



Politecnico di Torino

**Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale Corso di
Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

***Analisi e classificazione dei difetti nello stampaggio a caldo
dell'acciaio***

Relatore: *Professore Roberto Doglione*

CoRelatore: *Professore Dario Antonelli*

Candidato: *Claudio Piana*

Matricola: *S289472*

Anno Accademico: 2025/2026

Ringraziamenti

A mia moglie, per essermi stata accanto in tutti questi anni difficili, per avermi sostenuto nei momenti più pesanti e per aver creduto in me anche quando io stesso facevo fatica a farlo.

A te, Federico, che hai stravolto la nostra vita nel modo più bello possibile, ricordandomi ogni giorno cosa conta davvero.

A te, Elisa, che ancora dobbiamo conoscere, ma che già aspettiamo con tutto l'amore che abbiamo.

Indice

Capitolo 1 – Introduzione.....	7
Capitolo 2 – Il processo di stampaggio a caldo dell'acciaio	8
2.1 Fondamenti metallurgici.....	8
2.2 Materiali per forgiatura	8
2.2.1 Acciai al carbonio.....	8
2.2.3 Acciai da Cementazione.....	9
2.2.4 Acciai Inossidabili.....	10
2.2.5 Tabella riassuntiva	10
2.3 Processo	11
2.4 Parametri critici	13
2.4.1 Deformazione plastica.....	13
2.4.2 Velocità di deformazione	15
2.4.1.1 Effetto della velocità di deformazione	18
2.5 Set-up di lavoro.....	19
2.6 Strumenti di controllo	20
Capitolo 3 – Macchinari.....	21
3.1 Forni a induzione.....	21
3.2 Maglio.....	23
3.3 Pressa idraulica	24
3.4 Pressa meccanica.....	25
3.5 Bilanciere a vite.....	26
Capitolo 4 – Analisi e classificazione dei difetti.....	27
4.1 Parting Line.....	27
4.2 Mismatch	28
4.3 Cracks.....	29
4.4 Sfogliature.....	31
4.5 Difetti di flusso (Flow – through).....	31
Capitolo 5 Classificazioni delle possibili root cause.....	32
5.1 Geometria dello sbizzato	32
5.2 Temperatura dello spezzone fuori range	32
5.3 Temperatura eccessiva dello stampo	32
5.4 Composizione della miscela e tipologia di lubrificante	32

Capitolo 6 Raccolta e analisi dati.....	34
6.1 Articolo 080.91	34
6.2 Articolo 3756.....	44
6.3 Articolo 5623.....	50
Capitolo 7 Preparazione dei campioni.....	56
7.1 Introduzione.....	56
7.2 Prelievo e taglio dei campioni.....	56
7.3 Inglobamento dei campioni.....	58
7.4 Preparazione superficiale dei campioni	59
7.5 Abrasione mediante carte abrasive.....	61
7.6 Lucidatura con panni da 6 micrometri, 3 micrometri e 1 micrometro	61
7.7 Importanza della preparazione metallografica per l'analisi del difetto.....	62
Capitolo 8 - Analisi metallografica dei difetti osservati al microscopio	63
8.1 080.91 – Lato numeri.....	64
8.1.1 Osservazione a basso ingrandimento.....	64
8.1.2 Osservazione a ingrandimento intermedio e alto.....	68
8.1.3 Interpretazione del difetto.....	68
8.2 080.91 - Lato pianetto.....	70
8.2.1 Osservazione a basso ingrandimento.....	70
8.2.2 Osservazione a ingrandimento intermedio	70
8.2.3 Osservazione ad alto ingrandimento.....	71
8.2.4 Interpretazione del difetto.....	72
8.3 3756A	73
8.3.1 Osservazione a basso e medio ingrandimento.....	73
8.3.2 Osservazione ad alto ingrandimento.....	75
8.3.3 Interpretazione del difetto.....	76
8.4 5623	77
8.4.1 Osservazione a basso e medio ingrandimento.....	77
8.4.3 Osservazione ad alto ingrandimento	79
8.4.4 Interpretazione del difetto.....	80
Capitolo 9 Conclusioni.....	81
Bibliografia	83

Capitolo 1 – Introduzione

La lavorazione a caldo dei metalli a radici antiche, basti pensare che il bronzo e il ferro dolce venivano forgiati già nell'anno 1200 a.C.

In Europa questa tecnica si affermò nell'anno 1000 a.C soprattutto per la realizzazione di scudi, elmi e schinieri.

Lo stampaggio a caldo dell'acciaio è un processo di deformazione plastica dei metalli ed è principalmente utilizzata per alte produzioni e per componenti strutturali destinati a settori quali:

- Automotive
- Movimento terra
- Aeronautica

La sua diffusione è legata ai molteplici vantaggi che ne beneficiano i pezzi prodotti tramite questo processo, quali:

- Eliminazione delle dislocazioni interne: incremento di duttilità e tenacità;
- Allineamento delle fibre metalliche (flow lines) lungo la geometria del pezzo: elevata resistenza a fatica e agli urti;
- Maggiore libertà geometrica: facilità nell'ottenere geometrie complesse con notevole risparmio di materiale e di tempo;
- Correzione dei difetti interni: chiusura delle porosità interne
- Elevata produttività

La forgiatura è un processo complesso condizionato da diversi parametri elencati di seguito:

- Scelta della macchina;
- Temperature di esercizio (dello spezzone e dello stampo);
- Gestione aria e pulizia stampo;
- Tipologia di lubrificante e sua diluizione;
- Forma dello sbozzato;

In particolare negli ultimi anni, l'introduzione di strumenti di simulazione numerica basati sul metodo degli elementi finiti ha permesso di analizzare in maniera sempre più approfondita tali parametri. Tuttavia per inevitabili semplificazioni dei modelli numerici il confronto tra tali strumenti e l'esperienza reale è ancora lontana con conseguente difficoltà nella ricerca dei difetti e della sua causa radice

Capitolo 2 – Il processo di stampaggio a caldo dell'acciaio

2.1 Fondamenti metallurgici

La deformazione plastica a caldo dell'acciaio avviene in un range di temperature tra i 950°C e 1250°C. Questo processo riduce il limite elastico e favorisce la ricristallizzazione dinamica.

I parametri chiave sono: temperatura del materiale, velocità di deformazione, storia termica (tempo a T), e attrito stampo–pezzo ossia lubrificazione stampi.

2.2 Materiali per forgiatura

La scelta del materiale riveste un ruolo fondamentale nella progettazione del processo, nella definizione dei parametri di lavorazione e nella prestazione finale del componente.

Di seguito gli aspetti tenuti in considerazione durante la scelta del materiale:

- Deformabilità a caldo
- Sensibilità alle alte velocità di deformazione
- Sensibilità alle alte temperature
- Rapporto ossidazione/scaglia
- Trattamento termico per utilizzo finale
- Proprietà finale

2.2.1 Acciai al carbonio

2.2.1.1 Acciai a basso tenore di carbonio

I più comuni sono C15, C20 e C22.

Si tratta di materiali con $C < 0.25\%$, con le seguenti caratteristiche:

- Basso costo e facilità di reperibilità
- Ottima deformazione a caldo: ad alte temperature si riduce il rischio di cricche durante la deformazione;
- Bassa resistenza allo stampaggio: lo sforzo per la deformazione è ridotto con conseguente carichi trasmessi a stampo e macchina minori;
- Buona saldabilità: aspetto molto importante se sono richieste operazioni di assemblaggio o ripristino.

Le applicazioni di questi acciai sono su componenti strutturali semplici, elementi di supporto (leve, staffe).

Ovviamente presentando una percentuale di carbonio inferiore a 0.25% offrono una resistenza meccanica limitata.

2.2.1.2 Acciai a basso medio tenore di carbonio

I più comuni sono C35, C45 e C50.

Si tratta di materiali con C compreso tra 0.25% e 0.60% che rispetto ai precedenti presentano le seguenti caratteristiche:

- Maggiore resistenza meccanica previo trattamento termico quali tempra e rinvenimento;
- Maggiore deformazione a caldo ma con range di temperature più stringenti;

Le applicazioni principali riguardano componenti di trasmissioni e parti soggette a carichi ciclici.

2.2.2 Acciai legati

Quando è richiesta un'elevata resistenza meccanica grazie alla sua buona temprabilità, la loro tenacità si ricorre a acciai legati al cromo (Cr), cromo-molibdeno (Cr-Mo) e nichel-cromo-molibdeno (Ni-Cr-Mo).

Le applicazioni tipiche riguardano:

- Alberi di trasmissioni;
- Elementi di giunti e leveraggi per macchine movimento terra;
- Parti di sicurezza quali flange, perni e snodi sottoposti a carichi dinamici elevati

I più comuni sono:

- 42CrMo4
- 34CrNiMo6
- 30CrMo12

2.2.3 Acciai da Cementazione

Una famiglia molto importante per lo stampaggio a caldo è quella degli acciai da cementazione.

Dopo cementazione, essi offrono una superficie dura e resistente all'usura (post trattamento termico di tempra) e un cuore tenace in grado di assorbire urti e carichi ciclici.

Le applicazioni più tipiche riguardano il settore automotive in particolare:

- Ingranaggi;
- Gran parte dei componenti delle trasmissioni delle automobili per civili o industriali.

I più comuni sono:

- 16MnCr5
- 20MnCr5
- 18CrNiMo7-6

2.2.4 Acciai Inossidabili

Non trovano grandi applicazioni se non per un uso dei strategico di quei componenti in cui è richiesta un'alta resistenza alla corrosione e delle buone caratteristiche meccaniche a caldo.

Le applicazioni tipiche riguardano:

- Valvole, raccordi e corpi pompa per fluidi aggressivi;
- Componenti operanti in ambienti marini o fortemente corrosivi.

I più comuni sono:

- Acciai inossidabili austenitici;
- Acciai inossidabili martensitici.

2.2.5 Tabella riassuntiva

Di seguito la tabella riassuntiva di tutti gli acciai elencati nei paragrafi precedenti

Famiglia	Acciai	Caratteristiche	Applicazioni tipiche
Acciai a basso tenore di carbonio (%C < 0,25%)	C15 C20 C22	Basso costo Ottima deformazione a caldo Bassa resistenza allo stampaggio Buona saldabilità	Elementi di supporto (leve, staffe)
Acciai a medio tenore di carbonio (%C tra 0,25% e 0,60%)	C35 C45 C50	Buona resistenza meccanica Buona deformazione a caldo	Trasmissioni Parti soggetti a carichi ciclici
Acciai legati	42CrMo4 34CrNiMo6 30CrMo12	Buona temprabilità Ottima tenacità	Alberi di trasmissioni Elementi per macchine movimento terra Parti sottoposti a carichi dinamici
Acciai da cementazione	16MnCr5 20MnCr5 18CrNiMo7-6	Superficie dura Cuore tenace	Ingranaggi Componenti delle trasmissioni
Acciai inossidabili	Acciai inossidabili austenitici Acciai inossidabili martensitici	Alta resistenza alla corrosione Buone caratteristiche meccaniche	Valvole, raccordi e corpi pompa per fluidi aggressivi Componenti operanti in ambienti marini o fortemente corrosivi

Table 2.1 – Applicazioni delle maggiori famiglie di acciai utilizzate nello stampaggio a caldo [1]

2.3 Processo

Lo stampaggio comprende le seguenti operazioni:

1. **Taglio della billetta:** può avvenire tramite cesoia o sega. L'obiettivo di questa fase è quello di ottenere una billetta delle dimensioni prestabilite durante la fase di fattibilità.
2. **Riscaldamento della billetta:** il riscaldamento della billetta rappresenta una fase cruciale poiché condiziona l'intero processo.
Il riscaldamento avviene tramite l'utilizzo di forni a induzione elettromagnetica nel quale l'energia termica è generata dalla corrente indotta nel pezzo stesso.
3. **Sbozzatura:** consiste nel primo passaggio in cui si cerca di ottenere una forma che aiuti nella fase successiva ad ottenere la forma del pezzo
4. **Stampaggio:** si ottenere la forma del pezzo
5. **Tranciatura bave:** mediante attrezzi montati su un'altra pressa denominata "SBAVATRICE" viene rimossa la bava ed eventualmente il pezzo viene forato.
6. **Coniatura:** operazione che non viene eseguita su tutti i processi di stampaggio. Consiste nel perfezionare il pezzo precedentemente stampato calibrando le misure e ottenendo una superficie liscia. Lo stampo per la coniatura ha una precisione dimensionale maggiore di quello per lo stampaggio.
7. **Sabbiatura:** serve ad effettuare sul pezzo una "pulizia" superficiale
8. **Trattamento termico post stampaggio:** ha lo scopo di ottenere una struttura più omogenea, ridurre le tensioni residue e ottenere la durezza necessario per utilizzo finale.

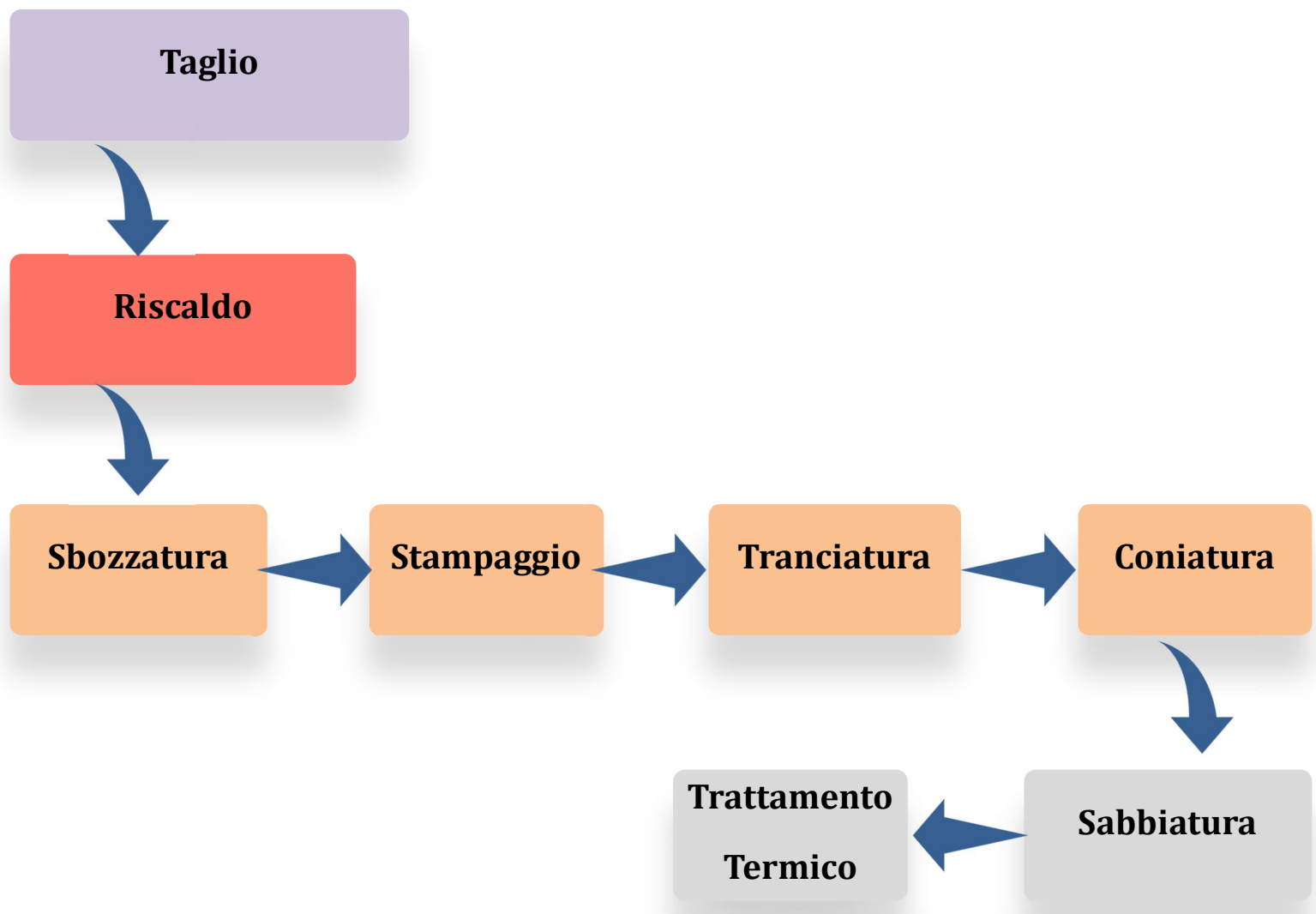


Figure 2.1 – Process Flow dello stampaggio a caldo.

2.4 Parametri critici

2.4.1 Deformazione plastica

Un materiale metallico preventivamente scaldato alla temperatura di massima plasticità e sottoposto all'azione di forze esterne, gradatamente crescenti e anche dinamiche, si deforma prima elasticamente e poi in maniera permanente assumendo una nuova forma.

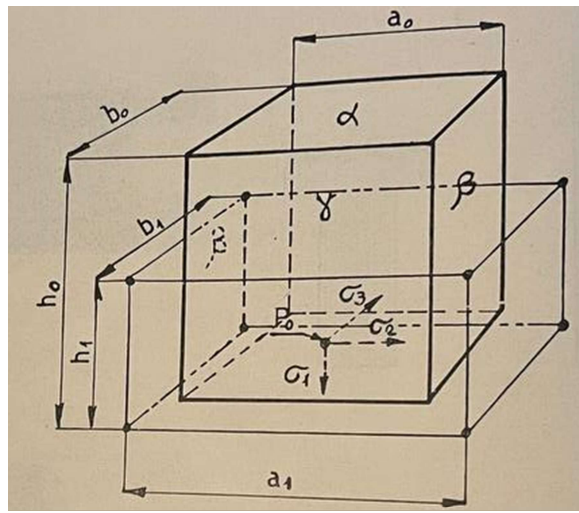


Figure 2.2 – Andamento delle tensioni su un corpo metallico generico [1]

Se consideriamo un punto qualsiasi P_0 interno a un corpo metallico deformabile, esso rimane in equilibrio sotto una determinata azione di forze esterne.

Se su quel punto vengono applicate tre tensioni σ_1 , σ_2 , σ_3 normali rispetto ai piani α , β , γ , trazioni o compressioni, superando il limite delle tensioni massime si manifesta il fenomeno della deformazione plastica. Le particelle di materiale scorrono l'una su l'altra e si dispongono sotto forma di fibre più adatte a sopportare maggiori sollecitazioni meccaniche.

Un continuo aumento delle forze esterne causa una riorganizzazione delle particelle creando il fenomeno di deformazione totale per cui il metallo assume una nuova forma ma con il suo volume costante.

$$a_0 \times b_0 \times h_0 = a_1 \times b_1 \times h_1 = V \quad (2.1)$$

Dividendo i primi due membri per a_0 e passando ai logaritmi otteniamo:

$$0 = \ln \frac{a_1}{a_0} + \ln \frac{b_1}{b_0} + \ln \frac{h_1}{h_0} \quad (2.2)$$

Utilizzando gli integrali otteniamo:

$$\int_{a_0}^{a_1} \frac{da}{a} + \int_{b_0}^{b_1} \frac{db}{b} + \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} = 0 \quad (2.3)$$

Denominando con ϑ la deformazione subita dal parallelepipedo avremo:

$$\int_{a_0}^{a_1} \frac{da}{a} = \vartheta_a = \text{Deformazione per allungamento} \quad (2.4)$$

$$\int_{b_0}^{b_1} \frac{db}{b} = \vartheta_b = \text{Deformazione di allargamento} \quad (2.5)$$

$$\int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} = \vartheta_h = \text{Deformazione di schiacciamento} \quad (2.6)$$

Sostituendo le (2.4), (2.5) e (2.6) nella (2.3) otteniamo:

$$\vartheta_a + \vartheta_b + \vartheta_h = 0 \quad (2.7)$$

Il parallelepipedo nello schiacciarsi ha diminuito la sua altezza h_0 (h_1 è negativa) ma in compenso si è dilatato nei due lati aumentando le dimensioni in modo tale che la somma delle deformazioni sia 0. Quindi:

$$\vartheta_a + \vartheta_b = -\vartheta_h \quad (2.8)$$

2.4.2 Velocità di deformazione

La velocità media v_m di un punto nello spazio è data dal rapporto tra lo spazio percorso da quel punto e il tempo che esso ha impiegato a percorrerlo. Nel nostro caso lo spazio percorso è la deformazione ϑ .

$$v_m = \frac{\vartheta}{t} \quad (2.9)$$

Quindi, la velocità istantanea possiamo scriverla nel seguente modo:

$$v = \frac{d\vartheta}{dt} \quad (2.10)$$

Differenziando la (2.6) otteniamo:

$$d\vartheta = \frac{dh}{h} \quad (2.11)$$

Sostituendo l'ultima equazione alla velocità media ricaviamo la velocità del punto h.

$$v_h = \frac{h_0 - h}{t} \quad (2.12)$$

Esprimendo (2.12) in forma differenziale, otteniamo:

$$v_h = \frac{dh}{dt} \quad (2.13)$$

Dove:

- dh: schiacciamento infinitesimale;
- dt: tempo infinitesimale impiegato a provocare lo schiacciamento d;

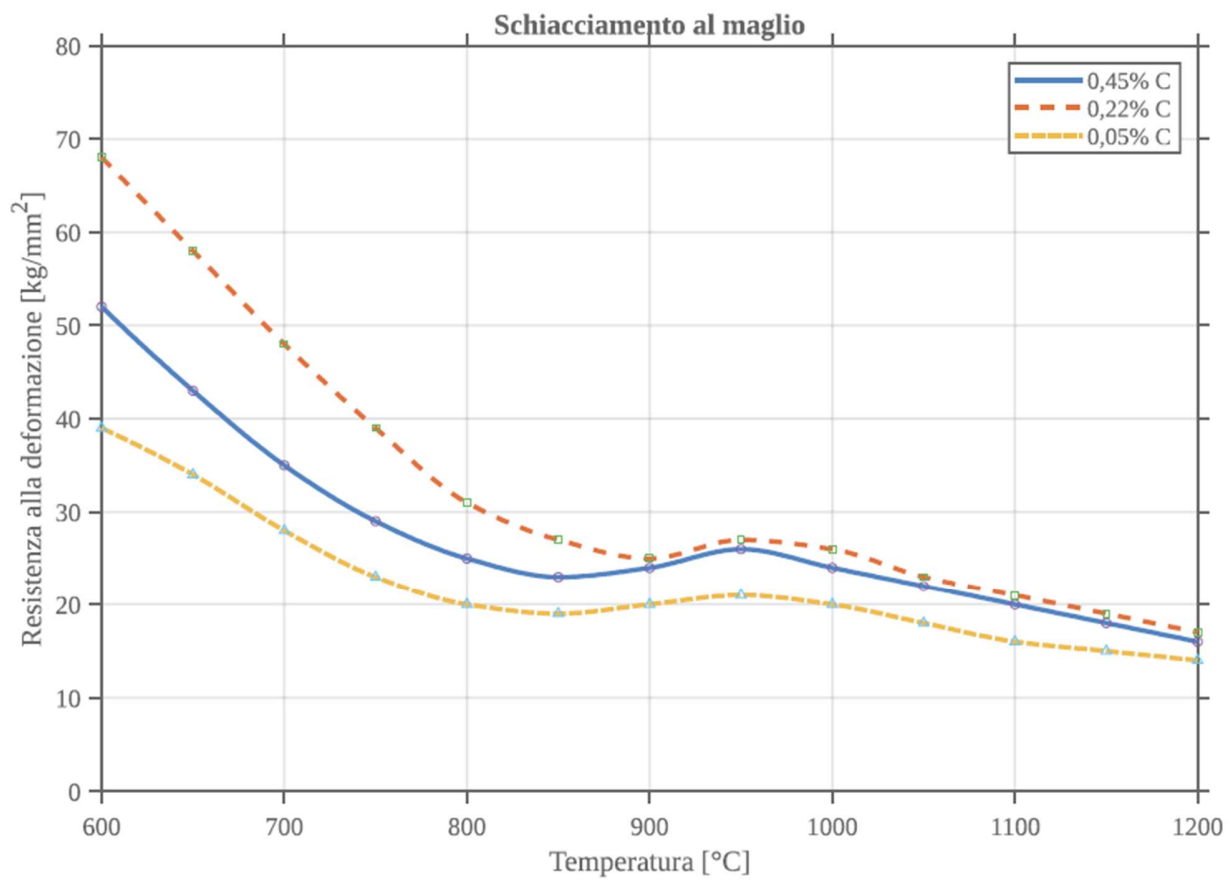


Figure 2.3 -Andamento della resistenza alla deformazione al variare della temperatura e in funzione della %C. [1]

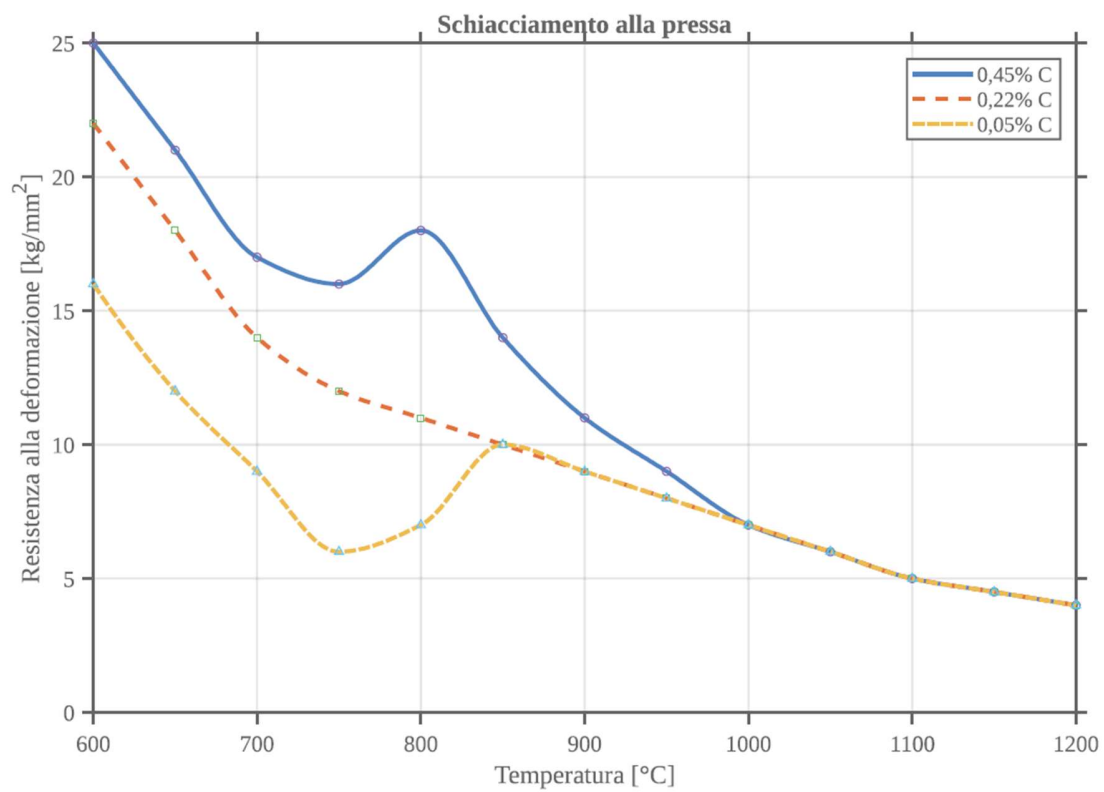


Figure 2.4 - Andamento della resistenza alla deformazione al variare della temperatura e in funzione della %C [1]

2.4.1.1 Effetto della velocità di deformazione

A seconda della geometria del pezzo da forgiare può essere più conveniente stamparlo su un maglio piuttosto che su una pressa e viceversa.

a) Bassa velocità di deformazione:

- Il materiale ha più tempo per deformarsi in modo più “omogeneo”;
- Il materiale ha più tempo per fluire e riempire tutta la geometria dello stampo;
- Il materiale raffredda più rapidamente in quanto sta più tempo a contatto con lo stampo;
- Stress termico elevato per lo stampo in quanto resta più tempo a contatto con il materiale;
- Gli stampi sono sollecitati con forze di picco “basse”
-

b) Elevata velocità di deformazione:

- Deformazione concentrata in tempi brevissimi;
- Geometrie complesse potrebbero non essere adatte in quanto il materiale potrebbe non avere il tempo di riempire tutta la geometria dello stampo;
- Stress termico minore per lo stampo in quanto resta a contatto con il materiale per un tempo minore;
- Gli stampi sono sollecitati con forze di picco “alte”

2.5 Set-up di lavoro

Questa tabella riporta una serie di parametri fondamentali per il processo di stampaggio a caldo e inoltre mostra il loro impatto sulla qualità del pezzo qualora non dovessero essere impostati correttamente.

Parametro	Range di Lavoro	Limiti operativi	Impatto qualità
Temperatura billetta all'uscita forno	1.190 – 1.230 °C	1.170 – 1.250 °C	Se bassa difficoltà nell'ottenere la forma desiderata
Uniformità T dello stampo	180 – 230 °C	+/- 50 °C	Riempimento non idoneo. Film lubrificante non idoneo
Concentrazione lubrificante grafico nell'acqua	4 – 10 %	2 – 12 %	Attrito pezzo stampo/usura stampo/pieghe
Pressione spruzzo lubrificante	3 – 4 bar	2.5 – 5 bar	Distribuzione film lubrificante e usura eccessivo stampo
Allineamento mezzo-stampi	≤ 0,1 mm	≤ 0,5 mm	Sfalsamento figura. Si cerca di averlo il più basso possibile
Pressione aria per pulizia stampo	3 – 4 bar	2.5 – 4.5	Se eccessiva può comportare un'usura precoce dello stampo

Table 2.2 - L'incidenza dei parametri fondamentali per il processo di stampaggio a caldo sulla qualità del pezzo forgiato in base al loro andamento

2.6 Strumenti di controllo

Ogni parametro, per un'ottimizzazione del processo e determinarne il suo comportamento, necessita di essere misurato.

Di seguito l'elenco dei strumenti necessari per il monitoraggio di alcuni parametri:

- **Pirometri a infrarossi:** vengono montati sulla bocca dei forni e leggono la temperatura di ogni singolo pezzo. Essendo strumenti molto impattanti sul processo necessitano di una taratura, con un pirometro certificato, abbastanza frequente.
- **Termocamere:** vengono utilizzate per monitorare la temperatura dello stampo. Le termocamere infatti sono capaci di individuare la zona con più stress (troppo calda o troppo fredda) in maniera tale da riuscire a intervenire sul processo. Infatti, è importante che la temperatura dello stampo stia all'interno di un range molto stretto affinché il lubrificante possa garantire un corretto film sullo stampo stesso.
- **Termo bilancia:** per la lubrificazione viene miscelata acqua con una sostanza a base di grafite. Per monitorare la percentuale di grafite all'interno della miscela si utilizza la termo bilancia. Il funzionamento è molto semplice: la bilancia fa evaporare tutta l'acqua presente all'interno del campione della miscela. Ciò che resta sarà il residuo fisso ossia la percentuale di grafite nell'acqua.
- **Strumenti di misura:** per garantire un corretto allineamento tra i due stampi si utilizzano vari strumenti a seconda della complessità del pezzo quali: calibri decimali, comparatori.
- **Manometri:** a bordo macchina sono presenti svariati manometri al fine di garantire una pressione dell'aria di pulizia stampo all'interno del range desiderato in uno stampo pulito, quindi privo di scoria e acqua, il lubrificante avrà meno difficoltà a coprirlo.

Capitolo 3 – Macchinari

3.1 Forni a induzione

I parametri fondamentali che si devono impostare su un forno a induzione sono:

- Produzione oraria: si imposta la velocità della catena che porta il pezzo all'interno della bobina
- Diametro pezzo: Il plc del forno crea il volume da scaldare
- Potenza forno: in base al volume si regola questo parametro affinché si raggiunga la temperatura desiderata

Per poter garantire un corretto funzionamento del forno, si possono impostare tre diversi settaggi:

- Manuale: l'operatore imposta manualmente produzione oraria e Potenza per raggiungere la temperatura richiesta. Il pirometro a infrarossi non effettua alcuna correzione ma esegue solamente una lettura;
- Semi-automatico: l'operatore imposta la produzione oraria. Il plc del forno per raggiungere la temperatura richiesta segue una curva (velocità-potenza). Questa curva cambia per ogni pezzo. Il pirometro non esegue nessuna correzione ma esegue solamente una lettura;
- Automatico: il forno, basandosi sulla curva, raggiunge il punto di funzionamento autonomamente. Il pirometro esegue una correzione a ogni lettura affinché la temperatura letta sia sempre nel range desiderato.

Il riscaldamento avviene tramite l'utilizzo di forni a induzione elettromagnetica nel quale l'energia termica è generata dalla corrente indotta nel pezzo stesso.

Il fenomeno si descrive attraverso la **legge di Faraday–Neumann–Lenz**:

“Una variazione del flusso del campo magnetico attraverso un circuito genera una Forza Elettromagnetica (FEM) indotta, che a sua volta provoca una corrente”

$$E = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad (3.1)$$

Dove:

- E: forza elettromotrice indotta [V]
- ϕ_B : flusso magnetico concatenato [Wb]
- “-“ : la Corrente indotta crea un campo magnetico opposto alla variazione di flusso originale

La variazione del flusso magnetico nel tempo genera nel metallo un campo elettrico circolare E il quale induce **correnti parassite** (correnti di Foucault). Tali correnti, circolando nel materiale di resistività ρ , dissipano calore per effetto Joule:

$$P = \int_V \frac{J^2}{\sigma} \cdot dV \quad (3.2)$$

Dove:

- J : densità di corrente indotta [A/m^2]
- σ : conducibilità elettrica del materiale [S/m]

Il calore quindi dipende da:

- Intensità del campo magnetico variabile
- Conducibilità elettrica dell'acciaio
- Volume di materiale attraversato dalle correnti indotte

Un aspetto fondamentale del riscaldamento a induzione è l'effetto pelle (skin effect), per cui le correnti indotte si concentrano in prossimità della superficie della billetta

La profondità di penetrazione δ è data da:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (3.3)$$

Dove:

- ω : pulsazione della corrente
- μ : permeabilità magnetica del materiale
- σ : conducibilità elettrica

Per una completa analisi sullo stampaggio a caldo è fondamentale effettuare una valutazione delle macchine utilizzate nel processo di stampaggio a caldo.

Le caratteristiche cinematiche, dinamiche e strutturali delle macchine di forgiatura influenzano in modo determinante il comportamento del materiale durante la deformazione.

A parità di condizioni quali: materiale della billetta, temperatura della billetta, geometria dello stampo si possono ottenere risultati molto differenti in termini di precisione dimensionale, continuità delle fibre, usura stampo e insorgenza di difetti.

La scelta della macchina, durante la progettazione, è uno degli aspetti più critici.

3.2 Maglio

È una macchina a colpi liberi che trasmette energia al pezzo mediante la caduta di una massa battente (mazza o martello) su un'incudine fissa. La deformazione del metallo avviene grazie all'impatto cinetico. Ha una velocità di deformazione alta in quanto la corsa dell'utensile è elevata.

L'energia disponibile dipende da:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.4)$$

Dove:

- m: massa del maglio
- v: velocità di caduta.

Vantaggi

- Elevata duttilità del pezzo grazie a deformazioni progressive;
- Buona adattabilità a geometrie complesse;
- Struttura relativamente semplice e robusta.

Svantaggi

- Vibrazioni e rumorosità elevate;
- Limitata ripetibilità del colpo;

3.3 Pressa idraulica

Utilizza un sistema idraulico per generare una forza statica controllata che agisce in modo uniforme sull'intera superficie del pezzo.

Ha una velocità di deformazione bassa in quanto la corsa dell'utensile piuttosto lenta rispetto al maglio e alle presse meccaniche.

La legge di Pascal garantisce che la pressione si trasmetta integralmente al pistone di lavoro:

$$F=p*A \quad (3.5)$$

Dove:

- F: forza esercitata
- p: pressione del fluido
- A: l'area del pistone.

Vantaggi

- Applicazione uniforme della pressione: flusso del materiale controllato;
- Elevata precisione dimensionale e ripetibilità;
- Possibilità di regolare forza, velocità e tempo di mantenimento;
- Minime vibrazioni e rumorosità;
- Ideale per stampaggio a caldo di grandi pezzi (alberi, flange, dischi).

Svantaggi

- Ciclo più lento rispetto alle presse meccaniche;
- Investimento iniziale elevato;
- Impianto complesso (centralina, valvole, olio ad alta pressione)

3.4 Pressa meccanica

A differenza delle presse idrauliche, che generano forza tramite la pressione di un fluido, la pressa meccanica trasforma il moto rotatorio continuo di un albero motore (solitamente mediante volano) in moto alternato rettilineo del martinetto (o slitta), attraverso un sistema di biella-manovella. Ha una velocità di deformazione alta in quanto la corsa dell'utensile piuttosto elevata.

Schema funzionale

Il ciclo tipico comprende:

- Accumulo dell'energia nel volano ($\omega = \text{costante}$);
- Discesa della slitta, comandata da un sistema biella-manovella o camma eccentrica;
- Impatto sul pezzo (fase di deformazione plastica);
- Risalita della slitta e preparazione al nuovo ciclo.

Energia accumulata dal volano:

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (3.6)$$

Dove:

- J: inerzia del volano
- ω : velocità angolare

Vantaggi

- Alta produttività: il ciclo è rapido e ripetitivo, ideale per produzioni in serie.
- Ottima precisione dimensionale: corsa rigida e controllata meccanicamente.
- Buona efficienza energetica: l'energia meccanica è diretta, senza perdite per compressione di fluidi.
- Possibilità di automatizzazione: facilmente integrabile in linee automatiche con alimentatori e manipolatori.

Svantaggi

- Forza non costante lungo la corsa (massima solo a fine corsa).
- Difficoltà di regolazione della forza rispetto alle presse idrauliche.
- Corsa breve, non adatta a deformazioni molto profonde.
- Sollecitazioni meccaniche elevate su organi di manovra, che richiedono manutenzione accurata.
- Limitazioni su pezzi di grandi dimensioni o complessi, dove la distribuzione della forza deve essere più controllata.

3.5 Bilanciere a vite

È una pressa a vite in cui l'energia viene accumulata in un volano e trasmessa alla vite principale mediante un sistema a frizione. Quando la frizione è innestata, il volano mette in rotazione la vite che, tramite il dado solidale al martello, esercita una spinta verticale sul pezzo.

L'arresto della corsa avviene per inversione della frizione. L'energia disponibile è proporzionale al momento d'inerzia del volano e alla sua velocità di rotazione.

Ha una velocità di deformazione bassa in quanto la corsa dell'utensile è la più lenta tra tutte le macchine descritte.

Vantaggi

- Maggiore controllo della forza rispetto al maglio;
- Buona ripetibilità;
- Minor rumorosità e vibrazioni;
- Adatta a pezzi di piccole e medie dimensioni.

Svantaggi

- Rendimento energetico limitato (frizione e attriti);
- Rallentamento progressivo durante colpi ripetuti;
- Non adatta a deformazioni molto profonde.

Capitolo 4 – Analisi e classificazione dei difetti

Nello stampaggio a caldo di acciaio la formazione dei difetti nello è determinata da diversi fattori:

- Campo di velocità del materiale
- Condizioni termiche
- Scorrimento del materiale
- Distribuzione delle tensioni
- Presenza di ossidi

4.1 Parting Line

Parting Line (in Italiano Linea di divione) è quella linea che si crea dove gli stampi (inferiore e superiore) si incontrano.

La sua forma e posizione influenza le caratteristiche del flusso delle fibre all'interno del forgiato provocando dei difetti. Per evitarli, si cerca di collocare la parting line nella sezione trasversale massima in quanto risulta essere più facile far scorrere il materiale per deformazione piuttosto che forzarlo a entrare dentro cavità profonde.

La figura sottostante mostra l'effetto della posizione della linea di divisione (parting line) sui modi di flusso del metallo.

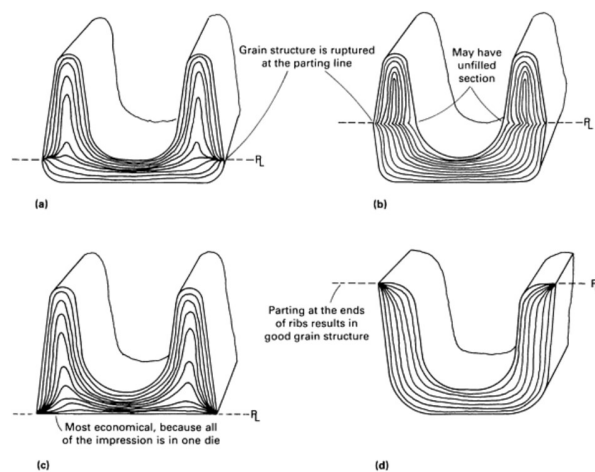


Figure 4.1 – Flusso del materiale in funzione della posizione della parting line [4]

- a) e (b) sono configurazioni non desiderabili: queste parting line generano schemi di flusso del materiale che portano alla formazione di difetti di forgiatura.
- (c) e (d) sono invece raccomandate: con queste parting line, i flussi del metallo risultano regolari nelle zone maggiormente sollecitate.

4.2 Mismatch

Per mismatch si intende il disallineamento tra stampo inferiore e superiore.

Questo difetto lo si può attribuire all'errata progettazione degli stampi, un malfunzionamento della pressa o un'errata regolazione dei parametri di processo.

Nei pezzi forgiati, secondo la norma UNI-EN 10243:1 (specificata per tolleranze dimensionali per pezzi forgiati a caldo) normalmente abbiamo una tolleranza che va da 0.5 mm a 1mm.

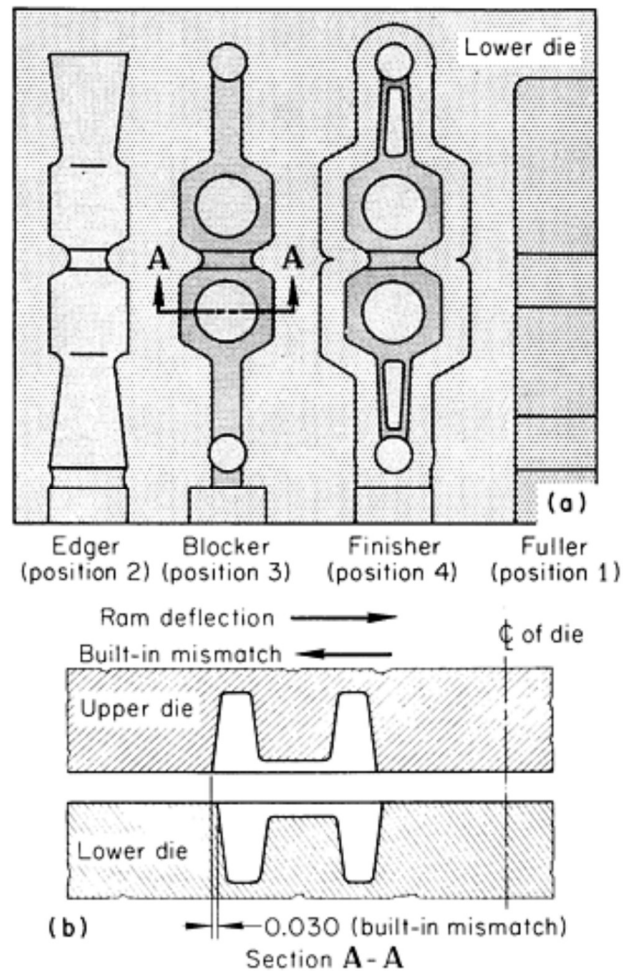


Figure 4.2 – Descrizione del disallineamento su un pezzo forgiato [4]

Per ridurre il problema del disallineamento si possono introdurre delle chiavette di centraggio (meccanico maschio – femmina) posizionate sulle superfici di divisione degli stampi in modo da ottenere un accoppiamento preciso quando gli stampi si chiudono.

Lo svantaggio dell'utilizzo di questo metodo è il costo elevato della produzione di queste chiavette e la frequente manutenzione/sostituzione che richiedono.

4.3 Cracks

Le cricche possono essere classificate a seconda della loro geometria e posizione.

1. Cricatura esterna a metà altezza del provino nello stampaggio per upsetting

Si tratta di cricature esterne che compaiono a metà altezza della superficie laterale del provino durante l'operazione di upsetting. A seconda del grado di vincolo applicato alle estremità del provino, si possono formare due tipi di cricche:

- Longitudinali
- Oblique



Figure 4.3 – Cricca longitudinale con pezzo vincolato lungo la direzione del difetto [4]

2. Cricatura longitudinale sul fondo della zona concava (upsetting con punzone tronco-conico circolare)

Cricca longitudinale che si forma nella parte inferiore della zona concava del provino quando si usa un punzone a troncoconica circolare. È una cricca di taglio, causata dall'espansione del materiale sotto il punzone dovuta al flusso circonferenziale.

Per prevenirla occorre scegliere una geometria adeguata del punzone.



Figure 4.4 – Cricca longitudinale [4]

3. Cricca di taglio agli spigoli del materiale estruso

Cricca di taglio che appare negli spigoli del materiale durante un'operazione di estrusione. Si forma al confine tra zona di metallo morto e zona plastica. La cricatura superficiale è dovuta alla propagazione delle cricche originate agli spigoli. La prevenzione richiede la scelta di un diametro appropriato della matrice (die).

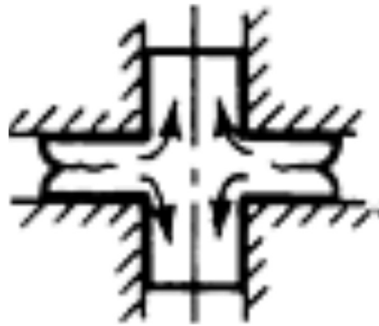


Figure 4.5 – Cricca di taglio con apertura negli spigoli [4]

4. Cricca a metà altezza della flangia in estrusione bidirezionale senza vincolo laterale

Questa cricca si verifica **a metà altezza del materiale nella flangia** durante un'estrusione **in due direzioni**, senza vincoli laterali. Il materiale fluisce **in avanti e indietro**, perciò la cricca è causata dalla **depressione/collasso** del materiale nella flangia. La prevenzione richiede la selezione di un **diametro adeguato della matrice**.



Figure 4.6 – Cricca longitudinale con pezzo non vincolato lateralmente [4]

4.4 Sfogliature

Sono difetti che si formano quando il materiale si ripiega su sé stesso durante la forgiatura creando una discontinuità superficiale o sub-superficiale.

È un difetto estremamente pericoloso in quanto interrompe la continuità della fibra e funge da innesco di cricche a fatica.

Le principali cause sono:

- Preforme non corrette
- Raggi di raccordo troppo stretti
- Lubrificazione errata dello stampo
- Raffreddamenti locali

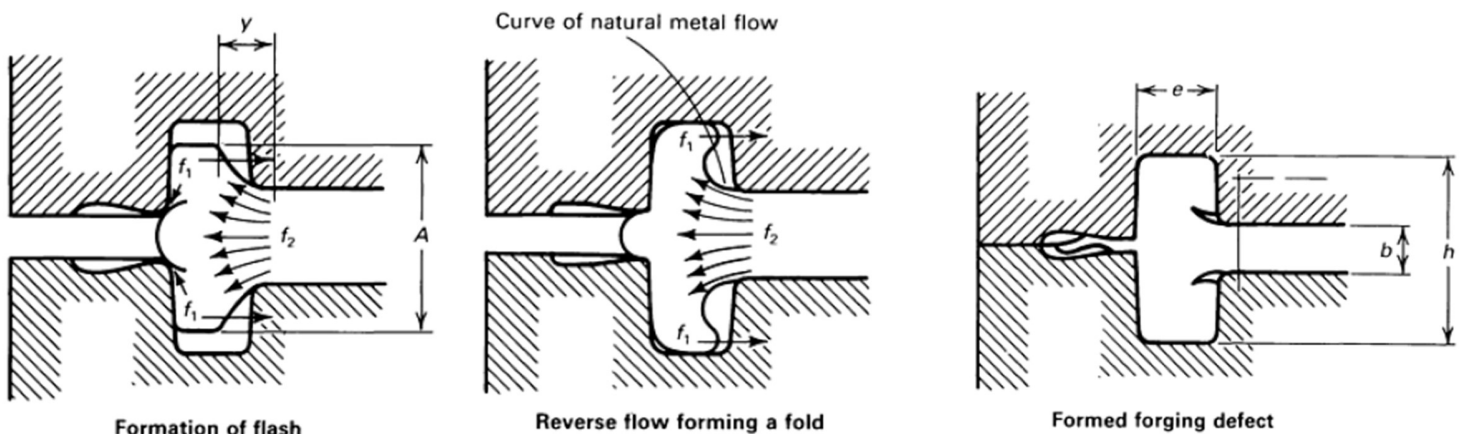


Figure 4.7 – Formazione della sfogliatura durante il processo di forgiatura [4]

4.5 Difetti di flusso (Flow – through)

Sono difetti che si formano quando il materiale è obbligato a fluire verso una zona che ha cessato di deformarsi.

Le principali cause possono essere:

- Raffreddamento locale
- Eccessivo attrito tra materiale e stampo dovuto a una non corretta lubrificazione

Capitolo 5 Classificazioni delle possibili root cause

In questo capitolo analizzeremo quali sono le cause radice che danno luogo ai difetti elencati nel capitolo precedente.

5.1 Geometria dello sbozzato

In base alla forma del pezzo finale e quindi in base alla forma dello stampo può essere necessario effettuare una sbozzatura ossia dare allo spezzone una prima forma al fine di diminuire la deformazione plastica in un unico passaggio.

Lo studio della forma dello sbozzato viene effettuato tramite simulatori che mostrano l'andamento delle fibre che avrebbe il pezzo finale.

Un errata forma dello sbozzato può comportare:

- Figura incompleta
- Sfogliature (Laps)

5.2 Temperatura dello spezzone fuori range

Un parametro fondamentale nel processo di forgiatura è la temperatura dello spezzone.

Se questa è superiore al limite massimo può comportare un pezzo finale più sottile in quanto il materiale è più facile esca in bava (stampo aperto).

Se invece la temperatura è inferiore al limite minimo risulta più complicato ottenere dei pezzi conformi in quanto ci sarà il serio pericolo di ottenere dei pezzi non complete ossia figura incompleta

5.3 Temperatura eccessiva dello stampo

Un parametro fondamentale da tener sotto controllo durante il processo di forgiatura è la temperatura dello stampo. Il valore ottimale oscilla tra i 130 e 200 °C.

Durante il contatto dello stampo con il pezzo a circa 1200°C la temperatura istantanea aumenta, lo scopo della lubrificazione (miscela acqua + grafite) è quello di riportare la temperatura all'interno del range di lavoro.

L'azione del lubrificante oltre a raffreddare lo stampo è quella di creare un sottile film al fine di aumentare lo scorrimento del materiale sullo stampo stesso.

Una temperatura eccessiva dello stampo può comportare la non omogeneità del film causando sfogliature, figure incomplete cricche subsuperficiali.

5.4 Composizione della miscela e tipologia di lubrificante

Un ulteriore parametro da monitorare è la % di composizione della miscela acqua più grafite.

L'obiettivo del lubrificante è quello di creare un sottile film al fine di aumentare lo scorrimento del materiale riducendo l'attrito tra stampo e pezzo. Una percentuale fuori range (limite alto o limite basso) causa una non omogeneità del film.

Un aspetto fondamentale è la tipologia di lubrificante. Alcuni di essi sono destinati per la realizzazione di geometrie più complesse sia per la resistenza a temperature più elevate (dovuto agli sforzi di contatto) sia per la loro composizione chimica che permette una maggiore stabilità della soluzione sotto esercizi più stressanti.

Capitolo 6 Raccolta e analisi dati

In questa sezione verrà presentata la raccolta dati effettuata sul processo dello stampaggio a caldo effettuando un'analisi dettagliata sui difetti, sulla loro possibile root cause e la loro relazione con un'eventuale azione di miglioramento.

Sono stati presi in esami 6 campioni differenti per un periodo di circa 18 mesi

6.1 Articolo 080.91

Per il seguente articolo sono stati presi in esame 18 lotti per un totale di 228800 pezzi forgiati.

Articolo	Lotto di produzione	Quantità prodotta	Quantità Conforme	Quantità Non Conforme	Percentuale dei NC rispetto alla Quantità prodotta	Macchina di produzione	Tipologia lubrificante	Percentuale di miscela	Pressione aria pulizia stampo	Temperatura stampo inferiore	Temperatura stampo superiore
080	1	13500	11966	1534	11,36%	Bilanciere a vite	Henkel	12%	3,5	210	330
080	2	12500	11072	1428	11,42%	Bilanciere a vite	Henkel	12%	3,5	220	290
080	3	11800	10415	1385	11,74%	Bilanciere a vite	Henkel	12%	3,5	190	280
080	4	13800	12037	1763	12,78%	Bilanciere a vite	Henkel	12%	3,5	240	310
080	5	13000	11855	1145	8,81%	Bilanciere a vite	Henkel	9%	3,5	210	260
080	6	12000	10783	1217	10,14%	Bilanciere a vite	Henkel	9%	3,5	215	270
080	7	13500	12311	1189	8,81%	Bilanciere a vite	Henkel	9%	3,5	210	240
080	8	12500	11524	976	7,81%	Bilanciere a vite	Fuchs	9%	3,5	215	245
080	9	11500	10737	763	6,63%	Bilanciere a vite	Fuchs	9%	3,5	205	255
080	10	12500	11819	681	5,45%	Bilanciere a vite	Fuchs	9%	3,5	205	265
080	11	12000	11587	413	3,44%	Bilanciere a vite	Fuchs	6%	3,5	160	200
080	12	13000	12762	238	1,83%	Bilanciere a vite	Fuchs	6%	3,5	165	190
080	13	12600	12413	187	1,48%	Bilanciere a vite	Fuchs	6%	3,5	170	180
080	14	12500	12259	241	1,93%	Bilanciere a vite	Fuchs	6%	3,5	160	180
080	15	13000	12777	223	1,72%	Bilanciere a vite	Fuchs	6%	3,5	155	170
080	16	13000	12763	237	1,82%	Bilanciere a vite	Fuchs	6%	3,5	155	170
080	17	13500	13281	219	1,62%	Bilanciere a vite	Fuchs	6%	3,5	160	170
080	18	12600	12403	197	1,56%	Bilanciere a vite	Fuchs	6%	3,5	165	170
		228800	214764	14036							

Table 6.1 - Raccolta dati per l'articolo 080 dove mostra le quantità Non Conformi per ogni lotto di produzione, la relativa percentuale di scarto

La tabella soprastante mostra i seguenti dati:

- Quantità prodotta per lotto;
- Quantità NON conforme (di conseguenza la Quantità conforme);
- % Quantità NC rispetto alla Quantità prodotta;
- Macchina di produzione
- Tipologia di lubrificante
- % di miscela (acqua + grafite)
- Pressione aria pulizia stampo
- Temperatura stampo inferiore
- Temperatura stampo superiore

Per ogni lotto di produzione è stata svolta un'ulteriore analisi sulla quantità non conforme suddividendola per tipologia di difetto.

Lotto 1	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
973	Sfogliatura
276	Taglio
172	Spessore non conforme
113	Figura incompleta
1534	

Lotto 2	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
939	Sfogliatura
266	Taglio
126	Spessore non conforme
97	Figura incompleta
1428	

Lotto 3	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
919	Sfogliatura
254	Taglio
126	Spessore non conforme
97	Figura incompleta
1396	

Lotto 4	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
1186	Sfogliatura
461	Taglio
69	Spessore non conforme
47	Figura incompleta

1763

Lotto 5	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
642	Sfogliatura
132	Taglio
329	Spessore non conforme
42	Figura incompleta

1145

Lotto 6	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
712	Sfogliatura
128	Taglio
298	Spessore non conforme
79	Figura incompleta

1217

Lotto 7	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
589	Sfogliatura
98	Taglio
393	Spessore non conforme
109	Figura incompleta

1189

La seguente tabella mostra la distribuzione dei difetti sul totale della Quantita NON conforme e sul totale dei pezzi prodotti. Come si può notare il principale difetto dei primi 7 lotti è la sfogliatura con un incidenza de 42%.

Distribuzione dei difetti dal lotto 1 al lotto 7		
Difetto	Quantità NC	% di incidenza
Sfogliatura	5960	42%
Taglio	1615	12%
Spessore non conforme	1513	11%
Figura incompleta	584	4%

Per determinare una possibile root cause si è adoperato il diagramma di Ishikawa. Come prima azione correttiva si è deciso di intervenire sul lubrificante in quanto anche in base all'esperienza degli esperti del settore, la sfogliatura è principalmente legata alle temperature elevate dello stampo e quindi alla lubrificazione.

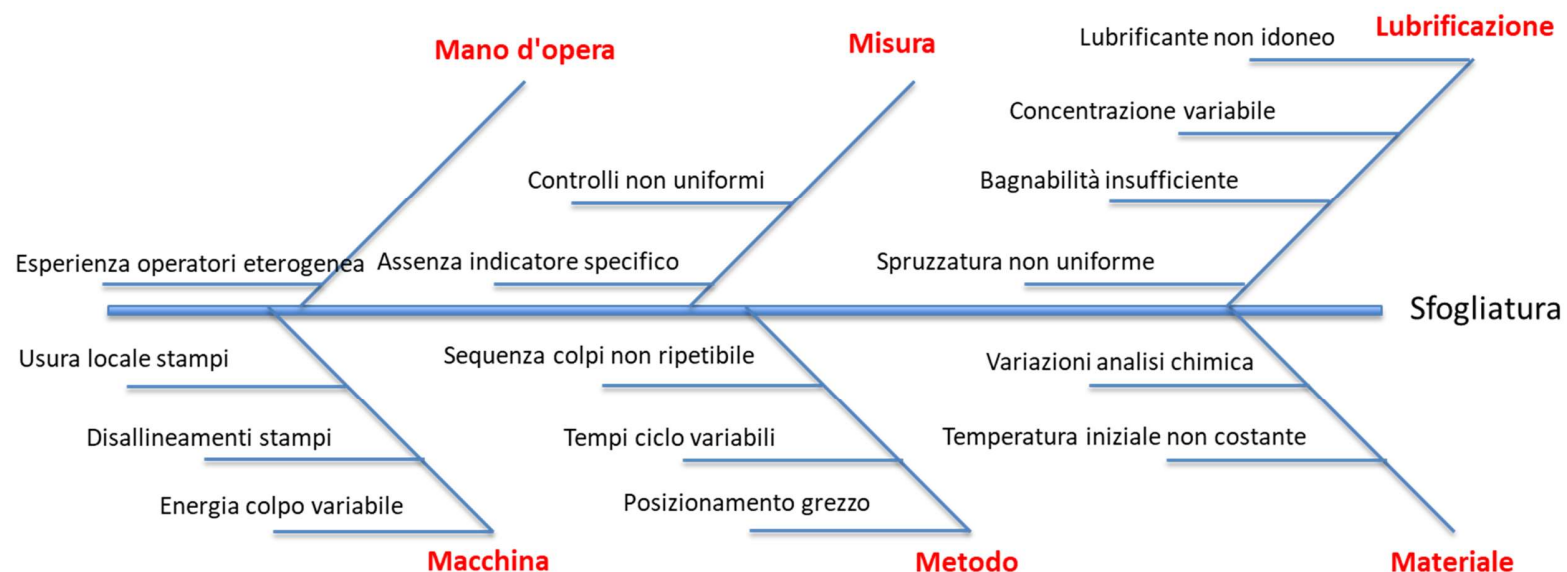


Figure 6.1 – Diagramma di Ishikawa per trovare la causa radice del problema

Si è, quindi, deciso di cambiare lubrificante a partire dal lotto di produzione n°8.

Di seguito i risultati.

Lotto 8	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
470	Sfogliatura
109	Taglio
316	Spessore non conforme
81	Figura incompleta

976

Lotto 9	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
334	Sfogliatura
86	Taglio
248	Spessore non conforme
95	Figura incompleta

763

Lotto 10	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
337	Sfogliatura
92	Taglio
150	Spessore non conforme
102	Figura incompleta

681

Lotto 11	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
202	Sfogliatura
148	Taglio
25	Spessore non conforme
38	Figura incompleta

413

Lotto 13	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
93	Sfogliatura
68	Taglio
6	Spessore non conforme
14	Figura incompleta

181

Lotto 14	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
138	Sfogliatura
65	Taglio
15	Spessore non conforme
23	Figura incompleta

241

Lotto 15	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
104	Sfogliatura
58	Taglio
35	Spessore non conforme
26	Figura incompleta

223

Lotto 16	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
98	Sfogliatura
96	Taglio
24	Spessore non conforme
19	Figura incompleta

237

Lotto 17	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
102	Sfogliatura
76	Taglio
29	Spessore non conforme
12	Figura incompleta

219

Lotto 18	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
95	Sfogliatura
68	Taglio
19	Spessore non conforme
15	Figura incompleta

197

Distribuzione dei difetti dal lotto 8 al lotto 18		
Difetto	Quantità NC	% di incidenza
Sfogliatura	2122	49%
Taglio	933	21%
Spessore non conforme	872	20%
Figura incompleta	442	10%

Come si può notare da quest'ultima tabella il difetto principale resta la sfogliatura. Questo ci permette di comprendere che il processo di forgiatura di questo articolo comporti sempre la formazione di questo difetto sul pezzo.

Resta comunque valida l'azione intrapresa in quanto il numero di pezzi difettosi è diminuito drasticamente. Si è passata dal un 11% dei primi 7 lotti di produzione al circa 1.8% negli ultimi 7 lotti di produzione.

C'è stata una fase di transizione tra il lotto 8 e il lotto 11 dove è stato necessario eseguire diversi test con il nuovo lubrificante al fine di trovare il giusto equilibrio tra percentuale della miscela e quantità del lubrificante.

Correlazione del fatto che il numero di pezzi con sfogliature è diminuito è una temperatura dello stampo inferiore e superiore più costante e leggermente più bassa. I lubrificanti a base grafite effettuano le loro migliori prestazioni quando la temperature degli stampi è inferiore a 190 °C.

La seguente tabella mostra l'andamento della temperatura nei lotti.

Lotti	Temperatura media stampo inferiore	Temperatura media stampo superiore
1 - 7	214 °C	290 °C
8 - 11	208 °C	255 °C
12 - 18	160 °C	175 °C

6.2 Articolo 3756

Per il seguente articolo sono stati presi in esame 10 lotti per un totale di 33800 pezzi forgiati.

Articolo	Lotto di produzione	Quantità prodotta	Quantità Conforme	Quantità Non Conforme	Percentuale dei NC rispetto alla Quantità	Macchina di produzione	Tipologia lubrificante	Percentuale di miscela	Pressione aria pulizia stampo	Temperatura stampo inferiore	Temperatura stampo superiore
3756	1	3500	2981	519	14,83%	Bilanciere a vite	Henkel	12%	3,5	210	330
3756	2	3300	2766	534	16,18%	Bilanciere a vite	Henkel	12%	3,5	220	290
3756	3	3850	3302	548	14,23%	Bilanciere a vite	Fuchs	12%	3,5	190	280
3756	4	3650	3152	498	13,64%	Bilanciere a vite	Fuchs	12%	3,5	240	310
3756	5	3950	3435	515	13,04%	Bilanciere a vite	Fuchs	9%	3,5	210	260
3756	6	3500	3404	96	2,74%	Bilanciere a vite	Fuchs	9%	3,5	215	270
3756	7	3000	2898	102	3,40%	Bilanciere a vite	Fuchs	9%	3,5	210	240
3756	8	2950	2864	86	2,92%	Bilanciere a vite	Fuchs	9%	3,5	215	245
3756	9	2900	2790	110	3,79%	Bilanciere a vite	Fuchs	9%	3,5	205	255
3756	10	3200	3132	68	2,13%	Bilanciere a vite	Fuchs	9%	3,5	205	265
		33800	30724	3076							

Table 6.2 - Raccolta dati per l'articolo 3756 dove mostra le quantità Non Conformi per ogni lotto di produzione, la relativa percentuale di scarto

La tabella soprastante mostra i seguenti dati:

- Quantità prodotta per lotto;
- Quantità NON conforme (di conseguenza la Quantità conforme);
- % Quantità NC rispetto alla Quantità prodotta;
- Macchina di produzione
- Tipologia di lubrificante
- % di miscela (acqua + grafite)
- Pressione aria pulizia stampo
- Temperatura stampo inferiore
- Temperatura stampo superiore

Per ogni lotto di produzione è stata svolta un'ulteriore analisi sulla quantità non conforme suddividendola per tipologia di difetto.

Lotto 1	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
367	Taglio
112	Figura incompleta
40	Spessore non conforme
519	

Lotto 2	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
384	Taglio
119	Figura incompleta
31	Spessore non conforme

534

Lotto 3	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
357	Taglio
153	Figura incompleta
38	Spessore non conforme

548

Lotto 4	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
370	Taglio
103	Figura incompleta
25	Spessore non conforme

498

Lotto 5	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
373	Taglio
125	Figura incompleta
17	Spessore non conforme

515

La seguente tabella mostra la distribuzione dei difetti sul totale della Quantita NON conforme e sul totale dei pezzi prodotti. Come si può notare il principale difetto dei primi 5 lotti è il taglio con un incidenza del 60%.

Distribuzione dei difetti dal lotto 1 al lotto 5		
Difetto	Quantità NC	% di incidenza
Taglio	1851	60%
Figura incompleta	612	20%
Spessore non conforme	151	5%

Il seguente articolo viene prodotto nella stessa macchina del precedente. A partire dal 3° lotto è stato sostituito il lubrificante. Inoltre, per determinare una possibile root cause si è adoperato il diagramma di Ishikawa.

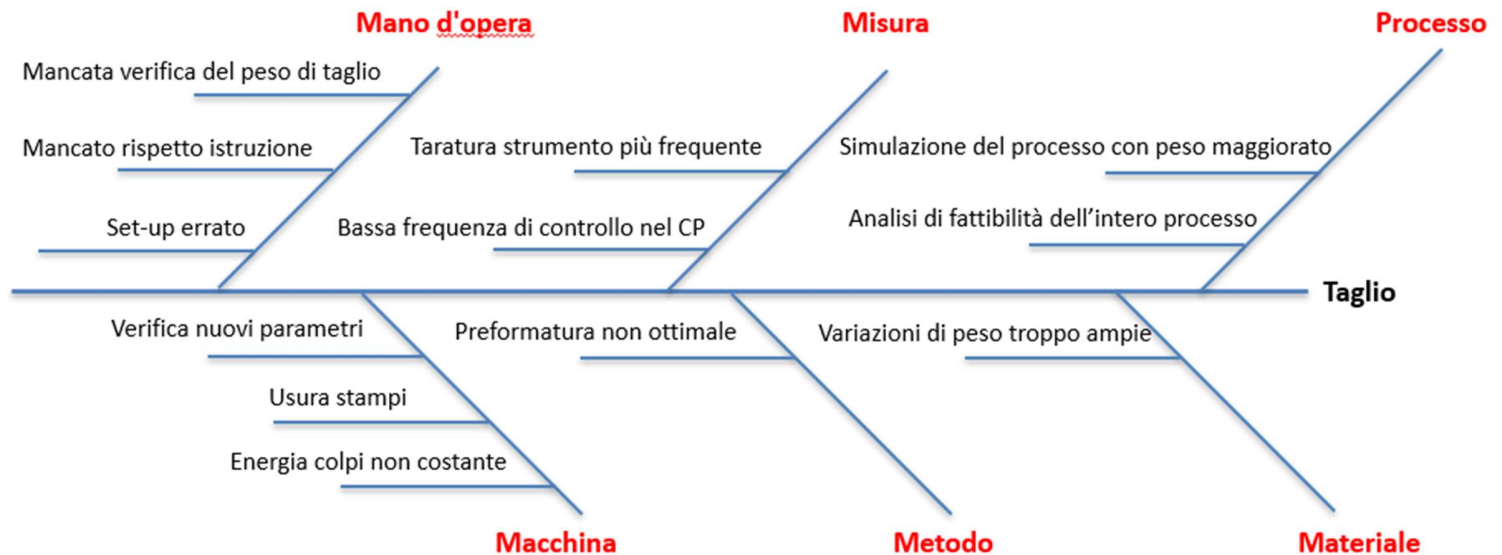


Figure 6.2 – Diagramma di Ishikawa per trovare la causa radice del problema

Si è, quindi, deciso di aumentare il peso del cesoiato di 0.1 kg, di modificare conseguentemente la preformatura in quanto non era più possibile eseguirla allo stesso modo e ovviamente sono stati modificati alcuni parametri del processo.

Dal lotto 6 (compreso) sono state introdotte tutte le modifiche precedentemente elencate.

Lotto 6	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
73	Taglio
14	Figura incompleta
9	Spessore non conforme

Lotto 7	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
84	Taglio
11	Figura incompleta
7	Spessore non conforme

102

Lotto 8	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
65	Taglio
20	Figura incompleta
1	Spessore non conforme

86

Lotto 9	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
96	Taglio
11	Figura incompleta
3	Spessore non conforme

110

Lotto 10	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
63	Taglio
2	Figura incompleta
3	Spessore non conforme

68

Distribuzione dei difetti dal lotto 6 al lotto 10		
Difetto	Quantità NC	% di incidenza
Taglio	381	82%
Figura incompleta	58	13%
Spessore non conforme	23	5%

Come si può notare da quest'ultima tabella il difetto principale resta il taglio. Questo ci permette di comprendere che la geometria del pezzo comporti ugualmente la formazione di questo difetto.

Restano comunque valide l'azione intraprese in quanto il numero di pezzi difettosi è diminuito drasticamente. Si è passata dal un 14% dei primi 5 lotti di produzione al circa 3% negli ultimi 5 lotti di produzione.

A differenza dell'articolo precedente l'effetto del lubrificante ha subito portato dei vantaggi in quanto i test erano già stati effettuati precedentemente, sicuramente questo ha inciso nell'ottenere subito il minor numero possibile di quantità non conformi.

6.3 Articolo 5623

Per il seguente articolo sono stati presi in esame 13 lotti per un totale di 79000 pezzi forgiati.

La tabella soprastante mostra i seguenti dati:

Articolo	Lotto di produzione	Quantità prodotta	Quantità Conforme	Quantità Non Conforme	Percentuale dei NC rispetto alla Quantità prodotta	Macchina di produzione	Tipologia lubrificante	Percentuale di miscela	Pressione aria pulizia stampo	Temperatura stampo inferiore	Temperatura stampo superiore
5623	1	6500	5594	906	13,94%	Bilanciere a vite	Henkel	12%	3,5	205	265
5623	2	6000	5138	862	14,37%	Bilanciere a vite	Henkel	12%	3,5	205	245
5623	3	5500	4636	864	15,71%	Bilanciere a vite	Henkel	12%	3,5	215	250
5623	4	5000	4092	908	18,16%	Bilanciere a vite	Henkel	12%	3,5	230	260
5623	5	6000	4897	1103	18,38%	Bilanciere a vite	Henkel	12%	3,5	225	260
5623	6	7000	6205	795	11,36%	Bilanciere a vite	Fuchs	12%	3,5	220	270
5623	7	6300	5626	674	10,70%	Bilanciere a vite	Fuchs	12%	3,5	215	240
5623	8	5900	5307	593	10,05%	Bilanciere a vite	Fuchs	12%	3,5	210	245
5623	9	6200	5437	763	12,31%	Bilanciere a vite	Fuchs	12%	3,5	205	245
5623	10	5600	5335	265	4,73%	Bilanciere a vite	Fuchs	7%	3,5	200	235
5623	11	6200	5952	248	4,00%	Bilanciere a vite	Fuchs	7%	3,5	160	205
5623	12	6300	6081	219	3,48%	Bilanciere a vite	Fuchs	7%	3,5	165	185
5623	13	6500	6233	267	4,11%	Bilanciere a vite	Fuchs	7%	3,5	170	185
		79000	70533	8467							

Table 6.3 - Raccolta dati per l'articolo 5623 dove mostra le quantità Non Conformi per ogni lotto di produzione, la relativa percentuale di scarto

- Quantità prodotta per lotto;
- Quantità NON conforme (di conseguenza la Quantità conforme);
- % Quantità NC rispetto alla Quantità prodotta;
- Macchina di produzione
- Tipologia di lubrificante
- % di miscela (acqua + grafite)
- Pressione aria pulizia stampo
- Temperatura stampo inferiore
- Temperatura stampo superiore

Per ogni lotto di produzione è stata svolta un'ulteriore analisi sulla quantità non conforme suddividendola per tipologia di difetto.

Lotto 1	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
715	Taglio
168	Figura incompleta
23	Sfogliatura

906

Lotto 2	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
736	Taglio
123	Figura incompleta
3	Sfogliatura

862

Lotto 3	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
693	Taglio
98	Figura incompleta
73	Sfogliatura

864

Lotto 4	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
824	Taglio
63	Figura incompleta
21	Sfogliatura

908

Lotto 5	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
983	Taglio
77	Figura incompleta
43	Sfogliatura

1103

A partire dal lotto 6 è stato cambiato lubrificante. Essendo la medesima macchina degli altri articoli, ovviamente la modifica è stata importata su tutti i prodotti. Si è deciso inizialmente di non modificare nessun altro parametro al fine di valutare la bontà della modifica del lubrificante.

Lotto 6	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
602	Taglio
106	Figura incompleta
87	Sfogliatura

795

Lotto 7	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
507	Taglio
95	Figura incompleta
72	Sfogliatura

674

Lotto 8	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
513	Taglio
18	Figura incompleta
62	Sfogliatura

593

Lotto 9	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
638	Taglio
35	Figura incompleta
90	Sfogliatura

763

Con la sola sostituzione del lubrificante si è ridotta drasticamente la percentuale di scarto

Lotti	% scarto
1 - 5	16,1
6 - 9	11,1

In questo caso per analizzare la causa radice è stato adoperato un approccio basato sull'analisi del processo e sulle prove di produzione. Infatti, analizzando gli scarti si è notato che anche alcune quote dimensionali risultavano fuori tolleranza questo causato da un non riempimento dello stampo. Si è quindi deciso quindi di diminuire la % di grafite in quanto uno strato eccessivo di lubrificante sullo stampo può causare un aumento dell'attrito tra materiale e stampo stesso. Conseguentemente si è aumentata anche l'energia per singolo colpo al fine di aumentare "la forza" che il bilanciere imprime sulla billetta.

Dal lotto 10 (compreso) sono state introdotte tutte le modifiche precedentemente elencate.

Lotto 10	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
218	Taglio
15	Figura incompleta
32	Sfogliatura

265

Lotto 11	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
238	Taglio
7	Figura incompleta
3	Sfogliatura

248

Lotto 12	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
143	Taglio
39	Figura incompleta
37	Sfogliatura

219

Lotto 13	
Quantità non conforme	Tipologia di difetto
185	Taglio
56	Figura incompleta
26	Sfogliatura

267

Come si può notare dall'analisi dei difetti sui singoli lotti il difetto principale resta il taglio. Questo ci permette di comprendere che la geometria del pezzo comporti ugualmente la formazione di questo difetto.

Restano comunque valide l'azione intraprese in quanto il numero di pezzi difettosi è diminuito drasticamente.

Lotti	% scarto
1 - 5	16,1
6 - 9	11,1
10 - 13	4,08

A differenza dell'articolo precedente l'effetto del lubrificante ha subito portato dei vantaggi in quanto i test erano già stati effettuati precedentemente, sicuramente questo ha inciso nell'ottenere subito il minor numero possibile di quantità non conformi.

Capitolo 7 Preparazione dei campioni

7.1 Introduzione

L'obiettivo di questa fase è stato quello di ottenere una superficie di osservazione perfettamente piana, lucida e priva di imperfezioni indotte dalla preparazione stessa. Infatti, nella metallografia, la qualità della superficie preparata è un aspetto determinante: graffi, deformazioni locali, residui di taglio o lucidature non corrette possono compromettere l'osservazione e portare a interpretazioni errate dei difetti reali presenti nel materiale.

Il lavoro sperimentale si è articolato in diverse fasi:

- taglio dei campioni
- inglobamento
- levigatura e preparazione superficiale
- lucidatura

7.2 Prelievo e taglio dei campioni

La prima fase dell'attività sperimentale ha riguardato il prelievo dei campioni dal componente forgiato. I provini sono stati ottenuti mediante taglio con troncatrice metallografica (vedi foto 7.1 e foto 7.2), in modo da isolare le zone di interesse e renderle compatibili con le successive operazioni di inglobamento e lucidatura.



Figure 7.1 Sega troncatrice utilizzata per il taglio dei pezzi forgiati al fine di ottenere i campioni della misura idonea per l'inglobamento



Figure 7.2 Modello della sega troncatrice

Durante questa operazione è stato necessario prestare particolare attenzione nell'evitare surriscaldamenti localizzati, deformazioni plastiche o danneggiamenti superficiali che avrebbero potrebbero mascherare o alterare i difetti reali presenti nel materiale.

Questa fase permette di passare da un'analisi puramente esterna del componente ad un'analisi interna, per questo va ritenuta molto importante. Infatti attraverso il taglio diventa possibile osservare la continuità del materiale, l'eventuale presenza di sfogliature, cricche, inclusioni o discontinuità legate al flusso del metallo durante lo stampaggio.

È altresì importante sottolineare che la superficie generata dalla troncatrice metallografica non può essere considerata direttamente idonea per l'osservazione metallografica. Il taglio produce inevitabilmente rigature, solchi e per questo motivo, la superficie ottenuta deve essere successivamente sottoposta a abrasione e lucidatura.

Dopo il taglio, i campioni sono stati controllati visivamente per verificare che la zona di interesse fosse effettivamente presente nella sezione ottenuta. Solo successivamente si è proceduto con la fase di inglobamento.

7.3 Inglobamento dei campioni

Per l'inglobamento dei campioni sono state utilizzate due resine (vedi foto 7.3):

1. ClaroFast: Materiale acrilico trasparente per l'inglobamento a caldo dei campioni metallografici;
2. DuroFast: Resina epossidica per inglobamento a caldo dei campioni metallografici.



Figure 7.3 – Resine utilizzate per l'inglobamento a caldo dei campioni prelevati da componenti forgiati

La procedura operativa di inglobamento è stata eseguita secondo una sequenza precisa:

- Inserimento del DuroFast nella zona di inglobamento della pressa (vedi foto 7.4);
- Posizionamento del provino con parte contenente il difetto a diretto contatto con la resina epossidica;
- Inserimento del ClaroFast al fine di ricoprire il provino.



Figure 7.4 – Pressa utilizzata per l'inglobamento a caldo dei campioni prelevati da componenti forgiati.
Marca "LECO", Modello "Mounting Press PR-36"

Per l'inglobamento dei campioni è stata utilizzata una pressa della "LECO" modello "Mounting Press PR-36".

Il ciclo è stato condotto con una temperatura di esercizio compresa tra 180 e 200 °C, una pressione pari a 4000 PSI e un tempo complessivo di circa 20 minuti. Durante questa fase, la combinazione di temperatura e pressione ha consentito la compattazione delle resine attorno al provino metallico, ottenendo un supporto solido, omogeneo e sufficientemente rigido per le successive operazioni di preparazione metallografica. Inizio modulo Fine modulo

7.4 Preparazione superficiale dei campioni

La fase più lunga e delicata dell'intera procedura è stata la preparazione superficiale dei campioni.

La macchina utilizzata in questa fase (vedi figura 7.5) è una lucidatrice e smerigliatrice metallografica modello MiniTech 233.

Di seguito le sue caratteristiche tecniche:

- Diametro piatto: supporta dischi fino a 250mm
- Velocità regolabile: da 20 giri/min fino a 700 giri/min
- Senso di rotazione: Bidirezionale (orario e antiorario)
- Raffreddamento ad acqua

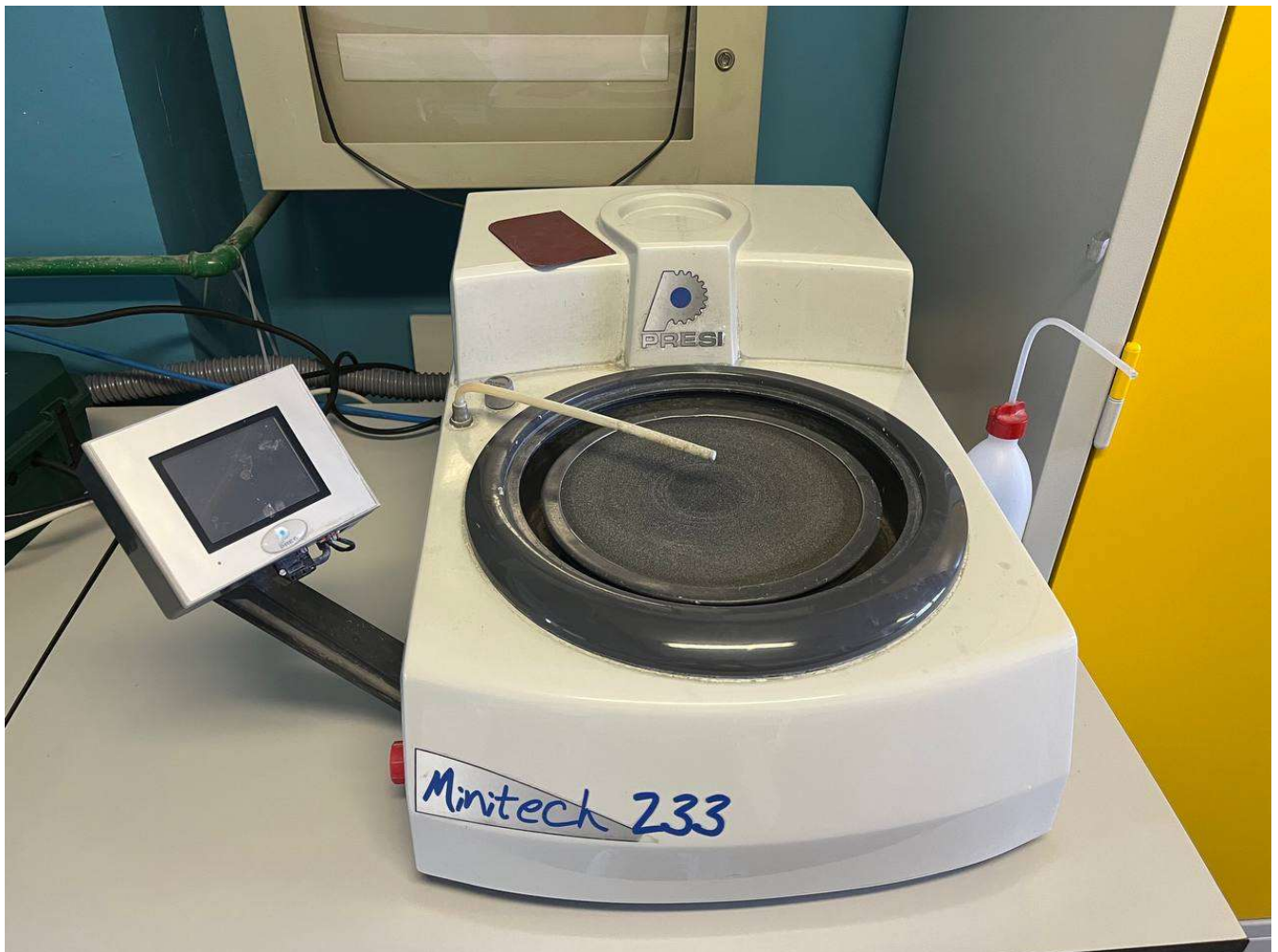


Figure 7.5 – Smerigliatrice metallografica utilizzata per la preparazione superficiale dei campioni

Lo scopo di questa fase è stato quello di eliminare progressivamente tutte le imperfezioni ed irregolarità sulla superficie a contatto con la lama in quanto l'operazione di taglio può causare delle rigature profonde, irregolarità, possibili deformazioni locali e rugosità elevate.

Per tali motivi la superficie generata dal taglio con troncattrice metallografica non è direttamente osservabile al microscopio per un'analisi metallografica accurata in quanto se osservata in queste condizioni, la superficie non permetterebbe di distinguere correttamente i difetti reali del materiale dagli artefatti prodotti dal taglio.

Al fine di evitare errori di riconoscimento di potenziali difetti al microscopio, i campioni sono stati sottoposti a una sequenza progressiva di abrasione e lucidatura.

In altre parole, la preparazione metallografica non consiste semplicemente nel lucidare il campione, ma nel ridurre gradualmente la profondità dei graffi fino a renderli trascurabili rispetto alla scala di osservazione microscopica. Ogni passaggio ha quindi una funzione specifica: le carte abrasive più

grossolane servono a spianare e rimuovere i segni più profondi, mentre i panni di lucidatura permettono di ottenere una finitura superficiale adatta all'analisi ottica.

7.5 Abrasione mediante carte abrasive

La prima parte della preparazione superficiale è stata eseguita mediante carte abrasive a granulometria decrescente. In particolare, sono state utilizzate le seguenti carte: carta 400, carta 800, carta 1200 e carta 2400.

L'utilizzo di carte con granulometria progressivamente più fine consente di rimuovere in modo controllato i segni di taglio e le irregolarità più marcate. La carta 400 rappresenta il primo passaggio significativo della preparazione: essa permette di spianare la superficie e rimuovere i solchi più profondi lasciati dalla sega. Tuttavia, proprio perché è una carta relativamente grossolana, lascia a sua volta graffi evidenti sulla superficie.

Di seguito l'ordine delle carte utilizzate: 400 → 800 → 1200 → 2400.

Ogni passaggio deve essere completato in modo adeguato prima di procedere al successivo. Se, ad esempio, i graffi lasciati dalla carta 400 non vengono completamente eliminati con la carta 800, essi resteranno visibili anche dopo le fasi successive, rendendo più difficile l'osservazione metallografica finale.

Durante la lavorazione è importante mantenere il campione ben appoggiato, applicare una pressione uniforme ed evitare movimenti irregolari che potrebbero creare graffi profondi o direzionali. In genere, tra un passaggio e l'altro, è consigliabile ruotare il campione di circa 90 gradi: in questo modo diventa più semplice verificare se i graffi della carta precedente sono stati effettivamente rimossi.

Un altro aspetto importante riguarda la pulizia del campione tra una carta e la successiva. Prima di passare alla granulometria più fine, il campione deve essere liberato dai residui dell'abrasivo precedente. In caso contrario, particelle più grossolane potrebbero restare intrappolate sulla superficie e produrre graffi profondi anche durante le fasi di finitura.

La fase con le carte abrasive ha permesso di ottenere una superficie già sufficientemente regolare, ma non ancora idonea all'osservazione microscopica dettagliata. Per raggiungere una qualità superficiale adeguata è stato quindi necessario procedere con la lucidatura fine.

7.6 Lucidatura con panni da 6 micrometri, 3 micrometri e 1 micrometro

Dopo la fase di abrasione con carta 2400, i campioni sono stati sottoposti a lucidatura mediante panni con sospensioni abrasive di granulometria decrescente. In particolare, sono stati utilizzati panni da 6 micrometri, 3 micrometri e 1 micrometro.

L'ordine seguito è stato quindi: 6 micrometri -> 3 micrometri -> 1 micrometro.

Anche in questo caso, il criterio è quello di passare progressivamente da una granulometria più grossolana a una più fine. Il panno da 6 micrometri ha avuto la funzione di eliminare i graffi residui lasciati dalla carta 2400 e di iniziare la vera e propria lucidatura della superficie mentre il panno da 1 micrometro è

stato utilizzato per ottenere la finitura finale, superficie che sarà analizzata successivamente al microscopio.

La lucidatura con panno è una fase più delicata rispetto all'abrasione con carta, in quanto la superficie del campione può essere facilmente danneggiata come ad esempio da una pressione eccessiva o da residui di impurità dei passaggi precedenti. Per questo motivo, tra un passaggio e l'altro è necessario pulire accuratamente il campione, in modo da evitare contaminazioni tra abrasivi di granulometria diversa.

La fase finale, rappresentata dall'utilizzo del panno da 1 micrometro, consente di ottenere una superficie adatta all'osservazione del difetto al microscopio. A questo livello di finitura, eventuali discontinuità presenti nel materiale risultano più facilmente distinguibili da graffi o imperfezioni superficiali generate dalla preparazione.

7.7 Importanza della preparazione metallografica per l'analisi del difetto

La preparazione metallografica non rappresenta una semplice fase preliminare, ma costituisce una parte essenziale dell'intera indagine sperimentale. La corretta individuazione dei difetti dipende dalla qualità della superficie osservata.

Nel caso dei componenti forgiati, i difetti possono assumere forme molto diverse: sfogliature, cricche, laps, discontinuità interne, inclusioni e zone di flusso non corretto del materiale. Una superficie non adeguatamente preparata può quindi impedire la corretta identificazione del difetto o rendere difficile distinguere tra difetto reale e difetto di preparazione del campione stesso.

Capitolo 8 - Analisi metallografica dei difetti osservati al microscopio

Nel seguente capitolo verranno analizzate le immagini ottenute mediante osservazione al microscopio ottico dei campioni preparati secondo le modalità descritte nel capitolo precedente.

L'osservazione al microscopio rappresenta un passaggio fondamentale nello studio dei difetti da stampaggio a caldo, poichè fornisce un ulteriore approfondimento rispetto alla sola valutazione macroscopica. Difetti simili esternamente possono avere natura totalmente differente se osservati al microscopio fornendo inoltre dati sull'estensione.

L'interpretazione delle immagini è stata condotta con un approccio prudente. La sola osservazione ottica, infatti, permette di descrivere con buona precisione la forma e la posizione di un difetto, ma non sempre consente di stabilirne con certezza assoluta il meccanismo di formazione.

Le informazioni fornite nei capitoli precedenti sono state utilizzate per valutare, il più possibile, un legame tra la morfologia dei difetti e fattori quali il flusso del materiale nello stampo, la quantità iniziale del cesoiato, le condizioni di lubrificazione, la presenza di ossidi superficiali, la geometria locale del pezzo e le concentrazioni di tensione. In questo modo, l'analisi microscopica non viene considerata come una semplice documentazione fotografica, ma come uno strumento di supporto alla comprensione tecnica del difetto e alla validazione delle ipotesi formulate durante l'analisi del processo produttivo.

Nei paragrafi successivi vengono presentati i singoli articoli riportando per ciascuno le immagini più significative e una discussione tecnica della morfologia osservata. Ogni caso viene trattato separatamente, in modo da evidenziare le differenze tra i difetti riscontrati e individuare, ove possibile, il meccanismo più probabile di formazione.

8.1 080.91 – Lato numeri

L'articolo 080.91, è stato analizzato mediante osservazione al microscopio ottico su campione precedentemente tagliato, inglobato e lucidato secondo la procedura descritta nel Capitolo 7. Le immagini sono state acquisite a diversi ingrandimenti, partendo da viste generali a basso ingrandimento fino ad osservazioni di dettaglio ad alto ingrandimento

La forma osservata risulta compatibile con una cricca superficiale o sub-superficiale rispetto a una semplice inclusione puntiforme o a un artefatto di lucidatura. La continuità della discontinuità, osservabile anche al variare dell'ingrandimento, conferma infatti la presenza di una reale perdita locale di continuità del materiale.

8.1.1 Osservazione a basso ingrandimento

Le prime immagini, acquisite a basso ingrandimento, permettono di inquadrare la zona generale del difetto. Questo livello di osservazione è utile perché consente di distinguere il difetto da una semplice irregolarità locale e di valutarne l'estensione complessiva.

Nella fig. 8.1 è possibile osservare un tratto lineare con una certa continuità denominata seguita da una cavità isolata. La morfologia del difetto riduce la possibilità che il difetto sia stato generato durante la preparazione del campione.

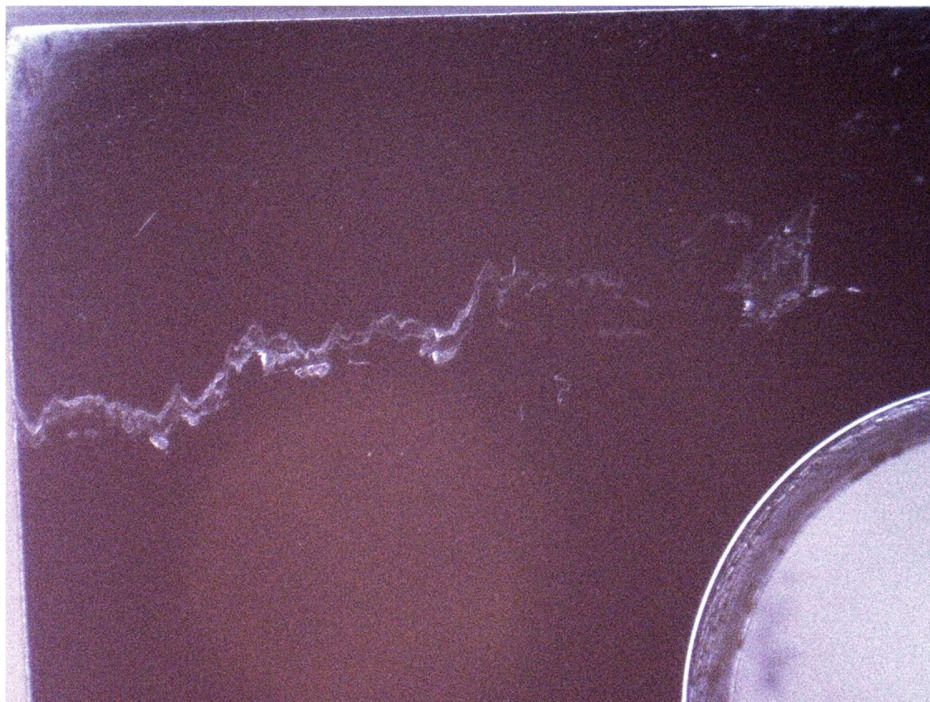


Figure 8.1 - Articolo 080.91 lato numeri: vista generale a basso ingrandimento della zona analizzata, acquisita a 2,5×0,23

Il tratto lineare in fig. 8.2 è una linea irregolare frastagliata con alcune zone leggermente più sottili. È possibile descrivere il difetto come una sfogliatura o comunque una discontinuità del materiale non perfettamente saldato.

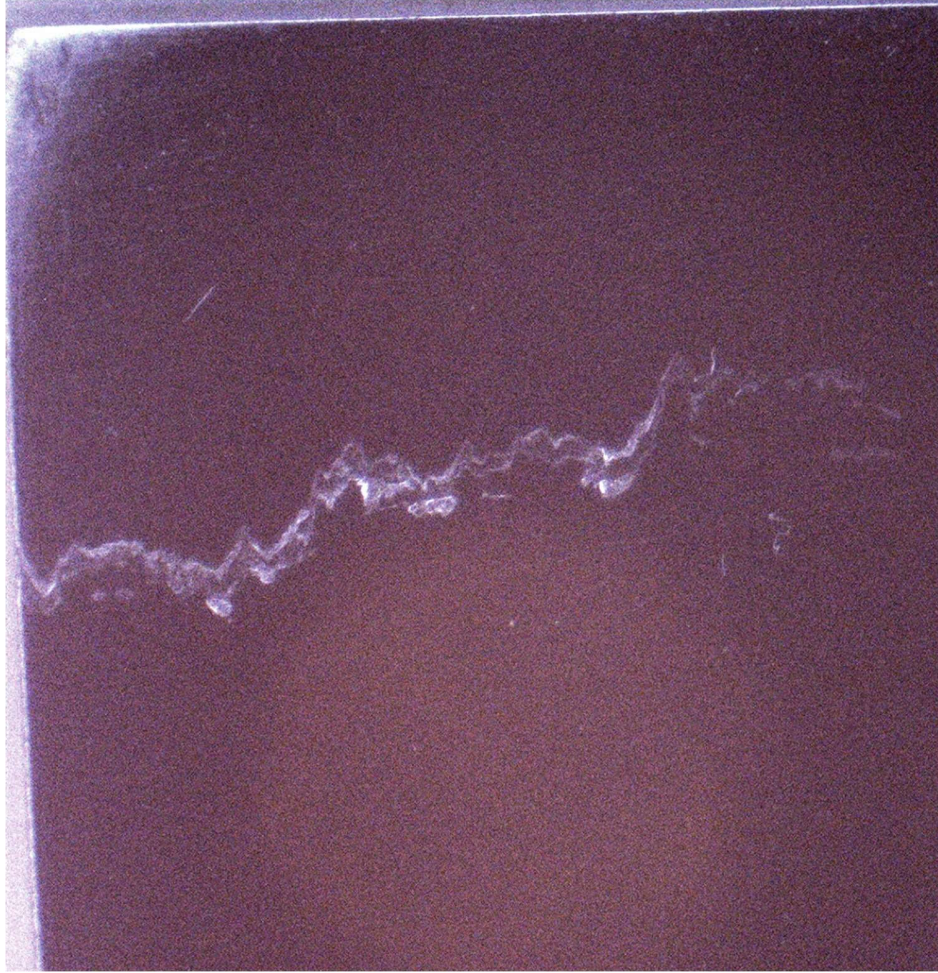


Figure 8.2 – Articolo 080.91 lato numeri: tratto lineare della figura 8.1, acquisita a $2,5 \times 0,23$

La fig. 8.3 mostra una cavità isolate alla fine del tratto lineare. Questo difetto è compatibile con una mancanza di materiale che può essersi generato durante la formazione della sfogliatura.

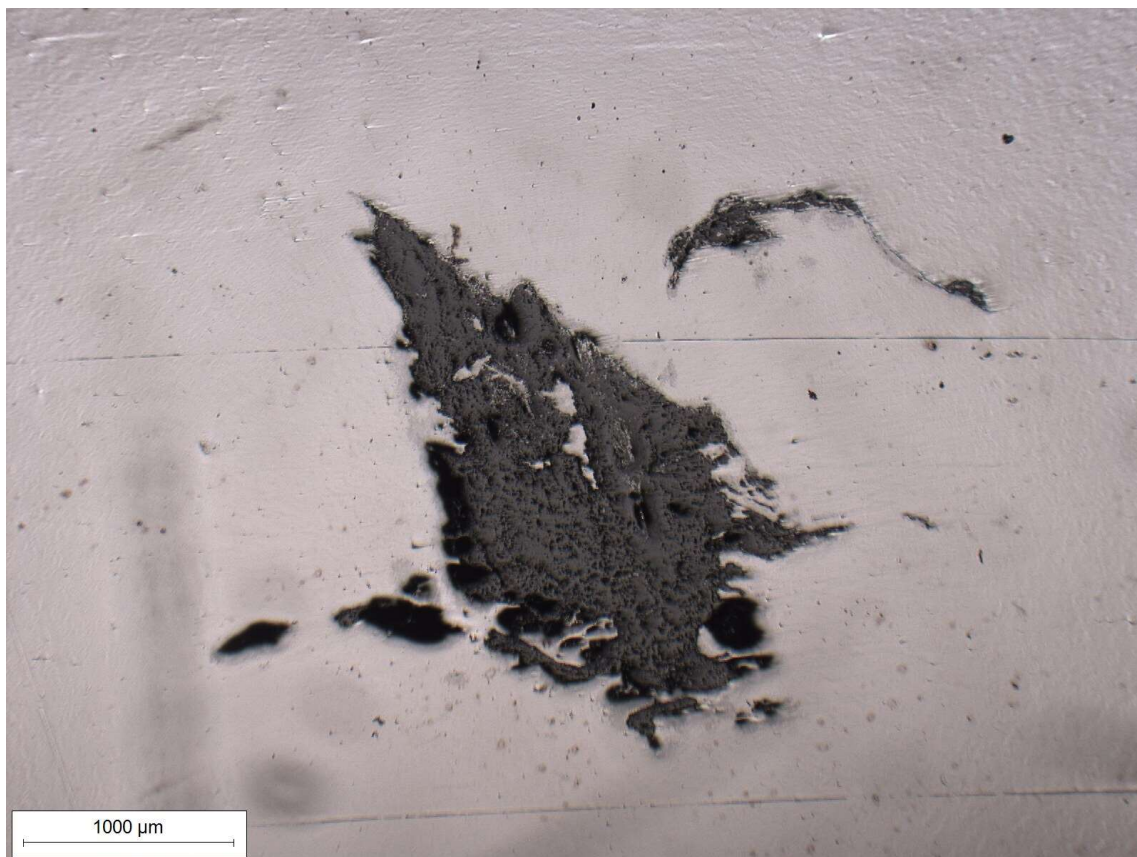


Figura 8.3 – Articolo 080.91 lato numeri: cavità isolate della figura 8.1, acquisita a $2\times 0,8$.

La fig. 8.4 mostra un maggiore focus sul difetto. É possibile notare una linea irregolare, molto frastagliata che rafforza l'ipotesi iniziale. Tale difetto quindi risulta essere una sfogliatura e non una cricca. Nel caso di una cricca, la morfologia del difetto sarebbe stata differente ossia molto più lineare e regolare.



Figura 8.4 – Articolo 080.91 lato numeri: individuazione della discontinuità, acquisita a 2×0,8.

8.1.2 Osservazione a ingrandimento intermedio e alto

Ad ingrandimento intermedio è stata analizzata la zona circostante al difetto principale. Come mostra la fig. 8.5 è possibile osservare delle inclusioni non metalliche, ossidi o microvuoti formatosi durante il processo di forgiatura.

Ad ingrandimento intermedio la discontinuità risulta più definita. Si osserva una linea con bordi non perfettamente regolari e larghezza variabile lungo il suo sviluppo. Questo aspetto è coerente con una separazione reale del materiale, piuttosto che con una rigatura superficiale.

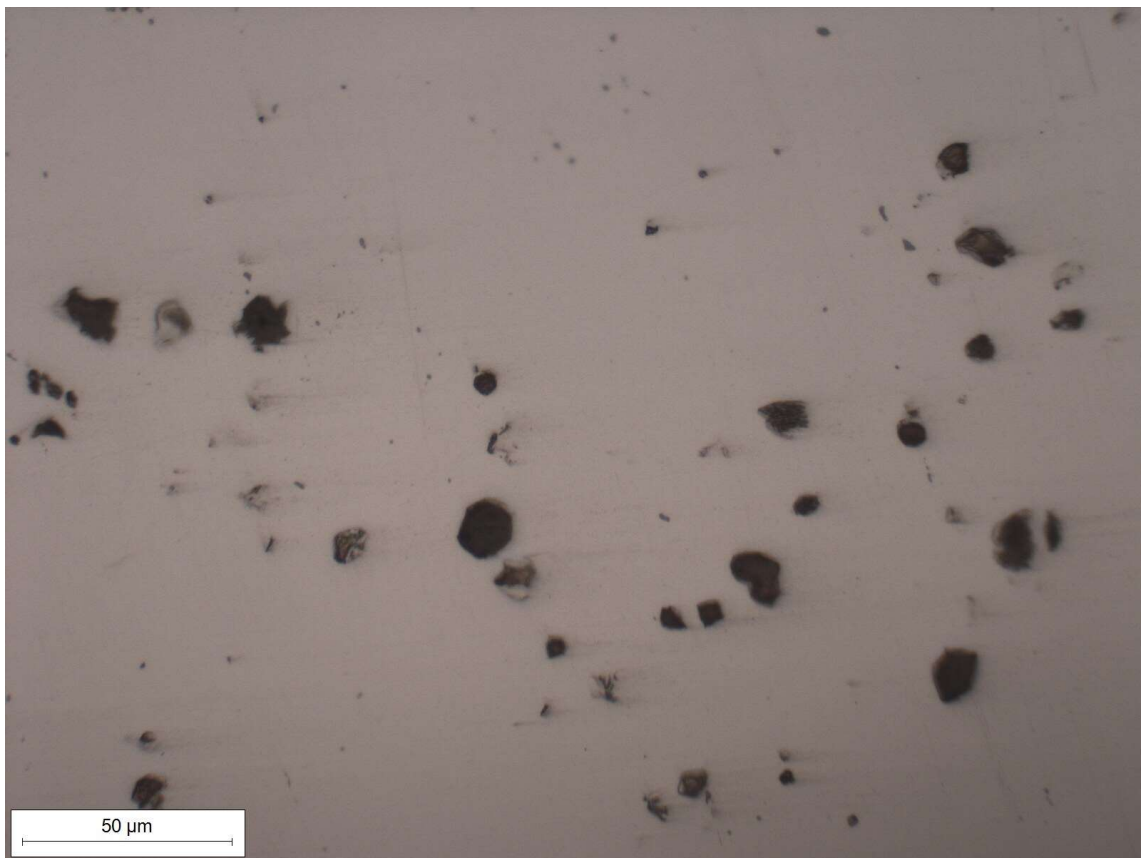


Figura 8.5 – Articolo 080.91 lato numeri: dettaglio ad alto ingrandimento della zona circostante al difetto principale, acquisita a 50×0,8.

8.1.3 Interpretazione del difetto

Nel complesso, il difetto osservato sull'articolo 080.91 lato numeri presentato nelle varie immagini può essere classificata come una sfogliatura dalla morfologia irregolare e frastagliata.

Dal punto di vista del processo di stampaggio a caldo, un difetto di questo tipo può essere associato a condizioni locali di sollecitazione, a un flusso non corretto del materiale o a concentrazioni di tensione in prossimità della superficie. La presenza del difetto sul lato numeri può essere significativa, poiché eventuali marcature, variazioni

geometriche locali o zone di contatto con lo stampo possono influenzare la distribuzione delle tensioni e il modo in cui il materiale fluisce durante la deformazione plastica.

La formazione di inclusioni è una caratteristica del processo di stampaggio a caldo. La superficie dell'acciaio, alle alte temperature, tende ad ossidarsi e se il materiale ripiega questi ossidi superficiali possono rimanere intrappolati all'interno della ripiega stessa.

8.2 080.91 - Lato pianetto

L'articolo 080.91, nella zona del pianetto, è stato analizzato mediante osservazione al microscopio ottico su campione precedentemente tagliato, inglobato e lucidato secondo la procedura descritta nel Capitolo 7. Per questo campione sono state acquisite immagini a diversi ingrandimenti in modo da valutare l'aspetto generale della zona difettosa, la morfologia locale della discontinuità e il rapporto tra difetto e microstruttura del materiale.

Le immagini mostrano infatti una zona superficiale irregolare, con presenza di materiale localmente non uniforme e una discontinuità che appare più compatibile con un fenomeno di ripiegamento, sfogliatura o lap superficiale, piuttosto che con una cricca netta e isolata.

8.2.1 Osservazione a basso ingrandimento

La fig. 8.6 mostra l'innescò di una possibile cricca. I bordi frastagliati fanno anche ipotizzare ad una possibile sfogliatura.

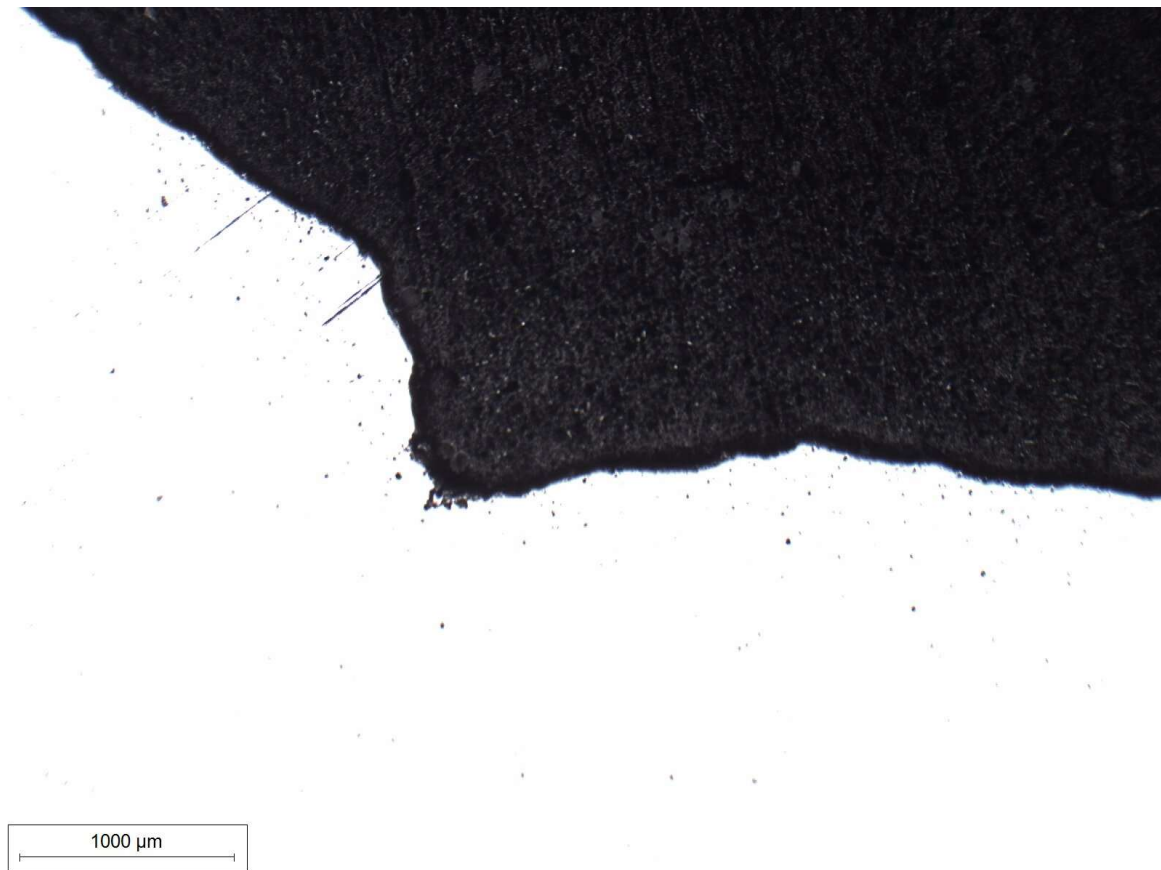


Figura 8.6 – Articolo 080.91 pianetto: vista generale a basso ingrandimento della zona superficiale analizzata, acquisita a 0.8x2

8.2.2 Osservazione a ingrandimento intermedio

La fig. 8.7 permette una maggiore identificazione del difetto. All'estremità del difetto è possibile notare l'innescò di una cricca con un andamento più lineare. A monte del difetto invece è possibile notare una zona più frastagliata quindi anche a questo ingrandimento non è facile determinare con chiarezza la tipologia del difetto.

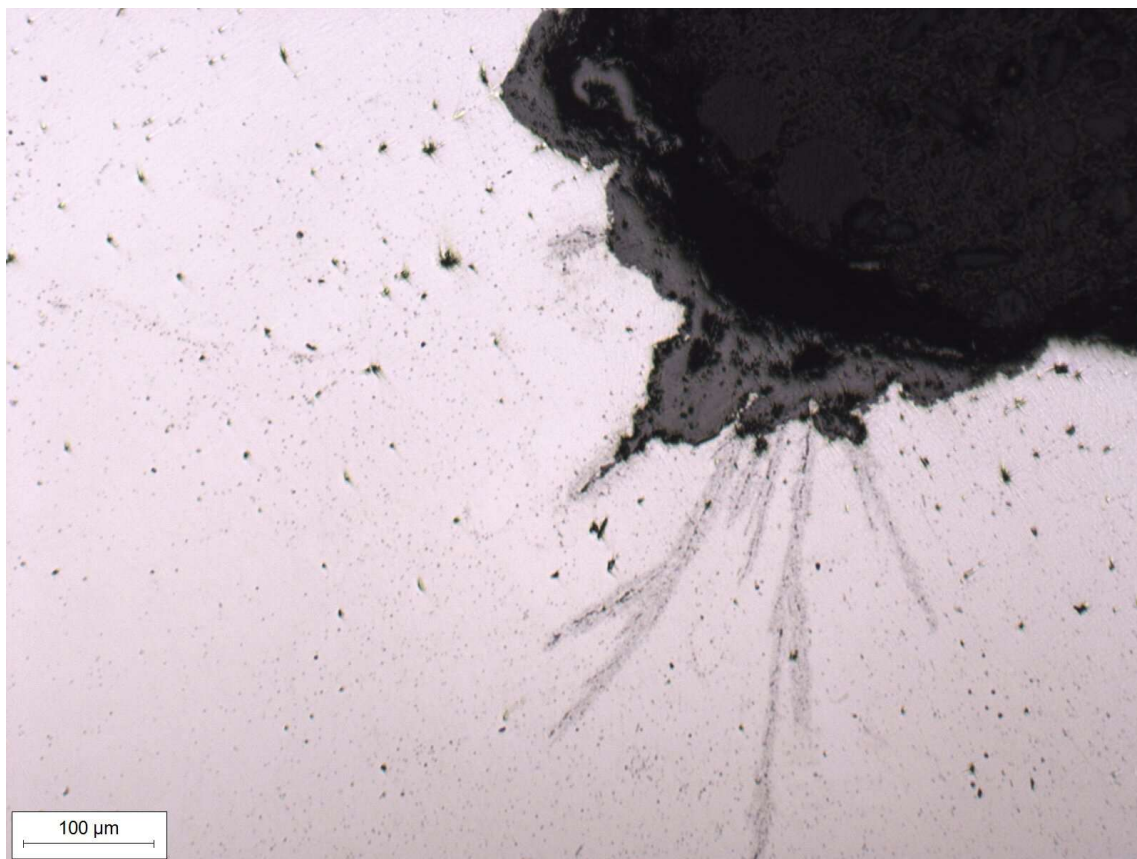


Figura 8.7 – Articolo 080.91 pianetto: dettaglio della zona superficiale con evidenza di irregolarità del bordo e indicazioni scure in prossimità del difetto, acquisita a 1.25x10.

8.2.3 Osservazione ad alto ingrandimento

La fig. 8.8 evidenzia con maggiore dettaglio la zona di discontinuità. Si nota una regione irregolare con la presenza di numerose indicazioni puntiformi nella zona circostante. La discontinuità non appare come una linea unica e sottile, ma come una zona più articolata, con contorni non netti e presenza di materiale distribuito in modo non uniforme. Questo ingrandimento permette con maggiore sicurezza di classificare il difetto. È possibile notare quindi un primo tratto rettilineo paragonabile ad un innescò di cricca e conseguentemente è presente una zona frastagliata paragonabile ad un mancanto riempimento dello stampo con conseguente mancanza di materiale. Nei processi di stampaggio a caldo, infatti, un ripiegamento del materiale può generare una zona di contatto non perfettamente saldata; se tra le superfici sono presenti ossidi, lubrificante o contaminanti, la risaldatura metallurgica può non avvenire completamente.

Inoltre sono presenti delle striature dovute a parti staccate dovute probabilmente al processo di preparazione del campione tramite levigatura e lucidatura.

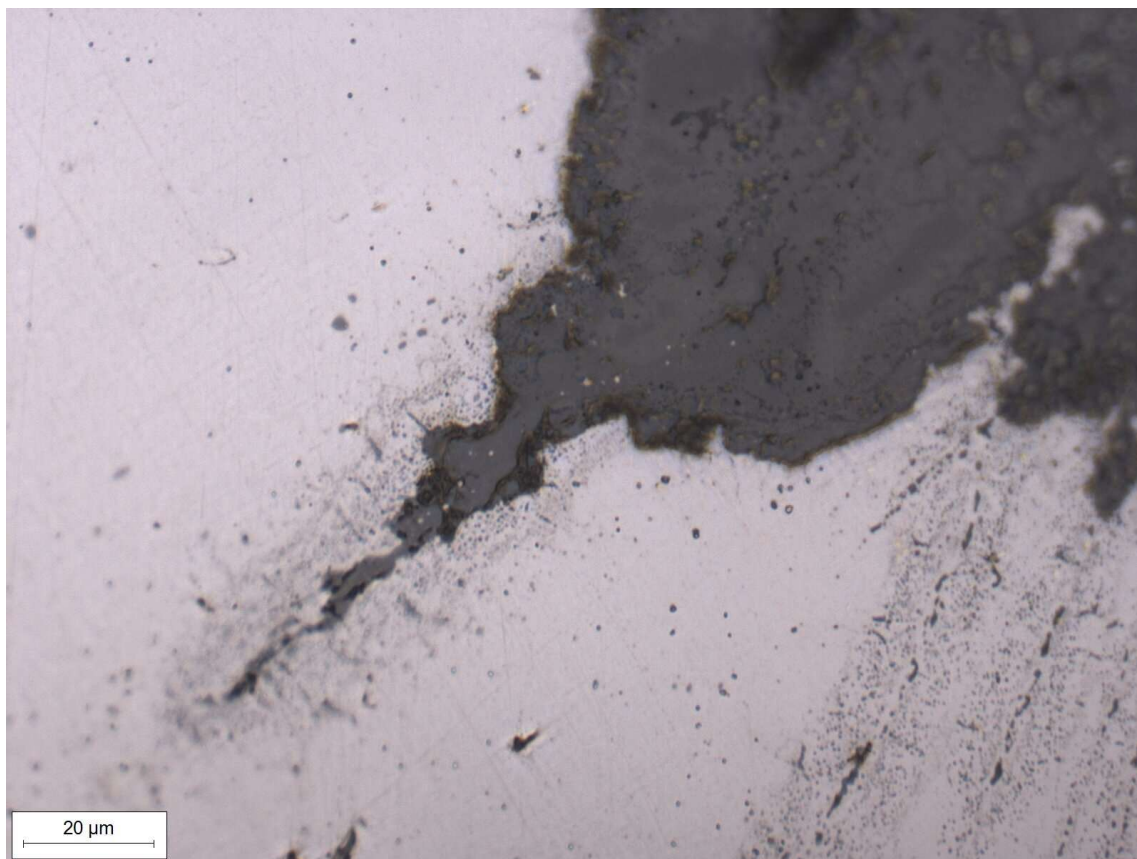


Figura 8.8 – Articolo 080.91 pianetto: dettaglio ad alto ingrandimento della discontinuità superficiale e delle indicazioni associate, acquisita a 50x1.25.

8.2.4 Interpretazione del difetto

Nel complesso, il difetto osservato sull'articolo 080.91, zona pianetto, può essere descritto come una discontinuità superficiale complessa costituita da più difetti. La morfologia osservata permette di identificare un primo tratto rettilineo che suggerisce la presenza di una cricca e successivamente un tratto da una forma irregolare e frastagliato che indica la presenza di una sfogliatura o una mancata saldatura dei lembi.

Dal punto di vista del processo di stampaggio a caldo, tale difetto può essere associato a condizioni locali di flusso non ottimali del materiale. Una variazione di geometria può influenzare il modo in cui il metallo riempie la cavità dello stampo se associato anche un'aumento dell'attrito tra stampo e materiale.

Se il materiale non fluisce in modo regolare, possono formarsi pieghe superficiali in quanto due parti di materiale possono venire a contatto senza saldarsi correttamente.

La presenza di indicazioni nella zona difettosa può essere coerente con ossidi o contaminanti intrappolati nel difetto. Nei processi di forgiatura a caldo, infatti, la superficie del materiale può ossidarsi rapidamente; se durante il riempimento dello stampo si genera un ripiegamento, gli ossidi superficiali possono rimanere intrappolati all'interno della piega e impedire la completa saldatura metallurgica delle superfici.

8.3 3756A

L'articolo 3756A è stato analizzato mediante osservazione al microscopio ottico su campione precedentemente tagliato, inglobato e lucidato secondo la procedura descritta nel Capitolo 7. Per questo campione sono state acquisite immagini a diversi ingrandimenti, con l'obiettivo di osservare sia l'estensione generale del difetto sia la sua morfologia locale. La sequenza di immagini permette di seguire la stessa discontinuità passando da viste più generali a osservazioni di dettaglio.

Il difetto mantiene continuità anche al variare dell'ingrandimento e non presenta l'aspetto regolare tipico di una semplice rigatura da preparazione metallografica. La morfologia osservata è quindi compatibile con una reale perdita locale di continuità del materiale.

8.3.1 Osservazione a basso e medio ingrandimento

La fig. 8.9 è un'immagine rilevata a basso ingrandimento. Il difetto mostra diverse morfologie ed estensioni.

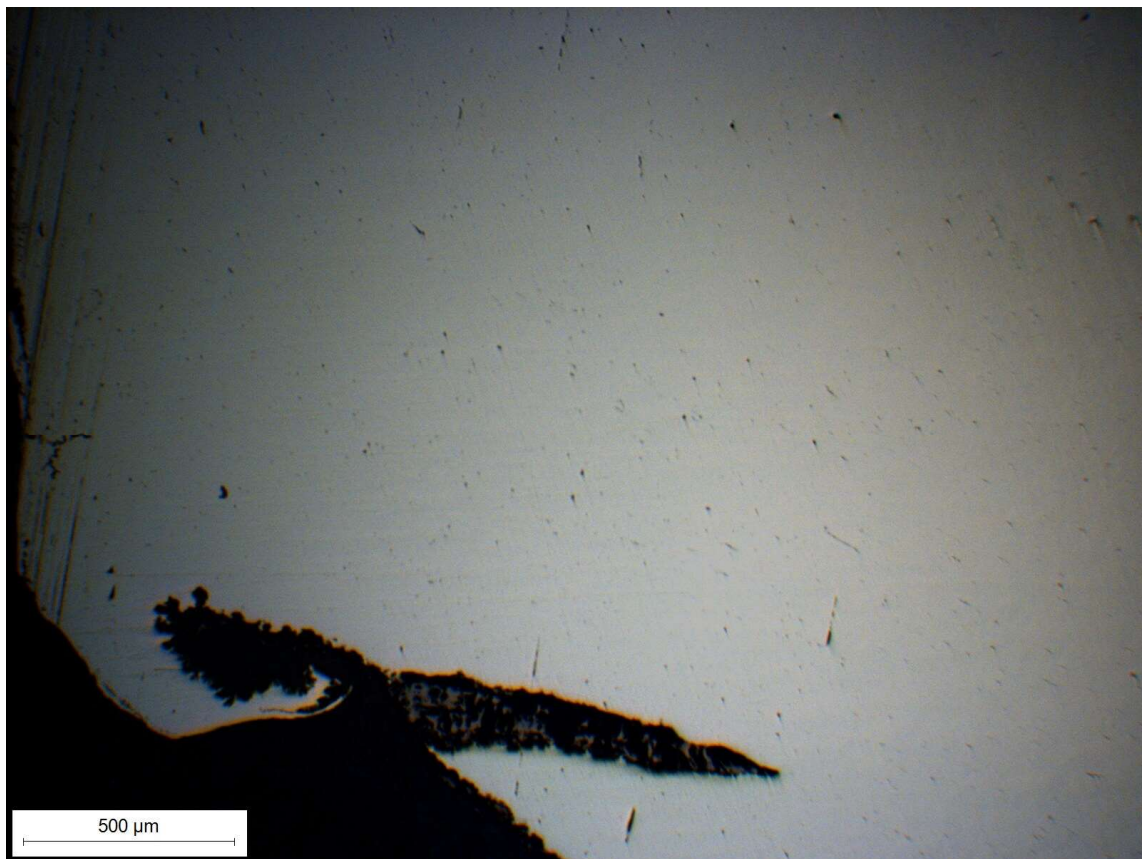


Figura 8.9 – Articolo 3756A: vista a basso ingrandimento della discontinuità principale, acquisita a 5×0,8.

La fig. 8.10 mostra una discontinuità irregolare allungata molto frastagliata e una parte terminale progressivamente più sottile e appuntita. Tale morfologia è compatibile con una ripiegatura o sfogliatura quindi una non corretta saldatura tra le parti.

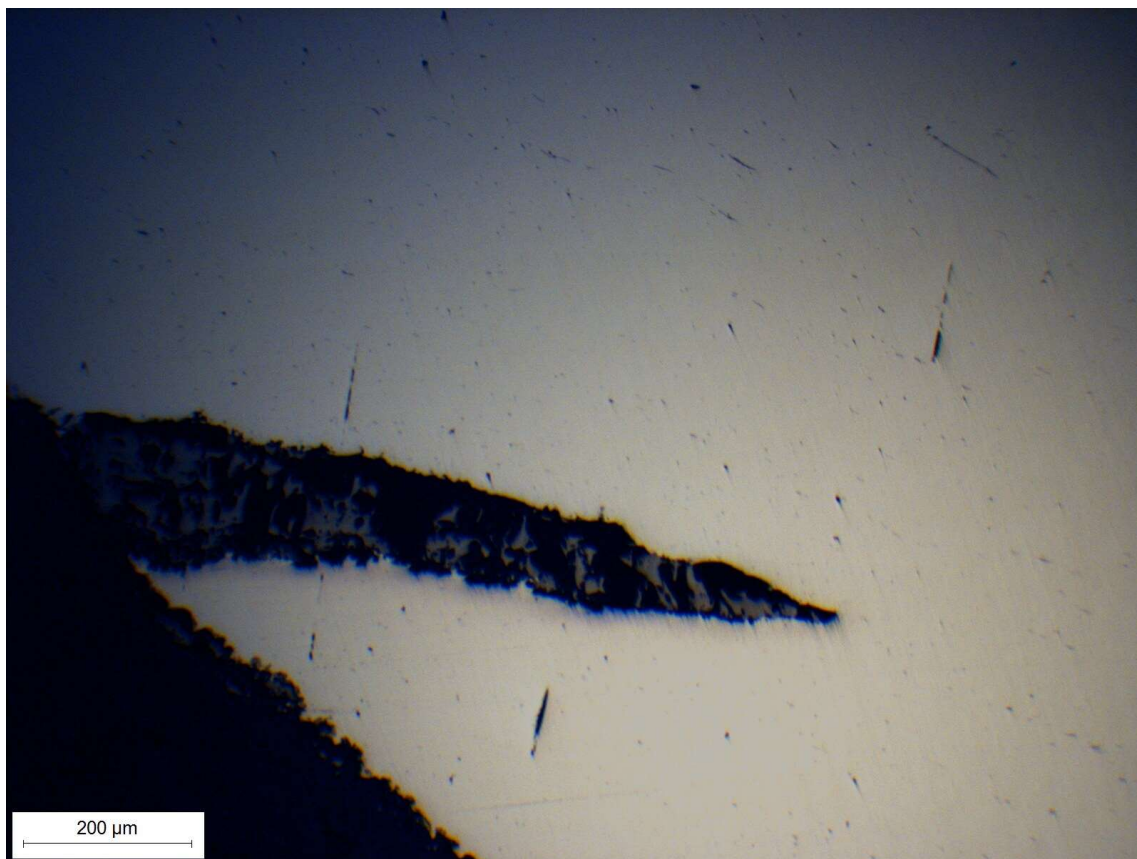


Figura 8.10 – Articolo 3756A: osservazione a ingrandimento intermedio della parte destra del difetto, acquisita a 10×0,8.

La fig. 8.11 mostra un ulteriore difetto creatosi nella parte opposta della sfogliatura mostrata nella fig. 8.10. La morfologia ampia, frastagliata e irregolare mostra in maniera evidente come il materiale non sia riuscito a saldarsi e si sia ripiegato su sé stesso. Inoltre è possibile osservare anche un possibile innesco di cricca sull'estremità del difetto.

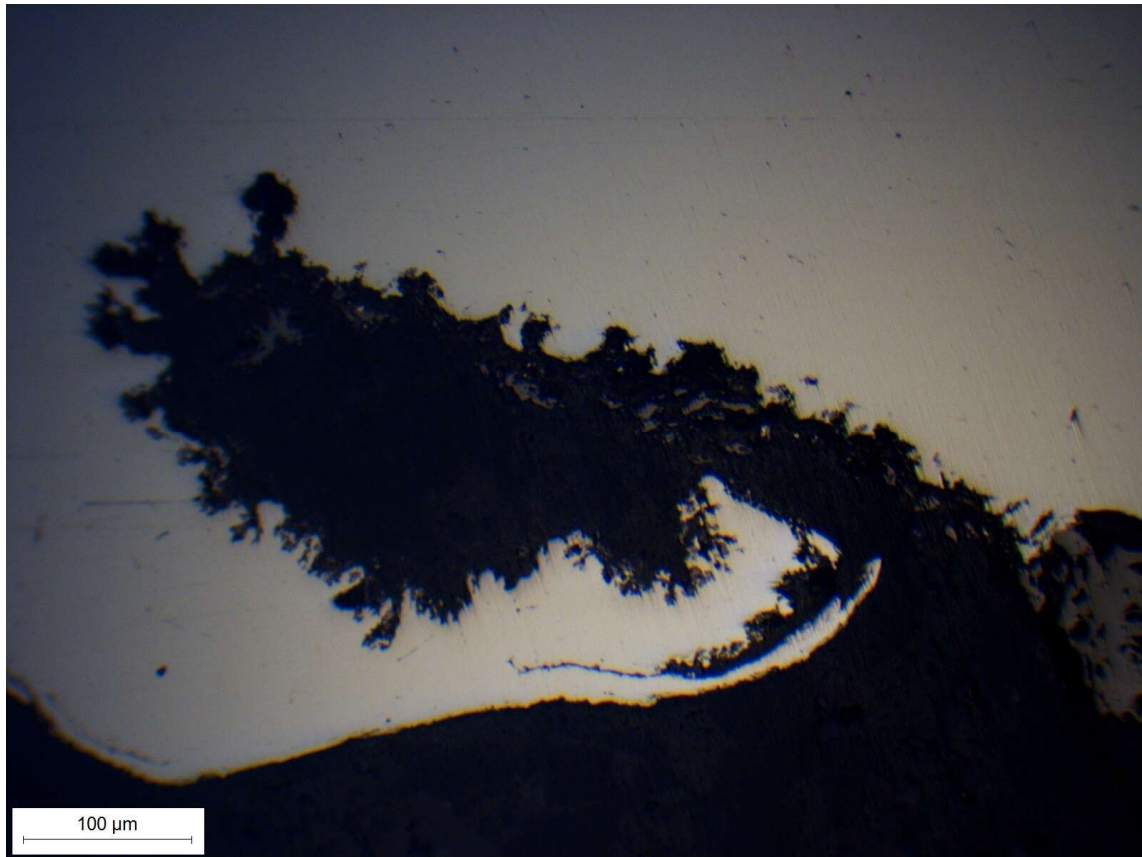


Figura 8.11 – Articolo 3756A: dettaglio a ingrandimento intermedio della parte sinistra della discontinuità, acquisita a 20×0,8.

8.3.2 Osservazione ad alto ingrandimento

Le immagini ad alto ingrandimento permettono di analizzare in modo più dettagliato la morfologia locale del difetto. La discontinuità si presenta come una zona ben marcata, con bordi irregolari e sviluppo localizzato. In alcune immagini si osservano porzioni più aperte e altre più sottili, elemento che suggerisce una separazione reale del materiale e non una semplice traccia superficiale prodotta dalla lucidatura.

La fig. 8.13 permette di classificare il difetto come una sfogliatura ma altrettanto importante sottolineare la presenza di un difetto secondario riconducibile ad un innesco di cricca e della sua propagazione.

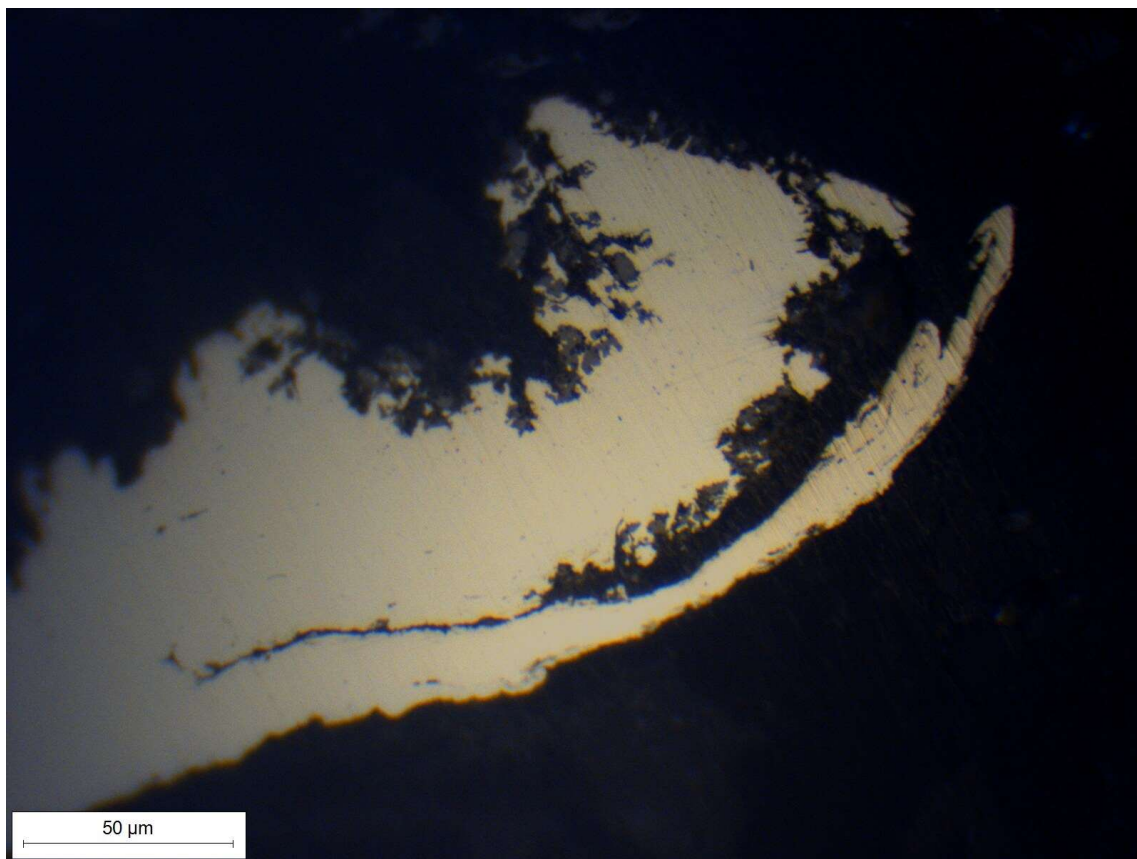


Figura 8.12 – Articolo 3756A: ulteriore dettaglio ad alto ingrandimento della zona difettosa, acquisito a 50×0,8.

8.3.3 Interpretazione del difetto

La morfologia non uniforme conferma che la zona difettosa è collegata a un fenomeno reale del materiale e non a un semplice segno meccanico da preparazione.

Il difetto osservato a vari ingradimenti è possibile classificarlo come una sfogliatura o una ripiegatura del materiale. Data alla sua estensione, è possibile anche osservare un difetto secondario riconducibile ad un innescio di cricca.

Durante il processo di stampaggio a caldo, difetti di questo tipo possono essere favoriti da condizioni di flusso non ottimali del materiale, da una quantità iniziale di materiale non sufficiente, da attrito non uniforme nello stampo oppure da una mancata completa risaldatura tra fronti di materiale.

Nel caso specifico, inoltre, considerando la geometria del pezzo e la posizione del difetto rispetto ad essa, il difetto può essere messo in relazione con un possibile riempimento non ottimale della cavità dello stampo, motivo per cui si è deciso di aumentare il peso del cesoiato di 100 g.

Una massa di partenza insufficiente può infatti favorire flussi anomali, zone di trazione locale, ripiegamenti o discontinuità non completamente chiuse durante la deformazione plastica.

Alla luce dei dati ottenuti dopo l'implementazione dell'azione correttiva è possibile dire con maggiore certezza, e non una semplice ipotesi, che il difetto è più compatibile ad lap causato da un flusso non ottimale del materiale.

8.4 5623

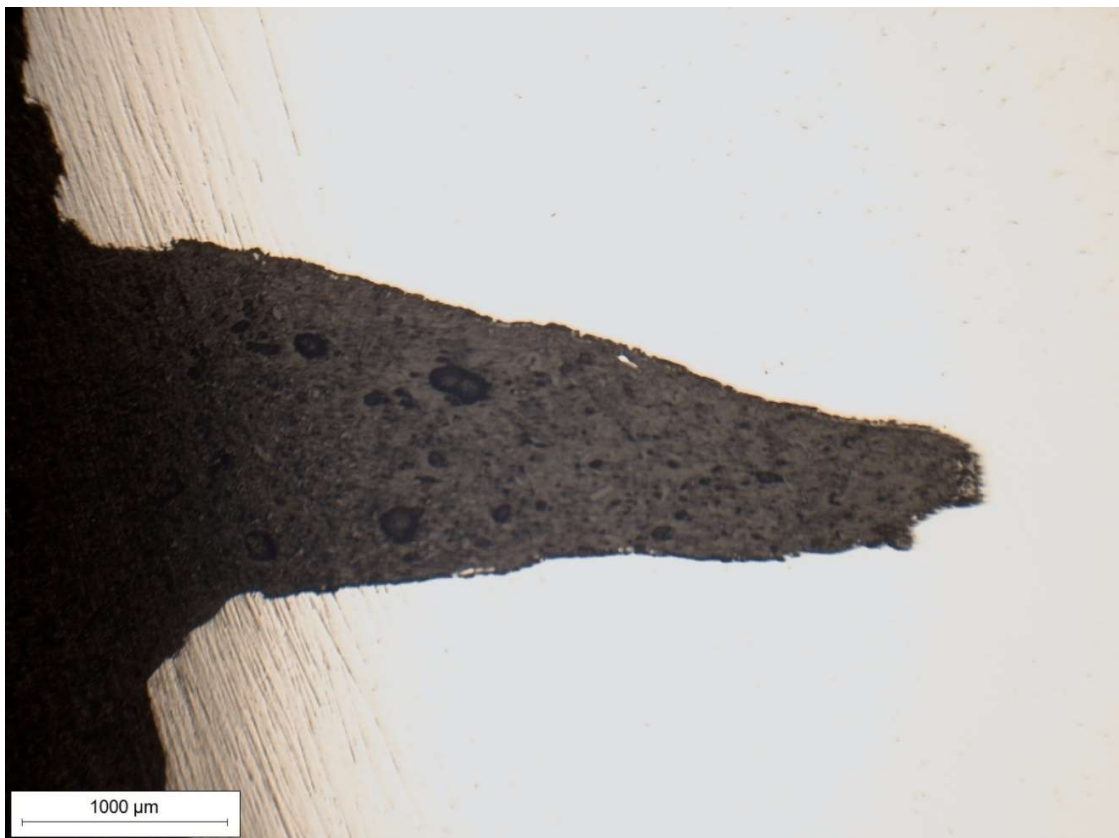
L'articolo 5623 è stato analizzato mediante osservazione al microscopio ottico su campione precedentemente tagliato, inglobato e lucidato secondo la procedura descritta nel Capitolo 7. Per questo difetto sono state acquisite immagini a ingrandimenti progressivi, partendo da una vista generale della zona interessata fino ad arrivare a dettagli a maggiore ingrandimento. Questo approccio ha permesso di valutare sia l'estensione complessiva della discontinuità sia la sua morfologia locale.

La forma osservata non appare riconducibile a una semplice inclusione puntiforme isolata, ma suggerisce una perdita locale di continuità del materiale.

8.4.1 Osservazione a basso e medio ingrandimento

Le prime immagini a basso ingrandimento permettono di inquadrare la zona generale del difetto.

La fig. 8.13 mostra il difetto ad un basso ingrandimento. La morfologia osservata consente di classificare il difetto come una cricca aperta. Il difetto si sviluppa dalla superficie verso l'interno del materiale rappresenta una perdita locale di continuità del campione.



0000.

Figure 8.13 - Articolo 5623: vista generale a basso ingrandimento della zona difettosa, acquisita a 0,8×2.

La fig. 8.14 permette di osservare meglio il profilo della cricca che presenta un andamento irregolare nella zona di apertura.

Inoltre è possibile notare un difetto secondario ossia delle inclusioni o cavità attorno al difetto principale.



Figure 8.14 - Articolo 5623: approfondimento del difetto a medio ingrandimento, acquisita a 5×0.8.

8.4.3 Osservazione ad alto ingrandimento

La fig. 8.15 acquisita ad alto ingrandimento permette di valutare l'entità del difetto secondario. In questo caso siamo in presenza di inclusioni non metalliche, ossidi o microvuoti generate durante il processo di stampaggio. È possibile escludere come causa radice un'errata preparazione dei campioni in quanto i bordi di ogni inclusione avrebbero avuto delle striature regolari.

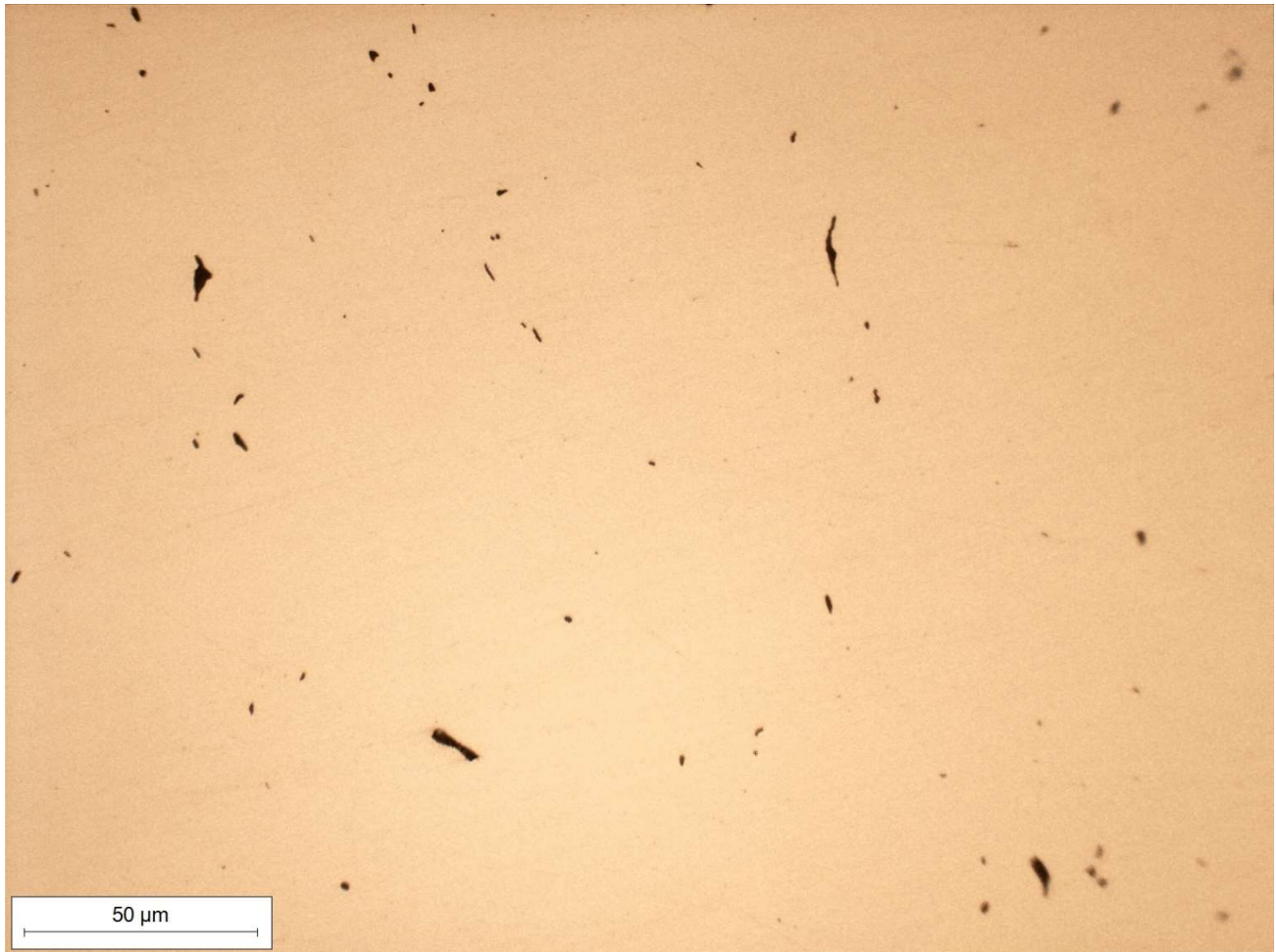


Figure 8.15 - Articolo 5623: vista del difetto secondario ad alto ingrandimento, acquisita a 50×0.8.

8.4.4 Interpretazione del difetto

Nel complesso, il difetto osservato sull'articolo 5623 può essere descritto come una discontinuità superficiale irregolare. La morfologia è quella di una cricca, quindi di una zona in cui il materiale mostra una perdita locale di continuità.

Dal punto di vista del processo di stampaggio a caldo, difetti di questo tipo possono essere favoriti da un flusso non ottimale del materiale nella cavità dello stampo, da condizioni locali di attrito e lubrificazione non uniformi, da una quantità di materiale iniziale non adeguata oppure da una piega superficiale non completamente risaldata. Se durante la deformazione due fronti di materiale vengono a contatto senza saldarsi correttamente, anche a causa della presenza di ossidi o contaminanti superficiali, in sezione metallografica il difetto può apparire come una discontinuità.

Capitolo 9 Conclusioni

L'obiettivo principale di questa tesi è stato quello di creare una correlazione causa-effetto tra il difetto analizzato e i parametri di processo.

L'elaborato è stato sviluppato partendo da una descrizione generale del processo di forgiatura a caldo per approfondire argomenti come i materiali facendo una distinzione tra i vari acciai utilizzati ed i macchinari impiegati evidenziando le differenze tra magli, presse e bilaciere a vite.

Successivamente l'attenzione è stata rivolta alla classificazione dei difetti descrivendo cricche, sfogliature e difetti di flusso mettendo in evidenza il loro possibile legame con i parametri di processo quali: la geometria dello stampo, la posizione della linea di divisione, temperatura dello stampo, % lubrificazione.

Una parte fondamentale del lavoro è stata rappresentata dalla preparazione metallografica dei campioni. Tale procedura ha avuto lo scopo di ottenere superfici piane, lucide e prive di imperfezioni indotte dalla preparazione, in modo da rendere possibile una corretta osservazione al microscopio ottico. La qualità della preparazione è risultata determinante, poiché graffi, residui o deformazioni superficiali avrebbero potuto causare un'errata determinazione del difetto reale.

L'analisi al microscopio ha permesso di osservare in sezione i difetti riscontrati sui campioni. Le immagini sono state acquisite a diversi ingrandimenti, così da valutare sia l'estensione complessiva delle discontinuità sia la loro morfologia locale. L'osservazione microscopica ha confermato che i difetti analizzati non erano semplici irregolarità superficiali o artefatti di preparazione, ma reali discontinuità del materiale.

Per lo svolgimento di questo elaborato sono stati presi in esame 3 articoli e per ognuno sono stati analizzati diversi lotti produttivi al fine di rendere il più possibile significativo il lavoro svolto.

Nel caso dell'articolo 080, analisi dei primi lotti ha evidenziato una maggiore incidenza del difetto di sfogliatura. Tale difetto è stato correlato alle condizioni di lubrificazione e all'eccessive temperature degli stampi che creavano un ambiente ostile per la realizzazione del film necessario a ridurre l'attrito tra materiale e stampi. L'introduzione di un nuovo lubrificante ha permesso la formazione di un film tale da favorire lo scorrimento del materiale.

Analizzando i successive lotti dopo l'introduzione del nuovo lubrificante, nonostante una notevole riduzione della % di scarto, il difetto principale restava ugualmente la sfogliatura. Questo ha permesso di capire come la geometria del pezzo e degli stampi incidono sulla determinazione del difetto.

Per l'articolo 3756, il difetto principale individuate è stato il taglio. Osservando il pezzo nella sua interezza era possibile notare una non perfetta saldatura tra due lembi del materiale. Sicuramente un'eccessivo attrito tra stampi e materiale non aiuta quest'ultimo nello scorrere e quindi nel riempire tutte le cavità ma tramite un approccio più tecnico-pratico si è deciso di aumentare il peso del cesoiato.

La riduzione della % di scarto è stata notevole ma restava uguale l'incidenza del taglio sul totale dei difetti. Questo in quanto la geometria del pezzo e dello stampo comporti una generazione di tale difetto.

Se per primi due articoli per l'identificazione della root cause è stato utilizzato il diagramma di Ishikawa per l'articolo 5623 è stato utilizzato un'approccio totalmente differente in quanto l'analisi è stata eseguita dopo l'introduzione del nuovo lubrificante questo perché la sua produzione è stata realizzata in corrispondenza della modificata del lubrificante per gli altri due articoli (080 e 3756). Le immagini al microscopio ottico hanno mostrato la presenza di una cricca dovuta alla non perfetta saldatura dei due lembi di materiale. La sola modifica del

lubrificante si è mostrata sufficiente per la riduzione del difetto. Una riduzione della temperatura degli stampi ha permesso l'ottenimento di un film di lubrificante che ha comportato un maggiore scorrimento del materiale tra gli stampi.

Nel complesso, i risultati ottenuti mostrano che i difetti nello stampaggio a caldo non possono essere interpretati considerando un solo parametro isolato. La formazione di una cricca, di una sfogliatura è spesso il risultato dell'interazione tra geometria del pezzo, flusso del materiale, lubrificazione, temperatura, quantità di materiale disponibile e condizioni locali di attrito. Per questo motivo, l'approccio più efficace non consiste soltanto nell'osservazione del difetto finale, ma nell'integrazione tra dati di produzione, conoscenza del processo e analisi metallografica.

Il lavoro svolto ha evidenziato l'importanza di seguire una metodologia ben strutturata ossia:

- Raccolta dati: per consentire di individuare il difetto principale e valutarne l'andamento nel tempo;
- Analisi del processo: permette di formulare ipotesi sulle possibili cause;
- Osservazione al microscopio: permette di verificare la morfologia reale del difetto rafforzando o correggendo l'ipotesi fatta.

In conclusione il lavoro svolto ha permesso di ridurre drasticamente la percentuale di scarto per tutti gli articoli analizzati. La tabella seguente riporta l'andamento degli scarti prima e dopo l'implementazione dell'azione correttiva.

Articolo	% scarto iniziale	% scarto finale
080	10,73	3,14
3756	14,32	2,97
5623	16,1	4,08

Come possibile sviluppo futuro, sarebbe utile confrontare in modo sistematico i campioni prelevati anche dopo dell'introduzione delle azioni correttive e non solamente prima, in modo da verificare non solo la riduzione quantitativa dello scarto, ma anche l'effettivo cambiamento della morfologia dei difetti. Un ulteriore sviluppo potrebbe riguardare l'utilizzo di software di simulazione, al fine di prevedere le zone critiche del pezzo, valutarne il flusso del materiale nello stampo e ottimizzare preventivamente geometria dello sbizzato, peso del cesoiato e parametri di processo.

Bibliografia

1. Rossi Mario Ingenieur Specialiste Dipl. Inst. Techn. Sup. de Fribourg-Suisse
“Stampaggio a caldo dei metalli; Stampi – Magli – Presse – Ricalatrici – Martellatrici – Tagliabillette – Granigliatrici – Forni”; Hoepli 1964
2. Lirio Schaeffer, Brito M. G. Alberto, Martin Geier **“Numerical simulation using finite element to develop and optimize forging processes”**; Metal Work Laboratory, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil; pp. 199-204.
3. Marek Hawryluk, Marcin Rychlik, Jacek Ziemba, Katarzyna Jasiak, Filip Lewandowski, Lukasz Dudkiewicz: **“Analysis of the production process of the forked forging used in the excavator drive system in order to improve the currently implemented technology by the use of numerical modeling”**; Materials Science-Poland, 39(2), 2021, pp.227-239
4. ASM Handbook Vol. 14: **“Forming and Forging”**; Section: **“Forging defects”**; pp. 834-841
References cited in this section:
 - T. Okamoto, T. Fukuda, and H. Hagita, Material Fracture in Cold Forging--Systematic Classification of Working Methods and Types of Cracking in Cold Forging, Sumitomo Search, No. 9, May 1973, p 46; *Source Book on Cold Forming*, American Society for Metals, 1975, p 216-226;
 - A.M. Sabroff, F.W. Boulger, and H.J. Henning, *Forging Materials and Practices*, Reinhold, 1968
 - F.N. Lake and D.J. Moracz, "Comparison of Major Forging Systems," Technical Report AFML-TR-71-112, TRW, Inc., May 1971