

Caratterizzazione della resistenza al rinvenimento di un acciaio per lavorazioni a caldo AISI H13 modificato

F. S. Gobber, D. Ugues, P. Martelli, M. Rosso

Gli acciai per stampi per lavorazioni a caldo sono spesso soggetti a temperature di servizio che possono superare i 500°C. I processi di formatura quali la pressocolata delle leghe di alluminio, la forgiatura e l'estrusione comportano l'impiego di condizioni di utilizzo critiche per la vita degli stampi in acciaio. Temperature di servizio troppo elevate portano al decadimento delle proprietà meccaniche di resistenza a caldo, mentre il ciclaggio periodico genera effetti di fatica termica. In questo studio sono stati indagati gli effetti dell'esposizione a temperature superiori ai 500°C sulla resistenza al rinvenimento di un acciaio per lavorazioni a caldo AISI H13 modificato. Nella prima parte dello studio è stata caratterizzata la resistenza al rinvenimento dell'acciaio dopo trattamento termico, con mantenimenti in forno a temperature comprese tra 500 e 650°C per tempi crescenti fino a 150 ore. Nella seconda fase dello studio è stato impiegato un banco di prova sperimentale in grado di simulare i fenomeni di fatica termica su campioni in acciaio, per caratterizzarne la resistenza al rinvenimento in condizioni di riscaldamento ciclico, più vicine a quelle di utilizzo degli utensili per lavorazioni a caldo. Le analisi effettuate al termine di 3.000 cicli di prova hanno evidenziato come la temperatura massima di 560 – 580°C, seppur raggiunta per pochi secondi durante ogni ciclo di prova, comporti un'alterazione della durezza confrontabile con un mantenimento statico in forno alla stessa temperatura.

KEYWORDS: ACCIAIO PER STAMPI – AISI H13 – ADDOLCIMENTO – CICLAGGIO TERMICO – MICROSTRUTTURA

INTRODUZIONE

I processi di formatura a caldo, ampiamente diffusi nella formatura delle leghe metalliche, comportano condizioni di esercizio piuttosto gravose per gli stampi che lavorano a contatto con il pezzo. Le temperature a cui lo stampo lavora dipendono dal processo e dalle caratteristiche del materiale da formare e variano a seconda che questo sia una lega leggera, caratterizzata da temperature di formatura relativamente basse come ad esempio l'alluminio, oppure una lega altofondente caratterizzata da temperature di formatura più elevate come ad esempio acciai o superleghe [1 – 3]. L'addolcimento (thermal softening) può essere considerato un meccanismo indiretto di danneggiamento degli acciai per stampi, poichè se la durezza superficiale di uno stampo per pressocolata diminuisce, questo sarà maggiormente suscettibile a danneggiamenti superficiali, che ne possono ridurre la vita e costringere ad interventi onerosi. Il lavoro presentato all'interno di questa memoria riguarda la caratterizzazione della resistenza all'addolcimento di un acciaio per utensili per lavorazioni a caldo AISI H13 modificato (Uddeholm Dievar) la cui composizione è riportata in Tab. 1. Mediante prove di invecchiamento in forno o di ciclaggio termico alternando riscaldamento e raffreddamento, a temperature

confrontabili con quelle caratteristiche dei processi di formatura a caldo (laminazione, forgiatura, estrusione), è stata caratterizzata l'influenza della temperatura sulla durezza e sulla microstruttura dell'acciaio bonificato.

**Federico Simone Gobber, Daniele Ugues,
Pietro Martelli, Mario Rosso**

Politecnico di Torino, Dipartimento di
Scienza Applicata e Tecnologia (DISAT) -
Viale T. Michel 5, 15121 Alessandria, Italia

Tab. 1 – Composizione chimica dell'acciaio AISI H13 caratterizzato in questo studio / Chemical composition of the AISI H13 steel characterized in this study.

COMPOSIZIONE CHIMICA [% peso]						
%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%V	%Fe
0.35	0.2	0.5	5.0	2.3	0.6	Balance

Materiali e metodi

L'acciaio per utensili a caldo oggetto di questo studio è stato ricevuto nello stato ricotto (180 HB) e sottoposto a trattamento termico (Fig. 1) ottenendo una durezza di circa 49 ± 1 HRC. Il trattamento termico è stato eseguito in un forno in vuoto alla

pressione di 10-2 mbar, temprando l'acciaio con azoto a 5 bar dopo austenitizzazione di 30 min a 1020°C e raffreddandolo con azoto a 3 bar per i rinvenimenti effettuati rispettivamente a 515 e 615°C dopo 2 h di mantenimento per ciascun rinvenimento.

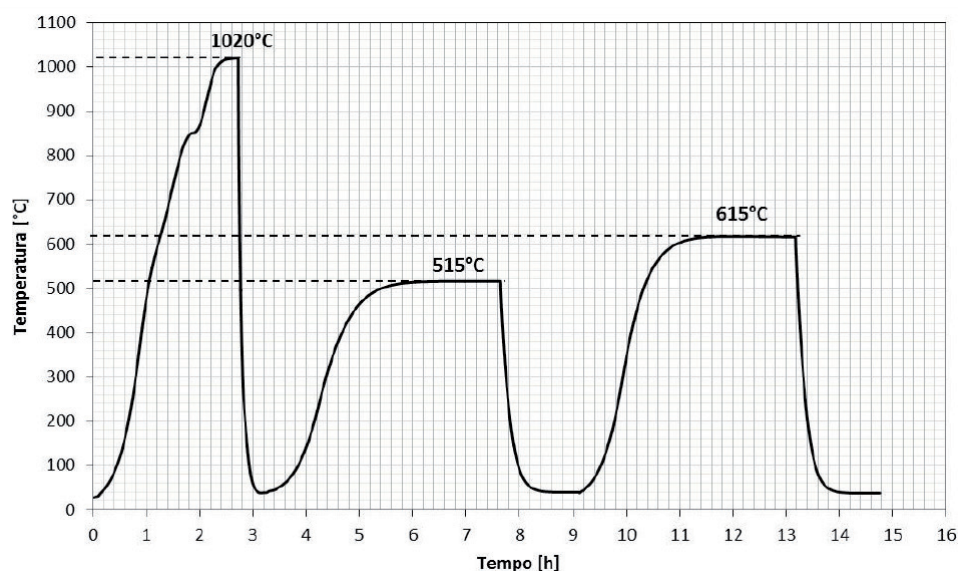


Fig. 1 – Trattamento termico per i campioni in AISI H13 modificato / heat treatment for the samples made of modified AISI H13 steel

Due tipi di test sono stati impostati per caratterizzare la resistenza al rinvenimento dei campioni in acciaio:

. prove di invecchiamento in forno per correlare l'addolcimento al tempo e alla temperatura di trattamento mediante il para-

[1]

$$TP = T * (C + \log t)$$

dove TP è il cosiddetto Tempering Parameter (cioè il parametro di Hollomon – Jaffe), T la temperatura assoluta, t il tempo di esposizione in ore e C una costante funzione del materiale (che per gli acciai da utensile ≈ 20)

. prove di ciclaggio termico con un banco prove sperimentale per osservare l'influenza dei cicli termici sulla resistenza al rinvenimento dell'acciaio.

Prove di invecchiamento in forno

Per queste prove è stato impiegato un forno a muffola, i campioni sono stati inseriti nel forno ed estratti a tempi via via crescenti secondo il piano di prove riportato in Tab. 2. Per ogni campione è stata misurata la durezza Vickers (HV 30) con duro-

metro di Hollomon – Jaffe (tempering parameter –TP, calcolato secondo l'equazione [1]) e definire così una curva di addolcimento del materiale

metro EMCO – Tester e convertita nel valore HRC equivalente. L'evoluzione della microstruttura è stata valutata, dopo 50 ore di mantenimento in forno per i tempi di 500, 550, 650°C e confrontata con lo stato di fornitura (ricotto) e dopo trattamento termico (bonificato). I campioni sono inglobati a caldo con resina fenolica e sottoposti a preparazione metallografica con carte abrasive e successivamente lucidati con panni e sospensioni diamantate da 3 e 1 μm , attaccati con Nital 2 per un tempo variabile a seconda del campione tra 2 e 10 secondi per evidenziare la microstruttura. L'osservazione microstrutturale è stata svolta con un microscopio metallografico Leica MEF 4.

Tab. 2 – Temperature e tempi adottati per le prove di resistenza al rinvenimento / Experimental temperatures and holding times for softening resistance tests.

PIANO DI PROVE	
Temperatura [°C]	Tempo [h]
350, 400, 500, 530, 550, 570	1, 18, 50, 100, 150
650	1, 5, 7, 18, 150

Prove di ciclaggio termico

L'obiettivo delle prove di ciclaggio termico è quello di osservare l'influenza di un riscaldamento discontinuo sulla resistenza al rinvenimento dell'acciaio studiato; tali condizioni infatti sono più vicine a quelle di impiego del materiale. In applicazioni come la pressocolata, la forgiatura o l'estrusione il materiale è soggetto a periodici cicli di riscaldamento (coincidente con la fase di formatura/deformazione) e raffreddamento (coincidente con la fase di applicazione di lubrodistaccanti, o di semplice raffreddamento tra un ciclo e il successivo). Sono stati impiegati dei campioni di forma cilindrica cava, lunghi 60 mm, diametro 33 mm e spessore di parete 13 mm. Due diverse condizioni sono state adottate per lo svolgimento di queste prove sulla base dei risultati delle prove di resistenza al rinvenimento: la temperatura più alta per cui l'acciaio non abbia manifestato addolcimento dopo 50 ore (500°C) e la temperatura più bassa per cui questo si sia verificato a parità di tempo (570°C). Il ciclo è stato quindi tarato con un campione strumentato con termo-

coppia tipo – K fissando la temperatura del forno a 950°C e variando il tempo di mantenimento del campione in forno per raggiungere la temperatura obiettivo di 500 o 570°C. Alla fase di riscaldamento segue il raffreddamento del campione mediante 4 ugelli disposti solidalmente a 90° lungo una circonferenza di raggio 140 mm (denominata testa di spruzzatura) che spruzzano acqua ad una pressione di 4 bar. La temperatura del campione dopo 4.5 s di spruzzatura è di circa 180 – 220°C, ben al di sotto delle temperature critiche per l'addolcimento dell'acciaio. La durezza superficiale dei campioni è stata tenuta sotto controllo dopo ogni 1000 cicli mediante misure di durezza Vickers (HV 30) ed è terminata dopo 3000 cicli totali. Al termine della prova i campioni sono stati sottoposti a preparazione metallografica, misure di microdurezza Vickers con carico pari a 0.1 kgf sono state effettuate per escludere la presenza di un eventuale rinvenimento superficiale localizzato. Tali misure sono state effettuate impiegando un microduremetro Leica VMHT con carico 0.1 kgf.

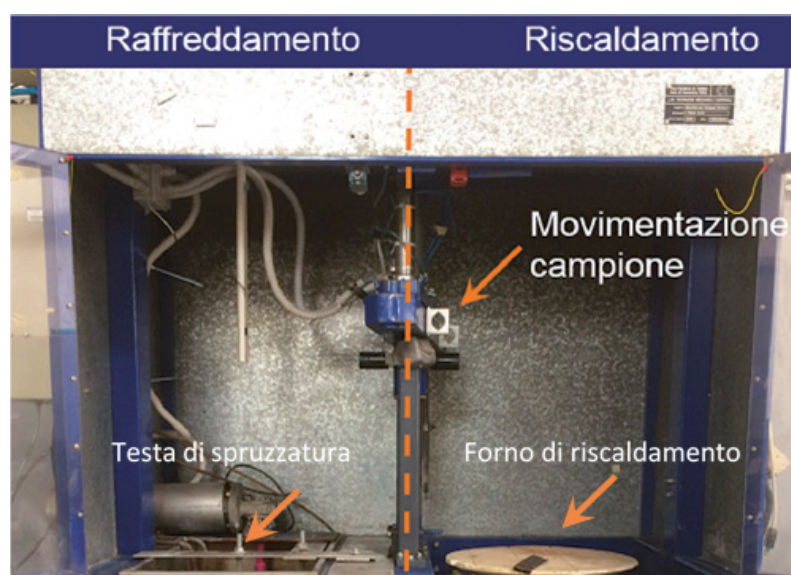


Fig. 2 – Immagine del ciclatore termico / Image of the thermal cycling rig.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Resistenza al rinvenimento in forno: curve di addolcimento e microstruttura

Dal grafico presentato in Fig. 3a si osserva come il materiale non risenta del fenomeno di addolcimento fino ad una temperatura di trattamento di circa 500°C, mentre per temperature più elevate si ha una diminuzione della durezza misurata dopo rinvenimento. A parità di tempo di permanenza tale diminuzione è tanto più marcata quanto più è alta la temperatura di trattamento. Le prove in forno alla temperatura di 650°C sono state interrotte dopo 50 ore poiché il valore di durezza misurato non è più significativo per il materiale. In Fig.3b si riporta l'andamento della durezza espressa in funzione del parametro di Hollomon – Jaffe (TP); questo comportamento è

confrontabile con dati di letteratura [4] di acciai per lavorazioni a caldo tipo AISI H11 e AISI H13. L'intersezione tra i due tratti di interpolazione lineare si assesta su valori del TP di circa $17.6 \cdot 10^3$: per valori inferiori di TP la durezza si mantiene costante mentre come osservato per altri acciai [4] questa può diminuire già nel primo tratto. Il motivo di tale comportamento è da ricercarsi innanzitutto nella composizione del materiale ed in seconda analisi nel trattamento termico. Secondo [5] la temperatura del trattamento di austenitizzazione per questo acciaio può modificare la popolazione di carburi nell'acciaio in seguito al rinvenimento favorendo la crescita di carburi del tipo M₂₃C₆ e M₇C₃ ricchi in Cr a discapito degli MC ricchi in V e più stabili al rinvenimento.

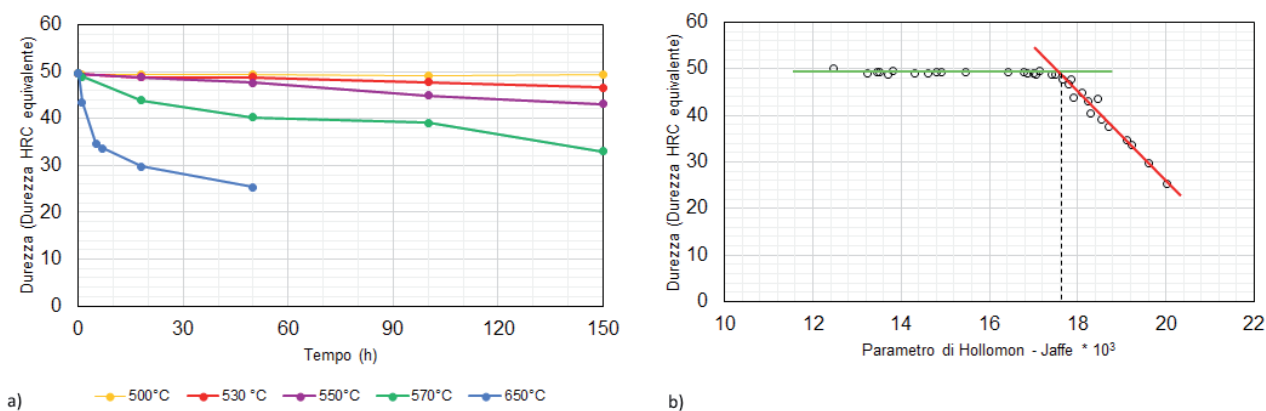


Fig. 3 – Curva di addolcimento in relazione al parametro di Hollomon – Jaffe per l'acciaio AISI H13 modificato / Softening curve of the modified AISI H13 steel as a function of the Hollomon – Jaffe parameter.

In Fig.4 sono riportate le microstrutture dei campioni nei vari stati metallurgici analizzati: ricotto, trattato termicamente e tre temperature caratteristiche per quelli sottoposti a trattamento in forno. La microstruttura del campione ricotto rispetto a quella ottenuta in seguito al trattamento termico di bonifica (Fig. 4a e 4b) mostra il passaggio da una microstruttura costituita da una matrice di ferrite α ed isole di carburi micrometrici a quella martensitica con carburi fini di difficile risoluzione al microscopio ottico, ottenuta dopo bonifica. In Fig.4c si osserva come la microstruttura rimanga invariata rispetto a quella del campione bonificato fino alla temperatura di 500°C. Tale osservazione è in accordo con i risultati riportati in Fig.3 a queste temperature di trattamento dopo 50 h non si osserva un addolcimento significativo. Sempre sulla base dei risultati di Fig. 3a, il tempo di mantenimento di 50 h risulta deleterio per la durezza a temperature di trattamento pari a 570°C e 650°C, dove si

riscontra rispettivamente un calo nella durezza pari al 18,6% e al 48,9% e, in misura minore, per la temperatura di 550°C, per la quale la perdita di durezza è dell'ordine del 4,0%. Per i campioni trattati a 570°C e 650°C, parallelamente ad un addolcimento elevato si osserva in Fig.4d e 4e una variazione sensibile nella microstruttura. Per il campione trattato a 570°C si osserva un parziale rinvenimento della matrice, con una martensite che appare più grossolana se confrontata con quella del campione bonificato. Per il campione trattato a 650°C la trasformazione metallurgica varia in modo sostanziale la microstruttura rispetto allo stato bonificato al punto da rassomigliare più allo stato ricotto. Non si distingue più la struttura martensitica e si osserva anzi una matrice ferritica nella quale sono presenti carburi cresciuti in modo grossolano a causa dal mantenimento a 650°C e risolvibili anche al microscopio metallografico.

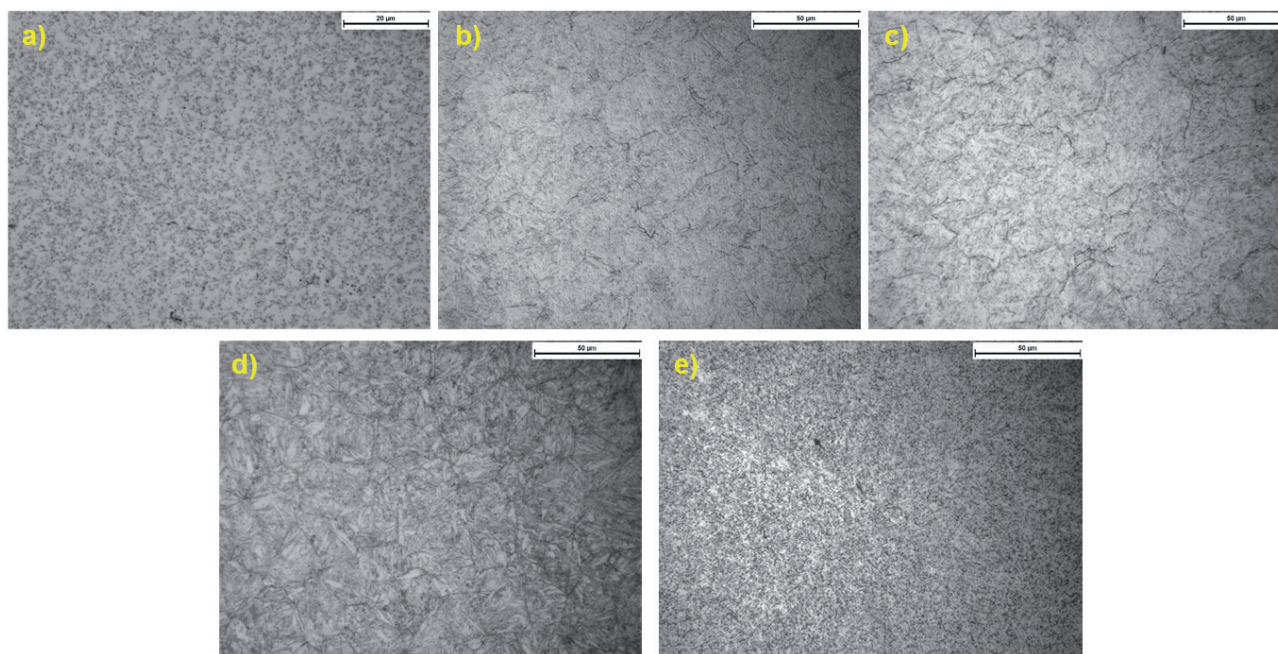


Fig. 4 – Micrografie dell'acciaio AISI H13 modificato, nei diversi stati microstrutturali a) ricotto, b) bonificato, e dopo mantenimento in forno per 50 h a c), 500°C d) 570°C, e) 650°C / Micrographs of the modified AISI H13 steel in the two metallurgical states a) annealed, b) quenched and double tempered, and after hoding in furnace for 50h at c) 500°C, d) 570°C, e) 650°C.

Resistenza al rinvenimento in condizioni di ciclaggio termico

Come si può osservare in Fig. 5a e Fig. 6, il campione ciclatο con $T_{max}=500^{\circ}C$ non ha risentito di alcun tipo di addolcimento dopo 3000 cicli. A differenza di questo, il campione ciclatο a $T_{max}=570^{\circ}C$ Fig.5b presenta un calo nella durezza dopo 2000 e dopo 3000 cicli, ma solo per quanto riguarda la sezione a 20 mm dalla superficie superiore del campione e quella a 40 mm e, fra queste, si nota un addolcimento differente. Questo diverso comportamento non è verosimilmente legato alla disomogeneità termica all'interno del

forno, che è nell'ordine di $5^{\circ}C$ da verifiche sperimentali, bensì è probabilmente legata al tempo necessario affinché tutto il campione venga immerso nel forno (ca. 2 – 3 secondi), che permette un riscaldamento tanto maggiore quanto più la sezione considerata si trova immersa (basti pensare che una differenza di 2 secondi è sufficiente ad innalzare di 50 – $60^{\circ}C$ la temperatura del campione nella zona di lettura della termocoppia); inoltre occorre considerare che la spruzzatura non è una tecnica di raffreddamento omogenea lungo l'asse del campione, ma è grossomodo localizzata.

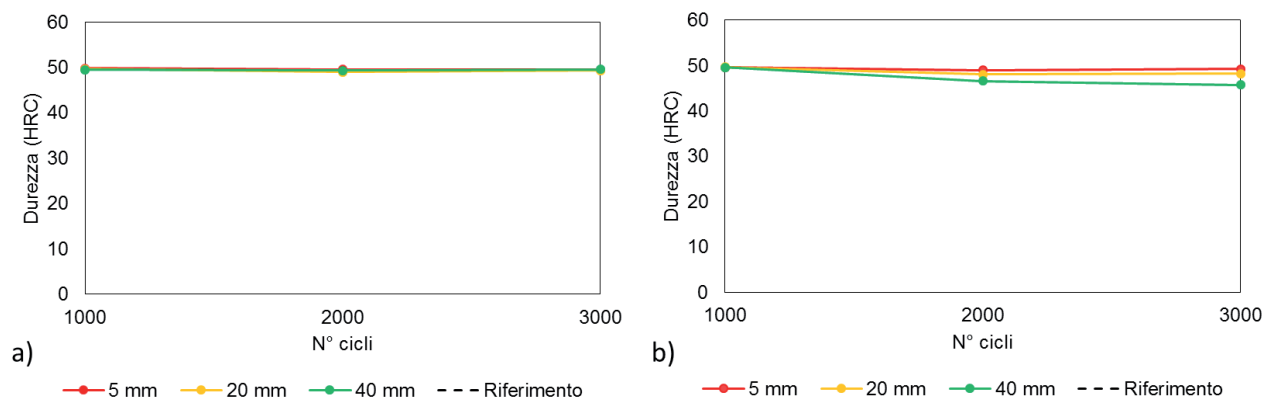


Fig. 5 – Durezza in funzione del numero di cicli termici, a) $T_{max} = 500^{\circ}C$, b) $T_{max} = 570^{\circ}C$ / Hardness as a function of the number of thermal cycles, a) $T_{max} = 500^{\circ}C$, b) $T_{max} = 570^{\circ}C$

Dai dati riportati in Fig. 6 non si osserva un rinvenimento localizzato sulla superficie, la durezza nello spessore dei campioni si mantiene costante. Tale comportamento è giustificabile, dal momento che è da ricondursi ai lunghi tempi di immersione impostati nella prova e alla geometria del campione, che hanno portato durante il ciclaggio ad una omogeneizzazione termica nel campione durante le fasi di riscaldamento e raffreddamen-

to. Non sono stati generati dei gradienti termici intensi sulla superficie tali da contribuire all'addolcimento sottoforma di fatica termica, perciò il contributo termico all'addolcimento è principale. I parametri di riscaldamento impiegati in questo lavoro hanno permesso di isolare il contributo termico preponderante, rispetto al contributo termo – meccanico.

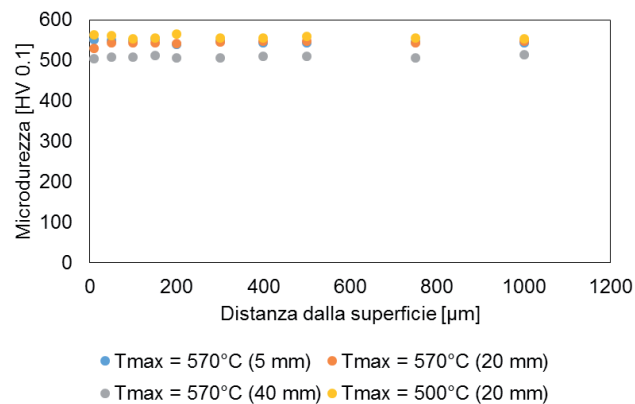


Fig. 6 – Valore medio dei profili di microdurezza per sezioni profondità crescente dei campioni sottoposti a ciclaggio termico / Average microhardness profiles of thermal cycled samples for increasing furnace depth.

CONCLUSIONI

All'interno di questo studio è stata caratterizzata la resistenza al rinvenimento di un acciaio per stampi AISI H13 modificato, sia in condizioni di invecchiamento isoterma, sia in condizioni di ciclaggio termico. Dalle prove effettuate si conclude che il materiale sia stabile sia da un punto di vista meccanico (rilevata dalla durezza) che microstrutturale fino alla temperatura di invecchiamento di 500°C, su una base temporale di 150 h. Oltre tale temperatura, la durezza decresce tanto più rapidamente quanto più elevata è la temperatura di trattamento, a causa dei fenomeni diffusivi che stanno alla base del meccani-

simo di addolcimento. Dalle prove di ciclaggio termico è stato isolato il solo contributo termico e si è osservato come anche in queste condizioni una temperatura massima di 500°C non causi alterazioni nella durezza del campione anche dopo 3000 cicli, cosa che invece accade per una temperatura massima di 570°C, in accordo con i dati ottenuti dalle prove di invecchiamento in forno. Le osservazioni metallografiche hanno rilevato una microstruttura stabile fino a 550°C mentre per i campioni invecchiati a 570°C e 650°C per 50 h si un rinvenimento della struttura martensitica sempre più marcato.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare Enrico Pallavicini e Dario Pezzini per il supporto nello svolgimento delle prove e della caratterizzazione. Si ringrazia inoltre Riccardo Zanchetta per aver fornito il materiale per lo studio.

BIBLIOGRAFIA

- 1] S. Shankar, D. Apelian, Die Soldering: Mechanism of the Interface Reaction between Molten Aluminum Alloy and Tool Steel, Metallurgical and Materials Transactions B, 476, 33B (2002).
- 2] M. Fazarinc, T. Muhić, G. Kugler, M. Terelj, Thermal fatigue properties of differently constructed functionally graded materials aimed for refurbishing of pressure-die-casting dies, Engineering Failure Analysis, 25 (2012).
- 3] A. Long, D. Thornhill, C. Armstrong, D. Watson, Predicting die life from die temperature for high pressure die casting aluminum alloy, Applied Thermal Engineering, 44 (2012).
- 4] E. Virtanen, C. Van Tyne, B. S. Levy, G. Brada, The tempering parameter for evaluating softening of hot and warm forging die steels, Journal of Materials Processing Technology, 213 (2013).
- 5] J. Sjöström, Chromium martensitic hot-work tool steels – damage, performance and microstructure, Division for Engineering Science, Physics and Mathematics, Department of Materials Engineering, Karlstad University, 2004.

Characterization of the resistance to thermal softening of a modified AISI H13 hot – work tool steel

F. S. Gobber, D. Ugues, P. Martelli, M. Rosso

Die steels are subject to a service temperature that can exceed 500 ° C. Molding processes such as die casting of aluminum alloys, forging and extrusion involve the use of critical applications for the life of molds in steel. Service temperature too high compared to the period of time. In this study the following data have been reported: In the first part of the study the heating of the steel after heat treatment was applied, with keeping in the oven a temperature between 500 and 650 ° C for increasing times up to 150 hours. By means of safety tests and SEM analysis, changes in the mechanical properties and the microstructural evolution of the alloy were recorded. In the second phase of the study a steel test bench was used to characterize its resistance to heat in hot heating conditions. The samples are subjected to several heating / cooling cycles with a peak temperature of 500 - 520°C and 560 - 580°C. These temperatures are compatible with the hot forming and forming processes. During each cycle the sample was cooled by applying a constant ΔT of about 350 ° C to increase the tensions able to plasticize the surface. The analyzes carried out at the end of 3,000 test cycles have shown the maximum temperature of 560 - 580 ° C, although reached for a few seconds during each test cycle, involves an alteration of the duration comparable with a static maintenance in the oven at the same temperature.

KEYWORDS: HOW WORK TOOL STEEL – AISI H13 – SOFTENING – THERMAL CYCLING – MICROSTRUCTURE