



**Politecnico
di Torino**

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale, dell'Autoveicolo e della Produzione
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Ottimizzazione di impianto di analisi metallografica per
testificazioni di parti critiche aeronautiche attraverso analisi
tecnico ed economiche di processo e prodotto**

Candidato:

Mattia Manfredini

Matricola S264716

Relatore:

Prof. Daniele Botto

Introduzione

Lo scopo dell'elaborato è la valutazione e ottimizzazione dell'impianto di analisi metallografica presente presso l'azienda Poggipolini SpA. L'analisi metallografica è un passaggio spesso obbligato nella produzione di componenti aerospaziali e sta divenendo sempre più diffusa anche in ambito motorsport. In questo contesto si pone l'analisi svolta: la valutazione di possibili miglioramenti al processo di analisi metallografica. Per poter valutare al meglio tale processo si è reso necessario uno studio approfondito della metallurgia dei materiali, dei processi di lavorazione, dei trattamenti termici a cui vengono sottoposti, del processo di analisi e delle normative a riguardo. Questa fase di studio particolarmente corposa mi ha permesso di acquisire tutti gli strumenti per poter affiancare attivamente l'operatore nello svolgimento di tali analisi, verificare di persona i limiti dell'impianto attuale e proporre modifiche. Si è quindi evidenziata la necessità di un intervento valutando simultaneamente le prestazioni del laboratorio rispetto alle aspettative aziendali e la capacità del laboratorio di fare fronte al fabbisogno aziendale. Presi in considerazione i feedback dell'operatore e le capacità attuali del laboratorio si sono proposte possibili modifiche all'attuale dotazione così da migliorare il processo di analisi in termini di qualità, quantità ed efficienza. Al termine dell'elaborato verranno fatte delle comparazioni tra le soluzioni proposte individuando il miglior compromesso tra incremento della capacità del laboratorio ed ammontare dell'investimento.

Indice

1	Introduzione	2
2	Produzione viteria critica	8
2.1	Materiali	8
2.1.1	13-8 PH	8
2.1.2	15-5 PH	13
2.1.3	17-4 PH	17
2.1.4	AISI 4340	21
2.1.5	INCONEL 718	24
2.1.6	MP35N	27
2.1.7	Ti-6AL-4V	30
2.2	Trattamenti Termici	33
2.2.1	Solubilizzazione	33
2.2.2	Tempra	34
2.2.3	Invecchiamento	35
2.2.4	Rinvenimento	36
2.2.5	Influenza dei precipitati sulle proprietà meccaniche	36
2.2.6	Influenza della dimensione del grano sulle proprietà meccaniche	37
2.3	Processi meccanici di produzione di un bullone	37
2.3.1	Forgiatura	37
2.3.2	Rullatura	39
2.3.3	Rullatura raggio sottotesta	41
2.3.4	Tornitura e fresatura	42
3	Metallografia	46
3.1	Tipologie di microscopio	46
3.2	Preparazione metallurgica	48
3.3	L'analisi metallografica nella produzione di bulloni (quadro normativo)	50
4	Impianto di preparazione e analisi metallografica	56
4.1	Dotazione e procedure di laboratorio	56
4.2	Validazione dell'impianto	61
4.3	Valutazione tempi del processo	62
4.4	Valutazione del soddisfacimento del fabbisogno aziendale	66
5	Individuazione dei possibili interventi sul processo di analisi metallografica	70
6	Simulazione dell'impatto sul processo della modifica alle dotazioni del laboratorio	75
7	Individuazione dell'intervento ottimale	83
8	Conclusioni	86

Elenco delle tabelle

2.1	Composizione Chimica 13-8 PH	8
2.2	Proprietà Meccaniche a 20°C 13-8 PH	9
2.3	Proprietà Fisiche 13-8 PH	9
2.4	Lavorazione 13-8 PH	10
2.5	Variazione dimensionale per invecchiamento 13-8 PH	12
2.6	Composizione Chimica 15-5 PH	13
2.7	Proprietà Meccaniche a 20°C 15-5 PH	13
2.8	Proprietà Fisiche 15-5 PH	14
2.9	Variazione dimensionale per invecchiamento 15-5 PH	16
2.10	Composizione Chimica 17-4 PH	17
2.11	Proprietà Meccaniche a 20°C 17-4 PH	17
2.12	Proprietà Fisiche 17-4PH	18
2.13	Variazione dimensionale per invecchiamento 17-4 PH	20
2.14	Composizione Chimica AISI 4340	21
2.15	Proprietà Meccaniche a 20°C AISI 4340	21
2.16	Proprietà Fisiche AISI 4340	21
2.17	Composizione Chimica Inconel 718	24
2.18	Proprietà Meccaniche a 20°C Inconel 718	24
2.19	Proprietà Fisiche Inconel 718	25
2.20	Composizione Chimica MP35N	27
2.21	Proprietà Meccaniche MP35N	27
2.22	Proprietà Fisiche MP35N	27
2.23	Composizione Chimica Ti-6AL-4V	30
2.24	Proprietà Meccaniche Ti-6AL-4V	30
2.25	Proprietà Fisiche Ti-6AL-4V	30
2.26	Processi e temperature	37
3.1	Confronto tra microscopie	48
3.2	Reagenti più comuni	51
3.3	Ingrandimenti analisi metallografica NAS 4002	52
3.4	Ingrandimenti analisi metallografica NAS 4003	53
3.5	Ingrandimenti analisi metallografica NAS 4004	53
3.6	Ingrandimenti analisi metallografica NAS 4008	54
4.1	scheda tecnica TR60	57
4.2	scheda tecnica IPA40	57
4.3	scheda tecnica LS2A	58
4.4	Tempi delle fasi del processo di analisi metallografica	65
6.1	CASO 0	77
6.2	CASO 1	77
6.3	CASO 2	77
6.4	CASO 3	78
6.5	CASO 4	78

6.6	CASO 5	79
6.7	CASO 6	79
6.8	CASO 7	79
6.9	CASO 8	80
6.10	CASO 9	80
6.11	CASO 10	81
6.12	CASO 11	81
6.13	CASO 12	81
6.14	CASO 13	82
6.15	CASO 14	82
8.1	Impatto interventi sui costi e capacità del laboratorio	86

Elenco delle figure

2.2	Immagine proveniente da "Metallurgia degli acciai" a cura di M. Boniardi e A. Casaroli	34
2.3	Processo di ricalcatura	38
2.4	Effetti sulla microstruttura dei processi di lavorazione	39
2.5	Esempi di sistemi per la rullatura	40
2.6	Concavità della cresta	41
2.7		41
2.8	Esempio di schema di rullatura del raggio sottotesta: http://truformequipment.com/products/fr-fx5	42
2.9	Effetto del carico di rullatura sul limite a fatica (in termini di tensione alternata) . . .	42
2.10	Tipologie di tornitura	43
2.11	Esempi di fresatrici: Dispense myplouni	44
2.12	Esempi di fresatura periferica: Dispense mypoliuni	45
2.13	Esempi Fresatura frontale	45
3.1	Interazione fascio elettronico-materia	48
3.2	Immagine BSE alluminio-rame	48
4.1	TR 60	56
4.2	Inglobatrice IPA40	57
4.3	Pulitrice LS2A	58
4.4	Microscopio Olympus BX41M	59
4.5	Dettaglio levigatura non omogenea	61
4.6	Analisi 13-8 PH	62
4.7	Analisi INCONEL 718	62
4.8	Analisi MP35N	63
4.9	Analisi Ti6Al4V	63
4.10	Analisi Ti6Al4V	64
4.11	Tempi del processo di analisi metallografica	65
4.12	Eccedenze analisi	66
4.13	Scenario 1	67
4.14	Scenario 2	67
4.15	Scenario 3	67
4.16	Scenario 4	68
4.17	Scenario 5	68
5.1	Diagramma di Pareto	71
5.2	Sistema di traslazione trasversale della morsa	72
5.3	Troncatrice Secotron 300 PLC	72
5.4	Levigatrice LS3A Digital	73
5.5	Innovation 250R Twin	74
5.6	Lucidatrice automatica robotizzata	74
6.1	esempio di simulazione del processo	76

7.1	Comparazione minuti-operatore per campione	83
7.2	capacità annuale con impiego attuale dell'operatore	84
7.3	Anni per rientro dell'investimento	84
7.4	costo medio campione su 5 anni	85
7.5	Costo medio del campione su 10 anni	85

Produzione viteria critica

In questo capitolo introduttivo vengono riportate le principali nozioni acquisite nella fase di studio del processo di produzione di viteria critica. Questa fase di studio è necessaria per comprendere a pieno l'importanza del processo di analisi metallografica e soprattutto per avere i mezzi necessari per affiancare l'operatore e comprendere a fondo quanto svolto. Per poter decifrare le caratteristiche indagate in fase di analisi è fondamentale conoscere la storia del campione analizzato così da poter interpretare le evidenze delle analisi in funzione del materiale, delle lavorazioni e dei trattamenti subiti.

2.1 Materiali

In questa sezione vengono introdotti i principali materiali utilizzati per la produzione di viteria critica da Poggipolini Spa, per ogni materiale vengono riportate le principali caratteristiche meccaniche, di resistenza alla corrosione, metallurgiche e di lavorazione. La valutazione di questi parametri è importante per comprendere l'approccio alla loro analisi. L'analisi metallografica prevede infatti lavorazioni meccaniche come la troncatura e la lucidatura dipendenti dalle caratteristiche meccaniche del materiale e l'attacco metallografico dipendente a sua volta dalla microstruttura e dalle caratteristiche da indagare.

2.1.1 13-8 PH

Descrizione

Il 13-8 PH è un acciaio inossidabile martensitico indurente per precipitazione, presenta un eccellente livello di resistenza, una elevata durezza, un'alta resilienza e una buona resistenza alla corrosione. Viene prodotto sotto forma di elettrodo consumabile sottoposto poi ad un processo di rifusione sotto vuoto (VAR), procedimento che permette, attraverso un efficace controllo della composizione chimica, di ottenere buone proprietà di durezza trasversale e duttilità anche in grandi sezioni. L'alta resistenza è sviluppata con un semplice trattamento termico a bassa temperatura.

Composizione chimica

Elemento	Composizione Chimica									
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	N	Al
% Min	-	-	-	-	-	7.5000	12.2500	2.000	-	0.9000
% Max	0.0500	0.1000	0.0100	0.0080	0.1000	8.5000	13.2500	2.5000	0.0100	1.3500

Tabella 2.1: Composizione Chimica 13-8 PH

Proprietà meccaniche e fisiche

Le varie condizioni 'H' nella tabella 2.2 indicano la combinazione di proprietà ottenuta dal trattamento termico alla temperatura indicata in gradi °F per 4 ore e raffreddamento ad aria tranne che per la condizione H 900 trattata per un'ora.

Nella tabella 2.3 sono riportate le principali proprietà fisiche.

Condizione	Orientamento provino	Proprietà Meccaniche			
		R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	Allungamento % L0= 4D	Riduzione Area %
H950	Longitudinale	1517	1413	10	45
	Trasversale	1517	1413	10	35
H1000	Longitudinale	1413	1310	10	50
	Trasversale	1413	1310	10	40
H1025	Longitudinale	1276	1207	11	50
	Trasversale	1276	1207	11	45
H1050	Longitudinale	1207	1138	12	50
	Trasversale	1207	1138	12	45
H1100	Longitudinale	1034	931	14	50
	Trasversale	1034	931	14	50
H1150	Longitudinale	931	621	14	50
	Trasversale	931	621	14	50

Tabella 2.2: Proprietà Meccaniche a 20°C 13-8 PH

Proprietà Fisiche	
Densità [kg/dm ³]	7.8
Intervallo di fusione [°C]	1404-1471
Modulo di elasticità (20°C) [GPa]	203
Coefficiente di Poisson	0.27
Ac1 [°C]	627
Ac3 [°C]	688
Ms [°C]	121
Mf [°C]	21

Tabella 2.3: Proprietà Fisiche 13-8 PH

Resistenza alla corrosione Presenta un livello di resistenza alla corrosione sia in ambienti ossidanti che riducenti superiore agli acciai AISI 410 e 431 ma inferiore al 17-4 PH. In tutte le condizioni di trattamento termico mostra pochissima ruggine dopo 500 ore di esposizione a nebbia salina al 5% ad una temperatura di 35°C. La resistenza a pitting è approssimativamente uguale a quella degli acciai inossidabili 17-4 PH e Tipo 304.

Come altri acciai inossidabili per precipitazione, la resistenza alla corrosione è massima nella condizione di massimo indurimento e diminuisce leggermente all'aumentare della temperatura di invecchiamento.

Caratteristiche metallurgiche

Grazie alla composizione chimica e al processo di fusione controllato presenta una microstruttura sostanzialmente priva di ferrite. Riscaldando il materiale a $\approx 1350^\circ\text{C}$ si ha l'inizio della trasformazione dell'austenite in δ -ferrite, processo che termina a $\approx 1447^\circ\text{C}$. La temperatura di *solidus* è $\approx 1447^\circ\text{C}$ mentre quella di *liquidus* è $\approx 1493^\circ\text{C}$. Raffreddando il materiale dallo stato liquido la solidificazione è completata come δ -ferrite con la successiva trasformazione in austenite che inizia allo stato solido a $\approx 1364^\circ\text{C}$. A causa di tempi di raffreddamento non sufficienti la microstruttura risultante a temperatura ambiente consiste di una matrice di martensite (derivata dalla decomposizione dell'austenite) e δ -ferrite residua.²⁶

Caratteristiche di lavorazione meccanica

Taglio Le procedure di taglio standard per acciai inossidabili al Nichel-Cromo danno risultati soddisfacenti, per il taglio di barre e billette per forgiatura è consigliabile un taglio a freddo. Anche il taglio

a caldo o il taglio con ruota abrasiva e grande volume di refrigerante può dare buoni risultati, tuttavia in caso di taglio con ruota abrasiva di materiale in condizione Aⁱ si possono formare piccole crepe sulla faccia tagliata ed è quindi preferibile evitarlo.

Il taglio termico richiede procedimenti adatti agli acciai inossidabili come il taglio a polvere, l'arco ossidrico o i metodi arco-aria. Dal momento che le zone interessate dal calore non sono significativamente indurite o infragilite dal calore localizzato della saldatura o del taglio a cannello, questa lega offre buone possibilità di taglio mediante un processo termico.

Forgiatura I pezzi grezzi per la forgiatura devono essere riscaldati uniformemente a 1176°C-1204°C e tenuti a temperatura per almeno 15 minuti prima della lavorazione. L'ultimo 50% della lavorazione a caldo deve essere effettuato sotto i 1038°C per ottenere il miglior affinamento del grano quando il pezzo viene solubilizzato. Dopo la forgiatura le sezioni devono essere raffreddate a una temperatura inferiore a 32°C per garantire l'affinamento del grano, preferibilmente ad aria. Per svolgere il processo di indurimento in condizioni ottimali i pezzi devono essere trattati per essere riportati alla condizione A. Nel riscaldamento per forgiatura, come nel trattamento termico sono sconsigliate atmosfere endotermiche o altri ambienti che possono causare carburazione o decarburazione.

Lavorabilità Il materiale può essere lavorato sia post-solubilizzazione che in varie condizioni indurite per invecchiamento. Nella condizione A la lega garantisce una buona vita dell'utensile e una buona finitura superficiale quando lavorata a velocità dal 20% al 30% più basse di quelle usate per inox tipo 302 e 304. La lavorabilità come indurito per invecchiamento (H) migliora con l'aumento della temperatura di trattamento.

La condizione H1150 Mⁱⁱ fornisce una lavorabilità ottimale, in questo caso per ottenere le proprietà meccaniche più elevate sono necessari un trattamento in soluzione ed un indurimento a temperature standard.

Il 13-8 PH presenta un indice di lavorabilità pari a 36 assumendo un valore di 100 per l'acciaio AISI 1212, nella tabella 2.4 sono riportate le condizioni ottimali di lavorazione. I livelli di resistenza più elevati si ottengono mediante lavorazione a freddo prima dell'indurimento per precipitazione. Questo metodo per ottenere la massima resistenza è particolarmente adatto alla produzione di elementi di fissaggio ad alta resistenza meccanica e alla corrosione.

Tipo di lavorazione	Utensili	Lubrificante
Bassa velocità e alta pressione (Fresatura e Perforazione)	Acciaio Super rapido	Elevata Lubrificazione (oli a base di zolfo)
Alta velocità (Tornitura)	Al carburo (CISC C-6 e C-7)	Refrigerante chimico

Tabella 2.4: Lavorazione 13-8 PH

Saldatura Il 13-8 PH può essere saldato con gas di protezione inerte oppure saldatura a resistenza. Quando è necessario materiale di apporto è importante che abbia proprietà simili a metallo di base. La saldatura in condizione A offre normalmente buoni risultati ma quando si prevedono alti livelli di tensioni residue da saldatura è conveniente utilizzare il materiale nella condizione H1150.

Non è solitamente necessario un preriscaldamento per evitare rotture. Se la saldatura avviene su materiale in condizione A il componente può essere subito sottoposto ad invecchiamento fino alla resistenza desiderata, tuttavia, la combinazione ottimale di resistenza, duttilità e resistenza alla corrosione si ottiene con un trattamento di solubilizzazione della parte saldata prima dell'invecchiamento.

Se saldato nella condizione H1150, la parte deve essere sottoposta a solubilizzazione prima dell'invecchiamento.

ⁱCondizione A (solubilizzato): Riscaldato a 927°C per 1h e raffreddato a meno di 16°C in modo che il materiale sia completamente trasformato in martensite.

ⁱⁱSolubilizzato(927°C) seguito da tempra e 2 trattamenti di invecchiamento: riscaldamento a 760°C per 4 ore, raffreddato ad aria per 2, nuovo riscaldamento a 621°C per 4 ore e raffreddamento ad aria

Nelle saldature con spessore massimo di circa 6 mm sia il deposito di saldatura che le aree del metallo base interessate dal calore risponderanno al trattamento termico di indurimento per precipitazione senza la necessità di una solubilizzazione post-saldatura. Le saldature di spessore superiore a 6 mm in cui vengono impiegate pratiche *multipass*, richiederanno, se sono richieste le migliori proprietà meccaniche, l'uso di una solubilizzazione post-saldatura prima dell'indurimento per precipitazione.

Descaling

I trattamenti di indurimento producono solo una leggera colorazione termica sulle superfici, la presenza di questo film può degradare la resistenza alla corrosione della lega. La calaminaⁱⁱⁱ può essere rimossa facilmente con sabbiatura a sabbia bagnata o decapaggio leggero per diversi minuti in una soluzione di acido nitrico al 10% e acido fluoridrico al 2% (in volume) a 43°C-60°C, è consigliabile evitare una esposizione prolungata a questa soluzione per ridurre al minimo la corrosione della superficie e la possibilità di infragilimento da idrogeno. Quando il decapaggio è sconsigliato si può procedere con leggera elettrolucidatura, questi ultimi due trattamenti passivano^{iv} le superfici per la massima resistenza alla corrosione. Il metodo più efficace per rimuovere le incrostazioni da trattamenti termici o forgiatura è la sabbiatura, questa dovrebbe essere seguita da un'immersione in una soluzione di acido nitrico al 10% e acido fluoridrico al 2% (in volume) a 43°C-60°C per diversi minuti per rimuovere eventuali detriti che potrebbero essere stati incorporati nella superficie dall'operazione di sabbiatura, come detto in precedenza è da sconsigliarsi l'esposizione prolungata alla soluzione acida. Nelle operazioni di decapaggio, lo stretto controllo del tempo e della temperatura è necessario per ottenere una rimozione uniforme delle incrostazioni senza attaccare le superfici.

Trattamenti termici

A seguito di lavorazioni che possano alterare la struttura metallurgica dell'acciaio è necessario un nuovo trattamento di solubilizzazione per ottenere tutte le proprietà di progetto delle parti prodotte. Prima di procedere al trattamento termico è di fondamentale importanza rimuovere tutti i possibili agenti contaminanti (oli, rivestimenti, vernici etc.). Sono solitamente utilizzati forni elettrici o a tubo radiante alimentati a gas così da evitare il contatto della fiamma con le parti da trattare. L'aria ha dimostrato di essere un'atmosfera soddisfacente per il trattamento di solubilizzazione e le operazioni di tempra. A seguito del trattamento di invecchiamento si ha un cambiamento delle dimensioni del pezzo che varia in funzione della condizione come riportato in tabella 2.5.

È importante tenere presente le basse temperature a cui si verificano l'inizio della trasformazione in martensite (Ms) 121°C e la fine della trasformazione (Mf) 21°C, se si vogliono ottenere le proprietà finali desiderate è necessario raffreddare le parti in lavorazione sotto i 16°C prima di applicare i successivi trattamenti termici.

Questa pratica è essenziale per assicurare l'affinamento del grano e per assicurarsi che il prodotto avrà la buona duttilità che ci si può aspettare da questa lega. Esempi di casi in cui è importante effettuare il raffreddamento:

- Raffreddare sotto i 16 °C dopo il trattamento di solubilizzazione prima di applicare trattamenti di indurimento per precipitazione.
- Raffreddare le parti forgiate sotto i 32°C dopo la forgiatura finale prima del trattamento di solubilizzazione.
- Raffreddare tutte le saldature sotto i 32°C (90°F) prima del trattamento di solubilizzazione.

Applicazioni in ambito aerospaziale

È ideale per applicazioni dove sono richieste elevate resistenza, tenacità, una buona resistenza alla corrosione e una minima direzionalità delle proprietà. Le applicazioni includono parti strutturali degli

ⁱⁱⁱStrato di ossido che si forma sulla superficie di prodotti siderurgici lavorati a caldo

^{iv}Formazione di un sottile film di prodotti di corrosione, sostanze presenti nell'ambiente o ossigeno adsorbito sulla

Condizione	Contrazione rispetto alla condizione A [mm/mm]
H 900	0.0004-0.0006
H 925	0.0004-0.0006
H 1025	0.0005-0.0008
H 1100	0.0008-0.0012
H 1150	0.0030

Tabella 2.5: Variazione dimensionale per invecchiamento 13-8 PH

aerei, componenti del carrello di atterraggio, alberi, valvole, raccordi e dispositivi di fissaggio. Trova anche applicazione nell’industria petrolchimica.

Nota Fonte Dati

Tutti i dati riportati sono stati estrapolati dalle fonti riportate in bibliografia [7] [17] [27] [29] [32] [30] [22]

superficie del metallo, aderente alla parte a contatto con l’ambiente aggressivo.

2.1.2 15-5 PH

Descrizione

Il 15-5 PH è un acciaio inossidabile martensitico indurente per precipitazione contenente un 4% di rame, è stato progettato per offrire elevata resistenza con una durezza superiore al 17-4 PH, la principale differenza da quest'ultimo è l'assenza di ferrite. La lega risulta ulteriormente rinforzata, attraverso la precipitazione del rame, da un trattamento termico a temperatura relativamente bassa. Il 15-5 PH offre anche un'eccellente tenacità a intaglio trasversale e duttilità oltre ad un'ottima uniformità delle proprietà. Le proprietà meccaniche in sezioni più grandi e la forgiabilità sono superiori a quelle della 17-4 PH. È particolarmente adatto per parti complesse che richiedono lavorazione e saldatura oppure dove la distorsione nel trattamento termico convenzionale è un problema. Viene impiegato dove sono richieste alta resistenza e buona resistenza alla corrosione.

Composizione chimica

Composizione Chimica										
Elemento	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Nb	Cu	Mo
% Min	-	-	-	-	-	3.500	14.00	5xC	2.500	-
% Max	0.070	1.000	0.030	0.015	1.000	5.500	15.50	0.450	4.500	0.500

Tabella 2.6: Composizione Chimica 15-5 PH

Proprietà meccaniche e fisiche

Le varie condizioni 'H' nella tabella 2.7 sottostante indicano la combinazione di proprietà ottenuta dal trattamento termico alla temperatura indicata in gradi °F per 4 ore e raffreddamento ad aria tranne che per la condizione H 900 trattata per un'ora.

Nella tabella 2.8 sono riportate le principali proprietà fisiche.

Condizione	Orientamento provino	Proprietà Meccaniche			
		R _m [MPa]	R _{p0.2} [MPa]	Allungamento % L ₀ = 4D	Riduzione Area %
H900	Longitudinale	1310	1172	10	35
	Trasversale	1310	1172	6	20
H925	Longitudinale	1172	1069	10	38
	Trasversale	1172	1069	7	25
H1025	Longitudinale	1069	1000	12	45
	Trasversale	1069	1000	11	32
H1075	Longitudinale	1000	862	13	45
	Trasversale	1000	862	12	33
H1100	Longitudinale	965	793	14	45
	Trasversale	965	793	10	34
H1150	Longitudinale	931	724	16	50
	Trasversale	931	724	11	35

Tabella 2.7: Proprietà Meccaniche a 20°C 15-5 PH

Resistenza alla corrosione Presenta un livello di resistenza alla corrosione sia in ambienti ossidanti che riducenti superiore agli acciai AISI 410 e 431 e paragonabile al 17-4 PH. In tutte le condizioni di trattamento termico mostra pochissima ruggine dopo 500 ore di esposizione a nebbia salina al 5% ad una temperatura di 35°C. Come altri acciai inossidabili per precipitazione, la resistenza alla corrosione è massima nella condizione di massimo indurimento e diminuisce leggermente all'aumentare

Proprietà Fisiche	
Densità [kg/dm^3]	7.75
Intervallo di fusione [$^{\circ}\text{C}$]	1404-1440
Modulo di elasticità (20°C) [GPa]	196
Coefficiente di Poisson	0.272
Ac1 [$^{\circ}\text{C}$]	621
Ac3 [$^{\circ}\text{C}$]	727
Ms [$^{\circ}\text{C}$]	121
Mf [$^{\circ}\text{C}$]	32

Tabella 2.8: Proprietà Fisiche 15-5 PH

della temperatura di invecchiamento.

Caratteristiche metallurgiche

La microstruttura è composta da martensite omogenea con precipitati di carbonitruro di Niobio e austenite residua la cui frazione dipende dalle condizioni metallurgiche. La δ -ferrite è presente con limite massimo consentito del 2%. La micrografia ottica mostra anche la presenza di solfuri allungati con inclusioni di ossidi globulari, aventi una frazione volumetrica combinata di circa lo 0,08%. Studi di microscopia elettronica hanno mostrato la presenza di precipitati sferici ϵ -rame fini che forniscono il rafforzamento principale in quanto altamente coerenti con la matrice martensitica²⁴.

L'acciaio risulta essere austenico a temperature di trattamento in soluzione fino a circa 121°C , raggiunta questa temperatura inizia la trasformazione in martensite che si completa a circa 32°C .

Caratteristiche di lavorazione meccanica

Taglio Le procedure di taglio standard per acciai inossidabili al Nichel-Cromo danno risultati soddisfacenti. Per il taglio di barre e billette per forgiatura è consigliabile un taglio a freddo. Anche il taglio a caldo o il taglio con ruota abrasiva e grande volume di refrigerante può dare buoni risultati, tuttavia in caso di taglio con ruota abrasiva si possono formare piccole crepe sulla faccia tagliata se non si lavora materiale sottoposto ad invecchiamento.

Il taglio termico richiede procedimenti adatti agli acciai inossidabili come il taglio a polvere, l'arco ossidrico o i metodi arco-aria. Dal momento che le zone interessate dal calore non sono significativamente indurite o infragilite dal calore localizzato della saldatura o del taglio a cannello, questa lega offre buone possibilità di taglio mediante un processo termico.

Forgiatura La forgiatura è un processo eccellente per ottenere forme complesse di acciaio inossidabile. I pezzi grezzi per la forgiatura devono essere riscaldati uniformemente a 1176°C - 1204°C e tenuti a temperatura per almeno 15 minuti prima della lavorazione. Su grandi sezioni oltre 19 mm di diametro o spessore, il materiale dovrebbe essere riscaldato per mezz'ora per ogni pollice (25,4 mm) di spessore a 1176°C - 1204°C e mantenuto da mezz'ora a un'ora alla temperatura prima della lavorazione. Un riscaldamento al di sopra dei 1204°C può provocare un indesiderato ingrossamento del grano e la formazione di ferrite, in caso di sovrariscaldamento l'acciaio dovrebbe essere raffreddato al di sotto dei 32°C e riscaldato a temperature di forgiatura adeguate. Dopo la forgiatura le sezioni devono essere raffreddate a una temperatura inferiore a 32°C per garantire l'affinamento del grano, preferibilmente ad aria. Il raffreddamento tra la temperatura di inizio trasformazione da austenite a martensite 121°C e la fine 32°C dovrebbe essere il più uniforme possibile per ridurre le tensioni residue. Per svolgere l'invecchiamento in condizioni ottimali i pezzi devono essere prima riportati alla condizione A.

Lavorabilità Il materiale può essere lavorato sia in condizioni trattate in soluzione che in varie condizioni indurite per invecchiamento. Uno dei vantaggi importanti di questa lega è che può essere lavorata nella condizione A e poi trattata termicamente dal momento che non si hanno incrostazioni o

distorsioni dannose grazie a temperature finali di indurimento basse. I tassi di lavorazione in condizione A sono simili a quelli degli acciai inossidabili tipo 302 e 304. Nella condizione indurita (H 900) questo materiale dovrebbe essere lavorato al 60% della velocità usata per la condizione A. Le finiture superficiali in entrambe le condizioni sono eccellenti. La migliore durata dell'utensile si ottiene dalla condizione H 1150-M.^v

Presenta un indice di lavorabilità pari a 45 assumendo un valore di 100 per l'acciaio AISI 1212.

Saldatura Le procedure utilizzate per la saldatura sono simili a quelle normalmente utilizzate per gli acciai austenitici, anche se la composizione e la sua struttura assomigliano più ad un acciaio inossidabile martensitico. Sono adatti tutti i processi di saldatura ad arco e a resistenza utilizzati sui normali acciai inossidabili. Le saldature possono avere proprietà paragonabili a quelle del metallo di base mediante trattamento termico post-saldatura. Il bassissimo contenuto di carbonio limita la durezza del materiale sottoposto a rapido raffreddamento ed evita la formazione di crepe nella saldatura e nella zona termicamente alterata del metallo di base. Ciò elimina la necessità di preriscaldamento. La lega 15-5 PH non mostra alcuna suscettibilità alla cricatura spontanea sotto il cordone di saldatura, non possiede però l'alta duttilità e tenacità degli acciai austenitici al Cr-Ni, ne consegue che non dovrebbe essere sottoposta ad alti livelli di stress biassiale o triassiale da saldature fortemente vincolate o a condizioni di intaglio. La saldatura deve essere progettata per evitare la concentrazione di sollecitazioni da saldatura. È saldabile con le comuni tecniche di fusione e resistenza.

Indurimento superficiale L'acciaio inossidabile 15-5 PH può essere nitrurato^{vi} quando è richiesta una maggiore resistenza al grippaggio e all'usura. Un vantaggio ottenuto utilizzando questo acciaio piuttosto che un acciaio inossidabile standard al cromo o al cromo-nichel è che l'anima viene contemporaneamente rafforzata e indurita durante il trattamento di nitrurazione. Per contro questo trattamento comporta una diminuzione notevole della resistenza alla corrosione, ne consegue che possa essere utilizzato solo per componenti non soggetti ad alto rischio di corrosione.

Trattamenti termici

Per ottenere massima durezza e resistenza il materiale solubilizzato viene riscaldato a $482^{\circ}\text{C} \pm 6^{\circ}\text{C}$ per un'ora e raffreddato a temperatura ambiente (H 900). Se il materiale nella condizione A viene lavorato a caldo, deve essere sottoposto a solubilizzazione dopo tale lavorazione e prima dell'indurimento. Un trattamento di solubilizzazione è richiesto anche per materiali induriti se si vuole procedere ad un re-indurimento a temperature inferiori. Prima di procedere al trattamento termico è di fondamentale importanza rimuovere tutti i possibili agenti contaminanti (oli, rivestimenti, vernici etc.). Aumentando la temperatura del trattamento termico è possibile ottenere maggiore duttilità nella condizione indurita. Se l'acciaio non è sufficientemente duttile in una determinata condizione indurita, può essere sottoposto a un successivo trattamento termico a una temperatura più elevata per aumentare la resistenza all'impatto e l'allungamento. Per materiale lavorato a caldo prima dell'indurimento deve essere effettuato un trattamento di solubilizzazione a 1022°C - 1050°C per mezz'ora, seguito da un raffreddamento a temperature inferiori a 32°C . L'acciaio 15-5 PH trattato termicamente può essere indurito alle proprietà finali desiderate in un'unica operazione. Mediante il trattamento termico a temperature comprese tra 482°C e 621°C è possibile ottenere un'ampia gamma di proprietà. A seguito di invecchiamento si ha una variazione delle dimensioni del pezzo in funzione della condizione come riportato in tabella 2.9.

^vRiscaldato a 760°C (1400°F) per due ore, raffreddato ad aria, riscaldato a 621°C (1150°F) per quattro ore e nuovamente raffreddato ad aria.

^{vi}La nitrurazione gassosa è un processo di diffusione termochimica utilizzato per incrementare la resistenza all'usura, la durezza superficiale e la resistenza alla fatica tramite la diffusione di azoto

Condizione	Contrazione rispetto alla condizione A [mm/mm]
H 900	0.00045
H 925	0.00051
H 1025	0.00053
H 1100	0.0009
H 1150	0.0022

Tabella 2.9: Variazione dimensionale per invecchiamento 15-5 PH

Descaling

I trattamenti di indurimento producono solo una leggera colorazione termica sulle superfici, la presenza di questo film può degradare la resistenza alla corrosione della lega. La calamina^{vii} può essere rimossa facilmente con sabbiatura a sabbia bagnata o decapaggio leggero per diversi minuti in una soluzione di acido nitrico al 10% e acido fluoridrico al 2% (in volume) a 43°C-60°C, è consigliabile evitare una esposizione prolungata a questa soluzione per ridurre al minimo la corrosione della superficie e la possibilità di infragilimento da idrogeno. Quando il decapaggio è sconsigliato si può procedere con leggera elettrolucidatura. Questi ultimi due trattamenti passivano e puliscono anche le superfici per la massima resistenza alla corrosione. Il metodo più efficace per rimuovere le incrostazioni da trattamenti termici o forgiatura è la sabbiatura, questa dovrebbe essere seguita da un'immersione in una soluzione di acido nitrico al 10% e acido fluoridrico al 2% (in volume) a 43°C-60°C per diversi minuti per rimuovere eventuali detriti che potrebbero essere stati incorporati nella superficie dall'operazione di sabbiatura, come detto in precedenza è da sconsigliarsi l'esposizione prolungata alla soluzione acida.

Applicazioni in ambito aerospaziale

È ampiamente utilizzato in applicazioni che richiedono elevata resistenza e tenacità in tutte le direzioni come componenti strutturali, valvole, pompe, alberi e ingranaggi. È ottimo anche per applicazioni che richiedono resistenza alla corrosione. Trova applicazione anche in componenti di reattori nucleari.

Nota Fonte Dati

Tutti i dati riportati sono stati estrapolati dalle fonti riportate in bibliografia [7] [33] [41] [23]

^{vii}Strato di ossido che si forma sulla superficie di prodotti siderurgici lavorati a caldo

2.1.3 17-4 PH

Descrizione

Il 17-4 PH è un acciaio inossidabile martensitico indurente per precipitazione contenente un 4% di rame. Presenta un mix di alta resistenza, buona resistenza alla corrosione in acqua dolce e salata, atmosfera industriale e marina e sostanze chimiche ossidanti e buone proprietà meccaniche fino a 316°C. Con un unico trattamento termico di indurimento per precipitazione a bassa temperatura si ottengono eccellenti proprietà meccaniche ed un alto livello di resistenza. Presenta buone caratteristiche di fabbricazione.

Composizione chimica

Elemento	Composizione Chimica									
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Nb	Cu	Mo
% Min	-	-	-	-	-	3.000	15.00	5xC	3.000	-
% Max	0.070	1.000	0.040	0.030	1.000	5.000	17.50	0.450	5.000	0.500

Tabella 2.10: Composizione Chimica 17-4 PH

Proprietà meccaniche e fisiche

Le varie condizioni 'H' nella tabella 2.11 indicano la combinazione di proprietà ottenuta dal trattamento termico alla temperatura indicata in gradi °F per 4 ore e raffreddamento ad aria tranne che per la condizione H 900 trattata per un'ora.

Nella tabella 2.12 sono riportate le principali proprietà fisiche.

Condizione	Orientamento provino	Proprietà Meccaniche			
		R _m [MPa]	R _{p0.2} [MPa]	Allungamento % L0 = 4D	Riduzione Area %
H900	Longitudinale	1310	1172	10	35
	Trasversale	1310	1172	5	15
H925	Longitudinale	1172	1069	10	38
	Trasversale	1172	1069	6	20
H1025	Longitudinale	1069	1000	12	45
	Trasversale	1069	1000	7	27
H1075	Longitudinale	1000	862	13	45
	Trasversale	1000	862	8	28
H1100	Longitudinale	965	793	14	45
	Trasversale	965	793	9	29
H1150	Longitudinale	931	724	16	50
	Trasversale	931	724	10	30

Tabella 2.11: Proprietà Meccaniche a 20°C 17-4 PH

Resistenza alla corrosione Presenta una ottima resistenza alla corrosione, migliore di tutti gli acciai inossidabili temprabili e paragonabile all'acciaio AISI 304. In ambiente marino viene a formarsi un sottile strato di ruggine mentre se immerso in acqua marina stagnante soffre di corrosione interstiziale. La resistenza è maggiore con i materiali sottoposti a massimo indurimento e tende a diminuire con l'aumentare della temperatura di invecchiamento. La tensocorrosione, sebbene si verifichi raramente, può essere fonte di cedimento, solitamente si verifica in parti altamente sollecitate esposte a condizioni che consentono la concentrazione locale di cloruri. Per incrementare la resistenza a questo tipo di ambienti il materiale deve essere sottoposto ad invecchiamento alla temperatura massima possibile per l'applicazione voluta ma comunque mai sotto i 552°C (H 1025). Come tutti gli acciai martensitici

Proprietà Fisiche	
Densità [kg/dm^3]	7.8
Intervallo di fusione [$^{\circ}\text{C}$]	1404-1440
Modulo di elasticità (20°C) [GPa]	196
Coefficiente di Poisson	0.272
Ac1 [$^{\circ}\text{C}$]	627
Ac3 [$^{\circ}\text{C}$]	704
Ms [$^{\circ}\text{C}$]	132
Mf [$^{\circ}\text{C}$]	32

Tabella 2.12: Proprietà Fisiche 17-4PH

l'infragilimento da idrogeno può essere un problema, con temperature di invecchiamento superiori a 593°C (1100°F) il problema non si presenta di conseguenza utilizzando condizioni superiori o al limite uguali ad H 1100 il rischio viene ridotto al minimo.

Caratteristiche metallurgiche

Dopo la solubilizzazione il materiale presenta una microstruttura martensitica di moderata durezza con una presenza sporadica di δ -ferrite che per normativa non deve superare il 5%, per incrementare resistenza e durezza il materiale viene sottoposto ad invecchiamento a temperature differenti in funzione della condizione desiderata. L'invecchiamento porta alla precipitazione delle fasi arricchite di rame². La precipitazione del rame inizia con la formazione di zone sferiche ricche di rame con cella cubica a corpo centrato, superata una dimensione critica le zone perdono la coerenza con la matrice e si ha la trasformazione alla struttura a facce centrate.³⁷

Caratteristiche di lavorazione meccanica

Taglio Le procedure di taglio standard per acciai inossidabili al Nichel-Cromo danno risultati soddisfacenti. Per il taglio di barre e billette per forgiatura è consigliabile un taglio a freddo. Anche il taglio a caldo o il taglio con ruota abrasiva e grande volume di refrigerante può dare buoni risultati, tuttavia in caso di taglio con ruota abrasiva si possono formare piccole crepe sulla faccia tagliata se non si lavora materiale sottoposto ad invecchiamento.

Il taglio termico richiede procedimenti adatti agli acciai inossidabili come il taglio a polvere, l'arco ossidrico o i metodi arco-aria. Dal momento che le zone interessate dal calore non sono significativamente indurite o infragilite dal calore localizzato della saldatura o del taglio a cannello, questa lega offre buone possibilità di taglio mediante un processo termico.

Forgiatura Prima della forgiatura il pezzo deve essere riscaldato a 1150°C - 1200°C , la forgiatura può essere eseguita tra 950°C e 1200°C . Per granulometria e proprietà meccaniche ottimali, i pezzi devono essere raffreddati ad aria sotto i 32°C prima di ulteriori lavorazioni. I pezzi grezzi per la forgiatura devono essere riscaldati uniformemente a 1177°C - 1204°C e tenuti a temperatura per almeno 15 minuti prima della lavorazione. Su grandi sezioni oltre 19 mm di diametro o spessore, il materiale dovrebbe essere riscaldato mezz'ora per ogni pollice (25,4 mm) di spessore a 1177°C - 1204°C e mantenuto da mezz'ora a un'ora alla temperatura prima della lavorazione. Il raffreddamento tra la temperatura di inizio trasformazione da austenite a martensite 132°C e la fine 32°C dovrebbe essere il più uniforme possibile per ridurre le tensioni residue. Dal momento che la trasformazione termina a 32°C è importante che dopo la forgiatura le sezioni siano raffreddate, preferibilmente ad aria, ad una temperatura inferiore prima di ulteriori lavorazioni per garantire l'affinamento del grano. Stesso accorgimento deve essere preso dopo ogni trattamento di solubilizzazione.

Lavorabilità Gli utensili in carburo e in acciaio super rapido devono essere utilizzati con lubrificazione standard. Il materiale può essere lavorato sia post-solubilizzazione (lavorabilità simile al 304)

che in varie condizioni indurite per invecchiamento. Uno dei vantaggi importanti di questa lega è che può essere lavorata nella condizione A^{viii} e poi trattata termicamente dal momento che non si hanno incrostazioni o distorsioni dannose grazie a temperature finali di indurimento basse. Nella condizione indurita (H 900) questo materiale dovrebbe essere lavorato al 60% della velocità usata per la condizione A. Le finiture superficiali in entrambe le condizioni sono eccellenti, la migliore durata dell'utensile si ottiene dalla condizione H 1150-M.^{ix}

Presenta un indice di lavorabilità pari a 45 assumendo un valore di 100 per l'acciaio AISI 1212 che sale a 50 nel per la condizione H 1150

Saldatura La lega 17-4 PH può essere saldata con gas di protezione inerte oppure con saldatura a resistenza, non è consigliata la saldatura ossiacetilenica poiché potrebbe verificarsi un accumulo di carbonio. Quando è necessario materiale di apporto è importante che abbia proprietà simili a metallo di base, se non è richiesta un'elevata resistenza, un metallo d'apporto inossidabile austenitico è soddisfacente. La saldatura in condizione A offre normalmente buoni risultati ma quando si prevedono alti livelli di tensioni residue da saldatura è conveniente utilizzare il materiale nella condizione H1150. Se saldata nella condizione A, la lega 17-4 PH può essere invecchiata al livello di resistenza desiderato dopo la saldatura, ma la combinazione ottimale di resistenza, duttilità e resistenza alla corrosione si ottiene sottoponendo a solubilizzazione la parte saldata prima dell'invecchiamento. La caratteristica più importante di questo acciaio è la possibilità di essere saldato senza richiedere il preriscaldamento in sezioni fino a 101.6 mm. Il rame nella lega è presente in una forma che non influisce sul comportamento della saldatura, discorso analogo vale per la piccola quantità di niobio presente. Il basso contenuto di carbonio è una caratteristica importante poiché limita la durezza del materiale raffreddato rapidamente e riduce al minimo la possibilità di crepe nel metallo di saldatura e nella zona termicamente alterata del metallo di base. La lega 17-4 PH non mostra alcuna suscettibilità alla cricatura spontanea sotto il cordone di saldatura, non possiede però l'alta duttilità e tenacità degli acciai austenitici al Cr-Ni, ne consegue che non dovrebbe essere sottoposta a condizioni di intaglio non necessarie che potrebbero innescare cricche. La saldatura deve essere progettata per evitare la concentrazione di sollecitazioni da saldatura.

Indurimento superficiale L'acciaio inossidabile 17-4 PH può essere nitrurato^x quando è richiesta una maggiore resistenza al grippaggio e all'usura. Il vantaggio nel suo utilizzo, piuttosto che un acciaio inossidabile 18-8 o al cromo, risiede nel suo nucleo estremamente forte e resistente. Per contro questo trattamento comporta una diminuzione notevole della resistenza alla corrosione.

Trattamenti termici

Per ottenere massima durezza e resistenza il materiale solubilizzato viene riscaldato a $482^{\circ}\text{C} \pm 6^{\circ}\text{C}$ per un'ora e raffreddato a temperatura ambiente (H 900). Se il materiale nella condizione A viene lavorato a caldo, deve essere sottoposto a solubilizzazione dopo tale lavorazione e prima dell'indurimento. Un nuovo trattamento di solubilizzazione è richiesto anche per materiali induriti se si vuole procedere ad un re-indurimento a temperature inferiori.

Prima di procedere al trattamento termico è di fondamentale importanza rimuovere tutti i possibili agenti contaminanti (oli, rivestimenti, vernici etc.)

Aumentando la temperatura di invecchiamento è possibile ottenere maggiore duttilità nella condizione indurita. Se l'acciaio non è sufficientemente duttile in una determinata condizione indurita, può essere sottoposto a un successivo trattamento termico a una temperatura più elevata per aumentare la resistenza all'impatto e l'allungamento a discapito della resistenza meccanica. Per materiale lavorato a caldo prima dell'indurimento deve essere effettuato un trattamento di solubilizzazione a 1022°C - 1050°C

^{viii}Condizione A (Solubilizzato): Riscaldato a 1038°C per 1h e raffreddato a meno di 32°C in modo che il materiale sia completamente trasformato in martensite.

^{ix}Riscaldato a 760°C (1400°F) per due ore, raffreddato ad aria, riscaldato a 621°C (1150°F) per quattro ore e nuovamente raffreddato ad aria

^xLa nitrurazione gassosa è un processo di diffusione termochimica utilizzato per incrementare la resistenza all'usura, la durezza superficiale e la resistenza alla fatica tramite la diffusione di azoto

per mezz'ora, seguito da un raffreddamento fino ad almeno 32°C. L'acciaio inossidabile 17-4 PH dopo il processo di solubilizzazione può essere indurito alle proprietà finali desiderate in un'unica operazione, mediante il trattamento termico a temperature comprese tra 482°C e 621°C è possibile ottenere un'ampia gamma di proprietà. A seguito di invecchiamento si ha un cambiamento delle dimensioni del pezzo che varia in funzione della condizione come riportato in tabella 2.13

Condizione	Contrazione rispetto alla condizione A [mm/mm]
H 900	0.00045
H 925	0.00051
H 1025	0.00053
H 1100	0.0009
H 1150	0.0022

Tabella 2.13: Variazione dimensionale per invecchiamento 17-4 PH

Descaling

I trattamenti di indurimento producono solo una leggera colorazione termica sulle superfici, la presenza di questo film può degradare la resistenza alla corrosione della lega. La calamina^{xi} può essere rimossa facilmente sia con mezzi meccanici, come sabbiatura a sabbia bagnata o decapaggio leggero per diversi minuti in una soluzione di acido nitrico al 10% e acido fluoridrico al 2% (in volume) a 43-60°C, è consigliabile evitare una esposizione prolungata a questa soluzione per ridurre al minimo la corrosione della superficie e la possibilità di infragilimento da idrogeno. Quando il decapaggio è sconsigliato si può procedere con leggera elettrolucidatura, questi ultimi due trattamenti passivano e puliscono anche le superfici per la massima resistenza alla corrosione. Il metodo più efficace per rimuovere le incrostazioni da trattamenti termici o forgiatura è la sabbiatura, questa dovrebbe essere seguita da un'immersione in una soluzione di acido nitrico al 10% e acido fluoridrico al 2% (in volume) a 43°C-60°C per diversi minuti per rimuovere eventuali detriti che potrebbero essere stati incorporati nella superficie dall'operazione di sabbiatura, come detto in precedenza è da sconsigliarsi l'esposizione prolungata alla soluzione acida.

Applicazioni in ambito aerospaziale

Considerato il cavallo di battaglia degli acciai inossidabili da precipitazione presenta molteplici applicazioni tra cui alberi di pompe, steli di valvole, sfere, elementi di fissaggio, giunti, fissaggi per razzi, rulli, attuatori idraulici, viti e ganci di atterraggio per aeromobili.

Nota Fonte Dati

Tutti i dati riportati sono stati estrapolati dalle fonti riportate in bibliografia [7] [42] [18] [13]

^{xi}Strato di ossido che si forma sulla superficie di prodotti siderurgici lavorati a caldo

2.1.4 AISI 4340

Descrizione

L'AISI 4340 è un acciaio da costruzione a medio tenore di carbonio e basso legato, contiene cromo, nichel e molibdeno. È un acciaio speciale con un'elevata resistenza accompagnata da buone tenacità e duttilità. È adatto alla tempra superficiale dove raggiunge la durezza di $54 \div 59$ hrc secondo il contenuto di carbonio. Possiede elevatissima resistenza a fatica fino a temperatura di 450°C circa e si comporta molto bene anche a bassa temperatura. Data la sua elevatissima temprabilità è destinato generalmente alla costruzione di pezzi di rilevanti dimensioni che lavorano in condizione gravose, ad esempio gli alberi per turbine idroelettriche. È impiegato con successo anche per la bulloneria ad altissima resistenza.

Composizione chimica

Elemento	Composizione Chimica								
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Cu	Mo
% Min	0.380	0.650	-	-	0.150	1.650	0.700	-	0.200
% Max	0.430	0.900	0.010	0.010	0.350	2.000	0.900	0.350	0.300

Tabella 2.14: Composizione Chimica AISI 4340

Proprietà meccaniche e fisiche

Nella tabella 2.15 sono riportate le proprietà meccaniche della lega in funzione dell'area nominale della sezione trasversale.

Nella tabella 2.16 sono riportate le principali proprietà fisiche.

Area nominale sezione trasversale [cm^2]	Proprietà Meccaniche				
	Orientamento Provino	R_m [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	Allungamento % $L_0 = 4D$	Riduzione Area %
Fino a 645 incluso	Trasversale	1793	1496	6	30
	Longitudinale	1793	1496	10	30
Da 645 a 929 incluso	Trasversale	1793	1496	5	25
	Longitudinale	1793	1496	10	30
Oltre 929	Trasversale	1793	1496	4	20
	Longitudinale	1793	1496	10	30

Tabella 2.15: Proprietà Meccaniche a 20°C AISI 4340

Proprietà Fisiche	
Densità [kg/dm^3]	7.85
Intervallo di fusione [$^{\circ}\text{C}$]	1340-1380
Modulo di elasticità (20°C) [GPa]	205
Coefficiente di Poisson	0.29
Ac1 [$^{\circ}\text{C}$]	725
Ac3 [$^{\circ}\text{C}$]	770
Ms [$^{\circ}\text{C}$]	310

Tabella 2.16: Proprietà Fisiche AISI 4340

Resistenza alla corrosione L'acciaio AISI 4340 è vulnerabile alla corrosione elettrochimica in atmosfera se non protetto con trattamenti superficiali come placcatura, anodizzazione e verniciatura. Il processo che permette di ottenere migliori proprietà in termini di resistenza alla corrosione, lubrificazione, bassa dilatazione termica e compatibilità galvanica è l'elettrodeposizione di uno strato di cadmio. Nel tentativo di limitare l'utilizzo del cadmio a causa della pericolosità dei suoi composti per l'ecosistema sono stati sfruttati materiali alternativi come zinco, zinco-nichel e stagno-zinco, tuttavia, questi ultimi non producono risultati sufficienti per rispettare i requisiti imposti dall'industria aerospaziale nella quale, per alcune applicazioni, viene ancora utilizzata l'elettrodeposizione di cadmio⁴⁷.

Caratteristiche metallurgiche

La materia prima presenta una microstruttura costituita da ferrite e perlite, il processo di tempra cambia la microstruttura in ferrite e martensite, in cui l'aumento del tempo di tempra tende ad aumentare la quantità di martensite. Il rapido raffreddamento si traduce nella diffusione incompleta degli atomi di carbonio e nel cambiamento della struttura cristallina da cubica a faccia centrata (FCC) a tetragonale a corpo centrato (BCT). Il processo di rinvenimento trasforma la martensite in bainite. Incrementando il tempo di permanenza di tempra si ha un incremento della durezza di circa il 31,4% da 334,12 a 439,3 VHN. D'altra parte, il valore della resistenza all'urto tende a diminuire. L'aumento del tempo di rinvenimento si traduce in una diminuzione della durezza, in cui il valore più basso di 85,48 VHN si ha con tempo di permanenza di tempra di 2h seguito da rinvenimento per 4 h.⁴

Caratteristiche di lavorazione meccanica

Forgiatura Prima della forgiatura preriscaldare il materiale a 1150°C-1200°C fino ad avere temperatura uniforme in tutto il pezzo, quindi forgiare sempre a temperature superiori a 850°C.

L'acciaio presenta buone caratteristiche di forgiatura ma è necessario prestare attenzione al raffreddamento poiché suscettibile a fessurazione, motivo per cui è consigliato un raffreddamento lento in sabbia o calce secca.

Lavorabilità La lavorazione viene eseguita al meglio allo stato ricotto o normalizzato e rinvenuto. Può essere lavorato con tutti i metodi convenzionali, tuttavia, nelle condizioni di elevata resistenza (1378 MPa o superiore), la lavorabilità è solo dal 10% al 25% di quella della lega allo stato ricotto. Presenta un indice di lavorabilità pari a 50 assumendo un valore di 100 per l'acciaio AISI 1212.

Saldatura Facilmente saldabile per fusione o per resistenza allo stato ricotto mentre è sconsigliata nello stato indurito e rinvenuto a causa del pericolo di cricche da tempra, poiché le proprietà meccaniche saranno degradate all'interno della zona termicamente alterata dalla saldatura. Se è necessario eseguire la saldatura, preriscaldare a 200°C-300°C e mantenerla durante la saldatura, immediatamente dopo la saldatura effettuare un trattamento di distensione ad una temperatura compresa tra 550°C e 650°C, prima della tempra e del rinvenimento.

Se la saldatura allo stato indurito e rinvenuto è davvero necessaria il pezzo lavorato dovrebbe essere sottoposto a distensione a 15°C al di sotto della temperatura di rinvenimento originale.

Indurimento superficiale Può essere sottoposto al trattamento termico di nitrurazione, raggiungendo un notevole incremento del limite di fatica e durezza superficiali elevate. Riscaldare a 500°C-530°C e mantenerlo per un tempo sufficiente (da 10 a 60 ore) in funzione della profondità del trattamento desiderata, si procede quindi con un raffreddamento lento riducendo il problema della distorsione. Così facendo i pezzi possono essere lavorati quasi alla dimensione finale, lasciando solo una piccola tolleranza di rettifica. La resistenza alla trazione del nucleo del pezzo di solito non è influenzata poiché l'intervallo di temperatura di nitrurazione è generalmente inferiore a quella di invecchiamento. La durezza superficiale ottenibile è compresa tra 600 e 650 HV.

Altro trattamento di indurimento possibile per barre e piastre pre-temperate e rinvenute è la tempra a fiamma o ad induzione. Le parti devono essere riscaldate il più rapidamente possibile a 830°C-860°C alla profondità desiderata e subito raffreddate in olio o acqua. Un trattamento successivo di

rinvenimento a 150°C-200°C ridurrà le sollecitazioni con un effetto minimo sulla sua durezza. Tutto il materiale superficiale decarburato deve essere prima rimosso per garantire i migliori risultati.

Trattamenti termici

Distensione (Stress Relieving) Per l'acciaio pretemprato, la distensione si ottiene riscaldandolo ad una temperatura compresa tra 500°C e 550°C, per la condizione ricotta si deve riscaldare a 600°C-650°C, mantenere fino a quando la temperatura è uniforme in tutta la sezione e raffreddare in aria calma.

Ricottura Una ricottura completa può essere fatta a 844°C seguita da un raffreddamento controllato in forno a una velocità di raffreddamento non superiore a 10°C/h fino a 315°C oltre può essere raffreddato ad aria.

Rinvenimento L'acciaio legato AISI 4340 dovrebbe essere trattato termicamente o normalizzato^{xii} e trattato termicamente prima del rinvenimento. La temperatura di rinvenimento dipende dal livello di resistenza desiderato, per livelli nell'intervallo 1792-1930 MPa, rinvenire a 232°C. Per resistenze comprese tra 861 MPa e 1378 MPa trattare a 510°C.

Non sottoporre a rinvenimento elementi con resistenza compresa tra 1516 MPa e 1792 MPa poiché il rinvenimento a temperature comprese tra 250°C e 450°C può provocare una degradazione della resistenza all'impatto a causa del fenomeno della fragilità al rinvenimento^{xiii}.

Tempra Il materiale viene riscaldato a 830°C seguito da una tempra in olio. Per l'alta resistenza (oltre 1378 MPa) la lega dovrebbe essere normalizzata a 900°C prima del trattamento termico.

Applicazioni in ambito aerospaziale

È solitamente utilizzato per le parti più durevoli degli aerei militari e commerciali specialmente per carrelli di atterraggio e parti strutturali. È inoltre adatto alla costruzione di pezzi di rilevanti dimensioni che lavorano in condizione gravose o che debbano avere grandi resistenze a fatica.

È impiegato con successo anche per la bulloneria ad altissima resistenza.

Nota Fonte Dati

Tutti i dati riportati sono stati estrapolati dalle fonti riportate in bibliografia [7] [40] [19] [35]

^{xii}Tattamento termico in grado di annullare qualsiasi trattamento termico o meccanico subito dal metallo in precedenza.

^{xiii}Fenomeno che si presenta quando nel passaggio lento nel campo di temperatura critico durante il rinvenimento si ha una brusca diminuzione della resilienza risultando in un infragilimento dell'acciaio.

2.1.5 INCONEL 718

Descrizione

L'INCONEL 718 è una lega a base di nichel e cromo induribile per precipitazione, presenta ottime caratteristiche di resistenza alla rottura e corrosione a temperature elevate (fino a 700°C) e resistenza ad ossidazione fino a 980 °C. Si presta bene alla fabbricazione anche di parti complesse, presenta inoltre un'eccellente saldabilità, in particolare un'ottima resistenza alla fessurazione post-saldatura, se paragonata alle altre leghe a base di nickel. L'economicità e la facilità di fabbricazione combinate con buona resistenza alla trazione, fatica, scorrimento viscoso e rottura, hanno portato al suo utilizzo in una vasta gamma di applicazioni.

Composizione chimica

Composizione Chimica		
Elemento	% Min	% Max
C	-	0.080
Mn	-	0.350
Si	-	0.350
P	-	0.015
S	-	0.015
Cr	17.00	21.00
Ni	50.00	55.00
Mo	2.800	3.300
Nb	4.750	5.500
Ti	0.650	1.150
Al	0.200	0.800
Co	-	1.000
B	-	0.006
Cu	-	0.300
Pb	-	0.0005
Bi	-	0.00003
Se	-	0.0003
Fe	Resto	-

Tabella 2.17: Composizione Chimica Inconel 718

Proprietà meccaniche e fisiche

Nella tabella 2.18 sono riportate le principali proprietà Meccaniche.

Nella tabella 2.19 sono riportate le principali proprietà fisiche.

Orientamento provino	Proprietà Meccaniche				
	Diametro o distanza tra facce parallele [mm]	R _m [MPa]	R _{p0.2} [MPa]	Allungamento % L0 = 4D	Riduzione Area %
Longitudinale	Fino a 254 incl.	1276	1034	12	15
L-T (Forgiati)	Fino a 127 incl.	1241	1034	10	12
	Da 127 a 254 incl	1241	1000	10	12
Trasversale	Fino a 127 incl.	1241	1034	6	8
	Da 127 a 254 incl	1241	1000	6	8

Tabella 2.18: Proprietà Meccaniche a 20°C Inconel 718

Proprietà Fisiche	
Densità [kg/dm^3]	8.19
Intervallo di fusione [$^{\circ}\text{C}$]	1321-1393
Modulo di elasticità (20°C) [GPa]	200
Coefficiente di Poisson	0.29

Tabella 2.19: Proprietà Fisiche Inconel 718

Resistenza alla corrosione La lega presenta un'eccellente resistenza alla corrosione in molti ambienti. Questa resistenza, simile a quella di altre leghe di nichel-cromo, è funzione della sua composizione. Il nichel contribuisce alla resistenza alla corrosione in un'ampia gamma di acidità e alcalinità, è efficace anche contro la tensocorrosione da ioni cloruro. Il cromo conferisce la capacità di resistere agli attacchi di mezzi ossidanti e composti di zolfo. Il molibdeno contribuisce alla resistenza alla vaiolatura.

Caratteristiche metallurgiche

Inconel 718 presenta una matrice austenica γ con reticolo cristallino FCC, questa struttura è presente a tutte le temperature rendendo il materiale duttile e adatto al rafforzamento con indurimento per precipitazione. Le principali fasi che prendono parte al processo di indurimento per precipitazione sono:

- γ' : un intermetallico misto ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$) coerente con la matrice e stabile alle alte temperature che migliora le proprietà meccaniche della lega⁴⁵;
- γ'' : un precipitato metastabile di Ni_3Nb che presenta una struttura TCC e costituisce la principale fase rafforzante⁴⁵;

Sono presenti anche fasi che causano un peggioramento delle proprietà meccaniche della lega a causa della loro bassa duttilità, in particolare:

- δ : fase con reticolo ortorombico e formula Ni_3Nb ⁴⁵;
- μ : fase con reticolo romboedrico e formula $(\text{Fe}, \text{Co})_2(\text{Mo}, \text{W})_6$ ⁴⁵;
- Laves: fase con struttura esagonale e formula $(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cr}, \text{Si})_2(\text{Mo}, \text{Ti}, \text{Cb})$ ⁴⁵;

L'indurimento per precipitazione presenta due fasi successive: soluzione solida e trattamento di invecchiamento. Nella prima fase le fasi secondarie (di indurimento) vengono dissolte lungo la matrice, così come i carburi ottenendo una soluzione sovrasatura a temperatura ambiente. È importante notare come dopo i 650°C con lunghi tempi di esposizione la fase γ'' si trasformi nella fase stabile δ causando una perdita di resistenza meccanica¹⁰. Essendo presenti due fasi indurenti (γ' e γ'') è possibile effettuare due trattamenti di invecchiamento per favorire la migliore precipitazione di entrambe.⁶

Caratteristiche di lavorazione meccanica

Taglio Può essere tagliato utilizzando qualsiasi sistema convenzionale di taglio al plasma, utilizzando una miscela di argon e idrogeno si ottiene il miglior arco di taglio. L'azoto può sostituire l'idrogeno ma la qualità del taglio peggiorerà leggermente. Il taglio al plasma dovrebbe essere svolto in atmosfera povera di ossigeno.

Forgiatura La lega 718 dovrebbe essere forgiata ad una temperatura massima di 1120°C per un tempo limitato. La lavorazione nell'intervallo 925°C - 1010°C migliora la resistenza del forgiato se la sua successiva temperatura di servizio è inferiore 595°C . Il pezzo non dovrebbe essere lavorato a temperature inferiori a 900°C , a seguito della lavorazione è preferibile un raffreddamento ad aria. Per evitare la formazione di una struttura duplex è necessario procedere con riduzioni uniformi. L'atmosfera nel forno per la forgiatura dovrebbe essere leggermente riducente e contenente almeno il 2% di monossido

di carbonio, per evitare l'infiltrazione di aria e quindi ossigeno è consigliabile mantenere una pressione relativa positiva. In queste condizioni sul pezzo riscaldato viene a formarsi una sottile pellicola verdenera di ossido aderente alla superficie, quest'ultima è preferibile alla grossa scaglia nera difficile da rimuovere che viene a formarsi in atmosfera ossidante.

Lavorabilità Le leghe a base di cobalto e nichel sono considerate generalmente di moderata/difficile lavorabilità, infatti durante la lavorazione queste leghe si induriscono rapidamente, generano un calore elevato, si saldano alla superficie dell'utensile da taglio e offrono un'alta resistenza alla rimozione del metallo a causa della loro elevata resistenza al taglio. Tuttavia, va sottolineato che queste leghe possono essere lavorate con metodi di produzione convenzionali a tassi soddisfacenti con alcuni accorgimenti riguardanti: la rigidità dell'ancoraggio del pezzo e dell'utensile, l'affilatura e l'angolo di spoglia dell'utensile (preferibilmente positivo) ed infine la lubrificazione e refrigerazione.

Quando non fosse possibile o sconsigliato utilizzare lubrificanti l'utilizzo di un getto d'aria sull'utensile permette di aumentarne sensibilmente la vita. La lega può essere lavorata sia indurita per invecchiamento che in condizione ricotta, con la prima si ottengono finiture leggermente migliori mentre con la seconda si ha una lavorazione più facile ed una minore degradazione dell'utensile. Presenta un indice di lavorabilità pari a 12 assumendo un valore di 100 per l'acciaio AISI 1212.

Saldatura La lega può essere saldata sia allo stato solubilizzato che invecchiato, nel secondo caso si avrà la formazione di una zona ammorbidita termicamente alterata. Il materiale si presta bene alla saldatura TIG. La risposta lenta della lega 718 all'indurimento per invecchiamento permette di saldare le parti e indurle direttamente per invecchiamento senza un trattamento di distensione intermedio, tuttavia con una solubilizzazione prima dell'invecchiamento e dopo la saldatura è possibile ottenere proprietà migliori. I materiali d'apporto per brasatura all'argento sono noti per causare cricche da stress nelle leghe a base di nichel, sono quindi da evitare se la parte è lavorata a freddo e/o indurita per precipitazione. È inoltre meglio evitare l'utilizzo di leghe brasanti contenenti cadmio che pur non causando cricche può aggravare quelle causate da altre fonti.

Trattamenti termici

Per ottenere la migliore combinazione di resistenza e caratteristiche di rottura il miglior trattamento termico è il seguente: mantenimento per un'ora ad una temperatura tra 954°C e 982°C raffreddamento ad aria poi 8 ore a 718°C quindi raffreddamento in fornace fino a 621°C con tasso di raffreddamento di 56 °C/hr, attesa 8 ore ed infine raffreddamento ad aria.

Per ottenere le migliori proprietà di trazione a temperatura ambiente e criogeniche, si dovrebbe utilizzare il seguente trattamento termico: mantenimento per 1/2 ore ad una temperatura di 1066°C, raffreddamento ad aria, riscaldamento per 8 ore a 718°C quindi raffreddamento in fornace a 621°C con tasso di raffreddamento di 56°C/ora, attesa 8 ore e raffreddamento ad aria.

La risposta all'invecchiamento della lega indurita è piuttosto lenta rispetto a quella delle leghe indurite in alluminio-titanio, perciò la lega può essere riscaldata e raffreddata attraverso l'intervallo di temperatura di invecchiamento a velocità normali, pur mantenendo morbidezza e duttilità. L'atmosfera del forno deve essere leggermente riducente per gli stessi motivi riportati nel paragrafo dedicato alla forgiatura.

Applicazioni in ambito aerospaziale

Viene utilizzato per turbine a gas, motori per lanciatori, navicelle spaziali, pompe e turbopompe ed elementi di fissaggio e bulloni per applicazioni alte temperature.

Nota Fonte Dati

Tutti i dati riportati sono stati estrapolati dalle fonti riportate in bibliografia [7] [9] [16] [20]

2.1.6 MP35N

Descrizione

MP35N è una lega a base di nichel, cobalto, cromo e molibdeno non magnetica che presenta altissima resistenza a trazione accompagnata da buona duttilità e tenacità ed eccellente resistenza alla corrosione. È resistente a solfatazione, ossidazione ad alte temperature e infragilimento da idrogeno.

Questa lega presenta un'eccezionale resistenza alla tensocorrosione a livelli di resistenza molto elevati in condizioni ambientali severe che possono rompere la maggior parte delle leghe convenzionali, è inoltre altamente resistente ad altre forme di attacco localizzato, come la corrosione alveolare e la corrosione interstiziale.

Composizione chimica

Elemento	Composizione Chimica										
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Ti	Fe	Co
% Min	-	-	-	-	-	33.00	19.00	9.000	-	-	resto
% Max	0.025	0.150	0.015	0.010	0.150	37.00	21.00	10.50	1.000	1.000	-

Tabella 2.20: Composizione Chimica MP35N

Proprietà meccaniche e fisiche

Nella tabella 2.21 sono riportate le principali proprietà meccaniche.

Nella tabella 2.22 sono riportate le principali proprietà fisiche.

Proprietà Meccaniche			
R_m [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	Allungamento % $L_0 = 4D$	Riduzione Area %
1793	1586	8	35

Tabella 2.21: Proprietà Meccaniche MP35N

Proprietà Fisiche	
Densità [kg/dm^3]	8.43
Intervallo di fusione [$^{\circ}C$]	1315-1440
Modulo di elasticità ($20^{\circ}C$) [GPa]	232
Coefficiente di Poisson	0.29

Tabella 2.22: Proprietà Fisiche MP35N

Resistenza alla corrosione La lega MP35N offre un'eccezionale resistenza alla corrosione generale, alla corrosione interstiziale e alla tensocorrosione a tutti i livelli di resistenza grazie ai 4 principali elementi leganti. La lega resiste alla corrosione in idrogeno solforato, acqua salata e altre soluzioni di cloruro, nonché gli acidi minerali (nitrico, cloridrico, solforico). La struttura cristallina FCC della matrice, grazie alla stretta spaziatura atomica, conferisce un'eccellente resistenza all'infragilimento da idrogeno che risulta evidente se confrontato con acciai legati ad alta resistenza con microstrutture cubiche a corpo centrato e leghe di nichel indurite per precipitazione come 718.⁴³

MP35N è un metallo estremamente nobile, molto simile al titanio, e può causare corrosione galvanica se accoppiato a un materiale meno nobile come l'acciaio inossidabile di tipo 316.

Caratteristiche metallurgiche

MP35N ha, come altre leghe a base di nichel e cobalto, una microstruttura cubica a faccia centrata (FCC) allo stato ricotto. Il meccanismo di rafforzamento primario è la trasformazione parziale della struttura FCC in una struttura impacchettata compatta esagonale (HCP). La fase HCP si forma come piastrine sottili lungo i piani della matrice FCC, la spaziatura delle piastrine HCP è direttamente correlata alla resistenza che aumenta al diminuire della prima. La fase FCC è stabile sopra i 649°C, mentre la struttura HCP è stabile sotto gli 427°C. Tuttavia, la trasformazione da FCC a HCP non sembra avere una temperatura M_s alla quale avviene per raffreddamento, come per la martensite nell'acciaio, e richiede quindi una deformazione meccanica. L'entità della trasformazione e il livello di resistenza finale dipendono dalla quantità di deformazione meccanica impartita a temperature inferiori a 427 °C. I metodi più comuni per introdurre la deformazione sono i processi di lavorazione a freddo come trafilatura, formatura, estrusione, laminazione o una combinazione di questi processi di produzione. La trasformazione non avviene solo con lavorazione a temperatura ambiente ma anche a temperature elevate al limite superiore della zona di trasformazione (427°C). Le piastrine esagonali che si formano sono stabili nella matrice cubica a facce centrate e le strutture risultanti mostrano una combinazione unica di eccellenti proprietà meccaniche e resistenza alla corrosione. È possibile ottenere un ulteriore incremento della resistenza meccanica di circa 275 MPa sottoponendo il pezzo lavorato ad un trattamento termico di indurimento per invecchiamento. La massima efficacia del trattamento si ha con temperature comprese tra 427°C e 649°C a causa della precipitazione di una fase di cobalto-molibdeno. Questo trattamento dà scarsi risultati sul materiale non lavorato in quanto la fase precipitante viene a formarsi all'interfaccia tra le piastrine HCP e la matrice FCC, interfaccia presente appunto dopo la lavorazione⁸.

Caratteristiche di lavorazione meccanica

Forgiatura Le operazioni di forgiatura devono essere svolte a freddo o sotto al limite superiore della zona di trasformazione (427°C) per ottenere il rafforzamento primario. Oltre i 650°C la fase HCP tende a dissolversi facendo perdere al materiale la resistenza ottenuta durante la lavorazione.

Lavorabilità L'MP35N è generalmente difficile da lavorare in qualsiasi condizione, può essere paragonato in termini di lavorabilità ad altre Superleghe contenenti cobalto come Waspaloy o Rene 41. La lega MP35N può essere lavorata a caldo e a freddo e formata con un'ampia varietà di processi. Per ottenere la massima resistenza è necessario svolgere lavorazioni di deformazione meccanica a freddo o comunque a temperatura minore di 427°C. È lavorabile con utensili di acciaio super-rapido o acciaio al carburo. I fluidi da taglio consigliati includono olio solubile, olio solforato o olio clorurato. La lavorazione della lega può essere difficile, ma è comunque realizzabile con la giusta combinazione di velocità, utensili da taglio e fluidi da taglio.

Presenta un indice di lavorabilità pari a 20 assumendo un valore di 100 per l'acciaio AISI 1212.

Saldatura La saldabilità della lega è simile a quella dell'acciaio inossidabile 304 assumendo le stesse preparazioni e precauzioni. È importante mantenere basso l'apporto termico specifico a circa il 50-60% di quello utilizzato per l'acciaio inossidabile 304 per limitare la perdita di resistenza meccanica nella zona del pezzo affetta da riscaldamento.

A causa del processo di indurimento ottenibile solamente per deformazione a freddo non è possibile recuperare la resistenza persa nella zona vicina alla saldatura attraverso un trattamento termico. La zona può essere sottoposta ad un trattamento di distensione per ridurre le tensioni residue causate dalla saldatura ma il recupero della resistenza può avvenire solamente per lavorazione a freddo.

Trattamenti termici

Oltre alla lavorazione a freddo anche un trattamento di invecchiamento può portare ad un incremento di resistenza della lega. L'aumento della resistenza nella condizione invecchiata si ottiene dalla precipitazione di particelle di Co_3Mo , questi precipitati nucleano, a causa della segregazione degli atomi di molibdeno a temperature superiori a 427°C, all'interfaccia tra la matrice FCC e le piastrine HCP

formatesi nella lavorazione a freddo. Il picco di invecchiamento si verifica a circa 538°C mentre la dissoluzione delle fase HCP inizia sopra i 649°C . È fondamentale notare che la formazione dei precipitati di Co_3Mo può avvenire solo quando è presente la fase HCP, di conseguenza l'invecchiamento della lega senza lavoro a freddo non rafforzerà il materiale.

È importante che la lega non sia esposta a temperature molto al di sopra della temperatura di invecchiamento raccomandata, poiché la struttura metallurgica creata nella lega dal processo di lavorazione a freddo può essere invertita alla struttura più morbida del materiale ricotto (oltre i 649°C), questo cambiamento non è recuperabile senza ulteriore lavorazione a freddo.

Applicazioni in ambito aerospaziale

In ambito aerospaziale viene utilizzato per sistemi di fissaggio come bulloni, perni e tiranti e per la produzione di molle. È utilizzato inoltre per componenti ad alta resistenza in ambiente marino sia per l'industria navale che per quella petrolifera. Viene anche utilizzato per componenti elettrici non magnetici sottoposti ad ambienti estremamente corrosivi.

Nota Fonte Dati

Tutti i dati riportati sono stati estrapolati dalle fonti riportate in bibliografia [43] [12] [8] [21]

2.1.7 Ti-6AL-4V

Descrizione

Il Ti 6Al-4V è una lega di titanio alfa-beta, questo significa che oltre al titanio sono presenti alliganti che favoriscono la fase alfa detti alfa-stabilizzanti come l'alluminio ed alliganti che favoriscono la fase beta detti beta-stabilizzanti come il vanadio. È una lega nata per applicazioni strutturali aerospaziali ma poi prestata ad un grande numero di utilizzi fra cui l'industria petrolifera e del gas, dove è essenziale una combinazione di elevata resilienza, resistenza alla corrosione e peso ridotto. Presenta anche ottima resistenza alla corrosione in ambiente marino. Essendo biocompatibile trova applicazione anche in campo medico. La densità del Ti 6Al-4V è pari al 50% di quella delle leghe a base di nichel e degli acciai inossidabili, questo dona al materiale un elevato rapporto forza/peso. Viene generalmente utilizzata allo stato ricotto per temperature di esercizio fino a 400°C. La resistenza della lega può essere incrementata con un processo di invecchiamento. La lega si presta bene anche alle operazioni di colata.

Composizione chimica

Composizione Chimica								
Elemento	Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
% Min	5.50	3.50	-	-	-	-	-	-
% Max	6.75	4.50	0.08	0.4	0.20	0.05	0.125	Resto

Tabella 2.23: Composizione Chimica Ti-6AL-4V

Proprietà meccaniche e fisiche

Nella tabella 2.24 sono riportate le principali proprietà meccaniche.

Nella tabella 2.25 sono riportate le principali proprietà fisiche.

Proprietà Meccaniche				
Diametro/spessore [mm]	R_m [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	Allungamento % $L_0 = 4D$	Riduzione Area %
fino a 50.8	931	862	10	25
tra 50.8 e 101.6	896	827	10	25
tra 101.6 e 152.4	896	827	10	20

Tabella 2.24: Proprietà Meccaniche Ti-6AL-4V

Proprietà Fisiche	
Densità [kg/dm ³]	4.42
Intervallo di fusione [°C]	1609-1660
Modulo di elasticità (20°C) [GPa]	114
Beta Transus [°C]	996±28
Coefficiente di Poisson	0.31

Tabella 2.25: Proprietà Fisiche Ti-6AL-4V

Resistenza alla corrosione Le leghe di titanio presentano una ottima resistenza alla corrosione grazie ad uno strato di ossido di titanio che viene a formarsi sulle superfici a contatto con ossigeno. Il film protettivo risulta essere stabile e, in caso di danneggiamento, tende a ripristinarsi spontaneamente

^{xiv} Anidro: composto o sostanza privi di acqua

in atmosfere contenenti ossigeno o umide. La resistenza alla corrosione è quindi legata alla presenza di acqua od ossigeno che permettano la formazione del film protettivo, nel caso di contatto con anidri^{xiv} o ambienti altamente riducenti il film protettivo non si forma o se presente in caso di danneggiamento non viene ripristinato portando quindi ad una veloce corrosione. Gli ambienti più corrosivi sono caratterizzati solitamente dalla presenza di acidi fortemente riducenti e da temperature elevate, in altri ambienti invece quando il titanio è protetto dal film di ossido i tassi di corrosione sono molto bassi, solitamente inferiori a 0.04 mm/anno. Il film protettivo in molti ambienti potrebbe inspessirsi portando ad una variazione di colorazione ed ad un leggero incremento di massa del pezzo. La lega presenta ottima resistenza alla corrosione alveolare (*Pitting*).

Il titanio è poco suscettibile a corrosione galvanica se accoppiato con altri materiali ma potrebbe a sua volta comportare corrosione di questi. Una eccezione è data dagli ambienti in cui la passivazione delle superfici è inibita dalla presenza di atmosfera riducente, in queste condizioni l'assenza del film protettivo potrebbe portare a corrosione galvanica se accoppiato con materiali più nobili.

Lo strato di ossido superficiale risulta particolarmente duro fungendo anche da protezione contro l'erosione. Il titanio si presta quindi molto bene alla fabbricazione di scambiatori di calore anche per grandi portate non essendo particolarmente suscettibile all'erosione per turbolenza o cavitazione.

Il film protettivo di ossido permette l'utilizzo del titanio anche in ambienti ricchi di idrogeno in quanto funge da barriera protettiva contro il passaggio di idrogeno e il conseguente infragilimento. La corrosione interstiziale può presentarsi nel momento in cui in alcune zone vengono a formarsi condizioni altamente riducenti e povere di ossigeno.[7]

Caratteristiche metallurgiche

Il titanio è allotropico, presenta quindi struttura cristallina variabile in funzione della temperatura, per il titanio puro si ha struttura α esagonale compatta (HCP) fino a 882°C (temperatura di β -transus), a temperatura superiore si ha una struttura cubica a corpo centrato (BCC) tipica della fase β . L'aggiunta di alliganti può modificare questa temperatura, in particolare la presenza di elementi α -stabilizzati come l'alluminio e β -stabilizzanti come il vanadio permette di avere struttura mista $\alpha + \beta$ a temperatura ambiente. Ti-6Al-4V essendo una lega del titanio $\alpha - \beta$ presenta quindi microstruttura mista. Grazie alla presenza di due fasi è possibile applicare diversi trattamenti termici per modificare la microstruttura e quindi le proprietà meccaniche. La microstruttura è quindi fortemente dipendente dalla storia di processi termici subiti dal pezzo, per esempio a seguito di tempra a temperatura leggermente inferiore a quella di β -transus si ha una struttura composta da piccole e rare isole di α -primaria in una matrice di β -trasformata mentre con una tempra ad una temperatura leggermente al disopra del β -transus, la struttura è composta per il 100% da β -trasformata. [15]

Caratteristiche di lavorazione meccanica

Forgiatura A causa della sua alta reattività, il titanio e le sue leghe durante le operazioni di riscaldamento per la forgiatura devono essere protetti così da evitare contaminazione da ossigeno, idrogeno e carbonio. La lavorazione avviene solitamente a temperature superiori a quella di β -transus in quanto la struttura BCC della fase β è più duttile e sono richieste pressioni minori, allo stesso tempo forgiare a queste temperature elevate può portare ad un incremento eccessivo delle dimensioni del grano, di conseguenza le fasi finali della forgiatura vengono svolte a temperature inferiori a quelle di β -transus. La temperatura di forgiatura riveste quindi un ruolo fondamentale nella buona riuscita dell'operazione, anche lo stampo deve essere riscaldato per evitare perdite di calore eccessive del pezzo che possono portare a difetti di fabbricazione. Le pressioni necessarie alla lavorazione del Ti 6Al-4V a 940°C sono assimilabili a quelle necessarie per la lavorazione dell'acciaio AISI 4340 forgiato a 1260°C mentre a 870°C le pressioni sono il doppio rispetto a quelle dell'acciaio, è facile notare la grande influenza della temperatura di forgiatura sulla forgiabilità del materiale. In generale la forgiatura del Ti 6Al-4V richiede equipaggiamenti con 1.5/2 volte la capacità di lavorazione necessaria per pezzi comparabili in acciaio. Nonostante gli accorgimenti solitamente si ha una minima contaminazione durante la forgiatura, i pezzi devono quindi essere molati o attaccati chimicamente così da rimuoverla. In fase di forgiatura è importante evitare il contatto tra il titanio e le scaglie di acciaio in quanto le condizioni di

alta temperatura e pressione possono causare una reazione esotermica tra il titanio e l'ossido di ferro che può danneggiare seriamente lo stampo.

Lavorabilità Le caratteristiche di lavorazione del Ti 6Al-4V sono simili a quelle degli acciai inossidabili austenitici, essendo una lega $\alpha - \beta$ presenta caratteristiche di lavorabilità peggiori delle leghe di tipo α ma migliori delle leghe di tipo β . Durante la lavorazione dovrebbero essere utilizzati utensili in carburo di tungsteno o utensili ad alta velocità al cobalto. Le migliori condizioni di lavorazioni prevedono basse velocità di taglio, alte velocità di avanzamento e grandi quantità di fluido da taglio non clorurato. La bassa conduttività termica del titanio inibisce la dispersione di calore attraverso il pezzo stesso, si rende quindi necessaria una abbondante refrigerazione del lavorato.

Saldatura La lega può essere saldata utilizzando materiale di apporto sempre di Ti 6Al-4V, per evitare l'ossidazione la saldatura deve essere schermata, il processo di saldatura più utilizzato è la saldatura TIG ma può anche essere saldato con successo usando la saldatura ad arco al plasma, la saldatura a punti, a fascio di elettroni, a fascio laser, a resistenza e la saldatura a diffusione.

Trattamenti termici

Solubilizzazione La combinazione di solubilizzazione ad elevate temperature e invecchiamento permette di migliorare le caratteristiche meccaniche della lega di oltre il 35% rispetto alla condizione ricotta. Le temperature di solubilizzazione variano tra i 900°C per le lamiere e i 950°C per i tondi e i pezzi massivi, maggiore è la temperatura di trattamento termico, maggiore è la presenza della fase β e quindi minore sarà la concentrazione del vanadio come β -stabilizzante, questo comporta che in raffreddamento la fase beta diviene instabile e quindi in tempra si trasforma in una struttura alfa di tipo martensitico (aciculare) chiamata α -prime, si ottiene quindi una struttura di α -primaria equiasica e α -prime. Se la solubilizzazione avviene a temperature inferiori si ha una minore quantità di fase β e quindi una maggiore concentrazione di vanadio che nel raffreddamento tende a ritardare la trasformazione della fase β in α -martensitica, si ha quindi una matrice di fase α con fase β -ritenuta. Con temperature ancora maggiori, oltre a quella di β -transus, si ha una struttura composta per il 100% da β -trasformata, tale struttura presenta massima resistenza meccanica dopo l'invecchiamento ma duttilità molto bassa. La tempra di solubilizzazione è tanto più efficace quanto più drastica è la velocità di raffreddamento, viene solitamente utilizzata acqua come mezzo temprante. Il tempo di passaggio dal forno di riscaldamento al bagno di tempra deve essere il più breve possibile. Se la tempra non è sufficientemente drastica si forma una fase intermedia detta omega molto fragile, per evitarla occorre incrementare la velocità di tempra e sottoporre subito il pezzo ad invecchiamento a 425°C in modo da trasformarla in α -prime.

Invecchiamento La temperatura di invecchiamento è compresa tra 425°C e 650°C per tempi variabili tra 4 e 8 ore. Durante l'invecchiamento si ha indurimento per precipitazione e decomposizione della fase beta soprasatura proveniente dalla tempra. Il massimo delle caratteristiche meccaniche di resistenza a trazione ed allo snervamento lo si ottiene a temperature intorno ai 500°C.[15]

Applicazioni in ambito aerospaziale

Grazie alle eccezionali caratteristiche meccaniche specifiche, di corrosione e prestazioni ad elevate temperature il titanio è materiale largamente utilizzato in ambito aerospaziale, settore che ne rappresenta il maggiore mercato. Le applicazioni di maggiore interesse sono in componenti dei propulsori (rotori, statori, condotti interni) e strutturali (ala, carrello di atterraggio) sottoposti a temperature fino a 500°C.

Nota Fonte Dati

Tutti i dati riportati sono stati estrapolati dalle fonti riportate in bibliografia [7] [15] [28] [51]

2.2 Trattamenti Termici

In questa sezione vengono riportati i principali trattamenti termici utilizzati nella produzione di viteria critica, la conoscenza dei processi e dei loro effetti sui materiali risulta necessaria per poter comprendere le caratteristiche indagate nel corso dell'analisi metallografica. Per trattamenti termici si intendono quei cicli termici di riscaldamento, mantenimento e raffreddamento eseguiti sui semilavorati o sui pezzi finiti per modificarne microstruttura e quindi le proprietà meccaniche. I trattamenti termici possono essere classificati in funzione delle temperature raggiunte in:

- Trattamenti termici che prevedono il superamento dei punti critici.
- Trattamenti termici sub-critici.

Di seguito verranno indagati due trattamenti termici con superamento dei punti critici: solubilizzazione e tempra, e due trattamenti subcritici: invecchiamento e rinvenimento.

2.2.1 Solubilizzazione

La solubilizzazione è un trattamento termico che permette ai precipitati ed agli alliganti di dissolversi in una soluzione sovrasatura in maniera omogenea. Il materiale viene riscaldato a temperature elevate, superiori a quelle di austenitizzazione, mantenuto a tali temperature per un tempo sufficiente a rendere la temperatura omogenea nel pezzo e permettere la solubilizzazione dei precipitati ed infine raffreddato velocemente. Il rapido raffreddamento è necessario per evitare che le specie solubilizzate precipitino nuovamente, come avverrebbe con un raffreddamento lento. Il processo di solubilizzazione ha anche lo scopo di ripristinare la microstruttura originale del metallo dopo le lavorazioni meccaniche e prima del processo di invecchiamento, anche in questo caso è di fondamentale importanza che si raggiunga la temperatura desiderata in tutto il pezzo e che sia mantenuta per un tempo sufficiente ad eliminare le alterazioni strutturali. Il tempo e la temperatura di solubilizzazione devono essere opportunamente calcolati per evitare effetti negativi secondari come l'accrescimento della dimensione del grano.

Solubilizzazione di acciai martensitici

Gli acciai inossidabili martensitici indurenti per precipitazione introdotti in precedenza (13-8 PH, 15-5 PH e 17-4 PH) vengono solitamente forniti nella forma di semilavorati già sottoposti ad un trattamento di solubilizzazione, così facendo il materiale presenta una bassa durezza ed una discreta deformabilità. Per questo tipo di materiali, avendo temperature M_f^{xv} dell'ordine di quelle ambiente, con il rapido raffreddamento in aria si ottiene una struttura prevalentemente martensitica.

Si prenda il diagramma di stato ferro carbonio in Figura 2.1, per semplicità non verranno considerati gli effetti degli alliganti, ipotizzando di avere un materiale ipoeutetoidico come 17-4 PH, con una temperatura di trattamento di circa 1000°C ed un tempo di permanenza sufficiente il materiale si troverebbe in una condizione di equilibrio costituita da sola austenite.

Prendendo ora, a titolo esemplificativo, il diagramma CTT relativo ad un acciaio ipoeutetoidico in Figura 2.2 e seguendo la curva T_4 , relativa ad un raffreddamento a velocità maggiore di quella critica, si nota come l'austenite si trasformi quasi istantaneamente in martensite non avendo il tempo per trasformarsi prima parzialmente in ferrite e poi in ferrite e perlite, come per la curva T_1 . In particolare il rapido raffreddamento, a velocità maggiori di quella critica superiore, comporta l'impossibilità di diffusione del carbonio all'esterno del reticolo con la conseguente formazione di carburi. Il reticolo andando incontro alla naturale trasformazione da cubica a facce centrate (FCC) della fase γ a cubica a corpo centrato (BCC) della fase α viene deformato dalla presenza degli atomi di carbonio, ne deriva quindi un riarrangiamento degli atomi che si dispongono secondo una struttura tetragonale a corpo centrato (BCT). La martensite presenta quindi stessa composizione chimica dell'austenite da cui si è originata ma diverso reticolo.

^{xv}21°C per 17-4 PH

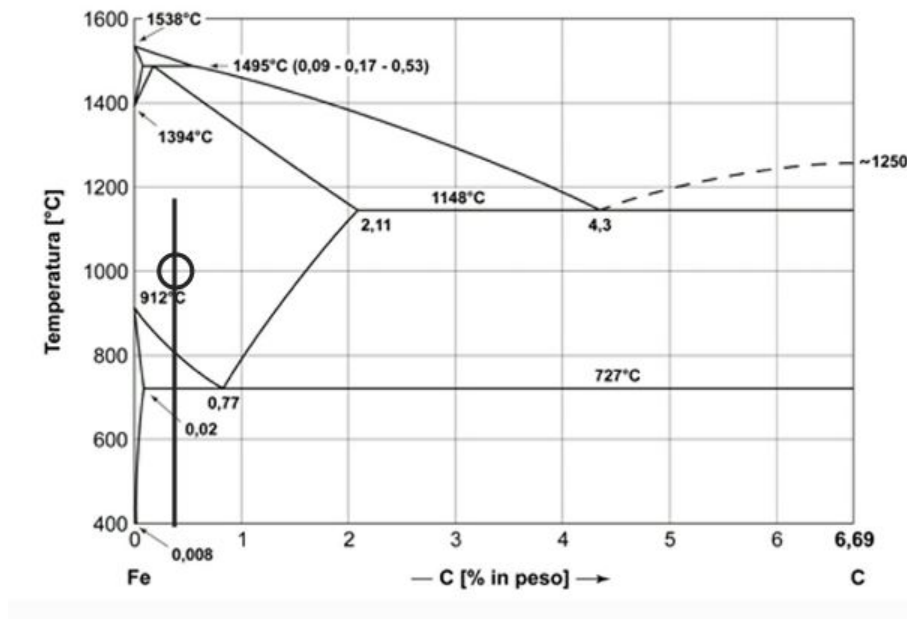


Figura 2.1: Diagramma Ferro Carbonio

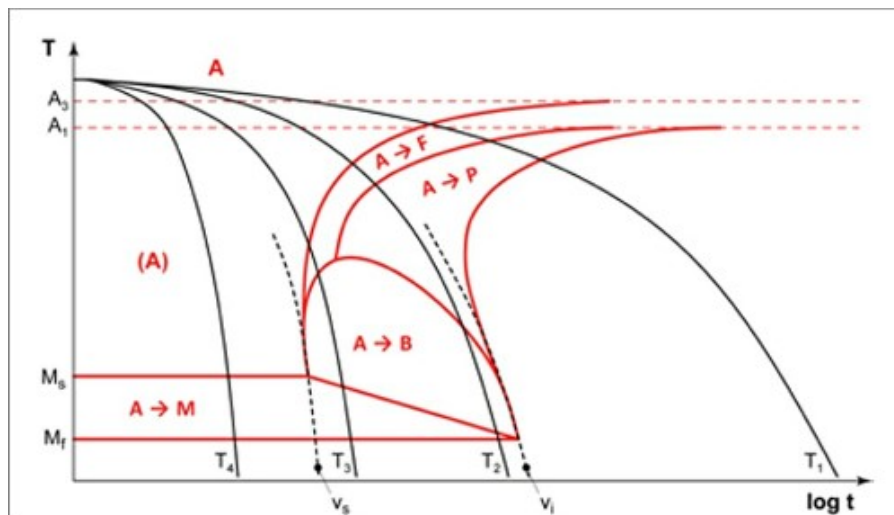


Figura 2.2: Diagramma CCT acciaio ipoeutetoidico

2.2.2 Tempra

Il processo di tempra ha come scopo l'ottenimento di una struttura martensitica. Il processo prevede il riscaldamento e il mantenimento del materiale a temperatura maggiore del punto critico A_3 per ottenere la trasformazione della microstruttura in austenite seguiti da un rapido raffreddamento con velocità maggiore di quella critica per inibire la trasformazione in perlite ed ottenere una struttura martensitica (il processo di trasformazione è lo stesso riportato nella sezione precedente). Il raffreddamento deve essere svolto con un mezzo opportuno per l'acciaio in questione, se per gli acciai auto-tempranti è sufficiente l'aria per altri sono necessari specifici mezzi tempranti come acqua e olio. Il trattamento di tempra dona al pezzo una microstruttura martensitica estremamente dura e resistente ma allo stesso tempo fragile e con uno stato tensionale residuo di notevole entità causato dal veloce raffreddamento, è quindi spesso necessario un ulteriore trattamento di rinvenimento.

Per gli acciai inossidabili martensitici il trattamento di tempra è compreso in quello di solubilizzazione, per altri tipi di acciai sottoposti a ricottura la tempra rappresenta un ulteriore trattamento termico. Il trattamento di tempra ideale prevede la trasformazione completa della microstruttura in tutto il pezzo in martensite, nella realtà questo accade solo per parti molto piccole, in sezioni maggiori si

ha una diversa velocità di raffreddamento, maggiore per la parte più esterna a contatto con il mezzo temprante e via via minore muovendosi verso il cuore del pezzo. Con velocità di raffreddamento decrescenti muovendosi lungo la sezione del pezzo vi è il rischio che diventino inferiori a quella critica comportando la formazione di microstrutture diverse come bainite, ferrite o perlite. Una microstruttura non uniforme comporta anche una disomogeneità delle proprietà meccaniche della parte.

La microstruttura martensitica (di piena tempra e non rinvenuta) garantisce proprietà meccaniche uniformi e dipendenti solamente dalla composizione chimica¹ e non dalla dimensione del grano^{xvi}. Un materiale risulta tanto più temprabile tanto più uniformi risultano le velocità di raffreddamento del pezzo al variare della distanza dal cuore, in altre parole la temprabilità di un materiale è l'attitudine dello stesso a formare martensite lungo la sezione. La temprabilità è una proprietà indipendente dalla forma e dal mezzo di tempra e funzione unicamente della natura e della composizione dell'acciaio: aumenta al crescere del quantitativo degli elementi in lega, compreso il carbonio, e al crescere della dimensione media del grano cristallino.

La differente velocità di raffreddamento lungo la sezione del pezzo è anche causa delle tensioni residue indicate in precedenza, in particolare il volume specifico della martensite è maggiore rispetto a quello dell'austenite e avvenendo la trasformazione prima sulla superficie e poi all'interno del pezzo si vengono a creare stati di tensione di trazione sulla superficie e di compressione al cuore. Lo stato tensionale instaurato nei casi più gravi può comportare la formazione di cricche e la deformazione del pezzo. Il livello delle autotensioni che si sviluppano aumenta al crescere del gradiente termico che si instaura nel componente durante il raffreddamento e dipende da:

- Drasticità del mezzo temprante: più è drastico il mezzo temprante maggiori sono le tensioni residue;
- Dimensione e geometria dei semilavorati: maggiori sono le dimensioni o la complessità del pezzo maggiori sono le tensioni residue;

Grande attenzione deve essere posta nella scelta del metallo e del mezzo temprante in funzione della geometria e delle dimensioni del pezzo, per pezzi particolarmente grandi o complessi è preferibile utilizzare materiali con alta temprabilità così da poter utilizzare fluidi poco drastici mentre pezzi di piccole dimensioni possono essere prodotti in materiali a bassa temprabilità e spenti con fluidi più drastici.

2.2.3 Invecchiamento

L'invecchiamento è un trattamento termico svolto a temperature sub-critiche con lo scopo di permettere la diffusione degli alliganti solubilizzati nella fase di solubilizzazione. Grazie a temperature maggiori di quelle ambiente si ha un incremento della diffusione degli atomi di elementi alliganti che reagendo comportano la formazione di precipitati finissimi di carburi ed intermetallici che migliorano le caratteristiche meccaniche del materiale. Il processo è costituito da un riscaldamento, da un mantenimento per tempi variabili tra 1 e 4 ore ed infine da un raffreddamento solitamente ad aria. Le temperature del trattamento influenzano notevolmente le proprietà meccaniche ottenibili con questo trattamento:

- Basse temperature per tempi prolungati permettono di ottenere precipitati molto fini distribuiti uniformemente;
- Temperature medie permettono di ottenere buoni livelli di indurimento in tempi minori a discapito però della dimensione e dell'uniformità dei precipitati che ingrandendosi divengono meno efficaci;
- Temperature elevate portano alla formazione di grossi precipitati che si separano dal reticolo cristallino e non deformandolo più causano una perdita dell'efficacia del trattamento;

^{xvi}La martensite si forma per riorganizzazione del reticolo cristallino e non per nucleazione e accrescimento, per cui non vi è motivo distinguere tipi diversi di martensite in funzione della dimensione del grano in quanto la durezza è solo funzione della distorsione del reticolo e di conseguenza del tenore di carbonio.

I tempi e le temperature di invecchiamento devono quindi essere opportunamente calibrate per evitare di sovrainvecchiare il metallo causando la coalescenza dei precipitati ed un peggioramento delle proprietà meccaniche.

Dal momento che le temperature a cui avviene il processo sono relativamente basse non si hanno eccessive variazioni dimensionali dei pezzi per cui è un trattamento che solitamente viene svolto su pezzi già lavorati.

L'invecchiamento rappresenta l'ultimo passaggio del processo di indurimento per precipitazione visto per le leghe 13-8 PH, 15-5 PH e 17-4 PH, i primi due passaggi sono appunto solubilizzazione e tempra. Per 15-5 PH e 17-4 PH si ha indurimento per precipitati a base di rame mentre per 13-8 PH a base di alluminio³⁸. Per Inconel 718 si ha precipitazione nella matrice austenica γ delle fasi γ' (intermetallico misto coerente $Ni_3(Al, Ti)$) e γ'' (intermetallico Ni_3Nb che presenta una struttura TCC). Per MP35N si ha la precipitazione di particelle di Co_3Mo nate per nucleazione a seguito della segregazione degli atomi di molibdeno all'interfaccia tra la matrice FCC e le piastrine HCP.

2.2.4 Rinvenimento

Il rinvenimento è un trattamento termico a temperature subcritiche effettuato solitamente a seguito della tempra per rendere il pezzo meno fragile e quindi meno incline a rottura improvvisa. La combinazione del trattamento di tempra e rinvenimento prende il nome di bonifica. Il trattamento consiste di un lento riscaldamento fino a temperature dell'ordine di 600°C-650°C seguito da un mantenimento ad un tempo variabile in funzione della dimensione del pezzo ed infine un raffreddamento solitamente ad aria o olio. Le temperature di rinvenimento possono variare in un intervallo molto ampio in funzione dello scopo del trattamento stesso ma sono da evitare gli intervalli 250°C-380°C per il fenomeno dell'infragilimento della martensite rinvenuta e 480°C-570°C a causa del fenomeno di degrado chiamato malattia di Krupp, se il trattamento viene svolto a queste temperature si ottengono pezzi con bassissima resilienza e molto inclini alla rottura fragile.

Gli scopi del trattamento sono solitamente due:

- ridurre le tensioni residue dovute alla tempra;
- attenuare la fragilità della martensite di piena tempra;

La prima finalità può essere ottenuta anche con un trattamento a bassa temperatura (150°C-200°C) chiamato distensione. La seconda finalità si ottiene con una progressiva trasformazione della martensite di piena tempra in martensite rinvenuta: sopra gli 80°C il carbonio intrappolato nella cella tetragonale della martensite fuoriesce per diffusione, la deformazione della cella diminuisce sempre più fino ad assumere la configurazione cubica a corpo centrato chiamata martensite rinvenuta. Il carbonio fuoriuscito si lega al ferro formando carburi ϵ con formula $Fe_{2-3}C$ per temperature di rinvenimento tra 100°C e 200°C, carburi aciculari Fe_3C per temperature comprese tra 200°C e 400°C che divengono globulari per temperature fino a 650°C, oltre si ha coalescenza dei carburi che incrementano di dimensione. Il trattamento di rinvenimento ha effetto anche sull'eventuale austenite residua che nell'intervallo 200°C-400°C diviene bainite mentre tra i 450°C e i 650°C diviene martensite con il successivo raffreddamento. Il miglioramento della resistenza alla rottura fragile è accompagnato però da una diminuzione della durezza.

2.2.5 Influenza dei precipitati sulle proprietà meccaniche

Nel processo di invecchiamento è stato indicato che le proprietà meccaniche del materiale vengono migliorate con un processo di precipitazione. Questo processo viene chiamato rafforzamento per precipitazione e consiste nella dispersione all'interno della matrice metallica di finissimi precipitati, questi possono essere:

- Coerenti: presentano un reticolo con orientamento analogo a quello circostante, la dislocazione viene rallentata nel passaggio attraverso la particella che viene tagliata in due (effetto Friedel-Fleischer)¹;

- Incoerenti: presentano un reticolo con orientamento diverso rispetto a quello circostante, la dislocazione non potendo attraversare la particella la accerchia e se ne distacca creando una seconda dislocazione attorno alla particella, l'effetto è quindi duplice, le dislocazioni vengono rallentate e moltiplicate (meccanismo di Orowan)¹. L'incremento del numero di dislocazioni comporta un maggiore intralcio tra le stesse che perdono conseguentemente di mobilità;

2.2.6 Influenza della dimensione del grano sulle proprietà meccaniche

Nei trattamenti con temperature elevate come la solubilizzazione i tempi e le temperature per il processo vengono individuate per evitare l'accrescimento delle dimensioni del grano, questo perché il bordo del grano rappresenta un ostacolo al movimento delle dislocazioni opponendo una resistenza maggiore rispetto alla parte interna del grano stesso. Durante la fase di solidificazione i grani vengono a formarsi a partire da punti di nucleazione diversi e crescono in direzioni casuali, ne consegue che se la struttura interna del grano, a meno di difetti puntuali e di linea, risulta essere regolare, l'interfaccia tra grani a causa della crescita disordinata risulta essere irregolare. Questa irregolarità comporta una minore densità atomica ed una maggiore energia libera degli atomi rendendo il bordo di grano molto più resistente alla deformazione plastica rispetto al cuore dello stesso e anche molto più reattivo favorendo fenomeni diffusivi e le precipitazioni. Inoltre, le dislocazioni tendono ad arrestarsi al bordo dei grani a causa del differente orientamento del reticolo cristallino dei grani adiacenti che ne impedisce la propagazione. Ne consegue che avendo grani di dimensione minore si avrà una maggiore densità di bordi di grano per unità di volume e di conseguenza un minore libero cammino medio delle dislocazioni con conseguente incremento di resistenza e diminuzione della deformabilità del reticolo.

2.3 Processi meccanici di produzione di un bullone

In questa sezione vengono introdotti i processi meccanici di formazione testa e filetto di un bullone, in particolare i processi di forgiatura e rullatura.

2.3.1 Forgiatura

Per forgiatura si intende una famiglia di processi produttivi, per componenti solitamente di lunghezza limitata, che prevedono la deformazione plastica del pezzo applicando forze di compressione mediante l'utilizzo di stampi. La lavorazione viene definita "a freddo" se svolta a temperatura ambiente mentre "a tiepido" e "a caldo" se svolte a temperature superiori, nella tabella 2.26 sono riportati i range di temperatura omologa^{xvii} per le varie lavorazioni.

Processo	$\frac{T}{T_m}$
a freddo	< 0.3
a tiepido	da 0.3 a 0.5
a caldo	> 0.5

Tabella 2.26: Processi e temperature

Forgiatura a freddo

Uno dei processi di forgiatura a freddo più comunemente utilizzato per la formazione della testa della vite è la intestatura o ricalcatura (*Heading*), il processo è realizzato solitamente su di un filo o una barra cilindrica con lo scopo di incrementarne la sezione trasversale.

L'operazione di ricalcatura viene realizzata con l'utilizzo di una macchina chiamata ricalcatrice/intestatrice (*Header*) dotata di uno stampo e uno o più punzoni, il pezzo cilindrico opportunamente tagliato viene posto all'interno dello stampo e compresso con l'utilizzo di punzoni. La pressione con cui avviene il processo deve essere maggiore del limite elastico del materiale così da indurre un flusso plastico che

^{xvii}temperatura omologa: T/T_m rapporto tra temperatura di lavorazione e temperatura di fusione del metallo

faccia assumere al pezzo la forma imposta dallo stampo e dal punzone. Nel caso in cui la deformazione da apportare al pezzo sia consistente è possibile utilizzare in sequenza più punzoni fino al raggiungimento della forma desiderata. Durante la fase di ricalcatura, con l'utilizzo di uno stampo dotato di orifizio di diversa sezione è possibile modificare il diametro del gambo della vite attraverso un processo di estrusione.

Il processo è riassumibile con le seguenti fasi:

1. il pezzo viene tagliato e posto nello stampo o in linea con una cavità
2. il pezzo viene forzato nella forma desiderata con una o più operazioni di pressatura con il punzone o estrusione
3. la parte viene espulsa dallo stampo

È di fondamentale importanza il calcolo dell'esatto volume di metallo da introdurre nello stampo per evitare nel caso di poco materiale la mancata adesione allo stampo oppure nel caso di un eccesso la deformazione della parte, la formazione di sbavature o peggio la rottura dello stampo.

Con questo tipo di lavorazione vi è la capacità di formare con successo pezzi a freddo da metalli duri, compresi gli acciai inossidabili e le leghe ad alta temperatura. Un ulteriore grande vantaggio di questo processo è dato dalla possibilità di produrre in modo economico un grande volume di pezzi limitando i costi di riscaldamento del pezzo e il volume di materiale di risulta.

Il processo però presenta anche una serie di svantaggi, la produzione di stampi e punzoni può essere particolarmente costosa quindi nel caso siano necessari diversi punzoni i costi per la loro produzione comportano volumi minimi di produzioni potenzialmente elevati, in secondo luogo non tutti i materiali si prestano a questo tipo di lavorazione, soprattutto se molto resistenti o se molto induribili per incrudimento. La forgiatura a freddo è anche limitata dalla deformazione massima del materiale per cui elementi di grosse dimensioni o che richiedano alti gradi di deformazione non si prestano molto a questa pratica.



Figura 2.3: Processo di ricalcatura

Effetti sulla microstruttura I processi di formazione a freddo permettono di massimizzare le proprietà metallurgiche del pezzo, il processo di estrusione comporta lo scorrimento del flusso di metallo lungo l'asse del pezzo grezzo comportando una deformazione del grano che si allunga nella direzione del gambo della vite donando al pezzo maggiore resistenza nella direzione assiale ^{xviii}. Per questo motivo è di fondamentale importanza progettare il processo di lavorazione in modo da ottenere un flusso di materiale che permetta di migliorare le proprietà meccaniche nella direzione di massima sollecitazione del componente. Per quanto riguarda la testa della vite, la deformazione plastica a differenza dei processi per asportazione di truciolo non causa il taglio della struttura dei grani ma solo una deformazione di questi non comportandone quindi un indebolimento. Le basse temperature a cui avviene il processo non comportano ricristallizzazioni o accrescimento del grano quindi i pezzi forgiati a freddo solitamente vanno incontro ad incrudimento e presentano grani più fini rispetto a quelli lavorati a caldo.³⁶ Si ha quindi una struttura con grani allineati e deformati in funzione della direzione del flusso plastico e con una densità di dislocazioni maggiore che comporta l'indurimento per incrudimento.

^{xviii} parte dell'orientamento assiale dei grani è solitamente già presente nei materiali di partenza a causa della lavorazione di rullatura applicata nella produzione dei semilavorati



Figura 2.4: Effetti sulla microstruttura dei processi di lavorazione

Forgiatura a caldo

Non sempre è possibile o economicamente conveniente svolgere le operazioni di formatura della testa della vite per deformazione plastica a freddo, in particolare per alcuni materiali particolarmente duri o per geometrie più complesse o di grandi dimensioni può essere necessario riscaldare preventivamente il pezzo. Con uno riscaldamento controllato è possibile incrementare la duttilità del pezzo rendendolo maggiormente formabile e meno esposto a frattura. Il mantenimento a temperature elevate permette anche di limitare od inibire il processo di incrudimento che porterebbe ad una minore duttilità del pezzo al procedere della lavorazione. Da un punto di vista economico il costo energetico per l'incremento di temperatura del pezzo può essere compensato da una minore energia necessaria per la deformazione dello stesso.

Il processo prevede un riscaldamento, spesso per induzione, ad una temperatura superiore a quella di ricristallizzazione e la lavorazione con utilizzo di stampi, presse e punzoni come indicato per la lavorazione a freddo, la principale differenza tra le due è rappresentata proprio dalla temperatura della parte lavorata e a volte dal riscaldamento degli stampi. L'utilizzo di stampi riscaldati alla temperatura del pezzo o leggermente inferiore evita il raffreddamento del materiale a contatto con essi preservandone la fluidità e quindi la formabilità.

Alcuni materiali (es: superleghe) richiedono che la lavorazione avvenga in atmosfera controllata per evitare che le alte temperature favoriscano l'ossidazione del materiale. La lavorazione a caldo comporta anche alcuni svantaggi: la contrazione del pezzo in raffreddamento può comportare una minore precisione del pezzo prodotto e se non controllata anche deformazioni, la struttura dei grani potrebbe modificarsi durante la lavorazione divenendo disomogenea all'interno del lavorato ed infine vi potrebbero essere reazioni tra il metallo caldo e l'ambiente circostante³⁴.

Effetti sulla microstruttura Il processo di forgiatura a caldo mantiene alcuni dei vantaggi di quella a freddo rispetto alla lavorazione a macchina garantendo la continuità dei grani ma perdendo l'indurimento per incrudimento. La forgiatura a caldo comporta un generale affinamento del grano, in funzione dei tempi di mantenimento a temperature superiori a quella di ricristallizzazione si può andare incontro a questo fenomeno che tende a trasformare i grani allungati dalla deformazione plastica in grani equiassici⁴⁴. La lavorazione a caldo permette solitamente di ridurre o annullare completamente le porosità del materiale. Se il materiale lavorato è nella condizione post-colata la lavorazione a caldo permette di incrementare notevolmente le proprietà ingegneristiche del materiale passando da una struttura dendritica tipica del raffreddamento in stampo ad una con grani sferici fini.

2.3.2 Rullatura

Per rullatura si intende un processo particolare di laminazione in cui la deformazione plastica avviene attraverso il passaggio tra rulli sagomati, nella produzione delle viti la rullatura è una soluzione spesso utilizzata nella creazione del filetto. Il processo prevede il passaggio del pezzo, con diametro leggermente superiore al diametro medio della filettatura, tra cuscinetti filettati o rigati che sotto la pressione generata dalla macchina penetrano nel pezzo. La penetrazione dei rulli comporta lo spostamento plastico di materiale che dal bassofondo del profilo è costretto a spostarsi radialmente per formare le creste del profilo stesso. Come per la forgiatura della testa anche in questo caso non vi è asportazione di truciolo ma spostamento plastico di materiale che assume la forma dello stampo rappresentato in questo caso dal rullo.

Il processo di rullatura presenta numerosi vantaggi fra cui grandi velocità di lavorazione, risparmio di materiale grazie alla mancata produzione di trucioli e miglioramento delle proprietà meccaniche. Dal

momento che le fibre del materiale non vengono tagliate ma deformate plasticamente costringendole a seguire il contorno della filettatura si ha un miglioramento di tutte le caratteristiche tecnologiche, la resistenza a trazione risulta essere il 10% maggiore rispetto allo stesso elemento prodotto per asportazione di materiale e la resistenza a fatica, grazie alla maggiore levigatezza della superficie e a tensioni residue di compressione, può aumentare anche del 75%⁵. Una differenza particolare tra i filetti tagliati e quelli rullati è la cima della cresta del filetto: nell'operazione di rullatura il materiale viene spinto verso la radice del profilo del rullo. Il materiale sui bordi esterni si allunga più velocemente del centro, quando il materiale incontra la radice della filiera, i bordi esterni si arricciano verso l'interno, formando la cresta. Il centro della cresta ha una leggera concavità come visibile nella Figura 2.6. Questa concavità fa parte dell'interfaccia di gioco tra le filettature di accoppiamento e non influenza l'accoppiamento o la funzione del giunto filettato.

La rullatura dei filetti presenta anche diversi limiti:

- non è adatta a pezzi cavi in quanto facilmente deformabili;
- non è applicabile a materiali poco duttili con coefficiente di allungamento inferiore all'8%;
- è difficilmente applicabile a materiali duri aventi durezza superficiale superiore a 35 HRC;
- con rapporti profondità-diametro del filetto superiori al 15% vi è il rischio di ottenere pezzi storti;
- dal momento che non vi è asportazione di materiale ma solo spostamento di una ben definita quantità di materiale, la precisione del pezzo pre-rullatura deve essere molto elevata, sono richieste quindi operazioni preliminari più complesse rispetto agli altri metodi di generazione dei filetti;
- il costo per la produzione dei rulli è elevato di conseguenza servono volumi di produzione elevati per rientrare del loro costo;

Il processo di rullatura può avvenire con rulli circolari a due o tre pezzi, con pettini piani oppure con rullo mobile e segmento fisso, la schematizzazione di questi sistemi è riportata nella figura 2.5.

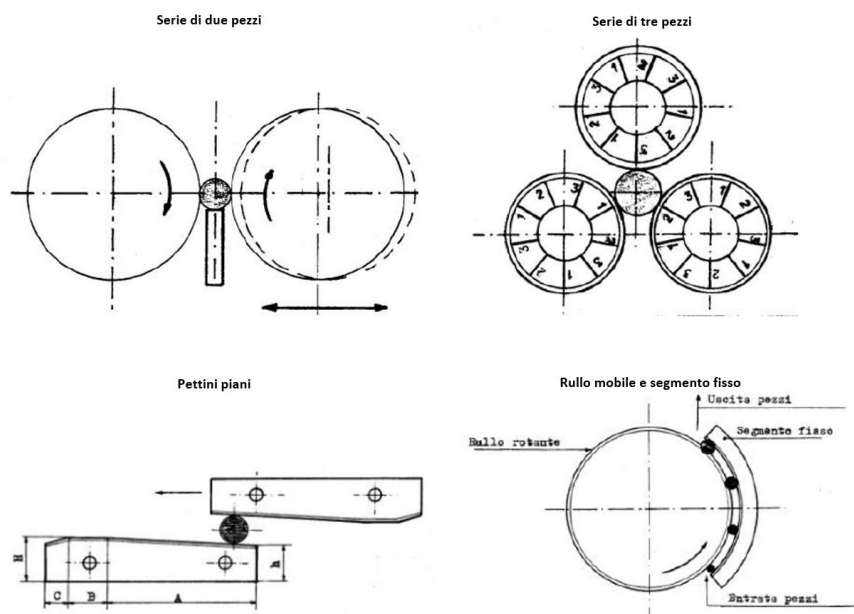


Figura 2.5: Esempi di sistemi per la rullatura

Effetti sulla microstruttura Gli effetti sulla microstruttura sono in larga parte paragonabili a quelli indicati per la forgiatura a freddo, la deformazione plastica permette infatti di ottenere un duplice effetto positivo, viene infatti garantita la continuità dei grani, come visibile in figura 2.7, e allo stesso tempo si ha il classico indurimento per incrudimento ottenuto grazie a deformazioni plastiche a

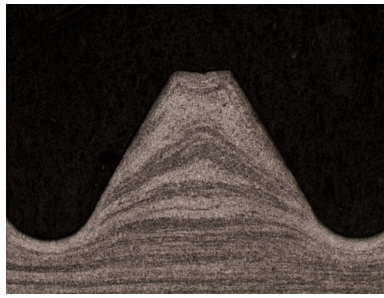


Figura 2.6: Concavità della cresta

freddo. Si ha quindi una struttura con grani allineati e deformati in funzione della direzione del flusso plastico e con una densità di dislocazioni maggiore che comporta l'indurimento per incrudimento.

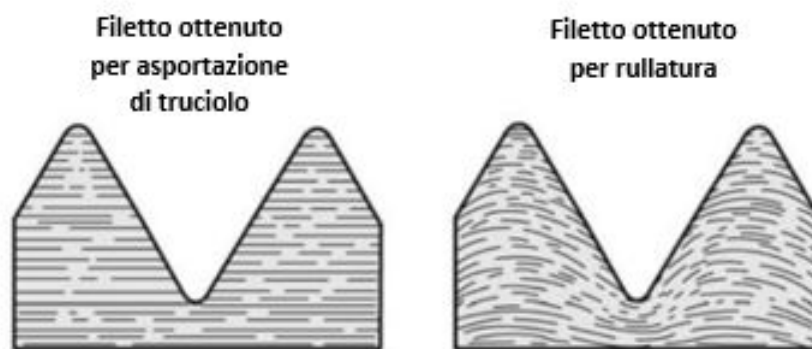


Figura 2.7

2.3.3 Rullatura raggio sottotesta

I bulloni vengono forgiati con un certo sovrametallo sul gambo che deve essere rimosso in un secondo momento con operazioni di taglio che vanno a rompere la continuità dei grani causando quindi una diminuzione della resistenza della zona, allo stesso tempo la stessa operazione di forgiatura non permette un controllo preciso della distribuzione delle fibre nella zona di raccordo tra gambo e sottotesta della vite, l'effetto combinato del processo di tornitura e la distribuzione non ottimale delle fibre comporta una maggiore suscettibilità della zona rispetto al resto della vite alla rottura. Per ovviare a questa problematica e uniformare le prestazioni meccaniche della parte si effettua un trattamento di rullatura che permette un controllo della deformazione impressa al pezzo così da creare una configurazione microstrutturale più prestazionale, il processo permette inoltre di creare uno stato tensionale residuo di compressione utile anch'esso a contrastare le rotture per fatica. Il processo avviene con utilizzo di macchine apposite o con macchina utensile dotate di uno o più rullini inclinati di 45° rispetto al gambo della vite e con raggio uguale a quello da imprimere al raccordo tra gambo e testa della vite. L'angolo di inclinazione è scelto in modo da imprimere una uguale forza nelle varie direzioni così da generare la deformazione richiesta. La vite viene quindi posta in rotazione intorno al proprio asse e compressa contro il rullino, i rullini e la zona lavorata vengono solitamente lubrificati. Il processo prevede schiacciamento e spostamento di materiale che comportano, in funzione dell'entità della deformazione, la nascita di rigonfiamenti nel sottotesta e sul gambo. Il carico applicato è il principale parametro della lavorazione e può essere ottimizzato per indurre il massimo incremento delle prestazioni a fatica come evidenziato nello studio [3], in particolare per due materiali (36NiCrMo e 42 CrMoV) sono stati effettuati test a fatica su viti sottoposte a rullatura del raggio sottotesta con carichi diversi L1, L2 35% maggiore di L1 ed L3 70% maggiore di L1 per 36 NiCrMo e V1, V2 10% maggiore di V1 e V3 45% maggiore di V1 per 42 CrMoV e confrontati con viti non lavorate nel raggio sottotesta, i risultati sono riportati nella figura 2.9. È possibile notare come per il 36 NiCrMo si abbia un peggioramento delle prestazioni con il carico L3 per cui il carico ottimale risulta essere superato.

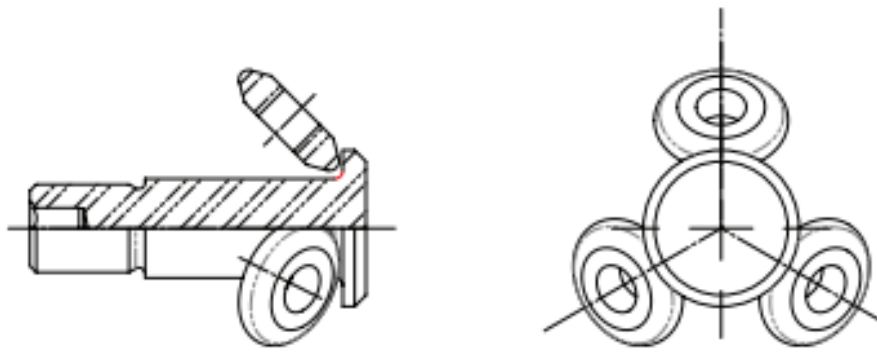


Figura 2.8: Esempio di schema di rullatura del raggio sottotesta/

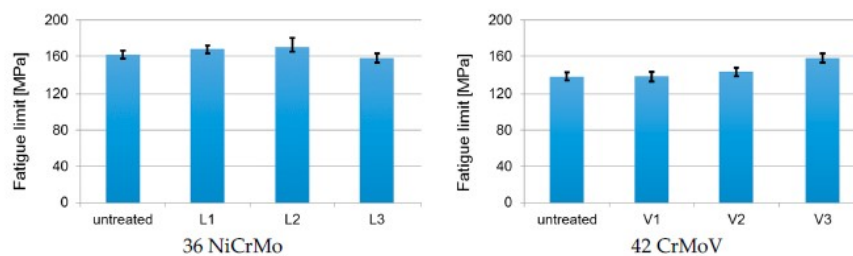


Figura 2.9: Effetto del carico di rullatura sul limite a fatica

Effetti sulla microstruttura

Come tutti i processi di deformazione plastica a freddo anche la rullatura del raggio sottotesta comporta un incrudimento che incrementa la resistenza meccanica del pezzo grazie ad un maggior numero di dislocazioni che interferendo tra loro bloccano i relativi scorrimenti. Il processo comporta uno spostamento plastico di materiale e di conseguenza una deformazione dei grani che tendono ad allinearsi con una configurazione ottimale per la resistenza del pezzo. Il processo di rullatura ha un effetto positivo anche sulla finitura superficiale infatti rimuovendo i microintagli che possono fungere da punto di innesco per le cricche si ha un ulteriore miglioramento della resistenza a fatica. A seconda del materiale della superficie trattata si possono avere anche altre modifiche derivate da trasformazioni martensitiche indotte da tensioni e/o trasformazioni in strutture cristallografiche diverse.

2.3.4 Tornitura e fresatura

Tornitura

La tornitura è un processo di produzione di pezzi assialsimmetrici per asportazione di truciolo che prevede la messa in rotazione del pezzo e l'asportazione di materiale con un utensile. In particolare il pezzo viene ancorato con un mandrino ed eventualmente una contropunta e messo in rotazione dalla testa motrice, l'utensile è sorretto dal portautensili che è fissato alla slitta trasversale a sua volta ancorata al carro. Questa struttura permette il controllo dell'utensile sia in direzione parallela che ortogonale al pezzo consentendo diversi tipi di lavorazioni:

- sfacciatura: l'utensile viene mosso radialmente ad una estremità del pezzo per creare una superficie piana;
- tornitura cilindrica: l'utensile viene mosso parallelamente al pezzo, il moto di taglio è rotazionale, quello di avanzamento è traslazionale, la combinazione dei due è un moto elicoidale;
- tornitura conica: il moto dell'utensile non è parallelo al pezzo ma angolato con una combinazione di spostamento radiale e parallelo creando così una forma conica;

- tornitura di copiatura o contornatura: l'utensile si muove in direzione radiale e parallela all'asse di rotazione seguendo un contorno sagomato;
- tornitura di forma/formatura: l'utensile impartisce la propria forma al pezzo mediante un moto puramente radiale;
- smussatura: con lo spigolo tagliente dell'utensile si rimuove l'angolo sul bordo del pezzo;
- troncatura: l'utensile viene mosso radialmente all'interno del pezzo fino al taglio di una estremità;
- filettatura: un utensile a punta opportunamente sagomata viene mosso parallelamente al pezzo scavando quindi un solco elicoidale che costituisce il filetto;
- foratura: una punta viene fatta avanzare parallelamente al pezzo lungo l'asse di rotazione ricavando quindi un foro sull'estremità libera del pezzo;
- barenatura: con un movimento analogo a quello di foratura viene inserito un utensile monota-
gliante all'interno di un foro già presente;

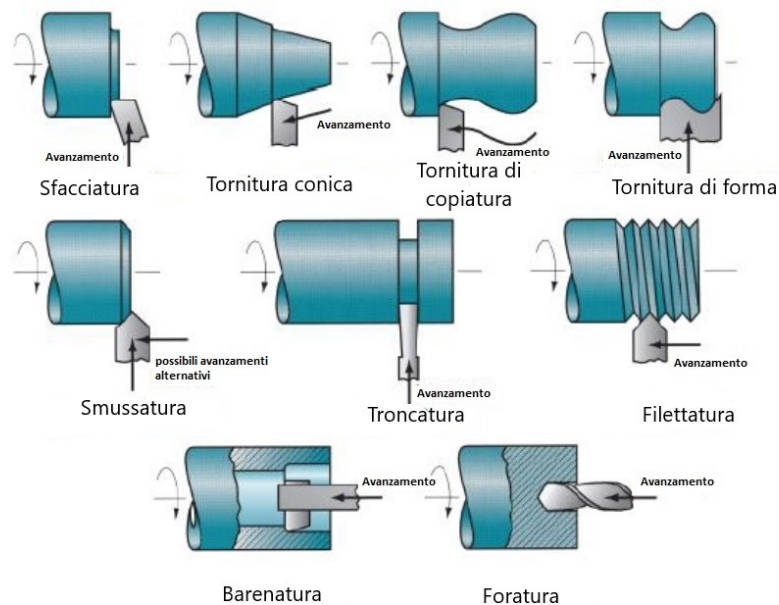


Figura 2.10: Tipologie di tornitura

Nel caso di componenti particolarmente pesanti in cui le forze di inflessione dovute alla massa causerebbero la rottura del pezzo o il danneggiamento dei cuscinetti del mandrino viene utilizzato il tornio verticale.

Fresatura

La fresatura è una lavorazione per asportazione di truciolo che si distingue dalla tornitura per il fatto che in questo caso è posto in rotazione l'utensile e non il pezzo. Un'altra differenza tra fresatura e tornitura è che la prima è una operazione a taglio interrotto infatti il singolo dente è impegnato a intervalli sul materiale avendo quindi continui cicli termici brevi di riscaldamento e raffreddamento che comportano maggiore stress termomeccanico sull'utensile, nella tornitura i cicli risultano essere notevolmente minori. Le fresatrici sono sempre costituite da un piano di lavoro e da un mandrino che sorregge e mette in rotazione la fresa, gli assi di possibile movimento del piano di lavoro ed eventualmente del mandrino determinano la funzionalità e il costo della macchina. Il caso più semplice è quello della fresatrice a banco fisso simplex dotata di un unico asse, si passa poi a quelle a colonna

orizzontale e verticale con 3 assi, aggiungendo un ulteriore asse che permette la rotazione del pezzo si ottiene la fresatrice universale, se si aggiunge un asse legato alla rotazione della testa su cui è montato il mandrino si ottiene la fresatrice a canotto che permette di lavorare superfici oblique. Nella figura 2.11 sono riportate illustrazioni delle macchine appena indicate. Il volume delimitato dalle distanze che la

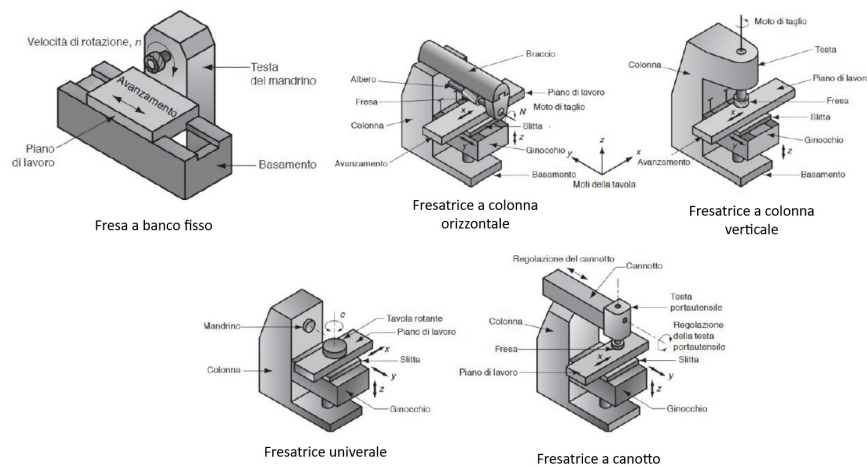


Figura 2.11: Esempi di fresatrici

macchina può raggiungere nelle tre dimensioni durante la lavorazione prende il nome di cubo di lavoro e rappresenta quindi un vincolo dimensionale da tenere in considerazione durante la progettazione. Il costo di queste macchine risulta tendenzialmente molto elevato e crescente in funzione del numero di assi controllabili poichè uniscono grande flessibilità ad una estrema precisione in tutte le direzioni di lavoro. Con la fresatura è possibile ottenere una vasta gamma di superfici:

- superfici piane;
- scanalature di forma semplice e complessa;
- smussi;
- sedi di linguette e chiavette;
- taglio di ruote dentate;

La fresa è un utensile multitagliante, di geometria cilindrica, posto in rotazione da un mandrino. I taglienti possono essere posti sulla laterale del cilindro per fresatura periferica oppure anche sulla base per la fresatura frontale.

Nella fresatura periferica l'asse di rotazione è parallelo alla superficie da lavorare, il moto di alimentazione può essere concorde o discorde con il senso di rotazione della fresa ottenendo rispettivamente una fresatura in concordanza o in opposizione. In figura 2.12 sono riportati alcuni esempi di fresatura periferica, in particolare la fresatura simultanea in cui vengono svolte contemporaneamente due lavorazioni e la fresatura di forma in cui nel pezzo viene ricavata una particolare geometria determinata dalla forma dell'utensile stesso. La fresatura frontale è adottata solitamente per la spianatura di superfici ed in questo caso solitamente per ragioni di stabilità sono utilizzate frese di dimensione maggiore rispetto al pezzo. Nel caso in cui si svolgano operazioni di contornatura oppure si ricavano tasche la fresa deve essere necessariamente più piccola del pezzo. Nella figura 2.13 sono riportati alcuni esempi di fresatura, oltre alla fresatura convenzionale si ha quella parziale che si estende solo su di un lato del pezzo, quella a candela con lo scopo di creare cave. La fresatura di tasche prevede invece il taglio della superficie frontale e laterale per ottenere tasche poco profonde su pezzi piani ed infine la contornatura di una superficie in cui con una fresa solitamente a punta sferica vengono create superfici non piane con un movimento a passo stretto lungo un percorso curvilineo.

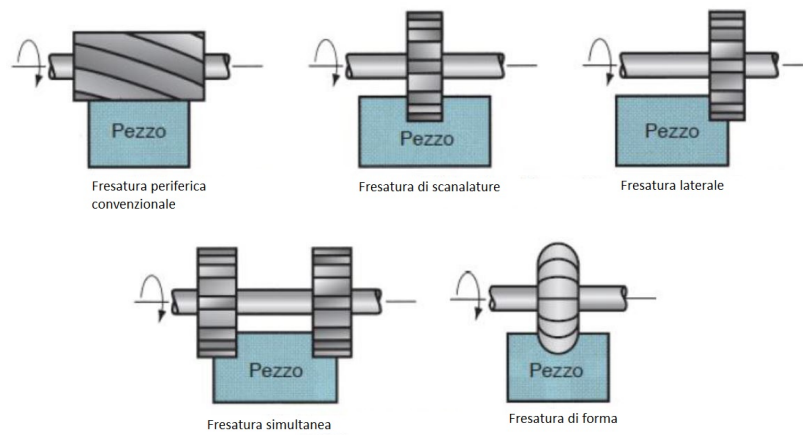


Figura 2.12: Esempi Fresatura periferica

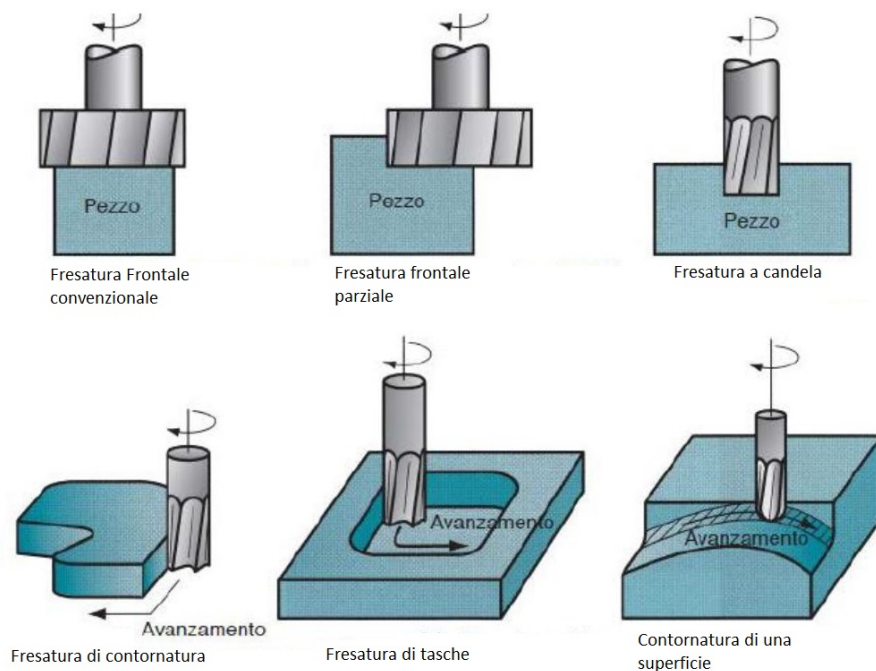


Figura 2.13: Esempi Fresatura frontale

Effetti sulla microstruttura delle lavorazioni per asportazione di truciolo

Come indicato in precedenza i processi di taglio non permettono di preservare la continuità dei grani che non vengono deformati ma tagliati, questo comporta a parità di forma ottenuta una minore resistenza della parte rispetto ad i pezzi ottenuti per forgiatura o rullatura. Da un punto di vista microstrutturale è possibile effettuare alcune considerazioni generali: i processi di lavorazione in vario modo possono comportare sia deformazioni plastiche che riscaldamento delle parti sottoposte a lavorazione, in particolare, con i processi di lavorazione ad alta velocità, le temperature raggiunte dalla superficie del pezzo a causa dell'attrito tendono a essere elevate. In generale le modifiche alla microstruttura si limitano ad una zona superficiale della parte fino ad una profondità media di circa $2\text{ }\mu\text{m}$ che tende ad assumere una colorazione biancastra. Le modifiche microstrutturali sono attribuibili principalmente a due fenomeni: il rapido riscaldamento e raffreddamento comporta variazioni di fase mentre la forte deformazione plastica porta ad un affinamento del grano⁴⁸. L'entità di questi fenomeni dipende in modo sostanziale dai parametri di lavorazione e dal materiale ma in generale portano ad un incremento della durezza del materiale.

Metallografia

La metallografia è la scienza che si occupa della caratterizzazione strutturale dei materiali metallici attraverso lo studio della morfologia cristallina. L'analisi microstrutturale di un materiale può essere svolta per diverse finalità:

- analisi delle microstrutture, individuazione delle fasi e verifica di conformità alle specifiche richieste;
- individuazione e studio delle origini di difetti come inclusioni, microvuoti e cricche;
- valutazione degli effetti sulla microstruttura dei processi di deformazione plastica a caldo e freddo, dei trattamenti termici e termomeccanici e verificarne la correttezza;
- studiare presenza e cause di fenomeni di degrado come la corrosione;
- valutazione dell'influenza delle condizioni di esercizio sul comportamento dei materiali metallici;
- analisi dei guasti;

Si parla di macrografia quando vengono utilizzate foto riproduzioni con ingrandimenti inferiori a 30x con scopo lo studio dell'aspetto superficiale, macrodifetti, fibratura e dendritismo, con ingrandimenti superiori si passa alla micrografia in cui vengono analizzati i grani cristallini, la tessitura, le inclusioni etc. con l'utilizzo di microscopio ottico (OM), microscopio elettronico a scansione (SEM) e a trasmissione (TEM). Per lo studio delle superfici di rottura, le analisi frattografiche, vengono utilizzati il microscopio elettronico a scansione (SEM) e il microscopio stereografico (SM). I microscopi sono in genere dotati di un sistema di acquisizione con cui ottenere immagini da sottoporre a software che procedono con l'analisi delle stesse.[39]

3.1 Tipologie di microscopio

La scelta del microscopio da utilizzare dipende da tre grandezze fondamentali:

- ingrandimento: incremento delle dimensioni di un oggetto a livello ottico;
- risoluzione: distanza minima tra due oggetti perchè possano essere distinti dal sistema ottico;
- profondità di campo: distanza dietro e davanti all'oggetto messo a fuoco a cui gli oggetti appaiono nitidi;

Microscopio ottico (OM)

Il microscopio ottico sfrutta le proprietà di riflessione della luce. La luce viene emessa da una sorgente ad elevata intensità, viene quindi centrata e collimata da diaframmi e condensatori e fatta incidere su uno specchio semiriflettente che la devia verso la superficie del campione attraverso la lente obbiettivo. La luce viene riflessa dalla superficie, attraversa lo specchio e si concentra nel fuoco della lente obbiettivo dove è posto un prisma deflettore in grado di deviare il segnale luminoso verso la lente oculare che permette la visione ingrandita del provino. Il segnale può essere deviato da uno specchio verso una fotocamera così da acquisire l'immagine. Il microscopio ottico metallografico differisce dal microscopio comune perché il campione metallico, che per la sua opacità non può essere osservato per trasparenza anche in sezione sottile, viene osservato per riflessione. L'ingrandimento ottenibile è limitato ad un

massimo di 2000 x ma nonostante ciò è possibile vedere i grani, se sono dell'ordine dei micron, la porosità, le diverse fasi di un materiale, i difetti e i geminati¹. Presenta però un limitato potere risolutivo ($\approx 1\mu\text{m}$) ed una scarsa profondità di campo. La scarsa profondità di campo comporta che non si possano mettere a fuoco dettagli posti su piani differenti, è quindi necessario rendere piani i provini. Il microscopio ottico può essere diritto o rovesciato a seconda della disposizione della superficie da analizzare rispetto al sistema di lenti.

Stereomicroscopio

A differenza del microscopio ottico sfrutta due percorsi ottici separati, diversamente allineati tra loro ed entrambi entranti con due obbiettivi e due oculari. Gli occhi destro e sinistro vengono raggiunti da immagini diversamente angolate che permettono una visione stereoscopica quasi tridimensionale. Si ha quindi una immagine con una profondità di campo maggiore rispetto agli altri microscopi ma con un ingrandimento minore.

Microscopio elettronico a scansione (SEM)

Il microscopio elettronico a scansione non sfrutta la luce come sorgente di radiazioni, ma un fascio di elettroni primari focalizzati che colpiscono il campione. Il limite della microscopia ottica è infatti dato dalla lunghezza d'onda della luce visibile troppo alta per permettere risoluzioni maggiori del micrometro, gli elettroni avendo lunghezza d'onda molto minore vengono riflessi da elementi di dimensione minore permettendo quindi una maggiore risoluzione. Gli elettroni vengono prodotti da una sorgente termoionica o emissione di campo, colpiscono il campione e vengono emessi elettroni secondari, elettroni retrodiffusi e raggi x come rappresentato in figura 3.1. Si scansiona porzione per porzione il campione e si analizzano le emissioni. In funzione delle emissioni analizzate si hanno due modi di visualizzazione:

- BSE (BackScattered-Electron imaging): sfrutta gli elettroni retrodiffusi generati da un'ampia zona nel volume di interazione tra materia ed elettroni. Questa tipologia di elettroni nasce da urti elastici tra gli elettroni e gli atomi che inducono cambiamenti di traiettoria, il numero di elettroni riflessi dipende dalla dimensione dell'atomo e quindi dal suo numero atomico, tanto più alto è il numero atomico tanto maggiore è il numero di elettroni retrodiffusi e di conseguenza l'intensità del segnale, le fasi con numero atomico maggiore risulteranno a schermo più chiare. Un esempio è riportato nella figura 3.2, l'alluminio con numero atomico 13 appare più scuro del rame con numero atomico 23. La dipendenza del numero di BSE dal numero atomico permette di individuare fasi diverse e generare immagini che contengono informazioni sulla composizione del campione oltre ad informazioni sulla cristallografia, sulla topografia e sul campo magnetico.
- Elettroni secondari: vengono generati dalla superficie e dalle zone adiacenti del campione da interazioni anelastiche tra il fascio primario di elettroni e il campione ed hanno un'energia inferiore rispetto agli elettroni retrodiffusi. Vengono utilizzati per l'analisi topografica della superficie del campione.

Con il microscopio SEM è possibile ottenere ingrandimenti fino a 10000x con risoluzioni fino al nanometro e buona profondità di campo

Microscopio elettronico a trasmissione (TEM)

Nel microscopio TEM il campione del metallo viene assottigliato tanto quanto basta per essere attraversato dagli elettroni. Si ha quindi una fonte di elettroni che può essere un filamento di tungsteno, questi vengono accelerati e dopo aver attraversato il campione, e in parte dispersi, colpiscono uno schermo fluorescente dove formano l'immagine ingrandita. L'ingrandimento arriva a 1000000x mentre la risoluzione è di 0.5 nm.

¹geminati: delle bande che si formano sul metallo.

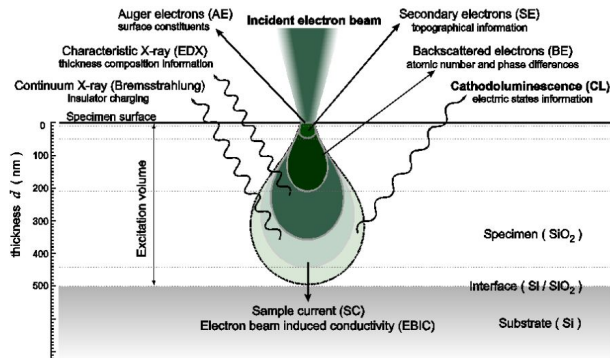


Figura 3.1: Interazione fascio elettronico-materia

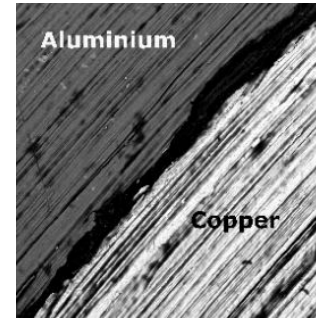


Figura 3.2: Immagine BSE alluminio-rame

	OM	SEM	TEM
Range di ingrandimento	1-1000	10-10000	1000-1000000
Risoluzione	$5\mu m-0.1\mu m$	$0.1\mu m-1nm$	$5nm-0.2nm$
Profondità di campo	0.1 mm a 10x $1\mu m$ a 100x	10 mm a 10x 1 mm a 100x	Limitata allo spessore del film
Ambiente	versatile	vuoto (0.03 Pa)	vuoto (0.03 Pa)

Tabella 3.1: Confronto tra microscopie

3.2 Preparazione metallurgica

I provino che devono essere sottoposti ad analisi microstrutturali mediante microscopi ottici o elettronici devono subire una preparazione preventiva costituita da una serie di fasi:

1. ottenimento del campione;
2. inglobatura del campione;
3. levigatura;
4. lappatura;
5. attacco metallografico;
6. osservazione al microscopio;

Ottenimento del campione

Per ottenere una analisi utile è necessario individuare uno o più campioni che siano rappresentativi del manufatto, particolare attenzione va data alla direzione di prelievo, è quindi consigliato prelevare più campioni dallo stesso pezzo. In particolare le lavorazioni a caldo e a freddo inducono nel materiale una anisotropia dovuta alla struttura fibrosa che nasce quando la deformazione plastica avviene sempre nella stessa direzione, in questo caso oltre ai campioni perpendicolari all'asse del pezzo bisogna prelevare anche dei campioni paralleli allo stesso così da studiarne il grado di deformazione plastica e cristallina. L'operazione di prelievo deve essere svolta in maniera tale da non alterare strutturalmente il materiale, a tale scopo vengono utilizzati abbondanti fluidi refrigeranti durante il taglio così da evitare alterazioni termiche e massimizzare l'asportazione di detriti. L'operazione viene svolta solitamente avvalendosi di opportuni troncatori provvisti di dischi diamantati che sono in grado di eseguire un taglio netto e pulito così da ridurre al minimo la successiva fase di levigatura.

Inglobatura del campione

Il campione sezionato viene inglobato a caldo o a freddo in una resina per rendere possibili le successive fasi di levigatura e lappatura e facilitarne la lavorazione e l'osservazione al microscopio. L'inglobatura

inoltre facilita l'esame microscopico sui bordi del campione per indagare i rivestimenti e i trattamenti termici superficiali.

Per l'inglobamento a caldo il campione viene posto in una pressa inglobatrice dove viene aggiunta resina e il tutto viene compresso e riscaldato così da garantire l'adesione della resina al pezzo. Anche il raffreddamento solitamente avviene sotto pressione per evitare distaccamenti della resina dal pezzo. Le resine utilizzabili per il processo a caldo possono essere termoindurenti, che induriscono quindi ad alte temperature e pressioni, oppure termoplastiche, che fondono ad elevata temperatura e induriscono nel processo di raffreddamento. Le resine utilizzate sono solitamente acriliche, fenoliche e dialilliche allo stato granulare o in polvere, il processo dura $10 \div 15$ minuti e avviene con temperature comprese tra 150°C e 180°C con pressioni di $25 \div 30$ MPa. Il tipo di resina utilizzato varia in funzione del tipo di campione e dell'analisi da effettuare, per esempio per campioni molto porosi vengono utilizzate resine acriliche e trasparenti mentre per campioni da sottoporre a microscopia SEM vengono utilizzate resine fenoliche con polveri di carbonio.

L'inglobamento a freddo risulta adatto a campioni sensibili al calore, alla pressione, per materiali porosi soprattutto se svolto sotto vuoto e per campioni di grosse dimensioni. Un ulteriore vantaggio è dato dalla possibilità di svolgere inglobamenti senza l'utilizzo di presse, si presta quindi all'utilizzo in contesti in cui il numero di inglobamenti non giustificerebbero l'investimento in presse apposite. Il campione viene posto in una formella dove viene coperto dai due o tre componenti delle resine opportunamente misurati e miscelati. La resina solidifica e il campione può essere prelevato per essere sottoposto alle successive lavorazioni. Le resine utilizzate sono solitamente acriliche, epossidiche e poliestere, sono generalmente in polvere con catalizzatore liquido. Le resine epossidiche sono adatte all'inglobamento sotto vuoto grazie al loro basso grado di viscosità, sono quindi indicate per il trattamento di elementi porosi, presentano inoltre ritiri molto lievi, di contro richiedono tempi di solidificazione molto lunghi, fino a dodici ore per le resine con migliore adesione al campione. Le resine acriliche sono adatte a lavori di inglobamento seriale, presentano tempi di solidificazione limitati (10-20 min), moderati fenomeni di ritiro e sono adatte a pezzi irregolari. Queste resine presentano buone capacità di penetrazione delle cricche e dei pori, polimerizzano con l'aggiunta di un catalizzatore nella miscela. In seguito a polimerizzazione risultano termoplastiche e resistenti agli agenti chimici. Le resine poliestere sono adatte ad inglobamenti seriali in quanto più economiche ma risultano adatte a soli campioni poco porosi e regolari, la polimerizzazione avviene sempre con aggiunta di un catalizzatore ed una volta indurite risultano termoplastiche. In base alle esigenze è possibile creare miscele di resine di natura diversa per migliorarne le caratteristiche.

Levigatura

Il campione viene levigato mediante l'utilizzo di carte da smeriglio di granulometria controllata e decrescente (150-2000 grintⁱⁱ) con lo scopo di eliminare le alterazioni strutturali subite dal metallo durante il taglio e di conferire alla superficie da esaminare una certa planarità.

Lappatura

Il campione viene sottoposto a lappatura tramite diversi passaggi su dischi in tessuto cosparsi con soluzioni acquose od oleose abrasive solitamente a base di allumina o pasta diamantata, i granuli abrasivi hanno diametro che va dai $5\text{-}6\mu\text{m}$ a $0.2\text{-}0.15\mu\text{m}$. Il processo ha lo scopo di creare una lucidatura a specchio della superficie rimuovendo tutte le righe create dai processi precedenti. Durante il processo è necessario lubrificare abbondantemente per asportare le particelle di campione che potrebbero rigare la superficie da analizzare. Per campioni che non si prestano a lappatura può essere utilizzata la lucidatura elettrolitica, il campione viene posto in una soluzione acquosa acida differente in funzione del materiale da lucidare. Viene creato un circuito elettrico in cui il campione funge da anodo mentre una barra solitamente in acciaio inox funge da catodo, anch'esso immerso nella stessa vasca. La lucidatura avviene grazie alla formazione di un film viscoso sulla superficie del campione all'interno del quale le asperità tendono a dissolversi per il passaggio preferenziale di corrente sui rilievi piuttosto che

ⁱⁱLa misura in grint indica la grana della carta con 150 grint i granuli abrasivi hanno diametro pari a $5\text{-}8\mu\text{m}$ mentre sono pari a $88\text{-}105\mu\text{m}$ per 2000 grint

nelle gole.

Attacco metallografico

I campioni così ottenuti se osservati al microscopio permettono l'individuazione di inclusioni non metalliche, porosità, cricche e grafite, volendo analizzare la microstruttura è necessario procedere con un attacco metallografico così da evidenziare la struttura cristallina attraverso la corrosione selettiva operata dai reattivi sulle zone superficiali dotate di maggiore energia come i bordi dei grani. Con l'attacco metallografico possono essere osservate caratteristiche quali forma e dimensione dei grani, inclusioni, precipitati e orientazioni microstrutturali. Il processo di attacco può essere elettrolitico, con l'immersione del campione in una cella elettrolitica seguita da lavaggio e asciugatura oppure chimico con l'immersione del campione in un reattivo per un certo tempo e successivo lavaggio e asciugatura. L'attacco chimico solitamente ha un duplice effetto, ossidante nei confronti delle zone a maggiore contenuto energetico e liscivante verso i prodotti di ossidazione per staccarli dalla superficie. I reattivi per attacco chimico si dividono in tre categorie principali:

- reattivi di contrasto: agiscono sui piani cristallografici dei singoli grani;
- reattivi di selezione: agiscono preferenzialmente su alcune fasi colorandole o asportandole;
- reattivi di granulazione: agiscono evidenziando i contorni dei grani;

Con l'attacco metallografico si cerca quindi di modificare la planarità di certe fasi o di particolari strutture come i bordi dei grani così che sottoposti all'analisi al microscopio le superfici non più planari e perpendicolari al fascio di luce riflettano con angolazioni diverse rispetto alle zone non attaccate. L'immagine vista al microscopio sarà quindi caratterizzata da diversi gradi di luminosità delle varie fasi e dei bordi dei grani rispetto al cuore degli stessi. Il tempo di attacco deve essere tale da permettere alla soluzione di evidenziare i dettagli desiderati, i tempi non dovrebbero mai essere sufficientemente lunghi da permettere al reagente di penetrare a più di $1.5\ \mu\text{m}$ per evitare che componenti minoritari della lega possano essere asportati. In caso di attacchi troppo brevi o troppo lunghi il campione deve ripetere la fase di levigatura, lappatura e attacco chimico. Il tipo di reagente e le modalità di impiego dipendono dal materiale analizzato, i principali reagenti sono riportati in tabella 3.2. Prima di effettuare l'attacco è indispensabile un lavaggio con una soluzione altamente detergente così da sgrassare il campione, solitamente cotone idrofilo impregnato con una soluzione molto fluida e detergente. Un ulteriore lavaggio è richiesto dopo l'immersione nel reagente per interrompere il processo, solitamente la superficie sottoposta ad attacco viene posta sotto un getto di acqua corrente, possono essere svolti successivi processi di lavaggio con soluzioni detergenti per rimuovere ogni residuo di reagente anche nelle cavità più piccole lungo i bordi dei grani così da inibire il prolungarsi della reazione. Il campione viene quindi asciugato con un getto di aria calda.

Osservazione al microscopio

Il campione così prodotto è ora pronto per l'osservazione al microscopio sia ottico che elettronico a scansione. Per osservazione con microscopio elettronico a trasmissione è necessario un ulteriore trattamento di assotigliamento chimico o elettrochimico dello spessore del provino così da renderlo permeabile al fascio elettronico.

3.3 L'analisi metallografica nella produzione di bulloni (quadro normativo)

Di seguito vengono riportate le prescrizioni delle norme NAS (*National Aerospace Standard*) riguardo l'applicazione di tecniche metallografiche alla produzione e accettazione di bulloni per applicazioni aerospaziali. Le norme coprono tutto il processo di analisi, dalla scelta dei campioni e la loro numerosità alle caratteristiche da indagare ed i mezzi da utilizzare, fino ai criteri di accettazione o rifiuto di un lotto, di seguito vengono riportati in estrema sintesi a scopo esemplificativo gli elementi chiave dell'analisi.

Reagente	Tempi e modalità di applicazione	Impiego
PICRAL Acido picrico cristallizzato + alcol etilico 95%	10-120 s	Per tutti gli acciai e le ghise ordinarie o debolmente legati. Mette in evidenza le strutture fini, evidenzia componenti strutturali e la disposizione dei grani. Annerisce la perlite, la sorbite e la kainite mentre colora in bruno la martensite.
NITAL Acido picrico cristallizzato + alcol etilico 95%	10-120 s	Per tutti gli acciai e le ghise ordinarie o debolmente legati. Evidenzia componenti strutturali e definisce il contorno dei grani. Distingue la ferrite dalla martensite, evidenzia per annerimento la perlite e la sorbite.
ACQUA REGIA GLICERINATA Acido nitrico + acido cloridrico + glicerina distillata	Si usa su campione riscaldato in acqua bollente	Per gli acciai inossidabili e le ghise non attaccabili con nital e picral.
PICRATO SODICO Acido picrico + soluzione acquosa al 25% di idrossido di sodio	Utilizzato bollente per 5-10 min	Per gli acciai ipereutettoidi, legati al tungsteno, rapidi e le ghise. Colora la cementite e i carburi complessi.
MURAKAMI (ferrocianuro di potassio alcalino) Ferrocianuro di potassio + idrossido di sodio + acqua distillata	Utilizzato bollente per 5-10 min	Per gli acciai rapidi, legati al tungsteno, inossidabili e acciai speciali resistente alla corrosione al calore. Per la ghisa ordinaria, grigia e ghise legate. Colora i carburi e i tungsturi degli acciai rapidi e la steatite nelle ghise.
KALLING (cloruro rameico) Acido cloridrico + cloruro rameico cristallizzato + alcol etilico al 95% + acqua distillata	Da pochi secondi a qualche minuto	Acciai legati, acciai al cromo (>5%), acciai austenitici e ferritici e ghise da bonifica al cromo. Colora la ferrite lasciando inalterata la cementite.
COGNE Acido acetico glaciale + acido picrico + acido cloridrico + alcol etilico 95%	10-120 s	Qualunque tipo di attacco.
HF 0,5 Acido Fluoridrico + acqua distillata	-	Leghe di alluminio.
PERCLORURO DI FERRO Cloruro ferrico + acido cloridrico + alcol etilico	-	Leghe di rame (evidenzia i bordi dei grani e i cristalli β).

Tabella 3.2: Reagenti più comuni

NAS 4002

La norma NAS 4002 riporta le indicazioni per la produzione, verifica, documentazione ed imballaggio di elementi di fissaggio in AISI 4340.

Per quanto concerne l'analisi metallografica l'attenzione viene posta sullo studio della microstruttura, delle discontinuità, della carburazione e decarburazione delle superfici e dello scorrimento dei grani nel filetto e nella testa. Per quanto riguarda la microstruttura si deve verificare l'assenza di vuoti, fratture, zone sovrariscaldate e fenomeni di segregazione che possano minare le proprietà fisiche o meccaniche della parte. Non sono ammesse cricche mentre sono ammesse discontinuità che si estendano per una profondità inferiore o uguale a quanto riportato dalla norma in funzione della zona della vite. A livello metallurgico la parte deve presentare una struttura martensitica rinvenuta. Martensite non rinvenuta o strutture diverse sono accettabili solo se: non sono presenti crepe, non si presentano sul fondo del filetto e nella giunzione tra testa e gambo della vite, sulla cresta del filetto non eccedano la profondità ammissibile per le fessure e non producano creste, discontinuità e bave che eccedano le tolleranze dimensionali. Lo scorrimento dei grani nel filetto conseguente a rullatura deve seguire un pattern indicato nella norma mentre nella testa deve essere verificato che lo scorrimento non porti a condizioni metallurgiche che possano degradare le proprietà meccaniche della parte. Carburazioni e decarburazioni non sono ammissibili nel sottotesta, raggio sottotesta, gambo e filetto, sono tollerate in altre zone indicate dalla norma. Gli ingrandimenti prescritti per ciascuna delle precedenti analisi sono riportati nella tabella 3.3.

Tipo di analisi	Ingrandimento
Scorrimento dei grani nel filetto	50X - 100X
Scorrimento dei grani nella testa	6X - 25X
Microstruttura	100X - 150X
Discontinuità	50X - 100X
Decarburazione e carburazione	100X - 150X

Tabella 3.3: Ingrandimenti analisi metallografica NAS 4002

NAS 4003

La norma NAS 4003 riporta le indicazioni per la produzione, verifica, documentazione ed imballaggio di elementi di fissaggio in 13-8 PH, 15-5 PH e 17-4 PH.

Per quanto concerne l'analisi metallografica l'attenzione viene posta sullo studio della microstruttura, delle discontinuità, della dimensione del grano e dello scorrimento dei grani nel filetto e nella testa. Per quanto riguarda la microstruttura si deve verificare che la dimensione dei grani sia principalmente uguale o minore di 5 per la norma ASTM E112. Non sono ammesse cricche mentre sono ammesse discontinuità che si estendano per una profondità inferiore o uguale a quanto riportato dalla norma in funzione della zona della vite. Non devono essere presenti vuoti e fenomeni di segregazione ed irregolarità superficiali che possano minare le proprietà fisiche o meccaniche della parte. Non sono permessi segni di sovrariscaldamento e bruciature da lavorazione in qualsiasi zona tranne che le superfici non in appoggio della testa e l'estremità della vite dove sono permessi se non si estendono oltre 0.003 inch. di profondità. Lo scorrimento dei grani nel filetto conseguente a rullatura deve seguire un pattern indicato nella norma mentre nella testa deve essere verificato che lo scorrimento non porti a condizioni metallurgiche che possano degradare le proprietà meccaniche della parte. Gli ingrandimenti prescritti per ciascuna delle precedenti analisi sono riportati nella tabella 3.4.

NAS 4004

La norma NAS 4004 riporta le indicazioni per la produzione, verifica, documentazione ed imballaggio di elementi di fissaggio in Ti 6Al-4V.

Per quanto concerne l'analisi metallografica l'attenzione viene posta sullo studio della microstruttura, delle discontinuità, della dimensione del grano, della contaminazione superficiale e dello scorrimento dei

Tipo di analisi	Ingrandimento
Scorrimento dei grani nel filetto	50X - 100X
Scorrimento dei grani nella testa	6X - 25X
Microstruttura	100X - 150X
Discontinuità e crescita dei grani	50X - 100X

Tabella 3.4: Ingrandimenti analisi metallografica NAS 4003

grani nel filetto e nella testa. A livello microstrutturale non sono ammesse cricche mentre sono ammesse discontinuità che si estendano per una profondità inferiore o uguale a quanto riportato dalla norma in funzione della zona della vite. Il materiale deve essere solubilizzato ed invecchiato, la microstruttura deve essere priva di vuoti e fratture e presentare grani di fase α primaria all'interno di una matrice β trasformata ed invecchiata. Non sono accettabili fenomeni di segregazione che possano minare le proprietà meccaniche della parte. Le zone che presentano tracce di riscaldamento oltre la temperatura di β -transus senza riduzioni meccaniche a temperature di coesistenza delle fasi α e β devono essere limitate alle parti della testa non in appoggio e all'estremità della vite e ad una profondità massima di 0.003 inch. Tutte le altre zone nate da una microstruttura equiassica di sola fase β e che non presentino fase α primaria sono da considerare sovrariscaldare e non ammissibili. Lo scorrimento dei grani nel filetto conseguente a rullatura deve seguire un pattern indicato nella norma mentre nella testa deve essere verificato che lo scorrimento non porti a condizioni metallurgiche che possano degradare le proprietà meccaniche della parte. Gli ingrandimenti prescritti per ciascuna delle precedenti analisi sono riportati nella tabella 3.5.

Tipo di analisi	Ingrandimento
Scorrimento dei grani nel filetto	50X - 100X
Scorrimento dei grani nella testa	6X - 50X
Microstruttura	200X - 500X
Contaminazione superficiale	200X - 500X
Discontinuità e crescita dei grani	50X - 100X

Tabella 3.5: Ingrandimenti analisi metallografica NAS 4004

NAS 4008

La norma NAS 4008 riporta le indicazioni per la produzione, verifica, documentazione ed imballaggio di elementi di fissaggio in INCONEL 718.

Per quanto concerne l'analisi metallografica l'attenzione viene posta sullo studio della microstruttura, delle discontinuità, della dimensione del grano e dello scorrimento dei grani nel filetto e nella testa. Per quanto riguarda la microstruttura si deve verificare che la dimensione dei grani sia principalmente uguale o minore di 5 per la norma ASTM E112. Non sono ammesse cricche mentre sono ammesse discontinuità che si estendano per una profondità inferiore o uguale a quanto riportato dalla norma in funzione della zona della vite. Non devono essere presenti vuoti, fratture e segni di sovrariscaldamento. Non sono ammissibili fenomeni di segregazione e irregolarità superficiali che possano minare le proprietà fisiche o meccaniche della parte. Lo scorrimento dei grani nel filetto conseguente a trattamenti termici e rullatura deve seguire un pattern indicato nella norma, per la testa il discorso è analogo con immagini riportate nella norma, inoltre la zona affetta dal riscaldamento per la lavorazione della testa non deve estendersi nel gambo per una lunghezza maggiore di un quarto del diametro nominale della vite. Gli ingrandimenti prescritti per ciascuna delle precedenti analisi sono riportati nella tabella 3.6.

Importanza dell'analisi metallografica nell'industria aerospaziale

L'industria aerospaziale è caratterizzata da un largo utilizzo di componenti critici. Una parte critica è una parte il cui guasto potrebbe avere un effetto catastrofico sul velivolo e per la quale sono state identificate caratteristiche critiche che devono essere controllate per garantire il livello di integrità

Tipo di analisi	Ingrandimento
Scorrimento dei grani nel filetto	50X - 100X
Scorrimento dei grani nella testa	6X - 25X
Microstruttura	100X - 150X
Discontinuità e crescita dei grani	50X - 100X

Tabella 3.6: Ingrandimenti analisi metallografica NAS 4008

richiesto¹¹. Proprio in questo quadro va ad inserirsi l'analisi metallografica, come riportato in precedenza le varie normative richiedono analisi dettagliate del componente per verificare che non vi siano difetti tali da minare le sue prestazioni e quindi più in generale la sicurezza del velivolo. Di seguito vengono evidenziati gli effetti dei difetti sulle proprietà del componente:

- **Cricche:** sono difetti caratterizzati da una frattura che attraversa il grano o il suo bordo. Le cricche, diminuendo la sezione resistente influenzano negativamente i carichi massimi sopportabili dal componente, rappresentano inoltre un fattore determinante nella vita a fatica del pezzo, portando quindi alla rottura con tensioni minori rispetto alle massime sopportabili dal materiale.
- **Martensite non rinvenuta:** la martensite prodotta nel trattamento di tempra risulta essere molto dura e fragile, presenta inoltre uno stato tensionale residuo di notevole entità che comporta il rischio di improvvise rotture di schianto, è quindi necessario evitarne il più possibile la presenza soprattutto in zone critiche come il fondo del filetto o il sottotesta.
- **Decarburazione:** è un fenomeno superficiale caratterizzato dall'impoverimento di carbonio, si presenta solitamente in seguito a deformazione a caldo e contatto del pezzo con l'ossigeno atmosferico, le principali conseguenze sono una diminuzione del limite di fatica, delle caratteristiche meccaniche resistenziali, della durezza della tempra superficiale ed una maggiore difficoltà nell'esecuzione dei trattamenti termochimici di diffusione.
- **Vuoti:** Sono zone del componente caratterizzate dalla presenza di gas al posto del metallo, vengono prodotti solitamente nella fase solidificazione del materiale e possono essere diminuiti con processi di deformazione plastica. La presenza di vuoti può portare ad una consistente degradazione delle proprietà meccaniche del componente.
- **Segregazioni:** sono fenomeni che si verificano quasi sempre nelle discontinuità del materiale come confini dei grani, dislocazioni, laminazioni e pori. La segregazione comporta un incremento di concentrazione di un tipo di molecola in una determinata area di un materiale, crea un materiale meno omogeneo. Questa mancanza di omogeneità crea aree che non hanno le proprietà chimiche o meccaniche previste.
- **Irregolarità superficiali:** le irregolarità superficiali possono causare una degradazione delle proprietà meccaniche e fungere da punto di innesco per rotture a fatica
- **Orientamento delle fibre della testa e del filetto:** nei processi di deformazione plastica si ha un flusso di materiale che comporta una anisotropia nel componente stesso, risulta quindi fondamentale che la direzione delle fibre sia favorevole in relazione alla direzione del carico applicato alla parte.
- **Dimensione del grano:** la dimensione del grano influisce in maniera sostanziale sulle proprietà del materiale, come riportato nella sezione sui trattamenti termici, si impone quindi una dimensione massima del grano in quanto strutture con grani di dimensioni maggiori comporterebbero valori minori di resistenza a rottura.
- **Flakes:** sono discontinuità particolari in componenti di acciaio che hanno la forma di macchie colore argento sulle superfici di rottura o di sottili crepe simili a capelli su campioni lucidati e attaccati metallograficamente. L'insidia di questo tipo di difetto è legata al lungo tempo di

incubazione, che lo fa emergere solitamente già in fase di utilizzo del pezzo, e alla forte influenza su tenacità e duttilità del materiale con conseguente diminuzione della vita utile e rotture improvvise.

- Sovrariscaldamento: un eccessivo riscaldamento del materiale può comportare una perdita delle proprietà meccaniche che si presume il componente abbia. Le temperature e l'entità del danno dipendono sostanzialmente dal materiale in questione, si prenda ad esempio quanto scritto per la lega MP35N nell'apposita sezione.

Nota fonte dati

Le informazioni riportate in questo capitolo sono state ricavate dalle fonti bibliografiche [39], [25], [31], [46], [14].

Impianto di preparazione e analisi metallografica

In questo capitolo viene analizzato l'impianto di analisi attuale con lo scopo di riportare lo stato attuale ed evidenziare eventuali margini di intervento e problematiche

4.1 Dotazione e procedure di laboratorio

Il laboratorio di analisi metallografica viene gestito attualmente da un solo operatore che ha a disposizione la seguente dotazione:

Ottenimento del campione

Per l'ottenimento del campione dal pezzo originale viene utilizzata una troncattrice Remet TR60, di cui viene riportata una breve scheda tecnica. La macchina è dotata di un sistema di aggancio che permette la veloce sostituzione dei vari dischi di taglio in funzione del materiale su cui operare e dell'usura degli stessi. In funzione delle dimensioni del campione da lavorare può cambiare anche il diametro e lo spessore del disco scelto. La velocità di rotazione della mola non è regolabile mentre il movimento del disco rispetto al pezzo è manuale con l'utilizzo di una leva posta sulla destra della macchina. Lo strumento è dotato di una grande vasca di contenimento del liquido refrigerante posta sotto alla mola stesa, tale vasca permette la decantazione dei residui del taglio e il ricircolo del refrigerante. Nelle operazioni di taglio per la produzione di campioni per analisi metallografica è necessario avere a disposizione grandi capacità di refrigerazione per evitare possibili alterazioni microstrutturali dovute al calore rilasciato in tale operazione.



Figura 4.1: TR 60

Inglobatrura

La macchina in dotazione è la Remet IPA 40, della quale viene riportata la scheda tecnica, è una pressa inglobatrice automatica con gestione del ciclo di lavoro attraverso microprocessore programmabile. La macchina permette di produrre anche due campioni in contemporanea. Per l'inglobatura viene utilizzata principalmente resina fenolica nera, l'inglobatura simultanea di due campioni è limitata a pezzi di dimensioni tali da permettere la creazione di uno strato sufficientemente spesso di resina da

TR 60	
Diam. max mola di taglio [mm]	200
Diam. max troncabile [mm]	60
Potenza motore [kW]	1.1
Velocità mola [rpm]	2850
Portata pompa [litri/min]	20
Capacità vasca [litri]	20
Alimentazione [V]	380 trifase
Peso [kg]	100
Dimensioni [mm] LxPxH	625x730x550

Tabella 4.1: scheda tecnica TR60

conferire solidità e resistenza al provino stesso. Il ciclo di inglobatura prevede una compressione, un riscaldamento graduale fino a 200°C, un mantenimento a tali temperatura ed infine un raffreddamento controllato fino ad almeno 60°C, per ridurre al minimo fenomeni di ritrazione indesiderata della resina si attende solitamente che il campione raggiunga la temperatura ambiente. Il riscaldamento avviene grazie a resistenze elettriche, la compressione è ottenuta sfruttando un pistone ad aria compressa collegato alla rete aziendale e azionato con una leva posta sul pannello frontale della macchina infine il raffreddamento avviene con un sistema di ricircolo ad acqua. Il liquido, con l'utilizzo di una pompa, viene prelevato e reimmesso in un serbatoio posto nel piano interrato dello stabile, e dimensioni dell'accumulo di acqua sono tali da garantire il raffreddamento della macchina anche dopo ore di lavorazione.



Figura 4.2: Inglobatrice IPA40

IPA40	
Diam. inglobamento [mm]	30
Temp. Inglobamento [°C]	200
Tempo max inglobamento [min]	99
Potenza [kW]	0.6
Alimentazione [V]	220 Monofase
Peso [kg]	25
Dimensioni [mm] LxPxH	225x480x680

Tabella 4.2: scheda tecnica IPA40

Levigatura e lucidatura

La pulitrice in dotazione è una Remet LS2A costituita dal modulo LS2 che rappresenta la pulitrice vera e propria mentre il modulo LSA permette l'automatizzazione del processo di levigatura del campione,

di seguito viene riportata la scheda tecnica della macchina. La macchina oltre che per la levigatura dei campioni viene utilizzata anche per l'ottenimento di sezioni in caso di componenti molto piccoli. Il modulo LSA permette la lavorazione contemporanea di 6 campioni attraverso l'utilizzo di una apposita stella porta-campioni. Il processo di levigatura e lucidatura avviene solitamente con 4 o 5 passaggi standard:

1. Levigatura con carta abrasiva con grana 80 grits: questa fase viene introdotta solamente quando il processo di troncatura non produce risultati soddisfacenti e si rende quindi necessario rimuovere grandi spessori di metallo/resina.
2. Levigatura con carta abrasiva con grana 320 grits: in questa fase vengono rimosse sbavature di resina sul componente e reso planare il provino rimuovendo difetti minori di taglio.
3. Levigatura con carta abrasiva con grana 1200 grits.
4. Levigatura con carta abrasiva con grana 2500 grits.
5. Lucidatura con panno e sospensione liquida di diamante mono o policristallino: in questa fase si ottiene una finitura a specchio.

Lo scopo della lucidatura è quello di ottenere una superficie priva di segni che possano interferire con l'osservazione al microscopio, una piccola quantità di solchi poco profondi è comunque accettabile in quanto viene solitamente rimossa durante l'attacco metallografico.



Figura 4.3: Pulitrice LS2A

LS2A	
Diam. disco [mm]	200
Potenza motore [W]	180
Velocità disco [rpm]	0-300
Alimentazione [V]	220 Monofase
Peso [kg]	32
Dimensioni [mm] LxPxH	370x500x650

Tabella 4.3: scheda tecnica LS2A

Attacco metallografico

L'attacco metallografico avviene con l'utilizzo di diversi reagenti in funzione del materiale analizzato e delle caratteristiche ricercate. Le sostanze più frequentemente adoperate sono:

- Nital 2: utilizzato per l'acciaio Aisi 4340
- Marble: utilizzato per gli acciai martensitici induribili per precipitazione 13-8 PH, 15-5 PH e 17-4 PH.

- Kroll: utilizzato per il titanio Ti6Al4V
- Kalling: utilizzato per l'Inconel 718

Il processo può avvenire sia creando un velo di reagente sopra al campione sia strofinandolo con un batuffolo di cotone imbevuto di reagente. Il processo dura solitamente da qualche secondo a qualche minuto e viene interrotto con un lavaggio in acqua così da rimuovere il reagente e terminare l'attacco. Una eccessiva esposizione agli acidi infatti può comportare una "bruciatura" del campione che diviene estremamente opaco e non più analizzabile, in questi casi si deve ripetere la lucidatura per eliminare lo strato eccessivamente esposto. Le operazioni sono svolte con i dispositivi di protezione individuale indicati per ogni sostanza adoperata.

Analisi del campione

Per l'analisi del campione viene utilizzato un microscopio ottico metallografico Olympus BX41M dotato di un sistema di acquisizione digitale di immagini Alexasoft tp3100 cmos. Il microscopio è dotato delle seguenti ottiche:

- 25X: utilizzata solitamente per l'analisi del raggio sotto testa.
- 50X: utilizzata sempre per l'analisi del raggio sotto testa.
- 100X: utilizzata per l'analisi del filetto e del fondo filetto.
- 200X: utilizzata sempre per l'analisi del filetto e del fondo filetto.
- 500X: utilizzata quando richiesto per la verifica della dimensione dei grani o per indagare in modo più approfondito eventuali difetti individuati con ottiche a minore ingrandimento.

Il sistema di acquisizione digitale di immagini è collegato ad un apposito computer, è quindi possibile analizzare le immagini sia proiettandole a monitor che attraverso gli oculari del microscopio stesso. Il computer è inoltre dotato di un software opportunamente calibrato sul microscopio e le ottiche in dotazione che permette, oltre all'acquisizione delle immagini, anche di effettuare misurazioni precise su di esse. Il microscopio è dotato di manopole per lo spostamento del campione nelle direzioni perpendicolari all'ottica per poter visionare in modo agevole più zone del campione e di una manopola estremamente sensibile per lo spostamento sull'asse verticale e di conseguenza la messa a fuoco. Modificando la messa a fuoco è infatti possibile mettere in risalto caratteristiche diverse dello stesso campione mettendo per esempio in risalto i bordi del filetto oppure le fibrature del materiale. Vi è infine un sistema di regolazione della luminosità necessario per ottenere buone immagini al variare delle ottiche o della capacità di riflettere del campione stesso.



Figura 4.4: Microscopio Olympus BX41M

Feedback dell'operatore sul macchine e processi attuali

Affiancando l'operatore nello svolgimento delle analisi sono stati individuate diverse possibili miglitorie al processo attuale di analisi metallografica che vengono riportate di seguito suddivise per fase del ciclo.

Ottenimento del campione

La fase di ottenimento del campione è suddivisibile in due sotto-fasi distinguibili, il posizionamento del pezzo da cui ricavare il campione ed il vero e proprio taglio, tale suddivisione risulta essere importante per la valutazione del processo dal momento che, come si vedrà in seguito, è possibile tramite modifiche alla macchina intervenire solamente su una delle due. La macchina attualmente in dotazione presenta buone prestazioni in taglio ma risulta deficitaria nei sistemi di posizionamento del pezzo rispetto al disco. Un posizionamento accurato è necessario per sezionare il campione in prossimità dell'asse di simmetria con un eccesso di materiale tale per cui le fasi di lucidatura, con relativa asportazione di materiale, rendano il piano di osservazione un piano di simmetria del componente (per quanto riguarda l'analisi di viteria). Con la macchina attualmente in dotazione è necessario, per garantire la buona riuscita del taglio, un lungo processo di posizionamento del pezzo che potrebbe essere notevolmente semplificato con alcune miglitorie alla macchina attuale.

Inglobatura

L'inglobatrice non presenta particolari punti di miglioramento, il processo automatico permette all'operatore di svolgere altre mansioni durante questa fase, la qualità del prodotto risulta essere in linea con le aspettative. L'inglobatura simultanea di due campioni presenta però una leggera degradazione della qualità del prodotto recuperabile nelle lavorazioni successive, allo stesso tempo però un minore spessore del campione complica le operazioni di lucidatura automatica in quanto nelle fasi di serraggio del campione nell'apposita stella porta-campioni si viene a creare una incurvatura dello stesso che mina la planarità della faccia lucidata.

Levigatura

La levigatura rappresenta l'elemento più debole del processo di produzione del campione metallografico, in particolare il sistema automatico risulta essere meno performante dell'equivalente manuale, infatti nella lavorazioni automatica di più campioni si ha una minore precisione nel posizionamento dei campioni che quando collocati nella stella e stretti tendono ad incurvarsi perdendo quindi la planarità della faccia a contatto con il disco levigante, questo problema è accentuato quando vengono utilizzati campioni inglobati simultaneamente come indicati in precedenza. La planarità è necessaria per una corretta analisi del campione con il microscopio in dotazione, una superficie analizzata non planare comporta una riflessione del fascio luminoso non ortogonale al pezzo e quindi un peggioramento della qualità dell'analisi con l'impossibilità di messa a fuoco simultanea di tutto il campione, discorso diverso si avrebbe con microscopi metallografici invertiti potendo appoggiare sul piano direttamente la faccia da analizzare. Altro elemento migliorabile del processo di levigatura è legato ad un fenomeno per cui nonostante la rotazione simultanea e opposta del disco levigante e della stella porta-campioni si ottiene una levigatura non omogenea, in particolare si forma una zona circolare centrale più erosa del resto del campione come visibile nella Figura 4.5. Tale fenomeno, seguendo le istruzioni del produttore di dischi leviganti, potrebbe essere attribuibile alla mancata fuoriuscita parziale dei singoli campioni dal piano di levigazione durante il processo di lucidatura. La minore qualità del processo di lucidatura automatica costringe l'operatore a svolgere il processo manualmente con un dispendio sostanzioso di tempo e l'impossibilità di lavorare più campioni in contemporanea.

Attacco metallografico

L'attacco metallografico risulta essere una fase estremamente legata al tipo di analisi e reagenti utilizzati, tali fattori non sono modificabili in quanto indicati da normativa, le dotazioni attuali del laboratorio risultano essere sufficienti e non si evidenziano particolari margini di intervento.

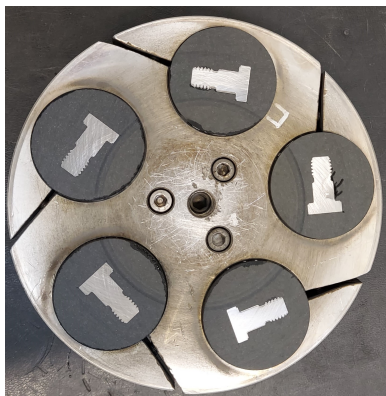


Figura 4.5: Dettaglio levigatura non omogenea

Analisi al microscopio

Nella fase di osservazione e stesura della relazioni tecnica non sono state rilevati punti di possibile intervento, al limite una piccola dipendenza della qualità dell'immagine osservata con grandi ingrandimenti in funzione dell'illuminazione esterna, il problema viene facilmente risolto schermando la zona di osservazione così da limitare l'influenza dell'illuminazione esterna.

4.2 Validazione dell'impianto

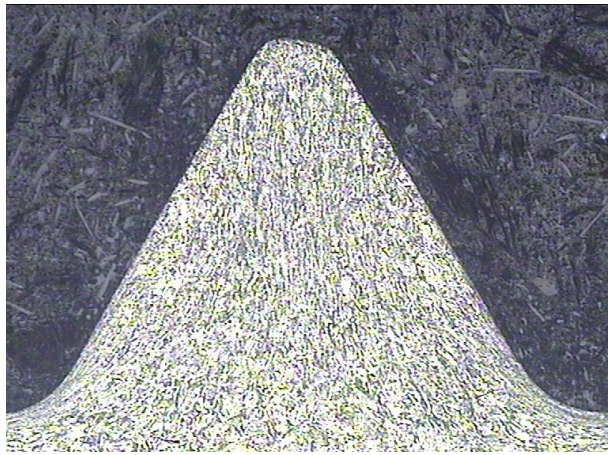
Prima di procedere con ulteriori considerazioni si è verificato che l'attuale laboratorio permettesse di produrre e analizzare campioni in grado di evidenziare le caratteristiche indicate dalle normative di riferimento. Come auspicabile l'impianto attualmente in uso permette di effettuare le verifiche richieste, di seguito vengono riportati alcuni esempi di analisi in cui si sono individuate conformità e non conformità alle richieste delle relative normative. Nella Figura 4.6 sono riportate, a titolo esemplificativo, 4 immagini relative all'analisi di un campione di 13-8 PH, è possibile notare nel fondo filetto la fibratura del materiale donata dal processo di rullatura e in generale l'assenza di difetti.

Nella Figura 4.7 sono riportate a titolo esemplificativo 2 immagini relative all'analisi di un campione di INCONEL 718, con la prima immagine è stata analizzata la dimensione del grano che è risultato essere pari a 5 per la normativa ASTM E112, nella seconda immagine è stata analizzata la microstruttura, non sono stati evidenziati segni di sovrariscaldamento, porosità o microsegregazioni.

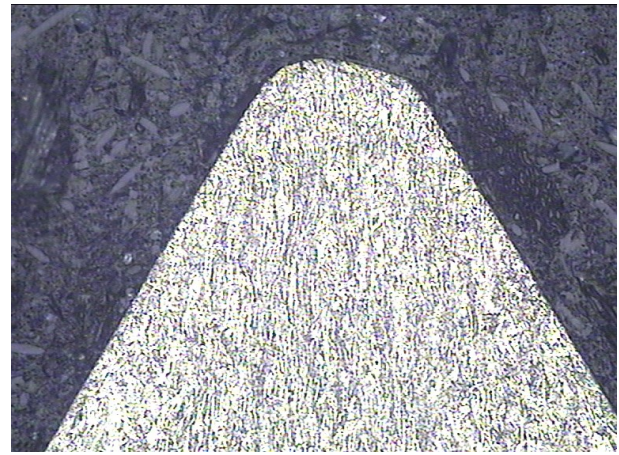
Nella Figura 4.8 sono riportate a titolo esemplificativo 4 immagini relative all'analisi di un campione di MP35N difettoso, con diversi ingrandimenti, si nota una distribuzione delle fibre non conforme alla normativa che ha portato allo scarto dell'intero lotto.

Nella Figura 4.9 sono riportate a titolo esemplificativo 2 immagini relative all'analisi di un campione di Ti6Al4V difettoso, è possibile notare la grande frattura sulla cresta del dente nella prima immagine e passante per l'intero dente della seconda. Anche in questo caso si tratta di difettosità non ammissibili che comportano la distruzione dell'intero lotto.

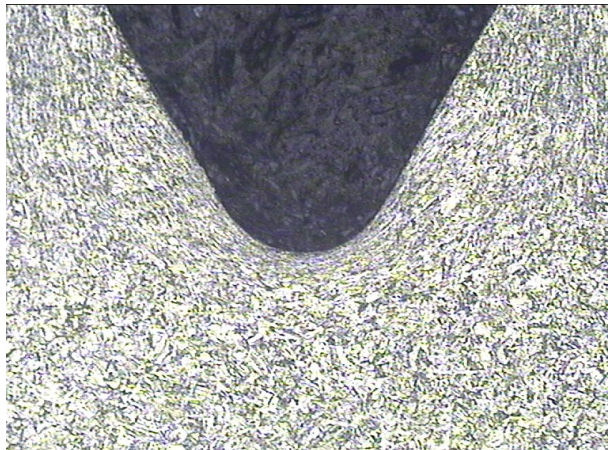
Nella Figura 4.10 sono riportate a titolo esemplificativo 4 immagini relative all'analisi di un campione di Ti6Al4V difettoso, è possibile notare l'irregolarità sul fondo del filetto.



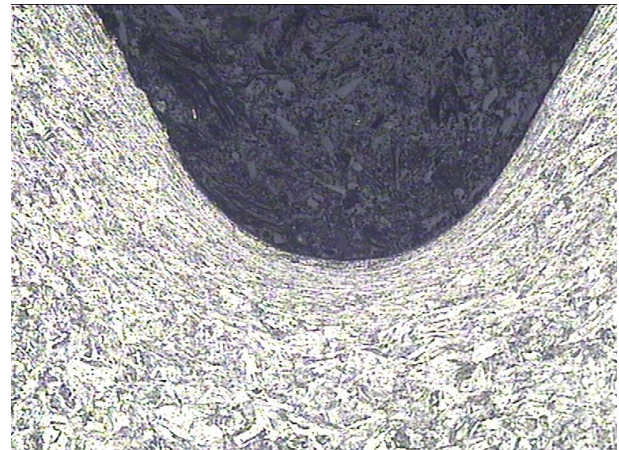
Dente 100X



Dente 200X



Fondo filetto 100 X



Fondo filetto 200X

Figura 4.6: Analisi 13-8 PH



Dimensione del grano 100X



Microstruttura 100X

Figura 4.7: Analisi INCONEL 718

4.3 Valutazione tempi del processo

Per la valutazione del processo si è proceduto con la misura del tempo necessario allo svolgimento di ogni singola fase della lavorazione. La misurazione è stata effettuata su campioni in 13-8 PH e Inconel 718. La scelta del tipo di campione (vite) e dei materiali è stata fatta in modo di valutare

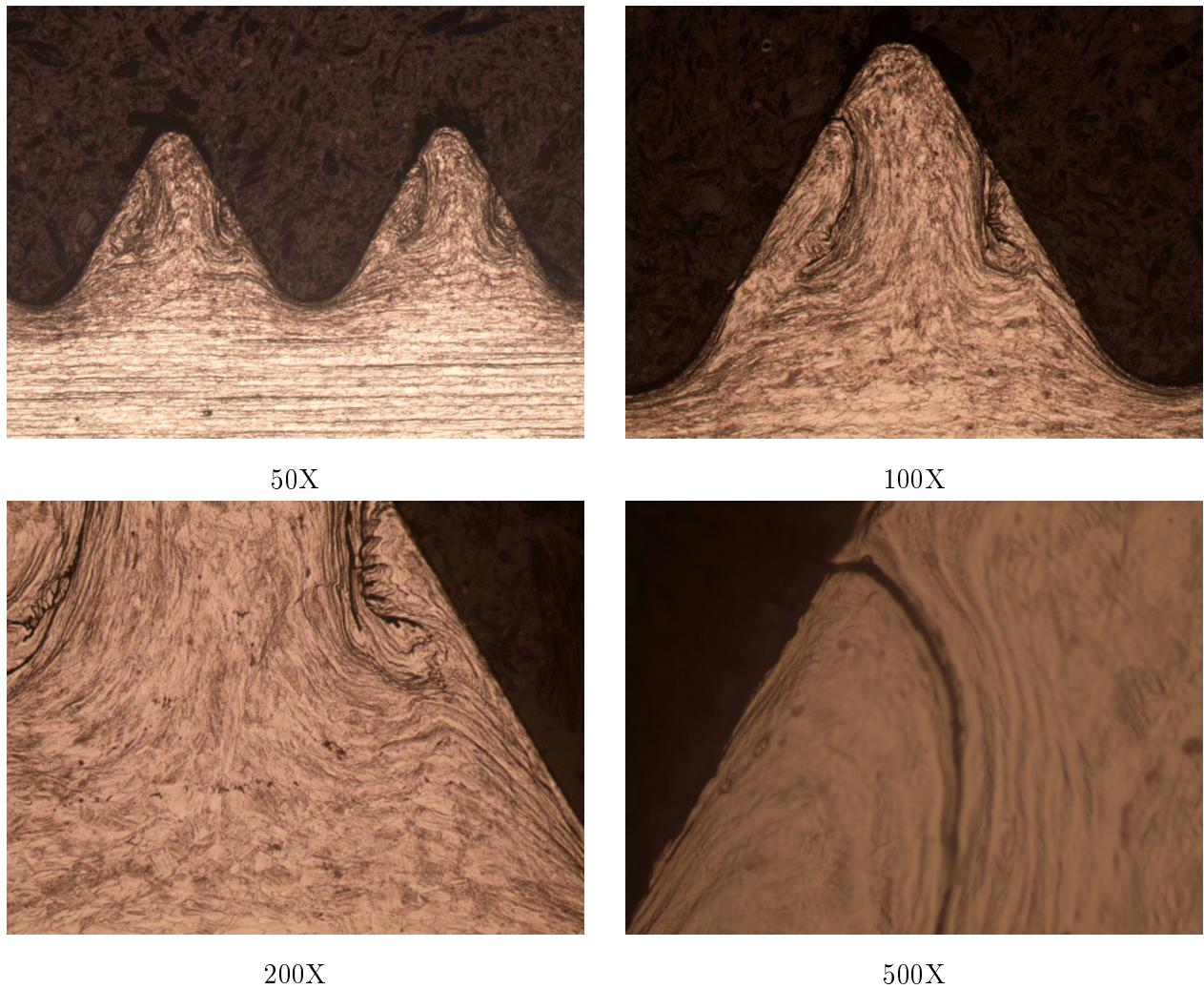


Figura 4.8: Analisi MP35N

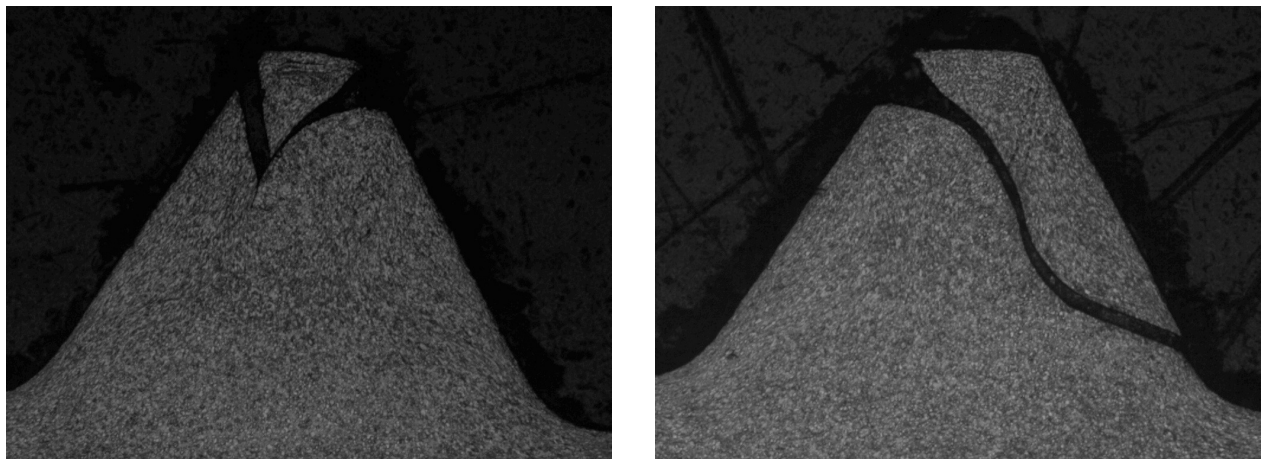


Figura 4.9: Analisi Ti6Al4V

l'elemento più analizzato con i materiali che rappresentano rispettivamente il caso più frequente e di facile lavorabilità (13-8 PH) e quello più frequente di più difficile lavorabilità (Inconel 718).

Apertura e chiusura della fase di lavorazione

Per l'apertura e la chiusura della fase di lavorazione l'operatore impiega circa 3 minuti.

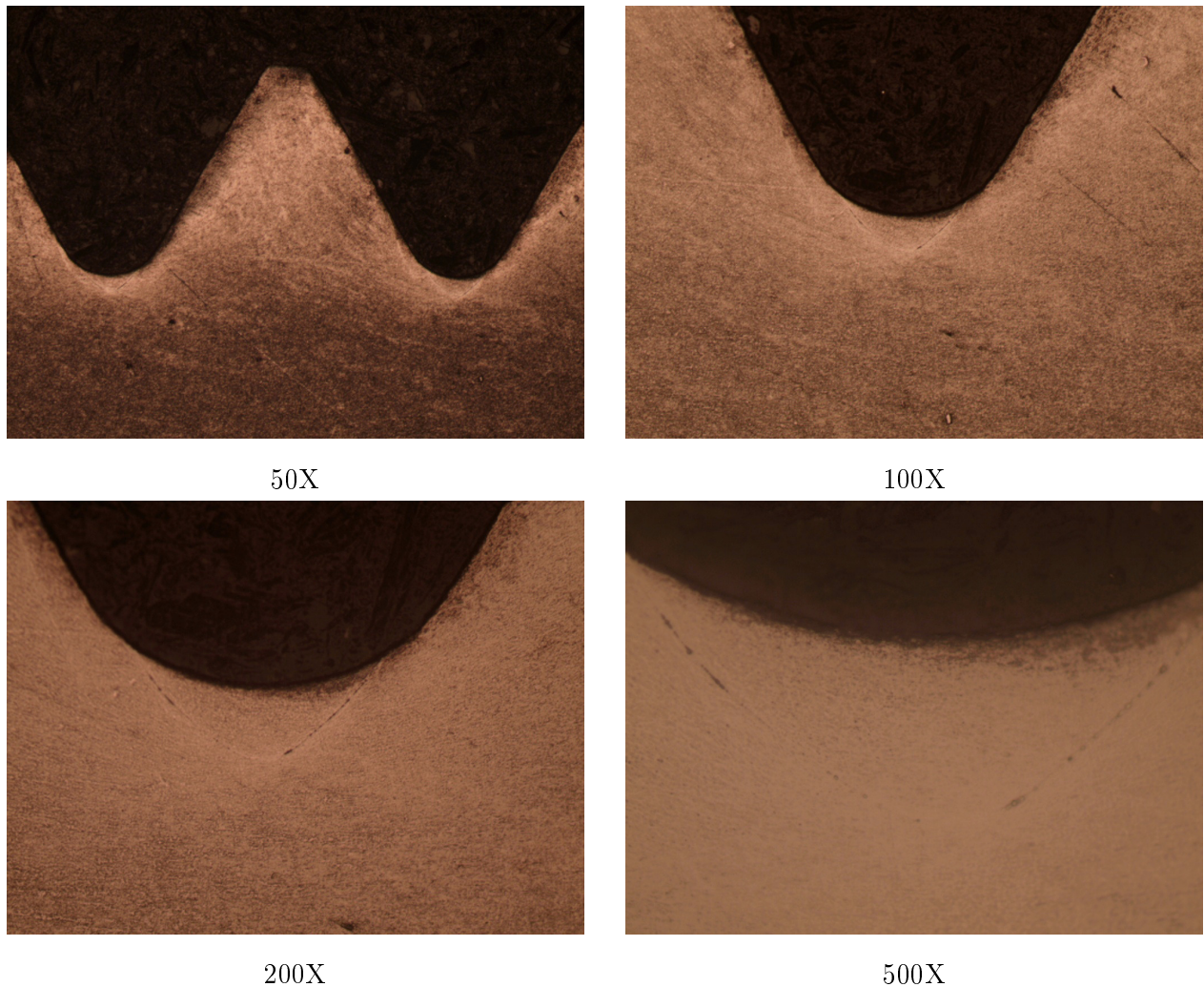


Figura 4.10: Analisi Ti6Al4V

Prelievo campione

Il tempo totale di prelievo del campione è di 13 minuti, in particolare il tempo di preparazione e posizionamento del pezzo da cui ricavare il campione è di 7 minuti mentre il tempo di taglio vero e proprio è di 6 minuti.

Inglobatura

Il tempo totale di inglobatura è di 24 minuti composto da 3 minuti di preparazione e 21 minuti di inglobatura vera e propria, questa seconda fase è automatica e non richiede la presenza dell'operatore.

Lucidatura

Il tempo totale di lucidatura è di 18 minuti composto da 4 minuti di preparazione e cambio dischi e 14 minuti di levigatura manuale, per la levigatura automatica non sono stati ricavati tempi in quanto tale processo non viene al momento adoperato.

Attacco metallografico

Il tempo totale di attacco metallografico è di 6 minuti, il processo pur non richiedendo un impegno manuale dell'operatore deve essere sorvegliato per evitare tempi eccessivi di esposizione del campione agli agenti chimici che potrebbero portare alla "bruciatura" del campione e quindi al ripetere le fasi precedenti di preparazione del campione.

Analisi al microscopio e stesura report

La fase finale dell'analisi richiede in media 8 minuti composta da 2 minuti di inserimento dei dati del prodotto nel report e 6 di osservazione e acquisizione immagini.

Fase	tempo impiegato [min]
Apertura/chiusura fase	3
Prelievo campione	13
Inglobatura campione	24
Levigatura	18
Attacco metallografico	6
Analisi e report	8

Tabella 4.4: Tempi delle fasi del processo di analisi metallografica

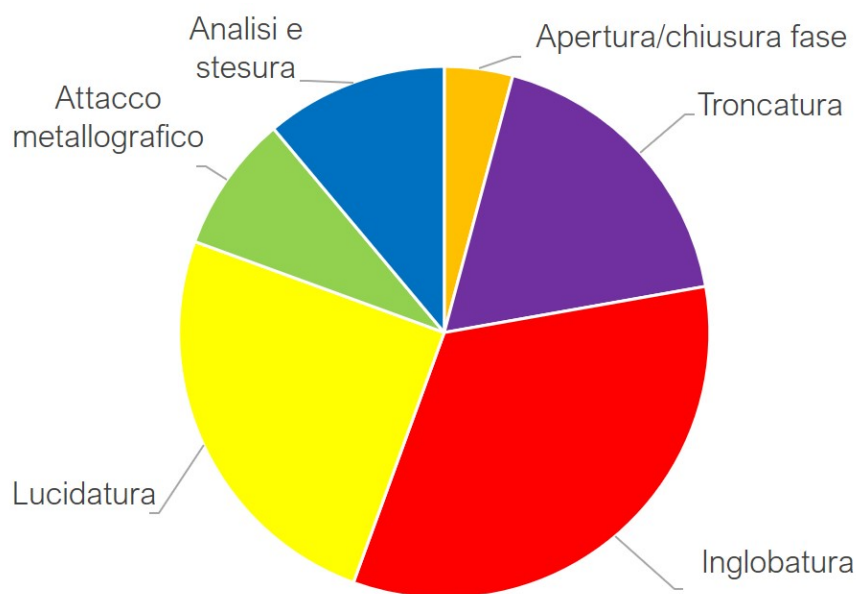


Figura 4.11: Tempi del processo di analisi metallografica

Comparazione

A livello aziendale il tempo indicato per l'analisi metallografica è di 60 minuti mentre il tempo medio impiegato per l'analisi di un campione è di 72 minuti, risulta quindi evidente una discrepanza tra i tempi reali e preventivati. Il tempo di elaborazione di un singolo campione non è però l'unico parametro su cui basare l'indagine in quanto il numero di campioni elaborati dall'azienda è notevole e di conseguenza una buona pianificazione del processo potrebbe portare ad un tempo medio del singolo campione simile all'attuale ma ad un numero maggiore di campioni processati per unità di tempo. Analizzando il tempo medio per l'analisi del singolo campione e rapportandolo al numero di ore giornaliere e al numero di giorni lavorativi annui risulta che il laboratorio attuale risulterebbe capace di soddisfare la richiesta di analisi aziendale. È quindi necessario verificare la situazione attuale del laboratorio per individuare eventuali ritardi così da evidenziare la necessità o meno di interventi sul processo.

4.4 Valutazione del soddisfacimento del fabbisogno aziendale

In questa sezione viene analizzata la capacità del laboratorio di rispondere alla necessità di analisi dell'azienda. A questo scopo sono stati raccolti i dati mensili sui report prodotti dal 2018 al 2021. Per ogni anno è stato posto come punto di verifica la fine dello stesso valutando così l'eventuale ritardo nella produzione dei report relativi a campioni facenti parte di lotti prodotti nel mese di dicembre dell'anno di riferimento e analizzati a gennaio del successivo. Uno slittamento delle analisi su elementi prodotti in un mese a quello successivo è fisiologico, è però necessario verificare se questo slittamento nel tempo si mantiene costante, incrementa con il volume di analisi richieste oppure cresce in maniera non giustificata da altri fattori. Il risultato è riportato nella Figura 4.12, si può notare quindi un progressivo accumulo di ritardo negli anni non giustificato da un proporzionale incremento della richiesta di analisi sintomo di una situazione di affanno del laboratorio che non riesce a soddisfare la richiesta annuale di analisi e che sfrutta i primi mesi dell'anno successivo per recuperare le analisi di quello precedente. Negli anni presi in considerazione il laboratorio ha subito diverse modifiche, è stato spostato tra diverse

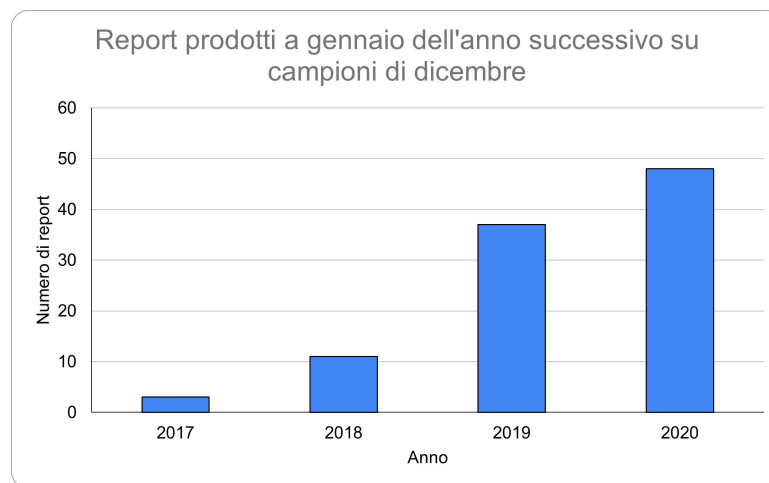


Figura 4.12: Eccedenze analisi

sedi, ha subito modifiche alle dotazioni ed ha visto l'avvicendamento di diversi operatori, si è quindi voluto valutare se il trend dei primi mesi del 2021 presenti segni di miglioramento tali da recuperare il ritardo oppure se l'intervento sull'impianto risulti indispensabile. La stima per il volume di analisi da svolgere nel 2021 è stata fatta considerando la media delle analisi svolte negli anni precedenti, non si sono evidenziati trend di crescita o diminuzione tali da dover apportare correzioni a questo tipo di stima.

Scenario 1

Il primo scenario rappresenta il caso più favorevole, si ipotizza infatti che nei restanti mesi del 2021 (maggio-dicembre) per recuperare il ritardo si mantenga un ritmo mensile uguale al valore massimo relativo al mese tenuto negli anni precedenti. Con questo ritmo il ritardo verrebbe completamente assorbito entro la fine dell'anno.

Scenario 2

Con il secondo scenario si ipotizza che nei mesi di maggio-dicembre il ritmo mensile sia uguale al valore medio tenuto per ciascun mese negli anni 2018-2020. Così facendo il ritardo a fine anno sarebbe di 98 analisi, un incremento di 50 unità rispetto a fine 2020.

Scenario 3

Il terzo scenario è uno dei più plausibili in quanto prevede che il ritmo di analisi mensile per maggio-dicembre sia uguale a quello tenuto nel 2018. La scelta dell'anno non è casuale in quanto risulta essere

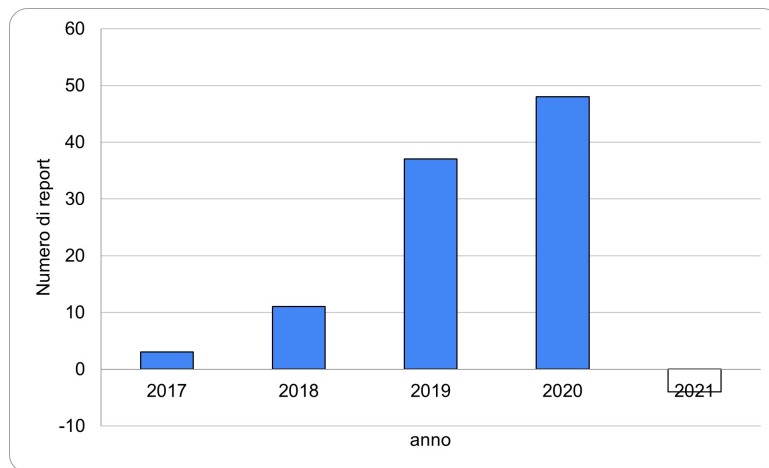


Figura 4.13: Scenario 1

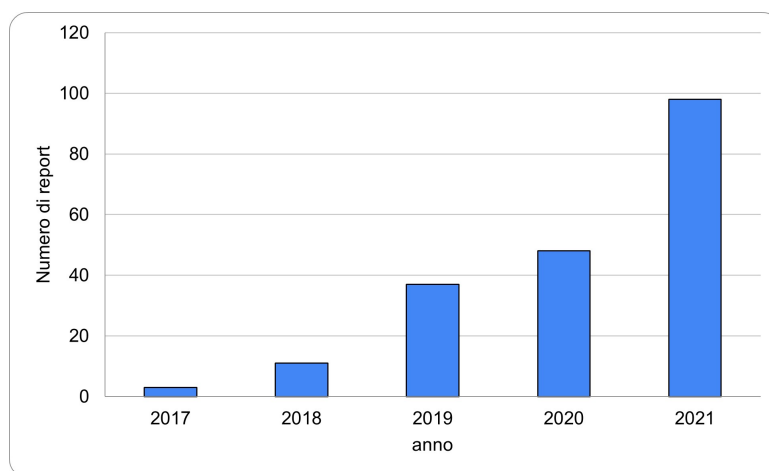


Figura 4.14: Scenario 2

il più rappresentativo della situazione attuale, stesse macchine e stesso operatore, negli altri anni invece vi sono state modifiche nel personale e nell'attrezzatura utilizzata. Così facendo il ritardo a fine anno sarebbe di 75 analisi, un incremento di 27 unità rispetto a fine 2020.

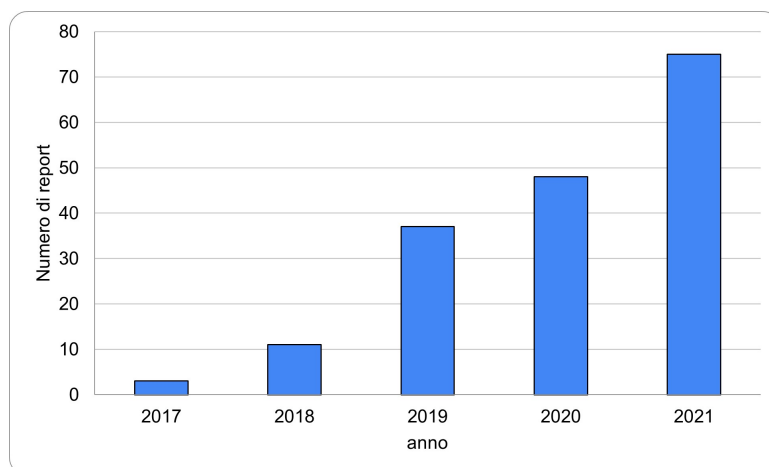


Figura 4.15: Scenario 3

Scenario 4

Il quarto scenario rappresenta una variante del secondo in cui si è corretto l'andamento maggio-dicembre con fattore che tiene in considerazione la performance dell'anno corrente nei mesi di gennaio, febbraio e aprile¹ rispetto a quella media degli anni precedenti. In questo caso il ritardo stimato a fine anno sarebbe di 103 analisi, un incremento di 55 unità rispetto a fine 2020.

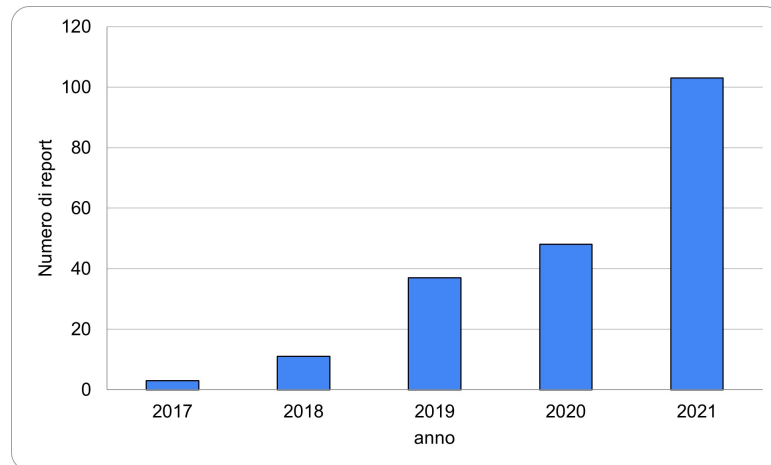


Figura 4.16: Scenario 4

Scenario 5

Il quinto e ultimo scenario ipotizzato è una correzione analoga alla precedente attuata sull'anno 2018, si è quindi calcolato il numero di analisi mensili per i mesi Maggio-Dicembre 2021 correggendo il valore degli stessi mesi del 2018 con un fattore che tenesse in considerazione la prestazione dei mesi gennaio, febbraio e aprile 2021 rispetto allo stesso periodo del 2018. In questo caso il ritardo stimato a fine anno sarebbe di 84 analisi, un incremento di 36 unità rispetto a fine 2020.

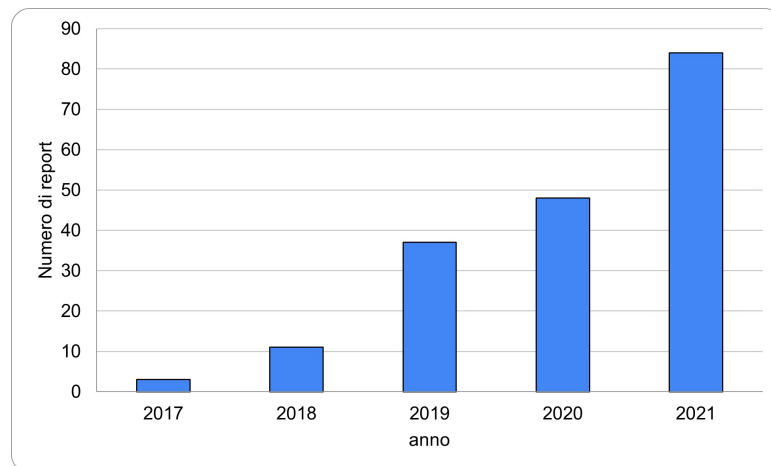


Figura 4.17: Scenario 5

Conclusioni

Si può quindi concludere che il solo scenario accettabile è rappresentato dal primo che risulta essere comunque il meno plausibile. Gli scenari più probabili sono rappresentati dal quarto e quinto, entrambi

¹Il mese di marzo è stato escluso dal calcolo dal momento che nel 2021 è stato effettuato lo spostamento dell'impianto che ha comportato un drastico calo dei report prodotti, per ottenere una stima più affidabile si è quindi escluso tale mese nel calcolo del fattore correttivo.

prevedono un incremento sostanziale del ritardo. Valutando il fabbisogno medio di report necessari per anno (455 report) e volendo recuperare nel 2021 il ritardo accumulato negli anni precedenti (48 report) sarebbe necessario svolgere nel 2021 almeno 503 report. Dal momento che l'addetto all'analisi svolge anche altre mansioni e non può incrementare il tempo dedicato a questo tipo di analisi, l'incremento di produttività del laboratorio può essere raggiunto con una maggiore automazione del processo, con un miglioramento del processo, con l'inserimento di personale oppure con un mix delle precedenti.

Individuazione dei possibili interventi sul processo di analisi metallografica

Nel capitolo precedente si sono evidenziati i tempi occupati da ogni fase sul totale dell'analisi, la capacità di risposta del laboratorio alle richieste attuali ed eventuali punti di miglioramento sui quali agire. Si è quindi evidenziata una necessità di intervento non tanto per problematiche legate alla qualità dell'analisi ma al ritardo accumulato sintomo di mancanza di tempo da parte dell'operatore per svolgere tutte le analisi richieste, l'incremento della capacità del laboratorio può avvenire in 3 modi:

- Modificando il processo attuale andando a cercare una migliore armonizzazione delle fasi
- Modificando la quantità di ore che l'operatore può dedicare all'attività scaricandolo da altre attività o inserendo nuovo personale
- Modificando le macchine presenti attualmente in laboratorio automatizzando il più possibile il processo così da poter sfruttare lo stesso numero di ore attuali dell'operatore per svolgere un numero maggiore di analisi.

La scelta della strategia o del mix di strategie più convenienti è legato a valutazioni tecnico-economiche indicate di seguito.

Stato attuale

Allo stato attuale la richiesta media di report per anno è di 440 con un dispendio medio di ore lavorative pari a 832, il tempo medio impiegato per ciascun documento è quindi 1 ora e 54 minuti. In precedenza è stato riportato un tempo medio di 72 minuti per analisi, la differenza di tempi è determinata dal fatto che ogni report è costituito in media da due analisi la cui somma sarebbe 144 minuti, la differenza tra il tempo per produrre un report di 114 minuti e i 144 minuti indicati è legata al fatto che avendo l'inglobatura una fase consistente una parziale sovrapposizione delle lavorazioni dei due campioni.

Obiettivo

Il primo scopo del miglioramento del processo è quello di riuscire a soddisfare il fabbisogno annuale di analisi recuperando il ritardo accumulato e garantendo un margine per possibili futuri incrementi di richiesta. Per il raggiungimento dei primi due obiettivi valutando il numero di report prodotti negli anni precedenti, il ritardo accumulato negli stessi anni e nel 2021 è necessario un incremento del numero annuo di report prodotti di almeno il 17%, così facendo il margine necessario per recuperare il ritardo nel 2021 diventerebbe un margine di sicurezza per incrementi futuri del numero di analisi necessarie fino al 10%.

Secondo scopo di questa fase di analisi è riuscire a tagliare il numero di ore di lavoro dell'operatore per report così da rendere il processo più veloce ed economico.

Fasi su cui concentrare gli interventi

Il processo di analisi metallografica è suddivisibile in 5 fasi principali, ciascuna ha un impatto diverso sui tempi totali dell'analisi, come visibile nel diagramma di Pareto in Figura 5.1. Le fasi con maggiore incidenza sui tempi totali sono ottenimento del campione (13 min), inglobatura (24 min) e lucidatura (18 min) mentre l'analisi e produzione del report (8 min) e l'attacco metallografico (6 min) hanno impatti molto minori. Le prime 3 fasi che numericamente rappresentano il 50% del processo a livello

temporale rappresentano il 76% del tempo totale di ogni analisi. Le ultime due sono anche fasi non automatizzabili, come l'ispezione del campione, o legate a tempi definiti come l'esposizione del campione all'acido. Per questi motivi l'analisi dei possibili miglioramenti viene focalizzata sulle prime 3 fasi dell'analisi.

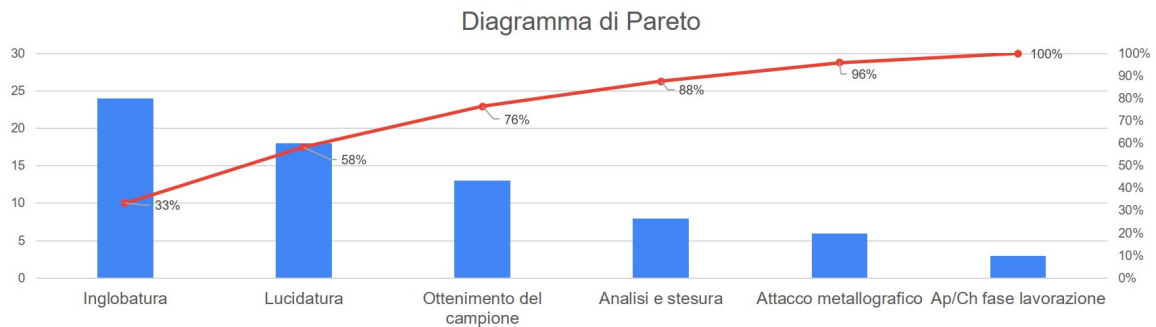


Figura 5.1: Diagramma di Pareto

Modifica del processo attuale

Il processo attuale risulta essere ben bilanciato con un impiego continuo dell'operatore senza tempi morti o colli di bottiglia, i margini di miglioramento risiedono quindi più che in un miglioramento del processo nella sostituzione o miglioramento delle macchine attualmente in dotazione.

Incremento della forza lavoro

Il numero di ore attualmente dedicabili a questa attività dall'operatore incaricato non è sufficiente ma allo stato attuale non è possibile sgravarlo da altri incarichi per dedicare maggiore tempo alle analisi metallografiche. Potrebbe quindi essere valutata la possibilità di incrementare il personale formando un nuovo operatore per la metallografia oppure inserirlo in altri contesti così da sgravare l'attuale da altre incombenze. L'ammontare di ore di analisi non è però tale da giustificare un incremento di personale per cui risulta necessario modificare la dotazione del laboratorio così da riuscire con lo stesso impiego dell'operatore a processare un numero maggiore di campioni.

Modifica delle macchine attualmente in laboratorio

In questa fase del lavoro vengono riportate le modifiche/sostituzioni delle macchine in dotazione, la scelta dei sostituti si basa su preventivi richiesti in collaborazione con l'operatore addetto alle analisi all'azienda attualmente fornitrice di macchinari e consumabili. Sono state esplorate anche alternative sia per marca che tipologia di macchina (es: lucidatrici elettrolitiche) ma le proposte non sono risultate concorrenziali.

Ottenimento del campione

La macchina utilizzata in questa fase è la troncatrice, per questo macchinario si sono evidenziate due possibili vie di intervento, migliorare la macchina attuale o sostituirla con una automatica, entrambi i casi intervengono sulla sotto-fase di posizionamento del pezzo in quanto la macchina automatica adotta già le modifiche apportabili alla macchina attuale.

Miglioramento della macchina attuale

Il miglioramento della macchina attuale prevede la parziale sostituzione del sistema di posizionamento del campione con l'inserimento di un sistema di traslazione trasversale controllato così da poter tagliare i tempi di preparazione del taglio dagli attuali 6 minuti a circa 4 minuti.

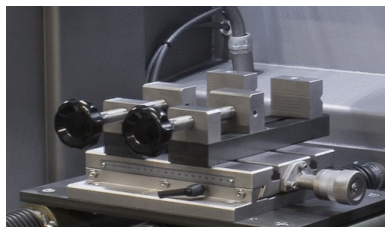


Figura 5.2: Sistema di traslazione trasversale della morsa

Sostituzione della troncatrice attuale con la SECOTRON 300 PLC

La macchina in questione implementa un sistema di posizione del pezzo con riferimenti laser e carro con traslazione longitudinale e trasversale con precisione al decimo di millimetro. La macchina è inoltre dotata di automatismo con la possibilità di memorizzare lo sforzo di taglio desiderato con il quale la macchina calcola automaticamente la velocità di avanzamento del disco in funzione di durezza e sezione del pezzo.



Figura 5.3: Troncatrice Secotron 300 PLC

Inglobatura

La macchina attualmente in uso è di recente acquisizione e svolge il lavoro richiesto in linea con le aspettative, per quanto riguarda le imperfezioni indicate in precedenza in caso di inglobatura simultanea di due campioni sono anch'esse accettabili e recuperabili in fase di lucidatura. Sul mercato non si sono individuate soluzioni alternative tali da poter giustificare una sostituzione, nel caso fosse necessario un incremento di campioni lavorabili in questa fase sarebbe sostanzialmente necessario incrementare il numero di macchine.

Lucidatura

Il processo di analisi attuale è altamente manuale e fortemente dipendente dall'esperienza dell'operatore addetto alle analisi, nell'ottica del miglioramento e incremento di capacità del processo l'automatizzazione del processo porterebbe anche ad una sua minore dipendenza dalle conoscenze dell'operatore rendendo quindi possibili sostituzioni dell'operatore da personale non ugualmente qualificato almeno per queste fasi.

Pulitrice automatica LS3A Digital

La macchina in questione è analoga a quella in uso ma di nuova generazione con un sistema di controllo computerizzato del processo di levigatura e la possibilità di memorizzare cicli di lavorazione. È accessoriabile con una stella porta campioni a pressione singola così da poter gestire la pressione sul singolo campione, questo permette di porre rimedio alle limitazioni della macchina attuale sull'elaborazione contemporanea di più campioni e allo stesso tempo permette di introdurre l'inglobamento simultaneo di due campioni. Tale pratica era stata accantonata nonostante la capacità della macchina poiché i provini prodotti risultavano di minore spessore e più tendenti ad incurvarsi durante il serraggio nella attuale stella porta campioni.



Figura 5.4: Levigatrice LS3A Digital

Pulitrice automatica LS3V Twin

La macchina in questione è analoga alla precedente ma presenta un ulteriore piatto di lucidatura, così facendo l'operatore durante il lavoro su di un piatto può preparare il secondo e svolgere altre attività andando quindi a rimuovere i tempi di cambio dei dischi leviganti dai tempi di lavorazione. Questa soluzione come la precedente richiede però la presenza dell'operatore nelle vicinanze della macchina per poter effettuare il cambio di disco e lo spostamento da un piatto all'altro del sistema di levigatura. La presenza di due piatti permette anche la lavorazione manuale su di un piatto durante il lavoro automatico sul secondo.

Pulitrice automatica Innovation 250 R Twin

La macchina in questione è una ulteriore evoluzione rispetto alla precedente con una sistema di traslazione automatica tra i dischi di levigatura e con una postazione di lavaggio automatico posto tra i due dischi, così facendo l'operatore preparati i primi due dischi può lasciare la postazione di levigatura e svolgere altre attività prima del cambio successivo dei dischi.



Figura 5.5: Innovation 250R Twin

Pulitrice automatica ROBOMET

In questo caso il processo di lucidatura è completamente automatico con una macchina dotata di 5 stazioni di lavoro e una postazione di lavaggio, il passaggio tra le stazioni è automatico come anche il lavaggio. È possibile salvare programmi di lucidatura richiamabili in un secondo momento così da creare profili ottimali per tipo di materiale o pezzo, presenta inoltre una stazione mola con liquido refrigerante così da poter lavorare automaticamente anche viti di piccole dimensioni che solitamente non vengono tagliate alla troncatrice ma inglobate e levigate. La macchina, come il ROBOMET riportato in Figura 5.6, permette quindi la completa automatizzazione del processo tagliando drasticamente il numero di ore-operatore per campione prodotto.



Figura 5.6: Lucidatrice automatica robotizzata

Simulazione dell'impatto sul processo della modifica alle dotazioni del laboratorio

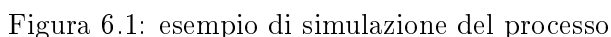
Definiti i possibili interventi sul processo è necessario creare un modello che permetta di valutare l'impatto delle singole modifiche o delle loro combinazioni sulle prestazioni del laboratorio. Ipotizzando 220 giorni lavorativi annuali e un fabbisogno annuale di 500 report ciascuno composto in media da 2.2 analisi¹ si è individuato in 5 il numero medio di campioni giornalieri da processare. Il simulatore è stato creato con l'utilizzo del programma Microsoft Excel in cui per ogni modifica si sono calcolati una serie di parametri basandosi sulle seguenti ipotesi:

- È sempre possibile elaborare 5 campioni dello stesso materiale o di materiali compatibili con la loro lavorazione simultanea
- I tempi di posizionamento del pezzo per il prelievo del campione possono essere ridotti da 6 a 4 minuti con le modifiche alla macchina
- Il taglio con troncattrice automatica impiega lo stesso tempo del caso manuale dal momento che l'unico compito dell'operatore è mantenere una pressione costante sul pezzo
- Il tempo di preparazione per la lucidatura automatica è di 3 minuti per un corretto posizionamento dei campioni nell'apposita stella porta-campioni
- I tempi di lucidatura automatica sono incrementati di 6 minuti rispetto al caso manuale per un minore controllo dell'operatore sul processo

Per la valutazione preliminare dell'impatto di ogni modifica sul processo è stato necessario individuare un parametro che potesse guidare nella scelta dell'opzione migliore. L'obiettivo principale dell'intervento è quello di riuscire a fare fronte al fabbisogno annuale di test dell'azienda incrementando il numero di test effettuabili nello stesso numero di ore che l'operatore attualmente può dedicare a questa attività. La scelta del parametro principale di confronto è quindi ricaduta sul numero di minuti di attività dell'operatore per l'elaborazione e l'analisi di un campione, si è giunti a questa scelta poiché questo indicatore:

- Fornisce una indicazione temporale utile per la valutazione della capacità dell'intervento di far fronte alle richieste del laboratorio
- Fornisce una indicazione utile per la valutazione del costo delle analisi conoscendo il costo orario della manodopera e l'ammontare dell'investimento.
- Rispecchia in modo fedele l'impatto dell'automazione di fasi della lavorazione, se si fosse scelto il tempo totale per analisi si sarebbe persa l'informazione sull'impatto dell'automatizzazione che potrebbe portare a tempi totali di processo maggiori ma richiedere un intervento molto più limitato dell'operatore. Dal momento che l'elemento limitante del laboratorio attuale non è il tempo totale disponibile ma il numero di ore che l'operatore può dedicare alle analisi è importante individuare un parametro che si focalizzi sull'intervento umano.

¹I report in campo motorsport richiedono solitamente una sola analisi mentre in ambito aerospace 2 con alcune eccezioni particolarmente numerose, si è quindi deciso di inserire un valore medio di 2.2 in linea con i dati degli anni



Il caso 0 rappresenta la situazione attuale ed è stato creato per poter effettuare un confronto sui singoli parametri tra le simulazioni e un modello simile al caso reale. Tale caso è stato utilizzato anche per lo sviluppo del modello così da correggere evidenze di eccessivi scostamenti tra il modello stesso e il caso reale.

Il caso 1 prevede la sostituzione della pulitrice attuale con la Remet LS3A, l'utilizzo di questa macchina permette di introdurre l'inglobatura simultanea di due campioni e anche l'attacco metallografico simultaneo sempre di due campioni. Si può quindi notare l'effetto sull'intero ciclo di lavoro della modifica di una singola macchina. La macchina in questione seppur automatica richiede la presenza dell'operatore per il cambio dei dischi di lucidatura, gli intervalli di lavorazione automatica della macchina risultano essere troppo brevi per prevedere attività differenti dalla metallografia. Si ipotizza quindi che nelle fasi di lucidatura l'operatore possa preparare i report da compilare al termine dell'analisi.

ii) L'operatore addetto all'analisi metallografica svolge anche mansioni di supervisione di aree di produzione che

CASO 0 - Macchine attuali		
Stima investimento	€	0
Tempo totale di analisi	min	288
Tempo di impiego dell'operatore	min	251
Minuti-operatore/campione	min	50
Costo attuale per campione	€	18.4
Capacità massima report annuali con stesso impiego dell'operatore	n	434
Capacità massima report annuali su 8h giornaliera	n	833

Tabella 6.1: CASO 0

CASO 1 - Pulitrice LS3A		
Stima investimento	€	15.500
Tempo totale di analisi	min	189
Tempo di impiego dell'operatore	min	168
Minuti-operatore/campione	min	34
Costo attuale per campione	€	18.4
Costo campione su 5 anni con investimento	€	15.4
Costo per campione al netto dell'investimento	€	12.3
Capacità massima report annuali con stesso impiego dell'operatore	n	648
Capacità massima report annuali su 8h giornaliera	n	1270

Tabella 6.2: CASO 1

Caso 2-Pulitrice LS3V Twin

Il caso 2 prevede la sostituzione della pulitrice attuale con la Remet LS3V Twin, le considerazioni su inglobatura e attacco metallografico sono le medesime del caso 1. La macchina in questione presenta due piatti di lavorazione con il passaggio manuale da un piatto al successivo, è quindi possibile durante la lucidatura su di un piatto preparare il secondo e preparare i report come per la macchina precedente, i tempi per lo svolgimento di queste due attività rientrano abbondantemente nel tempo di lavorazione automatica della macchina garantendo anche un margine di sicurezza.

CASO 2 - Pulitrice LS3V Twin		
Stima investimento	€	21.000
Tempo totale di analisi	min	186
Tempo di impiego dell'operatore	min	165
Minuti-operatore/campione	min	33
Costo attuale per campione	€	18.4
Costo campione su 5 anni con investimento	€	16.3
Costo per campione al netto dell'investimento	€	12.1
Capacità massima report annuali con stesso impiego dell'operatore	n	659
Capacità massima report annuali su 8h giornaliera	n	1290

Tabella 6.3: CASO 2

Caso 3-Innovation 250R Twin

Il caso 3 prevede la sostituzione della pulitrice attuale con la Remet Innovation 250R Twin, le considerazioni su inglobatura e attacco metallografico sono le medesime del caso 1. Rispetto al caso precedente la macchina in questione presenta un automatismo che permette il passaggio automatica tra un disco

richiedono spesso interventi di breve durata

di lavoro ed il successivo, preparando i due dischi nella fase iniziale è possibile liberare l'operatore per circa 10 minuti, tempo che può essere utilizzato per altre attività. La preparazione dei report viene quindi sovrapposta ai tempi vuoti delle fasi di inglobatura.

CASO 3 - Innovation 250R Twin		
Stima investimento	€	38.500
Tempo totale di analisi	min	188
Tempo di impiego dell'operatore	min	149
Minuti-operatore/campione	min	30
Costo attuale per campione	€	18.4
Costo campione su 5 anni con investimento	€	18.7
Costo per campione al netto dell'investimento	€	10.9
Capacità massima report annuali con stesso impiego dell'operatore	n	730
Capacità massima report annuali su 8h giornaliera	n	1277

Tabella 6.4: CASO 3

Caso 4-ROBOMET

Il caso 4 prevede la sostituzione della pulitrice attuale con la Remet ROBOMET, le considerazioni su inglobatura e attacco metallografico sono le medesime del caso 1. La macchina in questione presenta 5 stazioni di lavoro di cui 4 di lucidatura, il processo risulta essere del tutto automatico impiegando l'operatore nel solo montaggio e smontaggio dei campioni dall'apposita stella. La preparazione dei report viene sovrapposta ai tempi vuoti delle fasi di inglobatura.

CASO 4 - ROBOMET		
Stima investimento	€	80.000
Tempo totale di analisi	min	186
Tempo di impiego dell'operatore	min	147
Minuti-operatore/campione	min	29
Costo attuale per campione	€	18.4
Costo campione su 5 anni con investimento	€	26.8
Costo per campione al netto dell'investimento	€	10.8
Capacità massima report annuali con stesso impiego dell'operatore	n	740
Capacità massima report annuali su 8h giornaliera	n	1290

Tabella 6.5: CASO 4

Caso 5-Migliorie troncatrice

Il caso 5 prevede la modifica della attuale troncatrice con un sistema migliore di posizionamento del pezzo, l'effetto è solamente sul tempo di ottenimento del campione non influenzando le fasi successive, si nota infatti un miglioramento poco pronunciato dei parametri del ciclo di lavorazione.

Caso 6-Migliorie troncatrice + LS3A

Il caso 6 prevede la modifica della attuale troncatrice e la sostituzione della pulitrice con la Remet LS3A. Le considerazioni su questa configurazione sono la somma di quelle fatte per le singole modifiche (Caso 1 + Caso 5).

CASO 5- MIGLIORIE TRONCATRICE		
Stima investimento	€	3.000
Tempo totale di analisi	min	273
Tempo di impiego dell'operatore	min	230
Minuti-operatore/campione	min	46
Costo attuale per campione	€	18.4
Costo campione su 5 anni con investimento	€	17.5
Costo per campione al netto dell'investimento	€	16.9
Capacità massima report annuali con stesso impiego dell'operatore	n	473
Capacità massima report annuali su 8h giornaliera	n	879

Tabella 6.6: CASO 5

CASO 6- MIGLIORIE TRONCATRICE +LS3A		
Stima investimento	€	18.500
Tempo totale di analisi	min	177
Tempo di impiego dell'operatore	min	148
Minuti-operatore/campione	min	30
Costo attuale per campione	€	18.4
Costo campione su 5 anni con investimento	€	14.5
Costo per campione al netto dell'investimento	€	10.9
Capacità massima report annuali con stesso impiego dell'operatore	n	735
Capacità massima report annuali su 8h giornaliera	n	1356

Tabella 6.7: CASO 6

Caso 7-Migliorie troncatrice + LS3V Twin

Il caso 7 prevede la modifica della attuale troncatrice e la sostituzione della pulitrice con la Remet LS3V Twin. Le considerazioni su questa configurazione sono la somma di quelle fatte per le singole modifiche.

CASO 7- MIGLIORIE TRONCATRICE +LS3V Twin		
Stima investimento	€	24.000
Tempo totale di analisi	min	174
Tempo di impiego dell'operatore	min	145
Minuti-operatore/campione	min	29
Costo attuale per campione	€	18.4
Costo campione su 5 anni con investimento	€	15.4
Costo per campione al netto dell'investimento	€	10.6
Capacità massima report annuali con stesso impiego dell'operatore	n	750
Capacità massima report annuali su 8h giornaliera	n	1379

Tabella 6.8: CASO 7

Caso 8-Migliorie troncatrice + Innovation 250R Twin

Il caso 8 prevede la modifica della attuale troncatrice e la sostituzione della pulitrice con la Remet Innovation 250R Twin. Le considerazioni su questa configurazione sono la somma di quelle fatte per le singole modifiche.

CASO 8- MIGLIORIE TRONCATRICE + INNOVATION 250R Twin		
Stima investimento	€	41.500
Tempo totale di analisi	min	178
Tempo di impiego dell'operatore	min	135
Minuti-operatore/campione	min	27
Costo attuale per campione	€	18.4
Costo campione su 5 anni con investimento	€	18.2
Costo per campione al netto dell'investimento	€	9.9
Capacità massima report annuali con stesso impiego dell'operatore	n	806
Capacità massima report annuali su 8h giornaliera	n	1348

Tabella 6.9: CASO 8

Caso 9-Migliorie troncatrice + ROBOMET

Il caso 9 prevede la modifica della attuale troncatrice e la sostituzione della pulitrice con la Remet ROBOMET. Le considerazioni su questa configurazione sono la somma di quelle fatte per le singole modifiche.

CASO 9- MIGLIORIE TRONCATRICE + ROBOMET		
Stima investimento	€	83.000
Tempo totale di analisi	min	174
Tempo di impiego dell'operatore	min	131
Minuti-operatore/campione	min	26
Costo attuale per campione	€	18.4
Costo campione su 5 anni con investimento	€	26.2
Costo per campione al netto dell'investimento	€	9.6
Capacità massima report annuali con stesso impiego dell'operatore	n	831
Capacità massima report annuali su 8h giornaliera	n	1379

Tabella 6.10: CASO 9

Caso 10-SECOTRON 300 PLC

Il caso 10 prevede la sostituzione della Troncatrice con la Remet SECOTRON 300 PLC. In questo modo il processo di taglio viene migliorato sia nella preparazione, grazie al sistema di posizionamento con traslazione trasversale controllata, sia nel taglio che ora viene controllata tramite un computer automatizzando il processo. Dal momento che il processo non è completamente automatizzabile e che la modifica della pulitrice garantisce effetti anche sulle prestazioni dell'inglobatrice, si nota come l'effetto di questo singolo intervento risulti essere limitato. L'automazione del taglio comporta tempi liberi dell'operatore inferiori agli 8 minuti indicata come la soglia minima per poter ipotizzare che l'operatore possa svolgere altre attività, tali tempi vuoti vengono quindi utilizzati per la preparazione dei report.

CASO 10 - SECOTRON 300 PLC		
Stima investimento	€	25.000
Tempo totale di analisi	min	217
Tempo di impiego dell'operatore	min	217
Minuti-operatore/campione	min	43
Costo attuale per campione	€	18.4
Costo campione su 5 anni con investimento	€	20.9
Costo per campione al netto dell'investimento	€	15.9
Capacità massima report annuali con stesso impiego dell'operatore	n	501
Capacità massima report annuali su 8h giornaliera	n	1106

Tabella 6.11: CASO 10

Caso 11-SECOTRON 300 PLC + LS3A

Il caso 11 prevede la sostituzione della troncattrice con la Remet SECOTRON 300 PLC e la sostituzione della pulitrice con la LS3A. Le considerazioni delle modifiche al processo sono le stesse delle singole modifiche.

CASO 11 - SECOTRON 300 PLC + LS3A		
Stima investimento	€	40.000
Tempo totale di analisi	min	172
Tempo di impiego dell'operatore	min	137
Minuti-operatore/campione	min	27
Costo attuale per campione	€	18.4
Costo campione su 5 anni con investimento	€	18.1
Costo per campione al netto dell'investimento	€	10
Capacità massima report annuali con stesso impiego dell'operatore	n	794
Capacità massima report annuali su 8h giornaliera	n	1395

Tabella 6.12: CASO 11

Caso 12-SECOTRON 300 PLC + LS3V Twin

Il caso 12 prevede la sostituzione della troncattrice con la Remet SECOTRON 300 PLC e la sostituzione della pulitrice con la LS3V Twin. Le considerazioni delle modifiche al processo sono le stesse delle singole modifiche.

CASO 12 - SECOTRON 300 PLC + LS3V Twin		
Stima investimento	€	46.000
Tempo totale di analisi	min	169
Tempo di impiego dell'operatore	min	134
Minuti-operatore/campione	min	27
Costo attuale per campione	€	18.4
Costo campione su 5 anni con investimento	€	19.0
Costo per campione al netto dell'investimento	€	9.8
Capacità massima report annuali con stesso impiego dell'operatore	n	812
Capacità massima report annuali su 8h giornaliera	n	1420

Tabella 6.13: CASO 12

Caso 13-SECOTRON 300 PLC + Innovation 250R Twin

Il caso 13 prevede la sostituzione della troncattrice con la Remet SECOTRON 300 PLC e la sostituzione della pulitrice con la Remet Innovation 250R Twin. Le considerazioni delle modifiche al processo sono le stesse delle singole modifiche.

CASO 13 - SECOTRON 300 PLC + Innovation 250R Twin		
Stima investimento	€	64.000
Tempo totale di analisi	min	173
Tempo di impiego dell'operatore	min	118
Minuti-operatore/campione	min	24
Costo attuale per campione	€	18.4
Costo campione su 5 anni con investimento	€	21.3
Costo per campione al netto dell'investimento	€	8.7
Capacità massima report annuali con stesso impiego dell'operatore	n	922
Capacità massima report annuali su 8h giornaliera	n	1387

Tabella 6.14: CASO 13

Caso 14-SECOTRON 300 PLC + ROBOMET

Il caso 14 prevede la sostituzione della troncattrice con la Remet SECOTRON 300 PLC e la sostituzione della pulitrice con la Remet ROBOMET. Questa configurazione rappresenta la massima automatizzazione del processo possibile con le tecnologie attuali.

CASO 14 - SECOTRON 300 PLC + ROBOMET		
Stima investimento	€	105.000
Tempo totale di analisi	min	169
Tempo di impiego dell'operatore	min	114
Minuti-operatore/campione	min	23
Costo attuale per campione	€	18.4
Costo campione su 5 anni con investimento	€	29.3
Costo per campione al netto dell'investimento	€	8.4
Capacità massima report annuali con stesso impiego dell'operatore	n	954
Capacità massima report annuali su 8h giornaliera	n	1420

Tabella 6.15: CASO 14

Individuazione dell'intervento ottimale

Sono stati simulati gli effetti di ogni modifica e combinazione di modifiche all'impianto, è quindi necessario effettuare una analisi comparativa tra le varie soluzioni per individuare quella più indicata per la situazione aziendale attuale. Si riporta in Figura 7.1 una comparazione tra il numero di minuti operatore per campione per i diversi casi analizzati. Si nota un notevole taglio dei tempi per tutte

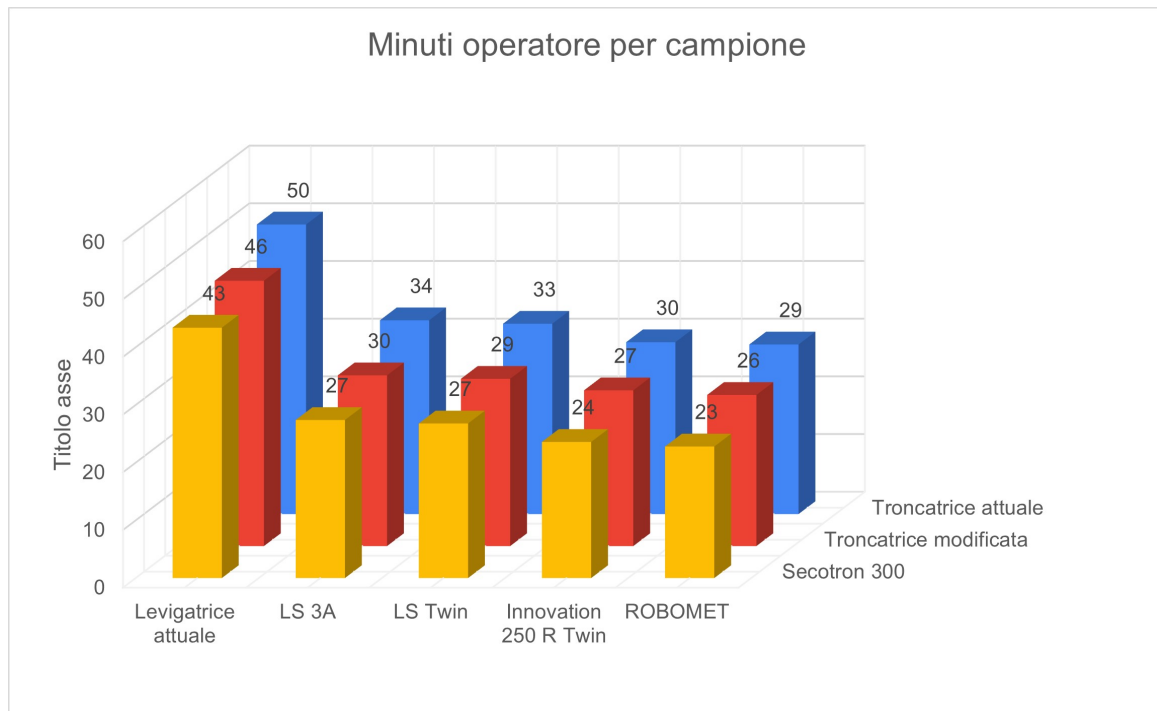


Figura 7.1: Comparazione minuti-operatore per campione

le soluzioni che prevedono la sostituzione della pulitrice, l'impatto della modifica o sostituzione della troncattrice risulta essere meno impattante, tale differenza è in parte attribuibile oltre al differente peso delle due fasi sul totale del ciclo (25% Lucidatura, 18% troncatura) e in parte all'effetto della modifica sulle altre fasi del ciclo, la sostituzione della lucidatrice infatti permette un migliore funzionamento dell'inglobatrice che potendo processare due campioni alla volta rispetto ad uno può raddoppiare la sua capacità. È ora necessario valutare la capacità di ogni soluzione di rispondere alla richiesta minima sufficiente per recuperare il ritardo e garantire un margine di sicurezza futuro. Si è proceduto quindi con il calcolo della capacità di analisi di ogni soluzione considerando il monte ore di manodopera medio degli ultimi anni. Per fare questa valutazione si sono presi dai database aziendali le ore di analisi per anno, si è calcolata la media e si è calcolato con le proporzioni del caso 0 il numero di ore operatore reali annuali. Conoscendo il numero di ore operatore annuali è possibile, ipotizzando un uguale impiego dell'operatore, calcolare il numero di campioni analizzabili e quindi di report producibili. Avendo individuato in 510 il numero minimo di report annuali per recuperare il ritardo tutte le soluzioni che prevedono il solo intervento sulla troncattrice non risultano essere sufficienti e sono quindi da scartare. Tutte le soluzioni rimanenti soddisfano le necessità aziendali, è quindi necessario introdurre parametri economici che possano guidare nella scelta migliore. Il primo parametro analizzato è il tempo per rientrare dell'investimento, tale indicatore è stato calcolato cercando il momento in cui il risparmio di manodopera di ciascuna soluzione compensa il costo dell'investimento. Da questa analisi si nota come le soluzioni che prevedono l'acquisto della macchina ROBOMET richiedono tempi elevati di rientro

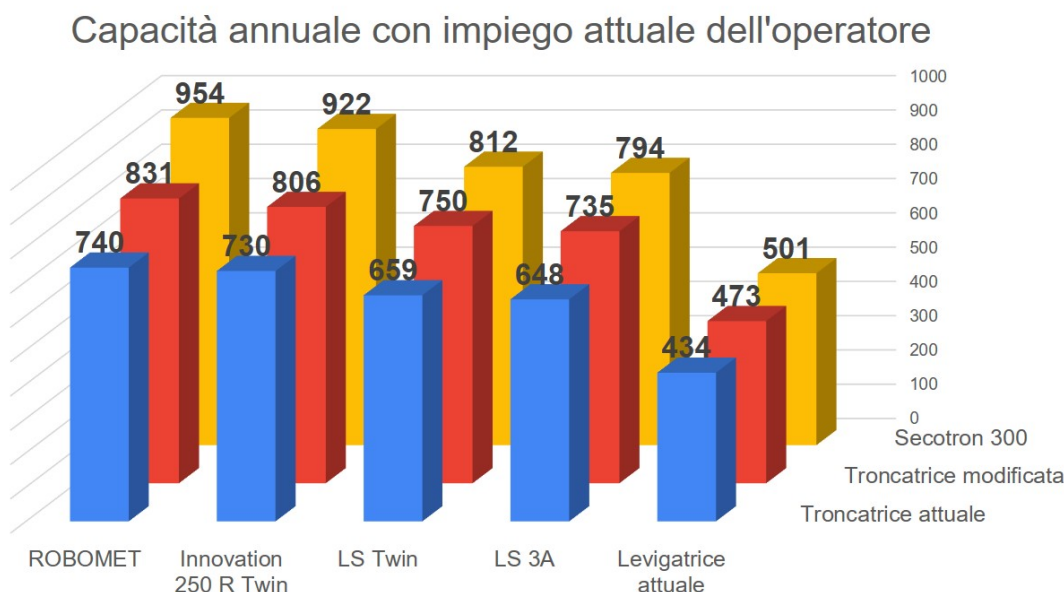


Figura 7.2: capacità annuale con impiego attuale dell'operatore

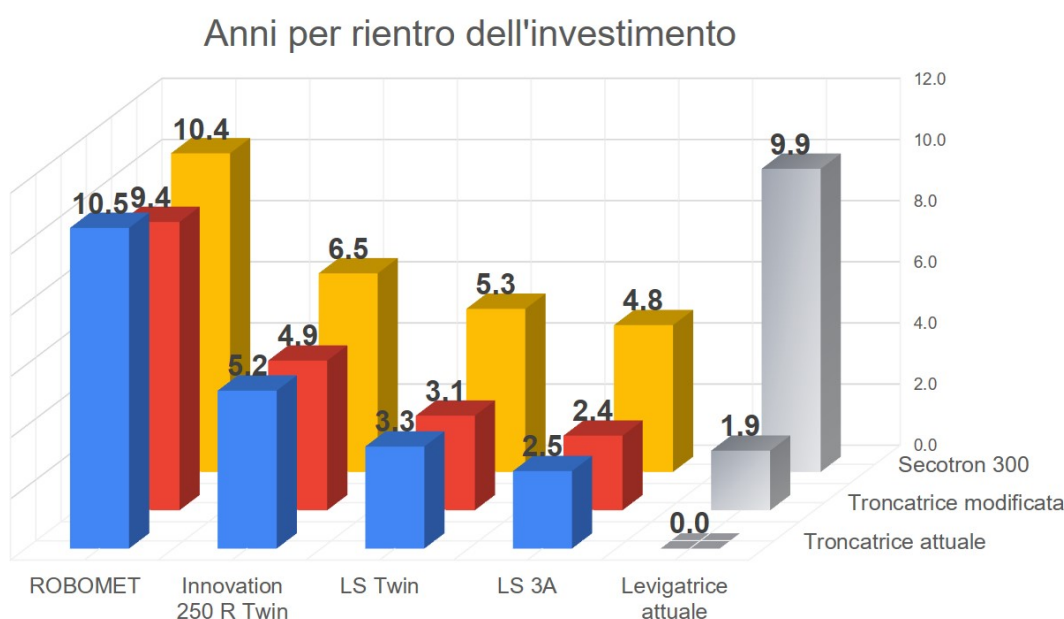


Figura 7.3: Anni per rientro dell'investimento

dell'investimento, le stesse soluzioni risultavano essere quelle con il maggiore taglio ai minuti-operatore per campione, si può quindi dedurre che tale macchina per portare ad un vantaggio economico necessiterebbe di un volume di analisi molto maggiore rispetto alla richiesta aziendale. Si possono quindi escludere tutte le soluzioni che prevedano l'acquisto di ROBOMET. Come ultimo indicatore nella scelta della migliore soluzione si è preso il costo per campione valutato su 5 anni ipotizzando di ammortare nello stesso periodo il costo dell'intervento. Si nota come delle soluzioni rimaste in considerazione quelle che prevedono l'acquisizione della pulitrice Innovation 250 R Twin o della troncatrice Secotron 300 presentano un costo maggiore del caso attuale e delle altre soluzioni, vengono quindi scartate anche queste opzioni. Le soluzioni rimaste in considerazione presentano tutte un costo per campione

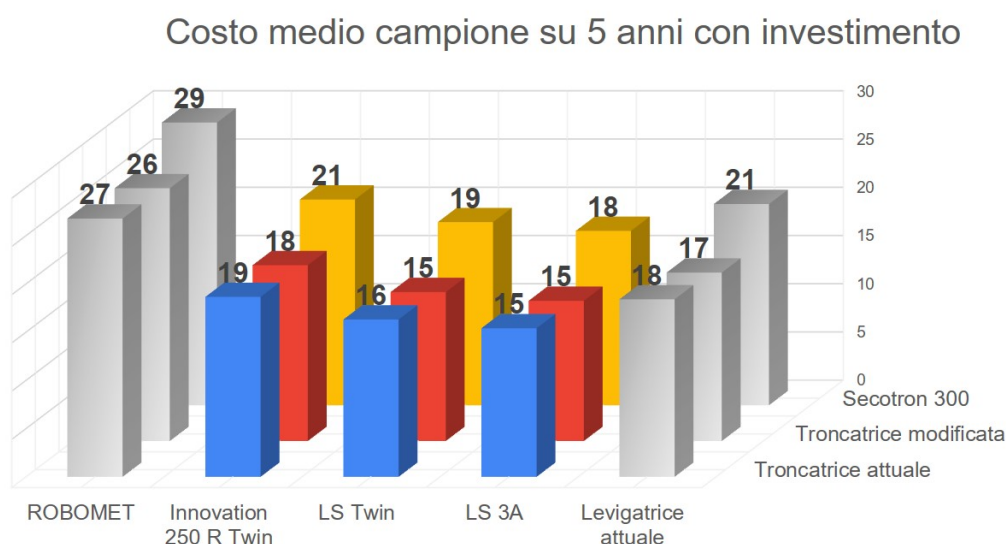


Figura 7.4: costo medio campione su 5 anni

simile, l'esborso per l'investimento varia di circa il 13% tra la soluzione più economica (LS3A) e la più costosa (LS3V Twin + modifiche troncatrice) si decide quindi di ampliare l'orizzonte temporale a 10 anni per evidenziare sul lungo periodo se una scelta risulti essere più vantaggiosa di un'altra. Sul

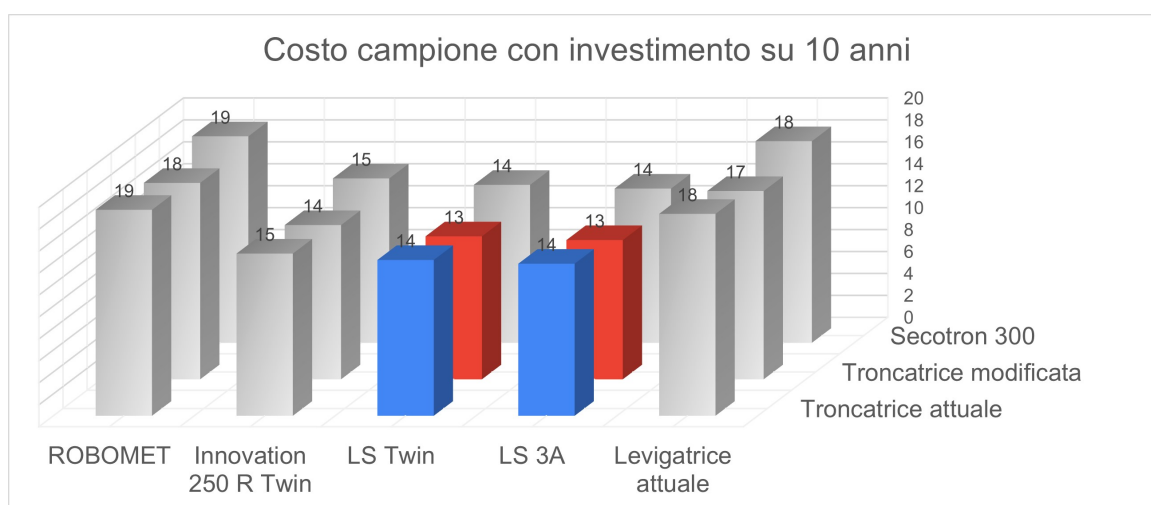


Figura 7.5

lungo periodo la modifica alla troncatrice risulta essere più vantaggiosa del mantenimento dell'attuale mentre per la scelta tra i due modelli di lucidatrice non si ha ancora una indicazione chiara, valutando però il numero massimo di report producibili a parità di impiego dell'operatore si evidenzia come la soluzione più costosa (LS3V Twin + modifiche troncatrice) risulti essere la più vantaggiosa garantendo maggiori margini per possibili incrementi futuri di richiesta ed un immediato sgravio dell'operatore. La soluzione in questione presenta anche due piatti di lucidatura. Questa configurazione permetterebbe, all'evenienza, di lavorare automaticamente su di un piatto e manualmente sul secondo, questa possibilità è stata fortemente richiesta dall'operatore essendo una casistica non nuova. In conclusione vista le considerazioni riportare si consiglia l'investimento per l'acquisto della pulitrice LS3V Twin e la modifica del sistema di posizionamento del campione della troncatrice attualmente in dotazione.

Conclusioni

In questo percorso sono state acquisite le conoscenze minime di metallurgia, lavorazioni meccaniche e metallografia per comprendere il processo di analisi metallografica e l'importanza di tale analisi nella produzione di viteria critica. Costruito un background sufficientemente solido per poter comprendere il processo si è affiancato l'operatore nello svolgimento delle analisi raccogliendo feedback su elementi limitanti e possibili migliorie dell'attuale laboratorio. Sempre in questa fase di affiancamento all'operatore si sono effettuate diverse prove cronometrate per calcolare i tempi medi di lavorazione di un campione e i tempi di ogni singola fase. Si è quindi proceduto con una analisi dei dati aziendali su questo step fondamentale del processo di produzione di viteria critica. Durante questa analisi si è notata una discordanza tra i tempi preventivati per le verifiche e i tempi reali del laboratorio, si sono quindi ricercati gli effetti di questa discrepanza sulla risposta del laboratorio al fabbisogno aziendale. In quest'ultima analisi si è notato un trend allarmante di crescita del ritardo accumulato di anno in anno e si è quindi evidenziata la necessità di un intervento sul processo o sulle dotazioni del laboratorio. Da una analisi preliminare si è notato come il numero di campioni processabili quotidianamente con l'attuale processo sarebbe sufficiente per rispondere al fabbisogno aziendale, il ritardo accumulato risulta quindi da attribuirsi all'impossibilità dell'operatore di dedicare il giusto tempo a questo tipo di analisi. Si è quindi deciso di intervenire sulla dotazione del laboratorio cercando di rispondere al fabbisogno aziendale mantenendo costante o diminuendo l'ammontare attuale di ore che l'operatore dedica alla metallografia. Si sono quindi ricercate sul mercato possibili soluzioni intervenendo sulle fasi dell'analisi dal maggiore impatto sui tempi totali, quindi ottenimento del campione, lucidatura e inglobatura, quest'ultima è stata presto scartata essendo l'unico processo automatico nell'attuale laboratorio. Individuate le possibili soluzioni si è creato un modello per la simulazione dell'impatto singolo e simultaneo della modifica o sostituzione di una o più macchine, con i dati prodotti dalle simulazioni si è effettuata una analisi tecnico-economica per evidenziare il soddisfacimento dell'obiettivo indicato in precedenza e quindi individuare tra le soluzioni indicate quella che meglio si addice alle esigenze aziendali. Dall'analisi è emersa la convenienza di un intervento sia sulla fase di ottenimento del campione sia sulla lucidatura, si consiglia quindi la sostituzione dell'attuale lucidatrice con la pulitrice Remet LS3V Twin e la modifica dell'attuale troncatrice con un più sofisticato sistema di posizionamento del pezzo da cui ricavare il campione. Nella tabella successiva viene riportata una stima degli effetti di tale intervento su alcuni indicatori di interesse.

LS3V + Modifiche alla troncatrice	
Stima investimento	24.000€
Variazione costo medio campione con ammortamento in 5 anni	-16%
Variazione costo medio campione al netto dell'investimento	- 42%
Ore annuali di manodopera risparmiate	353
Incremento capacità massima annuale a parità di impiego dell'operatore	+ 73%
Capacità massima annuale rispetto al fabbisogno attuale	307 %

Tabella 8.1: Impatto interventi sui costi e capacità del laboratorio

Bibliografia

- [1] M. Boniardi e A. Casaroli. *Metallurgia degli acciai*. 2017, pp. 182–183.
- [2] A. Zielińska-Lipiec A. Ziewicz1*, J. Kowalska e K. Ziewicz. «MICROSTRUCTURE CHARACTERIZATION OF WELDS IN X5CrNiCuNb16-4 STEEL IN OVERAGED CONDITION». In: *ADVANCES IN MATERIALS SCIENCE* (2019).
- [3] Giorgio Olmi Barbara Reggiani. «Experimental Investigation on the Effect of Shot Peening and Deep Rolling on the Fatigue Response of High Strength Fasteners». In: *MDPI* (2019).
- [4] Imam Basori et al. *Microstructure and Mechanical Properties Analysis of Quenched and Tempered AISI 4340 Steel*. 2019. URL: <https://knepublishing.com/index.php/Kne-Social/article/view/4139/8517#toc>.
- [5] Gianfranco Bianco. *Rullatura delle filettature esterne*. 2021. URL: <http://www.biancogianfranco.com/Agg%20Area%20Italia/Cremagliere/Rullatura%20delle%20filettature%20esterne.pdf>.
- [6] K. Candioto et al. «Characterization of the Superalloy Inconel 718 After Double Aging Heat Treatment». In: *ResearchGate* (2015).
- [7] *Catalogo Poggipolini Spa*. 2020. URL: <https://www.poggipolini.it/fasteners-catalog.pdf>.
- [8] Latrobe Speciality Steel Company. *MP35N Alloy*. 2008.
- [9] Special Metals Corporation. *Inconel alloy 718 Datasheet*. 2007.
- [10] Durand-Charre. «The microstructure of Superalloys». In: *CRC Press* (1997).
- [11] EASA. *What is the definition of "Critical parts"?* 2013. URL: <https://www.easa.europa.eu/faq/19013>.
- [12] Titanium Engineers. *MP35N Alloy*. 2020.
- [13] All Metals and Forge Group. *Alloy Information for PH Grades 17-4PH*. 2021. URL: <https://www.steelforge.com/ph-grades-17-4ph/>.
- [14] M.P. Sammartino e G. Favero e G. Visco e I. Nicolini. *La produzione di sezioni metallografiche*. 2004.
- [15] E. Gianotti. *TITANIO E SUE LEGHE. TRATTAMENTI TERMICI Ti 6Al 4V*. 2007. URL: https://www.gianottielio.it/syntax_files/tbl_documenti_allegato_ita_id_documento43.pdf.
- [16] High Performance Alloy Inc. *Alloy 718 Datasheet*. 2021.
- [17] AK steel International. *ARMCO PH 13-8 Mo Product Data Bulletin*. 2019. URL: https://www.aksteel.eu/files/downloads/ak_steel_armco%20AE_ph_13-8_mo_product_data_bulletin_-apr__2019-_74.pdf.
- [18] SAE International. *Aerospace Material Specification AMS 5622*. 2013.
- [19] SAE International. *Aerospace Material Specification AMS 6414*. 2016.
- [20] SAE International. *AEROSPACE MATERIAL SPECIFICATION AMS5662*. 2016.
- [21] SAE International. *AMS5844*. 2019.
- [22] SAE International. *SAE Aerospace Material Specification AMS5629*. 2016.

- [23] SAE International. *SAE Aerospace Material Specification AMS5659*. 2016.
- [24] Kumar et al. «Indigenous development and airworthiness certification of 15% PH precipitation hardenable stainless steel for aircraft applications». In: *Academy Proceedings in Engineering Sciences*. A cura di Springer. 2013.
- [25] Università degli studi de L'Aquila, cur. *Corso di didattica di tecnologia dei materiali- Analisi metallografica*.
- [26] P. F. Hlava M. J. Cieslak C. R. Hills e S. A. David. «An investigation of the high-temperature and solidification microstructures of PH 13-8 Mo stainless steel». In: *Metallic Materials Journal A* (1990).
- [27] Total Materia. *Database sui Materiali più completo al mondo*. 2021. URL: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=Home&LN=IT>.
- [28] AZO materials. *Titanium and Titanium Alloys - Forging Parameters and Forgeability of Titanium and Titanium Alloys*. 2021. URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2626>.
- [29] High Temp Materials. *Tech Data*. 2021. URL: <https://www.hightempmetals.com/techdata.php>.
- [30] Smiths Metal. *13-8 PH Datasheet*. 2021. URL: <https://www.smithmetal.com/pdf/stainless/ph/13-8ph.pdf>.
- [31] mypoliuni. *metallografia*. 2020. URL: http://mypoliuni.weebly.com/uploads/8/1/6/8/81687434/10._metallografia.pdf.
- [32] Neo Nickel. *Alloy 13-8 Datasheet*. 2021. URL: <https://www.neonickel.com/it/alloys/acciai-inossidabili/alloy-13-8/>.
- [33] Neo Nickel. *Alloy 15-5 Datasheet*. 2021. URL: <https://www.neonickel.com/it/alloys/acciai-inossidabili/alloy-15-5/>.
- [34] ChinaSavvy an Omnidex company. *What is hot forging*. 2021. URL: <https://www.chinasavvy.com/what-is-hot-forging>.
- [35] Metal Suppliers Online. *Metal Property Data 4340*. 2021. URL: <https://www.suppliersonline.com/propertypages/4340.asp#General>.
- [36] PIVOTPOINT. *Cold Forming Basics for Industrial Fasteners*. 2017.
- [37] Federico Scarpellini. «CARATTERIZZAZIONE DI UN ACCIAIO 17 -- 4 PH OTTENUTO MEDIANTE PRESSATURA ISOSTATICA A CALDO». Laura Magistrale. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA, 2018.
- [38] C. J. Slunder, A. F. Hoenie e A. M. Hall. *Thermal and mechanical tretment for precipitation-hardening stainless steels*. 1968.
- [39] Ing. Chiara Soffritti. *Strumenti e tecniche di indagine metallografica*. 2010.
- [40] MT acciai speciali. *Scheda prodotto ITA 40NiCrMo7*. 2021.
- [41] AK Steel. *ARMCO 15-5 PH*. 2019.
- [42] AK Steel. *ARMCO 17-4 PH STAINLESS STEEL Product Data Bulletin*. 2018.
- [43] THOMAS C. WILLIAMS / Carpenter Technology. *MP35N: A Superalloy for Critical*. 2019.
- [44] Totalmateria. *Cold and Hot Forging: An Overview*. 2010. URL: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=IT&NM=277>.
- [45] Saverio Tremamunno. «Studio dei trattamenti termici sulla lega di Inconel 625 prodotta per Selective Laser Melting». Laura Magistrale. Politecnico di Torino, 2018.
- [46] Università degli studi di Trieste, cur. *Preparazione di campioni metallografici*. 2004.
- [47] Peng-Nan Wang e Shih-Hsien Chang. «Effect of the Mechanical Properties and Corrosion Behaviors of Nickel-Cadmium Duplex Electroplated AISI 4340 Steel by Using Various Solid Solution Treatments». In: *Materials Transactions* (2018). A cura di The Japan Institute of Metals e Materials.

- [48] Yixuan Feng Zhipeng Pan e Steven Y. Liang. «Material microstructure affected machining: a review». In: *Manufacturing Rev* (2017).