

Giornata di Studio

Materiali metallici per l'aeronautica

TERNI | 31 GENNAIO 2024



GS2405

Sviluppo di Processi di Saldatura laser per componenti di superleghe ed acciai speciali realizzati mediante ALM per la realizzazione di propulsori Aerospaziali

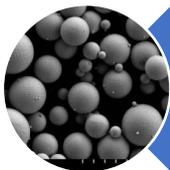
Giuseppe Barbieri – ENEA – Roma CR Casaccia giuseppe.barbieri@enea.it tel. 06 3048 6771

F. Cognini, A. Fava, M. Moncada

SOMMARIO



Cenni su Motori Aerospaziali



Materiali per stampa ALM (Additive Layer Manufacturing)

- Alloy 718; Acciaio 17-4PH; CuCrZr



Processo di saldatura laser

Casi studio:
Sviluppo del processo di saldatura Laser



Pre Welding Procedure Specification

Trattamenti Termici e Termomeccanici
Caratterizzazione NDT, Macroscopica
Realizzazioni e Conclusioni



Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



Cenni motori Aerospaziali



AVIO: <https://www.avio.com/>

Motori terzo stadio CH₄/O₂ liquido



Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



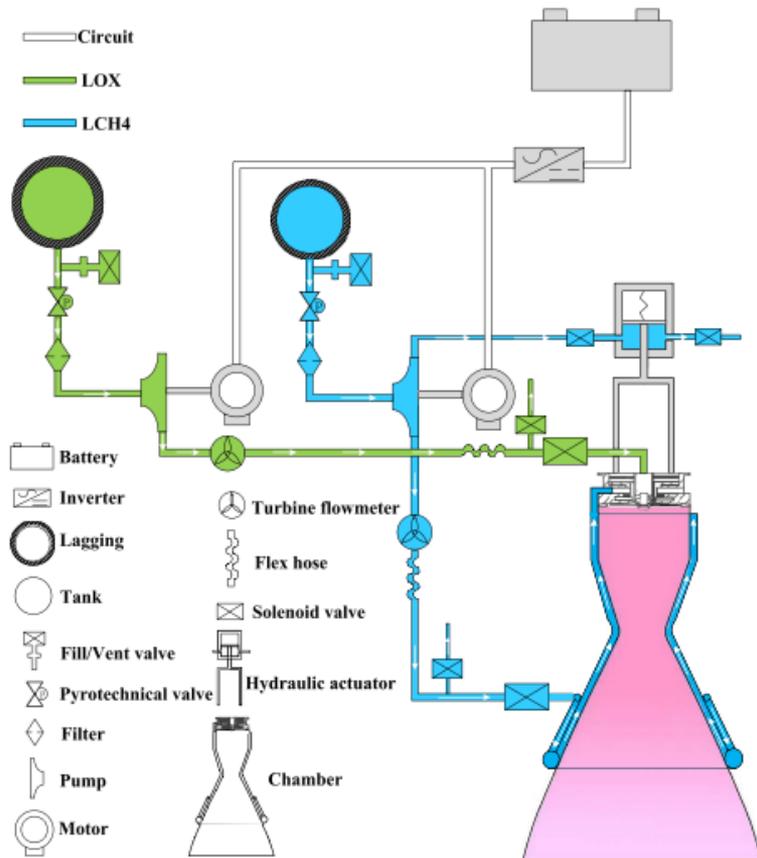
Cenni motori Aerospaziali

SCHEMATIZZAZIONE MOTORI

LNOX +LCH4

<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.03.002>

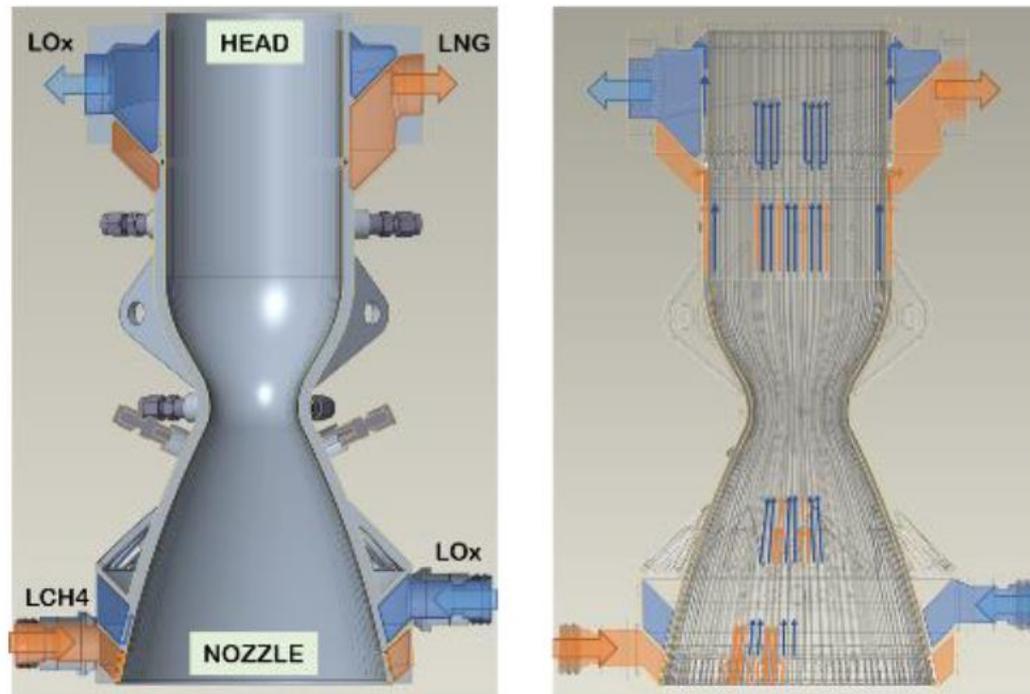
[Why LOX-LCH4 Propulsion System Development at GRC?
\(nasa.gov\)](https://nasa.gov)



Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



Cenni motori Aerospaziali



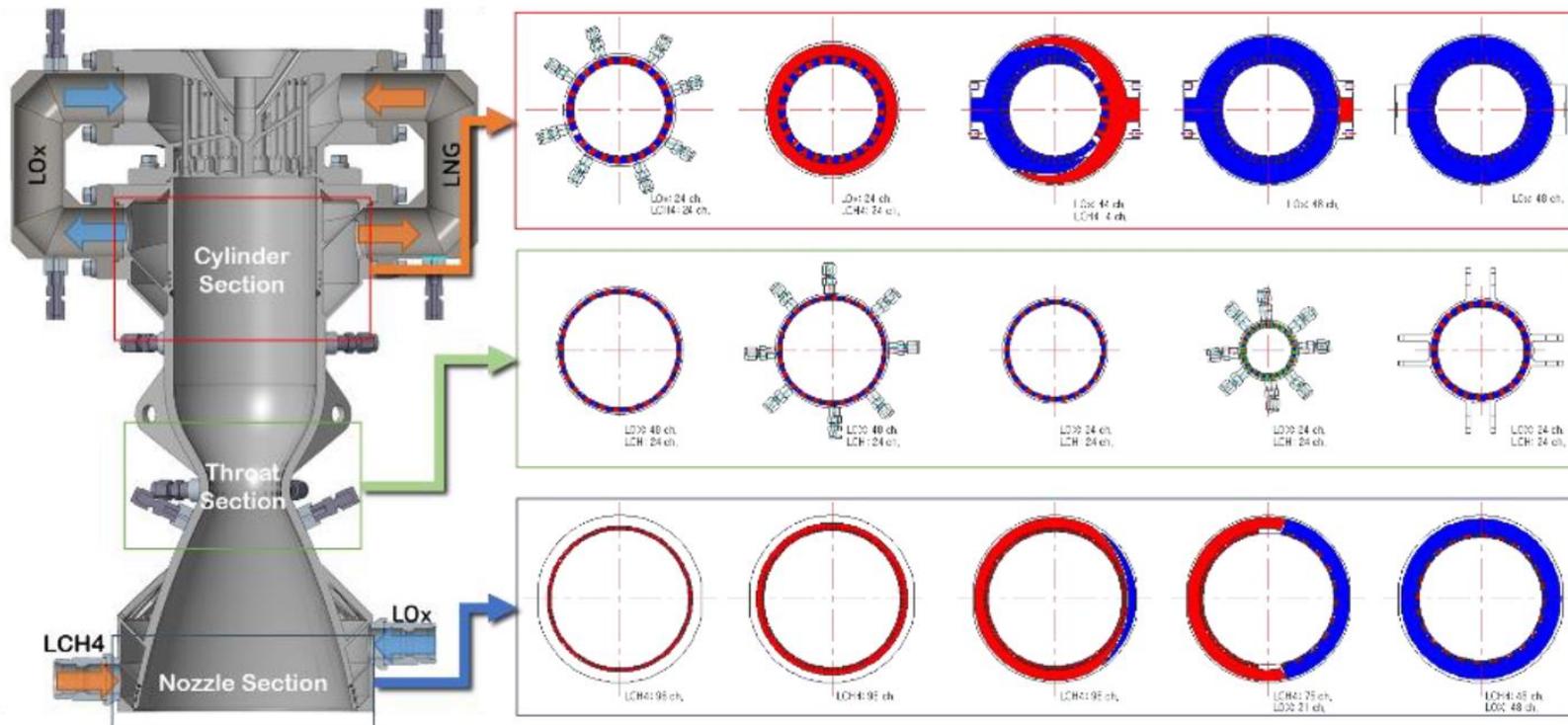
DOI: 10.13009/EUCASS2023-390 - Aerospace Europe Conference 2023 – 10TH EUCASS – 9TH CEAS



Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



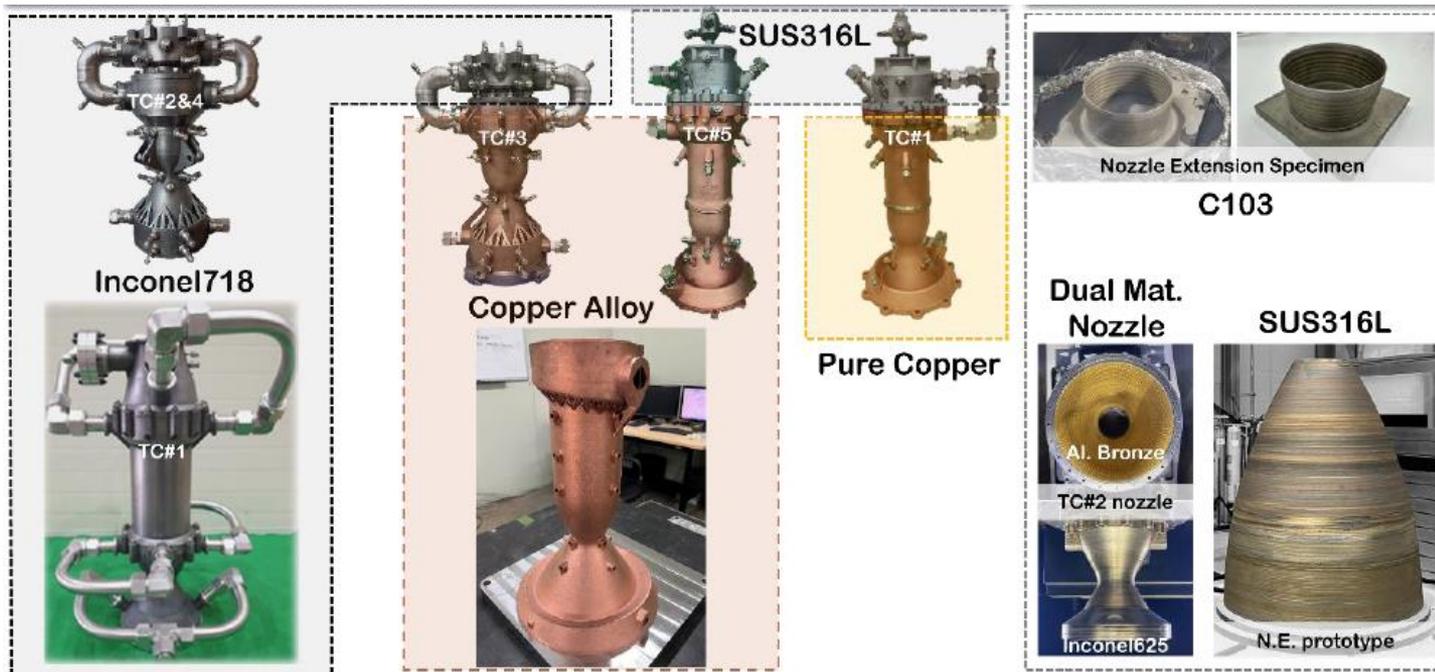
Cenni motori Aerospaziali



Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



Cenni motori Aerospaziali



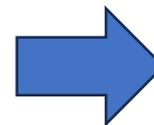
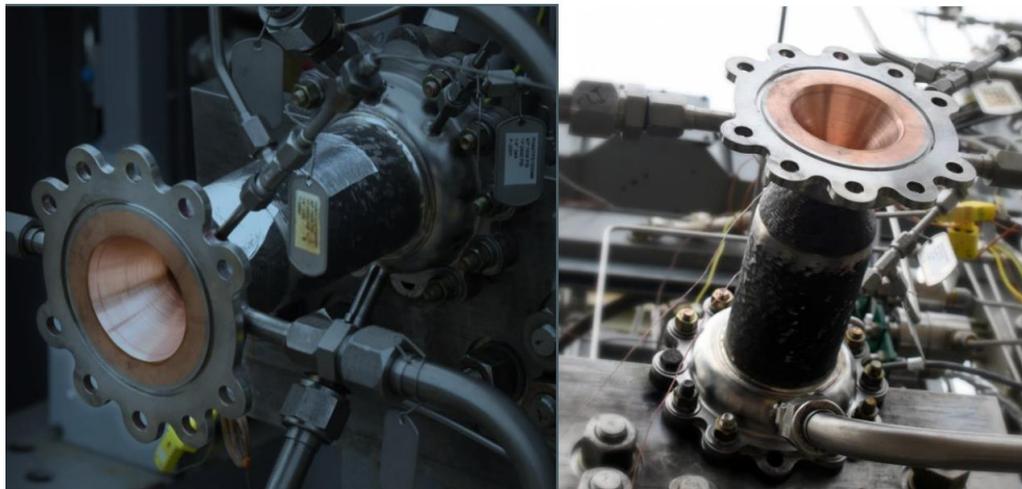
Principali materiali



Cenni motori Aerospaziali

Bi materiale

Liner in Copper alloys + Closeout 718 / 625 / SS



Monomateriale

3D printed



Principali «Architetture»

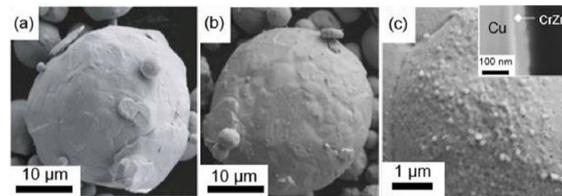
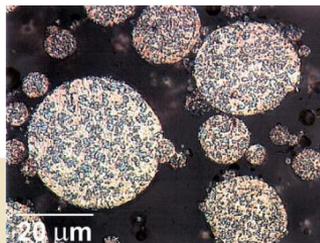


Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



MATERIALI

GRCop-84 - Cu₈Cr₄Nb -



LEGHE DI RAME



GRCop-84: A High-Temperature Copper Alloy for High-Heat-Flux Applications
(NASA David L. Ellis - Glenn Research Center, Cleveland, Ohio)

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111419>

Alloy	Elements			
	Cu	Cr	Nb	Zr
GRCop-42	Balance	3.1 - 3.4	2.7 - 3.4	-
GRCop-84	Balance	6.2-6.8	5.4-6.0	-
C-18150	Balance	0.5-1.5	-	0.05-0.2



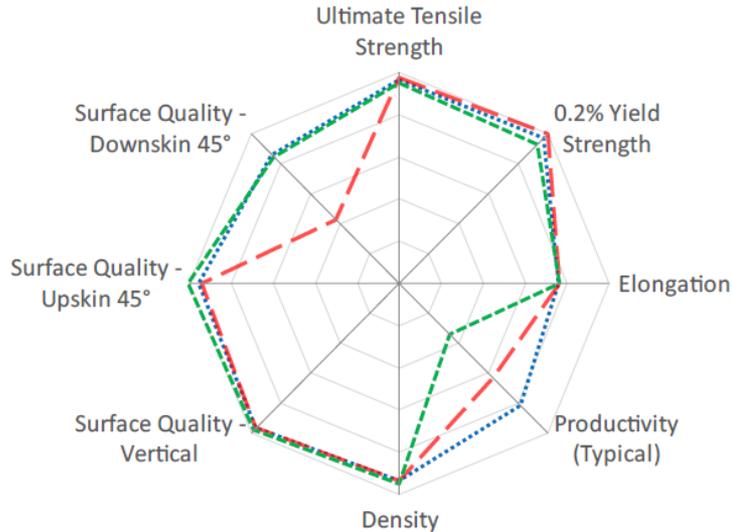
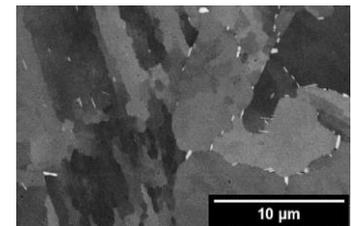
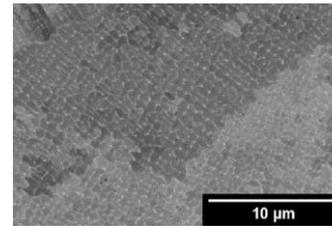
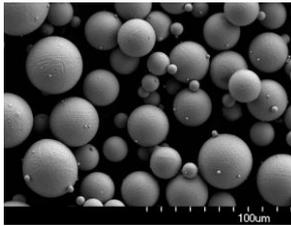
Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



MATERIALI

Alloy 718 - ALM

-  Base Parameter 285 SOLN+AGE
-  Base Parameter 287 SOLN+AGE
-  Surface Parameter 286 SOLN+AGE



TENSILE DATA

Tensile testing done in accordance with ASTM E8 and ASTM E21

Test Temperature: RT	Modulus of Elasticity (GPa)		0.2% Yield Strength (MPa)		Ultimate Tensile Strength (MPa)		Elongation (%)		Reduction of Area (%)	
	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V
	Thermal State									
As-Built	190	150	740	620	1060	970	29.0	33.0	--	--
SOLN+AGE	195	175	1305	1220	1495	1400	15.0	17.5	--	--

TENSILE DATA

Tensile testing done in accordance with ASTM E8 and ASTM E21

Test Temperature: RT	Modulus of Elasticity (GPa)		0.2% Yield Strength (MPa)		Ultimate Tensile Strength (MPa)		Elongation (%)		Reduction of Area (%)	
	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V
	Thermal State									
As-Built	185	180	755	705	1065	1040	29.5	30.5	--	--
SOLN+AGE	195	195	1315	1285	1480	1450	16.5	16.5	--	--
VSR+HIP+SOLN+AGE	205	200	1100	1105	1355	1350	24.5	24	36.5	35.5

Produttività: 8-25 cmc/h

Data sheet ge.com/additive M2 Series 5 Nickel 718



Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



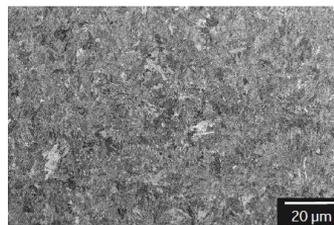
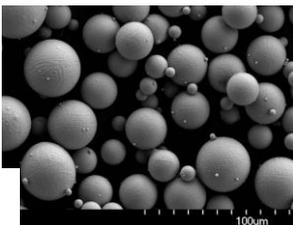
MATERIALI

SS 17- 4PH - ALM

□ Parameter 121 SOLN+AGE

▣ Parameter 123 SOLN+AGE

⊞ Parameter 246 SOLN+AGE



TENSILE DATA

Tensile testing done in accordance with ASTM E8 and ASTM E21

Test Temperature:

RT

Thermal State

As-Built
SOLN+AGE

Modulus of Elasticity (GPa)	0.2% Yield Strength (MPa)		Ultimate Tensile Strength (MPa)		Elongation (%)		Reduction of Area (%)		
	H	V	H	V	H	V	H	V	
187	184	715	705	995	935	17.0	17.5	--	--
195	197	1290	1300	1430	1435	12.5	10.5	--	--

TENSILE DATA

Tensile testing done in accordance with ASTM E8 and ASTM E21

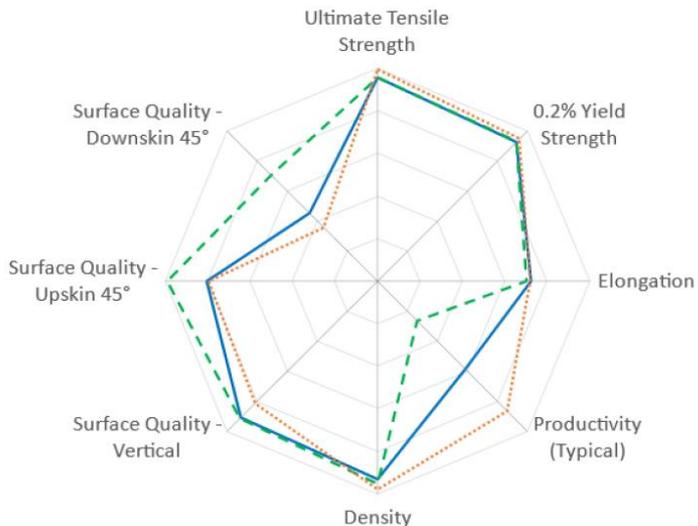
Test Temperature:

RT

Thermal State

As-Built
SOLN+AGE

Modulus of Elasticity (GPa)	0.2% Yield Strength (MPa)		Ultimate Tensile Strength (MPa)		Elongation (%)		Reduction of Area (%)		
	H	V	H	V	H	V	H	V	
181	168	765	775	935	935	18.0	18.5	--	--
190	195	1290	1300	1430	1435	13.0	10.0	--	--



Produttività: 8-25 cmc/h

Data sheet ge.com/additive M2 Series 5 Steel 17-4-Ph

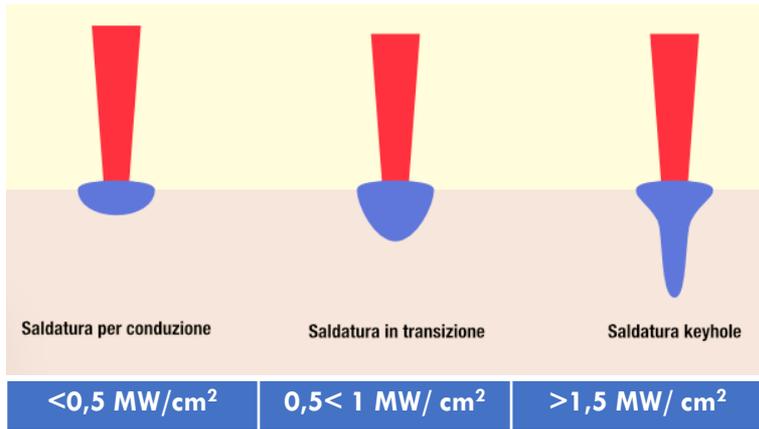


Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024

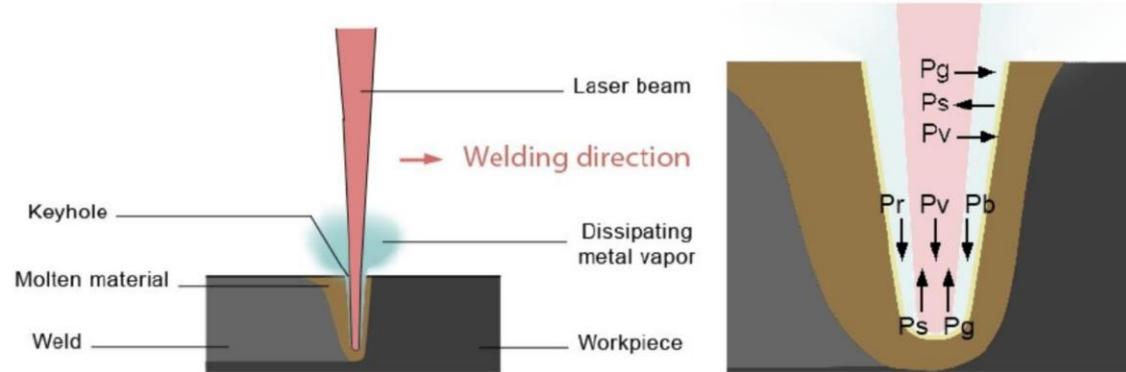


Cenni saldatura laser ed apparecchiature

Tipologie di saldature laser

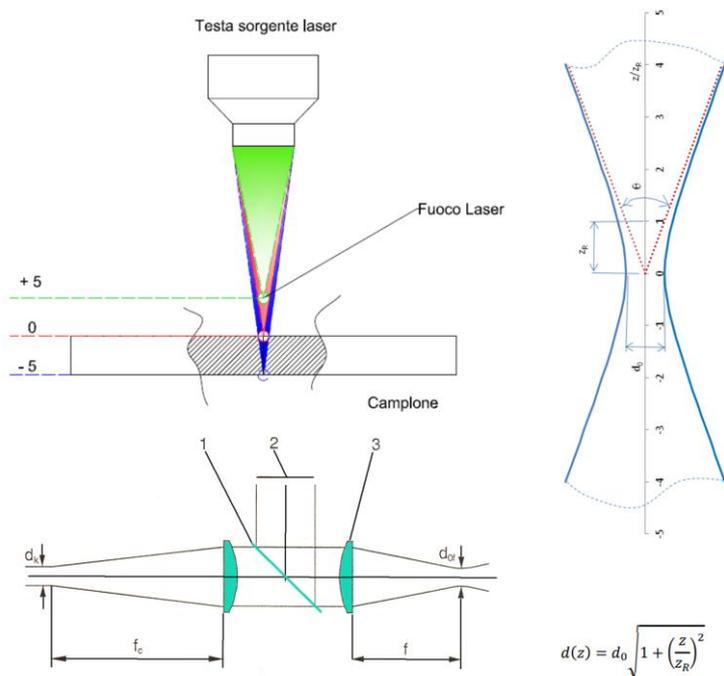


Saldatura Key-hole Ad alta densità di energia

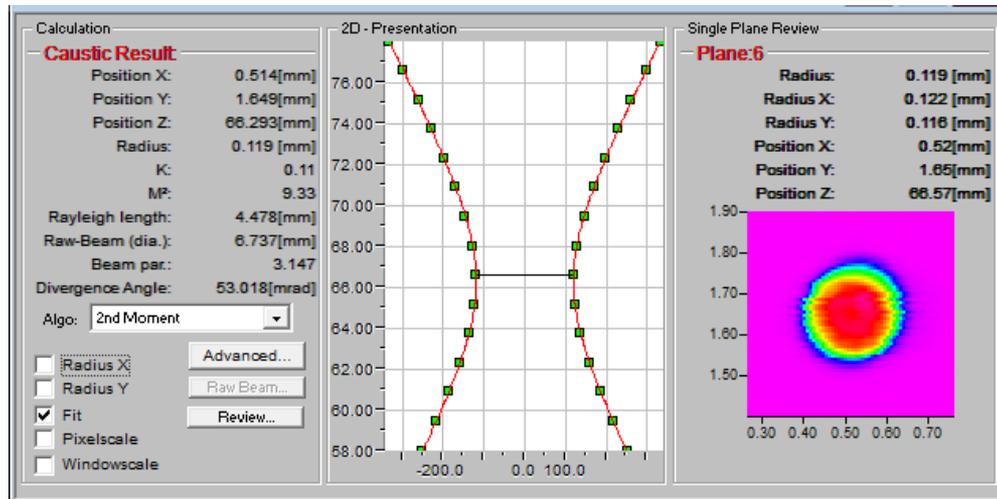


Cenni saldatura laser ed apparecchiature

Parametro di focalizzazione



Caratterizzazione del fascio utilizzato



Pn=4200W
f_c=100 mm; d_k=100 μm;
f=250 mm
d_o = 250 μm
z_r = 4,5 mm

Wobbling
O/8/∞
Fino a 1000 Hz
Fino a 2,5 mm



Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



Cenni saldatura laser ed apparecchiature

Workstation laser Originale



Volume di lavoro 500 x 500 x 300 mm
Vx,y,z: 0.1 - 12 m/min + Asse rotativo

SETUP

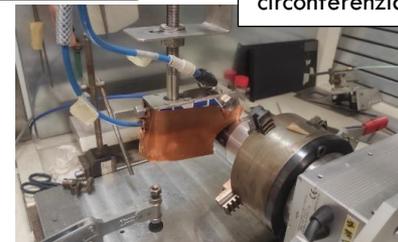


Sistema a doppia lama d'aria per la protezione delle ottiche

Pattino di saldatura per leghe reattive con ugello a spingere sistema di protezione gassosa a rimorchio

Sistema di bloccaggio

Per giunti circolarziali

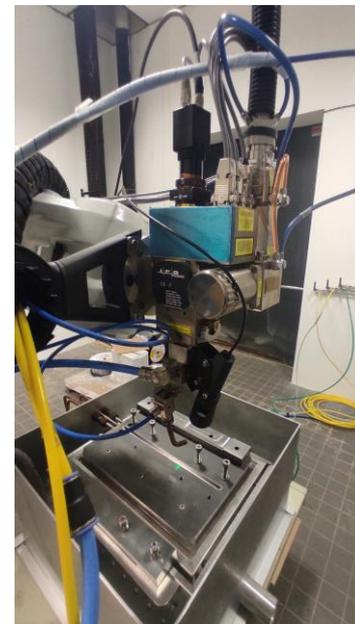
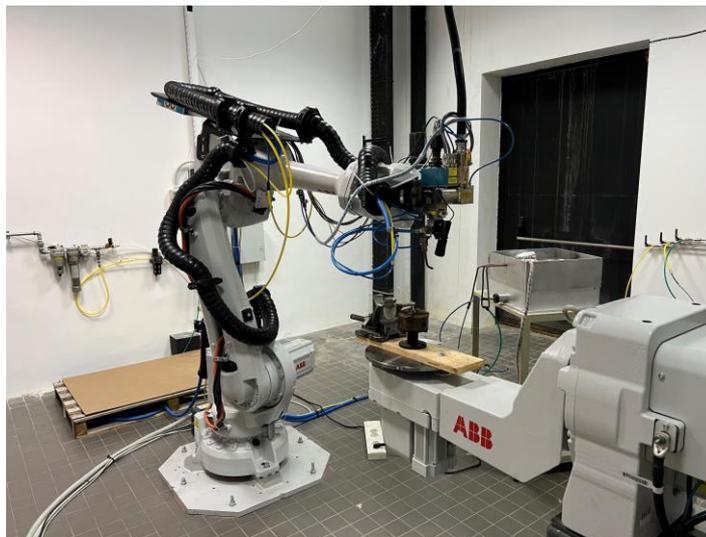


Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



Cenni saldatura laser ed apparecchiature

Workstation laser finale con sistema di visione ed inseguitore di giunto

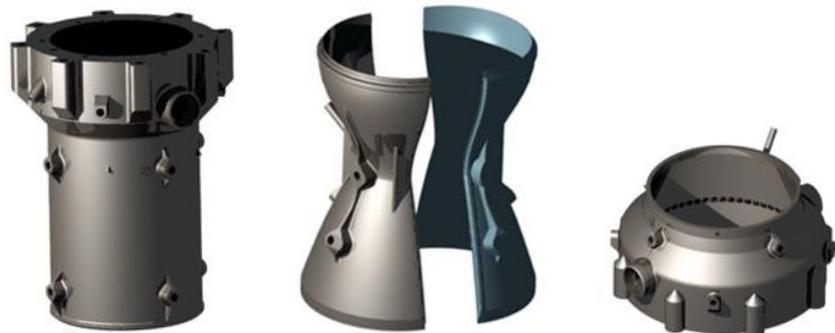


Stessa Sorgente e sistema di focalizzazione



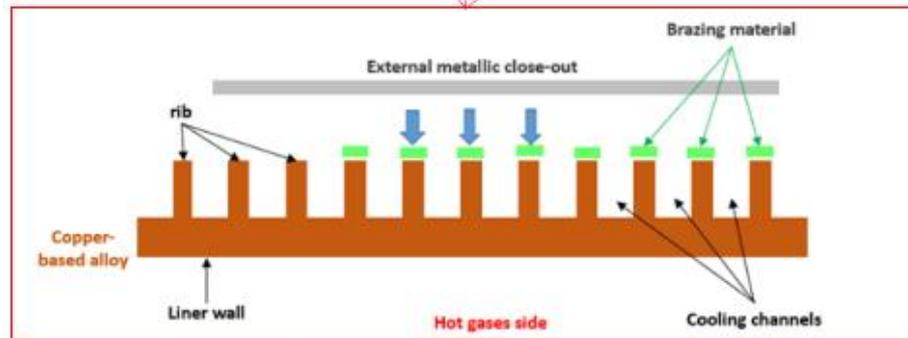
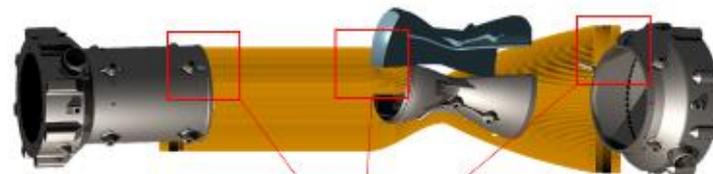
Casi Studio

Caso 1: Assembling mediante saldatura laser di sotto insiemi stampati i mediante SLM



DOI: 10.13009/EUCASS2019-315

Caso 2: Saldatura laser del closeout nel caso di motori con liner in lega di Rame

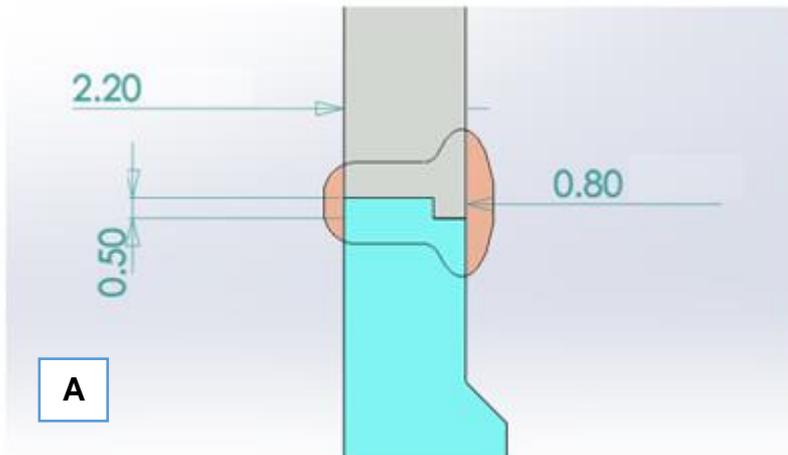


Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024

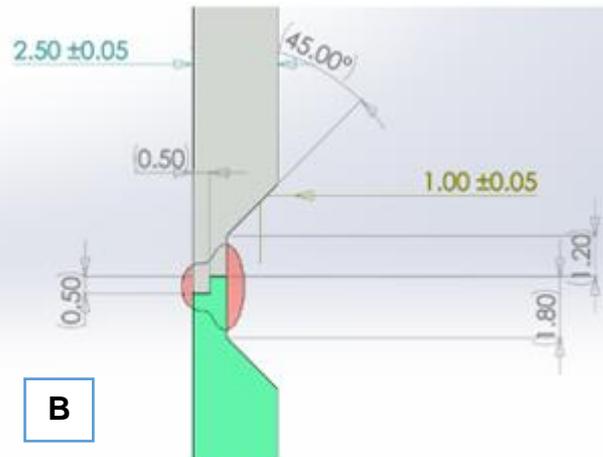


Tipi di Giunto di interesse

Caso 1: Assembling mediante saldatura laser di sotto insiemi stampati i mediate SLM



Caso 2: Saldatura laser del closeout nel caso di motori con liner in lega di Rame



Caso 1: Materiale di Interesse
Alloy 718 / Alloy 625 (A + B)

Caso 2: Materiale di Interesse
SS 17-4 PH 625 (A + A_{var})



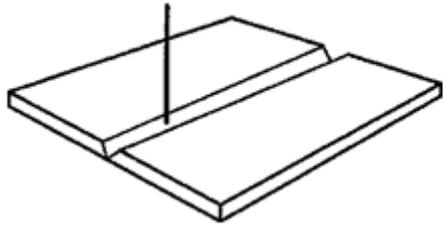
Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



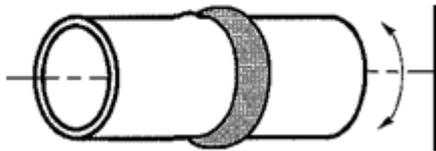
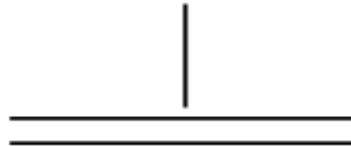
Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A

Standard di riferimento AWS 17.1

Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications



1G



1G



Campioni piani > 75 mm x 200 mm x t=1-3 mm



Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – Identificazione parametri

Materiale surrogato AISI 316

Valutazione preliminare di range di

- potenza
- velocità
- Wobbling (Frequenza/ ampiezza)

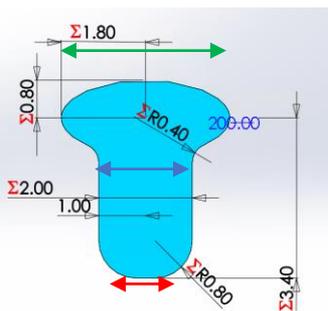
Test di rifusione e valutazione della forma e delle porosità

3 velocità V: 0,78/ 1,02 / 1,2 m/min

3 apporti termici Q

3 rapporti wobbling

Giunto ideale



Piano Sperimentale test Bead on Plate

n.	V [mm/s]	Q [J/mm]	d.wob [mm]	F [Hz]	P [W]
1	13	70	0		910
2	13	88	0,2	504	1144
3	13	106	0,4	252	1378
4	17	70	0,2	504	1190
5	17	88	0,4	252	1496
6	17	106	0		1802
7	20	70	0,4	252	1400
8	20	88	0		1760
9	20	106	0,2	504	2120

-Bh, bm, bl:

larghezza zona fusa in sommità, a metà e alla base;
-2p, A: perimetro e area della zona fusa (ZF).



Giornata di studio

Materiali metallici per l'aeronautica

Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – Identificazione parametri



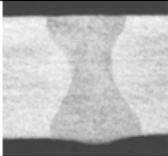
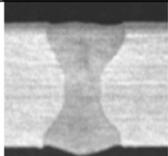
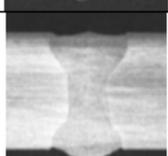
Analisi Visiva

ID	V (mm/s)	Q (J/mm)	Wob (mm)	P (W)	Bh (mm)	bm	bl	2p(mm)	A (mm ²)	Sezione Macrografica
1	13	70	0	910	1,63	1,01	0	7,57	3,26	
2	13	88	0,2	1144	1,97	0,93	1,31	9,99	4,66	
3	13	106	0,4	1378	2,11	1,04	1,68	10,13	5,26	
4	17	70	0,2	1190	1,68	0,88	0	7,44	2,87	
5	17	88	0,4	1496	2,19	0,91	1,36	9,54	4,14	

Analisi Macrografica (estratto)



Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – Identificazione parametri

ID	V (mm/s)	Q (J/mm)	Wob (mm)	P (W)	Bh (mm)	bm	bl	2p(mm)	A (mm ²)	Sezione Macrografica
1'	13	122	0	1586	1,85	0,85	1,97	9,9	4,13	
4'	17	122	0,2	2074	1,85	0,86	1,84	9,83	3,96	
7'	20	122	0,4	2440	1,92	0,94	1,73	10,1	4,01	

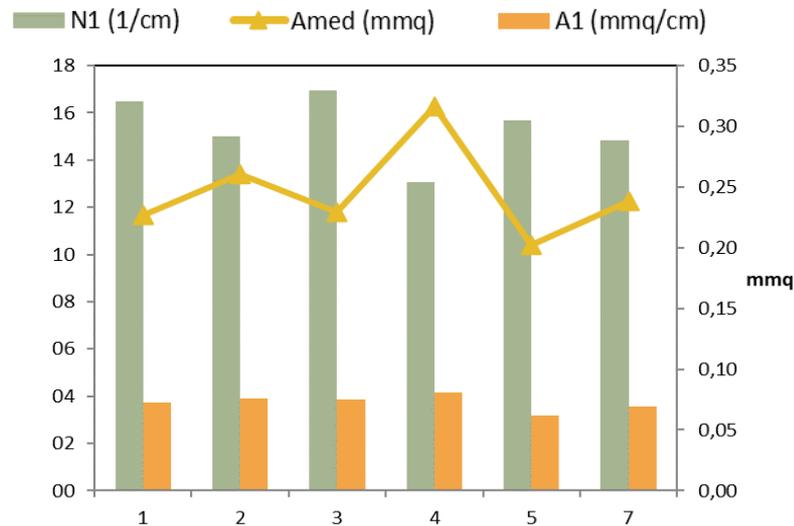
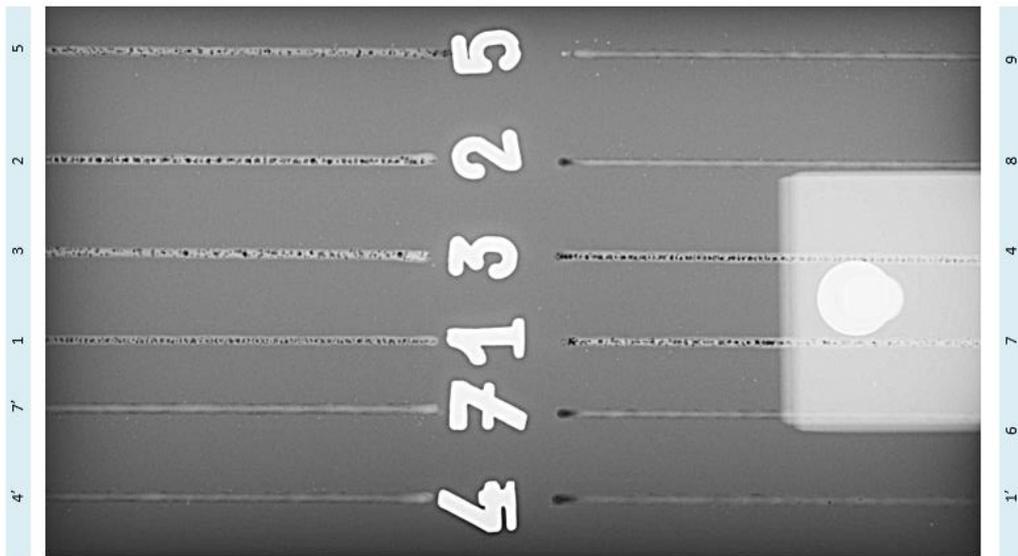
**3 test aggiuntivi per quei parametriche non consentivano la piena penetrazione
Q = 122J/mm**



Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – Identificazione parametri

Analisi Radiografica

Effettuata con analisi di immagine sui giunti «porosi»



Incidenza N1 (numero di porosità per centimetro: ordinata lato SX);
Area specifica A1 (area porosità per centimetro: ordinata lato SX)
Dimensione media Amed (A1/N1: ordinata lato DX)

Nelle saldature 1-5 e 7 la porosità è sistematica mentre nelle restanti saldature il livello di porosità è trascurabile;
Es.: nella 1' sono presenti 3 difetti abbastanza ravvicinati di area proiettata media $0,14 \text{ mm}^2$

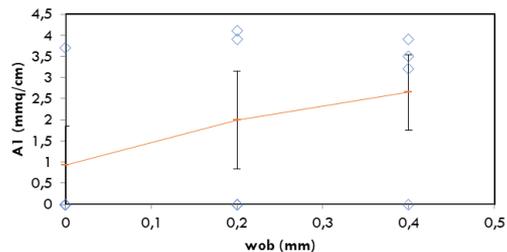
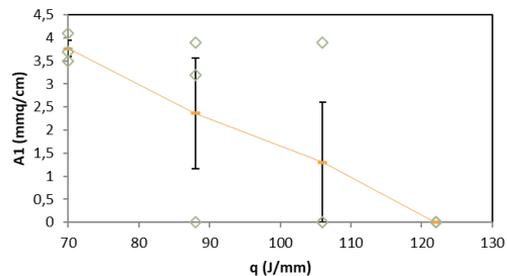
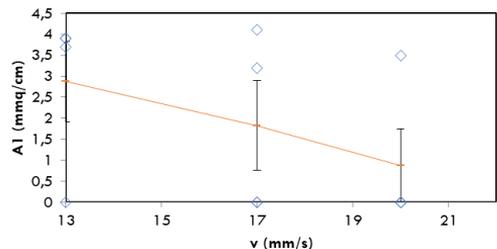


Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica

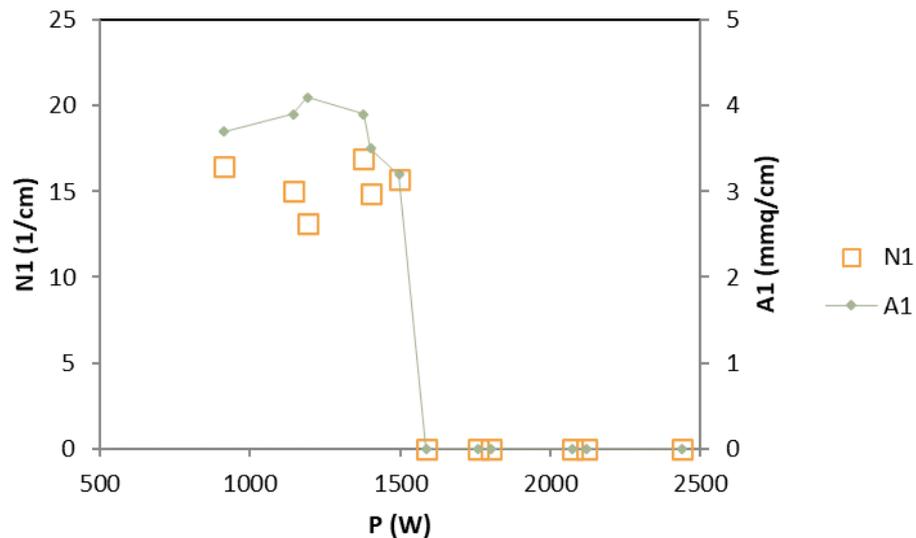
Figura 16. Aspetto al TEM di un giunto laser tipo A, realizzato in Ti-6Al-4V, con porosità sistemica. Temi presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024, no sperimentale



Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – Identificazione parametri



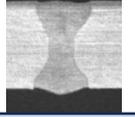
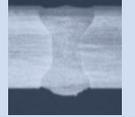
Analisi dei parametri sull'incidenza della porosità



- La porosità dipende principalmente dal livello di potenza;
- Essenzialmente i giunti sono porosi nel caso di parziale penetrazione

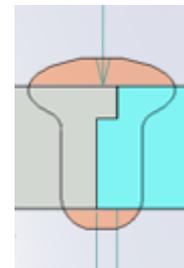


Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – Identificazione parametri

ID	V (mm/s)	Q (J/mm)	Wob (mm)	P (W)	Bh (mm)	bm	bl	2p (mm)	A (mm ²)	Sezione Macrografica
6	17	106	0	1802	1,69	0,83	1,6	9,28	3,4	
8	20	88	0	1760	1,63	0,74	1,37	9,09	3,13	
9	20	106	0,2	2120	1,57	0,77	1,41	8,79	3,09	
1'	13	122	0	1586	1,85	0,85	1,97	9,9	4,13	
4'	17	122	0,2	2074	1,85	0,86	1,84	9,83	3,96	
7'	20	122	0,4	2440	1,92	0,94	1,73	10,1	4,01	

Conclusioni Analisi di Bead on Plate AISI 316:

Tutti i parametri in tabella permettono di avere porosità prossime a «0» e geometria in grado di soddisfare i requisiti del giunto

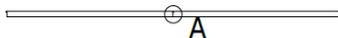


- Da privilegiare migliore produttività (maggiore velocità di processo);
 - Minore apporto termico;
- Assenza di porosità sia con Wobbling che senza
- Maggiore larghezza per cui robustezza → $W + Q$

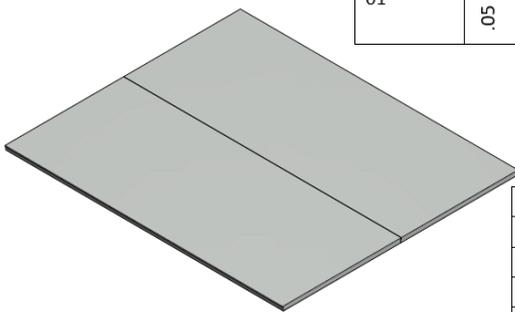
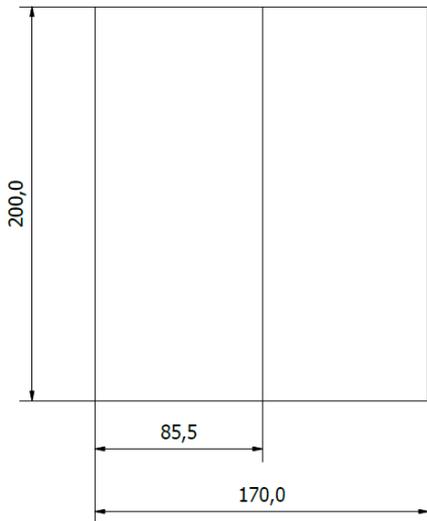
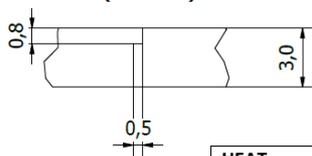


Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – Materiali Effettivi

Coupon di Qualifica



A (5 : 1)



Alloy 718

Condizione	Sy [MPa]	Su [MPa]	ELONGAZIONE %
Solubilizzato e ricotto	419	878	53
INVECCHIATO HT1	1205	1395	23
INVECCHIATO HT2	1158	1385	23

HEAT	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Al	Mo	Cu	Cb	Ta	Ti	Co	B	Fe
SEY1787-01	.05	.05	.008	.0002	.06	18.16	52.81	.58	2.91	.04	5.16	.01	1.02	.12	.002	Bal

SS 17-4 PH

Condizione	Sy [MPa]	Su [MPa]	ELONGAZIONE %
Solubilizzato	945.3	1104.5	8.7-9.1
H 900	1336.2	1503.7	12.4-13.6
H 925	1169.4	1194.9	13-13
H 1025	1179.7	1206.6	12.5-13
H 1075	1159.7	1180.4	12.5-12.5
H 1150	934.9	1046.6	16-18.7

HEAT	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N	Mo	Cu	Cb	Ta	Ti	Co	B	Fe
7500708	0.04	0.45	0.022	0.001	0.001	15.31	4.37	0.031	0.1	3.31	0034	.001	NA	NA	NA	Balance

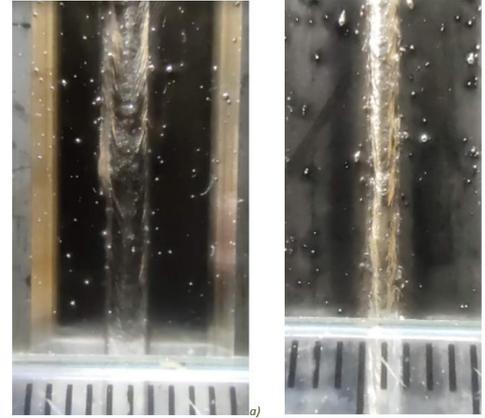


Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – Materiali Effettivi

Coupon di Qualifica

Id	Materiale, spessore	V (mm/s)	P (W)	Wobbling (tipo, mm, Hz)
52B=7'	AISI 316 3-/3,8 mm	20	2440	"O"/0,4 mm/300 Hz
55 D	AISI 316 3-/3,8 mm	20	2400	∞/0,5/100
55 E	AISI 316 3 mm	20	2200	∞/0,5/100
56 A	IN 718 3,2 mm	20	2200	∞/0,5/100
58 B,C,D	17-4PH 3mm	20	2200	∞/0,5/100

Riprove su AISI 316



Eccesso di sputtering

«Tuning» della
potenza e del
wobbling

Potenza
2440 → 2200 W

Wobbling
"O"/0,4 mm/300 Hz

∞/0,5/100 Hz

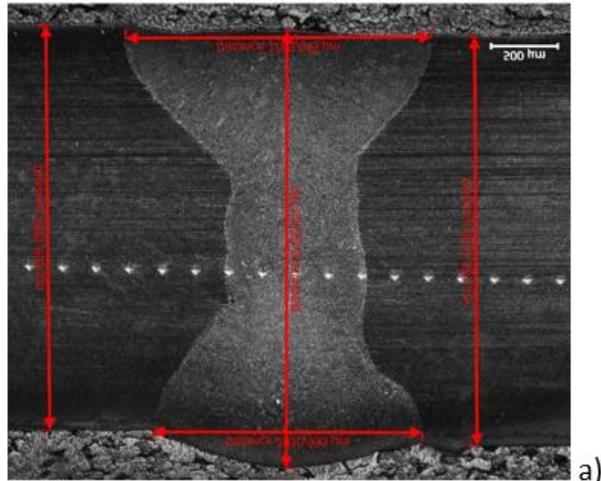


Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – Materiali Effettivi

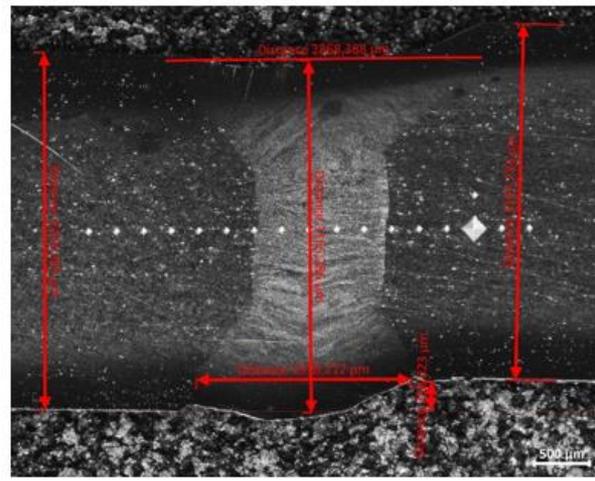
AISI 316

ALLOY 718

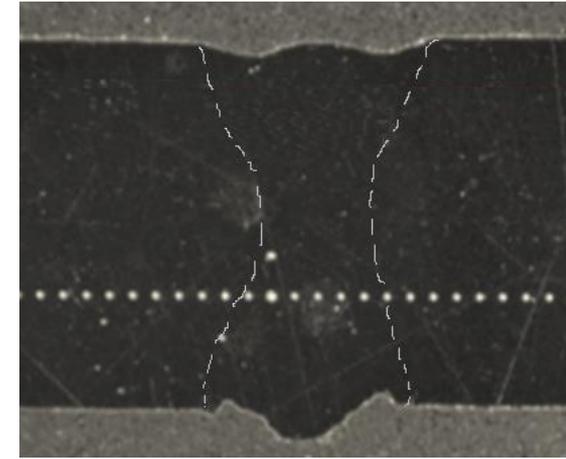
SS 17- 4 PH



a)



b)



- Le sezioni macrografiche fra AISI 316 e Alloy 718 sono molto simili;
- Le sezioni SS 17 4 PH invece tendono ad evidenziare incisioni marginali in particolare a rovescio



Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – Trattamento HIP



QUINTUS Hot Isostatic Press QIH 21 – 2070 – 1450M URC & 1400M URQ

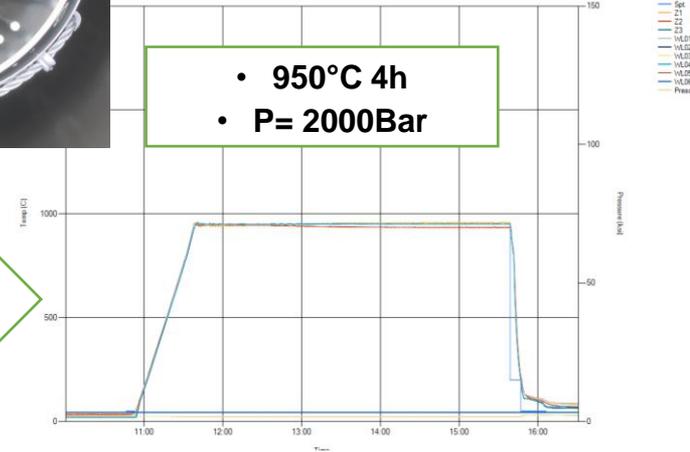
- ❑ Isostatic pressure in argon up to 2070 bar
- ❑ Temperature up to 1450° C
- ❑ Cooling ratio more than 3000°/min
- ❑ Dimensions up to H=700 mm; Diameter=230 mm



HIP
SS 17- 4 PH
ALLOY 718

- 950°C 4h
- P= 2000Bar

Trattamento per
distensione e
rinvenimento



- Trattamenti standard e trattamenti «obbligati» (caso bimateriale rame – ALLOY 718 o 17-4 PH)



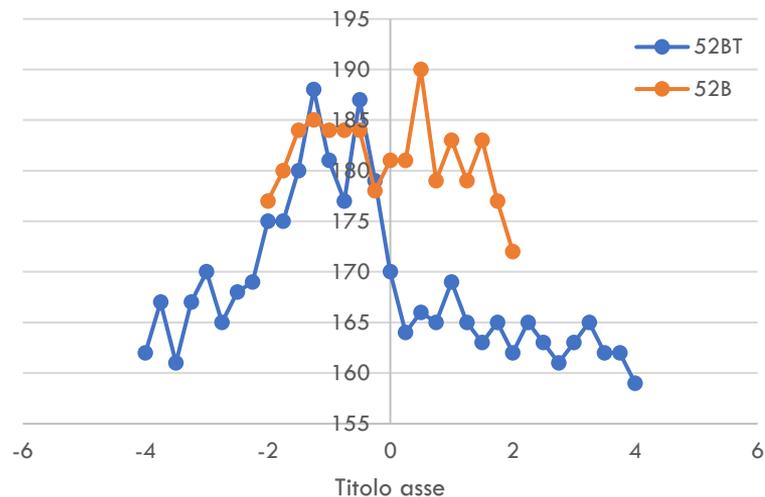
Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



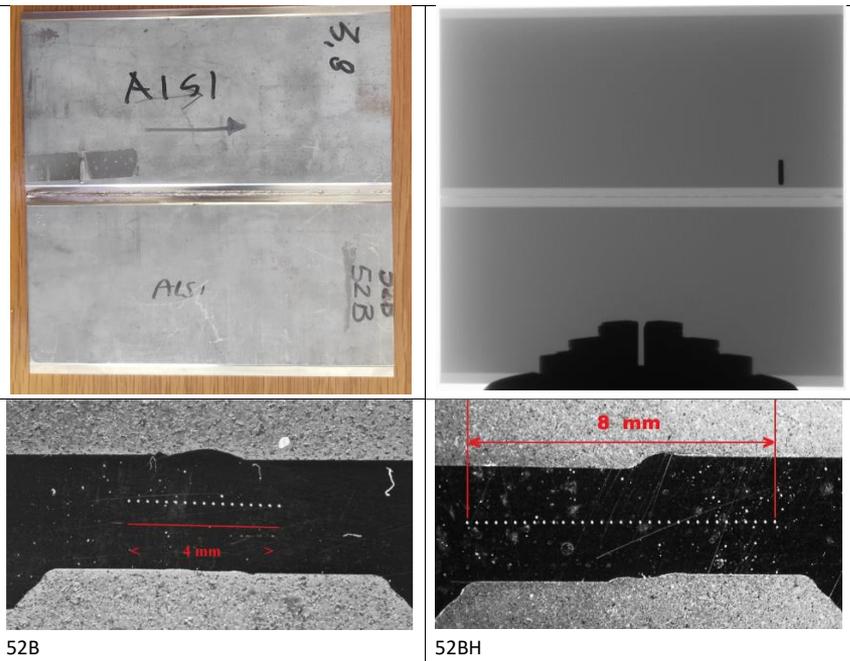
Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – RX e Durezza

AISI 316

Durezza 52B vs 52BH

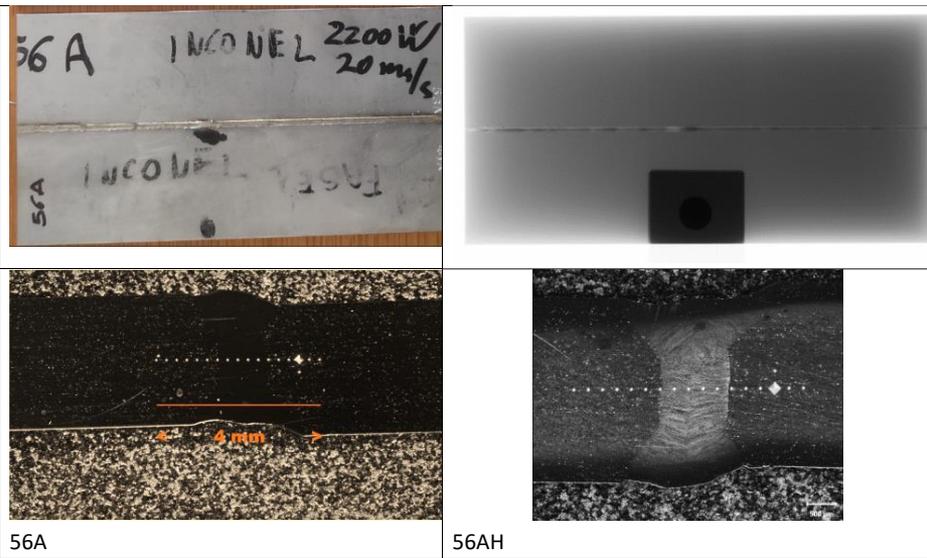


- Controlli Radiografici → OK
 - Durezza: maggiore in ZF (affinamento grano e δ ferrite)
 - HIP 950/ 4h 200 MPa
- (softening docuto a ingrossamento del grano)

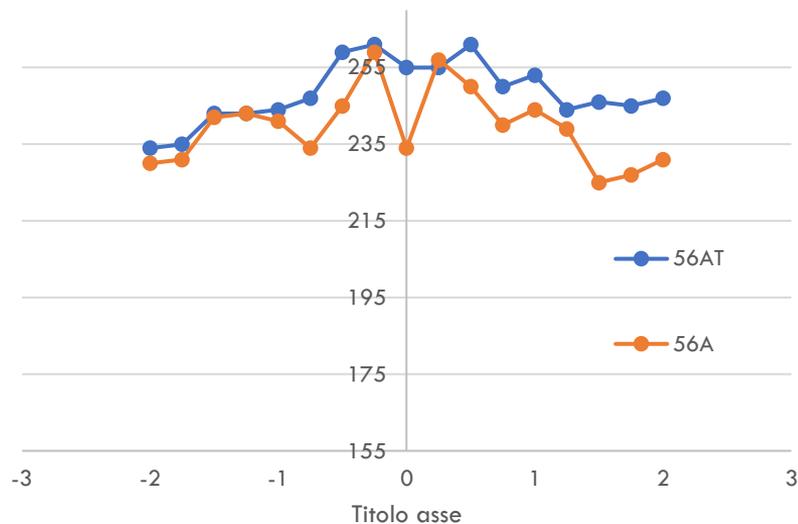


Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – RX e Durezze

ALLOY 718



Durezza 56A vs 56AH

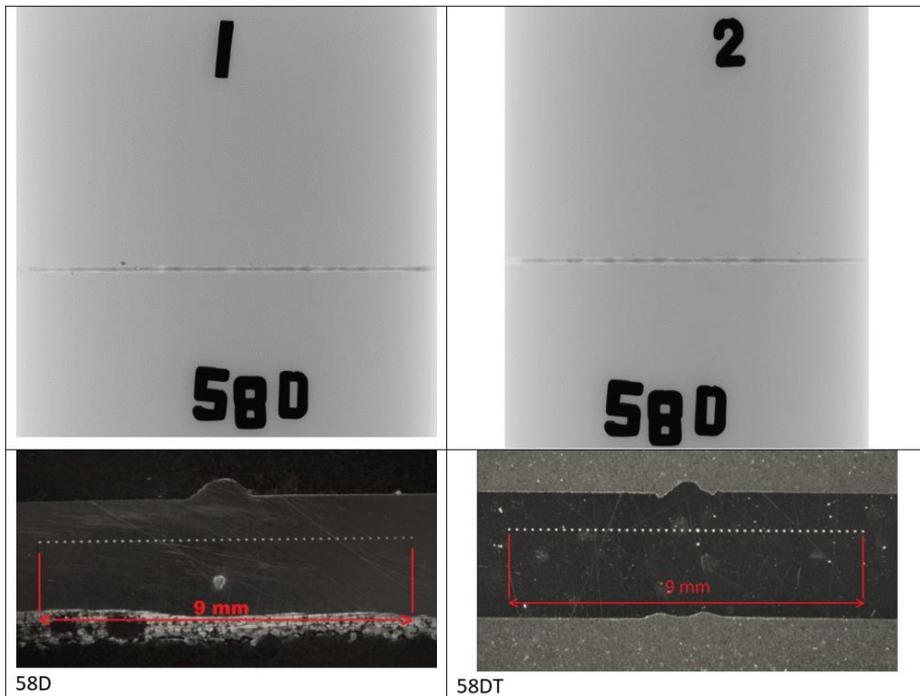


- Controlli Radiografici → OK
- Durezza: leggermente maggiore in ZF
- HIP 950/ 4h 200 MPa - distensione con precipitazioni a bordo grano con lieve incremento della durezza

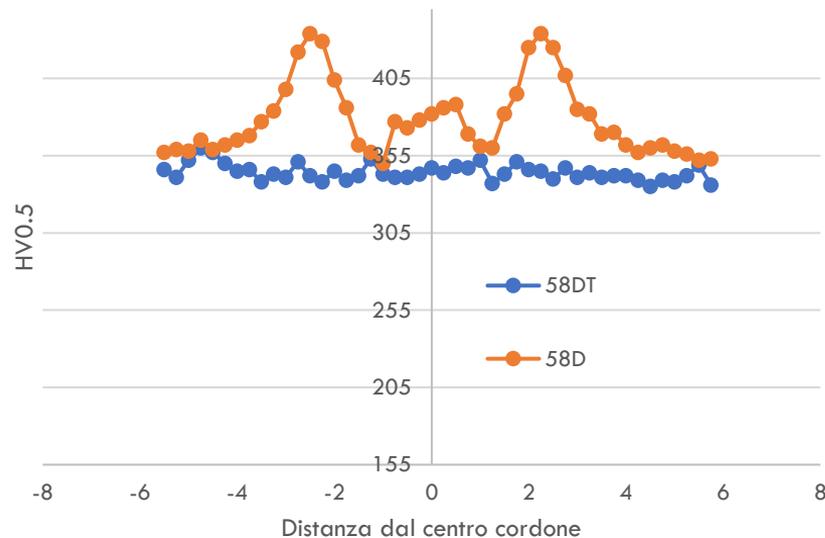


Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – RX e Durezza

SS 17 - 4 PH



Durezza 58D vs 58DT



- Controlli Radiografici → OK (incisioni marginali)
- Durezza: W (FZ martensitica) maggiore in ZTA e ZF
- HIP 950/ 4h 200 MPa distensione e rinvenimento



Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – Note su variazioni Durezza

SS 17 - 4 PH

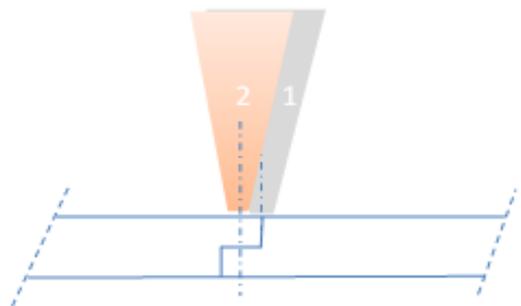
Il profilo di durezza arancio corrispondente al componente “as Welded” presenta infatti un tipico andamento ad Omega del profilo di saldatura. Partendo dal dato che riguarda il 17-4 PH che ha una Ac1 di 670 ° C, una Ac3 di 740° C, e una temperatura di Ms a Mf rispettivamente di 140 ° C e 32 ° C, l’andamento della durezza nelle condizioni as welded può essere di seguito spiegata. Si ha da un lato una maggiore durezza al centro del cordone, in ZF che ha una larghezza di poco superiore a 1, 5 mm infatti il processo di saldatura laser induce una ZF martensitica ma con elementi solubilizzati la cui durezza mediamente supera i 385 HV0.5 rispetto alla durezza del materiale base (MB) di 360 HV0.5. La zona termicamente alterata può essere suddivisa in due zone, una ZTA vicino alla ZF (Near Fused Zone- NFZ) e una più lontana dove si osserva un aumento di durezza maggiore rispetto alla prima parte della Zona Termicamente Alterata. Nella ZTA-NFZ le temperature sono comprese fra i 1400 e i 1050 ° C. In questa parte si ha una temperatura superiore alla AC3 per maggior periodo e un raffreddamento meno rapido con conseguente crescita del grano austenitico primario ed un livello di durezza inferiore rispetto alla ZF e tipicamente uguale se non di poco inferiore a quello del MB. Nella ZTA più distante subisce cicli termici nell’intervallo di temperatura 800-500 ° C (Ac3-Ac1) in cui a stato solido il materiale si austenitizza completamente ma subisce un raffreddamento ancora più rapido con conseguente formazione di martensite fine e soprassatura di precipitati che ha la durezza più elevata che supera i 430 HV0.5.

Il trattamento termico a 950° C per 4 ore, anche se a temperature inferiore rispetto alle temperature di solubilizzazione standard permette una re-omogeneizzazione del profilo di durezza che come evidenziato nel grafico di seguito in Blu porta all’eliminazione completa dell’andamento a “W” con una durezza omogenea media di circa 344 HV0,5 con una deviazione standard di 5, rispetto ad un valor medio di 359 HV 0.5 del BM.



Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo B –

- Con una procedura simile a quanto riportato per il giunto tipo A sono stati identificati i parametri relativi alla saldatura del giunto tipo B

ID	Offset	V (mm/s)	q (J/mm) P (kW)	Wobbling
54B 54C 54D,E 55A,B		17	35.3 (0,6)	"∞"/1 mm/80 Hz

Campione	Materiale	Spessore	Lunghezza	Larghezza
54B	AISI316	1-3,8 mm	200 mm	192 mm
54C, 55B e 55 C	Inconel 718	1 mm	200 mm	97 mm
54D, 54E e 55 A	17-4 PH	1-3 mm	200 mm	192 mm

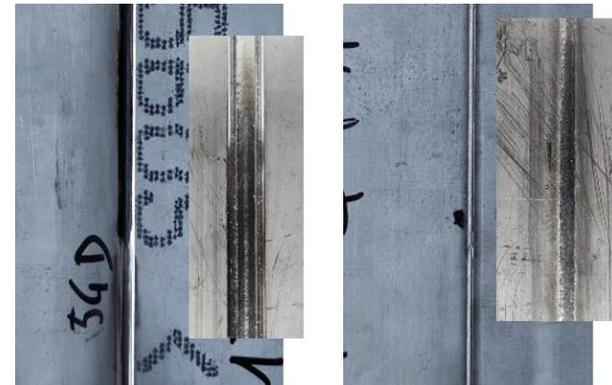


Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo B – Analisi Visiva

AISI 316



SS 17- 4 PH

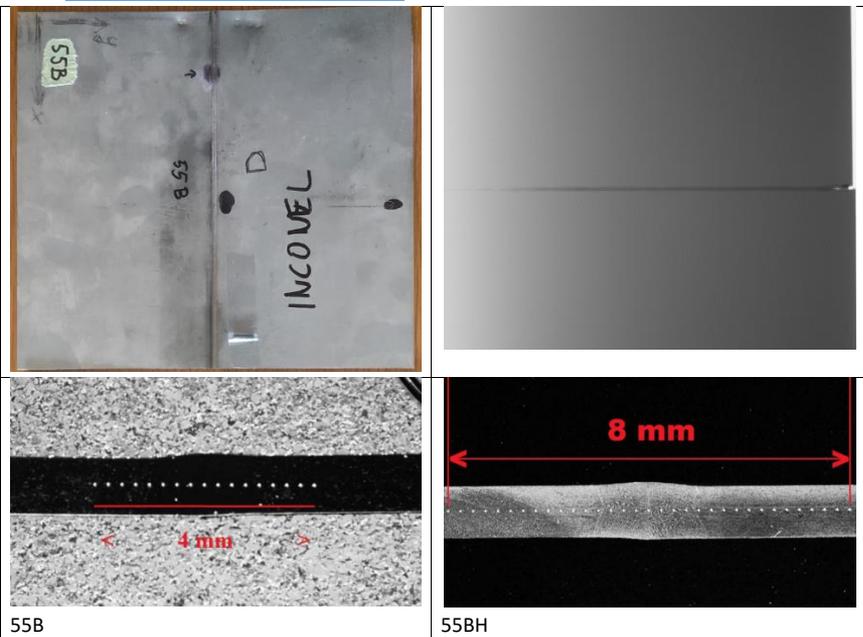


ALLOY 718

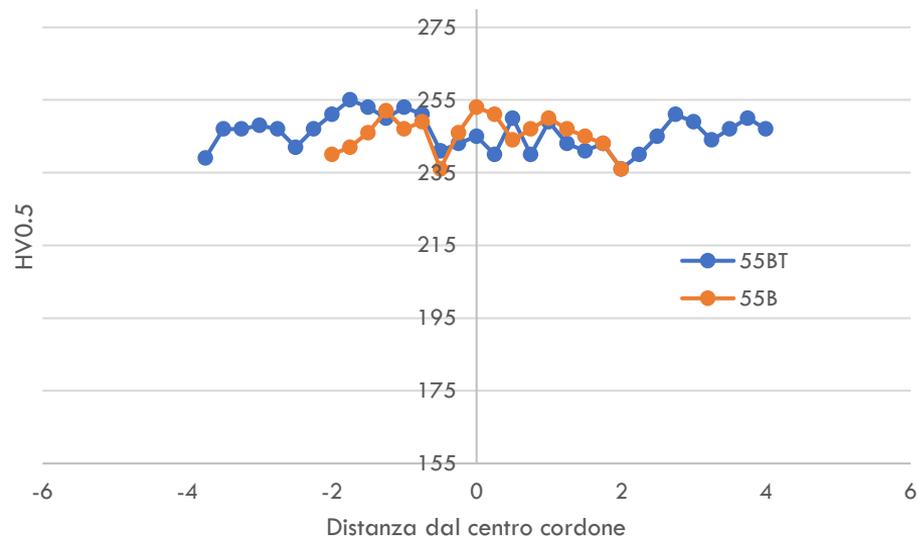


Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – RX e Durezze

ALLOY 718



Durezza 55B vs 55BH

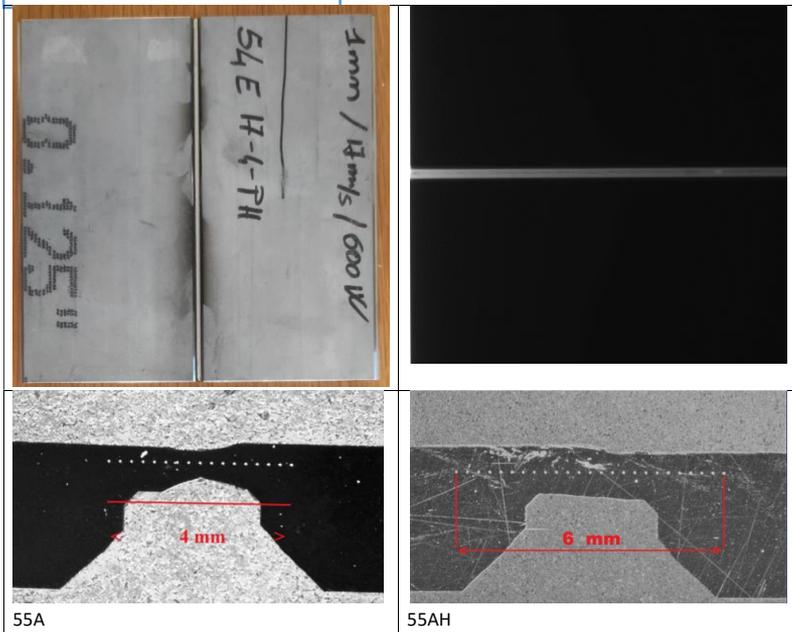


- Controlli Radiografici → OK
- Durezza: leggermente maggiore in ZF
- HIP 950/ 4h 200 MPa - distensione con precipitazioni a bordo grano

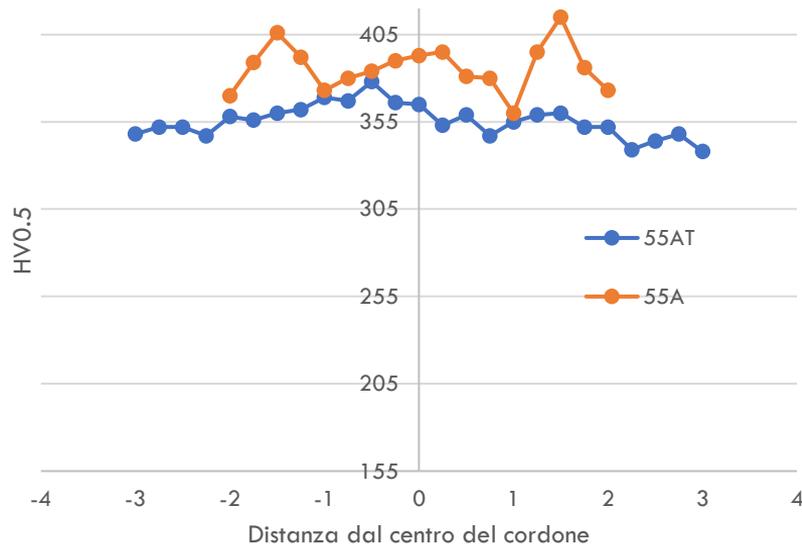


Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – RX e Durezze

SS 17-4 PH



Durezza 55A vs 55AH

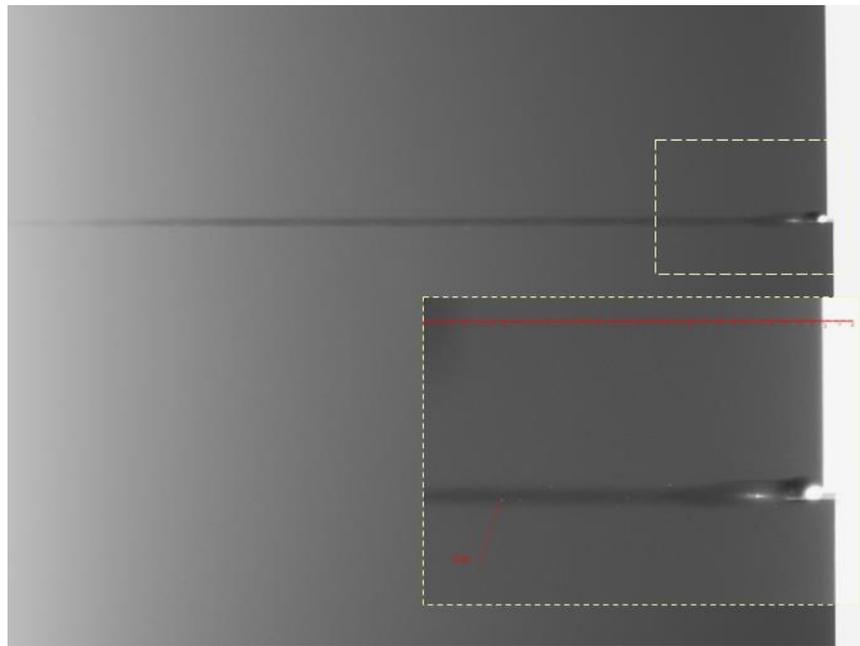


- Controlli Radiografici → OK 8 (incisioni marginali)
- Durezza: W (FZ e ZTA martensitiche)
- HIP 950/ 4h 200 Mpa → distensione e Rinvenimento

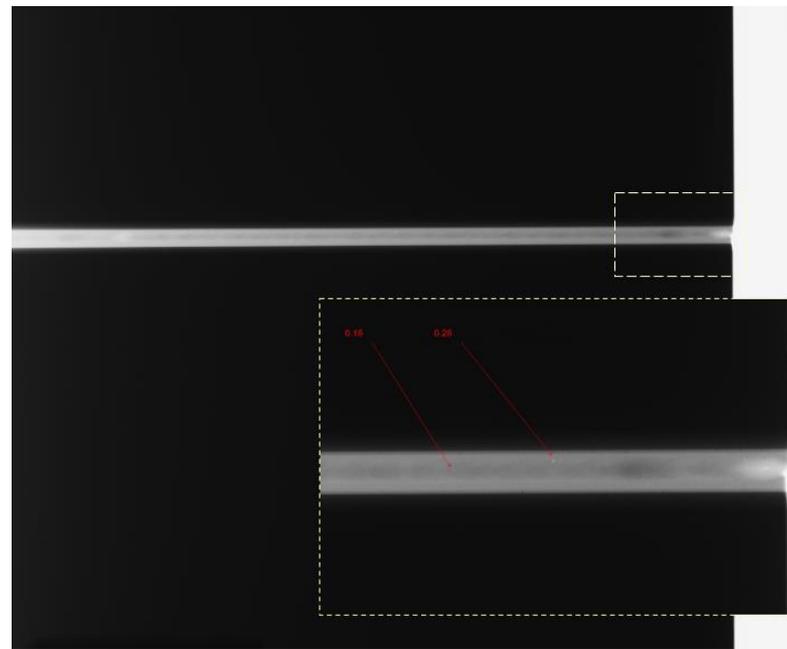


Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – Particolari RX

Alloy 718



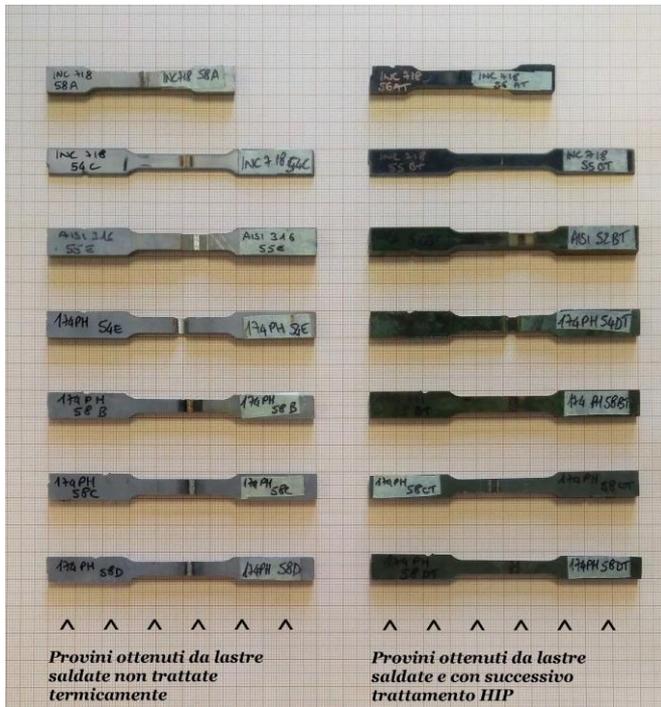
SS 17-4 PH



- Controlli Radiografici → OK escluso estremità - Qualche micro porosità, nessuna cricca



Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A & B – Prove meccaniche



Informazioni utili da una prova di trazione trasversale UNI EN ISO 4136:

- UTS ; Zona e modo di rottura

MAYES modello ESM n° di serie 300 K di capacità massima 100 kN
Le prove sono state eseguite a temperatura ambiente tra i 21 e i 23 °C,
ad una velocità di deformazione $V = 0,05$ mm/s



Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A & B – Prove meccaniche

ID file	Materiale	Trattamento HIP	spessore	larghezza	Carico Max	UTS	Rottura in saldatura
			mm	mm	kN	MPa	
com_01	Alloy718 58A	no	3.22	5.7	15.573	848.5	si
com_04	Alloy 718 56A H	si	3.24	5.6	15.008	827.2	si
com_07	Alloy 718 54C	no	1.15	5.95	5.163	754,5	si
com_10	Alloy 718 55B H	si	1.10	5.9	4.771	735,1	si
com_13	Aisi 316 55E	no	3.10	5.75	10.507	589,5	si
com_16	Aisi 316 52B H	si	3.03	5.6	10.450	615.9	si
com_19	17 4 PH 54E	no	1.08	5.45	6.473	1099.7	si
com_22	17 4 PH 54D H	si	1.10	5.5	6.577	1087.1	si
com_25	17 4 PH 58B	no	3.14	4.7	16.297	1104.3	no
com_28	17 4 PH 58B H	si	3.20	5.7	19.012	1042.3	no
com_31	17 4 PH 58C	no	3.17	5.6	19.927	1122.5	no
com_34	17 4 PH 58C H	si	3.18	5.0	16.417	1032.5	no
com_37	17 4 PH 58D	no	3.17	5.2	18.418	1117.3	no
com_40	17 4 PH 58D H	si	3.22	5.0	16.270	1010.6	no

Alloy 718: sia i provini AW e HIP si rompono sempre in FZ; i valori con H, come per le durezze, sono leggermente inferiori
SS 17-4 PH: sia i provini AW e HIP si rompono fuori FZ; i valori con H sono inferiori



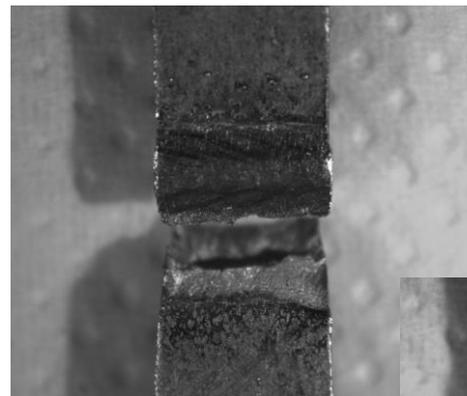
Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A – Trattamento Termico

ALLOY 718

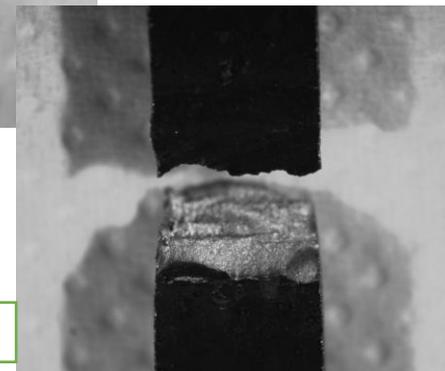
Ciclo Termico di solubilizzazione ed invecchiamento Alloy 718



58A



55AH



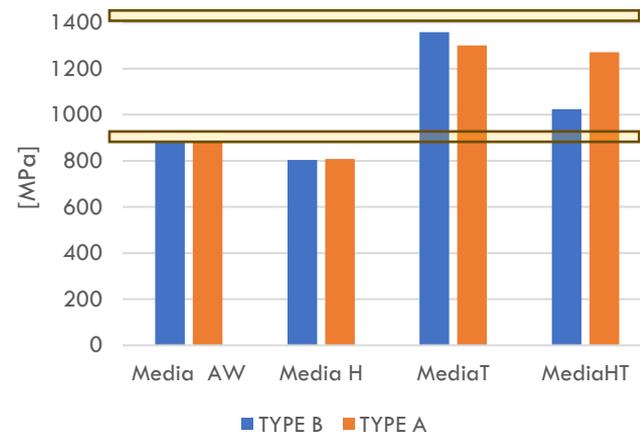
Tipo di Rottura a partire dalla ZTA



Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A & B – Prove meccaniche

ID	HIP	TT	lunghezza	spessore	larghezza	Carico Max	UTS	Rottura in
			mm	mm	mm	kN	MPa	saldatura
Inconel 718 58A	no	no	69,9	3,22	5,6	15,573	863,6	si
Inconel 718 58A	no	no	69,8	3,22	5,6	16,135	894,8	si
Inconel 718 58A	no	si	69,85	3,22	5,6	23,458	1300,9	si
Inconel 718 56A T	si	no	68,7	3,22	5,6	15,008	832,3	si
Inconel 718 56A T	si	no	69,45	3,22	5,6	14,149	784,7	si
Inconel 718 56A T	si	si	69,5	3,22	5,6	22,94	1272,2	si
Inconel 718 54C	no	no	99,85	0,99	5,9	5,163	883,9	si
Inconel 718 54C	no	no	99,85	0,99	5,9	5,169	885	si
Inconel 718 54C	no	si	99,8	0,99	5,9	7,937	1358,8	si
Inconel 718 55B T	si	no	98,9	1	6	4,771	795,2	si
Inconel 718 55B T	si	no	98	1	6	4,87	811,7	si
Inconel 718 55B T	si	si	98,4	1	6	6,146	1024,3	si

Andamento della UTS in funzione del ciclo di trattamento termico



Alloy 718: sia i provini AW, e HIP + T si rompono sempre in FZ;

- i valori con H + T sono notevolmente superiori
- I valori con T sono maggiori di H + T

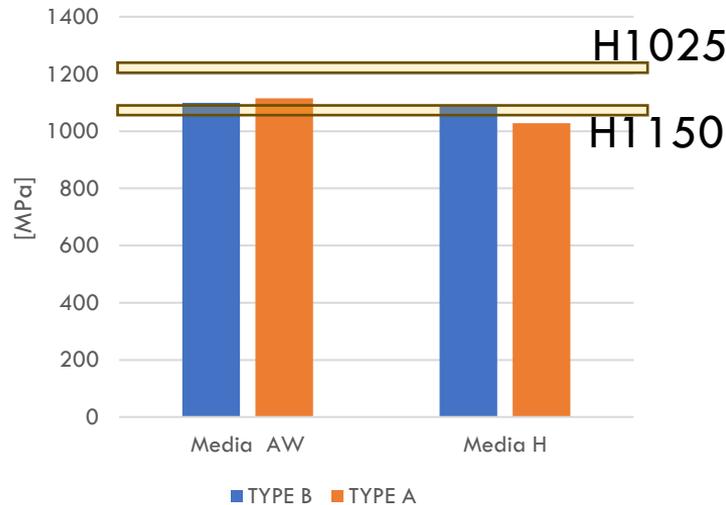


Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A & B – Prove Meccaniche

SS 17-4HP

ID	HIP	spessore	larghezza	Carico Max	UTS	Rottura in
		mm	mm	kN	MPa	saldatura
17 4 PH 54E	no	1,08	5,45	6473	1099,7	si
17 4 PH 54D H	si	1,1	5,5	6577	1087,1	si
17 4 PH 58B	no	3,14	4,7	16297	1104,3	no
17 4 PH 58B H	si	3,2	5,7	19012	1042,3	no
17 4 PH 58C	no	3,17	5,6	19927	1122,5	no
17 4 PH 58C H	si	3,18	5	16417	1032,5	no
17 4 PH 58D	no	3,17	5,2	18418	1117,3	no
17 4 PH 58D H	si	3,22	5	16270	1010,6	no

Andamento della UTS in funzione del ciclo di trattamento termico



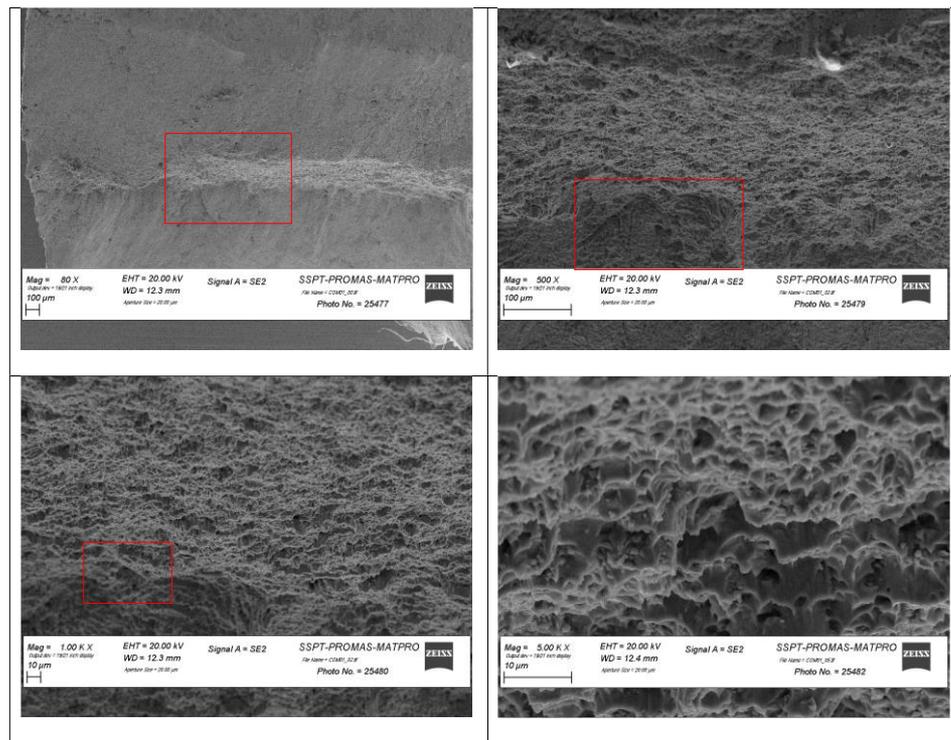
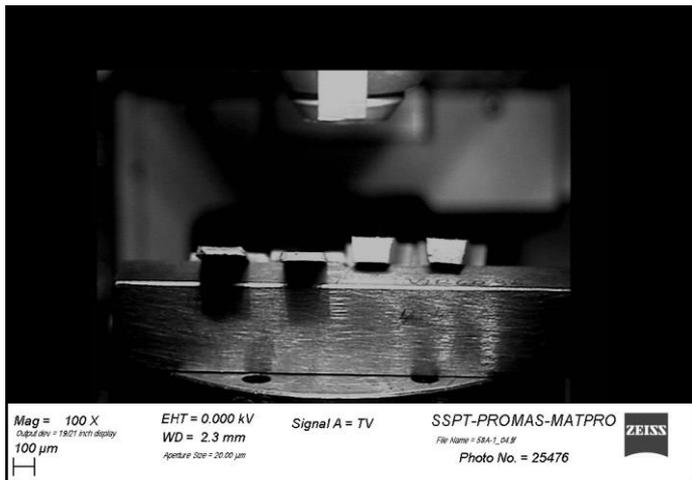
SS 17-4 PH: i provini AW, e HIP si rompono in genere fuori dalla saldatura fanno eccezione i 54 E e 54 D;

- i valori con H sono leggermente inferiori
- Nessun trattamento è stato effettuato su questo materiale che potrebbe essere effettuato a 550 °C assieme alla lega di rame



Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A & B – Analisi SEM

ALLOY 718



com_01 Inconel 718 58A

com_04 Inconel 718 56A T (trattato HIP)

com_07 Inconel 718 54C

com_10 Inconel 718 55B T (trattato HIP)

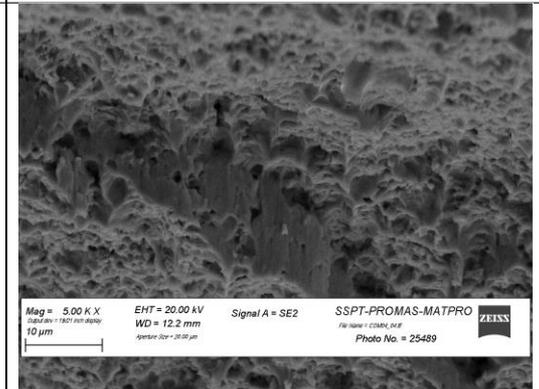
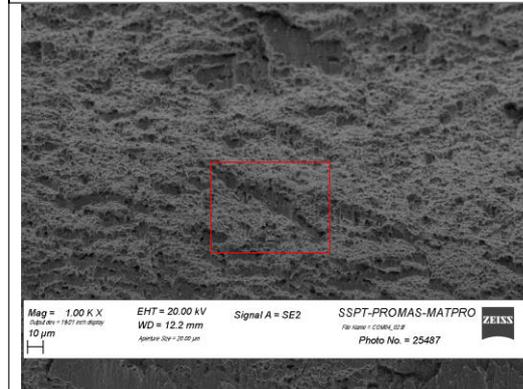
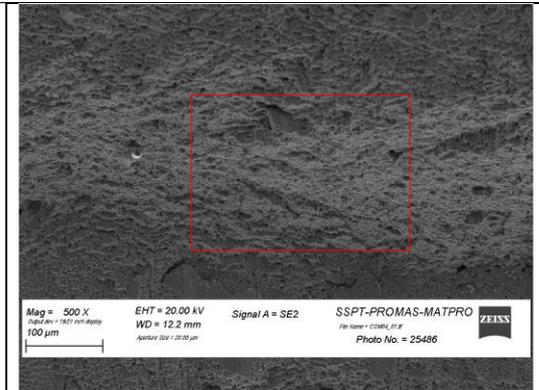
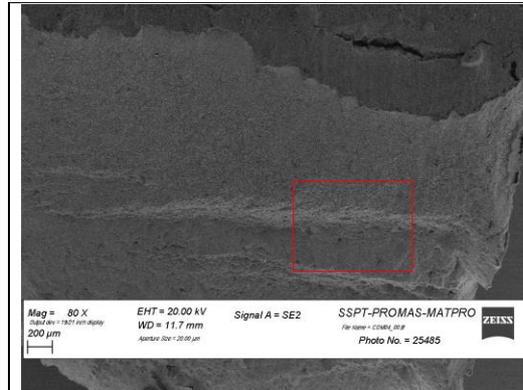
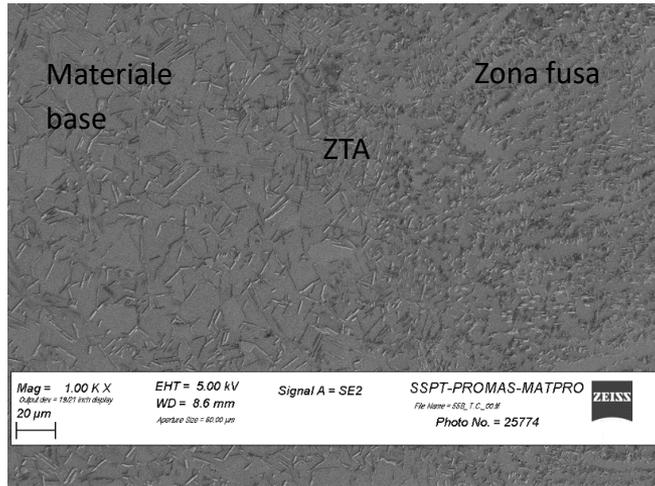


Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A & B – Analisi SEM

ALLOY 718



- com_01 Inconel 718 58A
- **com_04 Inconel 718 56A T (trattato HIP)**
- com_07 Inconel 718 54C
- com_10 Inconel 718 55B T (trattato HIP)



Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A & B – Componenti ALM



Brasatura

Saldatura Laser



SS 17 - 4 PH
1150°C / 2h
552 °C/ 4h
1200 °C bar



Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024



Sviluppo del processo di saldatura laser Giunto tipo A & B – Conclusioni

- I test di caratterizzazione non distruttiva, macrografica di durezza e meccanica sui giunti saldati hanno evidenziato in generale come il processo di saldatura laser sia applicabile sia all'inconel 718 che all'acciaio 17-4 PH.
- per l'inconel 718 si raggiungono proprietà simili a quello della lega nelle condizioni solubilizzata e ricotta.
- La modalità di frattura è semi duttile. Ciò è evidenziato sia dalla rottura tipica a 45° della sezione di frattura sia alla messa in luce di una linea di spiaggia circa metà della sezione che dimostra una parte della rottura duttile ma l'ultima parte fragile.
- I dimples rilevati all'analisi frattografica SEM sono circa 5 micron per i campioni non trattati e circa 3 micron per i campioni trattati ad indicare che il trattamento di HIP a 950°C , se da un lato permette di ridurre i macro difetti (porosità) in termini di microstruttura induce un overaging.
- Per Inconel 718 è stato effettuato un trattamento termico completo di solubilizzazione per ricostruire interamente la microstruttura tipica della lega nelle condizioni migliori di invecchiamento.
- Il trattamento di HIP "Close pore" potrà essere ipotizzato a temperature superiori. Infatti la saldatura laser, per quanto spinta nell'ottimizzazione dei parametri continua ad essere suscettibile alla formazione di porosità.
- Per SS 17-4 PH, la microstruttura in ZF è martensitica per cui la rottura avviene fuori dalla saldatura. Non è possibile ipotizzare la solubilizzazione completa e la realizzazione di un trattamento post saldatura "close pores" a 1150° come quello effettuato post stampaggio ALM a causa della brasatura intermedia che non permette di ipotizzare trattamenti post brasatura a temperature superiori ai 950°C .
- I campioni trattati mostrano una generale riduzione della resistenza a rottura ed una riduzione ed omogeneizzazione dei profili di durezza a sostanziale vantaggio della duttilità. Il successivo trattamento a 552°C promettono il sostanziale ripristino delle caratteristiche dell'acciaio anche in ZF e ZTA alle condizioni di fornitura H1025 contemporaneamente al corretto invecchiamento del liner in CuCrZr.





LAerospaZIO

PROGETTO COFINANZIATO DALL'UNIONE EUROPEA

Ringraziamenti

FESR Fondo Europeo di Sviluppo Regionale Programma Operativo regionale del Lazio
Programmazione 2014-2020

MAGIC - Tecnologie abilitanti per la Manifattura ALM, la Giunzione e il Controllo di propulsori aerospaziali

L'obiettivo generale del progetto è lo sviluppo di tecnologie abilitanti volte alla piena industrializzazione di processi di manifattura additiva (Additive Layer Manufacturing - ALM) di superleghe di nichel e di rame per la realizzazione di componenti aerospaziali, delle complementari tecnologie di giunzione, con particolare focus sui processi di brasatura dei materiali dissimili e la saldatura laser di componenti stampati 3D, oltre che dello sviluppo di procedure di certificazione e qualificazione attraverso Controlli Non Distruttivi (CND). Il costo complessivo del Progetto è di € 1.627.003,82, finanziato dalla Regione Lazio per € 1.093.785,16



Agenzia Spaziale Italiana



Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024

Ringraziamenti



Unione europea



REGIONE
LAZIO



PROGETTO COFINANZIATO DALL'UNIONE EUROPEA

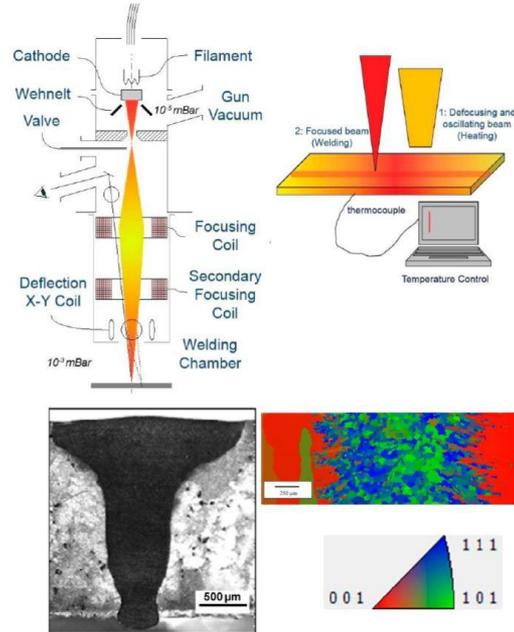


DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA INDUSTRIALE



Progetto 36530 POR FESR LAZIO
2014-2020

Ni-AWaRe: Nickel Alloys Welding and Repairing by High Density Energy Processes



Il progetto **Ni-AWaRe** ha lo scopo di sviluppare processi di saldatura e riparazione di componenti in superleghe di nichel, focalizzando l'attenzione su INS792, Inconel 718 e leghe derivate.

Si utilizzeranno procedure con rifusione laser e fascio elettronico e si svilupperanno materiali d'apporto a chimica migliorata e specifici trattamenti termici per garantire performance della zona saldata/riparata simili o superiori a quelle del materiale d'origine. I processi di saldatura mediante laser e fascio elettronico sono ad alta densità di energia e quindi il ridotto apporto termico permetterà di realizzare giunti con zona fusa e zona termicamente alterata di ridotte dimensioni, bassi stress residui, esenti da cricche e porosità.



Giornata di studio
Materiali metallici per l'aeronautica
Terni presso Fucine Umbre, 31 gennaio 2024