

**Angelo Bonomi
Francesco Brossa**

**SVILUPPO DELL'UTILIZZAZIONE
DEL TITANIO NEL CASALINGO**

**LAVORAZIONE DEL TITANIO E
RICERCA BIBLIOGRAFICA PRELIMINARE
SULL'OPERAZIONE DI IMBUTITURA PROFONDA**

Settembre 2000

Questo studio è stato condotto con il supporto del

CIRC

Centro per l'Innovazione e la Ricerca Chimica

SVILUPPO DELL'UTILIZZAZIONE DEL TITANIO NEL CASALINGO

LAVORAZIONE DEL TITANIO E RICERCA BIBLIOGRAFICA PRELIMINARE SULL'OPERAZIONE DI IMBUTITURA PROFONDA

1. INTRODUZIONE

Il titanio è un materiale metallico particolare che unisce la leggerezza a una grande resistenza meccanica e alla corrosione ed è inoltre dotato di un elevato grado di biocompatibilità. Pur non avendo produzioni importanti il titanio e le sue leghe hanno trovato applicazione specialmente in aeronautica per la sua leggerezza e resistenza meccanica, nelle apparecchiature dell'industria chimica e alimentare per la sua resistenza alla corrosione o come protesi medica per la sua biocompatibilità.

Più recentemente il titanio ha trovato applicazione anche in oggetti di uso molto comune come attrezzature sportive, braccialetti e casse d'orologio e nelle montature per occhiali. Molte altre potenziali applicazioni sono possibili e una di queste riguarda il casalingo e cioè l'uso del titanio come materiale per la produzione di pentolame, posateria ed altri attrezzi da cucina in sostituzione dell'acciaio inossidabile.

Rispetto all'acciaio inossidabile il titanio presenta una conducibilità termica leggermente superiore, un peso che è poco più della metà, delle proprietà meccaniche simili e una resistenza alla corrosione superiore.

Uno degli aspetti più importanti del titanio per un suo eventuale uso nella fabbricazione dei casalinghi riguarda la sua attitudine all'imbutitura profonda, operazione indispensabile per la fabbricazione di pentolame da lamiera di titanio. Per questa ragione questo studio, oltre a dare indicazioni su come si possono eseguire le varie lavorazioni sul titanio, presenta i risultati di una ricerca bibliografica preliminare su studi fatti in questo campo per il titanio per verificare la possibilità di imbutire questo metallo possibilmente in condizioni molto vicine a quelle usate per l'acciaio inossidabile e con un minimo di modifiche nelle apparecchiature da usare.

2. GENERALITA' SUL TITANIO

Il titanio è un elemento molto diffuso sulla terra, in particolare in Australia, in genere sotto forma minerale di ilmenite FeTiO_3 o rutilo TiO_2 . Ambedue i minerali costituiscono la fonte principale per la produzione di pigmenti bianchi per vernici che costituiscono l'industria principale del titanio. La fabbricazione del metallo riguarda un'industria minore ma di valore strategico per l'importanza che ha questo metallo e le sue leghe nel campo aerospaziale e militare. La produzione del metallo avviene in genere a partire dal rutilo che viene trasformato in cloruro di titanio TiCl_4 che è a sua volta ridotto con magnesio metallico formando la cosiddetta spugna di titanio. I grandi produttori di spugna di titanio si trovano in Giappone, Russia e USA.

La trasformazione della spugna in semilavorati metallici avviene dapprima per fusione in forni speciali ad arco sotto vuoto (VAR), eventualmente con l'aggiunta di altri metalli per formare delle leghe. Si producono così dei lingotti che a loro volta sono laminati a caldo in maniera molto simile all'acciaio inossidabile con laminatoi tipo Sendzimir ed eventualmente poi a freddo per la produzione di lamiere sottili. L'industria della fusione e laminazione del titanio è più diffusa di quella della produzione di spugna e impianti esistono anche in Europa in particolare in Francia, Inghilterra e Germania e in misura minore anche in Italia.

Il titanio e le sue leghe possiedono caratteristiche specifiche come:

- Bassa densità vicina ai $4,5 \text{ g/cm}^3$, intermedia tra quella dell'alluminio e degli acciai
- Resistenza meccanica elevata, in particolare per le leghe, associata ad una buona resistenza alla fatica.
- Resistenza alla corrosione in particolare all'acqua di mare
- Debole fragilizzazione alle basse temperature
- Amagnetismo

I prodotti laminati di titanio sono costituiti in genere da barre, fili, lamiere a base di metallo puro o leghe. I prodotti a base di solo titanio esistono in vari gradi di purezza, che dipende dal numero di rifusioni effettuate al VAR, esiste anche una qualità di titanio contenente piccole quantità di palladio per accrescere ancor più la resistenza alla corrosione. Il mercato del titanio non legato rappresenta circa il 25-30 % del mercato globale, comprendente anche le sue leghe, e che dovrebbe essere attualmente poco inferiore alle 200'000 t/a. La lega principale di titanio è la Ti-6Al-4V contenente circa il 6% di alluminio e 4% di vanadio, molto usata in campo aeronautico, costituisce circa il 50% del mercato totale. Le altre leghe di titanio che possono contenere anche altri elementi come Sn, Mo, Cr e Zr hanno un mercato minore dell'ordine del 20-25%.

Il titanio possiede a temperatura ambiente una struttura esagonale compatta chiamata fase "alfa". Verso la temperatura di circa 900°C (in funzione della sua purezza) si trasforma in una struttura cubica chiamata fase "beta". Gli elementi di lega e/o le impurezze favoriscono l'una o l'altra struttura e precisamente:

- Sono "alfageniche" le impurezze principali del titanio e cioè: O, N, C, B e l'Al come legante
- Sono "betagenici" elementi di lega come V, Mo, Nb, Ta
- Altri elementi di lega come lo Sn e lo Zr hanno un comportamento neutro.

I prodotti commerciali a base di titanio hanno quindi normalmente una struttura alfa mentre la lega principale Ti-6Al-4V ha una struttura mista alfa-beta. Altre leghe come la Ti-5Al-2,5Sn hanno una struttura alfa con un punto di trasformazione in beta a circa 1000°C mentre leghe come la Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr hanno a temperatura ambiente una struttura beta. Quest'ultima lega, sviluppata per applicazioni petrolifere offshore, è chiamata comunemente betaC.

Un'altra caratteristica delle leghe di titanio è la possibilità di presentare in certe condizioni fenomeni di superplasticità che possono essere utilizzati per la formatura di parti complesse. Questo effetto è utilizzato per la lega Ti-6Al-4V nella produzione di parti aeronautiche.

Un'altra lega, la Ti-Ni, presenta proprietà di memoria di forma ed è stata usata ad esempio per produrre antenne per cellulari indeformabili al piegamento. Infine si può notare che la lega Ti-Nb presenta proprietà superconduttrici ed è usata per la ricerca (anelli per l'accelerazione di particelle nucleari del CERN) e per apparecchiature scientifiche e mediche che usano la risonanza magnetica nucleare per le loro indagini.

3. LA LAVORAZIONE DEL TITANIO

La lavorazione del titanio presenta alcune somiglianze con quella dell'acciaio inossidabile pur presentando tuttavia alcuni aspetti particolari. Le lavorazioni principali considerate sono: il trattamento termico, le lavorazioni a caldo, le lavorazioni a freddo, il decapaggio, la lavorazione all'utensile, la saldatura e la fonderia.

3.1. Trattamento termico del titanio

Lo stato più duttile del titanio è ottenuto generalmente per ricottura. Essa può avvenire da una temperatura poco al di sotto del punto di trasformazione alfa-beta fino a 350°-400°C. Al di sotto di queste temperature la cinetica di ricottura diventa estremamente lenta.

Lo stato più incrudito per il titanio si ottiene per tempera e invecchiamento e si usa soprattutto per le leghe di titanio giocando sulle forme metastabili alfa e beta.

Il trattamento di distensione a seguito di lavorazioni come lavorazione all'utensile, saldatura e imbutitura può essere fatto per il titanio a temperature tra i 480° e i 600°C con tempi fino a 4 ore e raffreddamento all'aria. Per le leghe le temperature e i tempi sono variabili secondo il tipo.

La ricottura del titanio avviene a temperature tra i 650° e i 760°C con tempi fino a 3 ore. Anche qui le condizioni di ricottura delle leghe sono variabili secondo il tipo.

Per effettuare un buon trattamento termico del titanio occorre tener conto di una serie di precauzioni. Il titanio è molto reattivo alle temperature elevate con elementi come l'ossigeno, l'idrogeno, l'azoto e il carbonio che possono penetrare nel metallo e degradare le sue proprietà.

L'idrogenazione è da evitare tenendo conto che il tenore di H nei prodotti finiti non deve in genere superare i 125-250 ppm. L'idrogeno può provenire da forni a fiamma che lavorano in condizioni riducenti o semplicemente dall'umidità atmosferica. Il riscaldamento all'aria in forno elettrico resta il modo più pratico per evitare questa contaminazione.

L'ossidazione del titanio all'aria inizia a circa 425°C con l'apparizione di un film colorato. A 600°C si forma uno strato ossidato aderente con diffusione di ossigeno nella zona sottostante. Lo strato formato e la zona contaminata sottostante sono tanto più spessi quanto più alta è la temperatura e il tempo di riscaldamento. Questi due strati devono essere eliminati ulteriormente per via meccanica o per decapaggio. Quando questa ossidazione non può essere tollerata (prodotti sottili o prodotti finiti già in quota) è necessario utilizzare gas di protezione inerti (argon) o il vuoto.

La nitrurazione e la carburazione del titanio avviene in maniera più lenta che nel caso dell'ossidazione e per i trattamenti all'aria lo strato di nitruro che si può formare può essere eliminato facilmente per via meccanica o per decapaggio. Occorre notare che le atmosfere protettive largamente usate per gli acciai a base di CO, CO₂, H₂ o NH₃ possono provocare carburazioni e nitrurazioni profonde e non sono compatibili con il titanio e le sue leghe.

3.2. Lavorazioni a caldo

I pericoli di contaminazione, il potere emissivo elevato e la conducibilità termica non elevata rendono la formatura del titanio delicata e da condurre con la massima cura. Normalmente il titanio è riscaldato per la formatura in forni ugualmente utilizzati per gli acciai. I forni elettrici restano comunque i migliori producendo contaminazioni del metallo molto superficiali ovvero si può lavorare in forni con fiamme ricche in ossigeno (5% di eccesso) e schermature che proteggano il metallo dal contatto diretto della fiamma. E' bene comunque prendere delle precauzioni lasciando il metallo il tempo stretto necessario per riscaldarlo (contare circa da 1 a 2 minuti per millimetro di spessore o di diametro) e ridurre al minimo il tempo dal forno alla forgia. E' consigliabile utilizzare

degli utensili potenti per limitare il numero di riscaldi. Per le matrici conviene preriscaldarle a 300°-400°C e utilizzare lubrificanti come la grafite colloidale, il bisolfuro di molibdeno per evitare l'incollatura del metallo. Riguardo alle temperature si cerca di iniziare con il titanio in fase beta finendo in fase alfa e quindi partendo da temperature di circa 950°C e facendo la finitura a circa 850°C. Per le leghe le temperature dipendono dal tipo.

Per lo stampaggio con pressa meccanica i migliori risultati sul titanio non legato si ottengono riscaldandolo a 400-500°C per 10-15 minuti e scaldando lo stampo a 90-150°C.

3.3. Lavorazioni a freddo

Le caratteristiche meccaniche a freddo del titanio puro commerciale assomigliano a quelle dell'acciaio dolce con alcune importanti differenze che sono:

- L'incrudimento del titanio è molto rapido e una riduzione di sezione del 15% può far aumentare il carico di rottura da 4000 a 5500 Kg/cm².
- Il modulo di elasticità è dell'ordine 11'000 Kg/mm² ed è quindi circa la metà di quello dell'acciaio. Quindi a sforzo uguale il titanio si deforma due volte di più ovvero a deformazione uguale il titanio subisce uno sforzo che è la metà. Per ottenere una deformazione permanente residua occorre quindi far subire al titanio un allungamento doppio di quello necessario per un acciaio che ha lo stesso limite elastico. Il titanio è quindi un materiale piuttosto flessibile.
- Il comportamento meccanico della lamiera di titanio è fortemente anisotropo con proprietà meccaniche che variano sensibilmente passando dalla direzione di laminazione a quella trasversale.
- Il titanio presenta una forte tendenza al grippaggio. Le operazioni di imbutitura necessitano quindi di una lubrificazione abbondante.

In generale le qualità dolci di titanio puro commerciale (con bassi tenori di impurezze) si formano senza troppa difficoltà. Il ritorno elastico è importante e può richiedere una correzione degli attrezzi. Anche l'imbutitura profonda è possibile in presenza di un'abbondante lubrificazione a base di grafite o bisolfuro di molibdeno da preferire agli oli o grassi. La pressione necessaria per lo stampaggio è leggermente maggiore di quella usata per l'acciaio e la deformazione massima ottenibile dipende dalla velocità di deformazione. In generale le presse idrauliche dovranno essere usate a un mezzo o a un terzo della velocità usata per l'acciaio con l'uso eventuale di un tampone di gomma soprattutto nel caso di lamiere sottili.

La piegatura del titanio puro commerciale è facile e può essere fatta quasi ad angolo vivo senza fessure. In generale per lamiere di spessore inferiore a 2 mm è possibile ottenere raggi di curvatura pari a 3 volte lo spessore.

Rispetto allo stampaggio a caldo, nello stampaggio a freddo del titanio si ha minore duttilità, ritorno elastico più elevato e la necessità di maggiori pressioni di formatura.

3.4. Decapaggio del titanio

Il decapaggio è utile per migliorare l'aspetto superficiale del titanio e in particolare per eliminare l'eventuale strato di ossido in superficie soprattutto se il metallo è stato all'aria a temperature dell'ordine dei 600°C.

Il trattamento più efficace di decapaggio del titanio consiste in una sabbiatura della superficie seguita da un trattamento in un primo bagno a base di soda e nitrato seguito da un secondo trattamento in un bagno nitrofluoridrico.

3.5. Lavorazione del titanio all'utensile

La lavorazione del titanio all'utensile deve tener conto delle sue specifiche caratteristiche che lo rendono simile per questa operazione all'acciaio inossidabile. I due fattori più importanti che determinano le condizioni di lavorazione del titanio sono la conducibilità termica limitata e la forma particolare dei trucioli che permettono una limitata area di contatto con l'utensile creando così problemi di surriscaldamento locale. Le velocità di taglio non devono essere troppo elevate ma con avanzamenti relativamente rapidi e utensili resistenti alle alte temperature di taglio. E' quindi necessario assicurare la massima rigidità a tutto il sistema di lavorazione per compensare l'elasticità elevata del titanio ed evitare il più possibile le vibrazioni.

Le principali lavorazioni a macchina utilizzabili sono:

- Tornitura: si tratta di un tipo di lavorazione che non presenta particolari difficoltà con inserti di carburo e refrigeranti a base di soluzioni acquose di nitrato di sodio o emulsione di olio in acqua.
- Fresatura: si tratta di un'operazione che richiede maggiore attenzione poiché i trucioli hanno tendenza a restare incollati all'utensile. Per evitare questo fenomeno è opportuno impiegare una fresatura con alimentazione concorde.
- Foratura: non presenta particolari difficoltà usando basse velocità e permettendo il libero deflusso dei trucioli.
- Maschiatura: si hanno buoni risultati con maschi nitruati a filetti interrotti e a spirale.
- Alesatura: accorrono alesatori con un numero minimo di scanalature per favorire l'eliminazione dei trucioli.
- Brocciatura: le brocche devono essere affilate a umido e regolarmente controllate
- Rettifica: occorrono velocità notevolmente più basse di quelle usate per gli acciai, basse profondità di passata ed alimentazioni decrescenti.

3.6. Taglio del titanio

Il titanio può essere tagliato con le tecniche più usuali: taglio con la sega (meglio se a nastro e a bassa velocità), taglio termico con cannello ossiacetilenico o a ossigeno (pulire la parte ossidata dopo il taglio), taglio al plasma, taglio al laser di potenza e taglio con acqua pressurizzata.

3.7. Saldatura del titanio

Il titanio e la maggior parte delle sue leghe (alfa e beta) sono saldabili. Più difficile è la saldatura delle leghe (alfa + beta) come la Ti-6Al-4V molto usata in aeronautica.

I criteri essenziali da seguire sono:

- Pulire accuratamente i bordi da saldare per evitare la contaminazione da olio o altro sporco superficiale
- Proteggere durante l'operazione le parti calde con gas inerti (argon) poiché a partire da 400°C fino a 800°C l'ossigeno e l'azoto dell'aria entrano nel metallo rendendolo fragile. Nel caso della saldatura per punti questa precauzione non è necessaria vista la brevità del riscaldamento.

I metodi di saldatura utilizzabili sono i più vari da quelli con arco in gas inerte (TIG e MIG), a resistenza elettrica e meno frequentemente quelli al plasma, al laser e con fascio elettronico.

3.8. Fonderia di titanio

Il titanio può essere formato anche sotto forma di getti da fonderia. La formatura può avvenire con grafite, ceramica, cera persa o a sabbia. La fusione e colata deve avvenire in atmosfera inerte. Per migliorare la qualità del getto si può eseguire una ulteriore forgiatura o una pressatura isostatica a caldo (HIP).

4. RICERCA BIBLIOGRAFICA SUL TITANIO

Come già detto nel capitolo introduttivo la ricerca bibliografica sul titanio è stata limitata all'operazione di imbutitura profonda (in inglese deep drawing).

Per la ricerca bibliografica si sono scelti i servizi dell'European Information Network Service (EINS) che mette a disposizione un insieme numeroso di banche dati nel campo scientifico, tecnico ed economico.

Le banche dati che possono interessare per una ricerca sull'imbutitura profonda del titanio sono:

METADEX: di origine americana è la più importante banca dati nel campo metallurgico e dei materiali.

COMPEDEX*PLUS: anch'essa di origine americana riprende molti articoli riguardanti l'ingegneria dei materiali

CHEMABS: grande banca dati generale americana nel campo della chimica e dell'ingegneria

NTIS: anch'essa americana offre documenti del Servizio Tecnico Nazionale del Dipartimento del Commercio americano. Contiene sovente traduzioni di documenti tecnici russi o giapponesi.

PASCAL: versione francese del CHEMABS americano

CETIM: banca del centro di ricerche francese per l'industria meccanica

La scelta delle banche da usare è caduta sulle prime quattro della lista precedente, che sono le più importanti, e soprattutto sono tutte residenti nei calcolatori del FIZ di Karlsruhe (Germania) e ciò permette di effettuare interrogazioni comprendenti tutte quattro le banche allo stesso tempo.

Per effettuare interrogazioni efficaci occorre una strategia adatta con parole chiavi appropriate. Nel nostro caso le parole chiave principali sono "titanium" e "deep drawing". Una prima interrogazione sulla base di queste parole identifica ben circa 500 documenti corrispondenti, tuttavia, un esame di parte dei titoli mostra che la maggior parte dei documenti riguarda ricerche sull'effetto del titanio presente nell'acciaio sull'imbutitura profonda di quest'ultimo e lo stesso per l'imbutitura dell'alluminio. Si è dovuto quindi modificare l'interrogazione in modo da escludere questo tipo di studi.

Con la nuova interrogazione si sono quindi identificati 78 documenti i cui titoli sono stati tutti esaminati effettuando una selezione di 31 documenti effettivamente pertinenti con la nostra ricerca.

Di questi 31 documenti si è chiesto il riferimento completo che in molti casi contiene anche un riassunto del lavoro. La lettura di questi riferimenti ha permesso un'ulteriore selezione dei documenti più accessibili (scritti in inglese, tedesco o francese) da quelli scritti ad esempio in giapponese o russo, inoltre, non sono stati selezionati documenti che si riferivano all'uso della superplasticità per le leghe di titanio avendo questo aspetto per il momento solo un interesse marginale per il nostro studio. Si è infine ottenuto un gruppo di 11 documenti le cui copie complete sono state richieste alla Biblioteca dell'Università di Hannover (Germania).

I riferimenti completi dei 31 documenti selezionati sono riportati nell'Allegato

4.1. Esame dei documenti identificati

Considerando il numero di documenti identificati e il periodo di ricerca che va dagli anni settanta ad oggi si può ritenere che l'imbutitura profonda del titanio non è mai stata l'oggetto di numerosi studi. Esaminando la distribuzione degli articoli nel tempo e per paese si hanno questi risultati:

- 5 articoli negli anni 70
- 13 articoli negli anni 80
- 12 articoli negli anni 90
- 1 articolo nel 2000

La distribuzione per paesi vede primo il Giappone con 11 articoli pari al 35% di tutti gli articoli seguito dagli USA con 5 articoli, dalla Germania con 4 articoli, la Francia e la Russia con 3 articoli, la Cina con 2 articoli e la Gran Bretagna, la Polonia e l'India con un articolo ciascuna.

Occorre notare che gli articoli americani sono apparsi tutti negli anni 80 e riguardavano essenzialmente lavori sulla superplasticità delle leghe di titanio. Il Giappone ha un'attività continua di ricerca nel campo dell'imbutitura profonda dagli anni 70 ai nostri giorni, e così la Germania e la Russia anche se in tono minore mentre la Cina è diventata attiva su questo argomento solo negli ultimi anni.

4.2. Contenuto tecnico dei documenti esaminati

Degli undici documenti richiesti alla Biblioteca Universitaria di Hannover ne sono stati ottenuti 10. L'undicesimo, un articolo francese del 1978 che paragona l'imbutitura del titanio e dello zirconio, non è stato ritenuto così importante da doverlo ricercare presso una biblioteca francese.

Dei dieci documenti recuperati nove trattano specificatamente dell'imbutitura del titanio commercialmente puro mentre uno, cinese del 1992, tratta essenzialmente dell'imbutitura profonda della lega beta Ti-15-3 (15%V, 3%Cr, 3%Sn, 3%Al) con ottima formabilità a freddo e sviluppata dalla società americana TIMET, essenzialmente per uso aeronautico, in sostituzione della ben nota lega Ti-6Al-4V che non ha buone proprietà di formabilità.

Degli altri nove articoli due sono dedicati a studi di imbutitura profonda a caldo mentre gli altri si occupano di imbutitura profonda a freddo. Gli autori di questi articoli si sono preoccupati soprattutto di studiare il problema dell'anisotropia del titanio e della lubrificazione durante l'operazione di imbutitura. Il grado di imbutitura è stato in genere espresso attraverso il fattore LDR (Limiting Drawing Ratio) in pratica il rapporto limite tra il diametro del disco iniziale e quello ottenuto sul fondo prima che si formi una rottura. I due articoli che trattano dell'imbutitura a caldo sono uno cinese del 1999 che si riferisce all'uso di lamiera di titanio di origine russa e uno britannico del 1992 che si riferisce a lamiere in titanio prodotte dall'IMI. Gli altri articoli che si riferiscono all'imbutitura a freddo sono quattro giapponesi compresi in un periodo dal 1976 al 1995, in relazione con le grandi società siderurgiche giapponesi come la NKK e la Kobe che trattano anche laminati di acciaio inossidabile, e gli altri tre tedeschi del 1970, 1980 e 1999 in relazione a lamiere di titanio della CONTIMET.

Particolarmente interessante è l'articolo tedesco più recente del 1999 "Umformung von Titanblechwerkstoffen" che presenta una rivista della situazione attuale dell'imbutitura del titanio. In questo articolo gli autori citano le applicazioni attuali del titanio nell'aeronautica e aerospaziale, nel militare, negli impianti chimici, l'offshore, come biomateriali, nell'attrezzatura sportiva e nella gioielleria. Le applicazioni nel casalingo non sono citate.

Riguardo alle caratteristiche di imbutitura della lamiera di titanio gli autori segnalano l'importanza della purezza del metallo e in particolare il basso tenore di ossigeno per assicurare una buona duttilità.

Le condizioni ottimali di imbutitura a freddo del titanio si riscontrano a velocità basse di formatura per contrastare la tendenza di questo metallo a incollarsi sugli attrezzi di acciaio. L'uso di anelli di plastica dello spessore di 1 mm, che permettono di ridurre lo sforzo necessario, e alimentazioni di lubrificanti dell'ordine di 3 g/m² favoriscono l'operazione e valori di LDR dell'ordine di 2,5 possono essere facilmente raggiungibili.

Un altro articolo tedesco del 1980 "Some Characteristic Data on Anisotropy and Forming Behaviour of Commercially Pure Titanium" riporta studi sull'anisotropia e sull'effetto della ricristallizzazione e incrudimento del titanio sull'imbutitura. L'uso di titanio con grana fine e il posizionamento del massimo sforzo sulla lamiera nella direzione longitudinale a quella della laminazione migliorano i risultati. Secondo questi autori l'ottimizzazione di tutti questi parametri e l'uso di plastica come lubrificante potrebbero far aumentare il LDR ottenibile dai valori attuali di 2,3-2,5 fino a un valore di circa 3,4 senza ricorrere a ricotture intermedie.

L'ultimo articolo tedesco del 1970 presenta un paragone tra la formatura a freddo di titanio e l'acciaio inossidabile ricordando che nel primo caso le deformazioni ottenibili sono più limitate e che possono occorrere più operazioni di formatura.

L'articolo giapponese più recente del 1995 "Plastic Deformation in Deep Drawing of Titanium Sheet" conduce uno studio dettagliato sul comportamento della lamiera di titanio all'imbutitura in funzione dell'orientazione della lamiera rispetto al senso di laminazione. Si sono ottenuti facilmente valori di LDR di 2,10 con formazione di quattro orecchie sui bordi e uno spessore delle pareti più sottile che sulla flangia.

Un secondo articolo giapponese del 1994 "Deep Drawing Commercially Pure Titanium Sheets" riporta invece studi sull'uso di vari lubrificanti e film di polietilene e sul valore della forza residua di formatura per contrastare il ritorno elastico del metallo BHF (Blank Holding Force). I risultati dimostrano il benefico effetto dell'uso di film di polietilene come lubrificante con il raggiungimento di LDR dell'ordine di oltre 2,5 mentre l'uso di un'adeguata BHF permette di eliminare la formazione di grinze sul metallo.

L'articolo giapponese del 1991 riguarda anch'esso studi sull'anisotropia del titanio e quindi sull'influenza dell'orientazione della lamiera sull'imbutitura a freddo. Le prove effettuate con punzoni del diametro di 50 mm hanno dimostrato che la deformazione del metallo nella direzione longitudinale della laminazione avviene essenzialmente per scorrimento e che le rotture si manifestano sempre in questa direzione anche quando lo sforzo è maggiore nel senso trasversale.

L'ultimo articolo giapponese del 1976 "Effects on Texture on Deep Drawability of Commercially Pure Titanium Sheets" presenta studi sull'influenza della fibra della lamiera di titanio sull'imbutitura. Si sono ottenuti, a seconda delle condizioni di laminazione, valori di LDR da 2,4 fino a 2,8.

Gli articoli che riportano studi sull'imbutitura profonda a caldo del titanio sono due. Il più recente è cinese del 1999 "Study on the microstructure and formability of commercially pure titanium in two temperature deep drawing". In questo articolo si descrivono i risultati di formatura ottenuti riscaldando la lamiera e gli attrezzi prima dell'operazione a varie temperature fino a 400°C. In linea generale la formabilità del titanio a caldo è circa doppia che quella a freddo. Anche la pressione di mantenimento necessaria dopo formatura (BHF) è circa la metà per l'imbutitura a caldo. Le rotture avvengono sempre nella direzione di laminazione. Il secondo articolo, britannico del 1990 "Hot deep drawing of titanium sheets" descrive prove di imbutitura a temperature ancora più alte a 550°C e 600°C. I gradi di imbutitura ottenibili sono elevati con un LDR superiore a 3. La formazione di quattro orecchie sulla flangia si osserva fino alla temperatura di 550°C mentre a 600°C si formano solo due orecchie.

In linea generale possiamo osservare che l'imbutitura a freddo risulta più studiata di quella a caldo e che risultati migliori di quelli a freddo si ottengono a caldo solo ad elevate temperature di 500-600°C. Un'osservazione importante riguarda poi il problema della purezza del metallo e in particolare del tenore di ossigeno. Si può infatti osservare che le lamiere utilizzate per l'imbutitura a caldo avevano un tenore di ossigeno elevato dal 0,15 al 0,34% mentre le qualità di titanio utilizzate per l'imbutitura a freddo avevano un tenore di ossigeno meno elevato da 0,042% a un massimo del 0,1%. E' possibile che l'ossigeno giochi sulla formabilità del titanio, come già segnalato nell'articolo tedesco più recente, in maniera analoga al carbonio nel caso dell'acciaio inossidabile e che quindi lamiere di titanio di buona purezza e con basso tenore di ossigeno possano presentare possibilità di imbutitura a freddo analoghe a quelle osservabili nell'imbutitura a caldo di titanio meno puro e con un tenore di ossigeno più elevato.

5. CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI

Questo breve studio dimostra che il titanio è un materiale lavorabile in maniera molto simile agli acciai e che le difficoltà che si incontrano sono spesso dovute soprattutto all'esperienza limitata che si ha nella lavorazione di questo metallo.

Per quanto riguarda l'operazione di imbutitura profonda, studiata in dettaglio in questo lavoro, da quanto risulta dagli studi fatti e apparsi nella letteratura tecnica specifica non sembra che la lavorazione a caldo sia indispensabile per ottenere buoni risultati di formatura rispetto a quella a freddo per il titanio commercialmente puro mentre l'ossigeno sembra giocare nel titanio lo stesso ruolo che il carbonio esercita nell'acciaio inossidabile. Rapporti limite di formatura (LDR) superiori a 2,5 sono ottenibili anche a freddo con uso di opportune tecniche di lubrificazione (uso di plastica e in particolare di polietilene).

Volendo iniziare eventuali esperienze in questa direzione per sviluppare una tecnologia di imbutitura a freddo del titanio si raccomanda, sulla base di quanto si è potuto vedere nella letteratura specifica, di:

1. Scegliere qualità di titanio commerciale molto pure in particolare con basso tenore di ossigeno.
2. Usare possibilmente lamiere di titanio con grano fine.
3. Studiare a fondo i problemi di lubrificazione e in particolare l'uso delle plastiche per evitare i problemi di grippaggio e incollatura del metallo all'attrezzo.
4. Considerare il problema dell'anisotropia della lamiera alla ricerca di un'eventuale orientazione ottimale del materiale nella lavorazione.
5. Ricercare le velocità ottimali di pressatura e di pressione residua di mantenimento per assicurare un massimo di rapporto di formatura ed evitare difetti sulla lamiera formata.