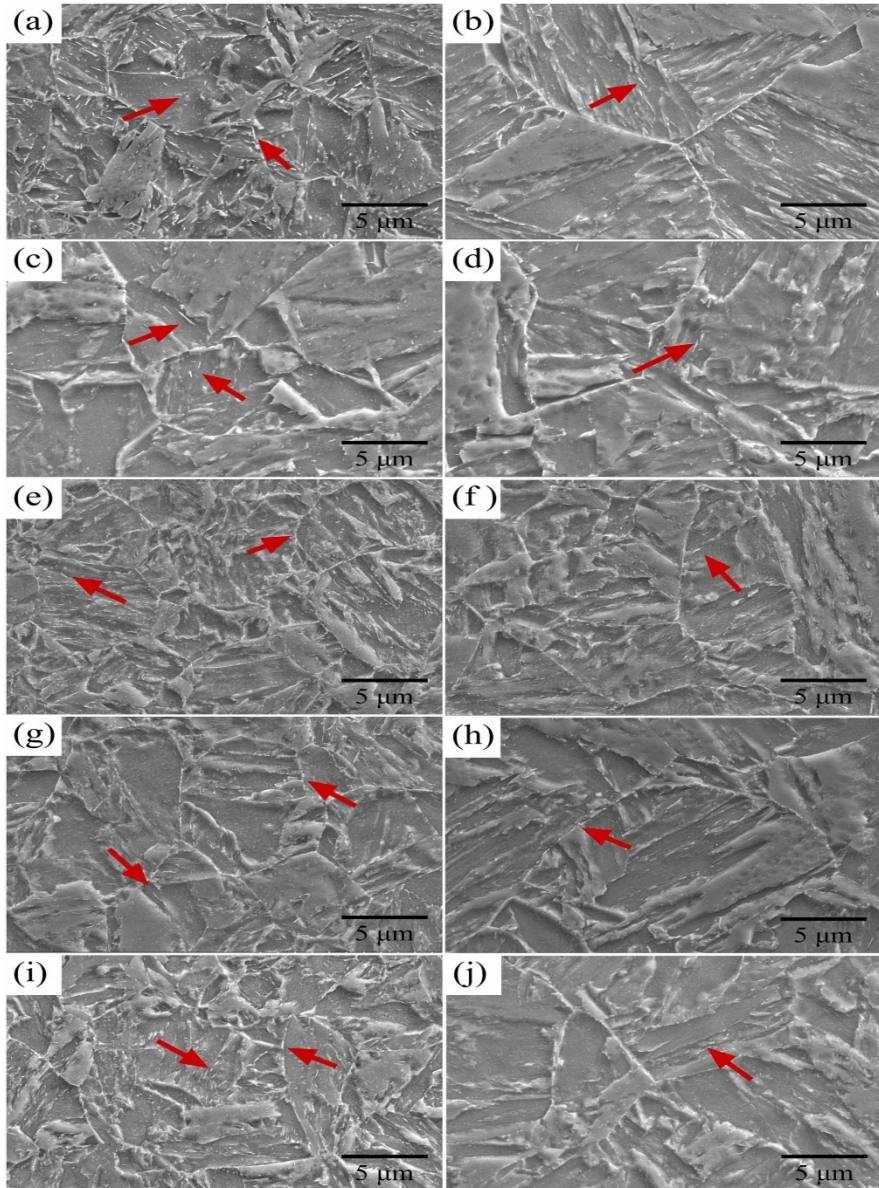
- a) Resistenza a trazione:** elevata a basse temperature, massima intorno a  $300\text{ }^\circ\text{C}$  per la martensite parzialmente rinvenuta e i carburi finemente dispersi, diminuisce oltre tale temperatura
- b) Allungamento:** aumenta fino a  $420\text{ }^\circ\text{C}$  per la sferoidizzazione parziale dei carburi e il rilassamento delle tensioni interne, poi si stabilizza o diminuisce leggermente
- c) Durezza:** diminuisce progressivamente con l'aumento della temperatura, seguendo la trasformazione e la distribuzione dei carburi che riducono la resistenza alla deformazione plastica
- d) Resilienza:** due minimi a  $200\text{-}300\text{ }^\circ\text{C}$  e oltre  $500\text{ }^\circ\text{C}$ , corrispondenti a fragilità da rinvenimento inferiore e superiore

L'acciaio  $Cr - Ni - Mo - V$  è utilizzato in grandi forgiati per applicazioni ad alte prestazioni, come: canne d'arma, rotor di turbine, recipienti in pressione grazie alla combinazione di elevata resistenza meccanica e tenacità.

L'aggiunta di **elementi di lega** quali  $Mn$ ,  $Cr$ ,  $Mo$ ,  $Ni$  e  $V$  migliora la stabilità dell'austenite e la temprabilità, permettendo un controllo preciso della trasformazione martensitica e un bilanciamento ottimale tra resistenza e duttilità mediante trattamento termico.

Riscaldamento + Mantenimento	Tempra	Temperatura di rinvenimento ( $^{\circ}C$ )	Raffreddamento
900 $^{\circ}C$ + 30 min	Tempra in acqua	430 $^{\circ}$ , 480 $^{\circ}$ , 530 $^{\circ}$ , 580 $^{\circ}$ , 630 $^{\circ}$ + 2 h	Raffreddamento ad aria

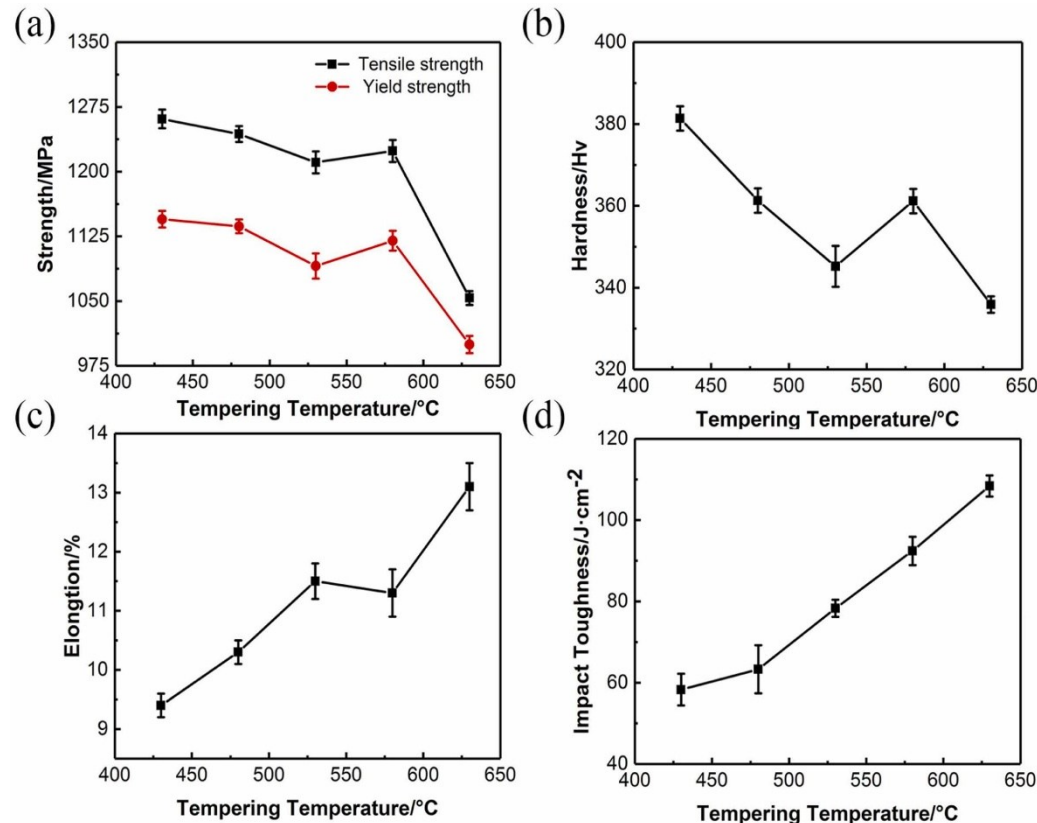
L'evoluzione della microstruttura e delle proprietà meccaniche ha consentito di identificare i tipi di carburi e di valutare le loro variazioni morfologiche e dimensionali in funzione della temperatura di rinvenimento, correlando microstruttura e prestazioni del materiale



Le osservazioni **SEM** mostrano l'evoluzione microstrutturale dell'acciaio *Cr – Ni – Mo – V* durante il rinvenimento tra 430 °C e 630 °C mostra modifiche progressive della martensite e dei carburi.

- A 430 °C, la martensite è fine e ben definita, con elevata densità di carburi lungo i bordi dei grani e delle lamelle.
- A 480 °C, le lamelle si ingrandiscono leggermente e i carburi diminuiscono, restando localizzati lungo i bordi.
- A 530 °C si osserva un maggiore ispessimento delle lamelle e distribuzione più irregolare dei carburi, segno del recupero della martensite.
- A 580 °C, il recupero è più evidente, con lamelle più larghe e carburi meno numerosi ma più uniformi.
- A 630 °C si manifesta un marcato coarsening, lamelle larghe e meno distinte e riduzione complessiva dei precipitati.

L'andamento delle **proprietà meccaniche** dell'acciaio *Cr – Ni – Mo – V* varia con la temperatura di rinvenimento



- a) Resistenza a trazione e snervamento:** entrambe diminuiscono tra 430 °C e 530 °C, con un lieve aumento a 580 °C, seguito da un calo alle temperature più elevate
- b) Durezza:** decresce progressivamente da valori elevati a 430 °C a livelli inferiori a 630 °C, con un piccolo incremento a 580 °C dovuto al rinvenimento secondario e alla precipitazione di carburi stabili
- c) Allungamento:** aumenta con la temperatura, migliorando la duttilità grazie all'ispessimento delle lamelle martensitici e alla riduzione del rapporto lunghezza/larghezza, favorendo maggiore deformabilità plastica
- d) Tenacità all'impatto:** cresce alle temperature elevate per la stabilizzazione microstrutturale e la trasformazione dei carburi, incrementando la resistenza alla frattura fragile

Il lavoro ha evidenziato come la **temperatura di rinvenimento** influenzi microstruttura e proprietà meccaniche di due acciai legati:  $65Si_2MnWE$  e  $Cr - Ni - Mo - V$ . Entrambi mostrano riduzione delle tensioni interne e della resistenza meccanica, accompagnata da incremento di allungamento e resilienza, ma presentano delle differenze.

Nel  **$65Si_2MnWE$** , acciaio meno legato, il rinvenimento provoca rapida decomposizione della martensite, forte calo di durezza e formazione precoce di sorbite. Non si osservano fenomeni di **seconda durezza** e la **fragilità da rinvenimento** è più evidente in corrispondenza delle temperature intermedie.

L'acciaio  **$Cr - Ni - Mo - V$** , più ricco in elementi di lega, presenta maggiore stabilità microstrutturale, fragilità da rinvenimento ridotta e sviluppo di durezza secondaria alle alte temperature per precipitazione di carburi complessi (V, Mo, Cr), mantenendo durezza e resistenza elevate.

In sintesi,  $65Si_2MnWE$  è indicato per applicazioni elastiche con rinvenimento moderato, mentre  $Cr - Ni - Mo - V$  è ideale per componenti soggetti a alte temperature o sollecitazioni cicliche, evidenziando l'influenza degli elementi di lega sui meccanismi di rinvenimento