



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA
DEI PROCESSI INDUSTRIALI E DEI MATERIALI
(Laurea triennale DM 270/04-indirizzo materiali)

APPLICAZIONE DI STAMPI IN RESINA
TERMOINDURENTE AL MICRO-STAMPAGGIO AD
INIEZIONE

Relatore: Prof. Giovanni Lucchetta

Correlatore: Marco Fiorotto

Laureanda: RACHELE BERTOLINI

ANNO ACCADEMICO 2011 – 2012

Indice

Introduzione	7
Capitolo 1 - Stampaggio ad Iniezione e tecniche di micro-fabbricazione	9
1.1 Stampaggio ad iniezione	9
1.2 Principali tecniche di micro-fabbricazione	13
1.2.1 Micro-EDM	13
1.2.2 Micro-Fresatura	14
1.2.3 LIGA	14
1.2.4 Double hot embossing	15
Capitolo 2 - Metodologia sperimentale	17
2.1 Procedura di realizzazione dell' inserto metallico	17
2.2 Sintesi delle resine epossidiche	21
2.2.1 GDE	22
2.2.2 ELO	23
2.3 Realizzazione dello stampo	25
2.4 Lavorazione in fresa	26
2.5 Parametri di processo	27
2.5.1 Analisi termica per l' ottimizzazione del processo	32
2.6 Caratterizzazione degli inserti	34
Capitolo 3 - Risultati	37
3.1 Caratterizzazione dell' inserto metallico	37
3.2 Caratterizzazione delle repliche silconiche	37
3.2.1 Caratterizzazione della prima replica in silicone	37
3.2.2 Caratterizzazione della seconda replica in silicone perELO	37

3.2.3 Caratterizzazione della seconda replica in silicone per GDE.....	38
3.3 Caratterizzazione delle repliche in resina epossidica.....	38
3.3.1 Caratterizzazione della replica in ELO	38
3.3.2 Caratterizzazione della replica in GDE.....	38
3.4 Caratterizzazione delle repliche inPoliStirene	39
3.4.1 Caratterizzazione delle repliche in PS dall' inserto in ELO.....	39
3.4.2 Caratterizzazione delle repliche in PS dall' inserto in GDE	40
Capitolo 4 - Analisi dei risultati	41
4.5.1 Analisi dei dati per la resina in ELO	41
4.5.2 Analisi dei dati per l' inserto in GDE.....	47
Capitolo 5 - Conclusioni.....	49
Riferimenti bibliografici.....	50

Indice delle figure

Figura 1: La figura mostra i componenti fondamentali della pressa di stampaggio ad iniezione. Sulla sinistra l'unità di chiusura, ha il compito di aprire e chiudere lo stampo. L'unità di iniezione, sulla destra, ha il compito di provvedere alla plastificazione.	10
Figura 2: Confronto tra la vite ed il pistone di iniezione del μIM (sinistra) e la vite dello stampaggio ad iniezione.	12
Figura 3: Illustrazione di una singola scarica-EDM	19
Figura 4: Avanzamento dell'elettrodo layer by layer	20
Figura 5: Sequenza dei passaggi della replicazione.	21
Figura 6: Struttura molecolare della TEA	22
Figura 7: Struttura molecolare dell'anidride esametildioftalica	23
Figura 8: Struttura molecolare dell'olio di lino epossidato	24
Figura 9: Struttura molecolare del benzilalcol	24
Figura 10: Struttura molecolare del GLYMO	24
Figura 11: Modello 3D dello stampo. Sono rappresentati in sequenza: Stampo mobile, vista esplosa, parte fissa e parte mobile.	25
Figura 12: Kugler- Micromaster 3/5 X	26
Figura 13: Battenfield micro power 15	27
Figura 14: Unità d' iniezione della macchina di micro-stampaggio ad iniezione	27
Figura 15: Andamento della pressione in cavità nelle fasi del processo	29
Figura 16: Curva di flusso del PS	30
Figura 17: Evoluzione di temperatura dello stampo dopo tre cicli di stampaggio. Vengono riportati l'elenco dei componenti:	33
Figura 18: master in metallo	34
Figura 19: Immagine all' interferometro ottico dell' inserto metallico lavorato all' EDM	34
Figura 20: Canale principale e relative grooves	35
Figura 21: Grooves 1 e 2.	36
Figura 22: Caratterizzazione dell' inserto metallico. Groove 1	36
Figura 23: Deterioramento dell' inserto in ELO in seguito a 1000 stampate	46
Figura 24: Deterioramento dell'inserto in GDE dopo 10 stampate.	48

Indice delle tabelle

<i>Tabella 1: Inserto in metallo</i>	37
<i>Tabella 2: Prima replica in silicone</i>	37
<i>Tabella 3: Seconda replica siliconica. ELO</i>	37
<i>Tabella 4: Seconda replica siliconica. GDE</i>	38
<i>Tabella 5: Replica in ELO</i>	38
<i>Tabella 6: Replica in GDE</i>	38
<i>Tabella 7: Repliche in PoliStirene dall' inserto in ELO</i>	39
<i>Tabella 8: Repliche in PoliStirene da inserto in GDE</i>	40
<i>Tabella 9: Tabulazione dz per gli intervalli di repliche indicati</i>	43

Indice dei grafici

<i>Grafico 1: Istogramma delle fasi di replicazione dell' ELO. Groove 1</i>	41
<i>Grafico 2: Istogramma delle fasi di replicazione dell' ELO. Groove 7</i>	42
<i>Grafico 3: Andamento della profondità della groove 1 per ogni punto analizzato</i>	44
<i>Grafico 4: Andamento della profondità della groove 7 per ogni punto analizzato</i>	44
<i>Grafico 5: Andamento della media della profondità del groove 1 rispetto alla media dell' ELO</i>	45
<i>Grafico 6: Andamento della media della profondità del groove 7 rispetto alla media dell' ELO</i>	45
<i>Grafico 7: Istogramma relativo alle fasi di realizzazione del GDE. Groove 1</i>	47
<i>Grafico 8: Istogramma relativo alle fasi di realizzazione del GDE. Groove 7</i>	47

Riassunto

La miniaturizzazione di dispositivi e componenti è una delle principali tendenze della tecnologia degli ultimi 20 anni. Dispositivi micro-fluidici, micro-meccanici, micro-ottici e soprattutto micro-componenti applicabili in ambito medico sono sempre più richiesti e, di conseguenza, anche lo sviluppo di tecniche industriali a sostegno della domanda per questi prodotti. Per un importante passo avanti nelle micro-tecniche di produzione un trattamento economico è di vitale importanza. Un metodo di replica, come il micro-stampaggio ad iniezione, rappresenta uno dei principali processi di produzione di micro-prodotti. Rendere la realizzazione dello stampo un processo più economico e più versatile è un obiettivo da raggiungere. In questo lavoro si propone una tecnica alternativa che rispecchi le caratteristiche di economicità e versatilità per la produzione di stampi applicabili al micro-stampaggio ad iniezione. Il processo seguito prevede l'utilizzo di materiali alternativi come le resine termoindurenti per la realizzazione degli stampi. Solo con un preciso tipo di materiale dei due testati sono state raggiunte circa mille stampe con un buon grado di replicazione.

Introduzione

La condizione essenziale per il successo del mercato di micro-prodotti è il costo della produzione su larga scala. In anni recenti, lo stampaggio ad iniezione è stata adattato alle necessità di fabbricazione di micro-componenti. Lo stampaggio ad iniezione è una tecnologia di processo ben consolidata nella produzione di parti polimeriche nella macro-gamma dimensionale. Pertanto il vasto know-how acquisito è reso disponibile per essere utilizzato nelle tecnologie di micro-iniezione. Una volta che un inserto è stato realizzato, diverse migliaia di pezzi possono essere stampati. Pertanto l'attenzione è stata posta sullo stampo. Gli stampi più diffusi sono in materiale metallico e vengono micro-lavorati principalmente con due tecniche: micro-fresatura e micro-elettroerosione. Gli svantaggi che le caratterizzano sono il costo e l'elevato tempo di realizzazione. Si è cercato perciò di sostituire stampi in materiali plastici a quelli metallici per l'agevolazione del processo. La double hot-embossing è una tecnica che utilizza una replicazione in due fasi, partendo da un master metallico, per la realizzazione di stampi in materiali plastici. I vantaggi che si ottengono sono evidenti: riduzione dei costi, incremento della rapidità di produzione, la possibilità di superare alcune limitazioni poste dalla geometria dello stampo di partenza e l'aumento della vita utile del master di partenza.

L'obiettivo di questo lavoro è di applicare due resine epossidiche, ottenute dalla replicazione in tre passaggi di un master metallico, come stampi per lo stampaggio ad iniezione.

Nel primo capitolo verranno descritte le principali tecniche di micro-fabbricazione ed una delle principali tecniche di produzione: lo stampaggio ad iniezione.

Nel secondo capitolo verrà descritta la metodologia utilizzata per la realizzazione dello stampo. Verranno esposti tutti i passaggi del processo.

Nel terzo capitolo verranno riportati i risultati ottenuti.

Nel quarto capitolo verranno discussi i risultati ottenuti.

Nel quinto capitolo, infine, verranno tratte le conclusioni.

Capitolo 1

Stampaggio ad Iniezione e tecniche di micro-fabbricazione

In questo primo capitolo verranno descritti i principi di funzionamento dello stampaggio ad iniezione. Successivamente verranno descritte le principali tecniche attuali di micro-fabbricazione.

1.1 Stampaggio ad iniezione

Lo stampaggio ad iniezione rappresenta una tecnologia di tipo discontinuo, adatta a formare manufatti di forme tridimensionali qualsiasi, anche totalmente asimmetriche con dimensioni comprese tra qualche mm e qualche metro. Permette di produrre pezzi che non devono essere ulteriormente assemblati e rispetta i requisiti di tolleranza dimensionale. Lo stampaggio è un processo di fabbricazione che permette la realizzazione di prodotti su media e larga scala, con un costo limitato. Inoltre, oltre ad entrambe le classi di polimeri ,termoplastici e termoindurenti, è possibile stampare anche altri tipi di materiale come ceramici , fibre e polveri eventualmente rinforzate con polimeri.

Una pressa ad iniezione è essenzialmente costituita da un cilindro di forza contenente una vite elicoidale che, ruotando, trasporta, fondendolo il polimero granulato- alimentato da una tramoggia di carico- sino alla testa della vite, ove è situata la camera calda di iniezione. (H.Ito, 2003). Un ugello di iniezione mette in comunicazione tale camera con lo stampo (mantenuto sempre a tempera relativamente bassa), che è formato da due parti ancorate a due piastre, di cui una è fissa e l'altra è mobile così da rendere possibile l'apertura dello stampo per estrarre il manufatto. Allorché ruota (fase di plastificazione) la vite funziona come quella di un estrusore, ed il riscaldamento e la fusione dei granelli solidi sono assicurati da una serie di resistenze elettriche di riscaldamento del cilindro. Una volta riempita la camera di iniezione, la massa fusa accumulata è sufficiente a riempire lo stampo: a questo punto la rotazione della vite cessa, la vite si arresta e viene spinta dal pistone per traslazione assiale verso l'ugello di iniezione, determinando così lo spostamento del fuso polimerico alla camera

calda dello stampo. Successivamente, il polimero nello stampo solidifica, si raffredda e, quando ha raggiunto una sufficiente rigidità, lo stampo viene aperto ed il manufatto estratto (Bernardo, 2006).

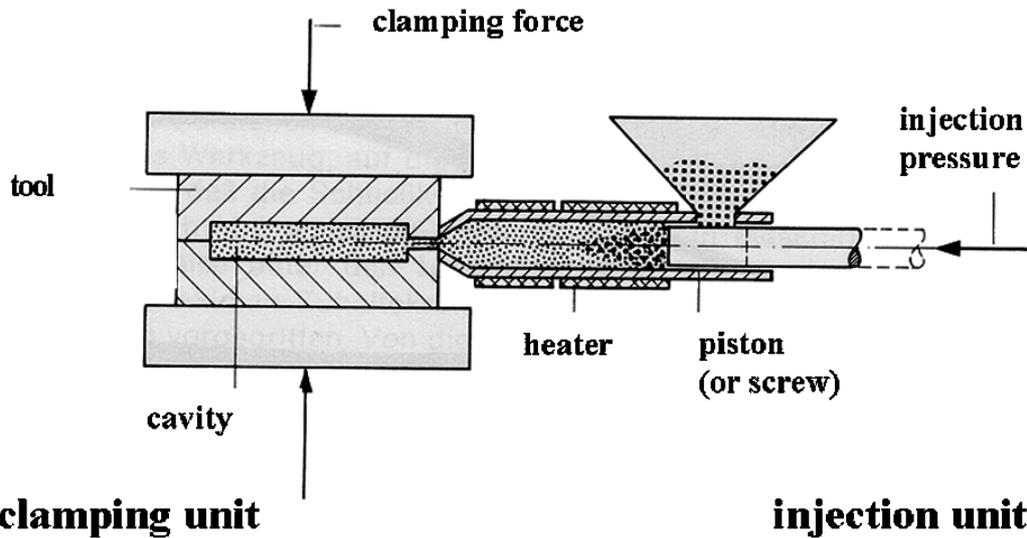


Figura 1: La figura mostra i componenti fondamentali della pressa di stampaggio ad iniezione. Sulla sinistra l'unità di chiusura, ha il compito di aprire e chiudere lo stampo. L'unità di iniezione, sulla destra, ha il compito di provvedere alla plastificazione.

Lo stampo rappresenta il cuore del processo: contiene l'inserto che impartirà la forma al prodotto finito, i canali di alimentazione, gli estrattori ed il sistema di condizionamento. Lo stampo deve avere una forma negativa rispetto a quella che si vuole impartire al prodotto finito. Spesso quindi la bontà del prodotto finito va di pari passo con la bontà dello stampo. Imperfezioni dello stampo causano rottura preventiva e spesso le imperfezioni vengono fedelmente riprodotte nel prodotto finale. È bene cercare di realizzare uno stampo robusto, che sia in grado di resistere alle alte temperature e per un numero elevato di cicli ma anche di sopportare sforzi elevati. Deve essere in grado di realizzare un numero elevato di pezzi senza danneggiarsi. Le caratteristiche che uno stampo deve avere sono: elevata rigidità e resistenza, tenacità, buona finitura superficiale e basso costo (M. Whitesides, 2010).

Un secondo componente fondamentale della macchina è la vite, che ha il compito di miscelare a fondo il fuso ed omogeneizzare la temperatura in quanto soggetta a squilibri tra le pareti del cilindro e le zone incavate della vite. Con il proprio movimento essa contribuisce al

riscaldamento del polimero per effetto autogeno. Esso è prodotto dall' elevato sforzo di taglio tra l'apice della filettatura e le pareti del cilindro; in questa zona il polimero risente di un fortissimo attrito.

La vite si trova all' interno di un cilindro il quale porta il materiale all'interno dell' ugello di iniezione. La massa fusa entra così nei canali di colata e quindi nello stampo. La macchina opera in eccesso di materiale per poter garantire alla fine della vite un "cuscinetto" di polimero sufficiente ad impartire una pressione adeguata. Tale pressione viene definita "post-pressione" e serve ad evitare la presenta di concavità nel prodotto finito dovute alla contrazione del polimero in seguito al raffreddamento.

Una volta che il ciclo si è concluso la vite arretra iniziando a plastificare nuovo materiale ed il prodotto viene espulso mediante degli estrattori.

Si è pensato così di adattare un processo di così notevole successo come lo stampaggio ad iniezione alla fabbricazione di micro-componenti. Il grande "know-how" e la tecnologia di processo acquisita, potevano essere sfruttati per soddisfare le richieste di produzione di micro-prodotti.

Inoltre i costi di fabbricazione venivano solo in parte influenzati dalla complessità dello stampo dato il numero elevato di pezzi che era possibile produrre; anche la quantità di materiale richiesta è limitata dalle contenute dimensioni dello stampo. Perciò i componenti fabbricati attraverso il micro-stampaggio ad iniezione sono adatti per applicazioni che richiedono un costo contenuto o per prodotti "usa e getta".

Questa tecnica di produzione viene sfruttata in diversi settori : ottico, meccanico, informatico, medico e nel settore della microfluidica.

Il micro-stampaggio ad iniezione produce componenti che hanno due caratteristiche fondamentali:

- Possiedono un peso complessivo dell'ordine dei milligrammi e hanno requisiti di tolleranza dell'ordine dei micrometri
- Possiedono aree caratterizzate da micro-features caratterizzate da requisiti di tolleranza compresi tra i micrometri ed i nanometri.

È sulla base di questi due requisiti che il micro stampaggio ad iniezione viene anche definito "stampaggio di precisione". È errato però pensare che la tecnologia dello stampaggio ad iniezione si possa applicare senza alcuna modifica al micro-stampaggio ad iniezione. Basti pensare alla grandezza dei pellets utilizzati nello stampaggio ad iniezione. La vite di iniezione deve avere un diametro minimo che permetta l'ingresso di un pellets e quindi di circa 14 mm.

Quando la vite avanza anche di un solo mm, circa 185 mg di plastica vengono iniettati. Un solo singolo pellets di PMMA pesa circa 24 mg. È evidente che viene già di gran lunga superato il peso di un ingranaggio prodotto con il micro-stampaggio ad iniezione che è di circa 0,8 mg. Perciò iniettando il volume di materiale minimo per lo stampaggio ad iniezione si supera la quantità di materiale che servirebbe a riempire lo stampo di un micro componente e ciò significa che del materiale risiederebbe lungo il canale di iniezione generando problemi di degradazione del materiale (Qin, 2010).

La vite dello stampaggio ad iniezione combina 4 funzioni in una singola unità:

- Plastificazione ed omogeneizzazione
- Misurazione
- Bloccaggio
- Iniezione

Nel micro stampaggio ad iniezione la singola vite convenzionale utilizzata nello stampaggio presenta qualche difficoltà di controllo del volume del fuso e quindi limitata accuratezza ed inoltre, data la configurazione del canale è possibile che si abbia un riflusso del fuso dovuto alle forti pressioni dovute al riempimento delle micro cavità.

Così il processo risulta ottimizzato utilizzando una vite per plastificare ed omogeneizzare ed un pistone per misurare ed iniettare il fuso. Negli ultimi anni sono state sviluppate delle macchine che utilizzano un sistema d'iniezione che comprende un estrusore a vite ed un gruppo di iniezione a stantuffo al fine di migliorare la quantità e l'omogeneità del materiale iniettato.



Figura 2: Confronto tra la vite ed il pistone di iniezione del μ IM (sinistra) e la vite dello stampaggio ad iniezione.

1.2 Principali tecniche di micro-fabbricazione

La micro-fabbricazione si occupa di tutte quelle tecnologie per la realizzazione di prodotti e/o features che hanno almeno due dimensioni sub-millimetriche. La realizzazione di questi micro-componenti ha catturato molta attenzione negli ultimi anni. Questi prodotti, essendo beni di massa, devono essere riproducibili su larga scala. Le tecniche sviluppate sin ora sono moltissime ma si presterà attenzione solo ad alcune ritenute principali, tra le quali: micro-EDM, fresatura, LIGA e double hot embossing.

1.2.1 *Micro-EDM*

I metodi di micro-lavorazione elettro-fisici e chimici assumono grande importanza per via del loro particolare metodo di rimuovere il materiale. L'EDM, "electrical-discharge-machining", risulta un metodo adatto alla lavorazione di micro-componenti poiché rimuove il materiale grazie ad un processo termico e prescinde dalle caratteristiche del materiale lavorato come ad esempio modulo di Young e la durezza. L'EDM può essere utilizzata su diversi tipi di materiale come l'acciaio temprato, il carburo cementato e sui ceramici resi conduttivi, con una precisione sub-micrometrica. La sua applicazione risulta efficace per la realizzazione di micro-ingranaggi, impianti medici e soprattutto nel campo della micro-fluidica. Grazie ad una serie di scariche elettriche tra l'elettrodo della macchina ed il pezzo da lavorare, si riesce ad erodere una quantità di materiale conforme all'elettrodo utilizzato. La scarica non è generata in maniera continua ma bensì attraverso una serie di micro-scariche di alta frequenza ed intensità controllata che fondono e vaporizzano il materiale. La distanza di scarica è una delle caratteristiche più importanti del processo elettro-erosivo il cui valore permette o meno l'innescio del processo di lavorazione senza contatto diretto fra pezzo ed elettrodo. Per incrementare la quantità di materiale eroso, l'operazione viene eseguita in presenza di dielettrico. Il fluido dielettrico ha la funzione di isolare i due elettrodi per ottenere elevata densità di corrente nel canale di plasma, di esercitare una certa pressione contro l'espansione del suddetto canale ed infine di prevenire il corto circuito dovuto a collegamenti fra le particelle. Applicando un determinato voltaggio, definito in funzione della conducibilità del dielettrico e dalla profondità del canale di lavorazione, si crea uno stato di plasma ed un flusso di corrente. La temperatura raggiunta è all'incirca intorno ai 10000 K e ciò provoca la fusione di materiale sia sull'elettrodo di lavorazione che sul materiale lavorato. Spegnendo la corrente il materiale fuso improvvisamente scoppia a causa di un'implosione nel canale del plasma. La quantità di materiale eroso dipende dal numero di scariche, dall'intensità di corrente delle

scariche e dal tipo di dielettrico utilizzato. Usualmente il diametro dei crateri varia da 1 a 100 μm . Negli ultimi anni recenti sviluppi di questa tecnologia hanno permesso di aumentare la precisione degli elettrodi e del loro movimento.

1.2.2 *Micro-Fresatura*

La fresatura è una tecnica di lavorazione meccanica a freddo per asportazione di truciolo, da parte di un utensile che ruota attorno al proprio asse su un pezzo in moto di avanzamento. È un processo molto versatile, in grado di produrre quasi qualsiasi forma con buone tolleranze dimensionali e finitura superficiale. La fresa è un utensile di rotazione dotato di un numero di taglienti i quali entrano in contatto in maniera sequenziale con il pezzo in lavorazione, producendo trucioli. L'utensile si muove con una certa profondità di passata ad una certa velocità. In corrispondenza dell'utensile si forma il truciolo, mediante scorrimento continuo del materiale lungo il piano di scorrimento.

1.2.3 *LIGA*

L'acronimo LIGA (roenteg Lithography Galvanic Abformung) indica una tecnica avanzata sviluppata in Germania nel 1980, utilizzata per realizzare manufatti di grande precisione e con un'elevata "aspect ratio". È un processo costituito da tre fasi: litografia, elettrodeposizione e stampo. Un substrato conduttivo viene ricoperto da uno strato molto spesso di "photoresist". Il photoresist deve avere diverse caratteristiche: buona planarità, buone proprietà adesive, deve essere conduttivo e non deve attaccare il substrato. I resistenti possono essere positivi o negativi. Nel primo caso la radiazione danneggerà il polimero rendendolo solubile in uno sviluppatore; il PMMA ne è un esempio ed è anche il più largamente utilizzato. Nel caso in cui si utilizzasse un resist negativo, le radiazioni avrebbero l'effetto di aumentare il peso molecolare del polimero, rendendolo insolubile in uno sviluppatore; il più comunemente utilizzato è una resina epossidica denominata SU-8. Per poter penetrare verticalmente tutto lo strato, la litografia sfrutta la luce di sincrotrone, cioè la radiazione magnetica generata da particelle cariche, solitamente elettroni o positroni, che viaggiano a velocità prossime a quelle della luce su una traiettoria determinata da un campo magnetico. Analizzando il caso di un resist positivo, esso assorbirà la luce di sincrotrone modificandosi chimicamente; le catene polimeriche si scindono, il polimero degrada diventando solubile in uno sviluppatore. Aumentando la dose di radiazione la degradazione aumenterà. Dopo lo sviluppo che elimina le parti non impressionate, il photoresist viene sottoposto a electroplating che va a coprire la struttura formatasi con la fotoincisione; in seguito la placcatura viene accresciuta

galvanicamente finché il metallo non supera il livello del photoresist che viene infine rimosso, ottenendo uno stampo metallico che è utilizzato per produrre un numero illimitato di copie (R.K.Jena, 2012).

1.2.4 Double hot embossing

Double hot-embossing è una tecnica di replicazione in due stati che coinvolge polimeri aventi una diversa temperatura di transizione vetrosa. La temperatura di transizione vetrosa rappresenta il valore di temperatura al di sotto del quale un materiale amorfo si comporta come un solido vetroso.

Sotto la T_g i movimenti di contorsione e rotazione di segmenti di molecole risultano bloccati ed il polimero si comporta in modo rigido e fragile, al di sopra di essa il polimero assume caratteristiche di plasticità e può venir deformato senza andare incontro a rottura.

In questa tecnica vengono utilizzati due tipi di polimeri termoplastici: uno con T_g più alta viene utilizzato per dare la forma ad un termoplastico avente temperatura di transizione vetrosa più bassa.

Il primo stadio di replicazione coinvolge il polimero a più alta T_g , il quale viene fatto colare su uno stampo metallico. In questa fase si ottiene uno stampo che ha la forma inversa di quella che si vuole ottenere a fine processo. La forma corretta si otterrà grazie alla seconda fase del processo dove il polimero a più bassa T_g viene fatto colare nello stampo intermedio.

Lo stesso principio fisico (transizione vetrosa e successiva colata) viene utilizzato in entrambi gli stadi del processo, per questo la tecnica prende il nome di double hot-embossing.

Lo stampo in metallo utilizzato nel primo stadio viene realizzato con i processi di micro-fabbricazione sopra descritti.

La scelta dei polimeri ad alta temperatura di transizione vetrosa avviene tra queste principali categorie: poliammidi(PI), polietereimmidi(PEI), polisolfoni (PS) o polietereeterchetoni (PEEK).

Tali polimeri devono essere molto stabili termicamente alle temperature di processo e devono garantire la possibilità di essere separati senza troppe difficoltà senza alcun rilascio di materiale.

I principali polimeri a più bassa temperatura di transizione vetrosa utilizzati sono: ABS, PMMA e PC.

La double hot embossing offre diversi vantaggi: lo stampo intermedio può essere riutilizzato per più processi senza mai perdere di qualità od inficiare la seconda replica, permette di

superare alcune limitazione geometriche incontrate nella replica di microstrutture in rilievo e rappresenta un metodo efficiente con costi limitati.

Questa tecnica, invertendo due volte la medesima figura, permette di realizzare stampi per cui la realizzazione della forma al negativo, essendo molto complessa, presenta difficoltà di riproduzione. (Guyout, 2011).

Capitolo 2

Metodologia sperimentale

In questo capitolo verrà descritta la catena di processo seguita, a partire dai materiali fino ad arrivare al prodotto finito. Si propone un metodo rapido e di basso costo per la produzione di stampi in materiale polimerico caratterizzati da canali micro-fluidici. Questi stampi, una volta inseriti nella macchina per micro-stampaggio ad iniezione, serviranno a realizzare un elevato volume produttivo.

L'approccio proposto prevede di sintetizzare due tipi diversi di resine epossidiche caratterizzate da canali micro-fluidici partendo da precursori liquidi. Si prevede una replicazione in tre passaggi che permette di invertire la figura di partenza. Lo stampo originario in acciaio è stato realizzato sfruttando una delle tecniche di micro-fabbricazione descritte nel capitolo 1: la micro-elettroerosione. Successivamente, grazie ad una colata di silicone la figura viene invertita una prima volta. Il silicone, grazie alle sue proprietà anti-adesive rende l'operazione di separazione dall'acciaio semplice, mantenendo pressoché inalterate le features presenti nella forma originaria. Questo passaggio viene ripetuto, facendo colare del silicone sul primo intermedio siliconico. Questa operazione è stata necessaria poiché la realizzazione del master con una configurazione contraria a quella che si sarebbe dovuta stampare avrebbe richiesto un tempo eccessivo di lavorazione. Sulla seconda replica in silicone vengono fatte colare due resine epossidiche diverse, fino all'ottenimento di uno stampo con la configurazione desiderata. Dopo la sintetizzazione del materiale è stato necessario lavorare il pezzo per ottenere una configurazione tale da permettere l'alloggiamento nello stampo della macchina per micro-stampaggio ad iniezione. La lavorazione è stata eseguita tramite micro-fresatura. Infine verranno descritti i parametri sfruttati per ottimizzare il processo di stampaggio.

2.1 Procedura di realizzazione dell' inserto metallico

La realizzazione dell' inserto metallico con i canali micro-fluidici corretti è stata eseguita con la tecnica di micro-fabbricazione EDM. L'operazione preliminare alla lavorazione è la lucidatura. La prima fase di levigatura avviene facendo strofinare un blocchetto di acciaio con

dei panni abrasivi di grana decrescente. Nel nostro caso è stato necessario partire da una grana molto grossa per ottenere un adeguato valore di rugosità superficiale. La seconda fase prevede lo strofinio con carta diamantata in presenza di lubrificante, sempre con grana decrescente di $6,3,1 \mu\text{m}$. Tutto ciò serve a diminuire la scabrezza superficiale dovuta alle asperità che caratterizzano tutte le superfici, al fine di renderle più lisce possibili. Il pezzo così ottenuto può essere inserito nella macchina di micro-elettroerosione EDM.

Come già detto nel § 1, questa tecnica sfrutta le scariche tra due elettrodi per erodere il materiale dalla superficie del pezzo lavorato. Una singola scarica viene creata in quattro fasi: creazione, accensione, scarica e rottura. Durante la prima fase, un voltaggio, denominato tensione di circuito μ_0 , viene applicato tra l'elettrodo della macchina ed il pezzo da lavorare. Il voltaggio, generalmente compreso fra $\mu_0=60 \text{ V}$ ed $\mu_0=40 \text{ V}$ a seconda della macchina, crea un forte campo elettrico fra gli elettrodi. L'accelerazione delle esistenti cariche libere nel dielettrico avviene lungo le linee di flusso del campo. Inoltre il campo elettrico comporta un'emissione di elettroni dal catodo (effetto di campo). Con gli elettroni in movimento verso l'anodo e gli ioni diretti al catodo inizia a fluire corrente. Di conseguenza il fluido dielettrico inizia a scaldarsi raggiungendo la propria temperatura di ebollizione, successivamente vaporizza creando così un canale di plasma.

Nella fase di accensione, gli elettroni accelerati cercano una ionizzazione, definita anche ionizzazione d'impatto, di molecole neutre, incrementando così il numero dei portatori di carica. Superata una certa soglia si riesce a superare la rigidità del dielettrico. La fase di accensione è strettamente collegata ad un cambiamento di corrente ed il voltaggio. Con la creazione del canale di plasma, la tensione di circuito μ_0 cala fino ad un valore di voltaggio μ_e , il cui valore dipende dalla resistenza ohmica dell'intervallo di lavoro (working gap), ed una corrente di scarica i_e inizia a fluire lungo la superficie del canale di plasma.

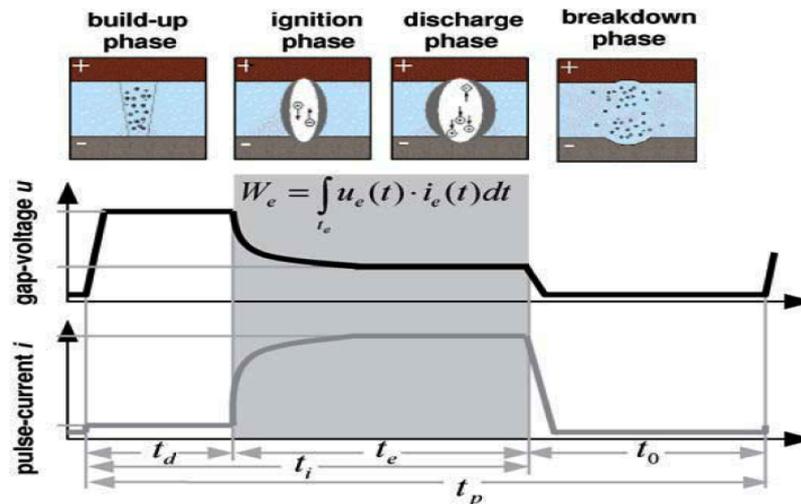


Figura 3: Illustrazione di una singola scarica-EDM

I valori di corrente di scarica si trovano in un intervallo compreso fra un minimo di $i_e = 1\text{mA}$ fino ad un massimo di $i_e = 1\text{mA}$. Il tempo che intercorre tra l'applicazione della tensione di circuito μ_0 ed il superamento della rigidità del dielettrico viene chiamato tempo d'accensione di ritardo t_d . Durante la terza fase, detta fase di scarica, l'energia elettrica viene convertita in energia termica a causa dell'impatto tra i portatori di carica e la superficie degli elettrodi. La quantità di materiale fuso creato dall'impatto degli elettroni sull'anodo è minore rispetto a quella dovuta all'impatto degli ioni sul catodo. Ciò è dovuto la differenza delle masse. Inoltre, il materiale dell'anodo viene rimosso principalmente all'inizio della fase di scarica. Per lunghi tempi di scarica t_e , il materiale rimosso dall'anodo diminuisce tendendo a zero mentre quello rimosso al catodo aumenta fino al raggiungimento di un valore prestabilito. Questo fenomeno, conosciuto anche come effetto delle polarità, può essere anche spiegato con le differenti mobilità dei portatori di carica. Poiché l'EDM opera con tempo di scarica molto piccoli che vanno dai $t_e=10\text{ns}$ ai $t_e=1\mu\text{m}$, l'elettrodo della macchina viene usualmente assunto come catodo per ridurre l'usura. La quantità principale di materiale rimosso avviene durante la fase di rottura. Lo spegnimento della corrente di scarica crea un collasso nel canale di plasma. Una bassa pressione indotta riduce la temperatura di bollizione del materiale fuso sulla superficie degli elettrodi ed il materiale viene vaporizzato od eroso tramite esplosioni. La quantità di materiale rimosso dipende dall'energia della scarica W_e , definita come:

$$W_e = \int_0^{t_e} i_e(t) u_e(t) dt \approx u_e i_e t_e \quad (1)$$

Successivamente alla scarica, il working gap viene deionizzato e pulito dalle particelle grazie a dei flussi di dielettrico fluido (Qin, 2010).

L' elettrodo di lavorazione perciò si usura durante la lavorazione e per ottenere una corretta forma tridimensionale del pezzo occorre mantenere costante la punta dell' elettrodo e controllarne l'usura. La teoria dell'usura uniforme (uniform wear method) permette di gestire queste problematiche mediante alcuni accorgimenti. Il metodo si basa sul fenomeno che, sotto certe condizioni, la variazione della forma della zona dell'utensile soggetta ad usura, dopo un transitorio iniziale, si stabilizza e di conseguenza può essere considerata costante e nota. Perciò ogni lato è lavorato "layer by layer", strato per strato. Considerando la profondità di taglio, quando l'elettrodo avanza scendendo di un'altezza ΔZ e l'area della sezione è sufficientemente piccola, la deformazione sulla punta dell'elettrodo scompare dopo la lavorazione dello strato perché la sezione deformata è completamente usurata e la punta diventa piatta ancora.

Poiché il valore della planarità del fondo dello strato lavorato è intorno a ΔZ , ΔZ deve essere fissato il più piccolo possibile. Tuttavia il rendimento deve tener conto che un ΔZ piccolo implica una bassa produttività. E' questo uno dei principali limiti di questa lavorazione: la lentezza di lavorazione. Nel nostro caso ci sono volute 16 ore.

Considerando un percorso orizzontale dell'elettrodo nel piano si ha che nel punto d'inizio, l'elettrodo è immerso nel pezzo fino a raggiungere un ΔZ , da lì segue il cammino prefissato. Quando arriva nel punto di fine, la superficie lavorata pende dal punto d'inizio a quello finale perché l'elettrodo si è accorciato a causa dell'usura. Per compensare questa inclinazione l'utensile segue il percorso inverso lavorando la superficie in modo da ottenere la precisione voluta. Questo accorgimento è chiamato scansione avanti e indietro (to-and-fro scanning).

Con l'obiettivo di diminuire l'influenza dei bordi arrotondati dell'elettrodo sulla superficie di lavorazione, la distanza tra due linee vicine si trova a meno della dimensione della sezione trasversale dello stesso.

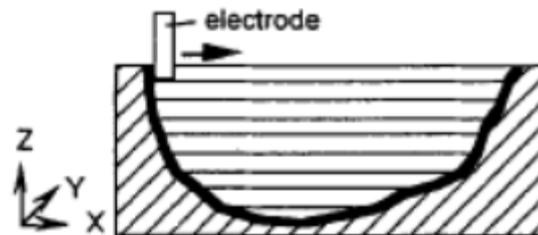


Figura 4: Avanzamento dell' elettrodo layer by layer

La parte interna e il contorno dell'area lavorata sono esaminati alternativamente. Quando il contorno è lavorato, i bordi della punta dell'utensile si arrotondano a causa dell'usura. Tuttavia, quando la parte interna viene trattata, la scarica si verifica uniformemente lungo la parte inferiore dell'elettrodo.

Questo ripristina la forma finale originale e riappare l'angolo acuto prima della successiva ripartenza. Ricapitolando, le regole per il metodo dell'usura uniforme possono essere riassunte come segue:

1. Lavorazione dal fondo dell'elettrodo, o lavorazione strato dopo strato con un piccolo elettrodo che avanza su ogni lato;
2. To-and-fro scanning;
3. Sovrapposizione dei percorsi;
4. Lavorazione delle parti interne e dei profili alternativamente

2.2 Sintesi delle resine epossidiche

L'inserto metallico realizzato all'EDM è il primo step della procedura di realizzazione dello stampo in materiale alternativo. I materiali testati sono due resine epossidiche ottenute mediante replica in tre passaggi sfruttando intermedi siliconici.

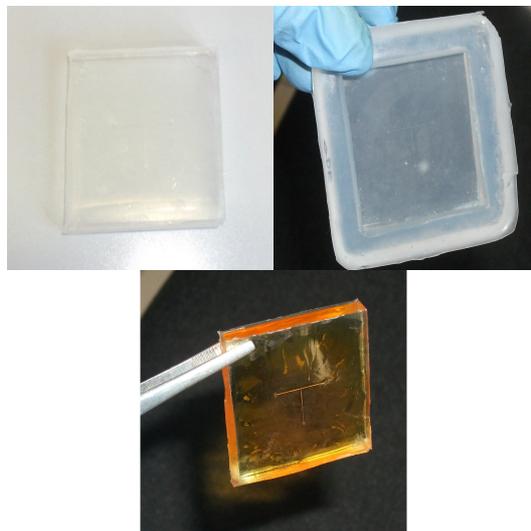


Figura 5: Sequenza dei passaggi della replicazione.

Il primo passaggio consiste nel colare uno strato di silicone sul metallo, ricoprendolo completamente. In tal modo è possibile ottenere una forma complementare a quella da cui si è partiti. Il silicone viene sintetizzato insieme ad un catalizzatore in un rapporto 1:10. Viene

mescolato, degasato dalle eventuali bolle che si trovano all' interno e che potrebbero riaffiorare in superficie ed infine posto in un forno a circa 80 C° per 45 minuti. Una volta solidificato il silicone può essere staccato dal metallo senza particolari difficoltà.

Il secondo passaggio consiste nel realizzare una seconda colata di silicone sopra uno strato di silicone rigido, al fine di immergervi il primo intermedio siliconico. Questa operazione serve ad ottenere uno stampo “contrario” a quello intermedio in silicone ed uguale all'originario inserto metallico. I materiali utilizzati sono i medesimi: silicone e catalizzatore.

Infine sarà possibile colare la resina per ottenere lo stampo voluto. L' inserto in resina deve avere una forma al negativo rispetto a quella che s' intende stampare.. Al fine di evitare che il silicone non ancora solidificato e quello già solido si fondano una volta messi in forno, è stata effettuata un'operazione di silanizzazione. Essa prende il nome dal silano, un composto chimico con formula chimica SiH₄, dalla forma tetraedrica ai cui vertici si trovano gli atomi di idrogeno. Nella pratica è stata eseguita facendo evaporare 20µL di octadecitriclorosilano sul primo intermedio siliconico prima di essere immerso nel secondo passaggio.

Le resine epossidiche sono una della più importanti classi di polimeri termoidurenti e vengono ampiamente utilizzate in diverse applicazioni. Esse hanno buone proprietà elettriche, termiche e meccaniche ma hanno una scarsa resistenza alla propagazione delle cricche. Le resine epossidiche possono essere reticolate in presenza di ammina o anidride. L' anidride come agente curante viene utilizzata nella maggior parte delle applicazioni poiché riduce l' esotermicità della reazione di polimerizzazione, conferendo maggiore stabilità termica e trasparenza. Le resine epossidiche sintetizzate sono due: una a base di olio di lino epossidato (ELO), l' altra a base di gliceroldiglicil etere (GDE).

2.2.1 GDE

La resina a base di GDE è ottenuta mediante i seguenti reagenti:

- Gliceroldiglicil etere (GDE), peso molecolare 204,22 g/mol.
- Trietilammina (TEA), ovvero un'ammina con formula bruta C₆H₁₅N, spesso indicata comunemente come Et₃N . Funge da catalizzatore..

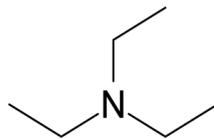


Figura 6: Struttura molecolare della TEA

- Anidride MetilEsaIdroftalica. Funge da reticolante.

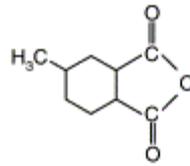


Figura 7: Struttura molecolare dell'anidride esametildroftalica

Tutti i reagenti vengono miscelati ed agitati a lungo in un agitatore magnetico. La reazione è esotermica e rilascia calore di reazione. Dopo aver mescolato a lungo si procede lasciandola a temperatura ambiente ed infine ponendola in forno a 90 C° per due ore e mezza.

La reazione fra il GDE ed il catalizzatore provoca l'apertura dell'anello epossidico ed il legame con l'anidride. La struttura, una volta avvenuta la reticolazione, è caratterizzata da legami trasversali fra le catene che rendono la resina dura e stabile.

2.2.2 ELO

La resina a base di ELO è ottenuta mediante i seguenti reagenti:

- Olio di lino epossidato (ELO). L'ELO è un olio vegetale totalmente o parzialmente epossidato, viene ottenuto dai semi maturi della pianta di lino, successivamente distillato ed epossidato. Il termine epossido indica la presenza di un etere ciclico triangolare, in cui un atomo di ossigeno è unito a ciascuno dei due atomi di carbonio che sono già legati l'uno all'altro. L'atomo di ossigeno porta due coppie di elettroni non condivisi ed anche a causa delle dimensioni ridotte, è un composto molto reattivo. Il doppio legame carbonio-carbonio dell'acido grasso oleico, linoleico e linolenico presente nel liquido di spremitura dei semi di lino può essere facilmente epossidato per reazione con perossiacidi e dioxirane o perossido di idrogeno, ottenendo così l'ossidazione di un doppio legame olefinico ad una struttura di ossirano.

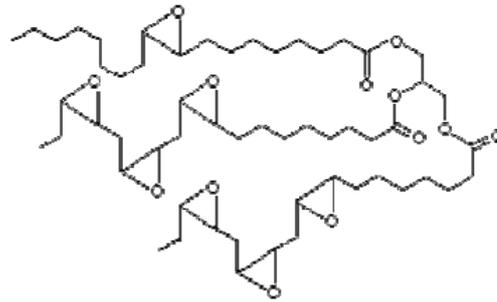


Figura 8: Struttura molecolare dell' olio di lino epossidato

- Anidride esametildioftalica. Vedi § 2.3.1
- TEA. Vedi § 2.3.1
- Benzil alcol

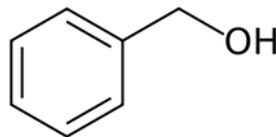


Figura 9: Struttura molecolare del benzilalcol

- 3 - glicidilossitrimetilossilano (GLYMO)

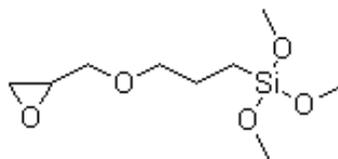


Figura 10: Struttura molecolare del GLYMO

L' anidride e l' ELO vengono miscelati insieme e ben mescolati. Questi due composti sono immiscibili perciò risulta necessaria una profonda miscelazione. In seguito vengono aggiunti gli altri reagenti e dopo il degasaggio, vengono posti in un forno a 130 C° per un ora e trenta minuti. Anche in questo caso, gli anelli epossidici si aprono, reagiscono con l'anidride formando sempre più legami esterei al progredire della reticolazione della resina.

Una volta indurita la resina si presenta dura e dal caratteristico colore giallastro.

2.3 Realizzazione dello stampo

Lo stampo per micro-stampaggio ad iniezione, come già accennato nel paragrafo 1.1, rappresenta il cuore del processo. Nel nostro caso lo stampo pre-esistente in dotazione alla macchina non veniva completamente riempito dal massimo volume di materiale iniettabile. Il materiale iniettato dal pistone, infatti, deve colmare tre parti: il volume della figura, il volume della materozza, ed il materiale che viene comunemente definito di cuscinetto. Quest'ultimo contributo identifica il materiale in "surplus" che serve per la compattazione del materiale a causa della post-pressione a fine iniezione. La post-pressione viene trasferita allo stampo grazie a questo cordone di materiale in eccesso. I tre contributi sono stati così calcolati e sommati: $1,086 \text{ cm}^3$ per riempire il volume della figura, $0,283 \text{ cm}^3$ per riempire la materozza e $0,002 \text{ cm}^3$ per mantenere il cuscinetto. La somma è di : $1,371 \text{ cm}^3$. La macchina ha la capacità di iniettare $1,1 \text{ cm}^3$. Risulta perciò evidente che lo stampo non si sarebbe riempito poiché il "volume da occupare" era eccessivo. Ciò ha comportato alla progettazione e al rifacimento dei componenti dello stampo. Esso è composto da una parte fissa ed una mobile sulle quali vengono montati gli inserti. Sulla parte mobile è stata montata una cornicetta di acciaio che avrebbe contenuto il prodotto stampato in polistirene

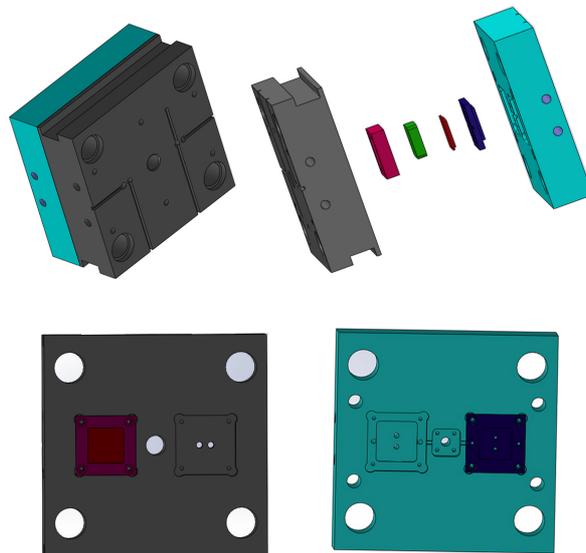


Figura 11: Modello 3D dello stampo. Sono rappresentati in sequenza: Stampo mobile, vista esplosa, parte fissa e parte mobile.

La parte fissa invece contiene l'inserto in resina che deve essere mantenuto fisso attraverso un blocchetto d'acciaio di sostegno ed una cornice superiore. Per permettere l'alloggiamento nella parte fissa dello stampo è necessaria un'ulteriore lavorazione in fresa di cui si tratterà nel paragrafo successivo. L'immagine che segue illustra ogni singola parte che compone lo stampo, per permettere una migliore comprensione dei concetti fin qui descritti.

2.4 Lavorazione in fresa

Per poter permettere l'alloggiamento del polimero all'interno della macchina per microstampaggio ad iniezione è stata necessaria un'ulteriore lavorazione di micro-fresatura.

La macchina utilizzata è la Kugler. La struttura della macchina è robusta, ha buone caratteristiche di smorzamento, ha la capacità di minimizzare la deformazione termica, di garantire stabilità a lungo termine ed essere isolata dagli effetti ambientali. Lo strumento di taglio è un componente chiave della macchina poiché influisce sui componenti lavorati in termini di precisione dimensionale, forma e qualità della superficie. Esso determina la dimensione delle features e la qualità dei componenti micro-lavorati.

Il sistema di controllo CND-Computer Numerico Controllo, svolge un ruolo essenziale nel controllo di precisione dei servo azionamenti e nella compensazione degli errori (sia geometrici che termici). Questi sistemi hanno raggiunto un livello di precisione nanometrica talvolta anche sub-nanometrica.



Figura 12: Kugler- Micromaster 3/5 X

2.5 Parametri di processo

La macchina utilizzata nel nostro processo è la Microsystem Battenfeld 50.



Figura 13: Battenfeld micro power 15

La macchina incorpora una vite da 14 mm montata a 45° rispetto all'asse di iniezione, che assicura una plastificazione omogenea del fuso.

Il materiale viene estruso in una camera di dosaggio contenente un pistone che seleziona il volume da iniettare secondo i parametri imposti. Una volta dosato, il materiale viene iniettato grazie ad un secondo pistone arrivando ad una velocità di 1000 mm/s. Il pistone di iniezione spinge il fuso nello stampo, ed una volta terminata quest'operazione viene applicata una pressione di tenuta, grazie ad un leggero movimento in avanti del pistone di iniezione. Il pistone di iniezione è in grado di raggiungere velocità molto alte, per poter garantire il riempimento dello stampo con materiale ancora molto caldo.

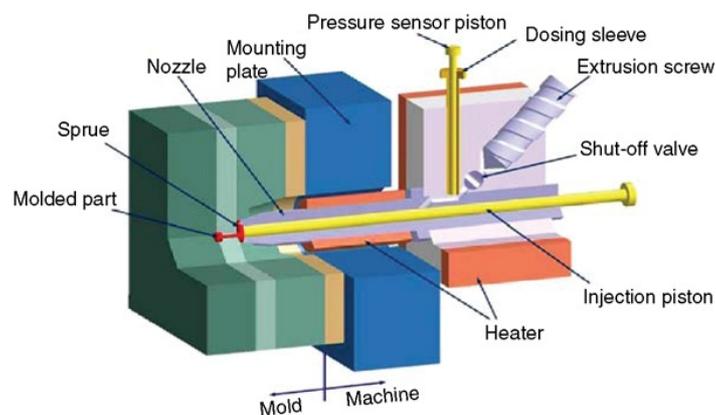


Figura 14: Unità d' iniezione della macchina di micro-stampaggio ad iniezione

Il micro-stampaggio ad iniezione è un processo che permette la produzione di massa di un elevato volume di micro-prodotti. Per poter ottimizzare la qualità dei micro-prodotti stampati, è necessario porre l'attenzione sulle condizioni di processo. Il processo di stampaggio è caratterizzato da quattro variabili fondamentali: temperatura della plastica, pressione della plastica, portata e velocità di raffreddamento. Queste variabili devono essere adattate al materiale che si intende stampare. Nel nostro caso il materiale utilizzato è il polistirene. Il polistirene è un polimero termoplastico con struttura prevalentemente amorfa e atattica. È caratterizzato dalla presenza di un anello benzenico che, date le grandi dimensioni, porta ad un irrigidimento della catena. La deformazione per movimenti delle catene relative è inibita dall'interazione di anelli benzenici di catene adiacenti. Quest'effetto è responsabile della fragilità e durezza che caratterizzano il PS, resistenza a trazione e mancata cristallinità (Brusatin, 2012). I polimeri, nel micro-stampaggio, vengono lavorati allo stato fuso e la temperatura di lavorazione deve essere sufficientemente alta per ottenere un fuso abbastanza fluido da scorrere all'interno delle apparecchiature di lavorazione. Per il polistirene questa temperatura si aggira attorno ai 240 C°. Una temperatura di lavorazione più alta riduce la viscosità, in virtù della pseudo-plasticità dei polimeri, e riduce la caduta di pressione che si verifica fra il passaggio della plastica all'interno del cilindro di plastificazione alla cavità dello stampo in cui è soggetta ad una pressione idraulica. Tutto ciò però deve essere limitato in quanto temperature eccessivamente alte portano ad una variazione di densità dallo stato fuso a quello solido e quindi ad un maggiore ritiro. Il fenomeno è parzialmente limitato dal fatto che un minore ΔP permette di avere una migliore compattazione delle molecole. La temperatura di lavorazione influenza anche ulteriori aspetti tra i quali: il tempo di raffreddamento, il numero di strutture cristalline che si possono formare, le tensioni residue ed la qualità estetica del prodotto.

Nel nostro processo è stato imposto un profilo da temperatura; a partire dai 240 C° iniziali necessari per un fuso omogeneo fino ai 260 C° nell'ugello di iniezione. La macchina permette di definire un tempo di tolleranza, ovvero un tempo dopo cui l'abilitazione all'iniezione può avvenire. L'abilitazione ritardata del cilindro di iniezione avviene per garantire un riscaldamento ottimale ed omogeneo del materiale del cilindro di plastificazione.

Un ulteriore parametro da tenere in considerazione è la pressione. La pressione della plastica è un parametro che va distinto dalla pressione esercitata dal pistone idraulico nella fase di iniezione. La pressione della plastica è quella che viene sentita dal materiale:

- Quando entra nella cavità e la comincia a riempire (pressione di riempimento)

- Quando la cavità è piena ed il materiale comincia a solidificarsi, mentre dell' altro materiale fuso riesce ancora a passare attraverso il punto di iniezione (pressione di mantenimento).

La macchina è dotata di un sistema di controllo a ciclo chiuso basato sul trasferimento dal controllo di velocità al controllo di pressione (commutazione V-P). Durante la fase di riempimento la pressa esercita un controllo sulla velocità di iniezione, nella fase di mantenimento esercita un controllo sulla pressione. Il punto di commutazione V-P è una posizione lineare raggiunta dalla vite durante il suo avanzamento. Durante la fase di riempimento la vite avanza con velocità costante, ma man mano che la cavità si riempie, il fuso esercita una certa pressione sulla vite. Affinché la vite possa avanzare con velocità costante la pressa deve rendere disponibile sul pistone una maggiore pressione idraulica.

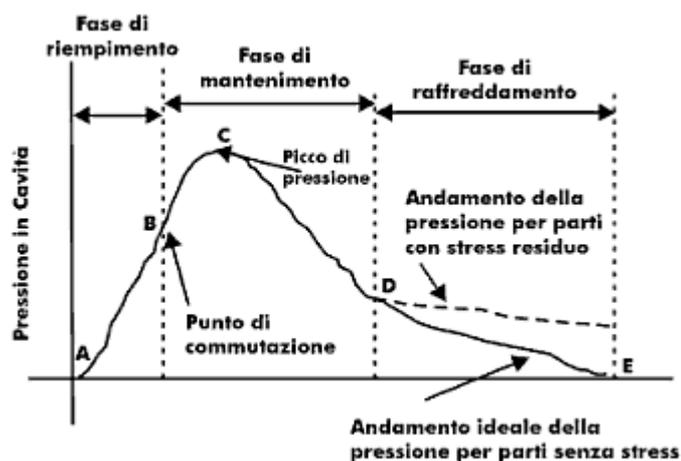


Figura 15: Andamento della pressione in cavità nelle fasi del processo

Quando la pressione esercitata diventa molto alta, il movimento di avanzamento della vite diventa minimo e quindi è più conveniente passare al controllo sulla pressione ad un certo valore e per un certo tempo (pressione di mantenimento). Durante la fase di iniezione (fino al raggiungimento del punto di commutazione V-P) la pressione idraulica deve essere il 5-10 % più alta di quella esercitata dalla plastica. Per poter passare dalla pressione idraulica alla pressione sul fuso nella camera di plastificazione bisogna conoscere il rapporto di plastificazione, ovvero il rapporto su cui si esercita la pressione idraulica e l'area su cui si esercita la pressione della plastica). La pressione della plastica deve essere regolata in modo tale da evitare la comparsa di bave o stampate incomplete. Inoltre un'eccessiva compattazione

può causare l'adesione della parte sullo stampo o una forza eccessiva in fase di estrazione, con conseguente distorsione della parte.

La portata della plastica è la quantità di materiale fuso che attraversa l'ugello di iniezione in un certo tempo. La portata è strettamente connessa con il tempo di riempimento. Il comportamento reologico di un polimero allo stato fuso è descritto dalla curva di flusso che rappresenta, su scala logaritmica, l'andamento della viscosità in funzione del gradiente di velocità.

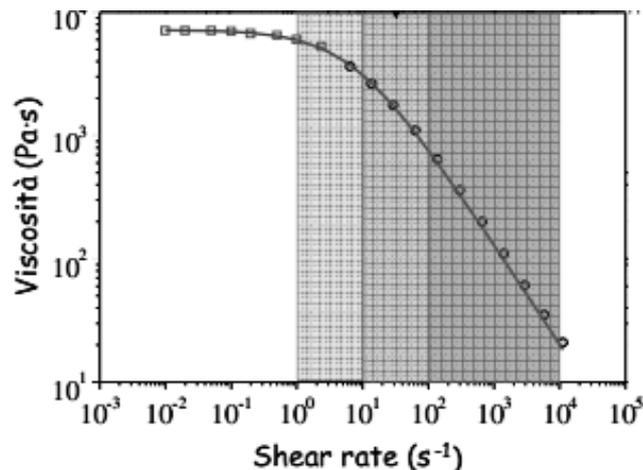


Figura 16: Curva di flusso del PS

La viscosità del polistirene diminuisce all'aumentare del gradiente di velocità, quindi:

- Portate elevate si traducono in alti gradienti di velocità sul materiale e quindi basse viscosità. Minore viscosità significa minore cambiamento del comportamento reologico del materiale nella fase di iniezione e di mantenimento.
- Portate elevate significano minore caduta di pressione (ΔP). Minore ΔP significa maggiore pressione all'interno della cavità, maggiore compattazione delle molecole e quindi minore ritiro. Minore ritiro significa poter ottenere parti dimensionalmente corrette e con minori variazioni da un ciclo all'altro.
- Maggiori portate permettono di riempire la cavità velocemente, quindi il materiale è ancora caldo in fase di mantenimento e si hanno minori cadute di pressione.

Poiché la viscosità cambia con la portata, se vogliamo ottenere un processo stabile dobbiamo mantenere la portata (o la velocità di iniezione) costante. Se la portata cambia, allora la viscosità cambia e le parti che si ottengono sono diverse.

La velocità di raffreddamento della plastica indica il tempo che il materiale impiega per restituire il carico termico ricevuto in fase di fusione. La velocità di raffreddamento dipende

da due parametri intrinseci del materiale: la conduttività termica e la capacità termica. La conduttività termica è una misura di quanto facilmente o velocemente il calore si muove attraverso il materiale. I polimeri tendono ad assorbire il calore che viene dato loro e lo trasformano in energia di movimento delle molecole. La conduttività termica dei polimeri è bassa e possono essere utilizzati come isolanti. La capacità termica è la misura dell'innalzamento della temperatura in una certa quantità di polimero per effetto di una certa quantità di energia termica. Dal momento che i polimeri tendono ad assorbire il calore hanno un'alta capacità termica. La velocità di raffreddamento è una proprietà intrinseca del materiale ed è diversa dal tempo di raffreddamento, temperatura dello stampo e portata dell'acqua di raffreddamento che sono, invece, parametri operativi dell'unità produttiva. La velocità di raffreddamento influenza:

- La quantità di tensioni residue nella parte e, quindi, le sue proprietà meccaniche
- Il grado di cristallinità del materiale e, quindi, le proprietà della parte
- Il ritiro della parte e, quindi, la sua forma e stabilità dimensionale
- Il tempo di ciclo

Le quattro variabili fondamentali descritte fin'ora descrivono il comportamento del materiale quando è fuso, formato ed estratto dallo stampo. Esse descrivono il comportamento del materiale indipendente dalla macchina e dal suo sistema di controllo. La macchina per micro-stampaggio ad iniezione comprende tutta una serie di parametri che permettono di regolare l'avanzamento del fuso dalla camera di plastificazione fino all'estrazione. Questi parametri sono numerosi possono regolare un valore singolo, un profilo regolabile con valori intermedi e possono essere indipendenti o correlati fra loro. A titolo di esempio se ne riportano alcuni: temperature dei cilindri, dosaggio del materiale, tempo di raffreddamento, tempo di chiusura dello stampo, temperatura dell'acqua di iniezione, valori di commutazione, valori di pressione e velocità.

Al fine di ottimizzare il processo bisogna tenere ben presente che esso è composto da tre fasi principali:

- Riempimento/mantenimento
- Raffreddamento
- Estrazione

Nella fase di riempimento si cerca di ottenere delle stampate incomplete, ossia riempite fra il 95% ed il 98%. Poiché il polistirene è un polimero non-newtoniano è meglio iniziare con la massima velocità di riempimento per poi diminuirla gradualmente. Poiché la cavità non sarà

mai completamente piena, la pressione sul fuso sarà sempre modesta. Una volta applicata la massima velocità di riempimento ed aver ottenuto una parte completa al 95% si inizia a diminuire la velocità. Dall'analisi visuale delle parti ottenute, si seleziona la migliore velocità di iniezione e posizione di commutazione dalla fase di riempimento a quella di mantenimento. La fase di mantenimento consiste nel mantenere una certa pressione per un certo periodo di tempo. La pressione di mantenimento può essere tenuta bassa inizialmente, per poi essere aumentata fino a completare la parte con una buona finitura superficiale ed estetica. In genere la pressione di mantenimento è $\frac{1}{3}$ o $\frac{1}{2}$ del picco di pressione in fase di riempimento.

La seconda fase è quella di raffreddamento. Il tempo di raffreddamento deve essere sufficientemente lungo per consentire l'estrazione del pezzo senza che subisca delle deformazioni e senza che si distorca per effetto di un ritiro incontrollato. La macchina permette di impostare anche la temperatura di raffreddamento che può essere diversamente impostata nella parte fissa ed in quella mobile dello stampo. Questa temperatura non è un parametro ben definito: essa può cambiare da un ciclo all'altro, a seconda del surriscaldamento dello stampo. Il valore di temperatura è all'incirca sui 60 C°.

L'ultima fase è quella di estrazione. Lo stampo deve essere aperto ad una velocità e per uno spazio sufficiente a consentire l'estrazione senza che il pezzo venga danneggiato. L'estrazione avviene per mezzo di quattro viti che spingono il pezzo da dietro e lo fanno scivolare fuori dallo stampo. La corsa e la velocità delle viti di estrazione è anch'essa regolabile e deve essere tale garantire l'uscita del pezzo senza possibilità di rimanere attaccato alla parte mobile della macchina.

2.5.1 Analisi termica per l'ottimizzazione del processo

Sono stati sviluppati diversi metodi per il miglioramento dei parametri di processo in modo scientifico, come ad esempio le simulazioni per la fase di riempimento dello stampo o per la valutazione delle temperature reali raggiunte dallo stampo in seguito ad una serie di cicli. Nel nostro caso è stata eseguita una simulazione termica per poter calcolare la distribuzione di temperatura all'interno dello stampo. I risultati ottenuti mostrano come vi sia un surriscaldamento graduale sia dell'inserto in resina che del materiale stampato in polistirene. Un eccessivo surriscaldamento della plastica potrebbe influenzare il ritiro del materiale. Infatti le materie plastiche passando dallo stato fuso a quello solido, perdono la loro mobilità ed occupano meno volume. Una delle principali cause è dovuta appunto all'abbassamento di temperatura. Ad esempio, un raffreddamento più rapido contribuisce ad un minore ritiro,

poiché le molecole vengono congelate nella posizione in cui si trovano senza avere il tempo di contrarsi. All'aumentare della temperatura dello stampo invece, diminuisce la differenza tra le pareti e la temperatura del fuso, diminuendo così la velocità di raffreddamento ed aumentando il ritiro.

Inoltre si è riscontrato sperimentalmente che il surriscaldamento della resina epossidica influenza negativamente la replicazione e talvolta causa l'adesione del polimero in polistirene alla resina con il conseguente blocco del ciclo di produzione. Perciò è stato pensato di settare in maniera differente le temperature del termoregolatore relative alla parte fissa e mobile dello stampo, abbassando quest'ultima a 50 C e mantenendo l'altra a 60 C.

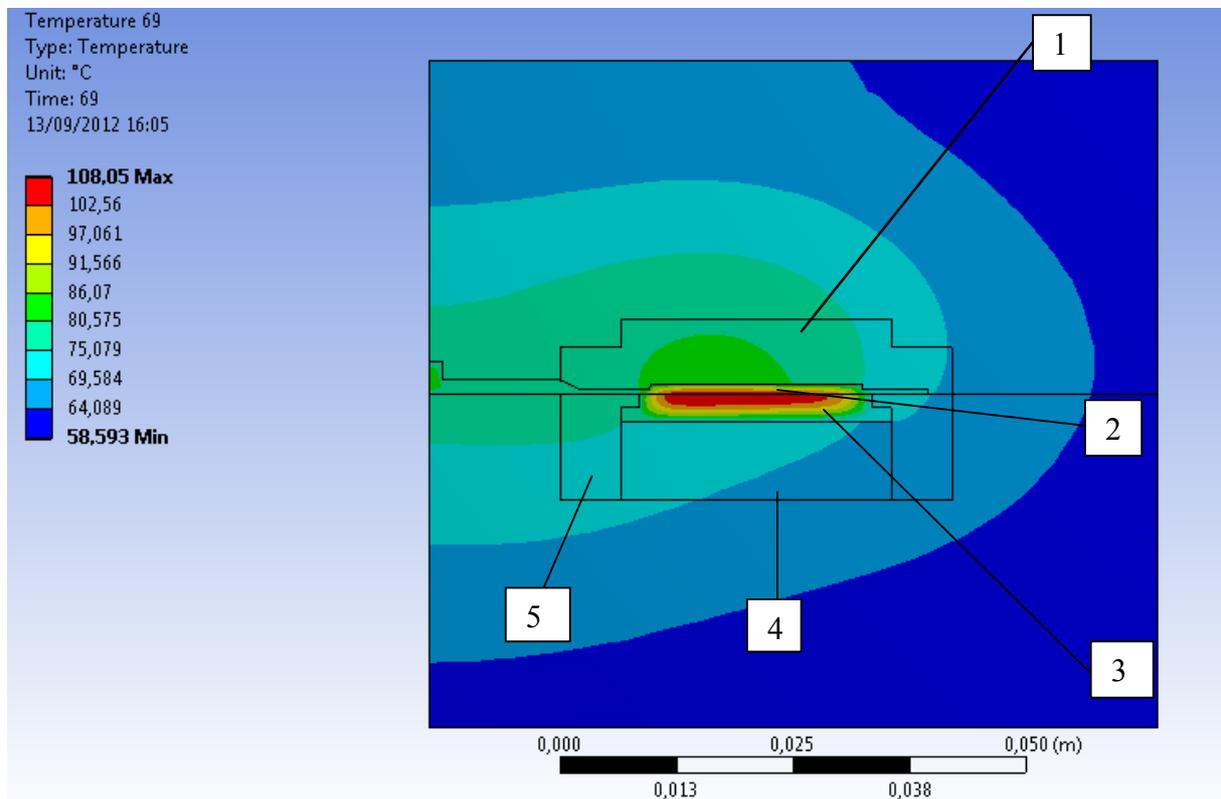


Figura 17: Evoluzione di temperatura dello stampo dopo tre cicli di stampaggio. Vengono riportati l'elenco dei componenti:

1. Figura dello stampo
2. Replica in PS
3. Inserto in resina epossidica
4. Spessore sotto resina
5. Cornicetta in acciaio

2.6 Caratterizzazione degli inserti.

Sulla superficie dell'inserto metallico è stato realizzata una particolare figura funzionale, già studiata nel campo della micro-fluidica. I mixer micro-fluidici vengono utilizzati per avviare e ottimizzare reazioni che richiedono un'elevata velocità di miscelamento. Vengono applicati nelle reazioni tra liquidi o tra gas. Oltre al campo della sintesi chimica, essi possono essere utilizzati nel campo delle analisi biologiche. La miscelazione in questi canali è spesso condotta in regime laminare, perciò può essere sfruttata anche per il miscelamento di fluidi viscosi.



Figura 18-master in metallo

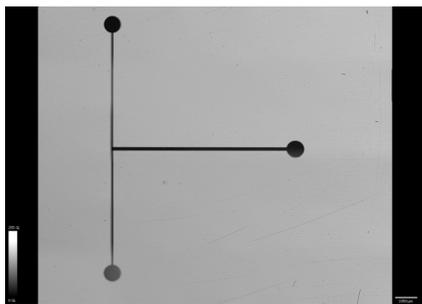


Figura 19-Immagine all'interferometro ottico dell'inserto metallico lavorato all'EDM

Oltre alla velocità di mescolamento ed al flusso laminare, un'altra caratteristica è il limitato volume interno. Questo è particolarmente importante quando si conducono reazioni altamente pericolose o quando si effettuano analisi biologiche che richiedono un volume limitato di campioni. I mixer sviluppati fino ad ora possono essere di due tipologie: attivi o passivi. I primi richiedono la presenza di una forza esterna per il mescolamento mentre i secondi sfruttano la geometria del canale in assenza di forze esterne. Nel nostro caso è stato realizzato un micro-mixer a forma di T, di tipo passivo, che garantisce un'elevata efficienza di mescolamento (Volker Hessel, 2005). Si tratta di un micro mixer di tipo Staggered Harringbone (SHM) utilizzato per sintetizzare liquidi ionici. Esso viene utilizzato da solo o in coppia per miscelare a fondo i reagenti e iniziare il processo di reazione in analisi biochimiche, somministrazione di farmaci, sequenziamento e sintesi di acidi nucleici. I liquidi ionici sono sali allo stato liquido che trovano numerose applicazioni, come nei solventi e nei fluidi elettro-conduttori. Dopo la lavorazione all'EDM l'inserto metallico si presentava come in figura 15. All'interno del canale principale sono state realizzate dieci grooves, che conferiscono il particolare aspetto a "liscia di pesce", e che generano una componente trasversale al flusso quando è applicata una pressione assiale. A causa di questi componenti

trasversali, gli elementi fluidi sono convogliati l'uno con l'altro; questo processo aumenta l'area di contatto tra i fluidi ed aumenta la miscelazione per diffusione (Yu Z.Y., 1998). Lo strumento utilizzato per la caratterizzazione è l'interferometro ottico. E' uno strumento che sfrutta l'interferenza fra più onde coerenti fra loro e che permette di misurare l'altezza della superfici con risoluzione sub-nanometrica, senza alcuna preparazione del campione. E' una tecnica rapida e non-distruttiva. Si è cercato di stabilire una procedura il più possibile coerente per ogni misurazione per potersi avvicinare il quanto più possibile alla misurazione dello stesso punto. Data la larghezza del canale si è pensato di suddividerlo in quattro passi di uguale lunghezza, identificando così tre punti. Anche se per ogni analisi il riferimento rispetto all'asse y sarebbe stato diverso, la misura calcolata alle distanze prefissate, partendo dall'estremo inferiore del canale, sarebbe all'incirca la stessa. Nel nostro caso la larghezza del canale risultava $194,22 \mu\text{m}$ e conseguentemente il passo $48,555 \mu\text{m}$. Per ogni step si è deciso di caratterizzare la prima e la settima grooves poiché hanno due geometrie rappresentative di tutte quelle che sono presenti.

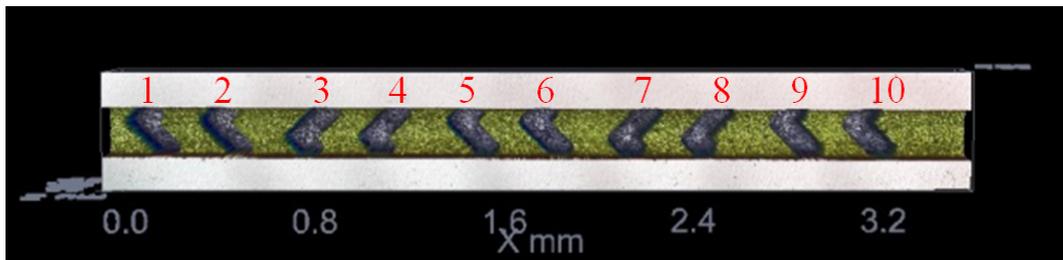


Figura 20: Canale principale e relative grooves

Per ciascuna misura si identificano 4 coordinate in y :

- Y_0 = coordinata y del bordo inferiore del canale
- $Y_1=Y_0+ 48,555$
- $Y_2=Y_1+ 48,555$
- $Y_3=Y_2+ 48,555$

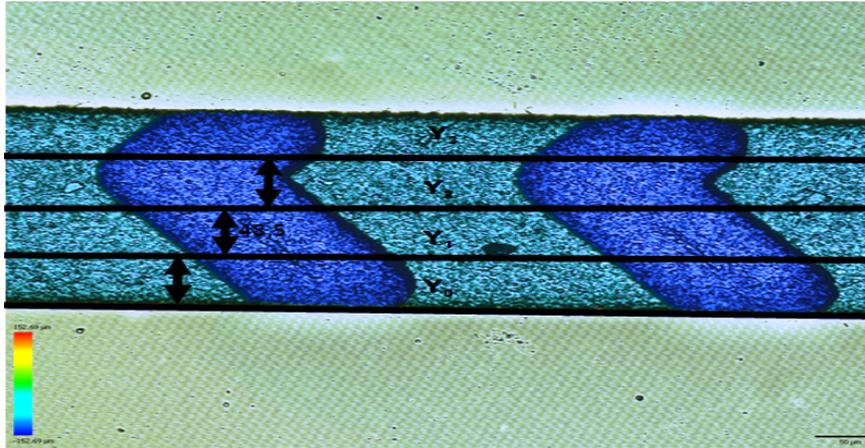


Figura 21: Grooves 1 e 2.

L'interferometro permette di misurare la profondità delle grooves come una media dei valori delle profondità rispetto alla media dei valori del canale. Questa procedura è stata seguita per tutte le misurazioni relative alle seguenti fasi:

1. Insetto in metallo (uguale per entrambe le resine)
2. Prima replica siliconica (uguale per entrambe le resine)
3. Seconda replica siliconica
4. Resine epossidiche (GDE ed ELO)
5. Polistirene

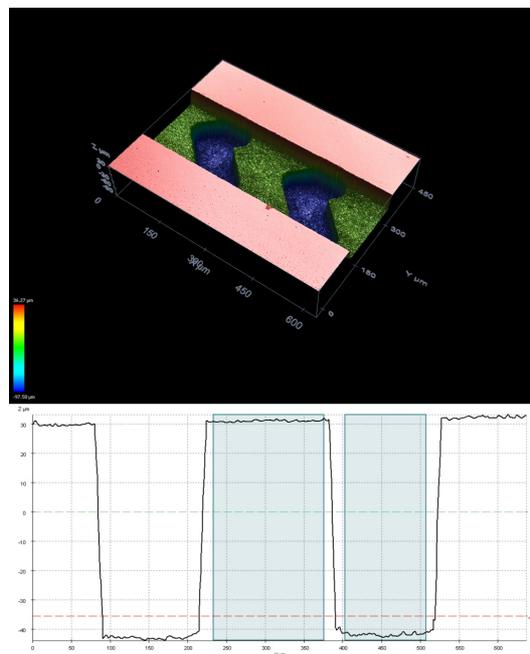


Figura 22: Caratterizzazione dell' inserto metallico. Groove 1.

Capitolo 3

Risultati

Si riportano in seguito i risultati ottenuti per ciascuna fase del metodo fin qui descritto.

3.1 Caratterizzazione dell' inserto metallico

Tabella 1: Inserto in metallo

INSERTO IN METALLO					
groove n°1			groove n°7		
Y	dz	dl	Y	dz	dl
$y_1 = 161.38$	72.87	153.55	$y_1 = 158.06$	76.18	151.89
$y_2 = 209.88$	72.70	151.47	$y_2 = 206.56$	75.28	153.97
$y_3 = 258.38$	73.58	150.23	$y_3 = 255.06$	74.08	151.89
AVG	73.05	151.75	AVG	75.18	152.58

3.2 Caratterizzazione delle repliche siliciche

3.2.1 Caratterizzazione della prima replica in silicone

Tabella 2: Prima replica in silicone

PRIMA REPLICA SILICONICA					
groove n°1			groove n°7		
Y	dz	dl	Y	dz	dl
$y_1 = 227.78$	78.262	151.89	$y_1 = 211.18$	80.497	158.11
$y_2 = 276.28$	79.051	150.23	$y_2 = 259.68$	79.371	156.04
$y_3 = 324.74$	80.134	149.4	$y_3 = 308.18$	80.381	151.06
AVG	79.14	150.506	AVG	80.08	155.07

3.2.2 Caratterizzazione della seconda replica in silicone per l'ELO

Tabella 3: Seconda replica silicica. ELO

SECONDA REPLICA SILICONICA					
groove n°1			groove n°7		
Y	dz	dl	Y	dz	dl
$y_1 = 194.58$	80.889	151.89	$y_1 = 199.56$	83.56	146.49
$y_2 = 243.08$	81.583	150.23	$y_2 = 248.06$	82.682	149.82
$y_3 = 291.58$	81.159	149.4	$y_3 = 296.56$	82.258	154.79
AVG	81.21	150.51	AVG	82.83	150.37

3.2.3 Caratterizzazione della seconda replica in silicone per il GDE

Tabella 4: Seconda replica siliconica. GDE

SECONDA REPLICA SILICONICA					
groove n°1			groove n°7		
Y	dz	dl	Y	dz	dl
$\gamma_1 = 168.02$	76.18	150.64	$\gamma_1 = 174.66$	78.88	151.06
$\gamma_2 = 216.52$	78.53	151.48	$\gamma_2 = 223.16$	77.86	150.64
$\gamma_3 = 265.02$	79.88	148.16	$\gamma_3 = 271.66$	77.88	149.82
AVG	78.19	150.09	AVG	78.21	150.50

3.3 Caratterizzazione delle repliche in resina epossidica

3.3.1 Caratterizzazione della replica in ELO

Tabella 5: Replica in ELO

REPLICA ELO					
groove n°1			groove n°7		
Y	dz	dl	Y	dz	dl
$\gamma_1 = 169.68$	85.42	148.99	$\gamma_1 = 156.4$	85.22	151.48
$\gamma_2 = 218.18$	83.81	149.4	$\gamma_2 = 204.9$	84.07	148.98
$\gamma_3 = 266.68$	83.70	145.67	$\gamma_3 = 253.4$	82.35	144.84
AVG	84.31	148.02	AVG	83.88	148.43

3.3.2 Caratterizzazione della replica in GDE

Tabella 6: Replica in GDE

REPLICA GDE					
groove n°1			groove n°7		
Y	dz	dl	Y	dz	dl
$\gamma_1 = 242.72$	85.00	155.63	$\gamma_1 = 229.44$	84.95	148.98
$\gamma_2 = 12.14$	86.62	157.70	$\gamma_2 = 277.94$	84.96	140.68
$\gamma_3 = 339.72$	84.79	143.59	$\gamma_3 = 326.44$	79.83	138.19
AVG	85.47	152.30	AVG	83.25	142.61

3.4 Caratterizzazione delle repliche inPoliStirene

3.4.1 Caratterizzazione delle repliche in PS dall' inserto in ELO

Tabella 7: Repliche in PoliStirene dall' inserto in ELO

POLISTIRENE-NR°1					
groove n°1			groove n°7		
Y	dz	dl	Y	dz	dl
Y ₁ = 201,22	83,277	154,79	Y ₁ = 209,52	84,988	153,55
Y ₂ = 249,72	84,982	151,47	Y ₂ = 258,02	83,993	151,48
Y ₃ = 298,22	84,647	155,21	Y ₃ = 306,52	82,635	149,4
AVG	84,302	153,8233	AVG	83,872	151,4767
POLISTIRENE-NR°100					
groove n°1			groove n°7		
Y	dz	dl	Y	dz	dl
Y ₁ = 161,38	82,318	151,47	Y ₁ = 138,14	84,128	151,48
Y ₂ = 209,88	82,359	146,08	Y ₂ = 186,64	82,808	152,31
Y ₃ = 258,38	83,398	150,64	Y ₃ = 235,14	82,241	155,62
AVG	82,69167	149,3967	AVG	83,059	153,1367
POLISTIRENE-NR°250					
groove n°1			groove n°7		
Y	dz	dl	Y	dz	dl
Y ₁ = 227,78	80,656	153,55	Y ₁ = 239,4	82,484	153,96
Y ₂ = 276,28	81,836	150,65	Y ₂ = 287,9	80,738	150,23
Y ₃ = 324,78	81,225	151,89	Y ₃ = 336,4	80,495	151,06
AVG	81,239	152,03	AVG	81,239	151,75
POLISTIRENE-NR°500					
groove n°1			groove n°7		
Y	dz	dl	Y	dz	dl
Y ₁ = 219,48	81,75	155,63	Y ₁ = 202,88	84,61	154,38
Y ₂ = 267,98	82,06	153,55	Y ₂ = 251,38	80,77	151,06
Y ₃ = 316,48	82,71	151,89	Y ₃ = 299,88	81,08	153,55
AVG	82,17333	153,69	AVG	82,15333	152,9967
POLISTIRENE-NR°750					
groove n°1			groove n°7		
Y	dz	dl	Y	dz	dl
Y ₁ = 181,3	81,14	150,23	Y ₁ = 166,36	82,8	150,64
Y ₂ = 229,8	81,41	152,3	Y ₂ = 214,86	81,31	157,29
Y ₃ = 278,3	81,12	154,8	Y ₃ = 263,36	80,86	155,62
AVG	81,22333	152,4433	AVG	81,65667	154,5167
POLISTIRENE-NR°1000					
groove n°1			groove n°7		
Y	dz	dl	Y	dz	dl
Y ₁ = 226,12	83,39	151,89	Y ₁ = 277,78		
Y ₂ = 274,62	82,24	154,38	Y ₂ = 276,28		
Y ₃ = 323,12	82,63	155,62	Y ₃ = 324,78		
AVG	82,75333	153,9633	AVG		

3.4.2 Caratterizzazione delle repliche in PS dall' inserto in GDE

Tabella 8: Repliche in PoliStirene dall' inserto in GDE

POLISTIRENE-NR°1					
groove n°1			groove n°7		
Y	dz	DI	Y	dz	dl
$\gamma_1 = 239.4$	78.88	154.8	$\gamma_1 = 228.8$	81.78	153.55
$\gamma_2 = 287.9$	77.62	149.4	$\gamma_2 = 271.3$	59.312	155.21
$\gamma_3 = 336.4$	79.46	153.13	$\gamma_3 = 319.8$	12.02	144.83
AVG	78.65	152.44	AVG	51.03	151.19
POLISTIRENE-NR°10					
groove n°1			groove n°7		
Y	dz	dl	Y	dz	dl
$\gamma_1 = 177.98$	3.73	135.71	$\gamma_1 = 159.72$	79.98	170.56
$\gamma_2 = 226.48$	17.65	179.28	$\gamma_2 = 208.22$	52.747	169.73
$\gamma_3 = 274.98$	14.46	162.68	$\gamma_3 = 256.72$	4.29	187.16
AVG	11.94	159.22	AVG	45.65	175.81

Capitolo 4

Analisi dei risultati

È possibile valutare nel processo seguito, due fasi di replicazione: la replicazione del stampo e la replicazione dello stampaggio. Nella prima fase di replica sono stati realizzati tre passaggi, partendo dal master in metallo fino ad arrivare alla replica in resina. Nella seconda fase verrà valutata la bontà delle repliche in polistirene ottenute attraverso stampaggio ad iniezione. Verranno analizzati distintamente i processi per ottenere l'inserto in ELO e l'inserto in GDE. Successivamente verranno analizzate le repliche in polistirene.

4.5.1 Analisi dei dati per la resina in ELO

Nei grafici seguenti è possibile osservare i vari step della prima fase di replicazione, sia per la prima che per la settima grooves. I grafici nr°1 e nr°2 riportano in ascissa la fase del processo corrispondente ed in ordinata l'altezza/profondità della groove.

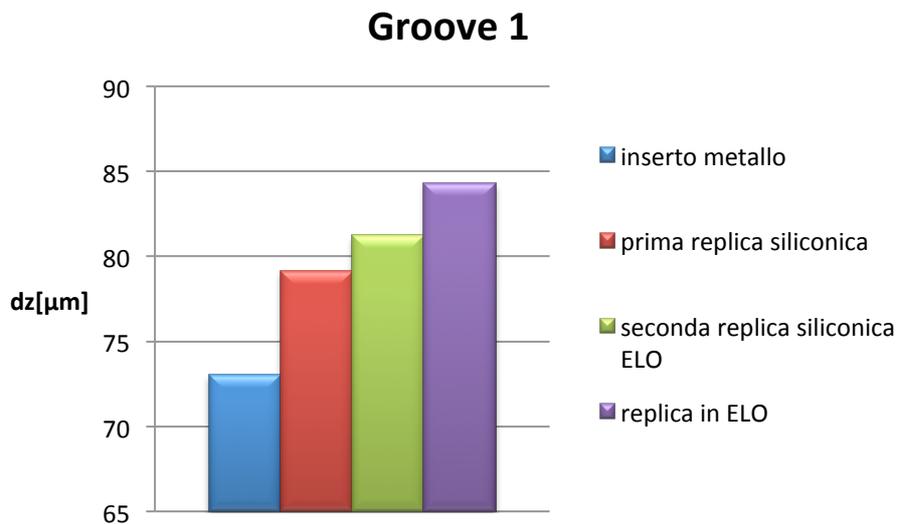


Grafico 1: Istogramma delle fasi di replicazione dell' ELO. Groove 1

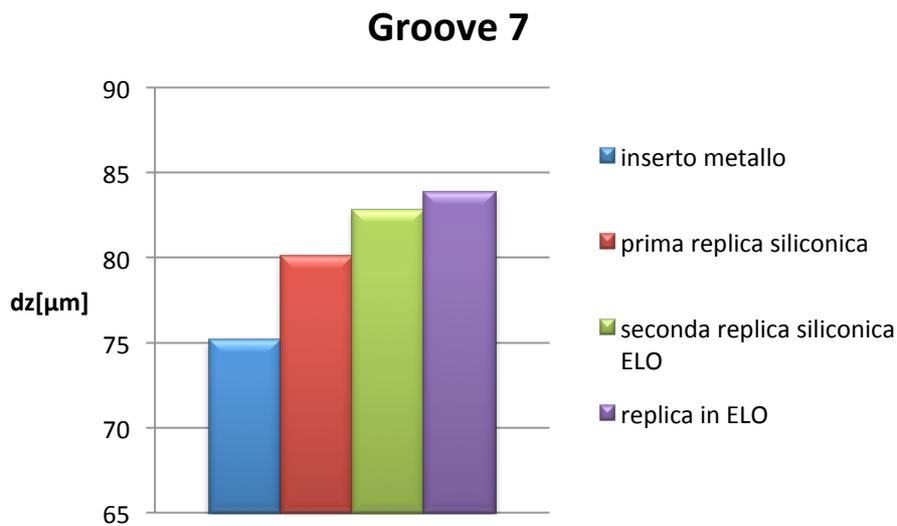


Grafico 2: Istogramma delle fasi di replicazione dell' ELO. Groove 7

L' andamento per la prima e la settima grooves risulta pressoché lo stesso. Si vede come la prima fase di replicazione è la principale fase di perdita di replicazione . Il silicone colato direttamente sul master in metallo, una volta solidificato, viene manualmente staccato dalla superficie metallica. È possibile che con questa operazione, tramite anche una minima forzatura dell'operatore, il silicone si sia deformato per poter permettere l'estrazione dal metallo. Le grooves aumentano di circa 5 μm. La replica peggiora di circa il 6,8 % nel primo step, per le successive fasi di replicazione la perdita è limitata al 3 %. Anche in questo caso l'aumento dell'altezza delle grooves rispetto alla prima replica può essere ricondotto ad una deformazione durante la separazione dei materiali. Questa fase potrebbe essere migliorata cercando di massimizzare la dose di silano utilizzata. Risulta difficile trovare una dose tale da facilitare l'operazione senza però danneggiare il silicone: è stato sperimentato che con eccessivo silano il silicone non solidifica bene in forno. L'ultima fase è caratterizzata da un aumento minimo delle grooves riconducibile ad un piccola deformazione durante la sintesi. La densità della resina è maggiore di quella del silicone e quindi, durante l' operazione di colaggio, il silicone potrebbe essersi leggermente deformato a causa del peso della resina. Per poter valutare la replica dello stampaggio vengono riportate in seguito le misurazioni eseguite sui vari pezzi stampati in polistirene.

La tabella nr° 9 riporta i valori di profondità espressi in μm per ciascuna y di riferimento e per ogni pezzo analizzato. Per entrambe le grooves viene riportata la media relativa ai tre valori di profondità ottenuti. Sulle prime due colonne di sinistra sono riportati i valori della resina di partenza per permettere un confronto diretto.

Tabella 9: Tabulazione dz per gli intervalli di repliche indicati

groove n°1														
INSERTO IN ELO		replica n°	1	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Y	dz [μm]	Y	dz [μm]											
Y_1	85,42	Y_1	83,27	83,17	82,32	81,28	81,39	80,69	81,75	81,14	82,29	80,37	81,95	83,39
Y_2	83,81	Y_2	84,98	82,93	82,35	81,85	80,89	81,85	82,06	81,52	80,87	82,18	81,48	82,24
Y_3	83,70	Y_3	84,64	84,40	83,39	82,70	82,64	81,59	82,71	81,31	81,95	82,05	82,05	82,63
dz_{avg}	84,31	AVG	84,30	83,50	82,69	81,94	81,64	81,38	82,17	81,32	81,70	81,53	81,83	82,75
groove n°7														
INSERTO IN ELO		replica n°	1	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Y	dz [μm]	Y	dz [μm]											
Y_1	85,22	Y_1	84,98	84,89	84,12	83,11	83,21	82,68	84,61	82,09	82,73	83,60	84,60	/
Y_2	84,07	Y_2	83,99	83,49	82,80	82,09	81,13	80,82	80,77	80,12	80,20	80,42	80,84	/
Y_3	82,35	Y_3	82,63	82,27	82,24	81,19	81,60	81,42	81,08	80,89	81,02	80,92	81,10	/
dz_{avg}	83,88	AVG	83,87	83,55	83,05	82,13	81,98	81,64	82,15	81,03	81,32	81,65	82,18	/

Vengono riportati in seguito due grafici relativi ad ogni groove che rappresentano due diverse misurazioni. I grafici nr° 3 e nr° 4 rappresentano l'andamento delle profondità dz per ciascuna y (y_1, y_2, y_3) di ogni pezzo prelevato. I successivi due grafici riportano l'andamento della media delle tre y relative a ciascuna groove per ogni pezzo prelevato, rispetto alla media della groove dell'inserto in resina a base di olio di lino epossidato.

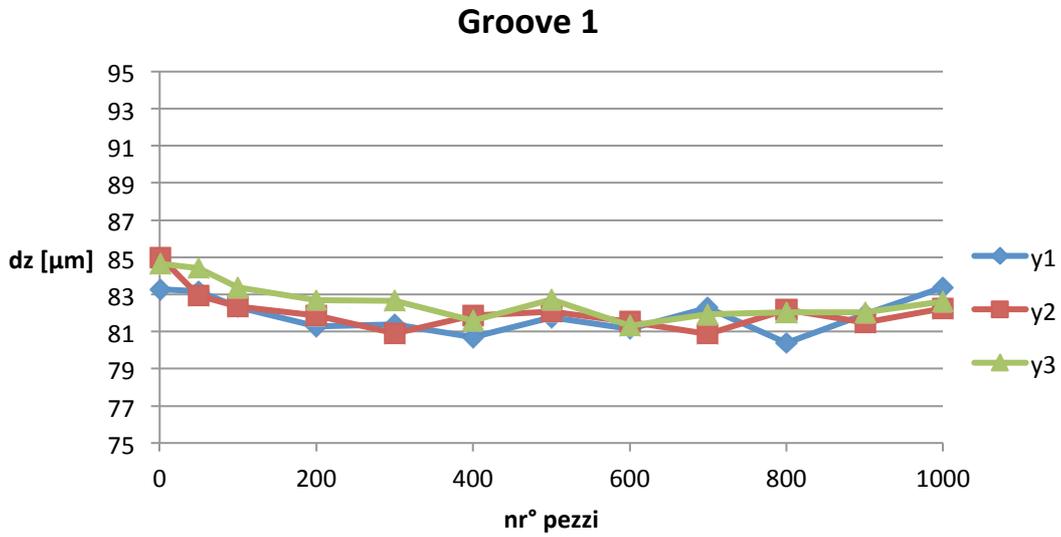


Grafico 3: Andamento della profondità della groove 1 per ogni punto analizzato.

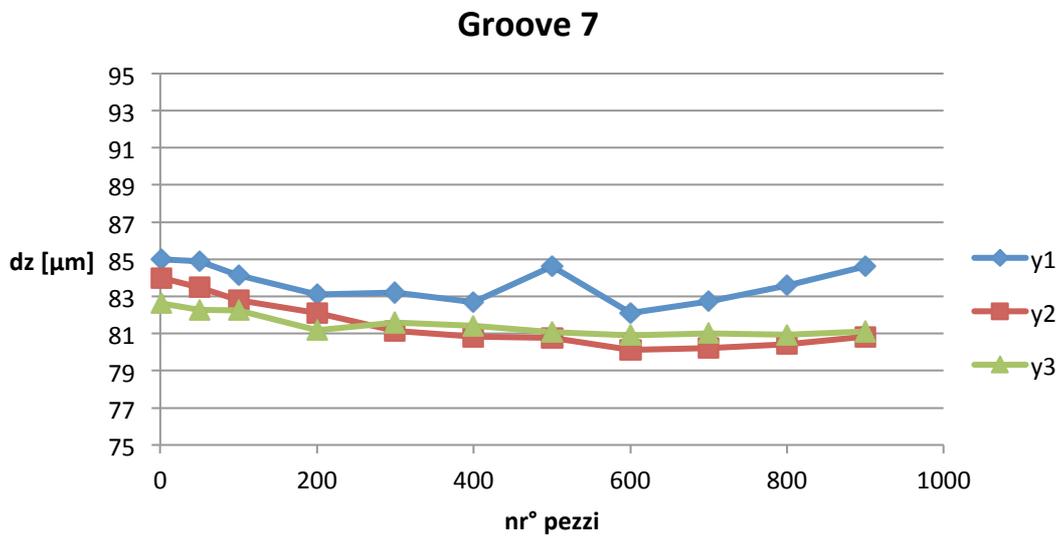


Grafico 4: Andamento della profondità della groove 7 per ogni punto analizzato.

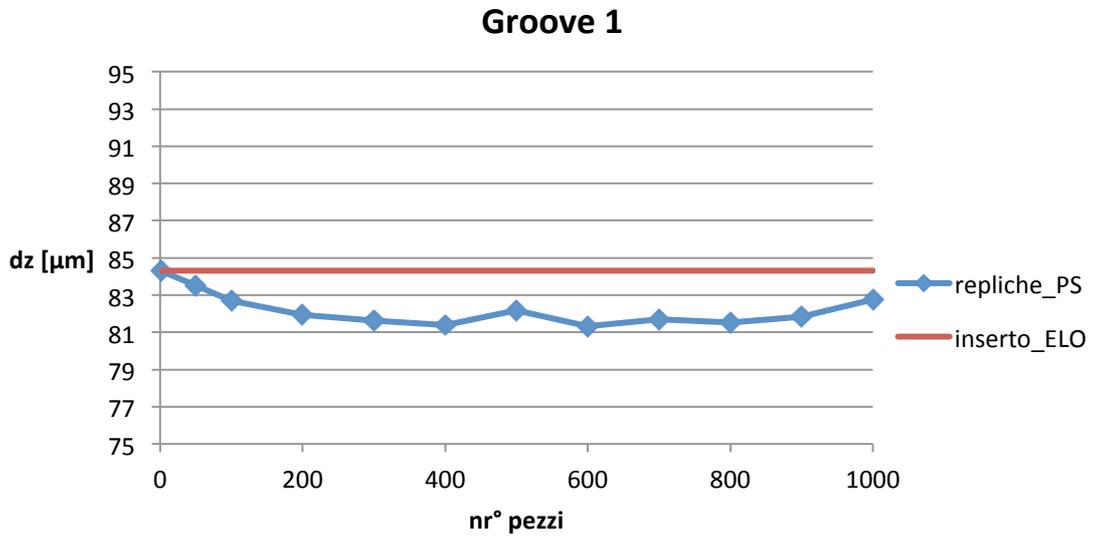


Grafico 5: Andamento della media della profondità del groove 1 rispetto alla media dell' ELO

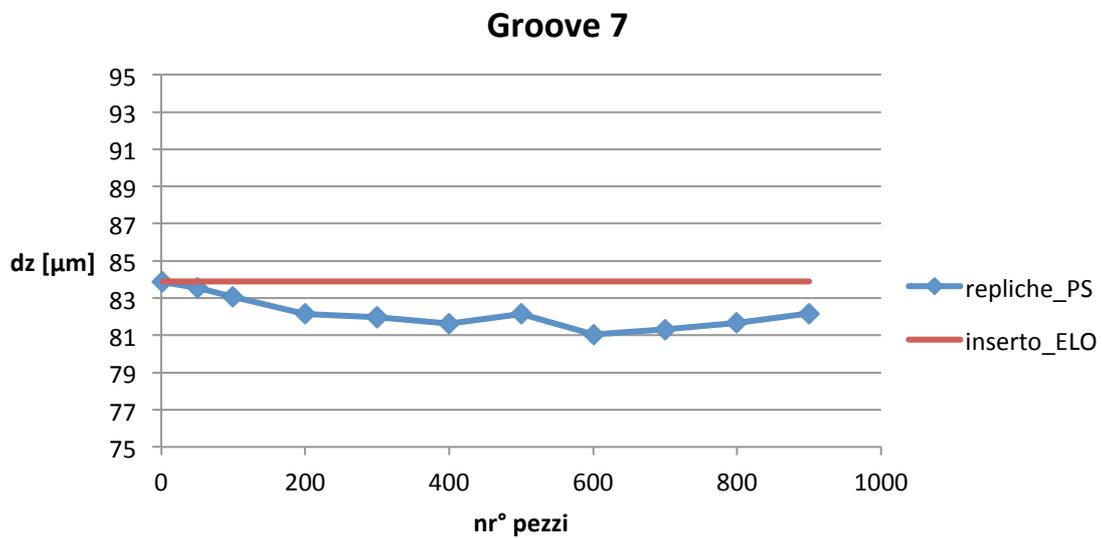


Grafico 6: Andamento della media della profondità del groove 7 rispetto alla media dell' ELO

Dal grafico nr°3 e nr°4 si evince che l' andamento della replicazione per entrambe le grooves è molto simile. Dapprima vi è un calo, successivamente i valori si stabilizzano per poi risalire verso le ultime fasi di stampaggio.

Dai grafici n°5 e nr°6 si evince che la media di profondità non si discosta eccessivamente dal valore di partenza. La distribuzione dei punti per entrambe le grooves è molto simile e la replicazione risulta omogenea.

Nella tabella 9 non sono stati riportati i dati relativi alla replica in polistirene nr° 1000 poiché l' inserto in ELO risultava ormai deteriorato e la replicazione non è avvenuta correttamente.

Viene di seguito riportata l' immagine dell' inserto dopo le 1000 stampe.

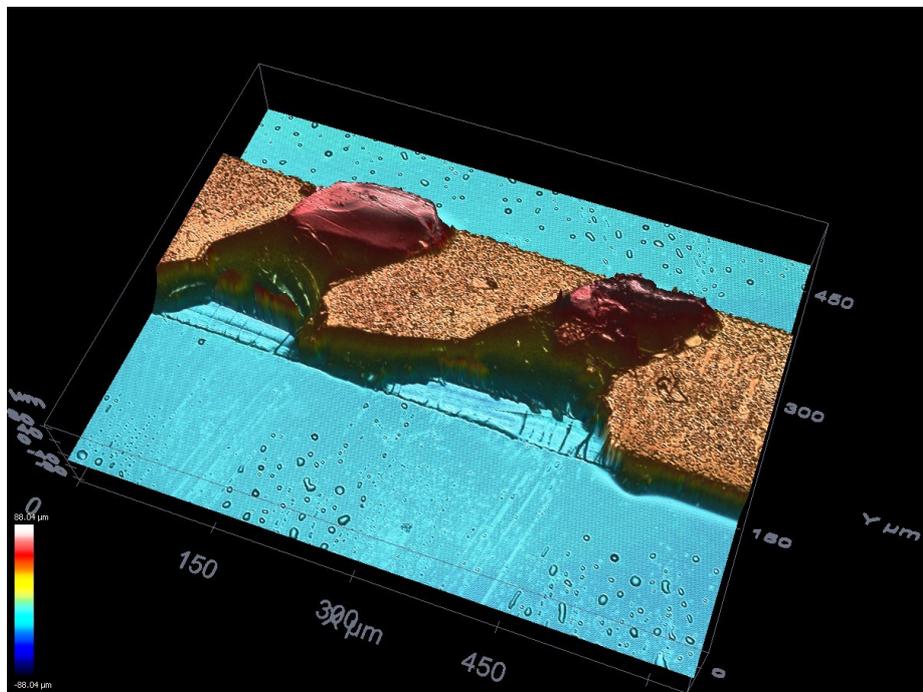


Figura 23: Deterioramento dell' inserto in ELO in seguito a 1000 stampe

4.5.2 Analisi dei dati per l'inserto in GDE

Vengono riportati di seguito i grafici ottenuti dalle varie fasi di repliche per ottenere l'inserto in GDE.

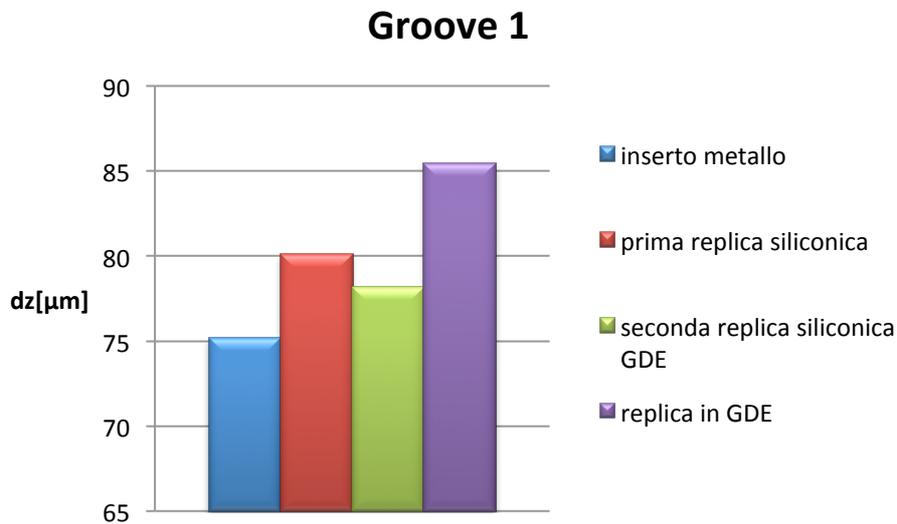


Grafico 7: Istogramma relativo alle fasi di realizzazione del GDE. Groove 1

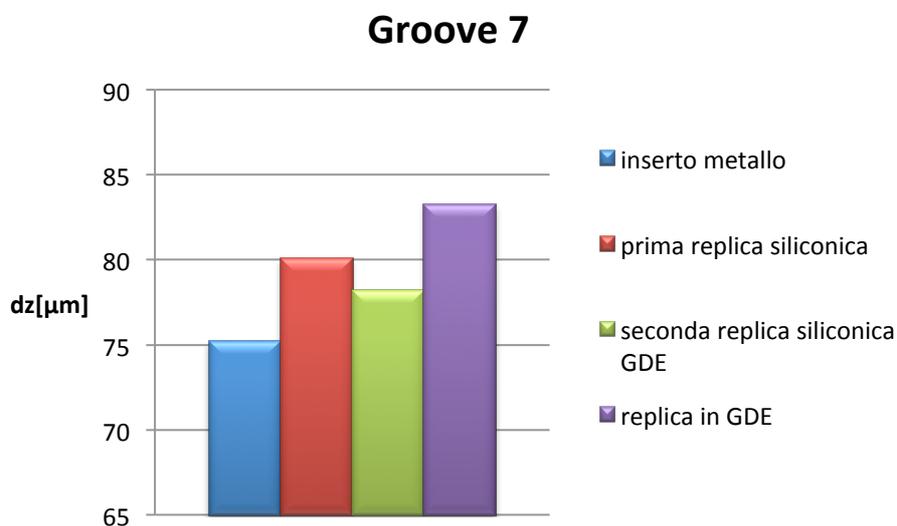


Grafico 8: Istogramma relativo alle fasi di realizzazione del GDE. Groove 7

Dai grafici nr° 7 e nr° 8 si vede come il primo passaggio della replicazione tra il master in metallo ed il silicone è fonte di una perdita di accuratezza. La seconda fase risulta opposta a quella osservata per la resina a base di olio linoleico: la profondità delle grooves diminuisce invece che aumentare. Di conseguenza, l'ultimo step della replica risulta notevolmente

diverso dal passaggio che lo precede. Si nota come, l'andamento di entrambi i grafici sia molto simile ma al tempo stesso siano molto meno lineari dei grafici nr°1 e nr°2. Complessivamente rispetto al master in metallo, la replicazione è peggiore dell'ELO.

Per quanto riguarda la fase di stampaggio non vengono riportati di seguito i grafici come è stato fatto per l'ELO, in quanto la resina ha ceduto dopo una decina di stampate.

Già dopo il primo ciclo della macchina la groove nr° 7 ha ceduto. La groove nr° 1 ha replicato bene per il primo ciclo di produzione ma con un successivo calo di qualità di replicazione. Dopo qualche decina di cicli l'inserto in resina aveva i canali completamente occlusi. Viene riportata di seguito un'immagine dello stato della resina dopo lo stampaggio.

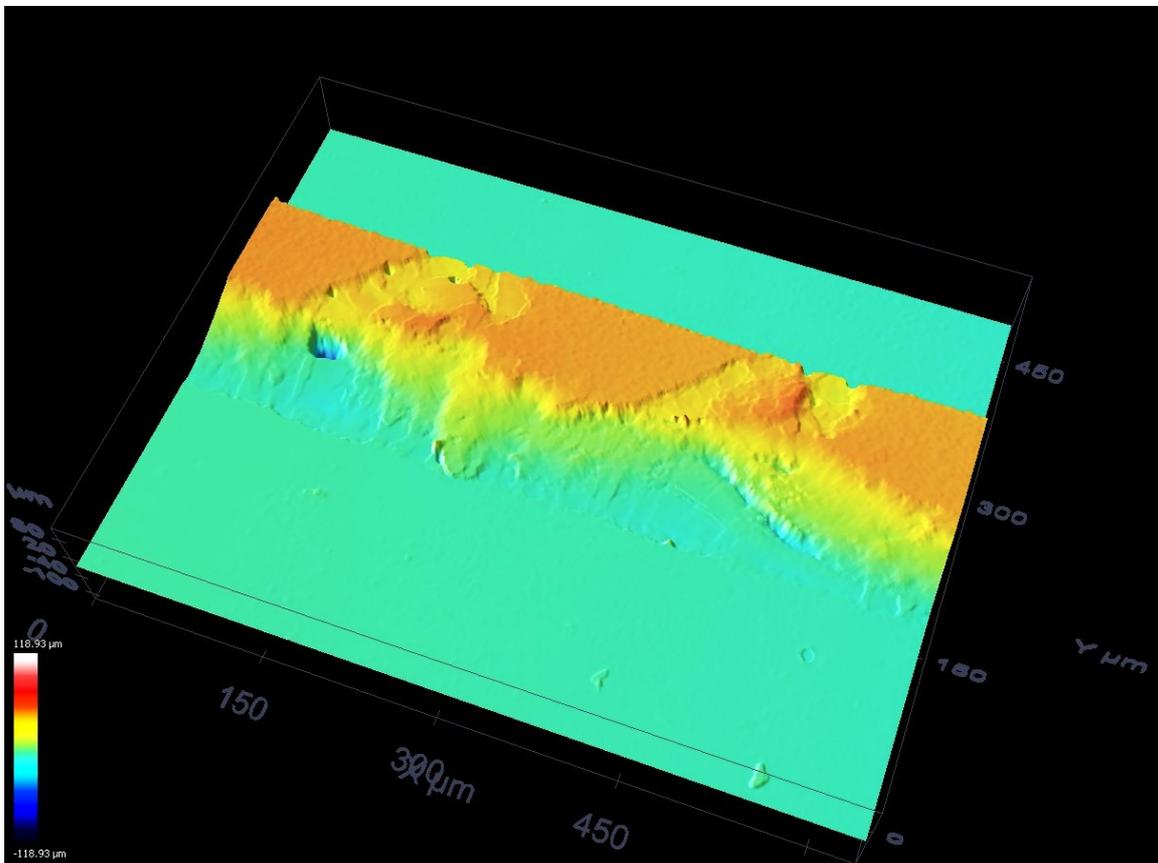


Figura 24: Deterioramento dell'inserto in GDE dopo 10 stampate.

Capitolo 5

Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro è valutare l'applicazione di stampi in materiale alternativo al micro-stampaggio ad iniezione. La resina epossidica a base di gliceroldiglicil etero ha ceduto dopo qualche decina di cicli di lavorazione e perciò si è dimostrata non adatta all'obiettivo prefissato. La resina a base di olio di lino epossidato ha resistito a circa 1000 cicli di lavorazione mantenendo un buon grado di replicazione. Il metodo utilizzato offre diversi vantaggi:

- È un metodo veloce e di basso costo per la produzione di stampi. I materiali utilizzati sono facilmente reperibili in qualsiasi laboratorio.
- È un metodo che prescinde dalla geometria da replicare. Il master in metallo realizzato aveva una configurazione opposta a quella della resina, rendendo necessari due passaggi intermedi in silicone per arrivare ad una configurazione finale negativa rispetto a quella di partenza. Se il master di partenza avesse avuto una configurazione al negativo più semplice da realizzare rispetto a quella corretta, il metodo si svilupperebbe in soli due passaggi.

Il principale limite di questa tecnica è il limitato numero di cicli di produzione realizzati prima di un parziale deterioramento della resina. La figura funzionale in essa realizzata era molto complessa, caratterizzata da dieci grooves e da un canale dell'ordine dei μm . È lecito ritenere che, partendo da una figura iniziale da replicare meno complessa, la resina potrebbe resistere per un numero di cicli di produzione molto più elevato.

Riferimenti bibliografici

Brusatin, Giovanna. 2012. *Scienza e tecnologia dei materiali polimerici*. 2012.

Guyout, Chantal Khan Malek Gael Thuiller Rolland Duffait Laurent. 2011. *Double hot-embossing with polymeric intermediate mould*. 2011.

H.Ito. 2003. Injection Model Semicrystalline Polymers : Structures Development. *Encyclopedia of materials: Science and Technology*. 2003, p. 4082-4087.

M.Whitesides, SindyK.Y.Tang and George. 2010. Basic Microfluidic and soft Lithographic Techniques. 2010.

Qin, Yi. 2010. *Micro-manufacturing engineering and technology*. s.l. : Elsevier, 2010.

R.K.Jena, C.Y.Yue, Y.C.Lam, P.S.Tang, A.Gupta. 2012. Comparison of different mold for microfabrication by hot embossing technique. *Sensors and Actuators B:Chemical*. 2012.

Volker Hessel, Holger Lowe, FriedhelmSchonfeld. 2005. Micromixer, a review on passive and active mixing principles. 2005.

Yu Z.Y., Masuzawa T., Fujino M. 1998. Micro-EDM for Three-Dimensional Cavities – Development of Uniform Wear Method. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 1998, Vol. 47, p. 169-172.