

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

***Relazione per la prova finale
«Scambiatori di calore realizzati
attraverso tecniche di manifattura
additiva»***

Tutor universitario: Prof. Stefano Bortolin

Laureando: *Luca Fusina*

Padova, 07/07/2022

Prospettive nella realizzazione di scambiatori di calore tramite manifattura additiva

Vantaggi:

- Componente monolitico: si evitano giunzioni (prevenendo trafiletti di fluido):
- Geometrie molto elaborate anche in scale ridotte
- Risparmio di materiale (quasi assenza di sfrido).

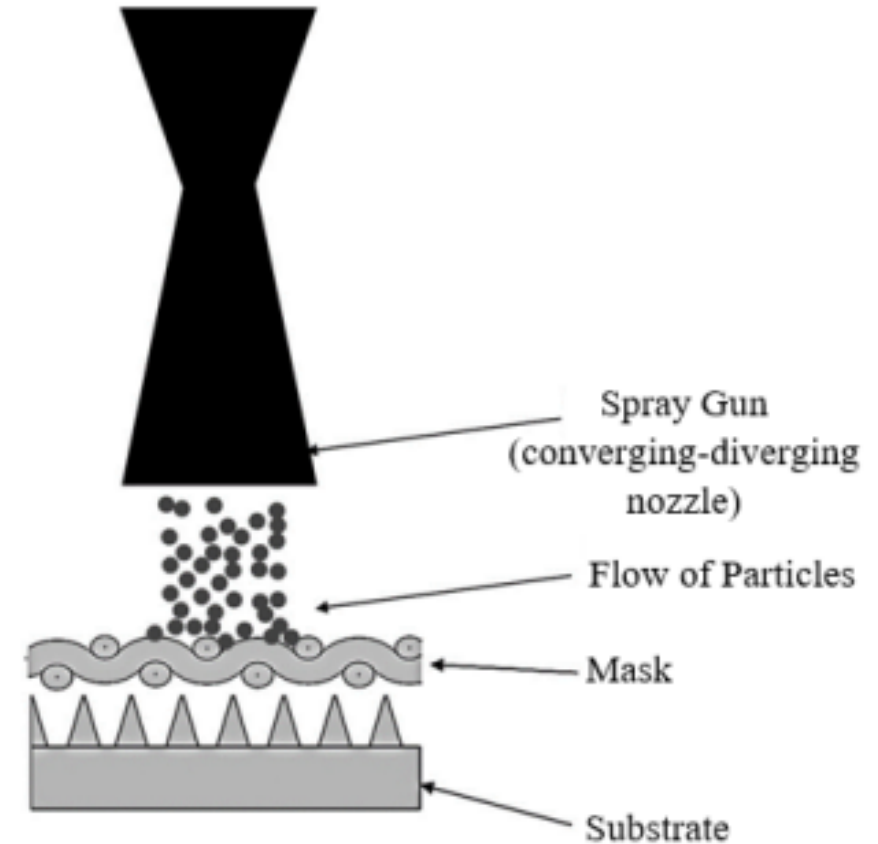
Criticità:

- Scostamento dalle dimensioni del modello CAD
- Finitura superficiale discreta, elevata rugosità superficiale.

LE TIPICHE FASI DEL PROCESSO DI PRODUZIONE



- Descrizione dei **parametri geometrici** e fisici più influenti nella produzione.
- Descrizione dei principali **processi** additivi impiegati.
- Analisi di **misure di scambio termico** disponibili in letteratura, e confronto con scambiatori convenzionali.
- Sintesi dei **vantaggi** e degli **svantaggi** dei processi produttivi in esame.



*Schema del processo di Cold Gas
Dynamic Spray [17].*

Rugosità superficiale

- Circa un ordine di grandezza in più rispetto alle lavorazioni convenzionali (es. SLS: $R_a = 5 \div 35 \mu\text{m}$).
- Migliora lo scambio termico (cioè $Nu = \frac{\alpha_c \cdot L^*}{\lambda^*}$), ma aumentano le perdite di carico.

Porosità

- Peggiorano conducibilità termica e caratteristiche meccaniche.

Spessore degli elementi

- Pareti più sottili riducono la resistenza termica per conduzione.

Effetto scala

PROCESSO	SPESSORE MINIMO DELLA PARETE [μm]
DMLS (Metalli)	150
POLYJET (Polimeri)	32÷100
LCM (Materiali ceramici)	100

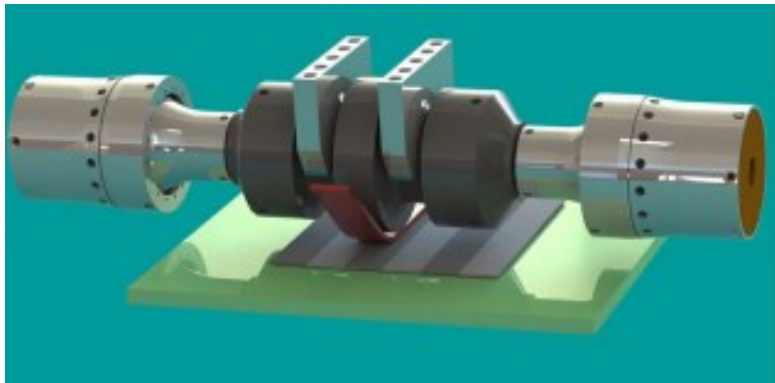
Spessori ottenibili con diverse tecniche [2].

Acciaio inossidabile (316, 316L), leghe di alluminio (AlSi10Mg, 6061), leghe di titanio (Ti6Al4V), Inconel (leghe a base Nichel-Cromo).

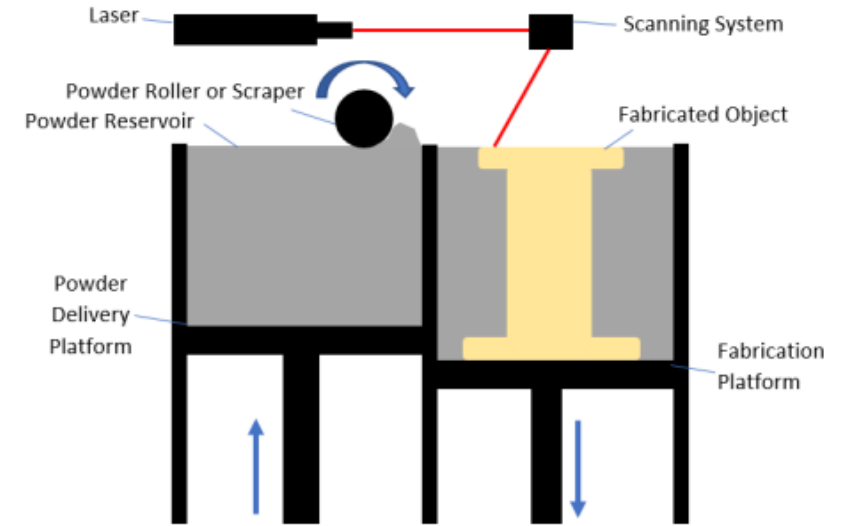
LASER POWDER BED FUSION: SELECTIVE LASER MELTING (O DMLS)

DIRECT ENERGY DEPOSITION

- Velocità maggiore (0.5÷10 kg/h) ma minore accuratezza.



Modello di Ultrasonic Additive Manufacturing [7].



Schema generale dei processi LPBF [2].

COLD GAS DYNAMIC SPRAY

- Diffuso per realizzare alette di forma varia.

ULTRASONIC ADDITIVE MANUFACTURING

- Processo ibrido: saldature ultrasonore e lavorazioni convenzionali.

POLIMERI

- Poliimmide, policarbonati, acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS), acido polilattico (PLA), PA12 (poliammide, o nylon, 12).
- Possibili *filler*.

FUSED FILAMENT FABRICATION

FOTOPOLIMERIZZAZIONE VAT

STEREOLITOGRAFIA

CONTINUOUS LIQUID INTERFACE PRODUCTION

MATERIAL JETTING: POLYJET™

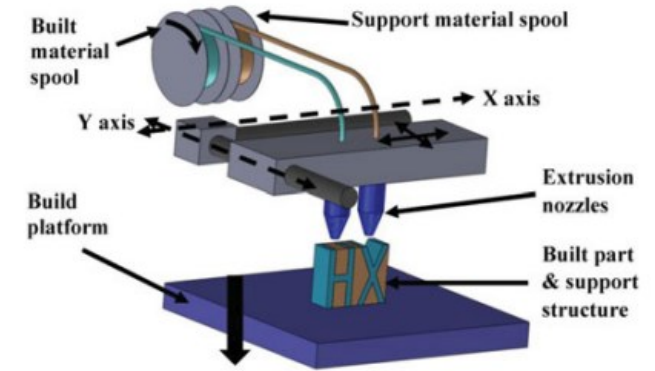
SELECTIVE LASER SINTERING (SLS)

CERAMICI

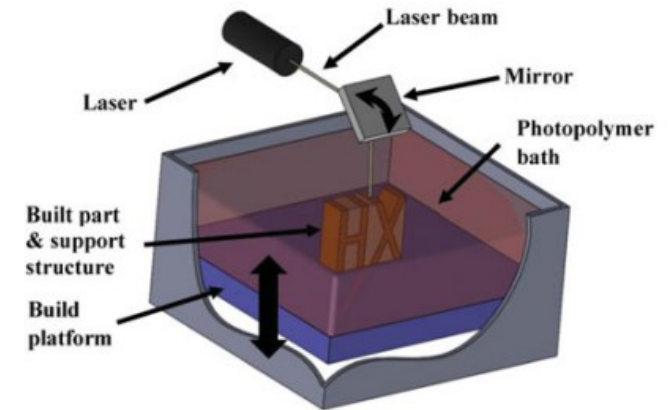
- SiC, Si₃N₄, Al₂O₃, compositi a matrice ceramica.

LITOGRAPHY-BASED CERAMIC MANUFACTURING (LCM)

LAMINATED OBJECT MANUFACTURING (LOM)



Schema del processo Fused Filament Fabrication [8].

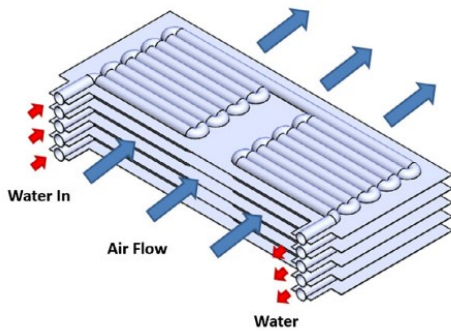


Schema della stereolitografia [8].

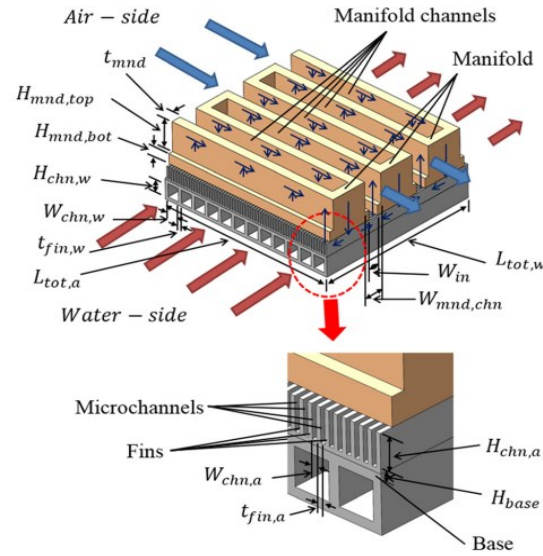
Confronto tra scambiatore wavy-fin (acciaio inox) e scambiatore realizzato additivamente in polietilene ad alta densità (HDPE)

A parità di \dot{Q} da scambiare, lo scambiatore in HDPE ha:

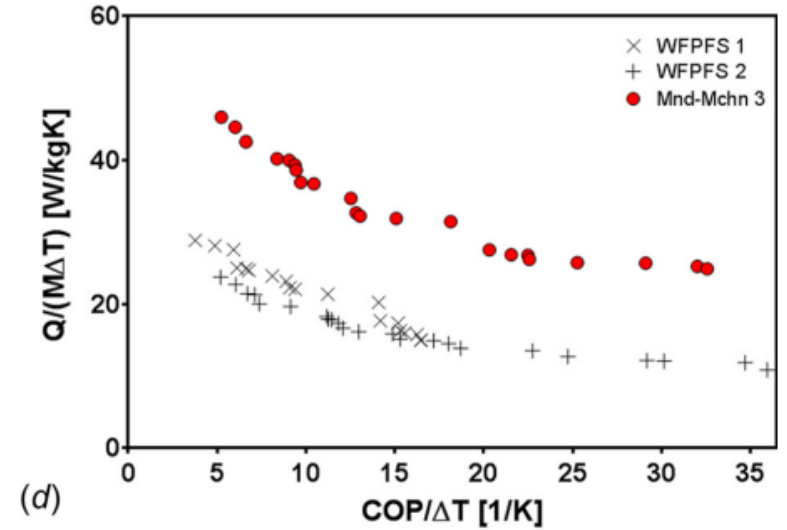
- Volume maggiore del 35% (λ ridotta)
- Massa ridotta dell'85%.
- Aumento del 27% del $COP = \frac{|Q|}{|P|}$



Scambiatore di calore in HDPE[11].



Scambiatore manifold-microchannel ad aria e acqua [5].



Confronto tra uno dei campioni manifold-microchannel (Man-Mch) con alcuni degli scambiatori convenzionali in esame [5].

Confronto tra una configurazione con microcanali e manifold e scambiatori convenzionali a piastre alettate

Scambio aria-acqua, si desidera massimizzare il $\frac{COP}{\Delta T}$ e il gravimetric heat

transfer density: $\frac{Q}{M \cdot \Delta T} \left[\frac{W}{kg \cdot K} \right]$.

**Dissipatori con reticoli TPMS
(Triply-periodic minimal surfaces)**

Diamon solid-networks structure,
con porosità variabile.

Porosità: $\varphi = \text{volume}_{\text{pori}} / \text{volume}_{\text{totale}}$

Volume fraction: $V_f = 1 - \varphi$

$$U = \alpha_c \cdot A_s \text{ [W/K]}$$

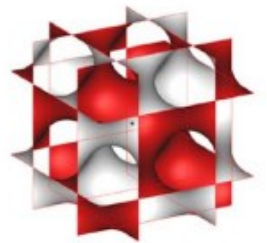
Es. Seconda riga: penalizzazione di U (-15.7%) minore della riduzione di Δp (-27.6%) rispetto alla struttura uniforme (a $\varphi = \text{COST.} = 80\%$).

Raffreddamento di pale di turbomacchine

- Aumento della temperatura del fluido in ingresso oltre i 1550 K.
- *Film cooling*
- *Transpiration cooling.*

Flow conditions 1: $Q = 100 \text{ W}$, $Re = 65,326$					
	$U \text{ (W/K)}$	$T_s \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{out} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta P \text{ (Pa)}$	$V_{out} \text{ (m/s)}$
Graded 20-15 (GD-So_20-15)	2.71	64.0	30.50	5911.0	51.6
Graded 20-17.5 (GD-So_20-17.5)	2.83	65.5	30.40	6532.0	51.9
Uniform 20-20 (UD-So)	3.36	61.9	30.3	9017.1	53.0
Flow conditions 2: $Q = 500 \text{ W}$, $Re = 27,500$					
	$U \text{ (W/K)}$	$T_s \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{out} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta P \text{ (Pa)}$	$V_{out} \text{ (m/s)}$
Graded 20-15 (GD-So_20-15)	1.76	311.0	77.0	1384	23.30
Graded 20-17.5 (GD-So_20-17.5)	1.83	301.0	76.9	1536	22.35
Uniform 20-20 (UD-So)	2.16	294.9	76.7	1992	22.40

Proprietà dei dissipatori a TPMS uniforme (UD-So) e con variazione di porosità. Le sigle indicano il calo di V_f [15].



Diamond (D)



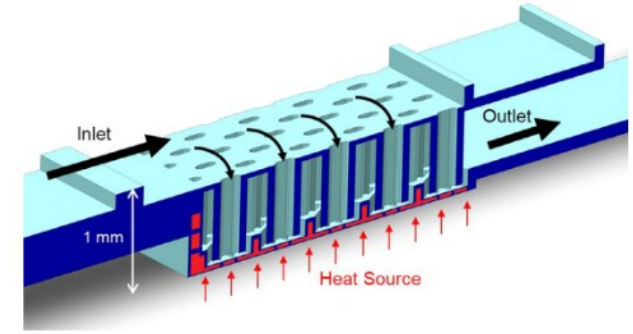
Gyroid (G)

Esempi di TPMS [15].

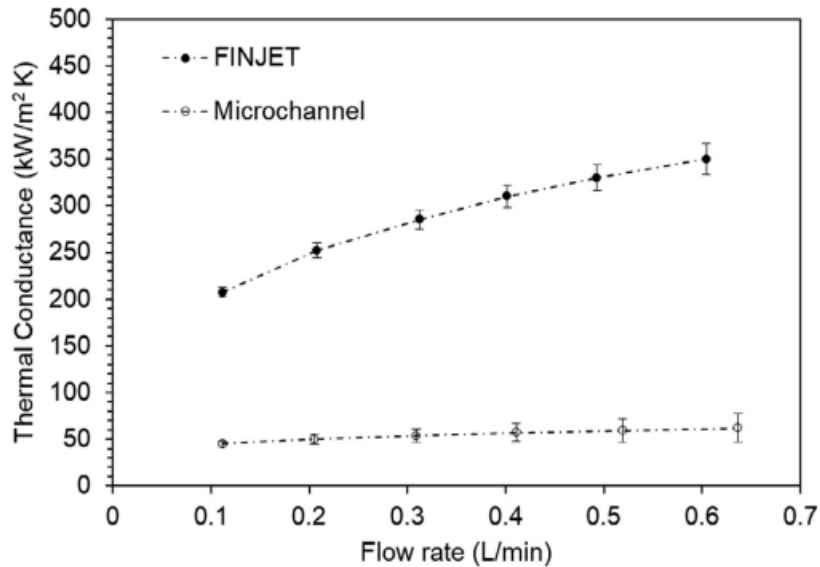
**Configurazione ibrida microcanali-microgetti (Jet-impingement):
confronto con scambiatore a microcanali**

Thermal management di componenti elettronici: area di scambio ridotta (3.1 mm x 4.2 mm), $\dot{Q} \approx 1000 \text{ W/cm}^2$. Processo MICA Freeform.

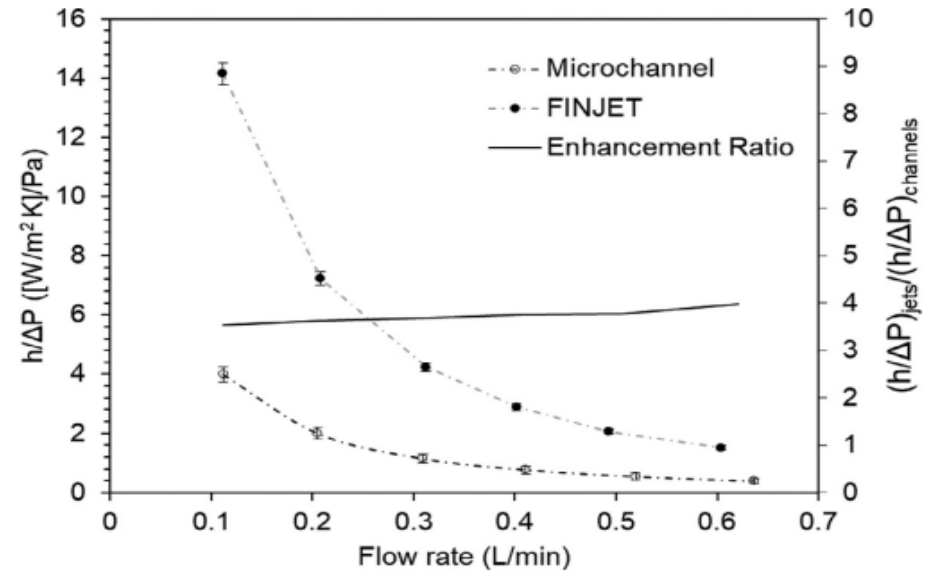
Aumento di Δp , ma il rapporto $h/\Delta p$ resta favorevole. Possibilità di mantenere la superficie riscaldata a 54°C , con acqua iniettata a 20°C .



Configurazione ibrida di microgetti e microcanali (FINJET) analizzata in [16].



Confronto del coefficiente di scambio termico convettivo h [16].



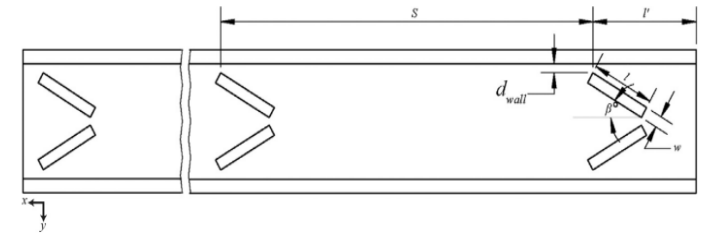
Confronto del rapporto $h/\Delta p$, e rapporto tra i rispettivi $h/\Delta p$ [16].

Scambiatore a minicanali: effetto di generatori di vortici longitudinali

Superficie 48.4 mm x 140 mm deve scambiare 15 kW/m².

Campioni in AlSi10Mg (DMLS), dotati di otto canali rettangolari ciascuno ($D_h = 2.86$ mm). Prototipo 1 liscio, di riferimento.

Acqua distillata (in ingresso a 25°C), $170 < Re < 1380$, $\dot{m} = 14.7 \div 120.2$ kg/h.

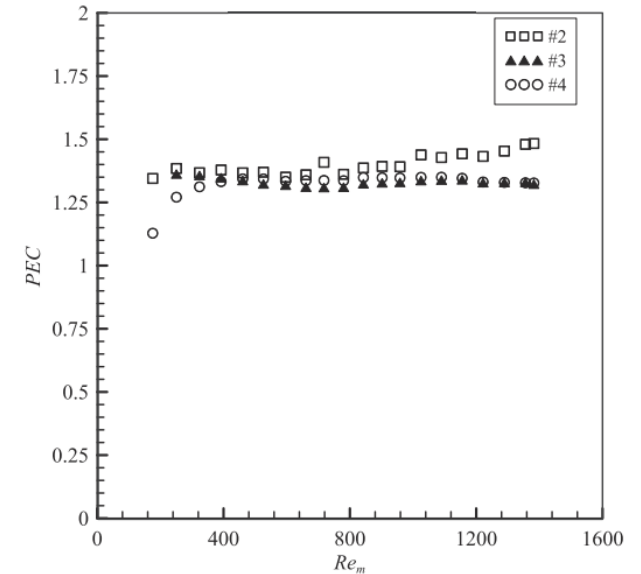
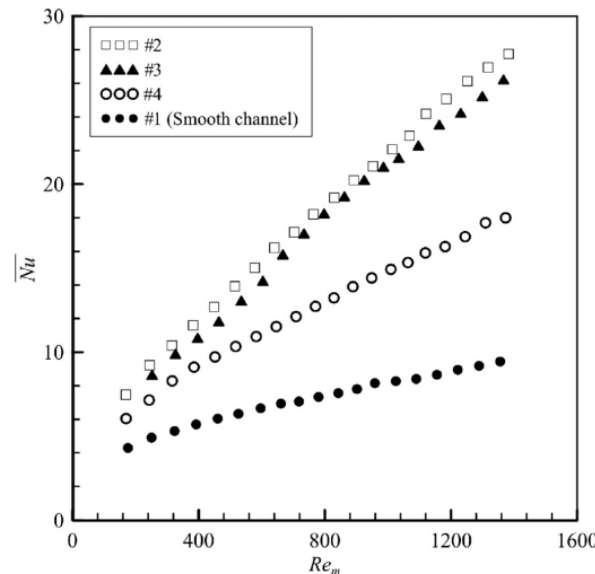


Vista in pianta di un minicanale [18].

$$f_{app} = \frac{\Delta p \cdot D_h}{2 \rho u_m^2 L} \quad (\text{Apparent friction factor})$$

$$PEC = \frac{\frac{Nu}{Nu_s}}{\left(\frac{f_{app}}{f_{app,s}}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (\text{rapporto tra grandezze dello scambiatore con vortici e di quello liscio (pedice s), a potenza di pompaggio costante})$$

PEC > 1: incremento fino a tre volte di Nu (grazie ai vortici), modesto aumento delle perdite di carico.



$Nu(Re)$ a sinistra, $PEC(Re)$ a destra [18].

Confronto tra scambiatori a piastre (scambio termico monofase acqua-acqua)

Campione additivo (LPHE): 3 lamierini (DMLS, in AISI 316), superfici «polmonari».

Campione saldobrasato: 6 lamierini.

Dati imposti: $T_{h,in} = 90^{\circ}\text{C}$, $T_{c,in} = 40^{\circ}\text{C}$, $\dot{m} = 0.1 \text{ kg/s}$

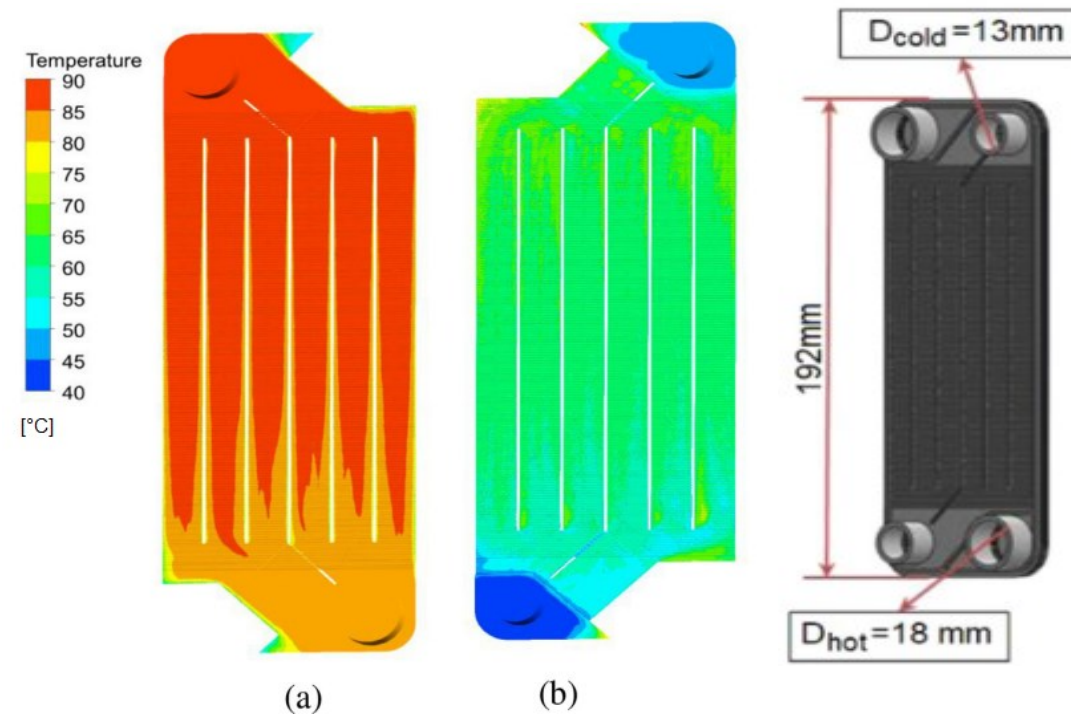
Valori misurati: $T_{h,out} = 83.12^{\circ}\text{C}$, $T_{c,out} = 46.98^{\circ}\text{C}$

$\dot{Q} \approx 3200 \text{ W}$

Efficienza: $\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} = 0.16$

Potenza richiesta (lato acqua calda): $P = \dot{V} \cdot \Delta p \approx \frac{0.1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \cdot 69000 \text{ Pa} \approx 6.9 \text{ W}$

Campione additivo: migliorano ε (+23%) e il coefficiente di scambio termico convettivo h (LPHE: $h \approx 10000 \div 34000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ per il fluido caldo, fino a $37000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ per il fluido freddo; convenzionale: massimo $8000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ in entrambi i lati).



Distribuzione della temperatura lato fluido caldo (a) e freddo (b) [19].

Scambiatore a piastre LPHE [19].

La grande **flessibilità** e la **complessità** delle parti possono migliorare lo scambio termico.

Difficoltà nella previsione del comportamento termico: non valgono le correlazioni normalmente impiegate.

Costi di produzione: la velocità moderata si addice a **volumi di produzione limitati**.

La manifattura additiva rappresenta un promettente complemento al settore, ampliando i limiti applicativi di molte tecnologie che dipendono dalla capacità di scambiare flussi termici in maniera ottimale.

1. I. Kaur, P. Singh, *State-of-the-art in heat exchanger additive manufacturing*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 178 (2021).
2. E. Klein, J. Ling, V. C. Aute, Y. Hwang, R. Radermacher, *A Review of Recent Advances in Additively Manufactured Heat Exchangers*, International Refrigeration and Air Conditioning Conference 1983 (2018).
3. V. Gnielinski, *New Equations for Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow*, Int. Chem. Eng., 16 (2) (1976), pp. 359–368.
4. L. Ventola, F. Robotti, M. Dialameh, F. Calignano, D. Manfredi, E. Chiavazzo, P. Asinari, *Rough surfaces with enhanced heat transfer for electronics cooling by direct metal laser sintering*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 75 (2014), pp. 58-74.
5. M. Arie, A. Shooshtari, V. Rao, S. Dessiatoun, M. Ohadi, *Air-Side Heat Transfer Enhancement Utilizing Design Optimization and an Additive Manufacturing Technique*, Journal of Heat Transfer, 139 (3) (2017).
6. T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, D. Hui, *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*, Composites Part B: Engineering, 143 (2018), pp. 172-196.
7. M. Norfolk, H. Johnson, *Solid-State Additive Manufacturing for Heat Exchangers*, JOM, 67 (3) (2015), pp. 655-659.
8. D. C. Deisenroth, R. Moradi, A. H. Shooshtari, F. Singer, A. Bar-Cohen, M. Ohadi, *Review of Heat Exchangers Enabled by Polymer and Polymer Composite Additive Manufacturing*, Heat Transfer Engineering, 39:19 (2018), 1648-1664.
9. M. Nikzad, *New Metal/Polymer Composites for Fused Deposition Modelling Applications*, Ph.D. thesis (2011), Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia.
10. D. C. Deisenroth, M. A. Arie, S. Dessiatoun, A. Shooshtari, M. Ohadi, A. Bar-Cohen, *Review of most recent progress on development of polymer heat exchangers for thermal management applications*, Proc. ASME 2015 International Technical Conf. and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems collocated with the ASME 2015 13th International Conf. on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, San Francisco, July 6-9, 2015.

11. M. A. Arie, A. H. Shooshtari, R. Tiwari, S. V. Dessiatoun, M. M. Ohadi, J. M. Pearce, *Experimental characterization of heat transfer in an additively manufactured polymer heat exchanger*, Applied Thermal Engineering, vol. 113 (2017), pp. 575-584.
12. A. Sommers, Q. Wang, X. Han, C. T'Joen, Y. Park, A. Jacobi, *Ceramics and ceramic matrix composites for heat exchangers in advanced thermal systems - A review*, Applied Thermal Engineering, 30 (2010), pp. 1277-1291.
13. U. Scheithauer, E. Schwarzer, G. Ganzer, A. Körnig, W. Beckert, E. Reichelt, M. Jahn, A. Härtel, H. J. Richter, T. Moritz, A. Michaelis, *Micro-reactors made by Lithography-based Ceramic Manufacturing (LCM)*, Proceedings of 11th International Conference on Ceramic Materials and Components for Energy and Environmental Applications 2015, Vancouver, Ceramic Transactions, 2016, 258, The American Ceramic Society.
14. A. Zocca, P. Colombo, C. M. Gomes, and J. Günster, *Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, Potentialities, and Opportunities*, Journal of American Ceramic Society, 98 (7) (2015), pp. 1983–2001.
15. O. Al-Ketan, M. Ali, M. Khalil, R. Rowshan, K. A. Khan, R. K. A. Al-Rub, *Forced Convection Computational Fluid Dynamics Analysis of Architected and Three-Dimensional Printable Heat Sinks Based on Triply Periodic Minimal Surfaces*, Journal of Thermal Science and Engineering Applications, vol. 13 (2021).
16. R. Kempers, J. Colenbrander, W. Tan, R. Chen, A. J. Robinson, *Experimental characterization of a hybrid impinging microjet-microchannel heat sink fabricated using high-volume metal additive manufacturing*, International Journal of Thermofluids, 5-6 (2020).
17. Y. Cormier, P. Dupuis, A. Farjam, A. Corbeil, B. Jodoin, *Additive manufacturing of pyramidal pin fins: Height and fin density effects under forced convection*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 75 (2014), pp.235-244.
18. H. Rastan, A. Abdi, B. Hamawandi, M. Ignatowicz, J. P. Meyer, B. Palm, *Heat transfer study of enhanced additively manufactured minichannel heat exchangers*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 161 (2020).
19. M. Göлтаş, B. Gürel, A. Keçebaş, V. R. Akkaya, O. V. Güler, *Improvement of thermo-hydraulic performance with plate surface geometry for a compact plate heat exchanger manufactured by additive manufacturing*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 188 (2022).