

# Influenza dell'invecchiamento sulla deformabilità di vergella laminata a caldo

B. Rivolta, R. Gerosa, D. Panzeri, L. Piazza, L. Angelini, M. Bersani, N. Bolognani, A. Panzeri, A. Parimbelli, C. Sala

Nella pratica industriale è noto che la deformabilità a freddo di alcuni acciai laminati a caldo in forma di vergella mostra valori crescenti se lavorati alcuni giorni dopo la laminazione. Si è inoltre osservato che questa variazione dipende dalla composizione chimica e dal diametro della vergella. A temperatura ambiente, i diametri maggiori possono richiedere anche tempi considerevoli (10-15 giorni) per raggiungere una condizione stabile, mentre il tempo si accorcia notevolmente se i campioni vengono mantenuti a temperature tra 100°C e 250°C. La conoscenza della velocità e dell'entità del recupero assume quindi un ruolo importante non solo dal punto di vista della qualità del prodotto, ma anche da quello del rapporto col cliente finale a cui è possibile fornire indicazioni personalizzate per sfruttare il campo di massima deformabilità del materiale. Nella letteratura scientifica, questo fenomeno è associato alla diffusione di idrogeno dalla vergella verso l'ambiente, giustificando gli elevati tempi di regime a temperatura ambiente e l'accelerazione osservata a temperature superiori. Nel presente lavoro sperimentale, l'influenza del trattamento di invecchiamento al variare del tempo è stata investigata su vergella laminata a caldo con diverse composizioni chimiche, mediante prove di trazione a temperatura ambiente. Oltre alle caratteristiche tensili, è stata monitorata la deformabilità, ed in particolare la strizione percentuale, al variare del tempo trascorso dal termine della laminazione. I risultati mostrano una chiara risalita della deformabilità nel tempo, mantenendo però inalterata la resistenza meccanica. Analisi microstrutturali e osservazioni delle superfici di frattura sono infine state effettuate a completamento della campagna sperimentale.

**PAROLE CHIAVE:** IDROGENO, DEFORMABILITÀ, INVECCHIAMENTO

## INTRODUZIONE

La deformabilità a freddo è un parametro di grande importanza specialmente per prodotti ed acciai che non possono essere impiegati dopo la sola deformazione plastica a caldo. Nella pratica industriale è noto che alcuni acciai devono essere sottoposti a deformazione a freddo solo alcuni giorni dopo la lavorazione a caldo, poiché la loro deformabilità subisce un aumento significativo che facilita le operazioni di formatura a freddo.

La letteratura tecnica [1, 2, 3] associa tale incremento della deformabilità alla diffusione dell'idrogeno presente nel materiale che nel tempo lascia la matrice metallica grazie all'elevato coefficiente di diffusione ed alla limitata solubilità specialmente nella fase  $\alpha$ . La mobilità dell'idrogeno, tuttavia, è fortemente influenzata dal numero di trappole presenti, come ad esempio i bordi

**B. Rivolta, R. Gerosa,  
D. Panzeri, L. Piazza**

Politecnico di Milano, Dipartimento di meccanica

**L. Angelini, M. Bersani, N. Bolognani,  
A. Panzeri, A. Parimbelli, C. Sala**

Caleotto S.p.A.

di grano, seconde fasi, inclusioni non metalliche, difetti reticolari e le interfacce tra carburi e matrice o tra le lamelle in strutture perlitiche [4, 5]. Questo fenomeno è chiamato "reverse aging" ed è classificato come danno da idrogeno reversibile [6]. Tale danneggiamento è considerato tale se non si ha formazione di micro cricche prima che una sufficiente quantità di idrogeno abbia lasciato il materiale. La necessità di lasciare il materiale in magazzino per un certo tempo prima di poter essere lavorato, riduce di conseguenza la produttività. È quindi importante studiare con attenzione il recupero della deformabilità nel tempo al fine di minimizzare gli effetti negativi sul ciclo produttivo. Nel presente lavoro sperimentale sono stati considerati

tre materiali in forma di vergella laminata a caldo, due acciai da bulloneria C-Mn-B ed un acciaio ad alto carbonio, ed è stata studiata l'evoluzione della deformabilità monitorando il coefficiente di strizione al variare del tempo intercorso tra la laminazione e l'esecuzione delle prove di trazione fino ad un massimo di 21 giorni.

## MATERIALI E METODI

I materiali studiati in questa attività sperimentale sono due acciai da bulloneria C-Mn-B ed uno ad alto carbonio. I diametri delle vergelle e le composizioni chimiche nominali sono riportati in Tabella 1.

**Tab.1** - Composizione chimica degli acciai analizzati / Chemical composition of the studied steels.

Acciaio	Diametro della vergella (mm)	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%V	%B
23MnB4	12.5	0.20 0.25	0.9 1.2	≤0.3	≤0.025	≤0.025	≤0.3	/	0.0008 0.005
30MnB4	15	0.27 0.32	0.8 1.1	≤0.3	≤0.025	≤0.025	≤0.3	/	0.0008 0.005
C82D2*	15	0.80 0.84	0.60 0.75	0.1 0.3	≤0.020	≤0.020	0.15 0.20	0.05 0.07	/

\*Rispetto alla composizione riportata nella EN 16120-4 c'è l'aggiunta di V e una quantità leggermente superiore di Cr.

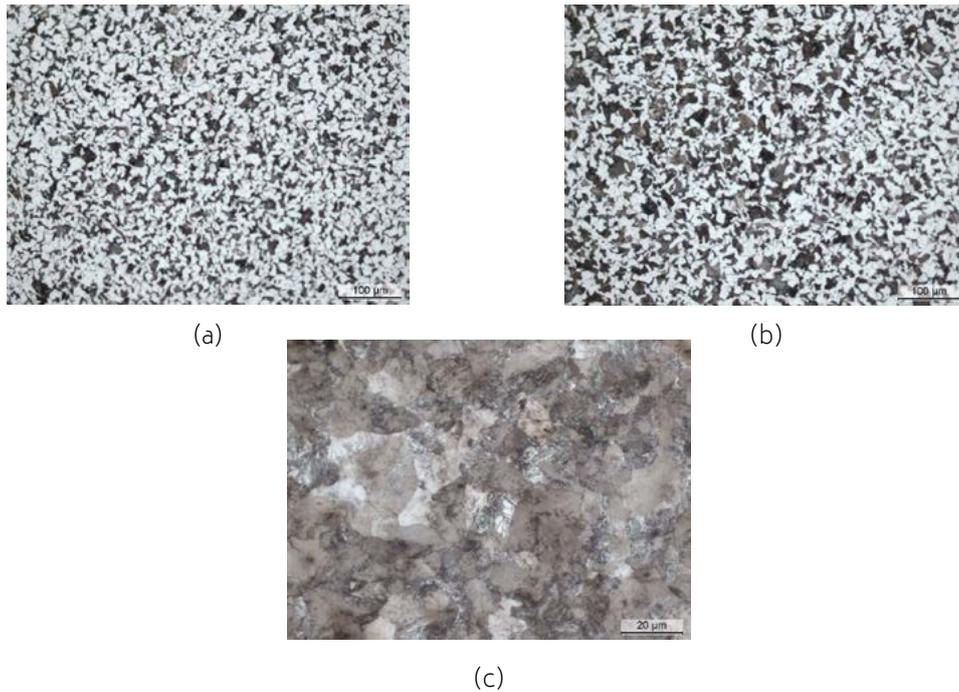
Gli acciai sono stati laminati a caldo e quindi raffreddati su tappeto Stelmor secondo due modalità: coibentata per gli acciai da bulloneria e mediante aria forzata per quanto riguarda il materiale ad alto carbonio. Quest'ultimo tipo di raffreddamento avviene mediante ventilatori posti al di sotto del tappeto Stelmor dove si trovano anche speciali deviatori che permettono di differenziare il flusso d'aria che giunge nella parte centrale e in quella laterale del tappeto. È infatti noto che la deposizione delle spire al termine della laminazione a caldo implica una diversa distribuzione di massa trasversalmente al tappeto di raffreddamento, con una maggiore densità di materiale ai lati e inferiore al centro. Per ottenere caratteristiche meccaniche omogenee sull'intera spira, è quindi necessario convogliare una diversa quantità di aria ai lati rispetto a quella che giunge nella zona centrale.

Le prove di trazione (in accordo alla normativa ISO 6892-1:2019) sono state effettuate su spezzoni di vergella di lun-

ghezza pari a 300mm dopo circa 60 minuti dalla laminazione a caldo (il tempo necessario per la movimentazione del coil ed il raffreddamento degli spezzoni prelevati per i test meccanici) e dopo un invecchiamento naturale con durate differenti fino ad un massimo di 21 giorni. L'aumento della deformabilità del materiale è stato monitorato mediante la misura della strizione percentuale, parametro considerato più rappresentativo del comportamento del materiale durante la formatura a freddo. Le superfici di frattura dei campioni di trazione sono state infine osservate mediante microscopia elettronica, cercando di associare le caratteristiche microscopiche al recupero di deformabilità.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

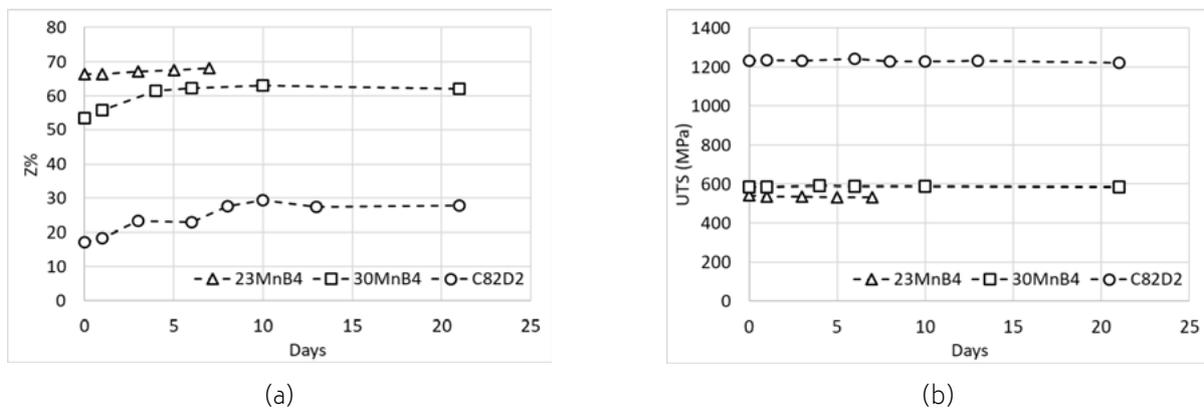
Mediante la consueta tecnica metallografica sono state osservate le microstrutture dei materiali in esame, come visibile in Figura 1.



**Fig.1** - Struttura ferritico-perlitica nei materiali 23MnB4 (a) e 30MnB4 (b) e completamente perlitica nell'acciaio C82D2 (c). / Ferrite and pearlite microstructure in 23MnB4 (a) and 30MnB4 (b) and pearlite in steel C82D2 (c).

La percentuale di ferrite e di perlite negli acciai da bulloneria è stata valutata mediante analisi dell'immagine e sono rispettivamente pari a 59% e 41% per il 23MnB4, 48% e 52% per il 30MnB4. L'acciaio ad alto carbonio è invece caratte-

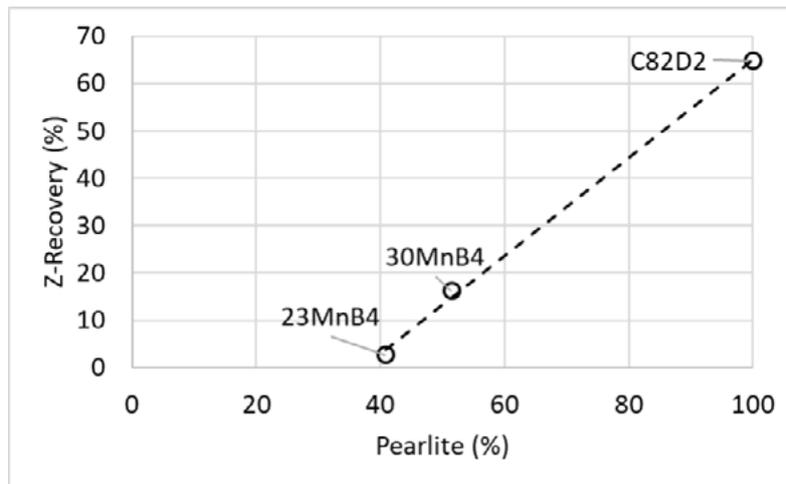
rizzato da una struttura completamente perlitica. L'evoluzione del coefficiente di strizione e del carico di rottura al variare del tempo di invecchiamento naturale sono riportati in Figura 2.



**Fig. 2** - Coefficiente di strizione percentuale (a) e carico di rottura (b) al variare del tempo di invecchiamento. / Percentage necking coefficient (a) and UTS (b) varying the aging time.

La deformabilità degli acciai 30MnB4 e C82D2 mostra un aumento significativo, mentre per il 23MnB4 la variazione è molto limitata. Dopo circa 5 giorni il 30MnB4 ha mostrato un recupero di 8.7% pari a circa il 16% del valore iniziale della strizione, mentre il C82D2 ha mostrato un incremento di strizione di 11.2% dopo 10 giorni, pari a circa il 65% del valore iniziale. Per tutti i materiali, il carico di rottura non ha invece mostrato variazioni apprezzabili. Come descritto nella letteratura, il recupero della defor-

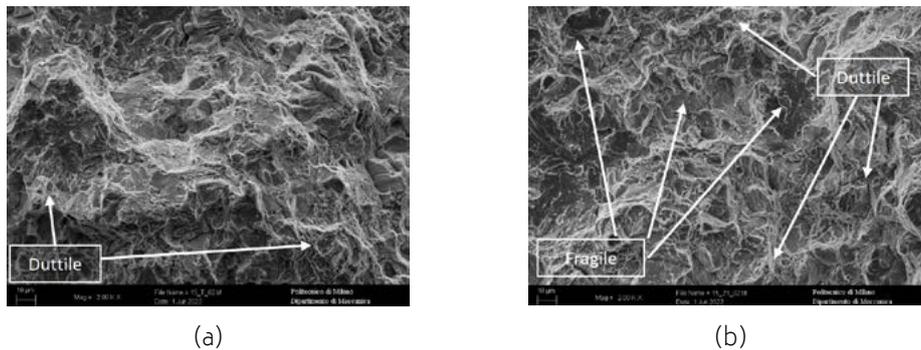
mabilità è legato al rilascio di idrogeno grazie al fenomeno della diffusione. La mobilità di questo elemento è tuttavia limitata dalla presenza di trappole che possono trattenerlo più facilmente all'interno della matrice. Gli spazi tra le lamelle di perlite possono fungere da trappole e per questo il recupero della deformabilità è stato confrontato con la quantità di perlite presente nella microstruttura come visibile in Figura 3.



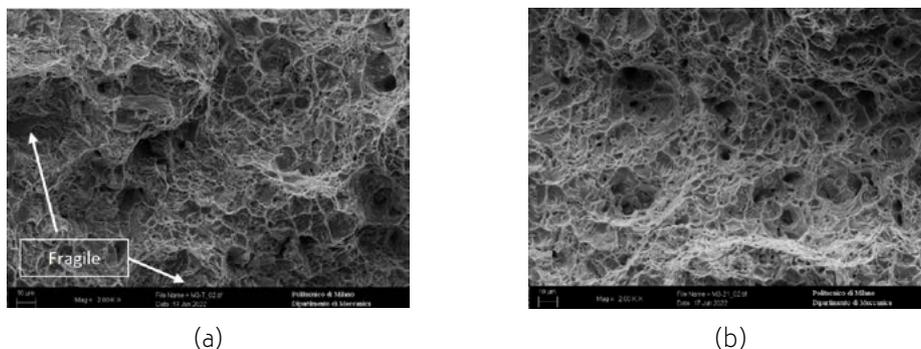
**Fig.3** - Confronto tra la quantità di perlite presente nella microstruttura e il recupero di deformabilità. / Comparison among the pearlite amount and the deformability recovery.

Per comprendere più approfonditamente i meccanismi legati al recupero della deformabilità nel tempo, sono state osservate alcune delle superfici di frattura dei campioni di trazione mediante microscopia elettronica.

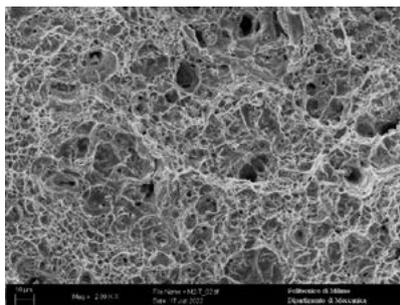
Nelle figure 4, 5 e 6, sono confrontate le superfici di frattura per diversi tempi di invecchiamento. Tutte le immagini sono riferite a zone centrali delle superfici.



**Fig.4** - Superfici di frattura del materiale C82D2. Laminato – Rottura prevalentemente fragile con piccole zone duttili (a); invecchiamento 21 giorni – Rottura con caratteristiche fragili, ma con zone duttili più ampie (b) / Fracture surfaces of C82D2. As-rolled – Prevalently brittle fracture, with small ductile regions (a); 21 days aged – Fracture with brittle features, but with wider ductile zones (b)



**Fig.5** - Superfici di frattura del materiale 30MnB4. Laminato – Rottura prevalentemente Duttile con piccole zone fragili (a); invecchiamento 21 giorni – Rottura con caratteristiche completamente duttili (b) / Fracture surfaces of 30MnB4. As-rolled – Prevalently ductile fracture, with small brittle regions (a); 21 days aged – Completely ductile fracture (b).



**Fig.6** - Superficie di frattura del materiale 23MnB4. Laminato – Rottura completamente duttile /  
Fracture surface of 23MnB4. As-rolled – Completely ductile fracture.

## CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sperimentale viene investigata la deformabilità di tre acciai al variare del tempo di mantenimento a temperatura ambiente. L'acciaio ad alto carbonio ha mostrato un forte recupero del valore di strizione, ottenendo un incremento di circa il 65% rispetto al valore iniziale. Anche la deformabilità dell'acciaio 30MnB4 ha subito un aumento apprezzabile, valutato intorno al 16%. Poco significativa, invece, è stata la variazione di deformabilità del 23MnB4. Poiché la formatura a freddo della vergella deve essere effettuata dopo il recupero della deformabilità, è importante determinare il tempo di immagazzinamento minimo affinché tale modifica sia arrivata a regime. Per il C82D2 sono stati necessari 10 giorni, mentre per il 30MnB4 il tempo limite è risultato pari a 5 giorni. La resistenza meccanica non ha invece subito variazioni di rilievo. È stata osservata una dipendenza tra la quantità di perlite presente ed il recupero di strizione mostrato dal materiale. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che gli spazi inter-lamellari possono fungere da

trappole e quindi rallentare la diffusione dell'idrogeno. Anche il tempo necessario per raggiungere il massimo della deformabilità è infatti superiore nel materiale ad alto carbonio. La relazione tra perlite, incremento della strizione percentuale e la variazione del tempo minimo di recupero verranno ulteriormente indagate su materiali diversi aventi condizioni microstrutturali intermedie rispetto a quelle studiate finora.

L'osservazione delle superfici di frattura ha mostrato un cambiamento dei meccanismi microscopici associato alla variazione di deformabilità: all'aumentare del valore della strizione, la frazione di area caratterizzata da rottura duttile aumenta. Questo è particolarmente evidente sull'acciaio ad alto carbonio.

Sono infine previste ulteriori prove per indagare il fenomeno del "reverse aging" su acciai diversi da quelli presentati in questo lavoro e per valutare l'influenza del diametro sul recupero della deformabilità e sul tempo limite affinché questo avvenga in maniera completa.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] C.J. Carneiro Filho, M.B. Mansur, P.J. Modenesi, B.M. Gonzalez, The effect of hydrogen release at room temperature on the ductility of steel wire rods for pre-stressed concrete, *Materials Science and Engineering A* 527 (2010) 4947–4952.
- [2] T. Chanda, Reverse ageing in hot-rolled high-carbon steel wire rod, *J Mater Sci* (2010) 45:6068–6074, DOI 10.1007/s10853-010-4692-0.
- [3] Qian Liu, Andrej Atrens, A critical review of the influence of hydrogen on the mechanical properties of medium-strength steels, *Corros Rev* 2013; 31(3-6): 85–103, DOI 10.1515/correv-2013-0023.
- [4] W.Y. CHOO and JAI YOUNG LEE, Thermal Analysis of Trapped Hydrogen in Pure Iron, *METALLURGICAL TRANSACTIONS A*, VOLUME 13A, JANUARY 1982—135.
- [5] Hideki Hagi, Effect of Interface between Cementite and Ferrite on Diffusion of Hydrogen in Carbon Steels, *Materials Transactions, JIM*, vol. 35, No. 3 (1994), pp 168-173, <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.35.168>.
- [6] VV.AA., *ASM Handbook, Volume 11, Failure Analysis and Prevention, Hydrogen Damage and Embrittlement*, DOI 10.31399/asm.hb.v11.a0006784.

# Effect of aging on the deformability of hot rolled wire rod

In the industrial practice, it is known that the cold deformability of hot rolled wire rod increases after a storage of some days. Such modification depends on the steel grade and on the wire rod diameter. At room temperature, the regime condition requires long time, whereas at temperature included among 100°C and 250°C it reduces to few hours. The knowledge of the deformation recovery rate and the amount of such improvement is basic for the product quality and for the final customer, who it's possible to give information about the optimal deformability. In the technical literature, such phenomenon is addressed to the presence of hydrogen that limits the as-rolled deformability. Because of the low solubility at room temperature and because of its fast kinetics, hydrogen leaves the wire rod quite easily and the deformability increases correspondingly. Both the deformability, represented by the necking coefficient, both the mechanical properties were determined by tensile tests on 300mm long wire rod specimens. The fracture surfaces were studied by SEM and finally the microstructural features were studied to complete the materials characterization.

**KEYWORDS:** HYDROGEN, DEFORMABILITY, AGING

[TORNA ALL'INDICE >](#)