

Valutazione della formabilità di lamiera di titanio a freddo e a tiepido

E. Ceretti, A. Fiorentino, G. P. Marena, M. Cabrini, C. Giardini, S. Lorenzi, T. Pastore

Il lavoro descrive i risultati di prove di trazione e di prove di formabilità limite Nakazima effettuate a temperatura ambiente e a tiepido (300 °C) utili per lo sviluppo di un modello simulativo per la valutazione della fattibilità di un elemento di geometria complessa per l'industria automobilistica, da realizzare in lamiera di titanio commercialmente puro. Si dimostra come le caratteristiche del materiale considerato, espresse in termini di legge di flusso e di formabilità, cambino al variare della temperatura di lavorazione rendendo fattibile o meno il prodotto. Il modello FEM e l'applicazione delle curve di flow stress e di formabilità limite (FLC) sono state validate tramite simulazione preliminare delle prove Nakazima stesse. L'approccio proposto è particolarmente adatto per definire, in ambiente virtuale, geometria e parametri di processo per operazioni di stampaggio su materiali innovativi difficilmente deformabili a temperatura ambiente e consente notevoli risparmi di tempo e di costo, evitando operazioni di "trial-and-error" normalmente utilizzate nella fase di setup del processo produttivo.

Parole chiave:

titanio e leghe, deformazioni plastiche, caratterizzazione materiali, simulazione numerica

INTRODUZIONE

Il titanio trova ampia applicazione sia sotto forma di lega sia come metallo commercialmente puro (Ti CP) in numerosi settori, grazie all'elevate proprietà meccaniche, al basso rapporto peso-resistenza, a caratteristiche quali la grande resistenza alla corrosione e l'elevata biocompatibilità [1][2][3]. Lamiere di titanio commercialmente puro sono utilizzate per gli scopi più vari, da componenti automobilistici, a tubi, scambiatori di calore, valvole e altre apparecchiature che operano in ambienti di alta aggressività, a strutture aerospaziali, a protesi per il biomedicale, a parti estetiche di personal computer e telefoni cellulari [3][4][5].

La formatura delle lamiere è resa complessa da alcune delle proprietà di questo metallo. Le deformazioni di maggiore entità si eseguono per lo più ad alta temperatura, sotto la transizione β , avendo cura di non raggiungere temperature troppo elevate, per un tempo eccessivo, per contenere l'assorbimento di ossigeno ed evitare la formazione di uno strato superficiale fragile. Oltre i 650 °C, inoltre, la temperatura elevata, abbinata a velocità di deformazione troppo basse, favorisce la ricristallizzazione del materiale riducendone la durezza, mentre già a 450 °C, il titanio tende a reagire con l'atmosfera ossidandosi e, sebbene le proprietà meccaniche restino invariate, l'estetica è alterata [5]. A temperatura ambiente, il Ti CP ha bassa formabilità e duttilità limitata. Il suo modulo elastico, solo metà di quello dell'acciaio,

comporta un maggiore ritorno elastico che ne limita, di fatto, l'applicazione a particolari con geometria poco complessa o determina la necessità di successivi trattamenti a caldo per compensarne l'effetto ("hot sizing") [4][6][7][8]. Tra 200÷450 °C, la deformabilità del titanio aumenta sensibilmente rispetto alla temperatura ambiente [9], per questo, i processi di formatura che richiedono deformazioni non particolarmente elevate possono essere realizzati in modo conveniente tra 200 °C e 315 °C [3]. Tuttavia, nonostante il campo di temperatura permetta di migliorare la formabilità del titanio, la lavorazione della lamiera può presentare numerose problematiche, nel caso di elevate sollecitazioni membranali, e instabilità locali che ne rendono difficile l'attuazione [10][11][12].

La simulazione di un processo di stampaggio della lamiera [13][14] passa attraverso la conoscenza delle caratteristiche meccaniche e di formabilità del materiale da lavorare, alla temperatura e alle velocità di deformazione proprie del processo. L'accesso a queste informazioni è fondamentale per simulare lo stampaggio di prodotti complessi, soprattutto per materiali difficilmente lavorabili. Il comportamento alla deformazione del titanio è stato oggetto di numerosi lavori [15][16][17][18][19][20] che ne hanno precisato i meccanismi di deformazione che lo regolano, evidenziando la presenza di effetti di invecchiamento dinamico sia a freddo sia a tiepido e sottolineato la sensibilità del titanio alla localizzazione della deformazione. Le leggi costitutive della deformazione plastica possono essere convenientemente descritte in termini di equazioni di Hollomon e Ludwig. La prova più semplice per caratterizzarne il comportamento è quella di trazione che fornisce, però, una indicazione utile solo per stati di tensione monoassiale. Per studiare processi di deformazione più complessi, quali sono quelli tipici dello stampaggio, è necessario condurre prove nelle quali le lamiere sono sottoposte a uno stato di sollecitazione biassiale. Tra queste, una delle più diffuse è la prova Nakazima che permette di analizzare il materiale in differenti condizioni di deformazione, grazie all'uso di provini aventi differente larghezza [21][22]. A dispetto del numero relativamente ampio di lavori sull'argo-

E. Ceretti, A. Fiorentino, G. P. Marena

Università di Brescia - Dip. di Ingegneria Meccanica e Industriale,
Via Branze 38, Brescia
e-mail: antonio.fiorentino@unibs.it, gianpietro.marena@unibs.it,
elisabetta.ceretti@unibs.it

M. Cabrini, C. Giardini, S. Lorenzi, T. Pastore

Università di Bergamo - Dip. di Progettazione e Tecnologie,
Viale Marconi 5, Dalmine (BG)
e-mail: claudio.giardini@unibg.it, tommaso.pastore@unibg.it,
marina.cabrini@unibg.it, sergio.lorenzi@unibg.it

mento, la pratica industriale dei processi di deformazione delle lamiera di titanio si basa ancora essenzialmente su un approccio empirico, con la realizzazione di numerose prove di stampaggio per definire i parametri di processo da adottare o la geometria dei pezzi.

Lo scopo della ricerca realizzata è stato lo sviluppo di un modello di calcolo utile a tecnici e progettisti per la verifica della fattibilità di stampaggio di forme complesse in titanio a temperatura ambiente e a tiepido, grazie all'introduzione di criteri descrittivi del danneggiamento del materiale, basati sulla deformazione massima che il materiale può sopportare, considerando il percorso di deformazione seguito. Il comportamento delle lamiera è stato valutato in termini di resistenza meccanica, con la descrizione delle curve di flow stress, e di curve limite di formabilità (FLC) a freddo e a tiepido. Il modello si basa su una simulazione agli elementi finiti del processo di stampaggio delle lamiera con il programma PamStamp-2G. In una prima fase, il modello è stato validato sulla geometria della prova di Nakazima, per confronto del campo di deformazione plastica ottenuto dalla simulazione con quello rilevato sperimentalmente dopo la prova. Infine, il modello è stato utilizzato per verificare la realizzabilità di una scatola di differenziale per impiego nel settore automobilistico.

METODOLOGIA SPERIMENTALE

Le prove sono state eseguite su lamiera di Ti CP di grado 2 allo stato ricotto, di spessore nominale 1 mm. La formabilità è stata valutata mediante prove di trazione e prove Nakazima, a temperatura ambiente e a 300°C.

Le curve di flusso sono state ottenute da prove di trazione eseguite su provette proporzionali (UNI EN 10002) con sezione resistente (A_0) pari a 20 mm² (Figura 1) prelevate a pieno spessore dalla lamiera, con una giacitura di 0°, 45° e 90° rispetto alla direzione di laminazione.

Le prove sono state eseguite in controllo di spostamento, con una velocità della traversa pari a 5 mm/minuto. Per le prove a 300°C, si è utilizzato un forno cilindrico, con rilevazione della temperatura mediante due termocoppie fissate direttamente al provino, nella zona del suo tratto utile. Su alcuni provini, oltre alla curva di flusso si è valutata la deformazione plastica al termine della prova come deformata di una griglia tracciata prima della prova stessa, in modo analogo alla prova Nakazima descritta nel seguito.

Le prove Nakazima[17] sono state eseguite per valutare lo stato di deformazione limite in corrispondenza del quale la lamiera si rompe. La prova parte dal presupposto che il limite oltre il quale avviene la rottura della lamiera sia definito dalla combinazione delle deformazioni plastiche membranali. Durante la prova, il punzone emisferico (Figura 2) avanza a velocità costante stirando il materiale in condizioni in cui questo non può scorrere, fino ai primi segni di strizione o cedimento della lamiera. La prova è condotta su provini di larghezza diversa in modo da indurre differenti stati di tensione e di deformazione biassiale. Al variare della larghezza della lamiera si ottengono, infatti, combinazioni diverse di deformazione massima e minima nella zona di cedimento. Queste deformazioni membranali subite dalla lamiera sono rilevate mediante una griglia di riferimento tracciata sui provini prima della prova (Figura 3). Le prove sono state realizzate utilizzando un'attrezzatura progettata e realizzata presso il Laboratorio di Tecnologia Meccanica dell'Università degli Studi di Brescia, composta di uno stampo fisso, un punzone mobile e un premilamiera (Figura 4), montata su una pressa a portale da 150 t, per movimentare il punzone. Nelle prove a caldo, la lamiera è stata riscaldata per effetto Joule, a seguito del passaggio di una corrente nel provino, collegato ai

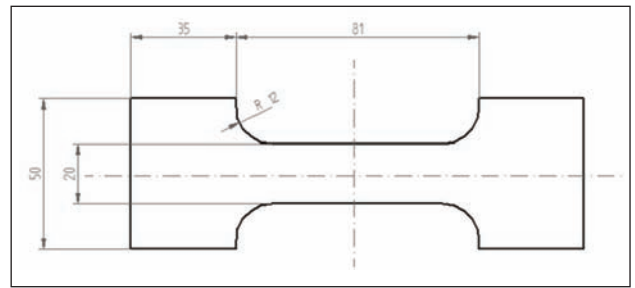


FIG. 1 *Provini utilizzati nelle prove di trazione.*

Tensile test specimens.

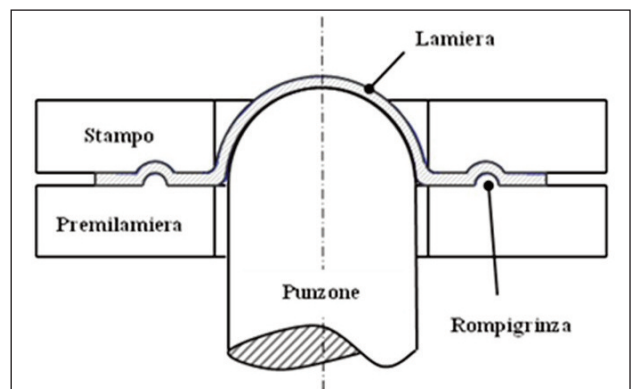


FIG. 2 *Schema delle prove Nakazima.*

Nakazima test.

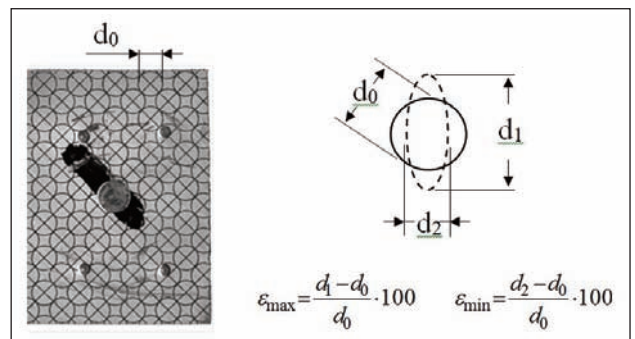


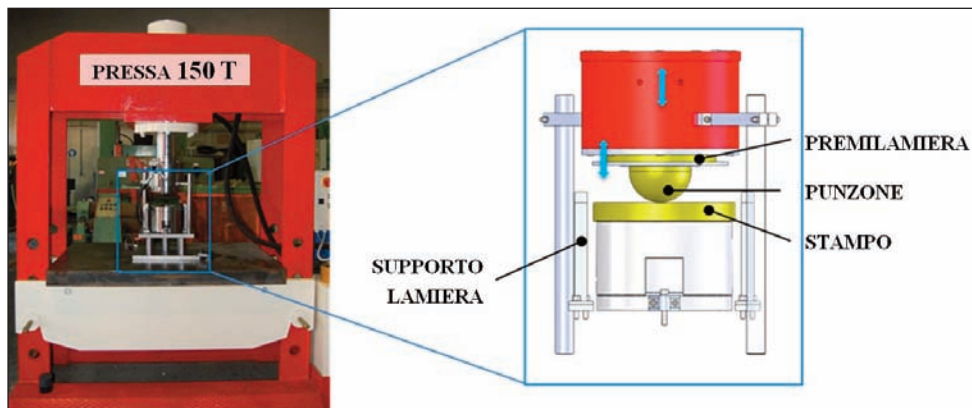
Fig. 3 *Griglia per la misura delle deformazioni minima (min) e massima (max) sulle lamiera.*

Grid for the measurement of minimum (min) and maximum (max) deformation.

due estremi con i cavi di alimentazione di un generatore di tensione, tramite due apposite morse che fungevano da distributori di corrente, in modo rendere più uniforme possibile la temperatura della lamiera. A questo riguardo, prove preliminari condotte con termocoppie poste sulla superficie della lamiera, hanno mostrato gradienti spaziali di temperatura molto contenuti nella zona interessata dalla deformazione. La temperatura di prova, al momento della deformazione, è stata verificata mediante una termocoppia appoggiata sulla superficie della lamiera, in prossimità della flangia. La tensione elettrica è stata tolta all'atto della discesa del punzone (inizio della prova), per evitare la chiusura del circuito elettrico sulla struttura dell'attrezzatura di prova e della pressa. Prima dell'inizio, il punzone è stato preriscaldato e posto alla distanza di 2 mm dalla lamiera, in modo da garantire una temperatura uniforme e il più possi-

FIG. 4
Attrezzatura utilizzata per il Nakazima test.

Equipment for the Nakazima test.



TAB. 1
Risultati delle prove di trazione.

Tensile test results on Ti GR.2 annealed - thickness 1 mm.

Condizioni di prova		R_m	$R_{p0,2}$	A	A_u
Temperatura	Direzione di prelievo	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
T.A.	0°	444	332	30	11
	45°	438	352	32	10
	90°	427	343	30	8
300°C	0°	156	93	44	18
	45°	138	86	50	19
	90°	136	90	51	14

bile costante durante la discesa del punzone stesso. Questa soluzione è stata scelta perché garantisce un rapido e uniforme riscaldamento della lamiera, non richiede sistemi di raffreddamento, ha ingombri ridotti e consente il monitoraggio continuo del processo di deformazione. Il punzone e lo stampo sono di facile sostituzione per adattare l'attrezzatura a esigenze specifiche di differenti geometrie e dimensioni. Sono state effettuate 24 prove su piastre di 400 mm di lunghezza e larghezza di 12, 36, 84, 100, 132 e 150 mm, prelevate in due diverse direzioni di laminazione, parallela e a 90° rispetto a quella di laminazione. Su ogni provino, è stata tracciata una griglia di riferimento con cerchi di diametro 5 mm. Per ogni prova, sono state rilevate cinque misure di deformazione della lamiera in prossimità della zona di rottura.

RISULTATI E DISCUSSIONE

I risultati delle prove di trazione sono riassunti nella Tabella 1, che riporta la resistenza a rottura (R_m), il carico di snervamento allo 0,2% di deformazione plastica ($R_{p0,2}$), l'allungamento a rottura (A%) e l'allungamento omogeneo in corrispondenza del carico massimo (A_u %). I valori rappresentano la media di almeno due prove condotte per ogni condizione considerata. La lamiera utilizzata mostra un comportamento relativamente omogeneo, con valori che risentono poco della direzione di prelievo. L'effetto di questa è evidente invece sulla morfologia di rottura dei provini con la comparsa di una frattura lungo piani a 45°, nei provini prelevati a 45° rispetto alla direzione di laminazione (Figura 5). La resistenza meccanica a 300°C è circa un terzo di quella a temperatura ambiente mentre l'allungamento aumenta da circa 30% a valori prossimi o superiori a 50%. Soprattutto aumenta il tratto a deformazione omogenea, con valori che, da circa 10% a temperatura ambiente, si portano a poco meno di 20%. In ogni caso, la strizione avviene prima sui provini con giacitura a 90°.

Curve di flusso

La curva di flusso è stata stimata dalla curva carico-spostamento ($F-\Delta s$) depurata dai contributi elastici (Figura 6) assumendo

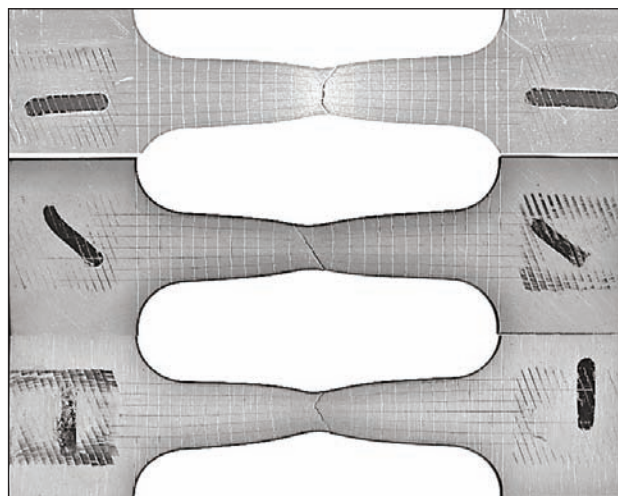


FIG. 5 **Aspetto dei provini con differente giacitura dopo la prova di trazione a 300°C.**

Tensile specimens tested at 300°C along directions at angles of 0°, 45° and 90° with respect to the original rolling direction.

come espressione dello sforzo reale (σ_r) e della deformazione plastica reale ($\epsilon_{p,r}$) le usuali relazioni che legano questi due parametri ai corrispondenti valori nominali ($\sigma_n, \epsilon_{p,n}$)

$$\epsilon_{p,r} = \ln(1 + \epsilon_{p,n}) \quad (1)$$

$$\sigma_r = \sigma_n \cdot (1 + \epsilon_{p,n}) = \frac{F}{A_0} \cdot (1 + \epsilon_{p,n}) \quad (2)$$

La deformazione plastica è stata valutata come scostamento dall'andamento lineare iniziale della curva di trazione, considerando, come tratto utile del provino, l'intera lunghezza del tratto rastremato (L_0), tramite la relazione

$$\epsilon_{p,n} = \frac{\Delta s}{L_0} - \frac{F}{m \cdot L_0} \quad (3)$$

In questa relazione, m rappresenta la pendenza del tratto lineare elastico della curva carico-spostamento (Figura 6a). Infine, i coefficienti di resistenza (k) e d'incrudimento (n) sono stati stimati per interpolazione della curva sforzo reale deformazione reale, nel tratto a deformazione plastica omogenea (Figura 6b) mediante la relazione di Hollomon (4):

$$\sigma = k \varepsilon^n \quad (4)$$

In Figura 6, si riporta, a titolo di esempio, l'interpolazione ottenuta in questo modo nel caso di una delle prove effettuate a 300°C, con il relativo coefficiente di correlazione R^2 .

La deformabilità si modifica in modo significativo passando da temperatura ambiente a 300°C. La dipendenza di k e n dalla temperatura e dall'angolo di prelievo del provino è riportata in Figura 7. I valori sono rappresentativi per velocità di deformazione stimabili intorno a 10^{-3} s^{-1} . Proporzionalmente alla riduzione della resistenza meccanica, si riduce il coefficiente k che diminuisce, seppure in modo molto meno marcato, anche con l'angolo di prelievo del provino, ossia con la direzione di sollecitazione rispetto quella di laminazione. Il coefficiente d'incrudimento, invece, aumenta con la temperatura mentre diminuisce con l'angolo di prelievo, con variazioni, in questo caso, confrontabili tra loro.

Curva limite di formabilità

L'aspetto dei provini dopo il test di Nakazima è descritto in Figura 8, per le prove condotte a 300°C. Analogo aspetto si trova per le prove a temperatura ambiente. La curva limite di deformabilità (FLC) è stata tracciata considerando le deformazioni plastiche rilevate in prossimità della rottura. In realtà, così come sono state misurate, corrispondono alle zone di lamiera ancora

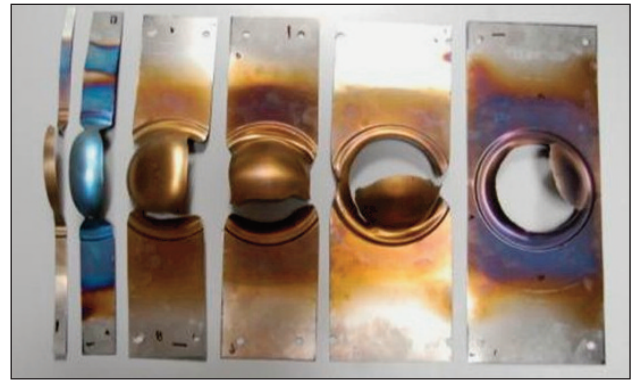
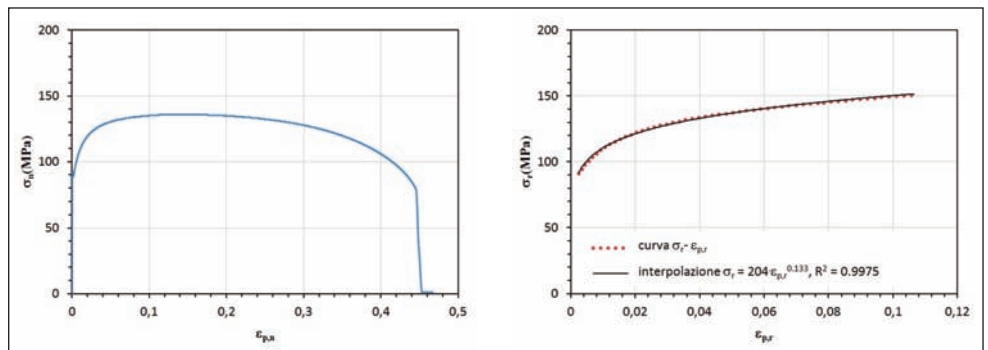


FIG. 8 *Provini utilizzati nelle prove Nakazima a tiepido.*
Nakazima specimens for warm forming tests.

sana, tuttavia tendono ad appoggiarsi superiormente alla curva limite di formabilità (Figura 9) che così può essere tracciata. I punti posti sotto questa curva limite rappresentano, quindi, deformazioni certamente sopportabili dalla lamiera durante le operazioni di stampaggio, mentre i punti sopra rappresentano situazioni critiche per le quali la lamiera potrebbe cedere. I risultati riguardanti l'insieme delle prove realizzate sui provini a diversa larghezza (Figura 9) confermano che la lamiera considerata in questo lavoro ha una formabilità significativamente superiore a tiepido, ossia a 300°C, rispetto alla temperatura ambiente, così come già evidenziato dalle prove di trazione. Il buon accordo tra le due prove è confermato anche dai risultati che si riferiscono all'allungamento misurato nella zona di strizione dei

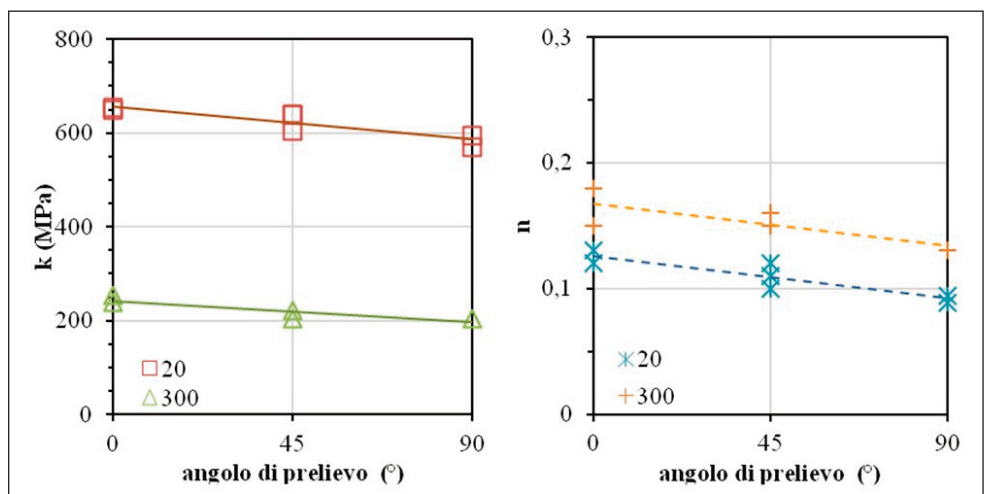
FIG. 6
Curva di trazione sforzo-deformazione plastica nominali (a) e interpolazione (b) del tratto a deformazione plastica omogenea della curva di flusso con la legge di Hollomon (300 °C, angolo di prelievo di 90°).



Nominal stress-plastic strain curve (a) and fitting (b) by Hollomon's law in the homogeneous plastic field of the flow stress curve (300°C, specimen orientation 90°).

FIG. 7
Effetto dell'angolo di prelievo e della temperatura sui coefficienti di resistenza (k) e d'incrudimento (n) del titanio (Ti CP grade 2).

Influence of specimen orientation and temperature on k and n coefficients for Ti CP grade 2.



provini (Figura 5), riportati come punti isolati nella Figura 9. Questi si pongono in linea con le curve limite alle differenti temperature.

I risultati mostrano inoltre che la direzione di laminazione non influenza in modo significativo le deformazioni e l'andamento della FLC. Questo è compatibile con lo stato ricotto di fornitura delle lamiere e conferma i risultati delle prove di trazione che non mostrano una significativa anisotropia nel materiale.

MODELLO SIMULATIVO E SUA VALIDAZIONE

Combinare la determinazione della legge di flusso del materiale e la relativa FLC sperimentale, secondo le metodologie descritte, con i risultati di simulazioni, permette di valutare la fattibilità dello stampaggio del prodotto in esame. Oggi sono disponibili diversi modelli di calcolo della deformazione plastica che consentono tale simulazione. In questo lavoro si è utilizzato un modello agli elementi finiti (FEM) implementato in ambiente Pamstamp 2G, di largo utilizzo per la simulazione di operazioni d'imbutitura.

Per la validazione dell'analisi è stato realizzato un modello FEM della prova Nakazima con l'intento di confrontare le deformazioni previste dal modello simulativo con quelle sperimentali. Tale confronto è stato fatto considerando una lamiera di larghezza pari a 34 mm. Gli stampi sono stati considerati perfettamente rigidi e la lamiera rigido-plastica, considerando una curva di flusso descritta dalla legge di Hollomon con i valori dei coefficienti (k e n) ottenuti per interpolazione dalle prove di trazione (Figura 7 e 10). Durante la simulazione, il perimetro della lamiera è stato completamente vincolato per rappresentare l'effetto del rompi grinza che impedisce lo scorrimento della lamiera stessa.

Il confronto è stato condotto in termini di geometria della lamiera a rottura come riportato in Figura 11. In particolare, sono stati confrontati la geometria ottenuta dal modello FEM e quella sperimentale e sono state valutate la corsa del punzone in corrispondenza della quale avviene la rottura della lamiera, la larghezza massima e minima della lamiera deformata a rottura e la posizione sulla lamiera in cui ha luogo la rottura: è evidente il buon accordo ottenuto. Nel modello FEM la zona in cui avviene la rottura è identificata come l'insieme di quegli elementi della griglia per i quali si hanno coppie di deformazione massima e minima tali da superare i limiti di formabilità individuati nel corso delle prove sperimentali e riportati in Figura 9. Questi elementi sono evidenziati in Figura 11 e mostrano come il modello FEM sia in grado di prevedere correttamente la zona di rottura.

ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL MODELLO

Come esempio di applicazione del modello per valutare la possibilità di ottenere per stampaggio un particolare complesso, si è scelta l'analisi della formatura della scatola di un differenziale, realizzata in titanio, di un autoveicolo industriale (Figura 12). La forma del pezzo ha tre caratteristiche geometriche particolari che rappresentano aspetti critici nella lavorazione di stampaggio della lamiera:

FIG. 11
Confronto tra le deformazioni previste dal modello FEM e quelle sperimentali per la prova Nakazima a temperatura 20°C e con larghezza della lamiera pari a 34 mm.



Comparison between FEM results and experimental deformations measured after Nakazima test at 20°C on 34 mm width sheet.

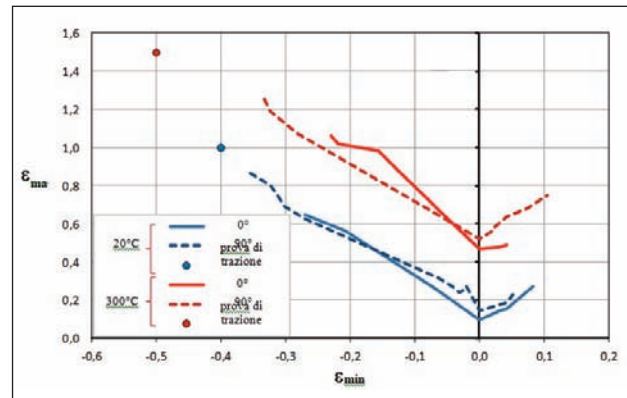


FIG. 9 Curve FLC sperimentali del Ti CP grade 2 ricotto.
Experimental FLC curves for annealed Ti CP grade 2.

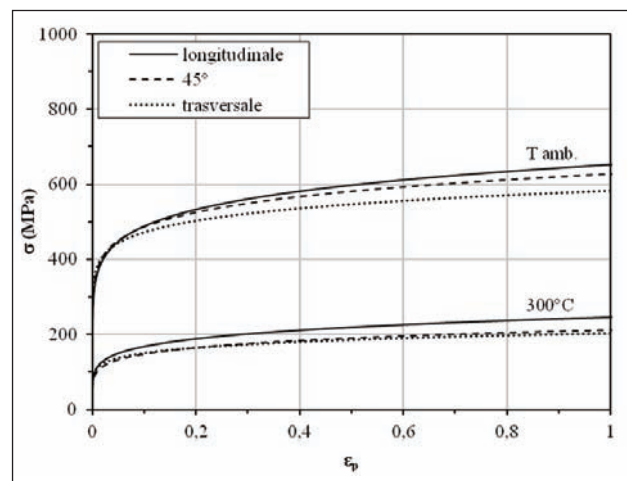


FIG. 10 Curve di flusso del materiale in funzione della temperatura e della giacitura tracciate in base alle prove di trazione realizzate.

Flow stress curves as a function of temperature and orientation angle estimated from tensile tests.

- la cupola sferica caratterizzata da elevata profondità di stampaggio, nella quale i cammini di sforzo e deformazione sono uguali lungo le due direzioni tangenziali;
- i due fianchi laterali, caratterizzati da pareti verticali;
- il "naso", una protrusione dalla forma complessa caratterizzata da cambiamenti nella direzione di flusso del materiale e da raggi di raccordo limitati che rendono difficile lo scorrimento del materiale, provocando elevate deformazioni localizzate e quindi elevato rischio di rottura della lamiera.

Lo stampaggio del pezzo è stato simulato sia a freddo che a tiepido (20° C e 300° C), in modo da evidenziare le differenze delle

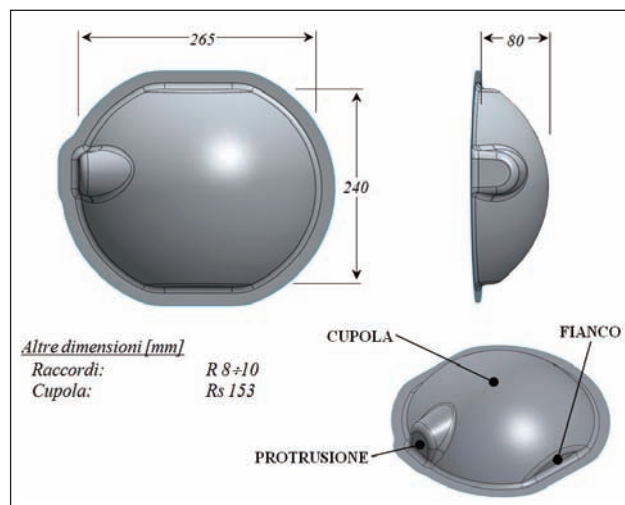


Fig. 12 Geometria della scatola del differenziale di un veicolo industriale.

Geometry of the differential gear box.

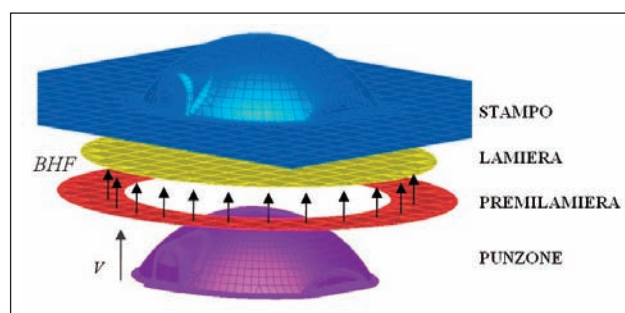


FIG. 13 Modello FEM.

FEM model.

Lamiera	20°C	300°C
Materiale	Ti CP GR.2 ricotto	
Dimensioni [mm]	ø 360 x 1	
E [GPa]	106	88
Legge di flusso	k = 640	k = 204
$\sigma = k\dot{\epsilon}^n$	n = 0.12	n = 0.15
Processo		
v [mm/s]	40	
BHF [kN]	minima necessaria	
Attrito Lamiera		
con Punzone $\mu =$	T = μN	
con altri $\mu =$	0.12	0.45
	0.12	0.35

TAB. 2 Parametri di Processo.

Process parameters.

due condizioni lavorative in termini di deformazioni massime ammissibili (confronto con le curve FLC) e di forze necessarie alla lavorazione per valutarne la fattibilità.

Le simulazioni sono state condotte modellando matrice, punzone, premilamiera e lamiera indeformata tramite elementi shell, come riportato in Figura 13. Matrice, punzone e premilamiera sono stati considerati corpi rigidi, mentre la lamiera è stata modellata come un oggetto elasto-plastico isotropo, vista la

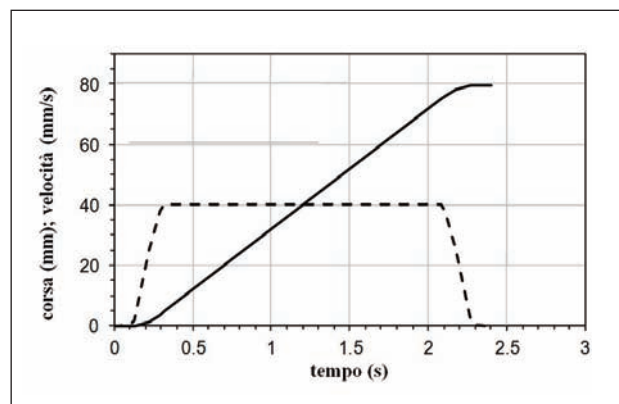


FIG. 14 Cinematica del punzone.

Punch movement.

ridotta variabilità dei coefficienti rispetto alla direzione di laminazione.

Sono stati usati 5 punti di integrazione lungo lo spessore mentre l'infittimento della mesh è stato impostato in modo adattativo secondo criteri di prossimità, curvatura e deformazione.

La lamiera di partenza è un disco con diametro pari a 360 mm e spessore 1 mm. Il modulo elastico e i coefficienti d'attrito tra la lamiera e gli altri corpi sono stati ricavati dalla letteratura, supponendo una buona lubrificazione a freddo e una non efficiente a tiepido [23][24][25]. Il modello d'attrito usato è quello coulombiano.

La velocità del punzone (V) è stata mantenuta costante durante il processo come riportato in Figura 14 e in Tabella 2 assieme agli altri parametri della simulazione.

Il valore della forza del premilamiera BHF è stato impostato costante durante la singola simulazione e pari al minimo necessario per evitare la grinzatura della lamiera. Infatti, l'assenza di grinze nel pezzo è condizione necessaria al confronto tra i risultati e, poiché la BHF dipende dalle caratteristiche del materiale (flow stress) a loro volta legate alla temperatura, sono state effettuate alcune simulazioni preliminari per determinare le BHF minime da utilizzare nei due casi. Non sono stati considerati valori più elevati per non ostacolare ulteriormente il flusso del materiale limitandone la formabilità.

Il confronto tra i risultati delle simulazioni (Figura 15 e Figura 16) evidenzia come la lavorazione sia realizzabile solamente in temperatura. A freddo, infatti, i punti sulla FLC mostrano come il materiale giunga a rottura per valori di BHF adeguati a evitare la formazione di grinze (20kN a temperatura ambiente e 5 kN a tiepido). La lavorazione a tiepido, invece, caratterizzata da una curva di flusso meno severa (Tabella 1 e Figura 10) e da una formabilità molto maggiore (Figura 9), permette di ottenere un pezzo sano, esente da grinze o rotture con un assottigliamento massimo nel pezzo contenuto, 21% in corrispondenza della protrusione. Inoltre, sebbene a 300°C il coefficiente d'attrito tra lamiera e stampi sia elevato, il materiale è meno resistente e quindi la BHF richiesta è bassa (5 kN). Ne consegue, quindi, una forza d'attrito contenuta che permette un adeguato scorrimento della lamiera. La forza di stampaggio è minore a tiepido (Figura 17).

CONCLUSIONI

Il lavoro sperimentale ha permesso di definire una procedura e di sviluppare un modello di calcolo per la verifica di operazioni di stampaggio di lamiera di materiali, quali il titanio, normalmente difficili da lavorare a freddo e in geometrie complesse, evitando lunghe e costose fasi di messa a punto del processo produttivo.

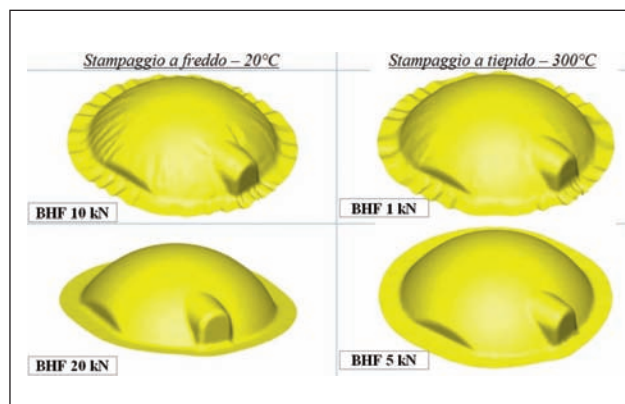


FIG. 15 *Effetto della forza del prelamiera sul componente stampato.*
Influence of BHF on the stamped component.

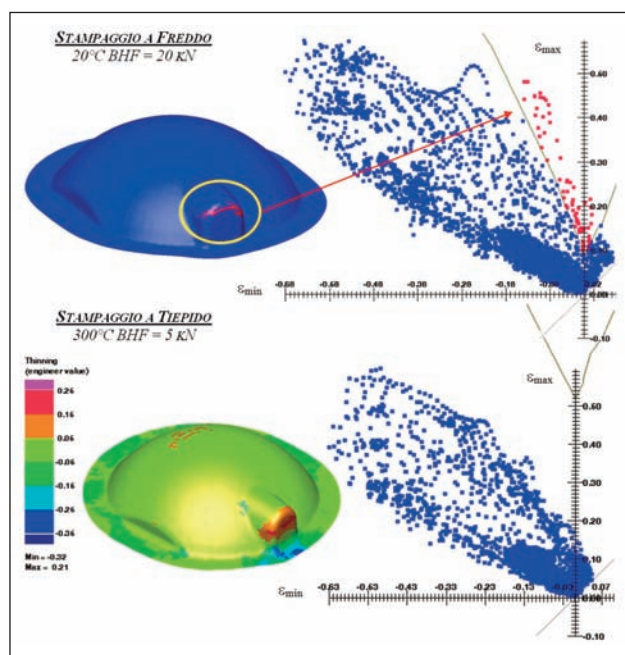


FIG. 16 *Confronto tra formabilità a freddo e a tiepido del pezzo.*
Comparison between cold and warm part formability.

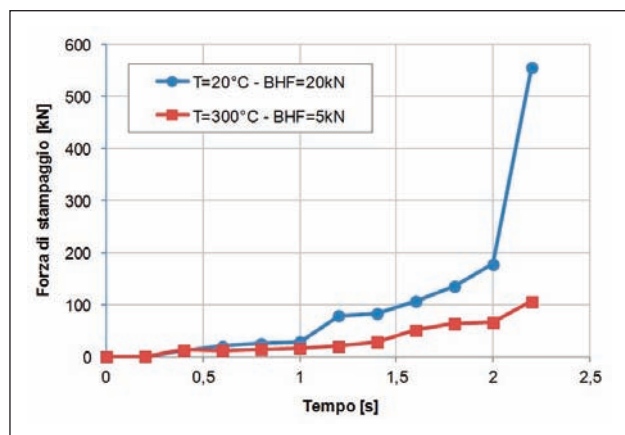


FIG. 17 *Forze di stampaggio.*
Stamping forces.

I risultati ottenuti hanno permesso di descrivere il comportamento di lamiere ricotte di titanio commercialmente puro, grade 2, sottoposte a stati di sollecitazione monoassiale (prova di trazione) e biassiale (prova Nakazima), quando deformate a temperatura ambiente e a tiepido, e hanno fornito dati utili per lo sviluppo del modello simulativo delle operazioni di stampaggio. Analizzando i risultati della prova di trazione e delle curve di formabilità, si sono resi evidenti i vantaggi delle lavorazioni a tiepido. Infatti, è stato possibile notare come, già alla temperatura di 300°C, le leggi di flusso del materiale prevedano sollecitazioni minori, mentre le curve di formabilità permettano di raggiungere in sicurezza valori di deformazione membranali e assottigliamenti molto più elevati, senza incorrere nella rottura della lamiera.

I dati ottenuti dalle prove sperimentali sono stati usati anche per la validazione preliminare del modello simulativo, confrontando i risultati ottenuti nello studio della deformazione di una striscia di lamiera con punzone sferico durante una prova Nakazima.

Grazie alla buona capacità predittiva così dimostrata dal modello FEM è stato possibile condurre una campagna simulativa dello stampaggio di un componente "automotive", che ha confermato come il miglioramento nel comportamento del materiale a tiepido possa giocare un ruolo benefico nella realizzazione delle parti più critiche del prodotto. Con riferimento alla geometria considerata, si è constatata l'impossibilità di ottenere il pezzo sano a temperatura ambiente, mentre a tiepido, la maggiore deformabilità del materiale rende possibile lo stampaggio. Dal punto di vista della lavorazione, inoltre, si è potuto verificare come la minore forza necessaria per lo stampaggio a tiepido, nonostante il maggior attrito tra lamiera e pezzo, comporti una minore forza richiesta dal prelamiera e permetta di contenere gli assottigliamenti nelle zone critiche.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato svolto grazie ai finanziamenti del MIUR per il progetto PRIN2008-DAMEN.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cigada A., Pastore T., "Titanio e leghe di titanio", "Struttura e proprietà dei materiali metallici", McGraw-Hill, Milano, 2012: 357-368.
- [2] Li D, Ghosh AK, Xia X., "Warm forming of Aluminum sheet - a review", Internal Report at Department of Materials Science and Engineering, University of Michigan.
- [3] Boyer R., Welsch G., Collings E.W., "Materials Properties Handbook: Titanium Alloys", ASM International, MetalsPark, OH, 1994.
- [4] Allwood J.M., Shouler D.R., "Paddle Forming: A Novel Class of Sheet Metal Forming Processes", CIRP Annals - Manufacturing Technology, 56 (1) 2007: 257-260.
- [5] Neugebauer R, Altan T, Geiger M, Kleiner M, Sterzing A., "Sheet metal forming at elevated temperatures", CIRP Annals - Manufacturing Technology, 55 (2) 2006: 793-816.
- [6] Donachie MJ., "Titanium a technical guide", 2nd ed., ASM International, MetalsPark, OH, 2000.
- [7] Ozturk F, Ece RE, Polat N, Koksall A., "Effect of warm temperature on springback compensation of titanium sheet", Materials and Manufacturing Processes, 25(9) 2010: 1021-1024.
- [8] Lai CP, Chan LC, Chow CL, Yu KM, "Warm-forming of light-weight alloys under multi-stage forming process", Advances in Materials and Processing Technologies 2009;83-86:88-93. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.83-86.88
- [9] Chen F.K., Chiu K.H., "Stamping formability of pure titanium sheets", Journal of Materials Processing Technology, 170, 2005: 181-186.
- [10] Keeler SP., "Circular grid systems: A valuable aid for evaluation sheet forming.", Sheet Met. Ind., 45, 1969:633-640.
- [11] Goodwin GM., "Application of strain analysis to sheet metal forming problems", Metall. Ital., 60, 1968: 767-771.

- [12] Teixeira P, Santos AD, Andrade Pires M, Cesar de Sa JMA, « Finite element prediction of ductile fracture in sheet metal forming processes », *Journal of Material Processing Technology*, 177, 2006: 278-281.
- [13] Makinouchi A., "Sheet Metal Forming Simulation in Industry", *Journal of Material Processing Technology*, 60, 1996: 19-26.
- [14] Jang S., Nezu K., "Application of an Inverse FE Approach in the Concurrent Design of Sheet Stamping", *Journal of Material Processing Technology*, 79, 1998: 86-93.
- [15] Santham A.T., Reed-Hill R.E., *Metall. Trans.*, 2, 1971: 2619-2622.
- [16] Monterio, Reed-Hill R.E., *Metall. Trans.*, 4, 1973: 1011-1015.
- [17] Elechie, M., 1980. Eds. Kimura H., Izumo G., *Titanium '80, Proceedings of IV International Conference on Titanium*, Kyoto, May 19-22, 1980. TMS of AMIE, Warrendale, pp. 831-840.
- [18] Ramachandran V., Baldwin D.H., Reed-Hill R.E., *Metall. Trans.* 1, 1990: 3011.
- [19] Senkov, O.N., Jonas, J.J., *Metall. Trans. A*, 27, 1996: 1877-1887.
- [20] Venugopala S., Venugopalb P., Mannana S.L., "Optimisation of cold and warm workability of commercially pure titanium using dynamic materials model (DMM) instability maps", *Journal of Materials Processing Technology*, 202, 2008: 201-215
- [21] ASTM E2218-2. Standard Test Method for determining Forming Limit Curves.
- [22] Embury J.D., Duncan J.L., "Formability Maps", *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 11, 1981: 505-521.
- [23] Young Modulus of Elasticity for Metals and Alloys, www.engineeringtoolbox.com (May 2012).
- [24] Adamus J., "Theoretical and experimental analysis of the sheet-titanium forging process", *Archives of metallurgy and materials*, 54 (3) 2009: 705-709.
- [25] Yetim AF. "Investigation of wear behavior of titanium oxide films, produced by anodic oxidation, on commercially pure titanium in vacuum condition", *Surface & Coatings Technology*, 205, 2010: 1757-1763.

Abstract

Cold and warm formability of titanium sheets

Keywords: titanium and its alloys, plastic deformation, materials characterization, numerical simulation

The knowledge of stress and strain relationship and material fracture conditions is fundamental to optimize sheet stamping processes in terms of part feasibility. In fact, the numerical models commonly used in simulation can give reliable results only if the input parameters, such as material characterization at different temperatures and friction condition are correctly estimated. This is particularly important in the case of hard-to-deform materials, such as Titanium and its alloys.

The simplest test to be carried out for the definition of material properties is the tensile test that can be executed at different temperatures (Figures 1 and 5). The main limitation of this test is related to the mono-axial stress state; on the contrary, the stress and strain conditions in actual stamping operations are more complex, being 3-dimensional. For this reason several tests have been developed, in particular Nakazima test (Figures 2-4). In this test a 2-dimensional stress state is generated and the maximum deformation at break can be easily identified allowing the definition of safe and unsafe deformation areas. In order to evaluate the influence of strain distribution in the material, several tests are carried out on sheet strips of different widths (Figure 8). In this way, several couples of limit membranal strain states can be obtained and plotted on a diagram reporting the so called FLC (Formability Limit Curves) identifying the safe and unsafe deformation areas (Figure 9). These curves can be obtained for different materials, thicknesses and temperatures.

The present research focuses on warm forming of non-axisymmetric components made of titanium CP; this material is characterized by low formability and high springback. Uniaxial tensile and Nakazima tests were performed to investigate the material behavior at room temperature and 300 °C. The flow stress curves derived from uniaxial tensile tests (Figure 9 and Figure 10) have been used to simulate the stamping process of an automotive component (Figure 12) by using the commercial finite element code PamStamp 2G (Figure 13) at room temperature and at 300°C.

The simulations confirm that the component cannot be produced at room temperature. However, the warm stamping process (Figure 15 and Figure 16) permit to obtain the component due to the higher material formability at 300°C. In order to validate the simulation results, the Nakazima test has been preliminary simulated and the results in terms of deformation have been compared with the experimental one obtaining a good agreement (Figure 11).

Further investigations will be oriented to the evaluation of the optimal temperature for titanium-CP sheet stamping, to the study of the effect on friction of the oxide formed on the sheet surface and to the evaluation of springback effect during the process.