



Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Tesi di Laurea in Ingegneria Chimica e dei Materiali

***Studio dell'effetto di trattamenti di Ausforming
sulla microstruttura di un acciaio ad alto silicio
con microstruttura bainitica carbide-free***

Relatore: Pezzato Luca

Correlatore: Franceschi Mattia

Laureando: *Dalla Via Matteo*
1196176

Padova, 9/03/22

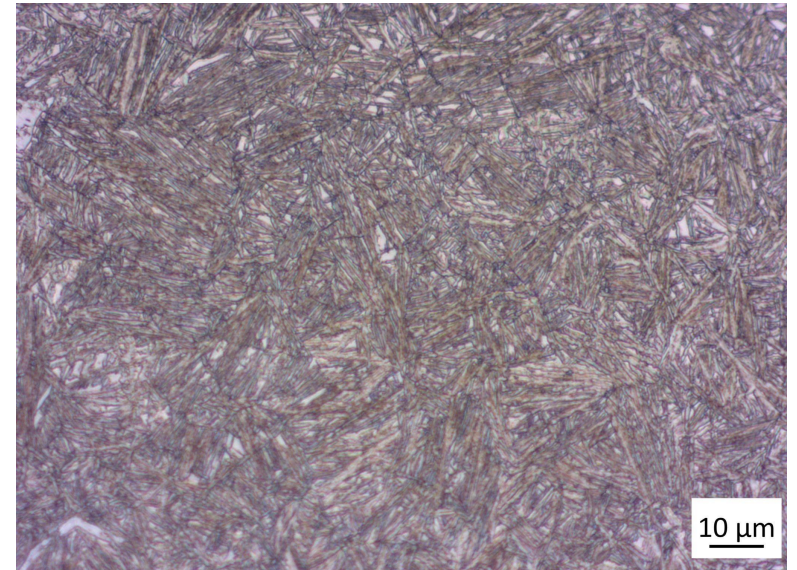
Con il termine Ausforming si intende un particolare trattamento termomeccanico utilizzato per migliorare le proprietà meccaniche degli acciai ad elevata durezza.

Il processo consiste nell'applicazione di una deformazione in contemporanea ad un trattamento termico.

L'aumento delle proprietà meccaniche è imputabile principalmente alla formazione di martensite o bainite, un fine aggregato di ferrite di morfologia aciculare e cementite.

I principali vantaggi di questo trattamento sono:

- Aumento velocità trasformazione bainitica
- Aumento proprietà meccaniche, con un giusto compromesso tra tenacità, durezza e duttilità
- Facilità di applicazione a livello industriale
- Perfezionamento della microstruttura





L'obiettivo che è stato prefissato per questa attività è quello di descrivere il legame presente tra temperatura di Ausforming (o livello di Ausforming) e microstruttura dell'acciaio.

Sono stati effettuati molteplici trattamenti termomeccanici deformando i campioni in vari range di temperature oppure variando l'entità della deformazione.

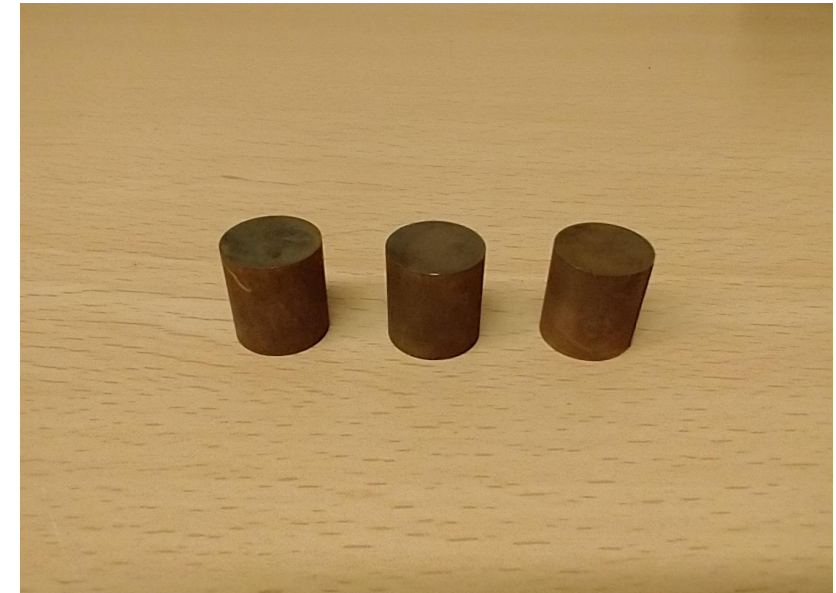
Successivamente è stata effettuata la caratterizzazione mediante misure di durezza, analisi con OM, SEM, XRD ed EBSD per poter meglio comprendere le conseguenze di questi trattamenti sulla microstruttura e sulle proprietà meccaniche del materiale.

Il materiale utilizzato è un acciaio bainitico ad elevato contenuto di silicio con la seguente composizione: Fe-0.38C-3.2Si-2.56Mn-0.1Al (wt.%).

Silicio e alluminio hanno la capacità di inibire la precipitazione di cementite permettendo di ottenere una fase bainitica costituita da ferrite ed austenite ricca in carbonio (ovvero carbide-free).

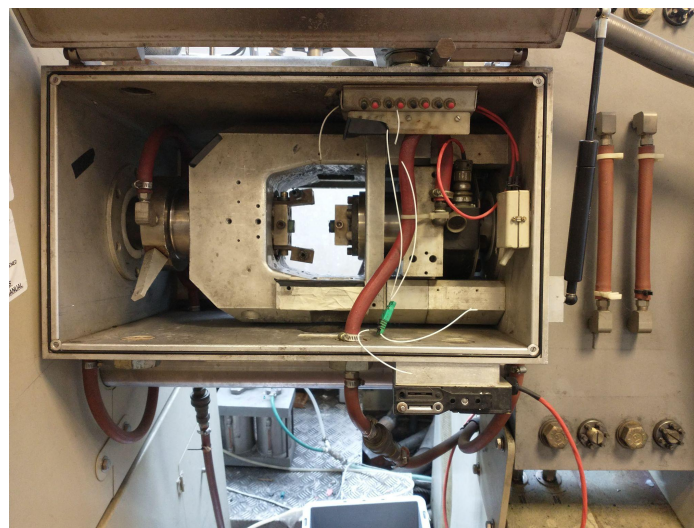
Questo tipo di lega è caratterizzata da un ottimo compromesso tra resistenza e duttilità grazie soprattutto all'effetto TRIP (Transformation Induced Plasticity), che implica una trasformazione di fase (martensitica) quando viene sottoposto ad una sollecitazione.

Le prove sono state eseguite su dei provini cilindrici $\varnothing 12 \times 14$ mm.



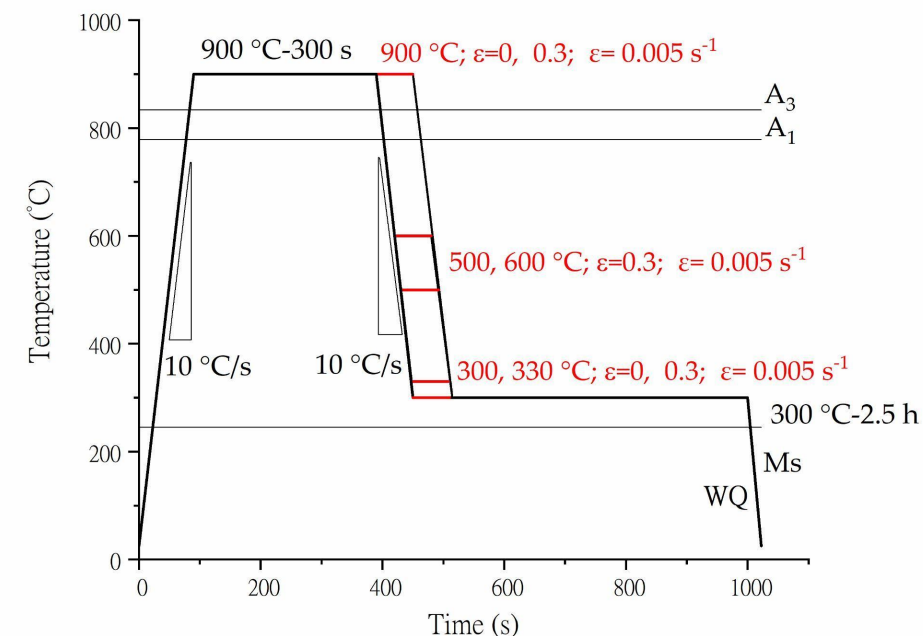
I trattamenti di Ausforming sono stati effettuati tramite un simulatore termomeccanico Gleeble 3800 che è in grado di ricreare condizioni operative di molteplici processi industriali. Nel nostro caso, le prove eseguite consistono in compressioni a varie temperature.

La deformazione viene imposta dal movimento di due punzoni mentre per il riscaldamento del provino si sfrutta l'effetto Joule.



Gli step caratterizzanti delle prove possono essere riassunti nei seguenti punti:

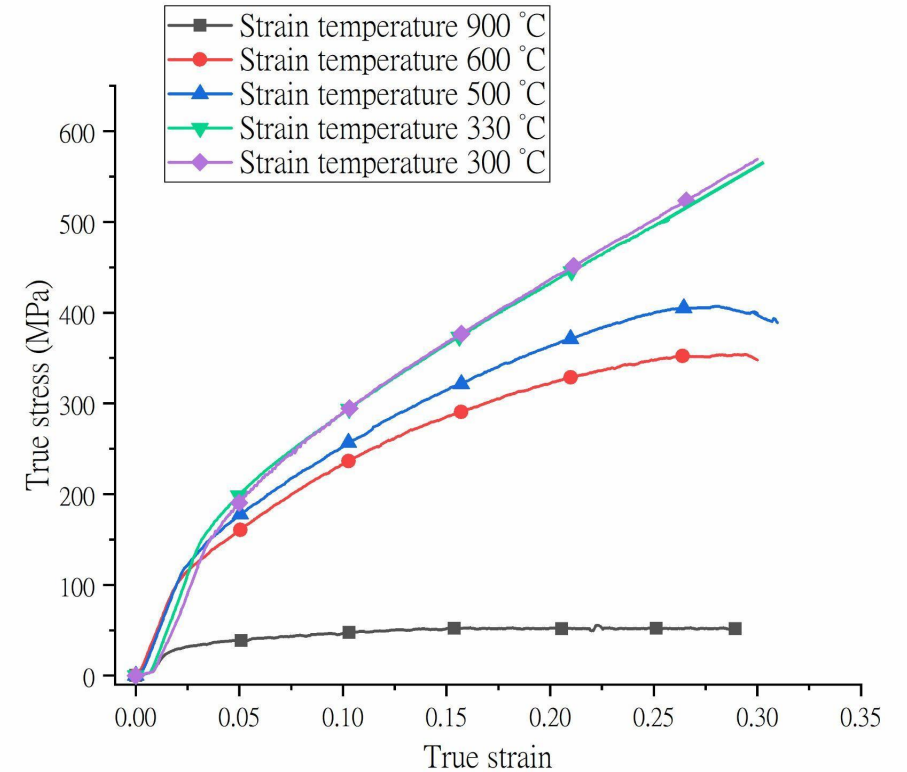
- Austenizzazione a 900°C per 5 min (Heating rate di 10°C/s)
- Raffreddamento fino alla temperatura di Ausforming (Cooling Rate di 10°C/s)
- Mantenimento per 20s (stabilizzazione)
- Deformazione
- Raffreddamento fino a 300°C
- Mantenimento in forno a 300°C per 2.5h
- Tempra



Sample ID	Austenitization condition (°C/time)	Deformation temperature (°C)	Deformation entity/ strain rate ($\dot{\epsilon}$, s ⁻¹)	Isothermal treatment (°C/time)
Pure-isothermal	900/5min	900	0	300/2.5h
Tdef900	900/5min	900	0.3/0.005	300/2.5h
Tde600	900/5min	600	0.3/0.005	300/2.5h
Tdef500	900/5min	500	0.3/0.005	300/2.5h
Tdef330	900/5min	330	0.3/0.005	300/2.5h
Tf300	900/5min	300	0.3/0.005	300/2.5h

I dati registrati dalla cella di carico, di cui è dotato il sistema Gleeble durante le prove, mostrano che:

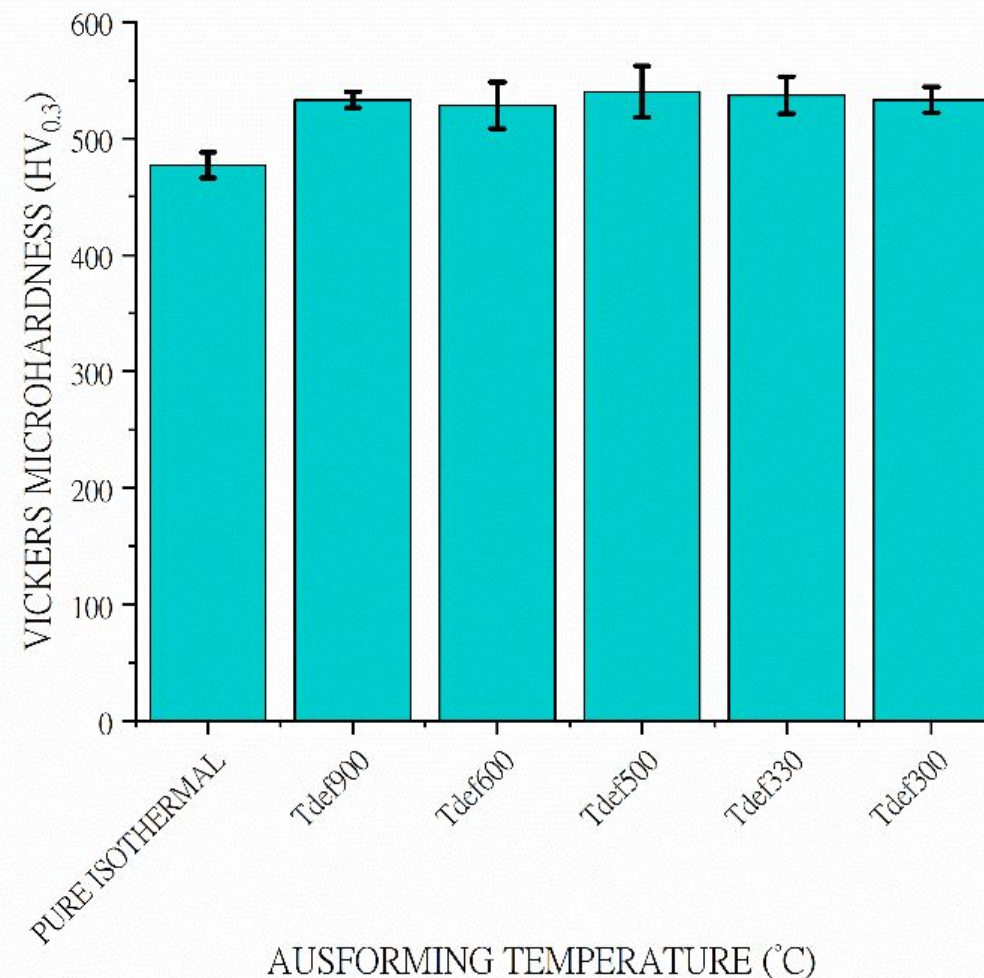
- Al diminuire della temperatura di Ausforming aumenta il carico di snervamento dell'austenite. (Tabella)
- Per deformazioni a 900 °C avvengono fenomeni di ricristallizzazione;
- Per deformazioni a 600 e 500 °C si hanno leggeri fenomeni di recupero e si osserva un aumento densità di dislocazioni.
- Per deformazioni a 330 e 300 °C non vi sono deflessioni delle curve

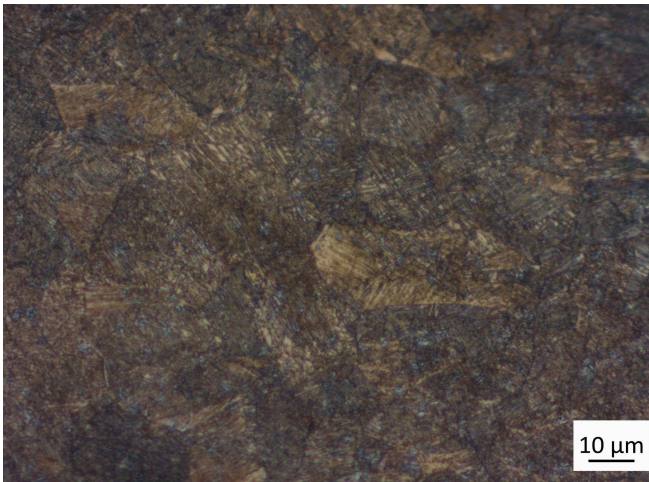
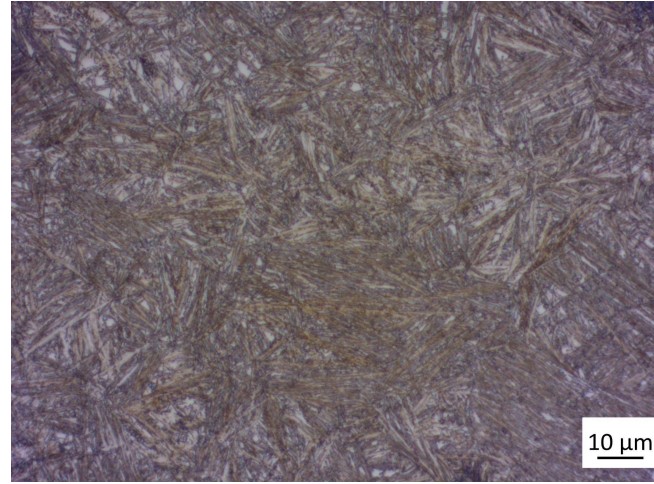
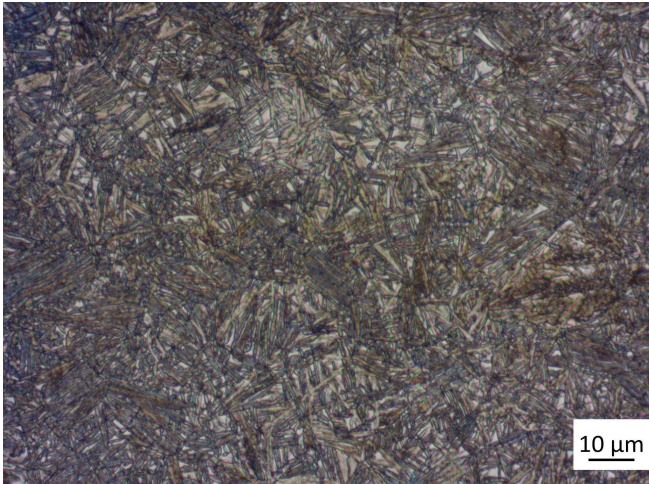


Ausforming temperature (°C)	Austenite yield strength (MPa)
900	22
600	104
500	120
330	148
300	156

Sono stati riscontrati valori di microdurezza Vickers mediamente superiori rispetto al campione trattato isotermicamente (senza deformazione). Tuttavia, non sono state rilevate marcate differenze tra i provini sottoposti ad Ausforming.

Le prove sono state eseguite sia sulla sezione trasversale sia su quella longitudinale: i valori non si discostano in modo evidente.



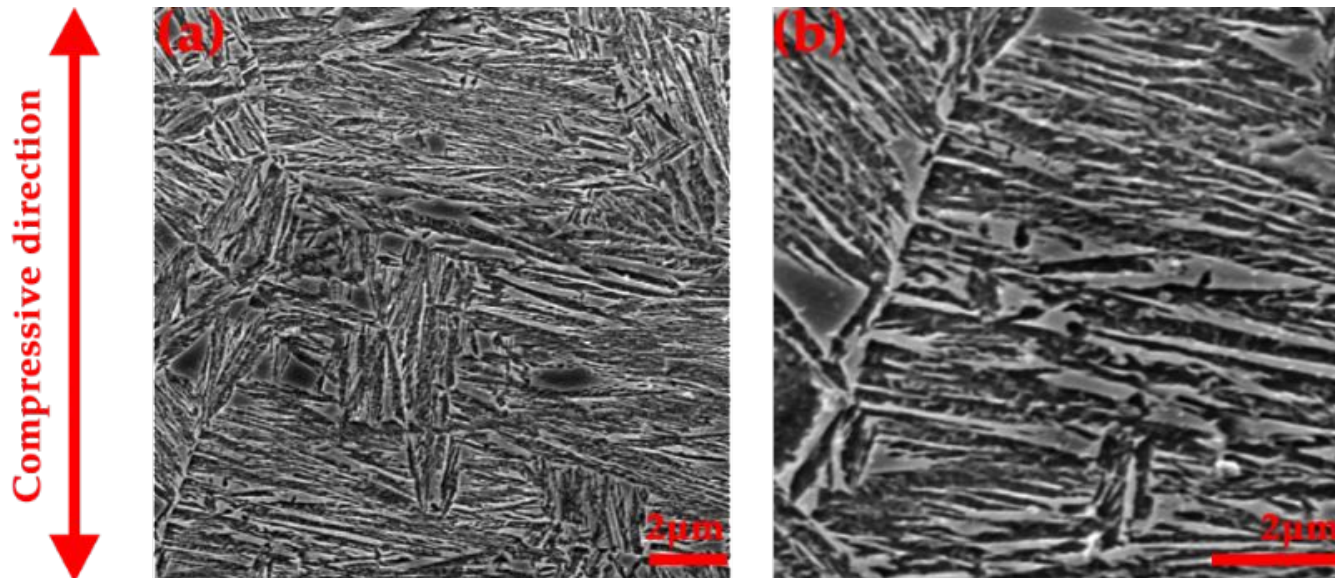


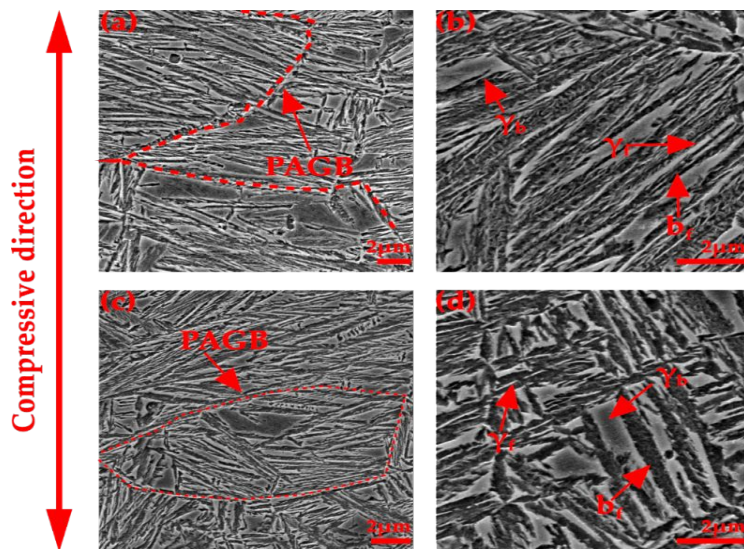
Già con l'analisi al microscopio ottico è possibile notare alcune differenze tra le microstrutture:

- Dimensione e forma dei grani
- Orientazione lamelle
- Dimensione lamelle

Le micrografie ottenute al SEM evidenziano come al variare della temperatura di Ausforming, la microstruttura tenda ad assumere una configurazione più ordinata e orientata in direzione ortogonale a quella di compressione. Nel caso Tdef900 non si notano differenze sostanziali rispetto alla prova non deformata (Pure-Isothermal) a causa dei fenomeni di ricristallizzazione.

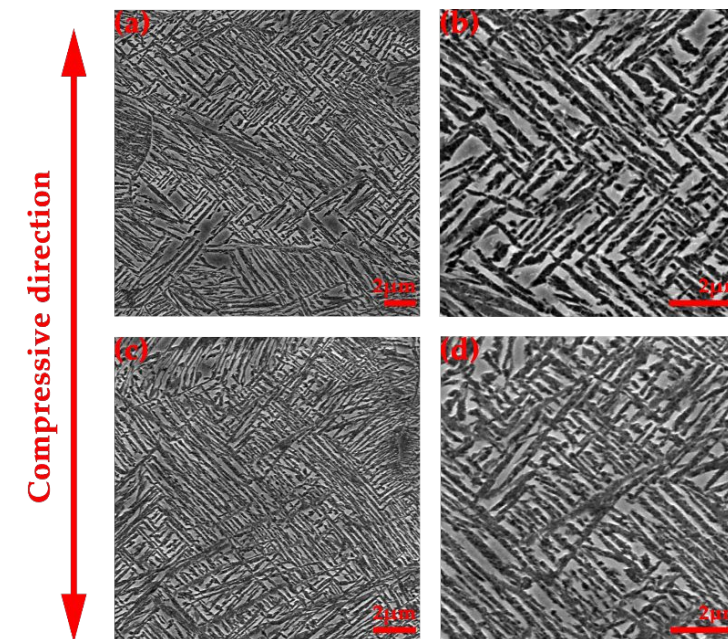
- Lamelle di ferrite allungate e orientate in direzioni casuali
- Grani di grandi dimensioni

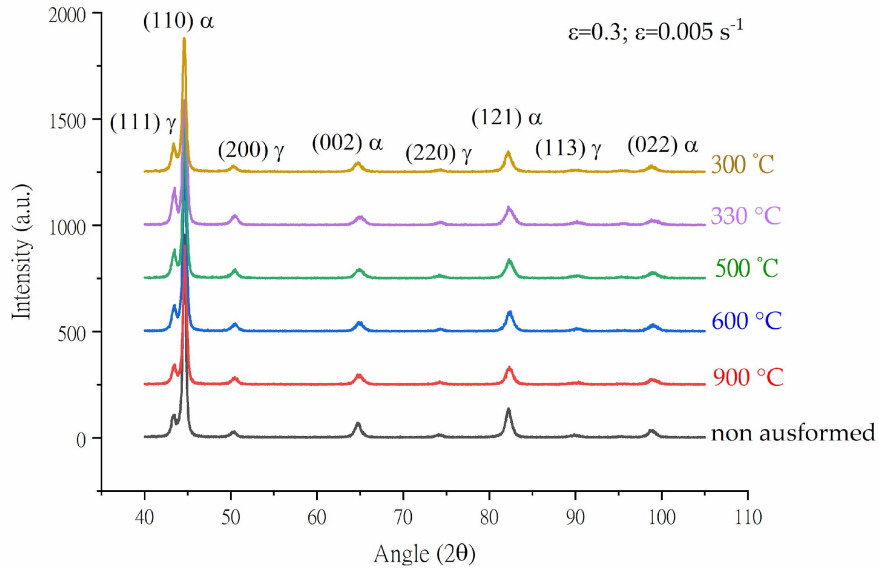




I campioni Tdef600 e Tdef500 (sinistra) presentano invece una struttura più orientata, con grani mediamente più piccoli e schiacciati e bordi grano ben visibili. Le lamelle di ferrite bainitica risultano più corte e fini, rispetto ai campioni deformati a 900 °C

Nei Tdef330 e Tdef300 (destra) la microstruttura è decisamente più ordinata e frammentata. La bainite forma un angolo di 45° rispetto la direzione di compressione (le lamelle si incrociano con un angolo di 90°).



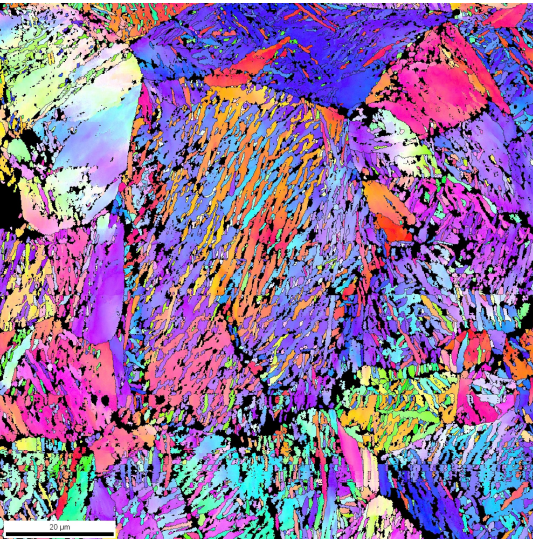
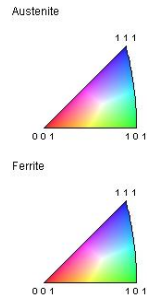
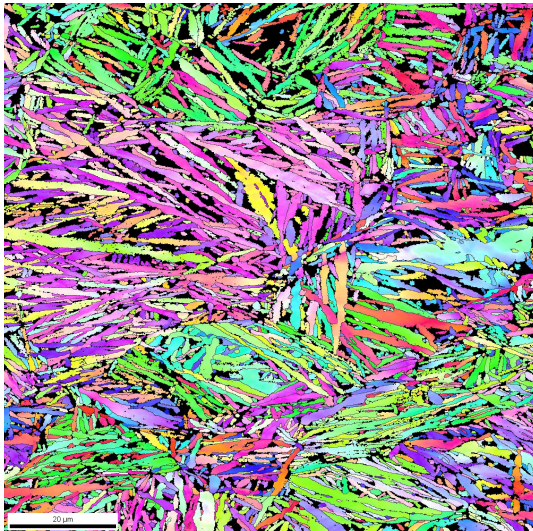


Con l'indagine XRD sono state quantificate le fasi presenti analizzando i picchi dell'austenite (FCC) e della ferrite (BCC). Le concentrazioni di austenite e bainite variano in funzione di due fenomeni antagonisti derivati dalla deformazione:

- Aumento della densità di dislocazioni → maggiori siti di nucleazione della bainite
- Incrudimento del materiale → maggiore difficoltà per l'austenite a trasformarsi in bainite

Per quanto riguarda le prove effettuate, la tendenza è quella di un aumento del quantitativo di austenite residua con il diminuire della temperatura di Ausforming a causa dei fenomeni di stabilizzazione dell'austenite.

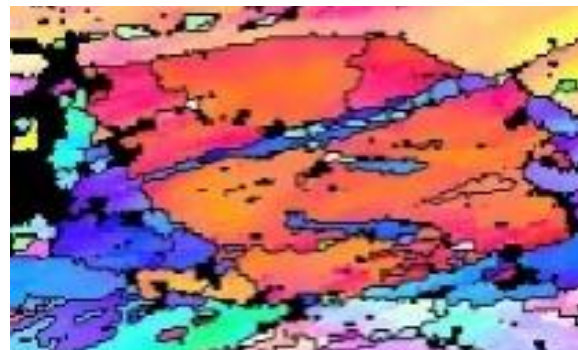
Ausforming Temperature (°C)	Austenite volume fraction (%) CD	Bainite Volume fraction (%) CD
Pure isothermal	14.9±0.4	85.1±0.1
900	17.3±0.4	82.7±0.1
600	17.6±0.4	82.4±0.1
500	19.8±0.4	80.2±0.1
330	23.1±0.4	76.9±0.1
300	17.8±0.4	82.2±0.1



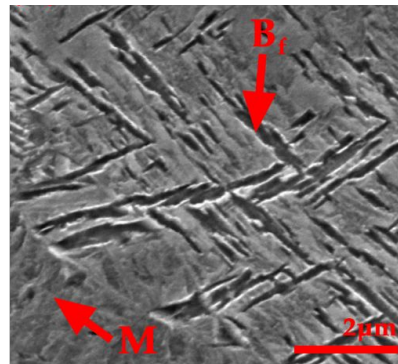
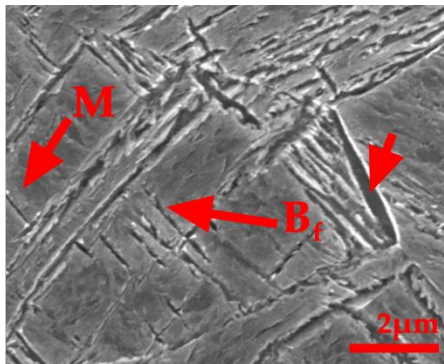
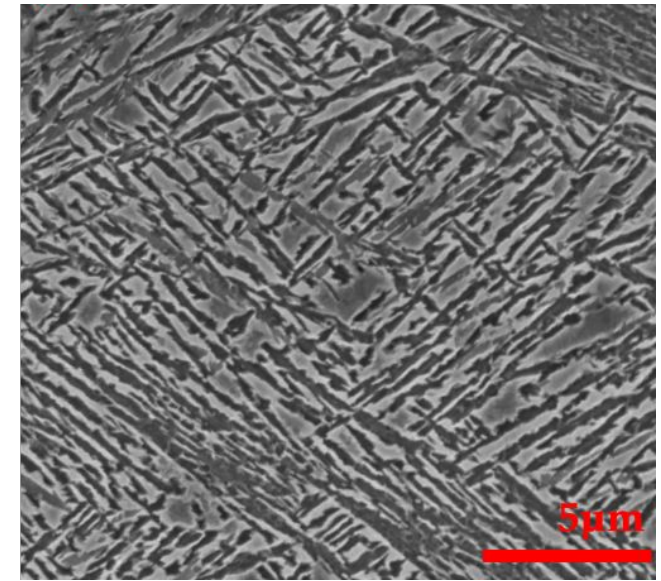
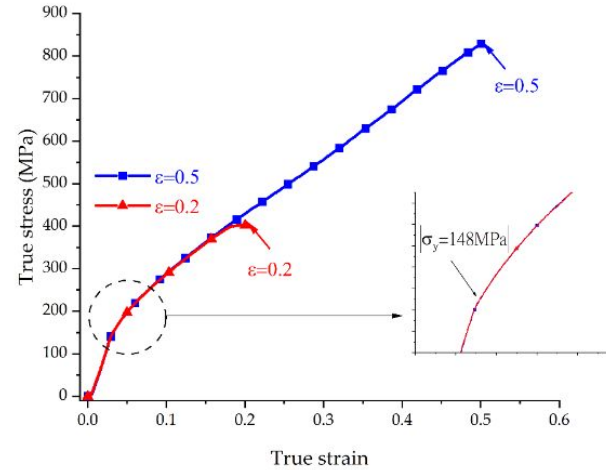
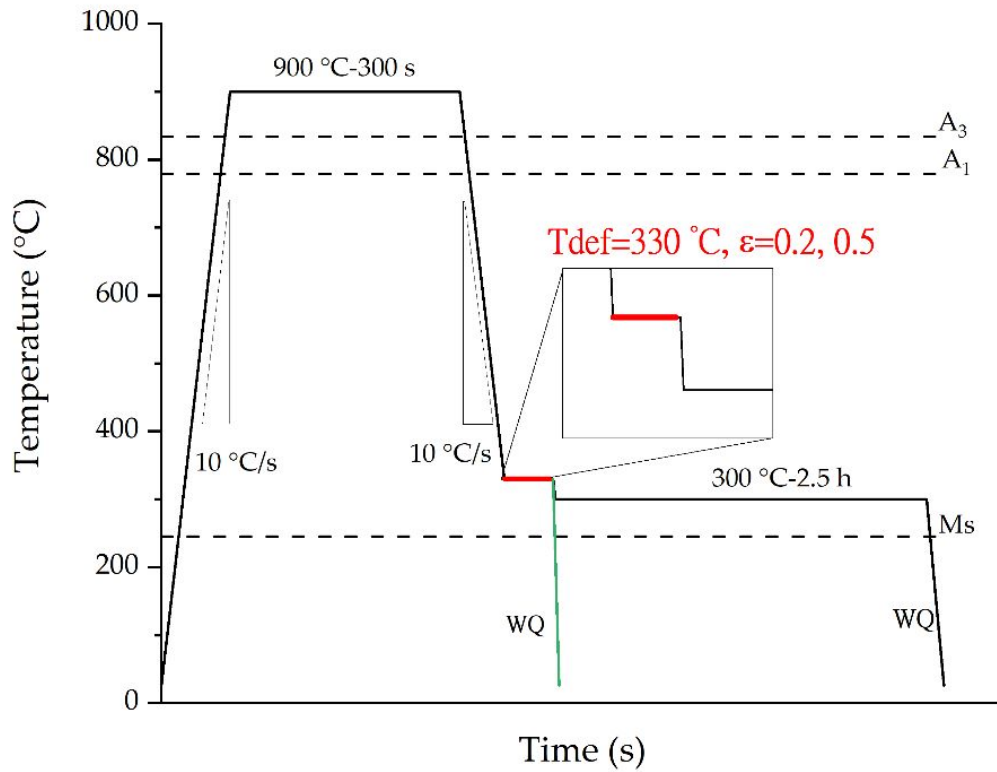
In figura sono riportate due mappe IPF ottenute tramite analisi EBSD sui campioni deformati a 500 e 300 °C rispettivamente.

Dall'osservazione delle mappe ottenute è possibile affermare che a temperature di Ausforming minori, la bainite cresce secondo specifiche orientazioni cristallografiche e non in modo completamente casuale.

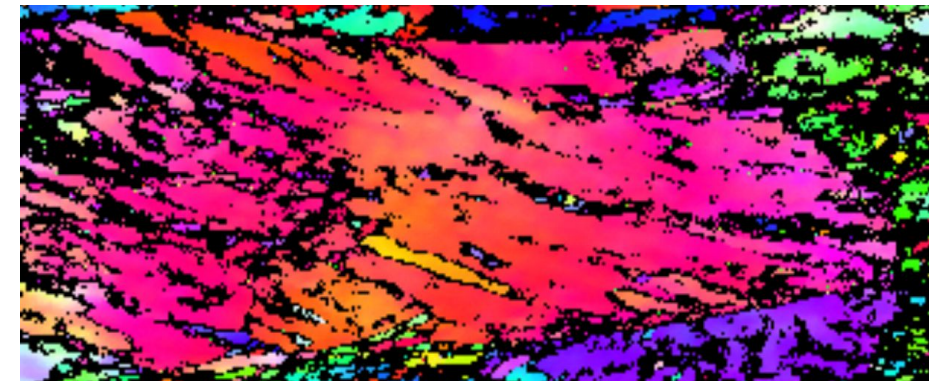
L'entità della deformazione e la direzione cristallografica dell'austenite primaria influenzano la quantità di varianti di bainite che si possono formare.



Analisi EBSD su grano contenente piano geminato con crescita della bainite con diversa orientazione cristallografica rispetto alla resto del grano,



Microstruttura dei campioni ottenuti effettuando un quenching dopo deformazione che evidenziano la presenza di bainite indotta da deformazione.



A seguito trattamenti termici di Ausforming si osserva che:

1. Al diminuire della temperatura di deformazione si ottiene una microstruttura progressivamente più orientata e frammentata
2. Al diminuire della temperatura di deformazione si ha un aumento della quantità di austenite residua a causa dei fenomeni di stabilizzazione
3. Al diminuire della temperatura di deformazione le proprietà meccaniche vengono migliorate grazie al rafforzamento dell'austenite
4. All'aumentare del valore della deformazione a parità di temperatura, si ottengono maggiori quantitativi di bainite indotta da deformazione



1222-2022
800
ANNI



www.dii.unipd.it

GRAZIE PER L'ATTENZIONE