

Imbutitura

Anche l'imbutitura come lo stretching viene usata per produrre contenitori a partire da una lamiera piana. La differenza tra stretching e imbutitura è sostanziale: nel primo, il semilavorato è bloccato e la profondità è raggiunta a scapito dello spessore della lamiera; in quest'ultimo, al semilavorato è permesso-e persino è incoraggiato-ad entrare nella matrice, e lo spessore è nominalmente invariato.

Nel caso più semplice di imbutitura pura, un semilavorato circolare del diametro d_0 viene convertito in un contenitore a fondo piatto, trascinandolo su una matrice con l'aiuto di un punzone di diametro D_p .

Sia la matrice che il punzone devono avere bordi ben arrotondati, altrimenti il semilavorato potrebbe essere tagliato.

Il contenitore finito viene estratto dal punzone, ad esempio, lavorando un leggero recesso nella parte inferiore della matrice (evidenzia).

Dopo che il contenitore è stato spinto attraverso la matrice, il suo bordo superiore si allarga a causa dello springback, viene bloccato dalla sporgenza durante la corsa di ritorno del punzone e la sporgenza stacca il contenitore. Nel punzone spesso è presente un foro centrale per impedire la formazione di una depressione e pertanto aiuta il distacco.

Imbutitura senza prelamiera

Quando la porzione di lamiera sulla matrice scorre verso il foro nella matrice può dare luogo a pieghe chiamate grinze. La formazione di pieghe può essere evitata quando la lamiera è sufficientemente rigida. Questo si verifica sempre con imbutiture poco profonde, quando il rapporto di imbutitura $d_0/D_p < 1,2$, dove d_0 è il diametro iniziale della lamiera e D_p il diametro del punzone.

Lamiere con spessore elevato rispetto al diametro iniziale consentono un rapporto di imbutitura maggiore; la formazione di pieghe dipende anche dal profilo della matrice, che determina la compressione circonferenziale. Il profilo più favorevole è la matrice a trattrice. Il grafico nella slide confronta le prestazioni di 3 diversi profili della matrice di imbutitura, troncoconico, cilindrico raccordato e a trattrice, mostrati a destra. La parte inferiore del grafico, identificata come good rappresenta le imbutiture eseguibili senza formazione di grinze, la parte superiore (wrinkling) dice quali imbutiture darebbero luogo alla formazione di grinze.

Le figure mostrano la progressione di un'imbutitura in una matrice a trattrice. Anche in questa slide viene indicata una condizione che deve essere rispettata per non produrre grinze.

Imbutitura con prelamiera

Quando la lamiera è relativamente sottile e il rapporto di imbutitura è oltre i limiti indicati precedentemente, la flangia deve essere vincolata con un prelamiera, come si vede nella figura a sinistra. Il prelamiera deve esercitare pressione sufficiente per prevenire le

pieghe, ma una pressione eccessiva limiterebbe il libero movimento del materiale e causerebbe fratture nella parete del contenitore.

Per produrre un contenitore senza difetti, la pressione del premilamiera può essere presa, come prima approssimazione, pari all'1,5% della tensione di snervamento del materiale.

Le foto a destra mostrano la lamiera prima dell'imbutitura e 3 imbutiti. Nel caso (b) la pressione del premilamiera è insufficiente, in (c) è ottimale, in (d) è eccessiva. Nella figura (c) si vede anche la formazione delle orecchie, dovute all'anisotropia planare del materiale.

Forza di imbutitura

Quando il premilamiera applica la pressione ottimale, la forza di imbutitura aumenta mentre la flangia parzialmente imbutita incrudisce; al diminuire del diametro della flangia, anche la forza diminuisce fino a quando il bordo ispessito della lamiera viene stirato formando la gobba che si vede a destra nella linea A.

Una pressione eccessiva causa una frattura precoce (linea B).

Una pressione troppo bassa consente la formazione di grinze (linea C) e, se le grinze non possono essere stirate, non si riesce a raggiungere la fine dell'imbutitura.

Una stima molto approssimativa della forza di imbutitura può essere ottenuta dalla formula nella slide.

Pigreco $D_p h$ è un'area, data dalla circonferenza sotto il punzone per lo spessore della lamiera. La forza dipende dalla resistenza meccanica del materiale della lamiera, espressa dalla tensione massima a rottura TS, moltiplicata per un fattore geometrico. A parità di diametro del punzone, la forza aumenta con il diametro iniziale della lamiera.

Quando la forza di imbutitura supera la forza che la parete del contenitore può sostenere, si ha una frattura.

C'è un limite alla deformazione raggiungibile, espresso come rapporto di imbutitura d_0/D_p .

Il diametro massimo del cerchio che si può imbutire in condizioni ideali è espresso come il rapporto limite di imbutitura (LDR).

Siamo interessati che il rapporto limite di imbutitura sia il più alto possibile. Cerchiamo di capire quali fattori ne condizionino il valore.

1. Un alto valore di n (sensibilità all'incrudimento) rafforza la parete della contenitore ma aumenta anche la forza di trazione, quindi è abbastanza neutrale; un leggero miglioramento nella LDR è spesso riscontrato con n più alto perché la forza massima è necessaria in un momento successivo.

2. Un alto valore di m (sensibilità alla velocità di deformazione) rafforza una strizione incipiente nella parete, mentre influenza appena la forza di imbutitura, quindi è leggermente positivo nel suo effetto.

3. La variabile del materiale più importante è r . Un materiale con valore alto di r si deforma riducendo molto la larghezza e poco lo spessore.

Ciò aiuta il semilavorato a ridurre progressivamente il diametro e quindi è un fattore positivo. La parete di contenitori parzialmente imbutiti è in condizioni di trazione biassiale, situazione in cui un materiale con r alto è più resistente, grazie alla tendenza ad assottigliarsi poco; la flangia invece è sottoposta a trazione radiale e compressione circonferenziale.

Il risultato è che l'LDR aumenta con l'aumento del valore di r medio, come mostra il grafico a destra.

Dal grafico si vede che un LDR di 2,0 permette una profondità di circa $0,8D_p$, mentre con un LDR di 3,0 si può arrivare a una profondità superiore a $2,0D_p$.

4. Raggi di raccordo piccoli sul punzone e sulla matrice impongono una forte deformazione di piega e quindi aumenta la forza di imbutitura senza modificare la resistenza della parete, quindi, diminuiscono l'LDR. Tuttavia, raggi molto grandi lascerebbero gran parte della lamiera non supportata e potrebbero formarsi grinze tra punzone e matrice.

Quindi i raggi sono ottimizzati, di solito entro i limiti di $R > 4h$ per lamiere spesse ($> 5 \text{ mm}$) e $R > 8h$ per quelle sottili ($< 1 \text{ mm}$).

Nel grafico si vede che se il raggio di raccordo sul punzone arriva a 25 mm l'assottigliamento aumenta molto, con forte indebolimento della lamiera.

5. L'attrito tra premilamiera, matrice e flangia fa aumentare la forza di imbutitura e quindi è dannoso. Lo sforzo di attrito può essere ridotto riducendo la pressione del premilamiera, ma un'eccessiva riduzione porta alla formazione di grinze. Pertanto, deve essere applicato un buon lubrificante che riduca l'attrito e quindi la forza di attrito.

6. Nell'imbutitura di una lamiera relativamente sottile, di rapporto d_0/h superiore a 50, la forza di attrito diventa una porzione importante della forza totale; di conseguenza, l'LDR diminuisce con un aumento del rapporto d_0/h .

7. L'attrito sul punzone è utile perché trasferisce la forza di trazione dalla lamiera al punzone, perché la lamiera scivola meno sul punzone. Quindi un punzone ruvido, o un semilavorato lubrificato solo sulla flangia, dà un LDR superiore.

Non esiste ancora uno standard internazionale per la determinazione dell'LDR e solo i dati ottenuti in condizioni identiche sono comparabili.

Un materiale con anisotropia planare mostra proprietà diverse nelle direzioni di laminazione, trasversale e a 45° ($r_0 \neq r_{90} \neq r_{45}$).

Ciò porta alla formazione delle orecchie, una variazione periodica dell'altezza della parete del contenitore; le orecchie dipendono dalla simmetria cristallina e si verificano in coppia (4, 6 o 8). La flangia si ispessisce meno nelle direzioni in cui r è maggiore, perciò le orecchie si formano in queste direzioni.

Contenitori di profondità maggiore di quella consentita dall'LDR possono essere realizzati deformando ulteriormente dopo la prima imbutitura.

1. L'ulteriore imbutitura lascia lo spessore della parete sostanzialmente invariato. Nelle figure (a) e (b) sono mostrati 2 esempi di imbutitura doppia.

2. L'ironing o stiratura (mostrata nella figura a destra) lascia il diametro interno praticamente invariato e raggiunge una maggiore profondità riducendo lo spessore della parete. È evidente che l'ironing è simile alla trafilatura di un tubo su un mandrino.

3. Un fenomeno fondamentale, finora non menzionato, è che un materiale lavorato a freddo presenta una maggiore duttilità quando la direzione di deformazione è invertita in operazioni successive; questo viene sfruttato nell'imbutitura inversa.

L'imbutitura multipla è ampiamente utilizzata per contenitori alimentari, tappi per penne stilografiche, alloggiamenti per filtri olio, pistoni per ammortizzatori, ecc.

L'ironing viene utilizzato nella produzione di massa di lattine e cartucce di munizioni imbutite e stirate.

Nell'imbutitura di contenitori quadrati o rettangolari il grado di difficoltà aumenta con il crescente rapporto tra profondità e raggio dell'angolo; gli oggetti verdi in figura, chiamati rompigrinze, ostacolano lo scorrimento della lamiera nelle zone in cui tende a scorrere maggiormente, per ridurre la differenza di scorrimento tra zone d'angolo e zone rettilinee.

Un punzone con una sommità curva o semisferica impone un diverso stato di deformazione.

In molte applicazioni pratiche, soprattutto nella produzione di parti di telai automobilistici, il processo di imbutitura non è né puro stretching né imbutitura pura.

La lamiera non è completamente bloccata (quindi non è puro stretching) né è libera di scorrere (quindi non è imbutitura pura).

Invece, le forme complesse vengono sviluppate controllando lo scorrimento della lamiera, ritardandola, ove necessario, con i rompigrinze inseriti nelle superfici della matrice e del premilamiera.

Per regolare il processo, viene applicato un lubrificante e viene specificata la rugosità e la tessitura della superficie della lamiera (vengono utilizzate spesso lamiere con finitura casuale).

In alcuni casi, la pressione del premilamiera viene variata in modo programmato durante la corsa o il premilamiera è sottoposto a un carico pulsante.

Nei sistemi più avanzati il premilamiera viene azionato da diversi cilindri idraulici programmabili autonomamente in modo che la forza ritardante possa essere controllata localmente.

La forma del prodotto è spesso rappresentata da una superficie "sculturata", cioè una superficie non rappresentabile analiticamente, cioè tramite formule, in modo semplice.

L'applicazione del CAD/CAM a tali forme ha notevolmente ridotto il tempo e gli sforzi coinvolti nella progettazione e analisi di componenti in lamiera e nella programmazione di macchine utensili CNC per la realizzazione di stampi

Le curvature possono essere dolci e non simmetriche, causando problemi di springback e distorsione dopo il distacco dalla matrice, in particolare con materiali con alto rapporto $\sigma_{0.2}/E$, e la modellazione al computer può aiutare a definire una forma di matrice che lo compensi. In altri casi, la formatura si avvicina ai limiti del materiale e la frattura si può facilmente verificare in assenza di controlli stretti. La modellazione al computer può consentire l'analisi dell'effetto delle variabili di processo.

Tailored Blanks

Recentemente si è cominciato a saldare tra loro varie lamiere caratterizzate da spessore o composizione differenti, in modo che risultino resistenti solo dove serve.

Le lamiere così ottenute consentono riduzioni della massa e del numero di componenti.

In pratica, mentre la normale sequenza di operazioni nella lavorazione di lamiera è data da taglio, deformazione e saldatura, con le tailored blanks la procedura diventa taglio, saldatura e deformazione plastica. La saldatura di lamiere piane è più rapida e affidabile, per contro sono necessarie presse più grandi e costose per deformare un insieme di lamiere saldate tra loro.