

Il nuovo acciaio da utensile da lavorazione a caldo THERMODUR E40K SUPERCLEAN

a cura di: E. Prati, A. Magistrelli - B.A Bonomi Acciai S.r.l

Al fine di prolungare la vita utile degli stampi di pressocolata e migliorare le proprietà di stabilità alle alte temperature unita all'elevata tenacità, Deutsche Edelstahlwerke ha sviluppato il nuovo acciaio per utensili a caldo Thermotur E 40 K Superclean (rifuso sotto elettro-scoria).

Thermotur E 40 K Superclean è stato sviluppato appositamente per gli stampi di pressocolata per soddisfare i più elevati requisiti di resistenza alla fatica termica, tenacità alle temperature elevate e resistenza all'usura a temperature elevate.

Rispetto ai gradi convenzionali di acciaio H11 e H13, Thermotur E 40 K Superclean mostra una straordinaria combinazione di stabilità alla temperatura e tenacità anche ad alte temperature. Queste proprietà rendono questo grado particolarmente adatto per stampi per pressofusione altamente sollecitati, stampi per estrusione e forgiatura.

Nel presente studio sono state studiate le proprietà selezionate (ad es. Tenacità Charpy-V a temperature elevate, resistenza agli shock termici e prova ad impatto con pendolo Charpy strumentato) del nostro nuovo acciaio per lavorazioni a caldo Thermotur E 40 K e sono state confrontate con i comuni gradi di acciaio H11 e H13.

KEYWORDS: ACCIAIO PER UTENSILI PER LAVORAZIONE A CALDO, THERMODUR E 40 K SUPERCLEAN, SPECIFICA NADCA#207, TENACITÀ, PROVA A IMPATTO STRUMENTATA, FATICA TERMICA, TRATTAMENTO TERMICO, COMPORTAMENTO ALLA TEMPRA, PROPRIETÀ FISICHE, PRESSOCOLATA, MICROSTRUTTURA

Introduzione

La richiesta di materiali adatti per componenti di pressocolata è ancora in aumento. Uno dei parametri essenziali di un'attrezzatura di pressocolata è la sua durata utile, che descrive il numero di componenti prodotti con lo stampo prima della sua avaria. La vita utile può essere incrementata grazie all'impiego di un materiale che esibisce buona stabilità a caldo ed alta tenacità anche ad elevate temperature. Nell'80% dei casi, l'avaria degli stampi è causata dalla fatica termica (Figura 1). La superficie del materiale di un componente di pressocolata subisce una permanente espansione e contrazione durante l'esercizio, che è iniziato da un riscaldamento e raffreddamento ciclico della superficie della cavità durante l'iniezione della lega liquida. Ulteriori dettagli di questo meccanismo di avaria, descritti dalla cosiddetta Teoria Kindbom, possono essere letti nella ¹. La Figura 1 mostra i principali meccanismi di avaria di stampi di pressocolata ^{2,3}.

Articolo presentato al NADCA di Indianapolis

Dr. Till Schneiders

Deutsche Edelstahlwerke GmbH

ed alla conferenza sugli utensili di Bratislava

Markus Gürçan

Deutsche Edelstahlwerke GmbH

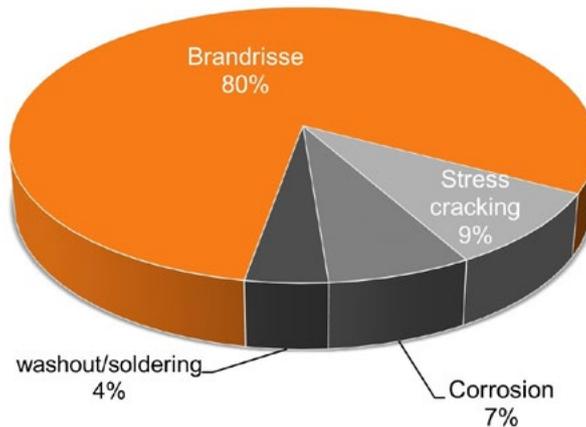


Fig.1 - Meccanismi di Avaria di uno stampo di Pressocolata

Ulteriori possibilità di avaria sono le cricche da tensionamento (9%), la corrosione (7%) e il washout / metallizzazione (4%). Per soddisfare i requisiti derivanti dalle esigenze operative è stato sviluppato il nuovo acciaio per utensili a caldo Thermodur E 40 K Superclean. Thermodur E 40 K Superclean mostra un'eccezionale combinazione di stabilità a caldo e tenacità anche a temperature elevate, particolarmente adatta per matrici per pressofusione altamente sollecitate, matrici

per estrusione e matrici per forgiatura.

SCHEMA DEGLI ESPERIMENTI

Vengono mostrate in Tabella 1 le composizioni chimiche e le dimensioni del nostro nuovo acciaio per utensili a caldo Thermodur E 40 K Superclean a confronto rispetto ai comuni acciai per utensili a caldo H11, H13 e 2367.

Tab.1 - Composizione chimica e dimensioni dei quattro acciai per utensili a caldo studiati.

Material (hardness in annealed state in HB)	AISI	Dimensions in mm	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Additives
Thermodur E 40 K Superclean (138)	-	850 x 350	0.37	0.21	0.25	0.006	<0.001	4.66	1.78	0.79	+
Thermodur 2343 Superclean (159)	Type H11 Superior	900 x 375	0.38	0.92	0.46	0.006	<0.001	4.81	1.20	0.47	
Thermodur 2344 Superclean (140)	Type H13 Superior	1010 x 375	0.38	1.04	0.45	0.011	0.002	5.05	1.22	0.87	
Thermodur 2367 Superclean (160)	Type 2367	850 x 350	0.37	0.23	0.33	0.010	<0.001	4.86	2.88	0.57	

L'analisi chimica del nostro nuovo acciaio per utensili per lavorazione a caldo è stata sviluppata utilizzando il software Thermo-Calc. La Figura 2 mostra la precipitazione dei diversi carburi sull'asse del molibdeno nello stato di equilibrio. Con

un contenuto di molibdeno dell'1,8% del nostro E 40 K è possibile riportare in soluzione i carburi secondari precipitati con le temperature di austenitizzazione tipiche di un ciclo di tempra ottimale.

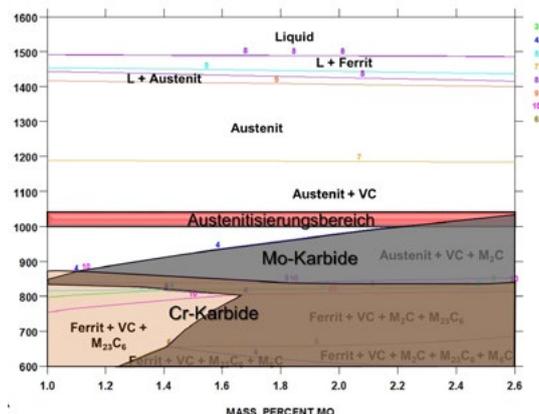


Fig.2 – Diagramma di equilibrio del Molibdeno

Al fine di migliorare la tenacità, il Thermodur E 40 K Superclean ha un basso contenuto di Si. I materiali base -Mo, -V e -Cr (elementi formanti carburi) sono stati progettati per ottenere una qualità premium con proprietà superiori alle

alte temperature. Tutti gli elementi rivelano un contenuto costante su tutta la sezione trasversale (Figura 3 e 4). Inoltre, Thermodur E 40 K Superclean mostra un basso contenuto di elementi di lega secondari.

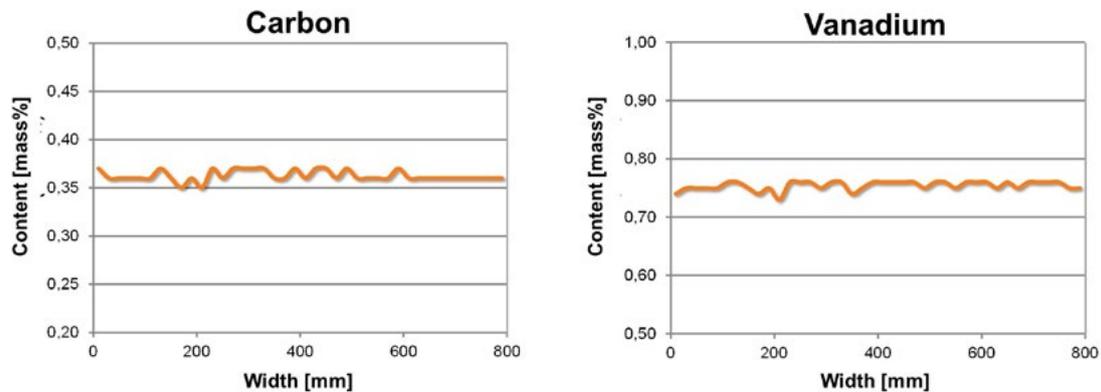


Fig.3 – Omogeneità Macroscopica



Fig.4 – Omogeneità Microscopica

Il Thermodur E 40 K Superclean è rifiuto sotto elettro-scorie e trattato termicamente in accordo alla specifica NADCA #207-2015. Tutti i campioni sono stati bonificati nell'intervallo di durezza di 45 ± 1 HRC. La microstruttura, la micropulizia e la dimensione del grano sono state valutate secondo la specifica NADCA #207-2015.

TENACITÀ

I test di tenacità sono stati eseguiti a temperatura ambiente secondo le specifiche europee con campioni non intagliati con una dimensione di 7 mm x 10 mm x 55 mm e secondo la specifica NADCA #207-2015 con campioni con intaglio a "V" con una dimensione di 10 mm x 10 mm x 55 mm. Tutti i campioni sono stati prelevati in direzione trasversale (nella sezione di transizione Q27 o nella sezione centrale Q17). La tenacità a temperatura elevata è stata studiata tra 100 °C e 600 °C, con incrementi di 100 °C, utilizzando campioni Charpy-V.

PROVA AD IMPATTO CON PENDOLO CHARPY STRUMENTATO

Le prove di impatto strumentate sono state eseguite secondo la norma DIN EN 14556 utilizzando una macchina per prove di impatto con un'energia di impatto massima di 300 J. Tutti i test sono stati eseguiti a temperatura ambiente utilizzando campioni non intagliati con una dimensione di 5 mm x 10 mm x 55 mm. Per la determinazione dell'innesco della cricca e della propagazione della cricca i risultati sono stati rappresentati in diagrammi forza-deviazione.

FATICA TERMICA

Il comportamento alla fatica termica è stato testato usando la configurazione ciclica di riscaldamento e raffreddamento in Figura 5. I campioni (50 mm x 55 mm x 10 mm) sono stati prelevati dalla direzione trasversale dell'area di transizione del blocco. Al fine di evitare l'innesco di cricche a causa di scanalature di rettifica, i campioni sono stati retti-

ficati con una rugosità superficiale di max. 5 µm. I campioni sono stati fissati su una ruota (Figura 5) e riscaldati fino a 650 °C per induzione ad alta frequenza per quattro secondi e successivamente raffreddati in una vasca acqua, che aveva una temperatura costante di 60 °C. Per evitare l'ossidazione, la struttura sperimentale chiusa è stata riempita con

gas inerte (argon). I test sono stati impostati a 2000, 4000, 6000 e 8000 cicli. I risultati dei test di fatica termica sono stati caratterizzati dal numero di cricche, dalla lunghezza massima delle cricche e dalla lunghezza totale delle cricche. Ulteriori dettagli di questo test sono descritti in ^{4,5}.

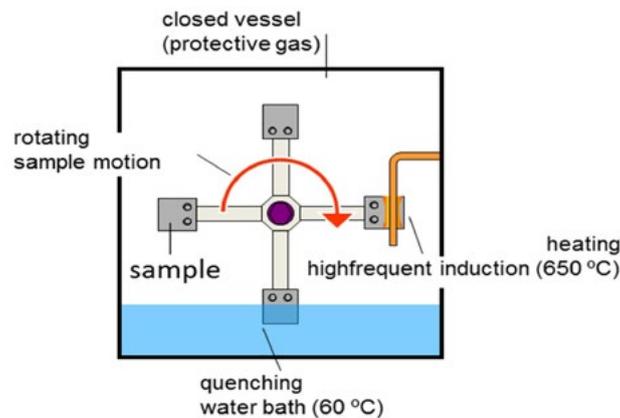


Fig.5 - Installazione sperimentale per testare il comportamento a fatica termica.

TRATTAMENTO TERMICO

La Figura 6 mostra il diagramma di trasformazione a raffreddamento continuo CCT del Thermodur E 40 K. Il com-

portamento è simile a H11, quindi è garantita la penetrazione di tempra di grandi sezioni trasversali.

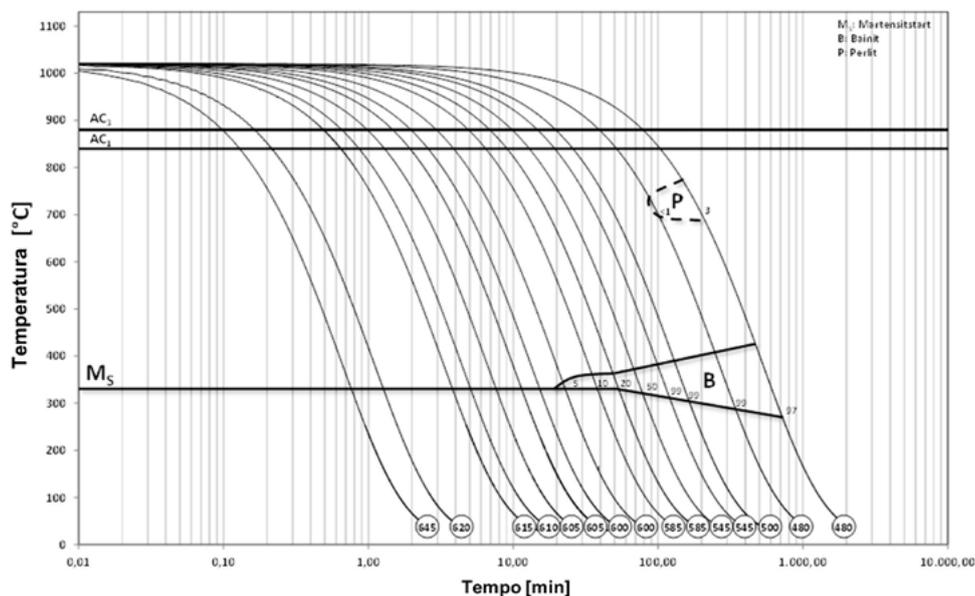


Fig.6 - Diagramma di Trasformazione a raffreddamento continuo (CCT)

COMPORTAMENTO AL RINVENIMENTO

La Figura 7 mostra il comportamento al rinvenimento del Thermodur E 40 K Superclean rispetto al comportamento al rinvenimento dei tre comuni acciai per utensili a caldo. Il picco di indurimento secondario di Thermodur E 40 K Su-

perclean si verifica a 525 °C, la durezza ammonta a 53 HRC. Il comportamento al rinvenimento del Thermodur E 40 K Superclean può essere paragonato al comportamento al rinvenimento del H11 (Figura 7).

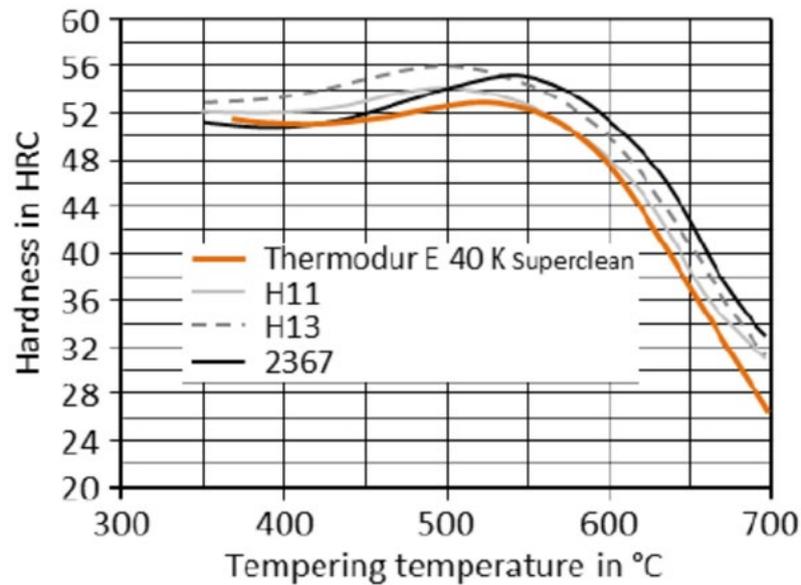


Fig.7 - Diagramma di Rinvenimento del Thermodur E 40 K Superclean.

RISULTATI E DISCUSSIONE

PROPRIETÀ FISICHE

Le proprietà fisiche della condizione bonificata (45 ± 1 HRC) sono elencate in Tabella 2. Il coefficiente di dilatazione termica aumenta all'aumentare della temperatura da $11,5 \text{ K}^{-1}$ ($20 \text{ °C} - 100 \text{ °C}$) a $13,2 \text{ K}^{-1}$ ($20 \text{ °C} - 600 \text{ °C}$) mentre la densità diminuisce (da $7,79 \text{ kg/dm}^3$ a 20 °C a $7,61 \text{ kg/dm}^3$ a 600

°C). A 20 °C la conducibilità termica ammonta a $28,3 \text{ W/m K}$. Innanzitutto la conducibilità termica aumenta fino a un valore massimo di 31 W/m K (300 °C) e successivamente diminuisce a $27,8 \text{ W/m K}$ (600 °C). Per quanto riguarda queste proprietà fisiche ci sono solo piccole differenze tra il Thermodur E 40 K Superclean e i comuni acciai per utensili a caldo.

Tab.2 - Coefficiente di dilatazione termica, conducibilità termica e densità del Thermodur E 40 K Superclean a diverse temperature in condizione di bonificato.

Quenched and tempered (45 ± 1 HRC)							
Thermal expansion coefficient in 10^{-6} 1/K	20 °C	20-100 °C	20-200 °C	20-300 °C	20-400 °C	20-500 °C	20-600 °C
	-	11.5	12.0	12.3	12.6	12.9	13.2
Thermal conductivity in $\text{W/m}\cdot\text{K}$	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
	28.3	29.3	30.9	31.0	30.7	29.5	27.8
Density in kg/dm^3	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
	7.79	7.77	7.74	7.71	7.68	7.65	7.61

MICROSTRUTTURA

Il Thermodur E 40 K Superclean presenta una microstruttura e macrostruttura omogenee sull'intera sezione trasversale. La microstruttura ricotta è costituita da una matrice ferritica con una omogenea distribuzione di carburi sferoidali. La microstruttura allo stato ricotto del Thermodur E 40 K Superclean è priva di bandosità eccessiva in conformità con la tabella di riferimento per la segregazio-

ne delle bandosità NADCA per livelli di microbandosità e segregazione microchimica e può quindi essere classificata come accettabile. I requisiti per il materiale rifuso sotto elettro-scorie, a livello di micropurezza, sono stati soddisfatti in conformità alla ASTM E45. Entrambe, struttura ricotta e struttura bonificata del Thermodur E 40 K Superclean, sono mostrate nella Figura 8.

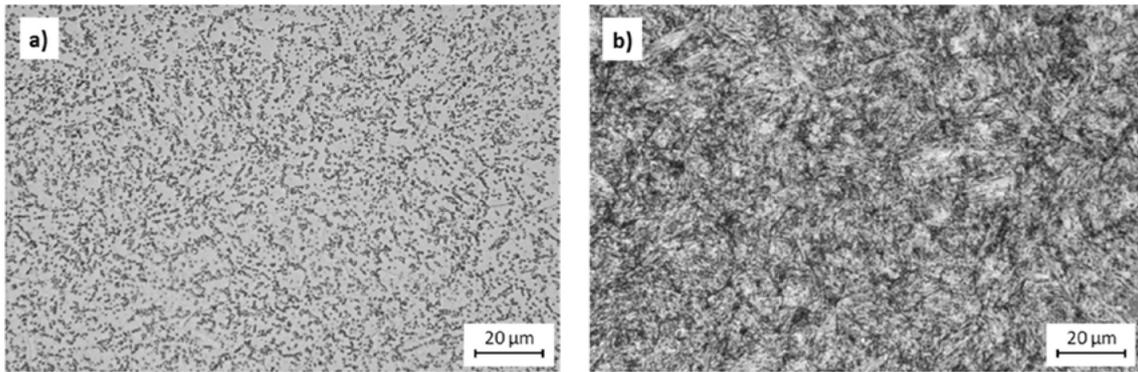


Fig.8 - a) Microstruttura ricotta e b) Microstruttura bonificata di Thermodur E 40 K Superclean.

PROVA DI TRAZIONE

La Figura 9 mostra la trazione R_m e la resistenza allo snervamento $R_{p0.2}$ e la riduzione dell'area Z in funzione della temperatura. Mentre R_m e $R_{p0.2}$ diminuiscono con l'aumentare della temperatura, Z aumenta con temperature elevate. A tempe-

ratura ambiente R_m è pari a 1480 MPa e $R_{p0.2}$ è pari a 1270 MPa indipendentemente dalla posizione del campione. La riduzione dell'area è dal 47% al 52% nella zona centrale e dal 56% al 58% nella zona esterna.

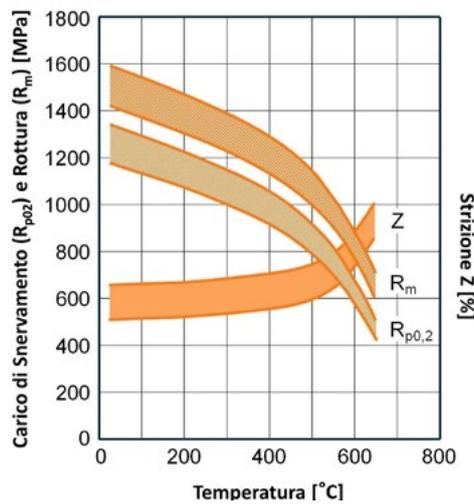


Fig.9 - Risultati delle prove di trazione di Thermodur E 40 K Superclean.

TENACITÀ

A temperatura ambiente, i quattro acciai per utensili da lavorazione a caldo mostrano un comportamento di tenacità paragonabile relativamente al test Charpy-V. Il Thermodur E 40 K Superclean mostra valori di circa 20 J nella sezione cen-

trale. Considerando i risultati del test di impatto strumentato ci sono differenze significative. La Figura 10 mostra i risultati dei quattro acciai per utensili a caldo esaminati nei diagrammi forza-deviazione. Le energie massime di impatto relative sono riportate in alto a destra in ciascun diagramma.

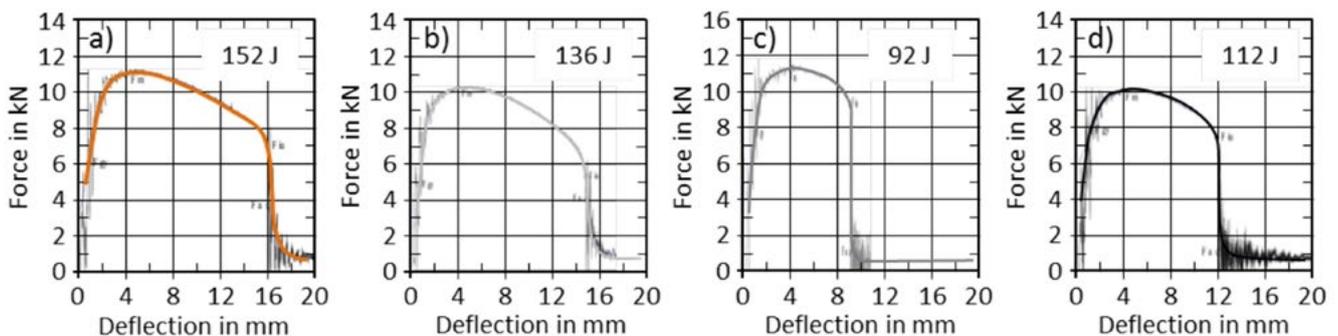


Fig.10 - Diagrammi di forza-deviazione misurati in prove ad impatto con pendolo Charpy strumentato per a) Thermodur E 40 K Superclean, b) H11, c) H13 e d) 2367. Tutti i campioni testati sono stati prelevati dal cuore (Q17). L'energia di impatto assorbita è mostrata in alto a destra in ogni diagramma.

Si può vedere che Thermodur E 40 K Superclean (152 J) ha la massima tenacità seguita da H11 (136 J) > 2367 (112 J) > H13 (92 J). Tutti gli acciai dissipano solo una piccola quantità dell'assorbimento di energia per l'innesco della cricca (parte elastica lineare, parte elasto-plastica lineare e parte plastica non lineare dei diagrammi), la frazione principale dell'assorbimento di energia viene dissipata durante la propagazione della cricca (area di caduta del carico e

rapida crescita delle microcricche)⁶. Il Thermodur E 40 K Superclean ed il H11 mostrano una migliore resistenza alla propagazione delle cricche rispetto agli acciai H13 e 2367. La Figura 11 mostra i risultati delle prove di tenacità a temperature elevate fino a 600 °C per gli acciai studiati. La tenacità del Thermodur E 40 K Superclean (Figura 7a) aumenta con l'aumentare della temperatura fino a 500 °C dove raggiunge un livello di tenacità massimo di ≈82 J.

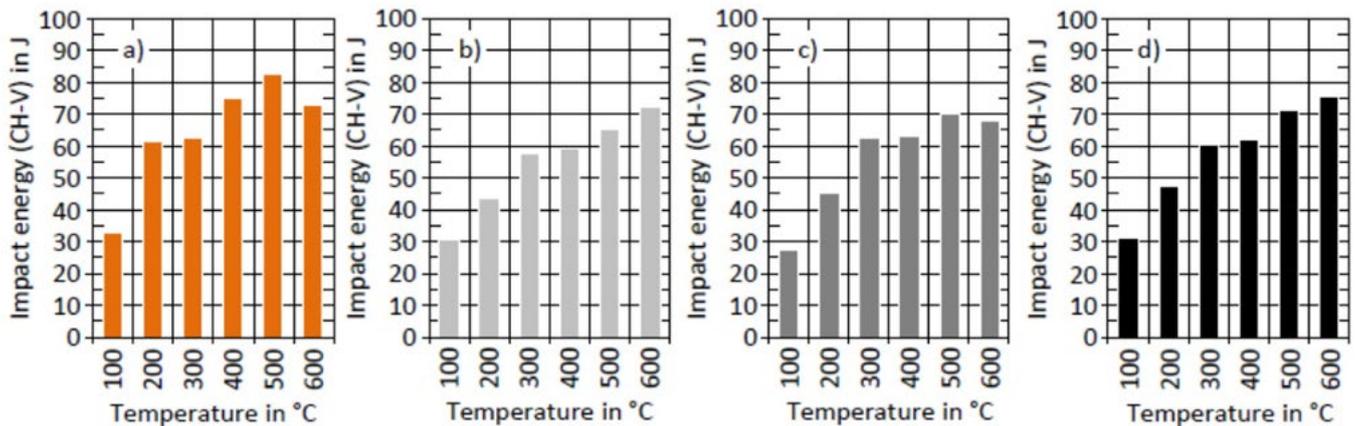


Fig.11 - Tenacità (Charpy-V) in funzione della temperatura per a) Thermodur E 40 K Superclean, b) H11, c) H13 e d) 2367.

RESISTENZA ALLA FATICA TERMICA

Il cambio periodico di tensione e compressione causato dal riscaldamento e dal raffreddamento nel test di fatica termica porta a una rete di cricche. La Figura 12 mostra la comparsa di cricche a caldo dopo 4000 cicli per tutti i ma-

teriali studiati: Thermodur E 40 K Superclean, H11, H13 e 2367. Rispetto ai comuni acciai per utensili a caldo, il Thermodur E 40 K Superclean è meno suscettibile alla formazione di cricche da fatica termica (Figura 12a).

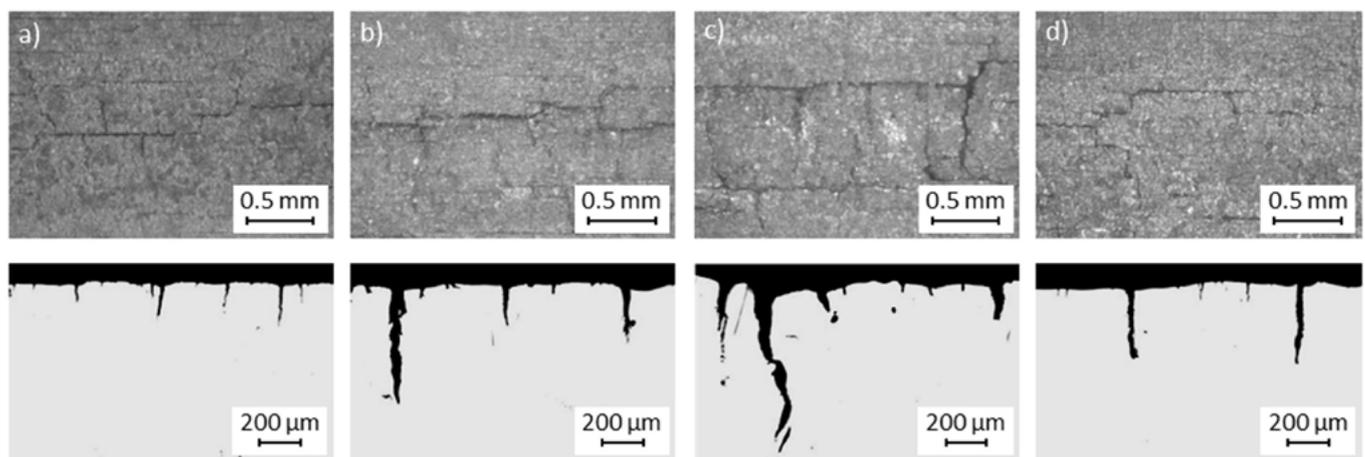


Fig.12 - Microstruttura di a) Thermodur E 40 K Superclean, b) H11, c) H13 e d) 2367 dopo 4000 cicli nel test di fatica termica.

La resistenza al controllo del calore è stata studiata attraverso la massima lunghezza della cricca e sommando tutte le lunghezze delle cricche dopo 4000 cicli. In questo contesto: minore è la lunghezza della cricca, maggiore è la re-

sistenza alla fatica termica. La Figura 13a mostra la massima lunghezza della cricca e la Figura 13b la lunghezza del numero totale delle cricche in funzione del numero di cicli, che è stato diversificato tra 2000, 4000, 6000 e 8000.

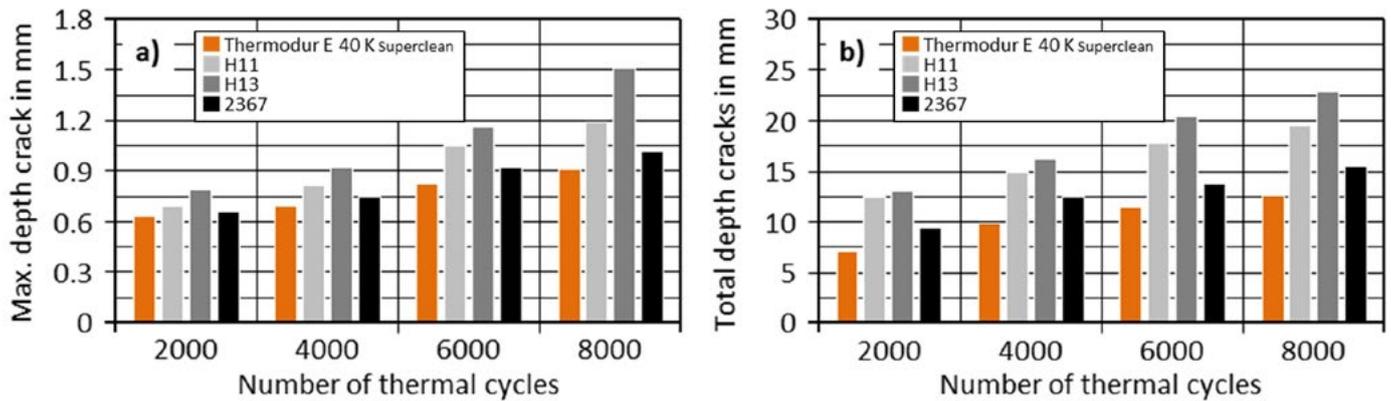


Fig.13 - a) Massima lunghezza della cricca e b) lunghezza totale delle cricche di Thermodur E 40 K Superclean, H11, H13 e 2367 dopo 2000, 4000, 6000 e 8000 cicli nel test di fatica termica.

Soprattutto dopo 6000 e più cicli termici, il nuovo acciaio per utensili a caldo Thermodur E 40 K Superclean mostra una lunghezza della cricca totale inferiore rispetto agli acciai comuni (vedi Figura 13b). È ben noto che il comportamento alla fatica termica è influenzato tra l'altro da due effetti opposti. L'innesco della cricca ha avvio sotto un carico ciclico quando il limite di snervamento viene superato localmente. Le prime cricche compaiono, ad esempio, in corrispondenza di inclusioni non metalliche o carburi eutettici^{2,6}. Questo effetto può essere ritardato da un'elevata durezza, ma ciò è limitato dalla perdita di tenacità e dal rischio di rottura. Una volta innescata la cricca, è utile che l'utensile presenti una buona resistenza alla propagazione della cricca. Poiché la fatica termica nella pressofusione è imprevedibile, è molto utile rallentare la propagazione delle cricche mediante una buona combinazione di stabilità alle alte temperature e tenacità per utensili altamente sollecitati. La maggiore resistenza di Thermodur E 40 K Superclean rispetto alle altre qualità contro le cricche da fatica termica deriva dalla maggiore tenacità alla durezza data di 45 ± 1 HRC.

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE

Al fine di aumentare la durata degli utensili da lavorazione a caldo, è consigliabile considerare che ci sono molte applicazioni diverse che richiedono diverse proprietà dell'acciaio. Gli acciai per utensili per stampi di pressocolata richiedono una buona resistenza alla fatica termica, il che

può essere ottenuto grazie ad una buona combinazione di stabilità alle alte temperature e tenacità per utensili altamente sollecitati.

Esistono diversi approcci per misurare la tenacità. Il valore ottenuto nel test Charpy-V è un valore integrale dell'innesco della cricca e della propagazione della cricca, il volume testato e la zona deformata plasticamente sono piuttosto grandi. Questo test fornisce informazioni non isolate circa la propagazione della cricca e c'è solo un riflesso limitato del carico nella prassi industriale. La tenacità come resistenza alla propagazione delle cricche può essere determinata mediante il test di impatto strumentato. I diagrammi forza-deviazione mostrano che Thermodur E 40 K Superclean mostra un'ottima tenacità e resistenza contro la propagazione delle cricche. Lo stesso vale per i risultati del test di fatica termica. Una volta innescata la cricca, la crescita è determinata dalla capacità del materiale di resistere a questa crescita, ovvero il livello di tenacità. Contrariamente al test Charpy-V, il volume testato in prossimità dell'estremità della cricca è molto piccolo, il che riflette le esigenze operative nel processo di pressofusione. Thermodur E 40 K Superclean mostra la più corta lunghezza massima della cricca così come la minore lunghezza totale delle cricche. Ciò approva i risultati della prova di impatto strumentata e sottolinea l'eccellente idoneità di questo acciaio per applicazioni che richiedono una buona tenacità.