



Soluții noi de realizare a mașinilor electrice cu puteri specifice mari destinate sistemelor de propulsie ale vehiculelor electrice și hibride

Aurelian CRĂCIUNESCU

**Facultatea de Inginerie Electrică
Universitatea POLITEHNICA din București**

SME'22, EDITIA A XVIII-a --- 9 decembrie 2022

Foi de parcurs tehnologice pentru puterile specifice ale motoarele electrice de tracțiune [1]

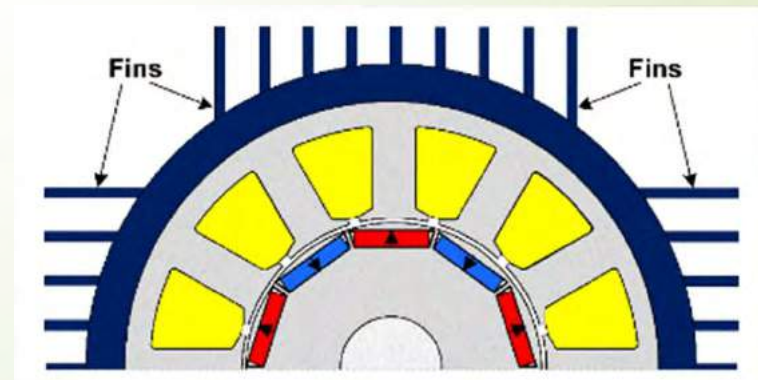
- Advance Propulsion Centre (U.K.):
2,5 kW/kg în 2018;
7,0 kW/kg în 2025
- Aerospace Technology Institute (U.K.):
3,0 kW/kg în 2018;
7,5 kW/kg în 2025
12,0 kW/kg în 2030
- NASA (USA):
6,6 kW/kg în 2018;
16,5 kW/kg în 2025;
19,7/33,0 (criogenic) kW/kg în 2030
41,1 (criogenic) kW/kg în 2035

Cum se caută să se realizeze performanțele cerute?

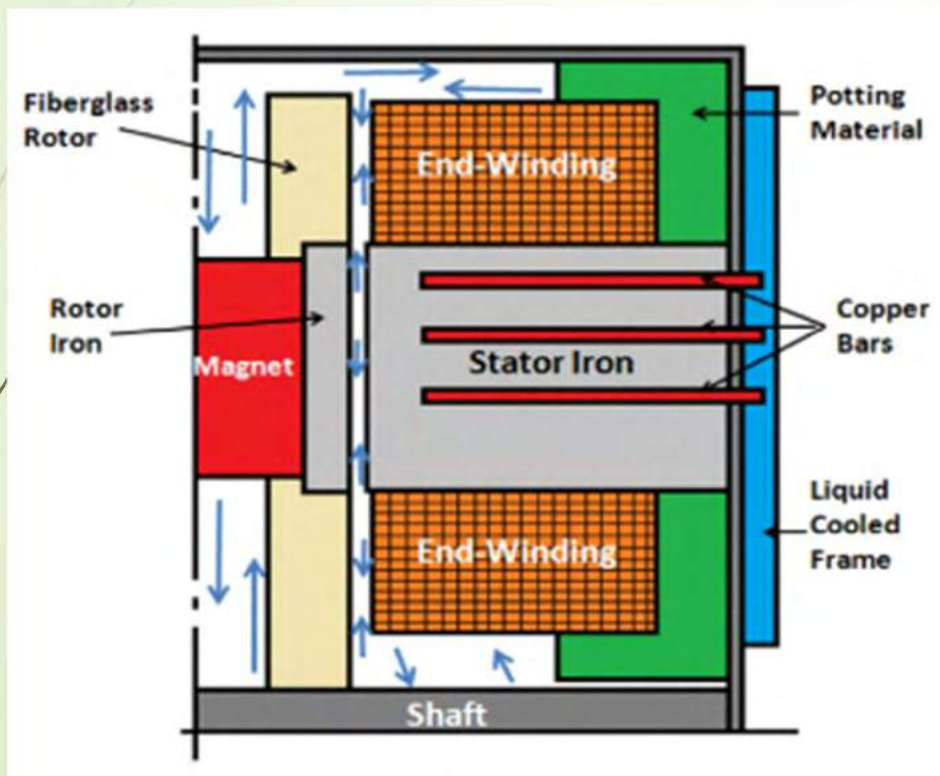
- Prin intensificarea răcirii
- Topologii noi
- Material noi
- Tehnologii de fabricație noi

O clasificare a mijloacelor de intensificare a răcirii mașinilor electrice:

- Pasive
 - Radiatoare
 - Ghiduri de căldură
- Active
 - Fluide de răcire cu circulație forțată
 - Aer
 - Apă cu glicol
 - Ulei de motor
 - Pompe de căldură

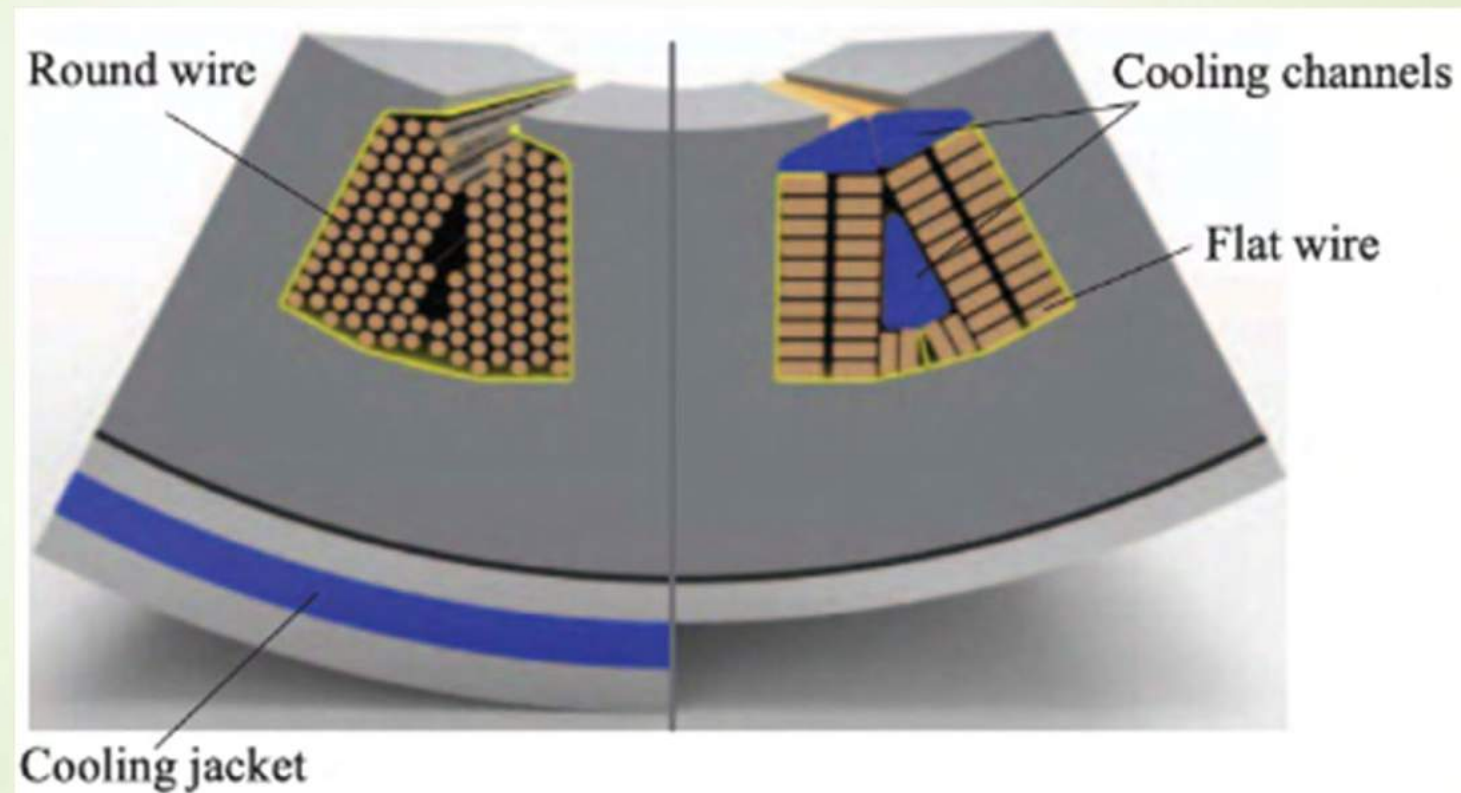


Sistem mixt de răcire pasivă și activă pentru un motor de avion de 75 kW, cu întrefier axial [14]



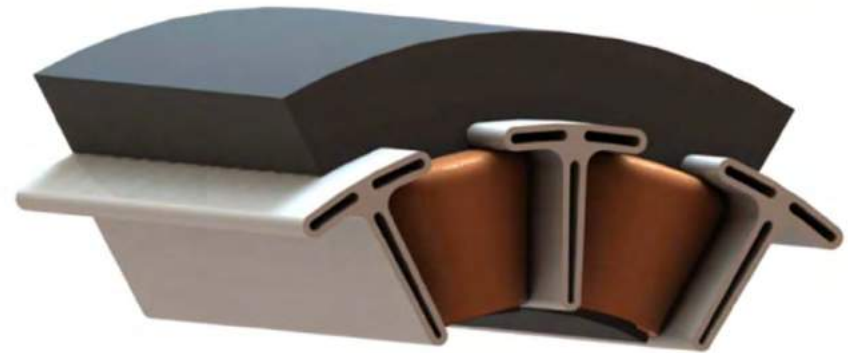
- În miezul magnetic statoric sunt introduse ghiduri de căldură din lamele de cupru (reduc temperatura înfășurării cu 25 grd C)
- Rășina aplicată pe capetele de bobină are conductibilitatea termică de 1–3 W/m.K, față de aer care are 0,02-0,03 W/m.K

Comparație între răcirea convențională cu cămașă de apă a înfășurării cu fire rotunde și răcirea în interiorul creștăturii a înfășurării cu fire dreptunghiulare [12]

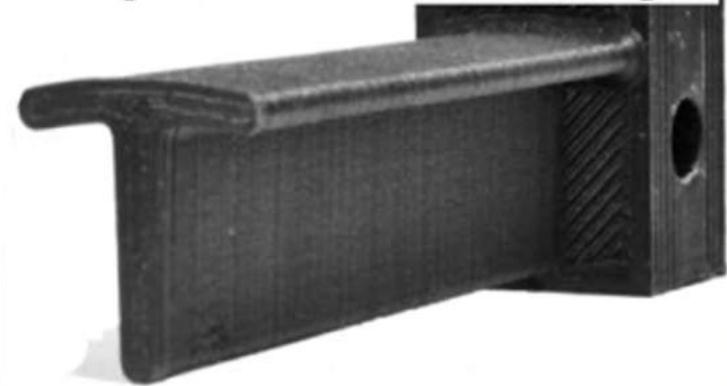


Schimbător de căldură ceramic printat 3D pentru răcirea unui stator cu înfășurări concentrate [4]

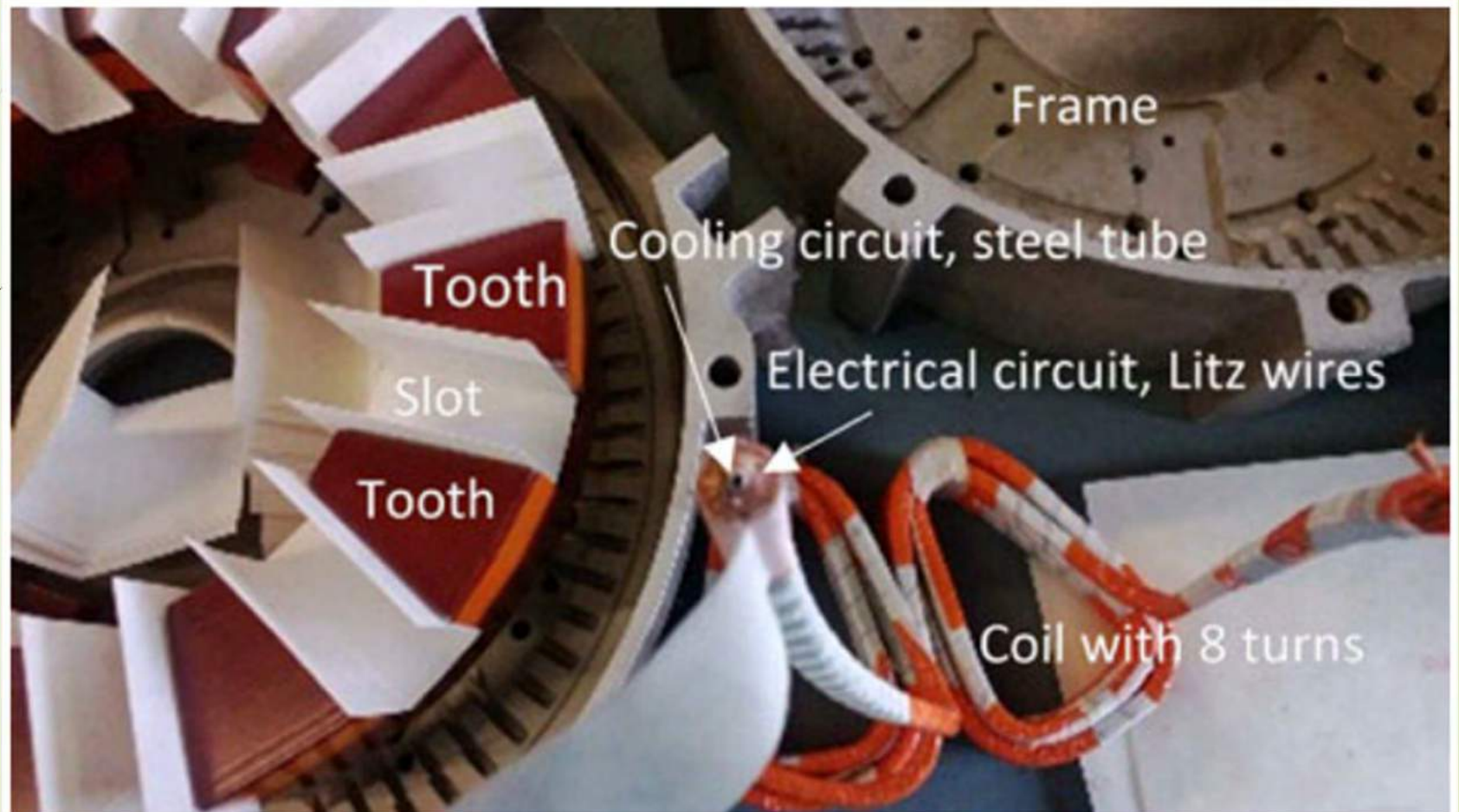
- Grosimea pereților: 0,8 mm
- Rigiditatea dielectrică 5,1 kV/mm
- Conductivitatea termică 35 W/m.K
- Fluid de răcire: amestec glicol-apă,
- Debitul de 0,32 L/min,
- Permite o densitate continuă de curent de 30 A/mm²,
- Menține temperatura înfășurărilor concentrate sub 132 grad. C.
- Univ. of Wisconsin-Madison, USA



Liquid-cooled heat exchanger |

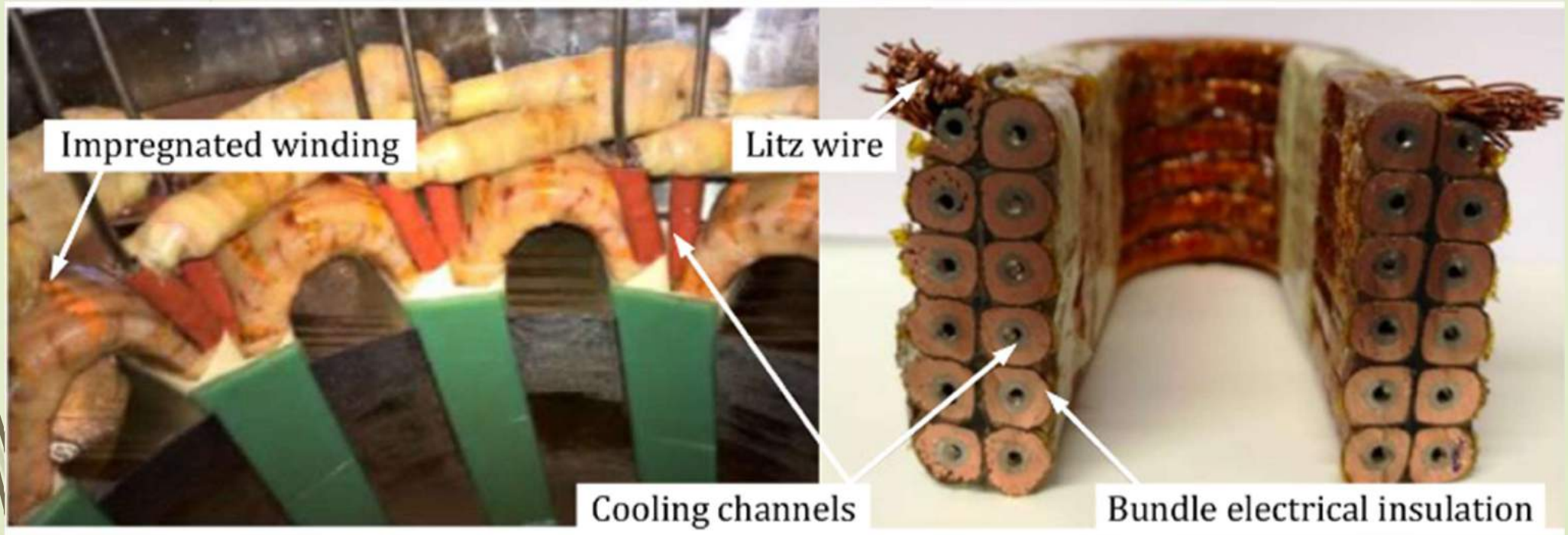


Conductor electric Litz cu tub de oțel încorporat pentru circuitul de răcire (motor de 205 kW, 6000 rpm)

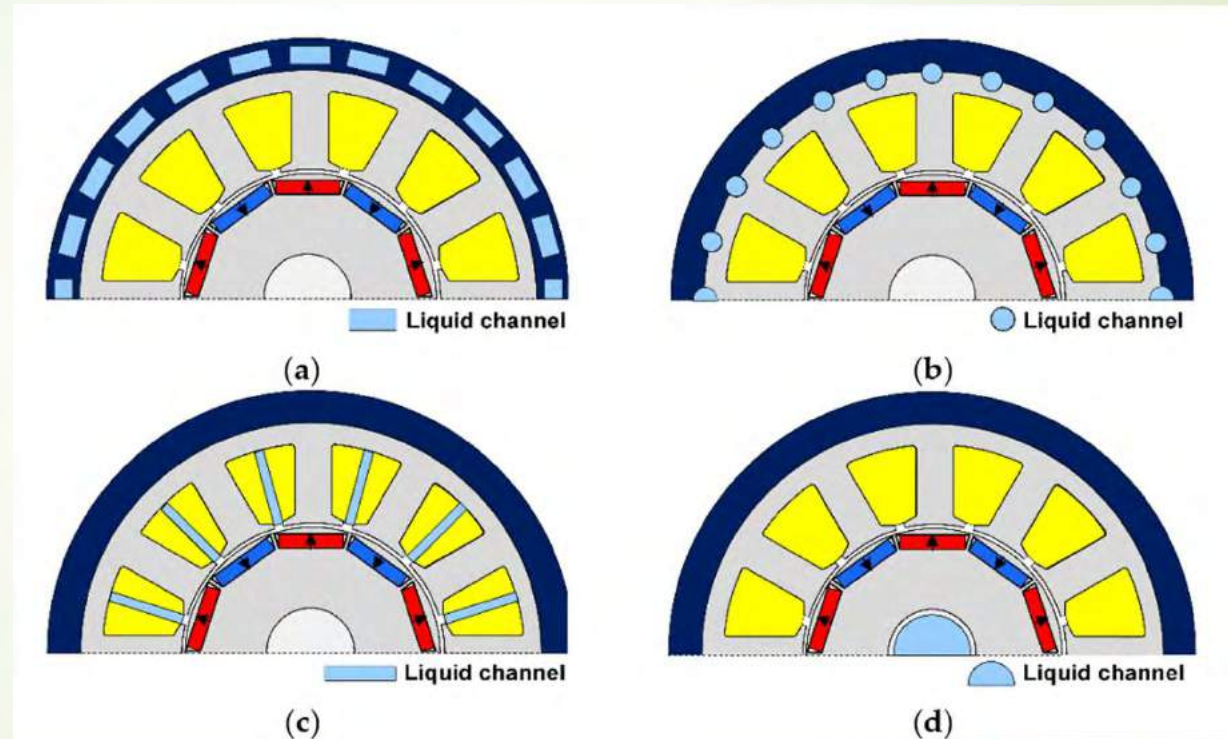


8

Conductor electric Litz cu tub de oțel încorporat pentru circuitul de răcire (motor de 205 kW, 6000 rpm)

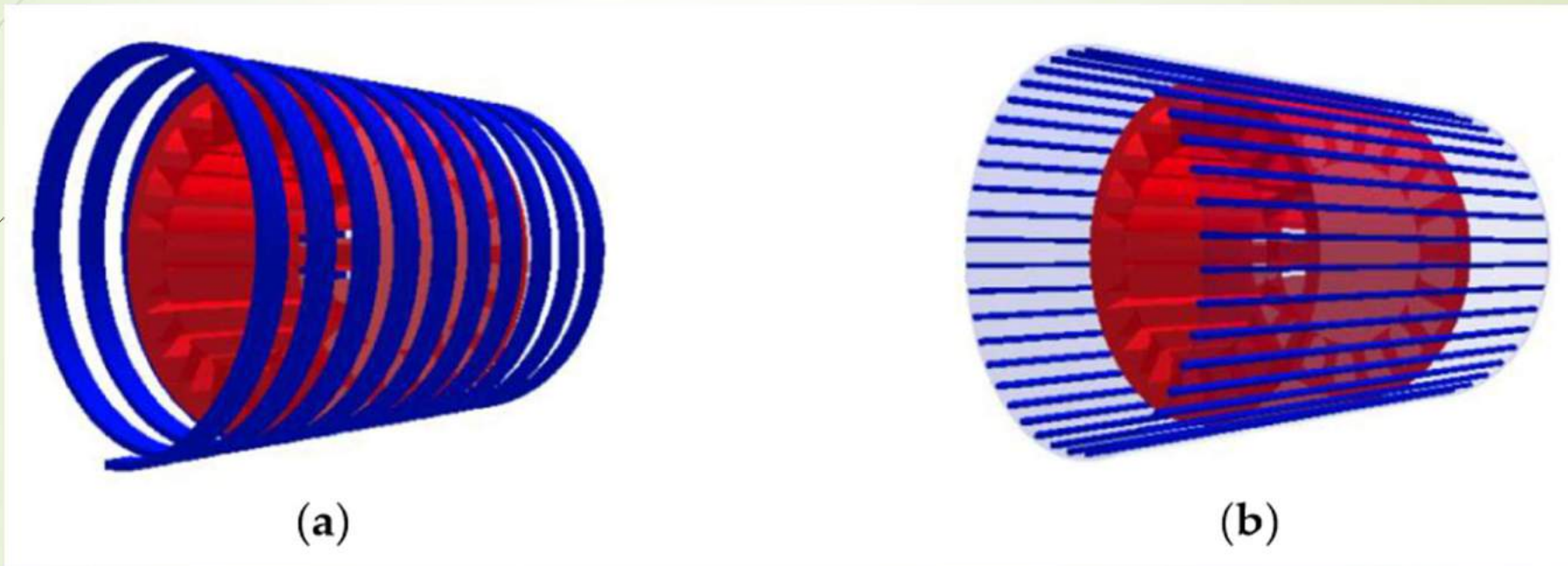


Canale de răcire forțată indirectă cu lichid la mașinile sincrone cu magneți permanenți [2]



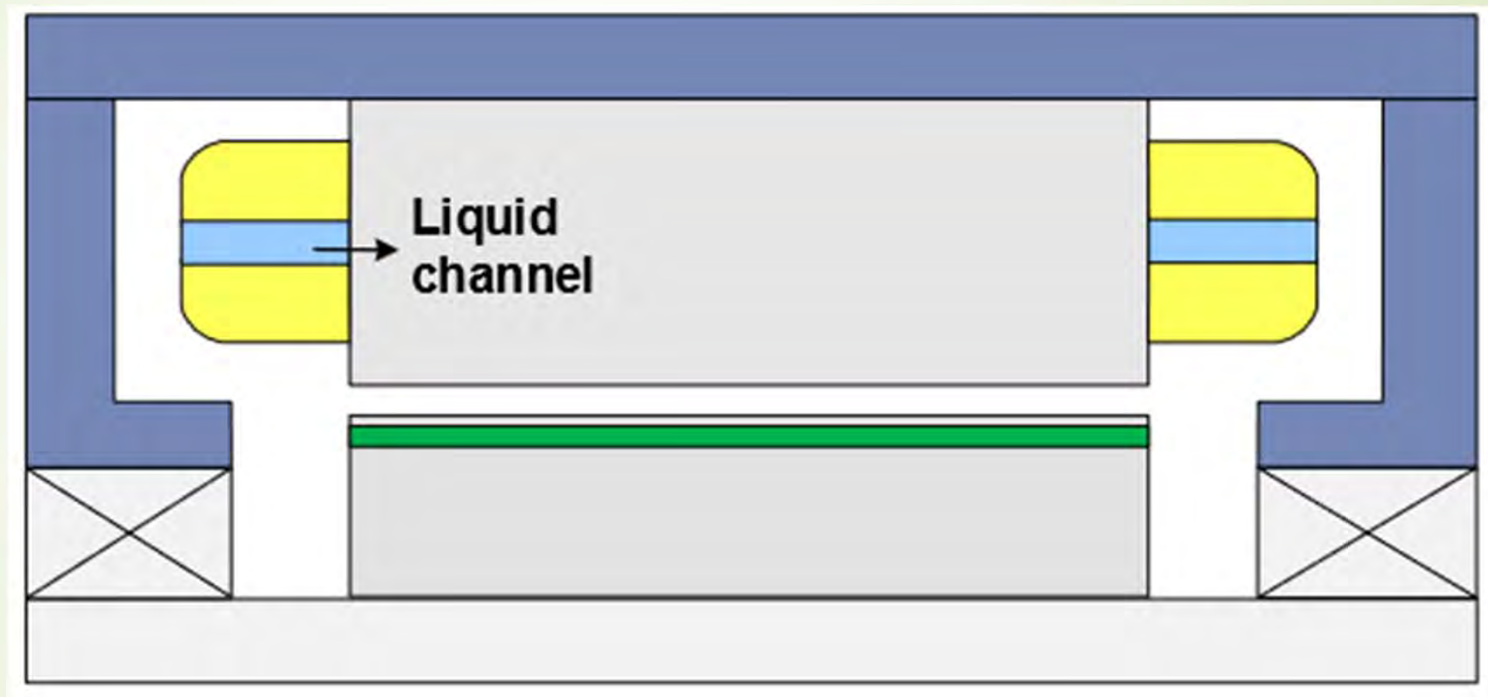
- a) canale cuprinse în carcasă; b) canale cuprinse în stator; c) canale cuprinse în înfășurări; d) canal cuprins în arbore.

Canale de răcire forțată indirectă cu lichid la mașinile sincrone cu magneti permanenți [2]



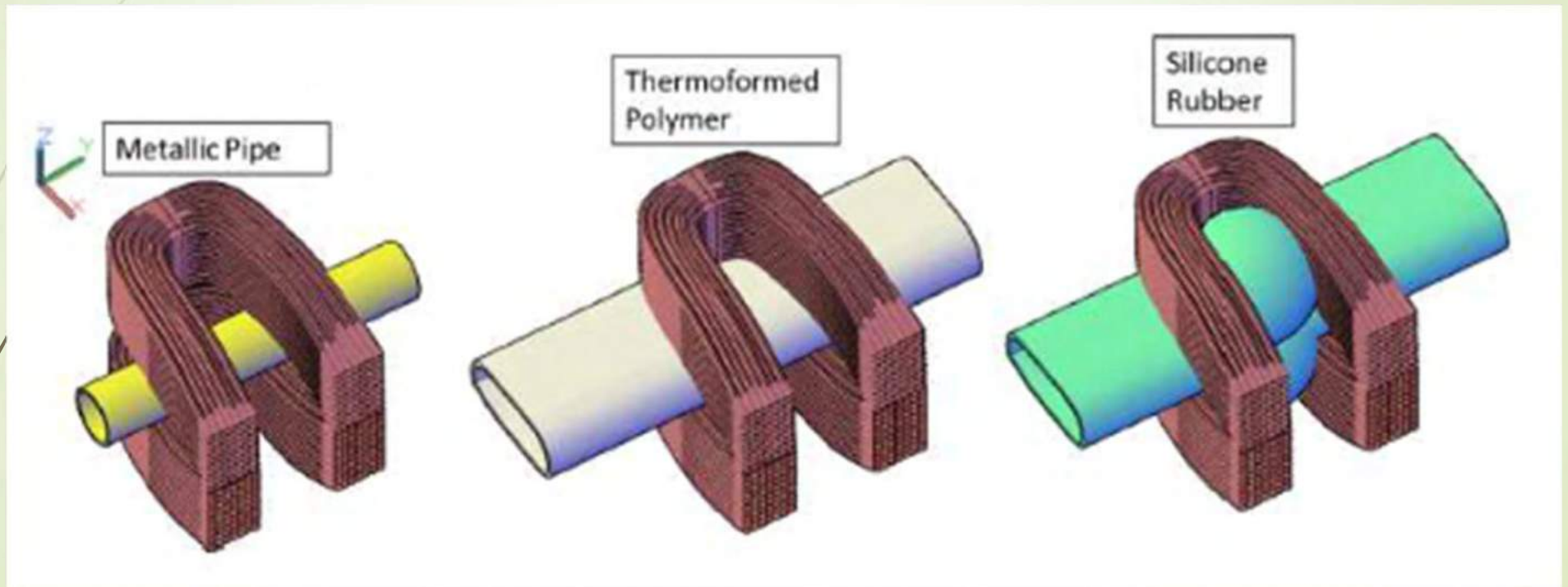
- Configurații de canale de răcire forțată cu lichid: a) canal elicoidal; b) canale axiale. Canalul spiral este mai eficient datorită impedanței mai mici. Canalele axiale au o rezistență termică de contact mai bună.

Canale de răcire forțată indirectă dispuse în capetele de bobină ale unei mașini electrice [2]

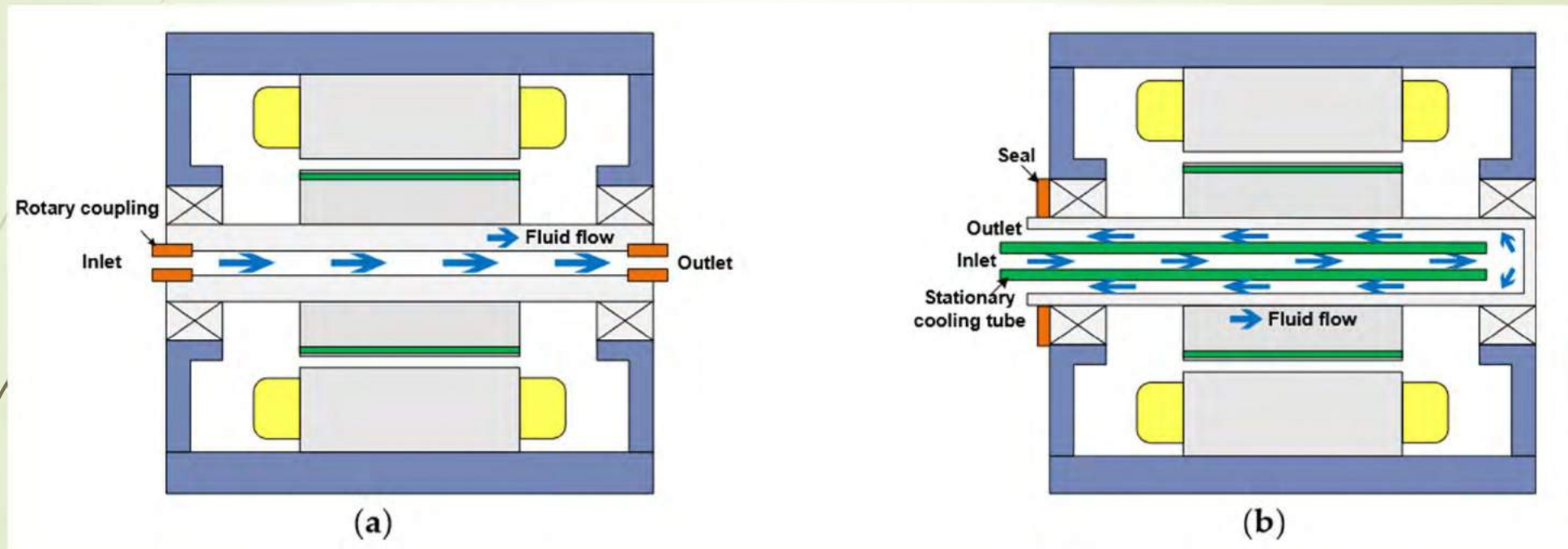


- Canal de răcire cuprins în capetele de bobină. Lichide de răcire: apă, glicol cu apă sau ulei de motor – se preferă apa datorită capacității ei mari de absorbție a căldurii

Materiale ale canalelor de răcire forțată indirectă a capetelor de bobină ale unei mașini electrice

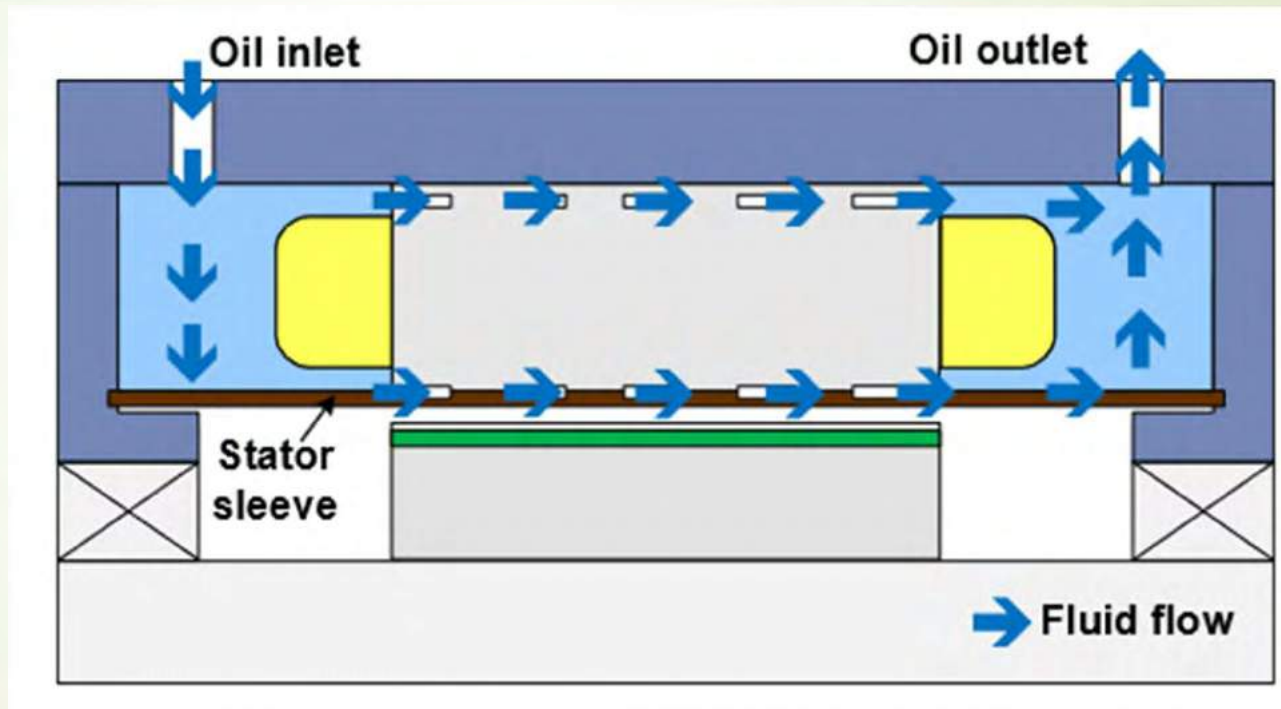


Canale de răcire forțată indirectă cu lichid dispuse în arborii mașinilor sincrone cu magneți permanenți [2]



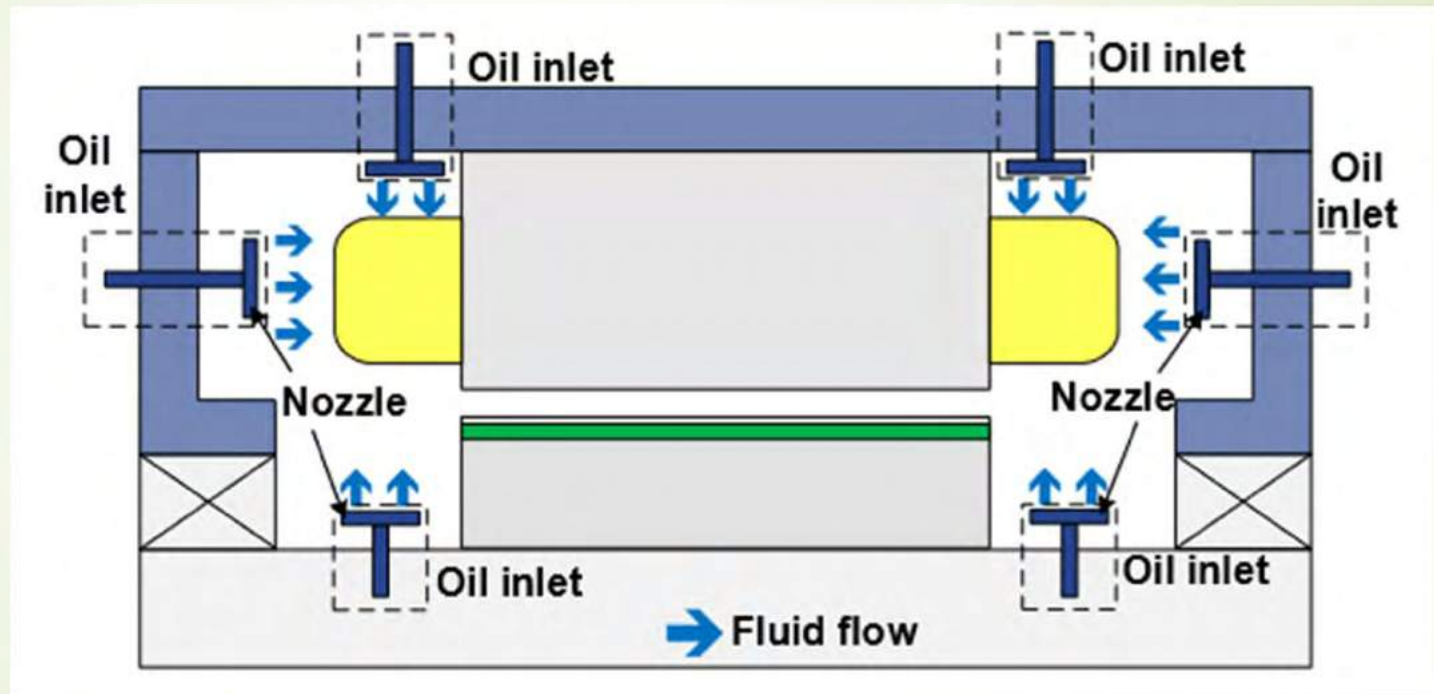
- Răcire recomandată pentru reducerea temperaturii magneților permanenți. Forțele centrifuge favorizează disiparea căldurii: a) Răcire directă; b) Răcire cu recirculare (are un coeficient de transfer a căldurii mai bun).

Circuit de răcire forțată directă cu lichid la mașinile sincrone cu magneți permanenți [2]



- Cu imersia statorului (uleiul înlocuiește aerul pentru un transfer de căldură superior) Rotorul poate fi și el imersat în ulei.

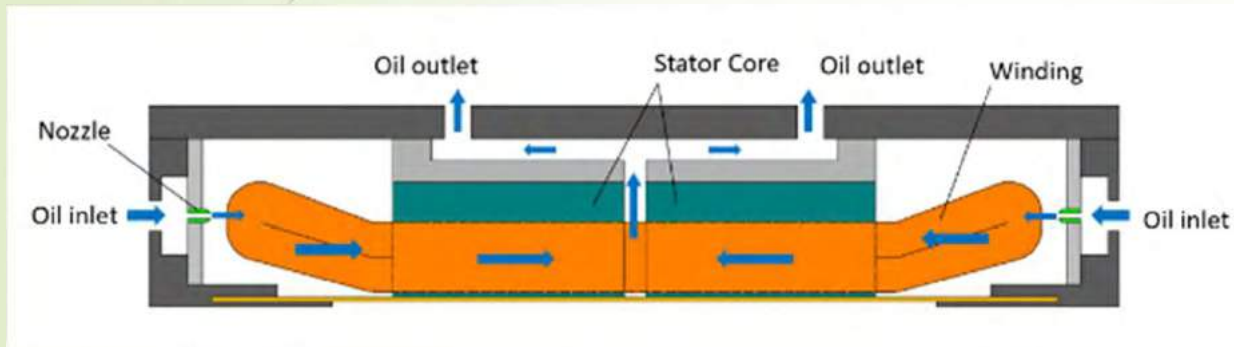
Răcirea forțată directă prin pulverizare la mașinile sincrone cu magneți permanenți [2]



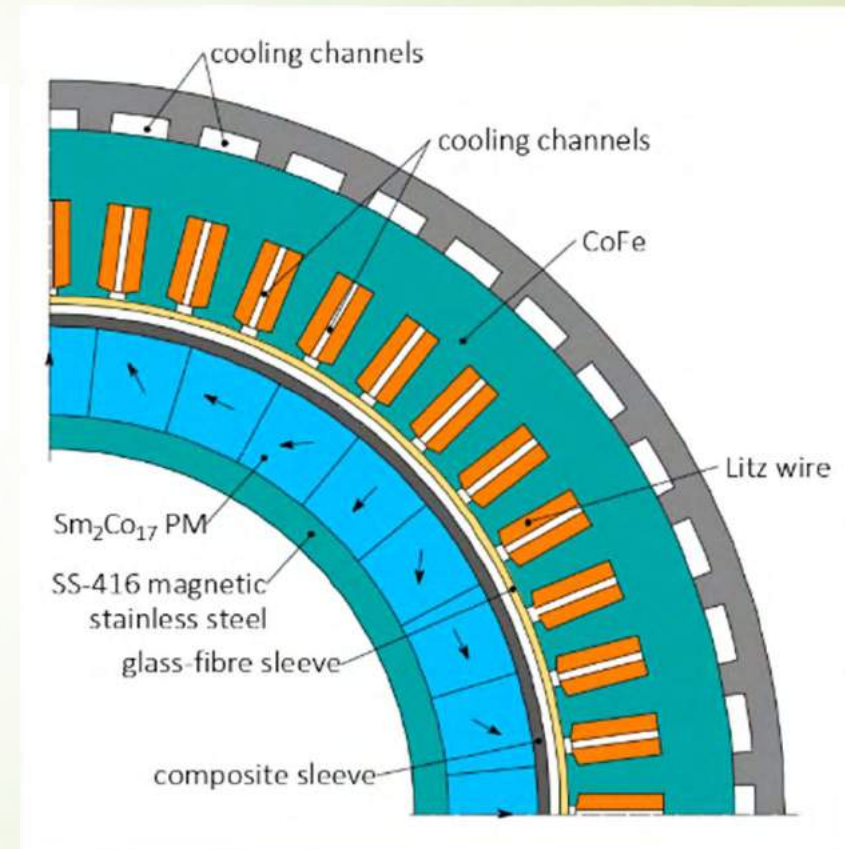
- Răcirea prin pulverizare are performanțe superioare răcirii prin imersie (folosită la Toyota Prius HEV în 2017).

16

Generator electric de 4 MW (5 MVA), 15.000 rpm, putere specifică 20 kW/kg pentru avioane electrice hibride [3]



- Tensiunea de fază: 500 V, Curentul de fază: 416 A
- Densitatea de curent: 27,5 A/mm²
- Randamentul: 97%
- Fluid de răcire: ulei, Debitul maxim: 500 L/min,
- Diametrul/lungimea statorului: 400 mm/210 mm



Fabricația aditivă în sprijinul realizării motoarelor cu putere specifică ridicată

17

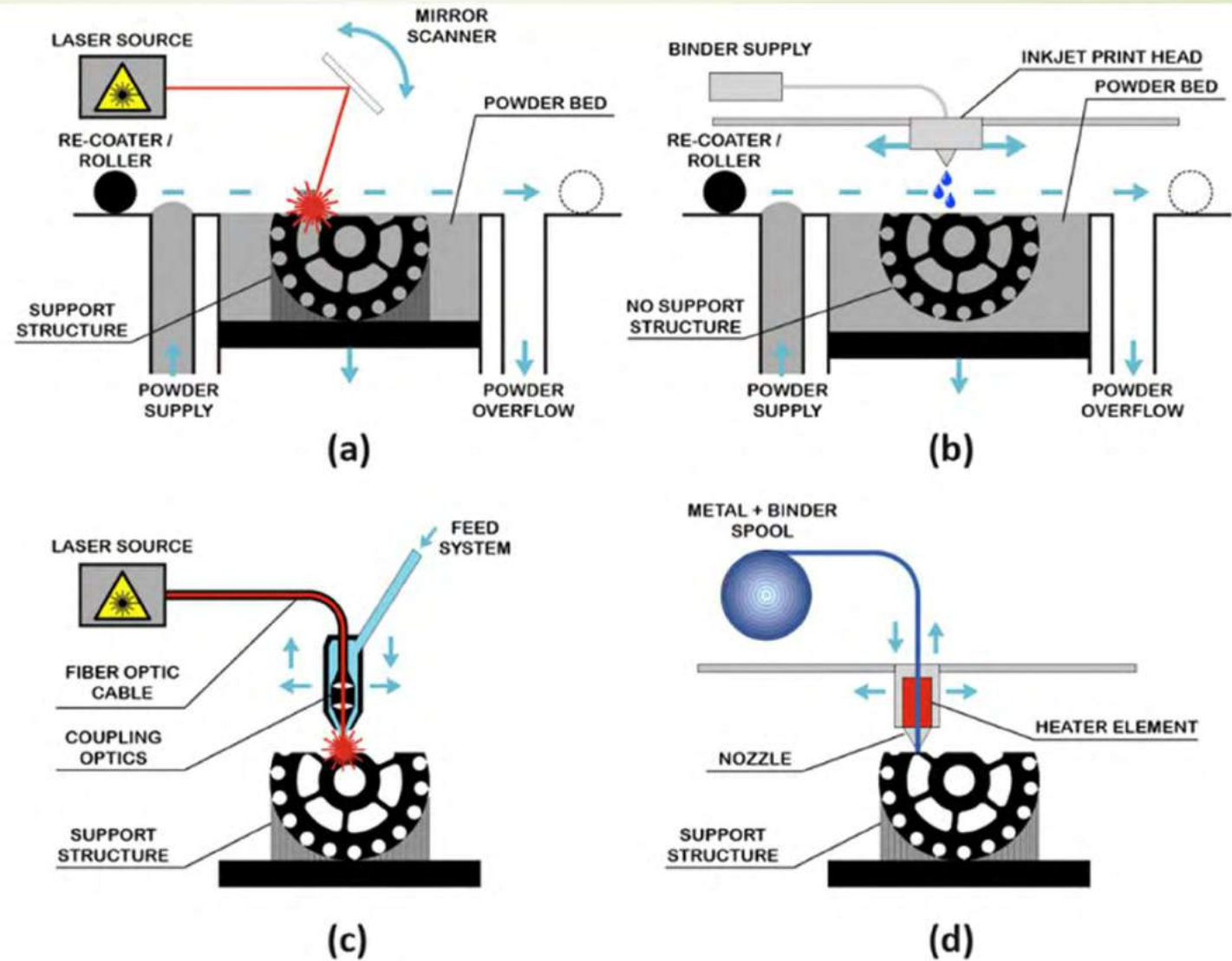
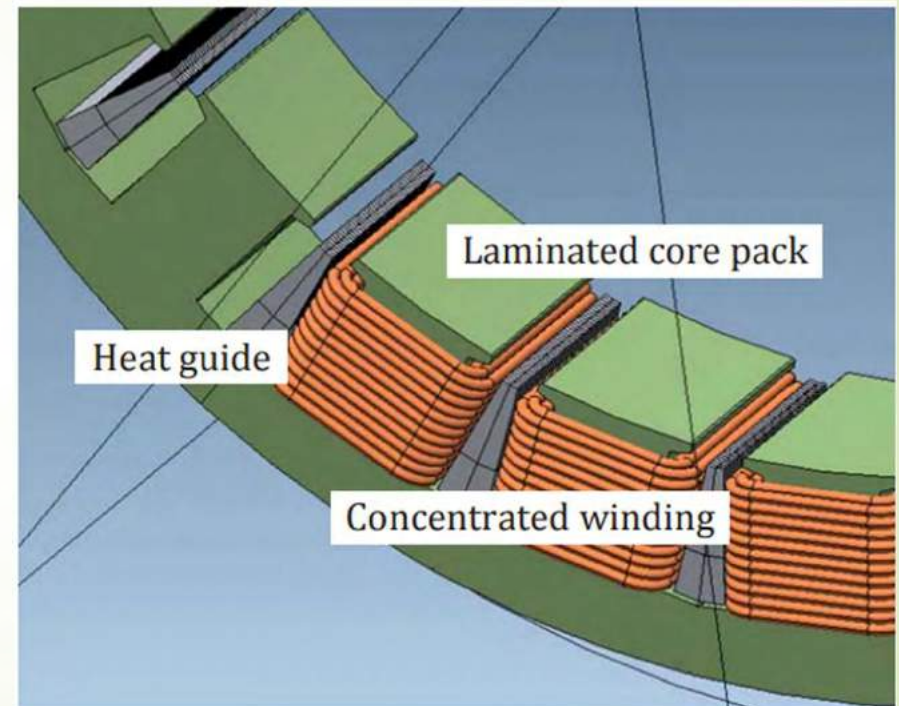
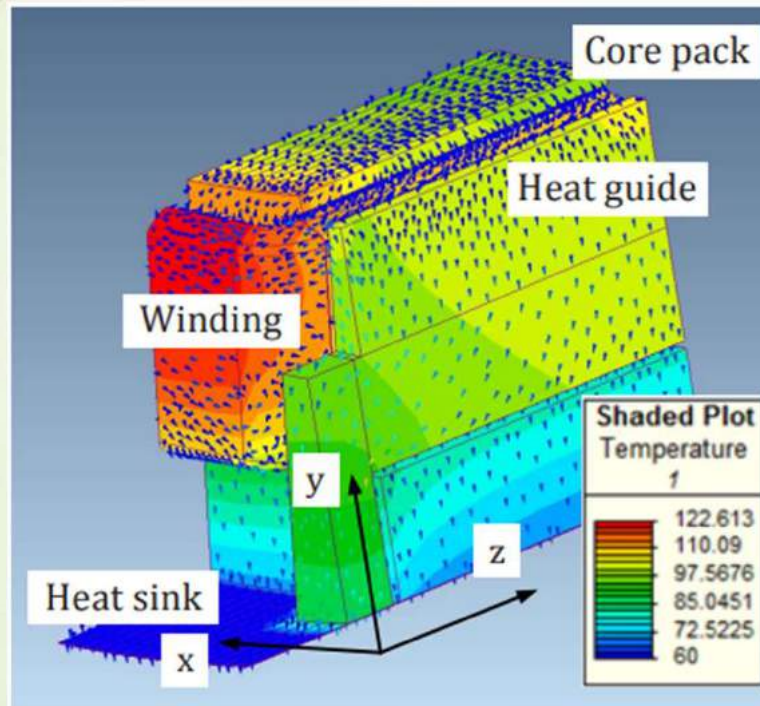


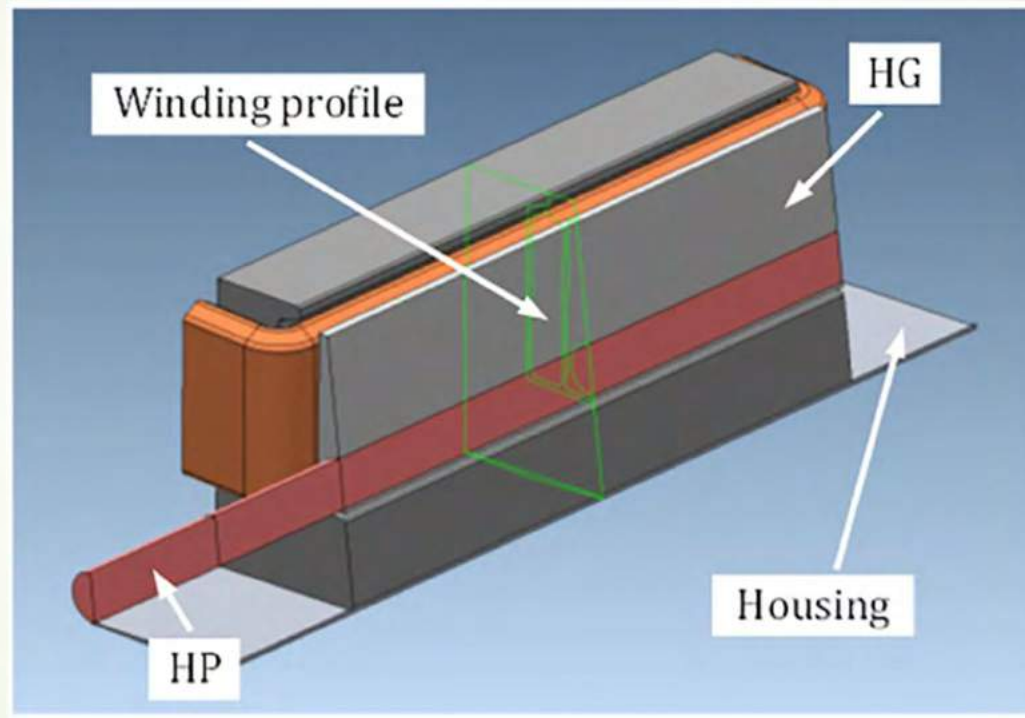
Fig. 2.1. Common metal AM methods: (a) laser powder bed fusion (L - PBF), (b) binder jetting (BJ), (c) directed energy deposition (DED), (d) fuse deposition modelling (FDM).

Ghid de căldură anizotrop termo-electric pentru răcirea bobinelor concentrate [5-6]



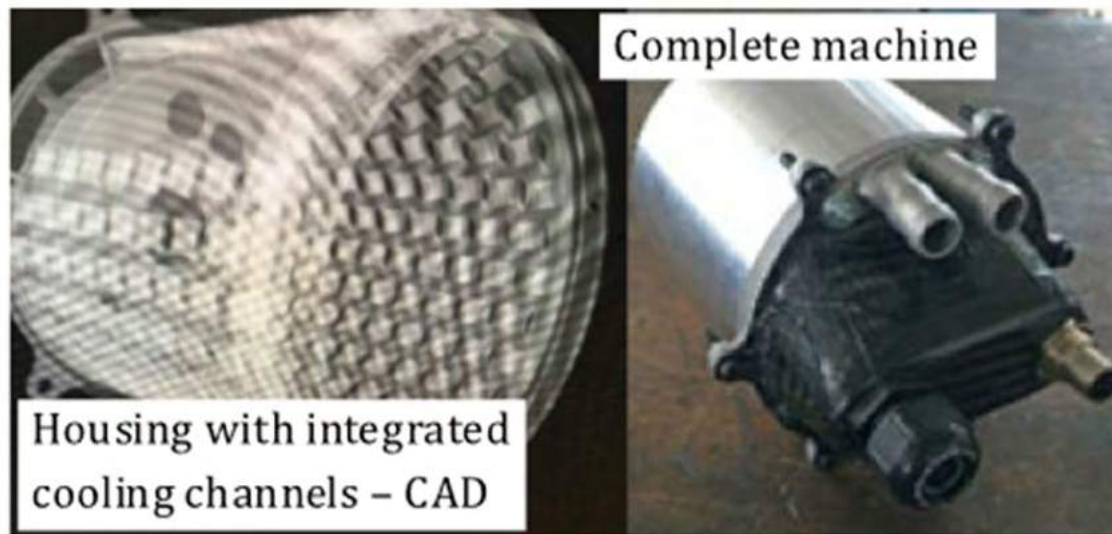
- Ghiduri de căldură pasive din aluminiu, cu structură celulară termo-electric anizotropă. (Univ.Newcastle, U.K.)

Ghid de căldură anizotrop asociat cu pompă de căldură [7]

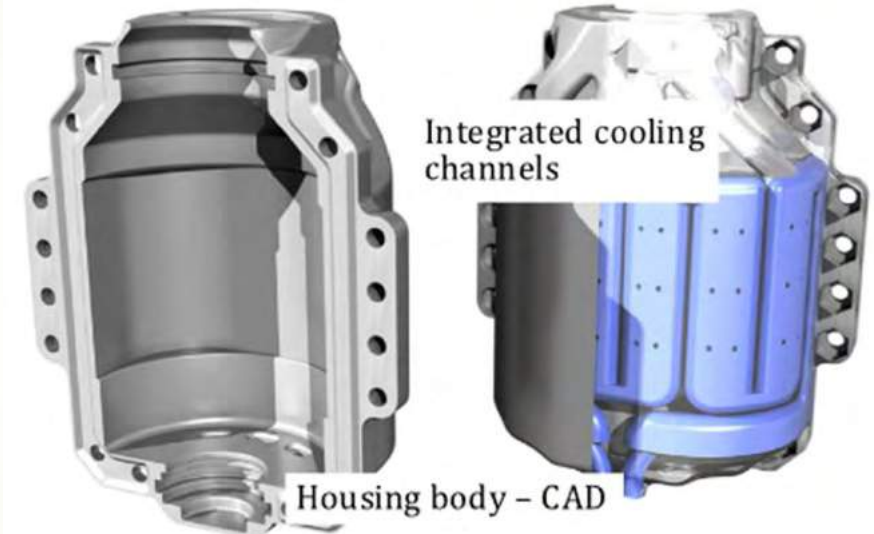


- Segment de înfășurare statorică cu pompă de căldură încorporată (HP) și ghid de căldură anizotrop încorporat (Univ. Newcastle, U.K.) – HP diametru 6 mm și 150 mm lungime. Pentru motor sincron de 80 kW, 8000 rpm, cu MP

Carcase de mașini electrice realizate prin tehnologia fabricației aditive - Exemple [7]



- Carcasă de motor din aliaj de aluminiu (AlSi10Mg) cu canale de răcire integrate – debitul fluidului de răcire sporit cu 31%, conducția căldurii îmbunătățită cu 20% - TU Munchen, Germania

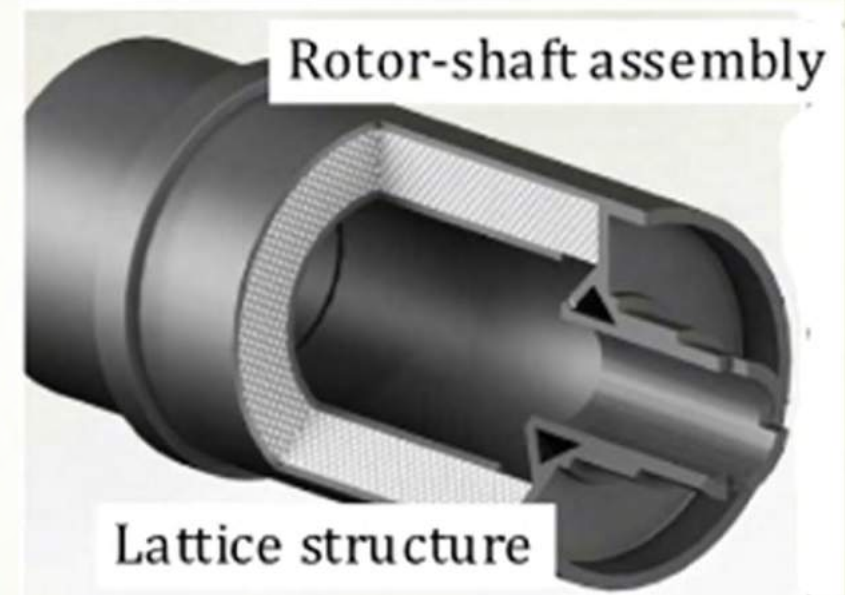


- Carcasă de motor electric cu canale de răcire integrate – Univ. din Nottingham, U. K.

Rotoare de mașini electrice realizate prin tehnologia fabricației aditive - Exemple [5]



- Rotor exterior din aliaj ușor (Ti6Al4V), pentru motor cu MP (univ. Newcastle)



- Rotor interior din oțel, cu structură reticulară (zăbrele) – masă redusă cu 25%, moment de inerție redus cu 21%

Miezuri magnetice rotorice de mașini electrice realizate prin tehnologia fabricației aditive - Exemple [5]

Rotor core assembly



- Miez magnetic rotorice pentru motoare sincrone cu magneti permanenți - masă redusă cu 50%.

Rotor core assembly



- Miez magnetic rotorice pentru motoare sincrone cu reluctanță comutată – inducția magnetică de saturație 2,3 T



Miezuri magnetice rotorice pentru motoare sincrone realizate cu tehnologia fabricației aditive - Exemple [5]



- Miezuri magnetice rotorice pentru motoare sincrone cu reluctanță, cu punți de rigidizare mecanică nemagnetice.

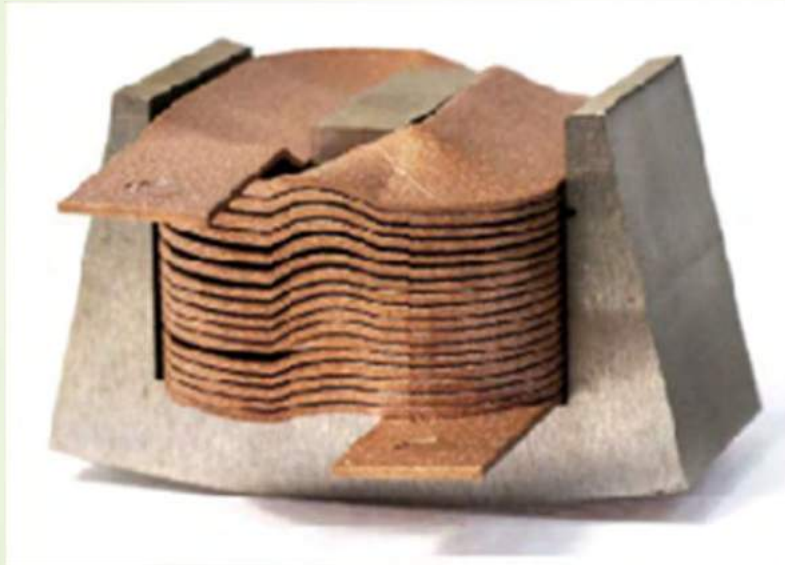
Miezul magnetic al motorului electric al automobilului Toyota Prius realizat prin tehnologia fabricației aditive [7]

COMPARISON SUMMARY OF TOYOTA PRIUS AND LAYERED MOTORS

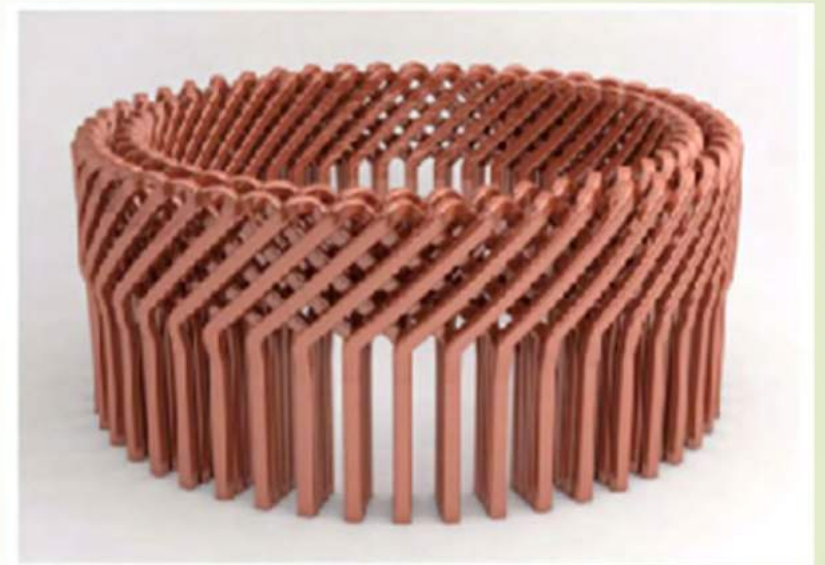
	Toyota Prius 2010	Layered motor
		
Stator configuration	48-slots with distributed winding	
Outer stator diameter	264 mm	
Inner stator diameter	161.9 mm	
Air gap length	0.73 mm	
Rotor core material	0.3 mm steel sheets	SMC
Rotor magnet	NdFeB (Br = 1.25 T)	NdFeB (Br = 0.49 T)
Rare-earth volume	13.01 cm ³ x 8	13.13 cm ³ x 8
Output torque	200.05 N.m	200.6 N.m
Torque ripple	15.8%	14.9% (<5% with skewing)

- Motor cu magneți permanenți interiori realizat prin procedeul fabricației aditive prin pulverizare la rece

Bobine de mașini electrice realizate cu tehnologia fabricației aditive [9]

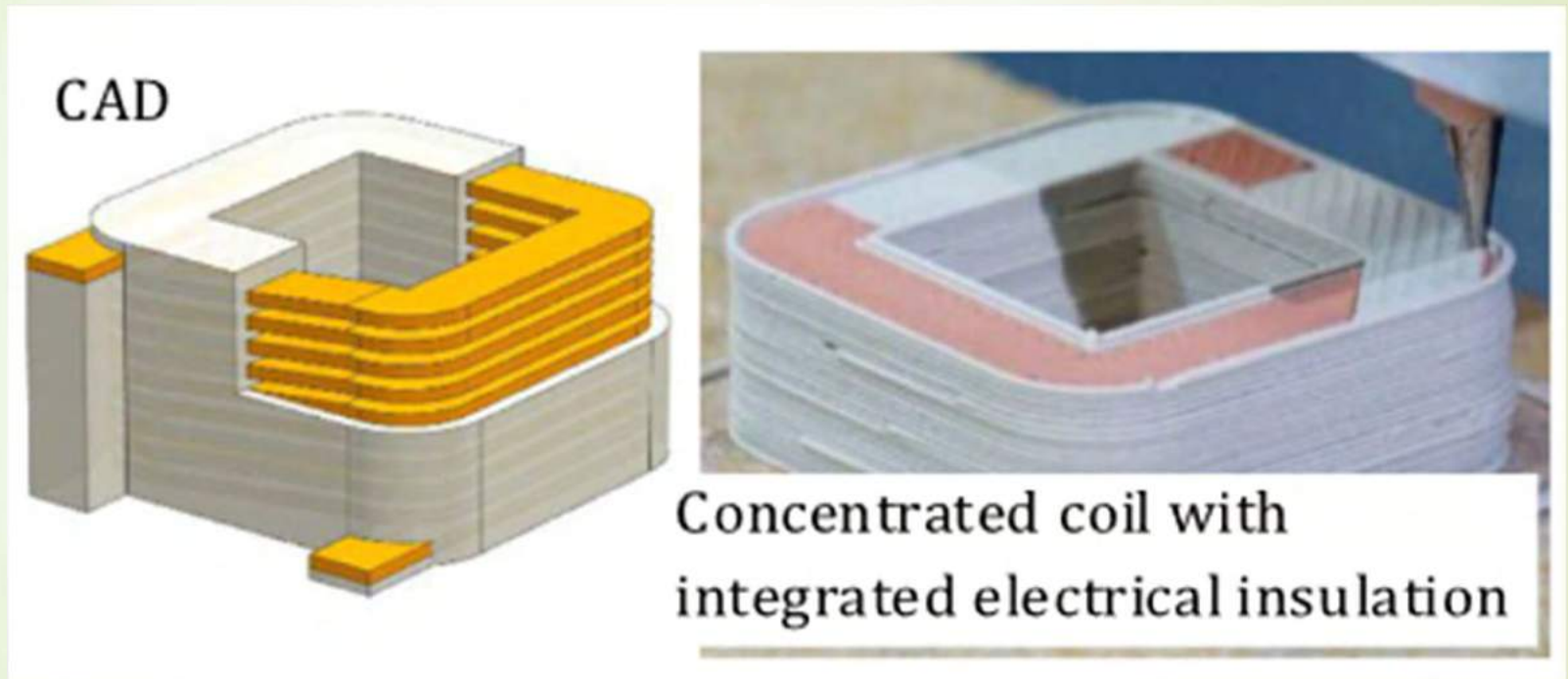


- Înfășurare profilată pentru reducerea interacțiunii dintre conductoare și câmpul magnetic din proximitatea creșturilor deschise (conductorul să fie paralel cu fluxul magnetic)



- Înfășurare în ac de păr – reduce lungime capetelor de bobină.

Bobine de mașini electrice realizate cu tehnologia fabricației aditive [5]



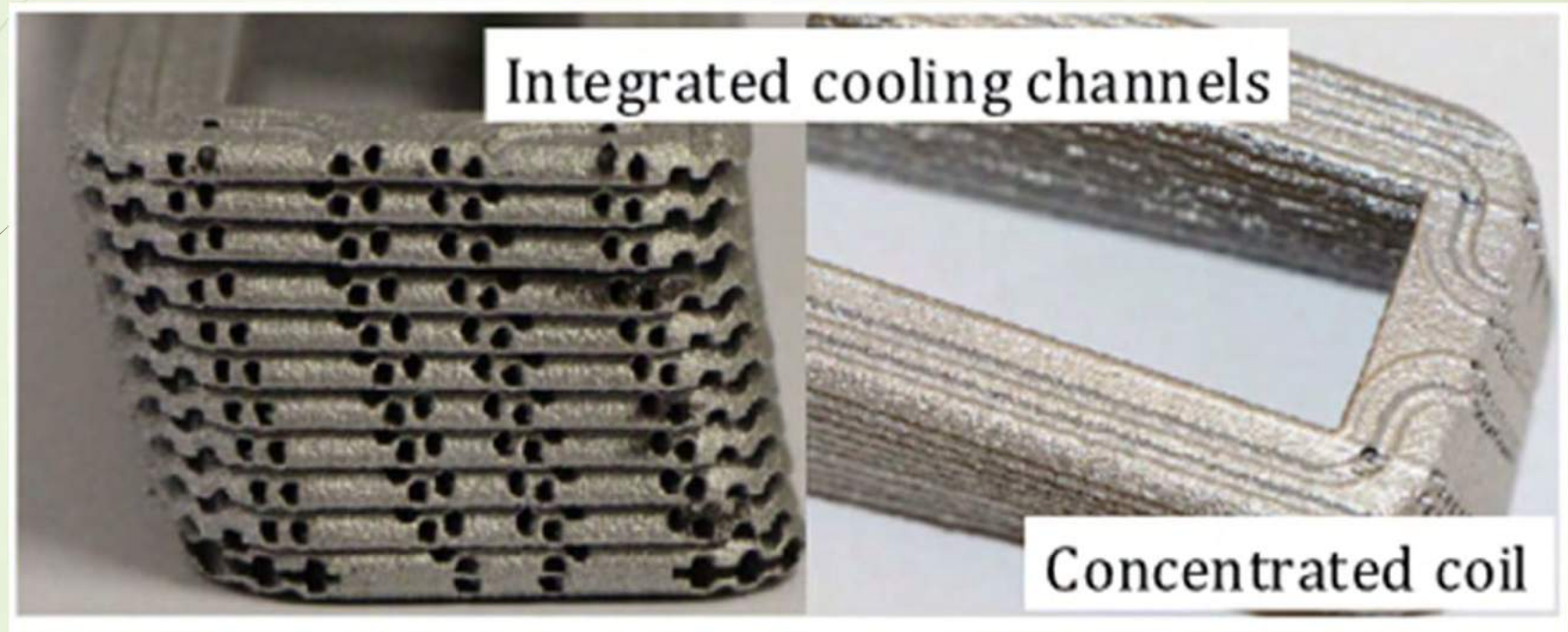
- Bobinaj concentrat cu izolație ceramică pentru pentru motoare sincrone cu reluctanță comutăată – dilatarea materialelor cauzată de creșterea temperaturii de până la 300 grd C nu a produs efecte mecanice.

Element de înfășurare de mașină electrică realizată cu tehnologia fabricației aditive [10]



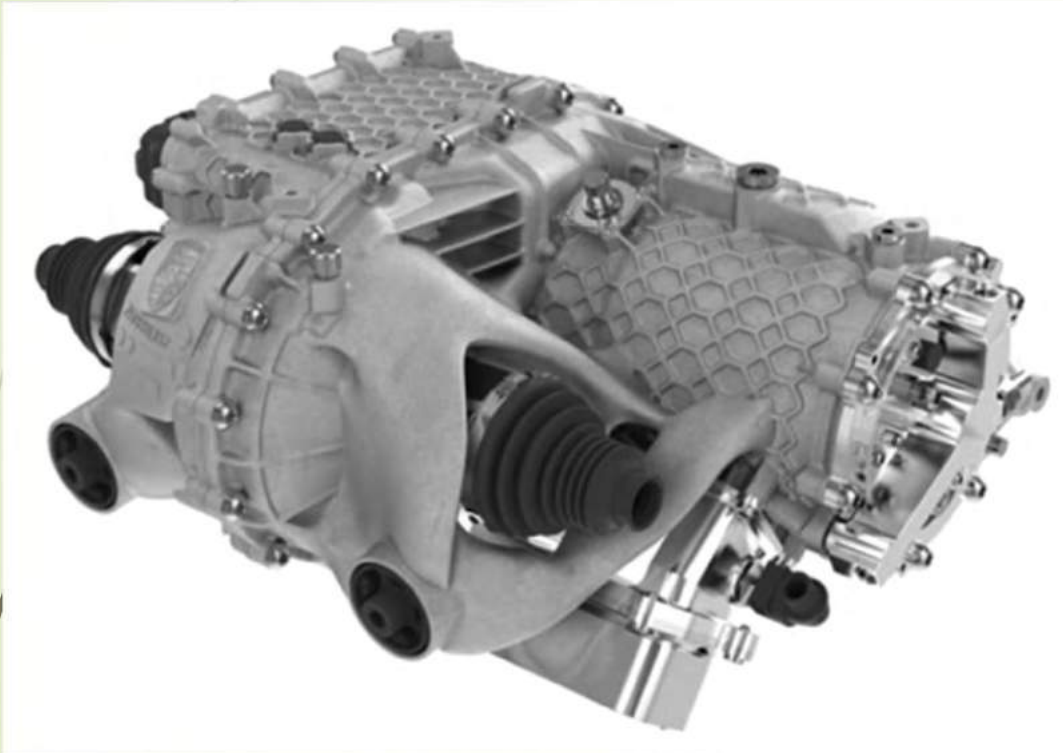
- Secțiune de înfășurare cu capăt de bobină integrat cu schimbător de căldură (Monash Centre for Additive Manufacturing – Australia)

Înfășurări de mașini electrice cu canale de răcire încorporate realizate prin tehnologia de fabricația aditivă [5]



- Înfășurare concentrată cu canale de răcire încorporate realizată din aliaj de aluminiu (AlSi10Mg). Permite extragerea căldurii din înfășurare la o densitate a curentului din conductor de 100 A/mm².

Carcasă pentru acționarea electrică a unui automobil Porsche [9]

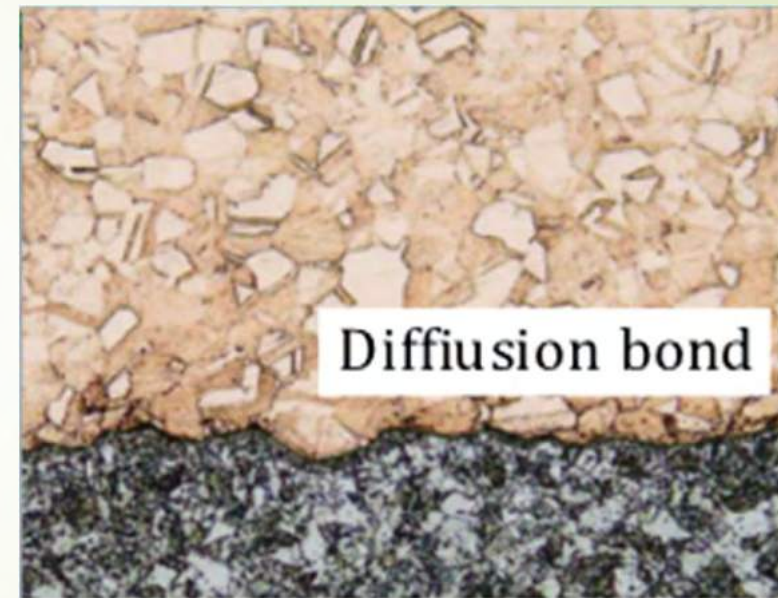


- Carcasă imprimată 3D pentru sistem de acționare electrică – carcasa încorporează două reductoare și va fi folosită pe puntea din față a unei mașini **Porsche** sport – structura de fagure de albine a redus greutatea carcasei cu 40% și a acționării electrice cu 10%. Pereții de 1,5 mm grosime asigură o creștere de 100% a rigidității dintre motorul electric și reductor.

Fabricația aditivă în construcția mașinilor electrice Exemplu [5]

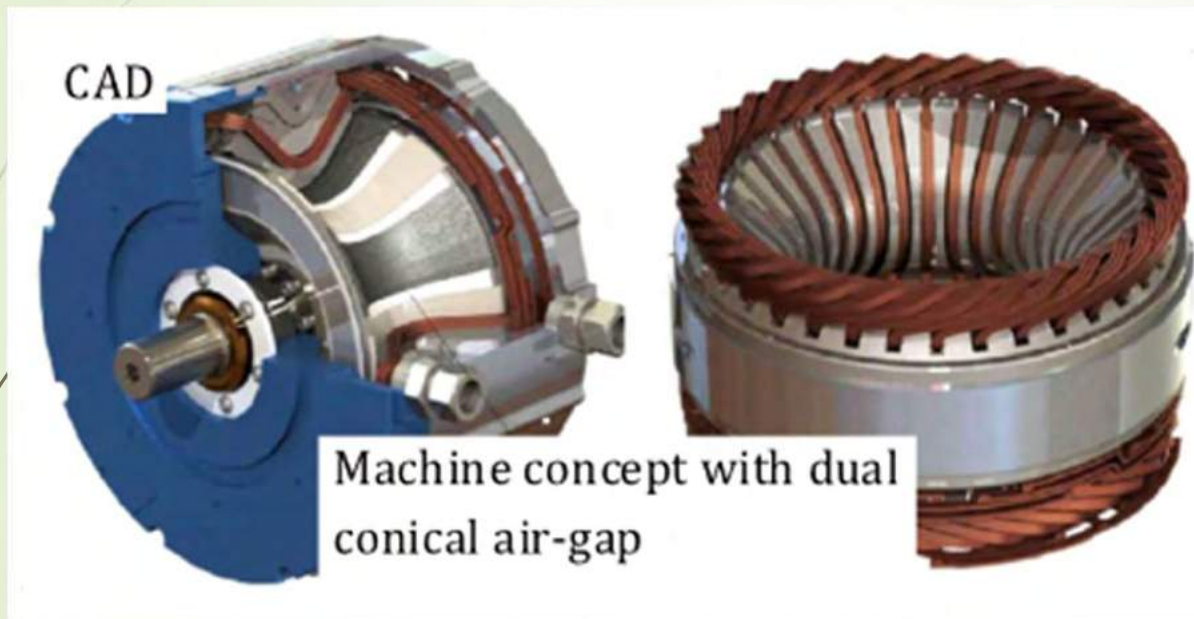


- Rotor din oțel masiv, placat cu cupru, pentru motoare asincrone de mare viteză, realizat prin tehnica pulverizării la rece – Rolls Royce Central Technology.



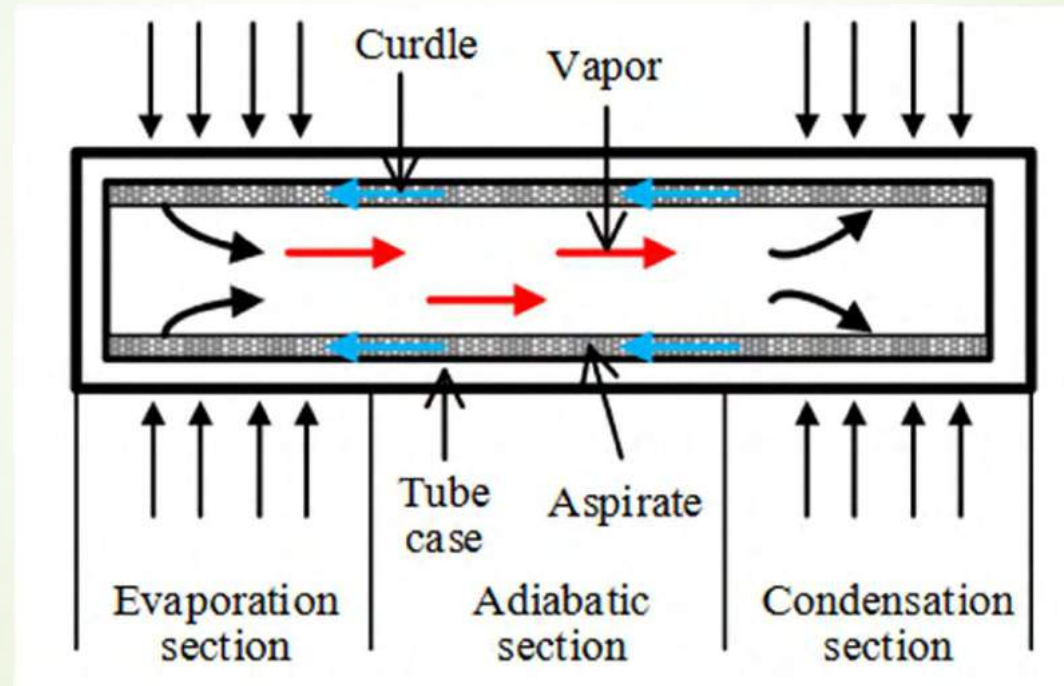
- O creștere a puterii cu cca. 80% în urma placării cu strat de cupru, față de motorul cu rotor de oțel masiv și cu cca. 10% față de motorul cu colivie.

Motor electric cu rotor dublu-conic realizat prin tehnologia fabricației aditive [5]



- Motor sincron cu magneți permanenți cu rotor conic dual realizat cu tehnologia de fabricație aditivă multimaterial - Univ. Newcastle, U.K.

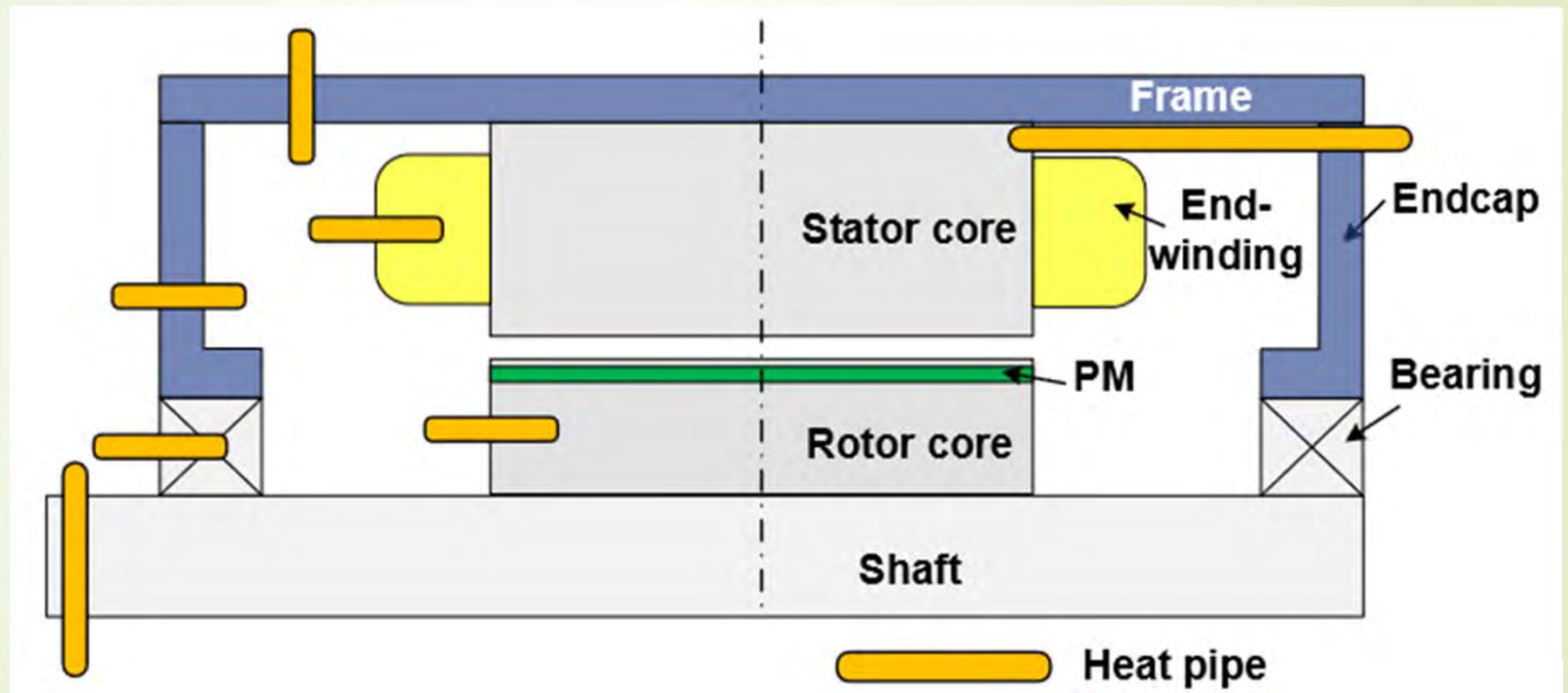
Diagrama schematică a unei pompe de căldură cu capilaritate



32

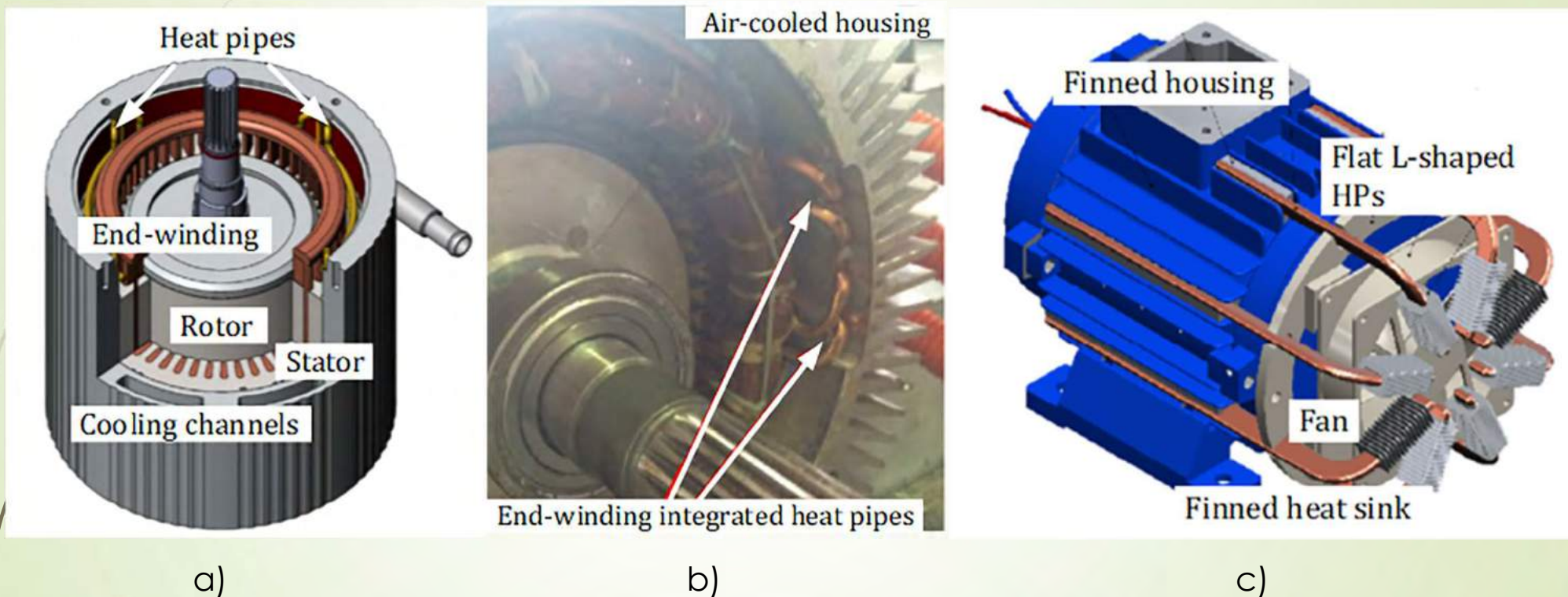
Conductibilitate termică între 3600 și 100000 W/m K față de 400 W/m K pentru Cu

Digrama schematică a dispunerilor posibile ale pompelor de căldură în mașinile electrice [2]



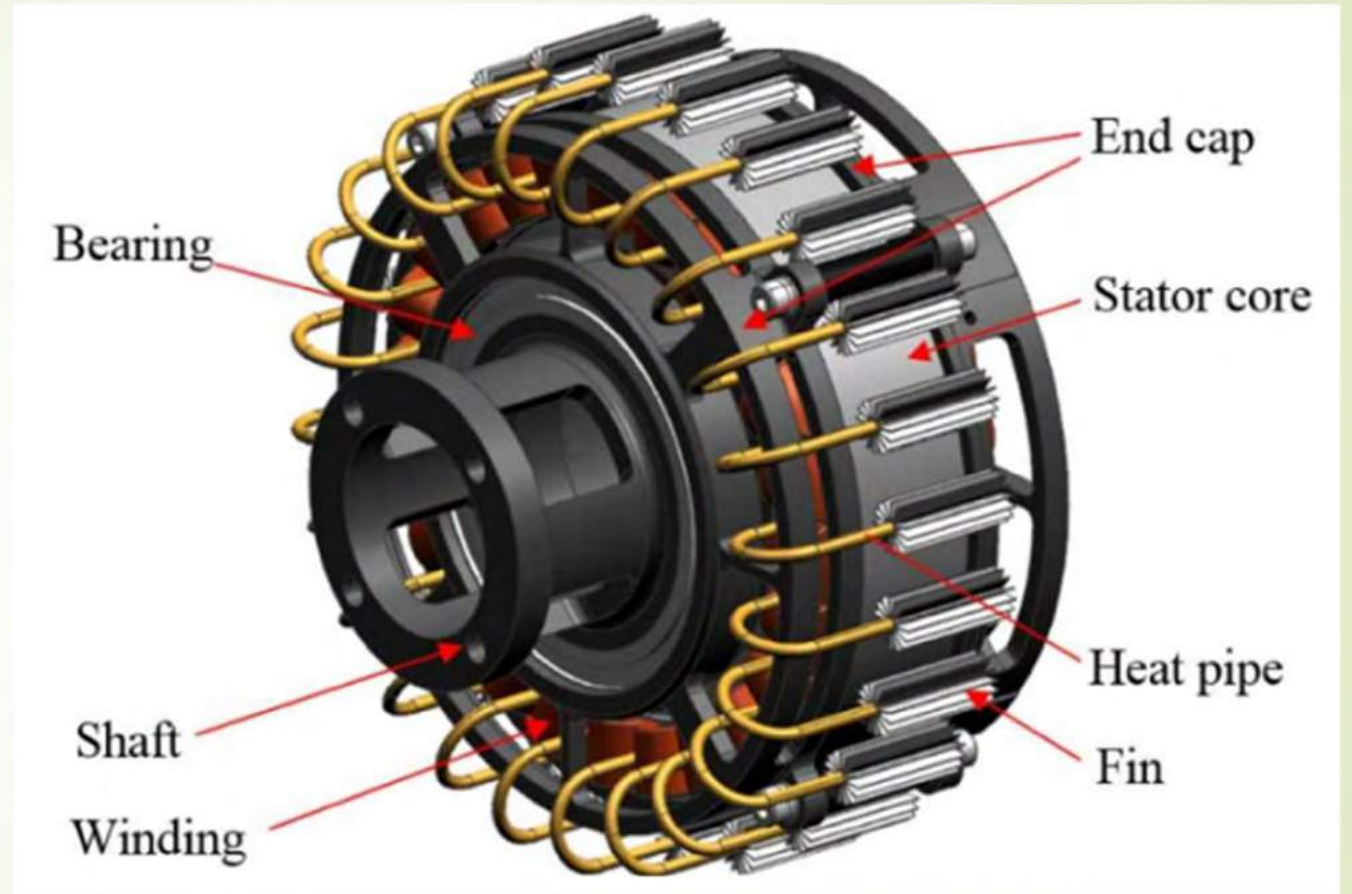
- Introduse în înfășurare, pot reduce temperatura cu 20%. Introduse în capete de bobină, pot reduce temperatura cu 20 grad. C.

Răcirea cu pompe de căldură a mașinilor electrice Exemple [8]

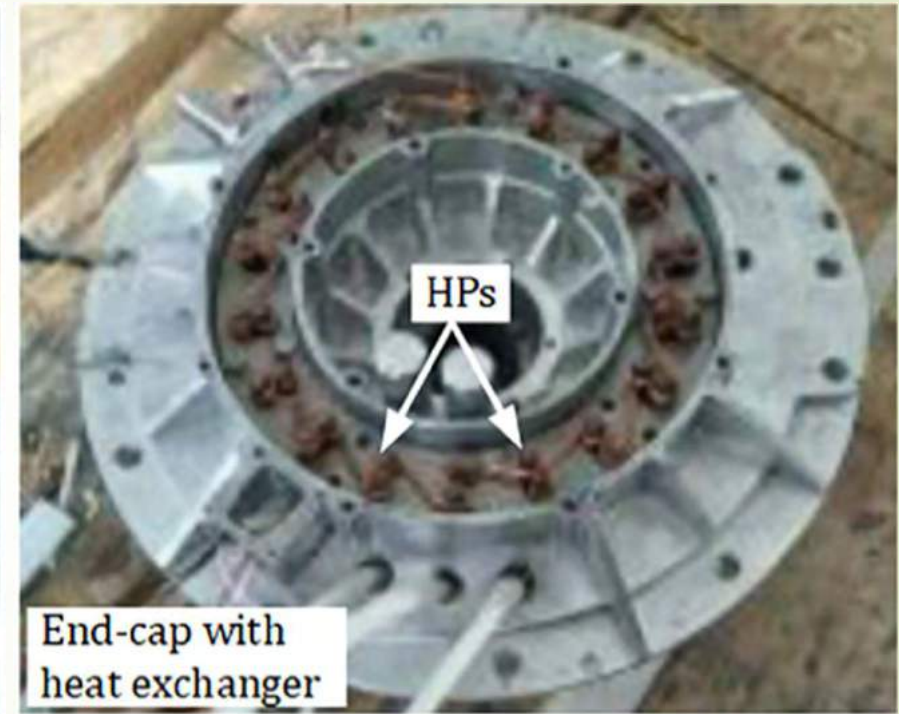
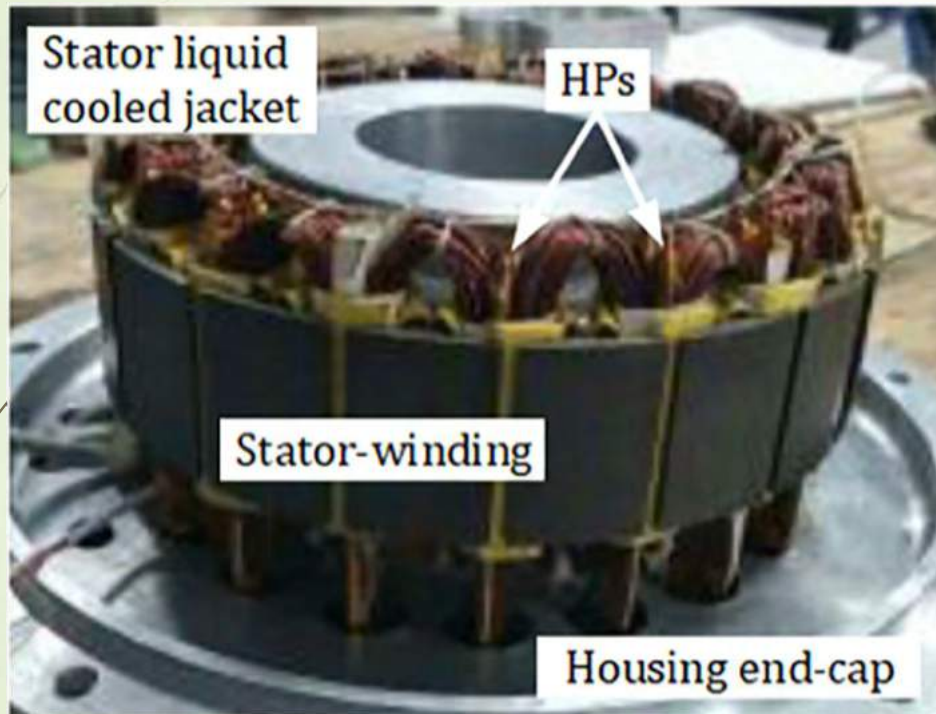


- Răcirea cu pompe de căldură a capetelor de bobină: a) cu lichid, fi 6 mm – City univ of Hong Kong.; b) cu aer, fi 4 mm - South China Univ. of Techn ; c) carcasă cu aripioare cu pompe de căldură în formă de L (10,5 mm x 4 mm x 200 mm) – Unv of Indonezia.

Motor electric
răcit cu
pompe de
căldură în
formă de U
[11]



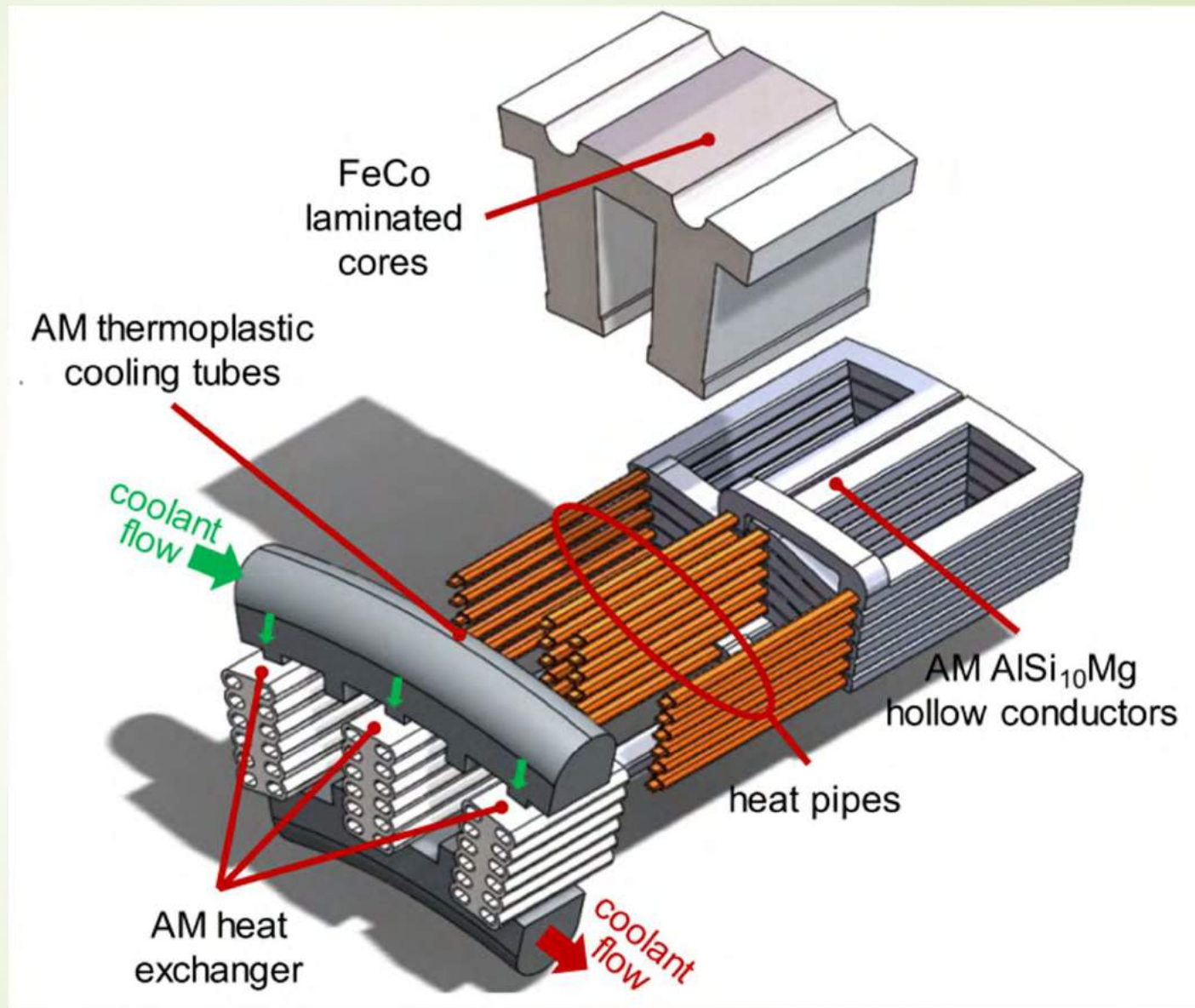
Sistem mixt de răcire pentru un starter-generator de 25 kW, cu rotor exterior, cu magneți permanenți



- Statorul interior are o cămașă de răcire cu lichid iar capetele de bobină sunt răcite cu un schimbător de căldură asociat cu pompe de căldură (Univ. Nanjing, China).

Răcirea cu pompe de căldură a înfășurărilor unui motor de avion [12]

- Înfășurare cu conductori tubulari care încorporează pompe de căldură pentru motor sincron cu MP, de 250 kW (1 min), 83 kW (continuu) 5000 rpm, putere specifică 20 kW/kg.



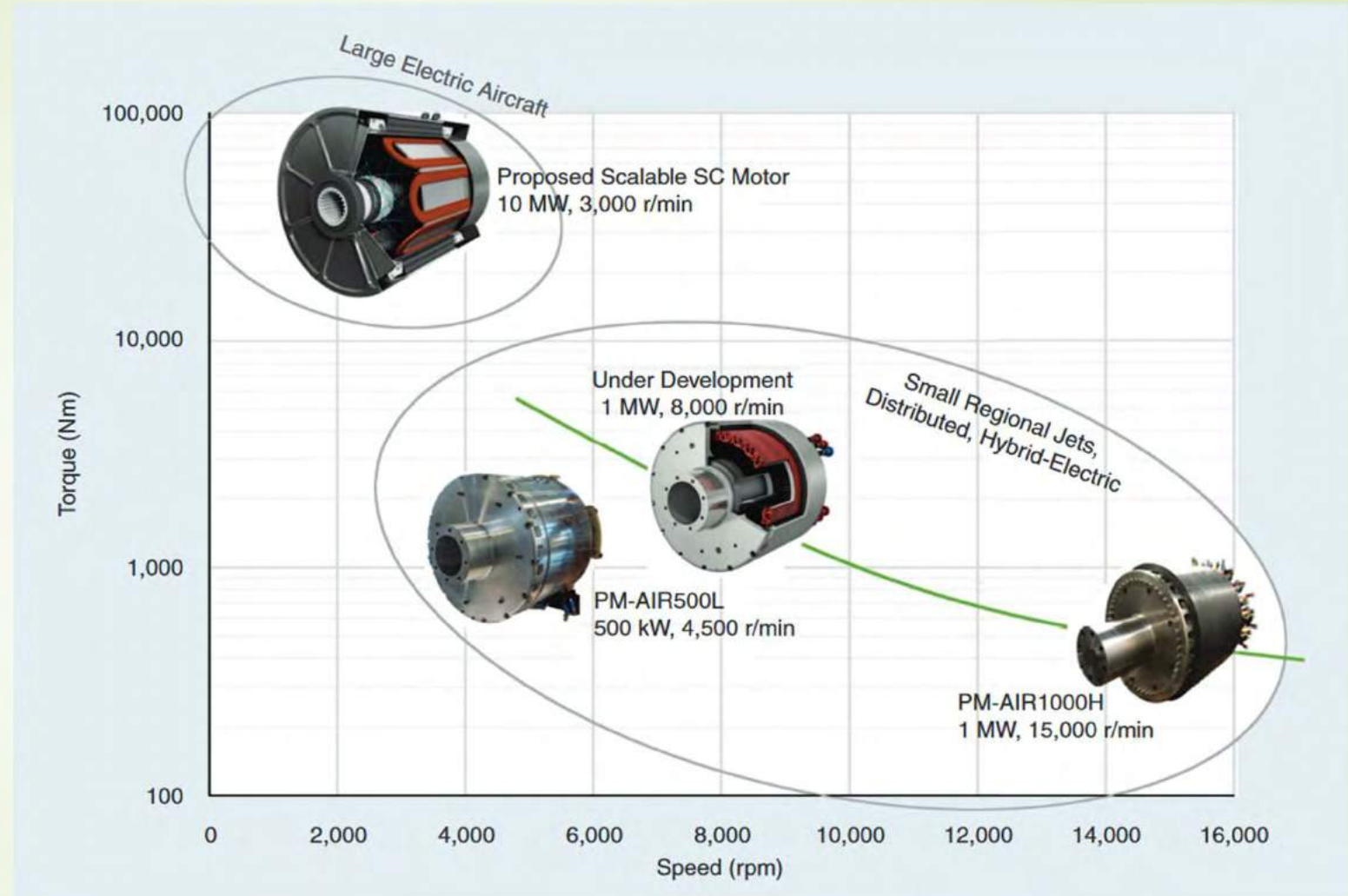
Sisteme de răcire combinată pentru motoarele electrice de tracțiune - Exemple [9]

- 2012 – Tesla Roadster Motor asincron: internă forțată cu aer + carcasă cu aripioare + ventilator exterior
- 2013 – Tesla S60 Motor asicron: răcire cu lichid a carcasei și a arborelui
- 2014 – Porsche Panamera E-hibrid 416: răcire forțată cu lichid a carcasei + răcire forțată cu aer
- Gneral Electric Motor sincron cu magneți permanenți interiori: răcirea cu lichid a carcasei + răcirea cu spray a capetelor de bobină + răcirea forțată a rotorului
- Zytek Motor cu magneți permanenți: răcirea forțată cu lichid a carcasei + răcirea forțată cu ventilator

Motoare electrice sincrone cu MP (FSCW-fractional-slot concentrated winding), pentru aeronave [12]

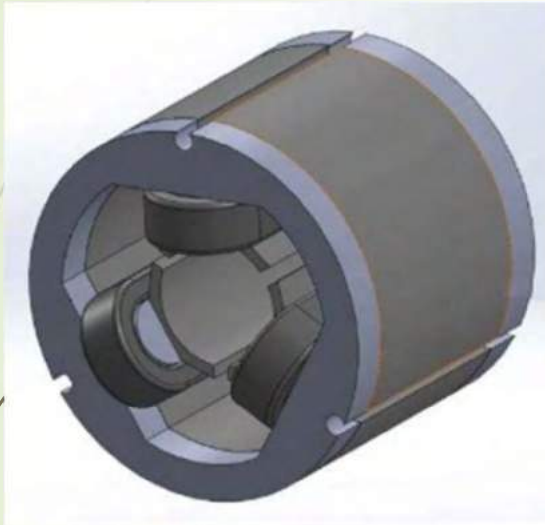
UW-Madison [6]	1MW, 20000 r/min PM machine (23.7 kW/kg, active)	FSCW (18S/12P, SPP = 1/2) inner SPM-rotor with retaining sleeve; Co-Fe core
Siemens SP260D [7]	260 kW, 2500 r/min PM machine (5.2 kW/kg, total)	dual-3-phase winding inner SPM-rotor (Halbach array) lightweight structural parts
Siemens SP2000 [8]	2MW PM machine (~10 kW/kg)	liquid-cooled inner rotor
Marquette Univ. [9]	250kW, 5000 r/min PM machines (18.4~20.1 kW/kg, active)	FSCW (36S/30P, SPP = 2/5) inner SPM-rotor (Halbach array) hollow conductor integrated with integrated cooling

Motoare electrice pentru aeronave [13]

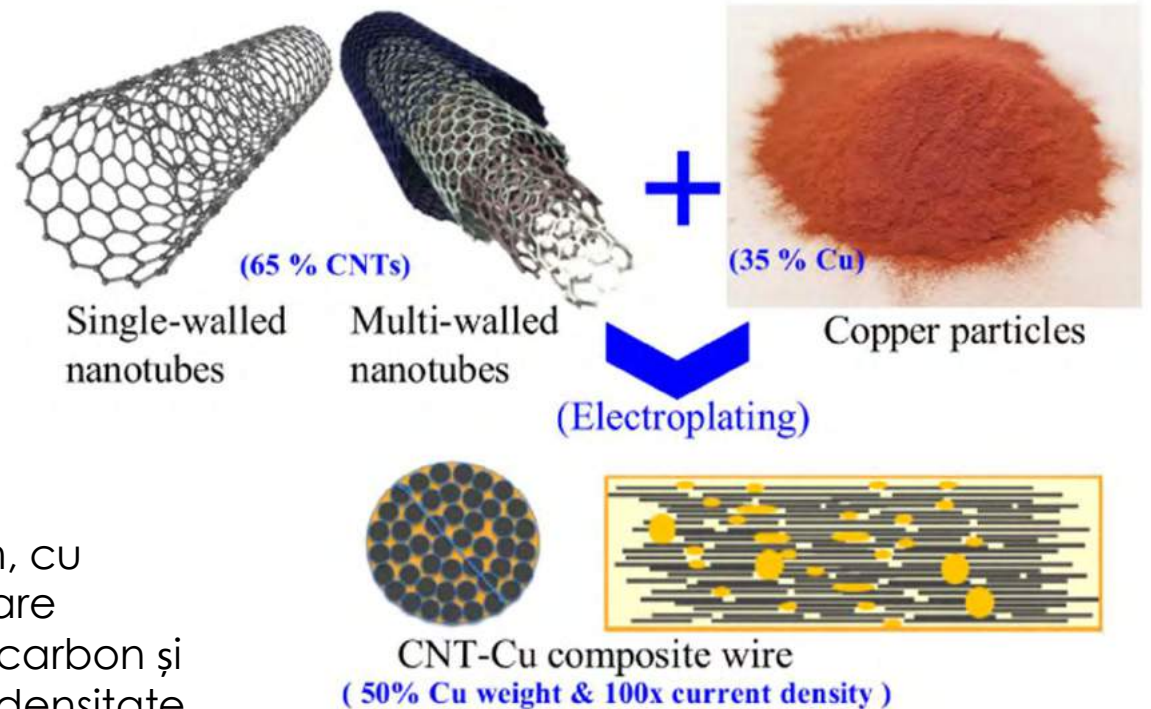


- Compararea performanțelor putere-cuplu ale motoarelor convenționale cu motorul cu înfășurări superconductoare

Mașini electrice cu înfășurări din conductoare speciale, CNT (carbon nano tub) [14]



Motor electric de 40 W, 15000 rpm, cu înfășurări din materiale conductoare nemetalice (CNT - nanotuburi de carbon și grafene (conductivitate ridicată, densitate redusă cu 40% față de Cu, creștere redusă a rezistenței cu temperatura).



Bibliografie

1	R. Wroble, Thermal management of electrical machines for propulsion – challenges and future trends, Archives of Electrical Engineering, vol. 71(1), pag. 175-187, 2022.
2	Z-Q. Zhu și D. Liang, Perspective of Thermal Analysis and Management for Permanent Magnet Machines, with Particular Reference to Hotspot Temperatures, Energies 2022.
3	D. Golovanov ș.a., 4-MW Class High-Power-Density Generator for Future Hybrid-Electric Aircraft, IEEE TRANSACTIONS ON TRANSPORTATION ELECTRIFICATION, VOL. 7, NO. 4, DECEMBER 2021, pag. 2952-2964.
4	W. Sixel ș.a., Ceramic 3D Printed Direct Winding Heat Exchangers for Improving Electric Machine Thermal Management, 978-1-7281-0395-2/19/\$31.00 ©2019 IEEE
5	R. Wrobel, A Comprehensive Review of Additive Manufacturing in Construction of Electrical Machines, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 35, NO. 2, JUNE 2020, pag. 1054-1064.
6	R. Wroble și A. Hussein, Design Consideration of Heat Guides fabricated using Additive Manufacturing for Enhanced Heat Transfer in Electrical Machines, in Energy Conversion Congress and Exposition, Portland (USA), 2018, pp. 6506-6513.
7	M. Ibrahim, F. Bernier și J-M. Lamarre, Novel Multi-layer Design and Additive Manufacturing Fabrication of a High Power Density and Efficiency Interior PM Motor, 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2020, pp. 3601-3606.
8	R. Wrobel și R. Glen, Heat pipes in thermal management of electrical machines – A Review, "Thermal Science and Engineering Progress", Elsevier, 2021.
9	H. Tiismus ș.a., State of the art of additively manufactured electromagnetic materials for topology optimized electrical machines, Additive Manufacturing, Elsevier, 2022
10	J. Pecotich ș.a., Additively Manufactured Electric Machine Conductors with Integrated End Turn Heat Exchangers
11	Zhang, X.; Zhang, C.; Fu, P.; Zhang, C.; Li, L. A Novel Cooling Technique for the Windings of High-Torque-Density Permanent Magnet Machines. In Proceedings of the 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Jeju, Korea, 7–10 October 2018; pp. 332–337.
12	F. Wu, A. M. El -Refaie și A. Al-Qarni, Additively Manufactured Hollow Conductors Integrated With Heat Pipes: Design Tradeoffs and Hardware Demonstration, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 57, NO. 4, JULY/AUGUST 2021
13	S. Siririmana ș.a., Electric Propulsor for Zero-Emission Aircraft, IEEE Electrification Magazine / June 2022.
14	A. Selema, M. N. Ibrahim și P. Sergeant, Electrical Machines Winding Technology: Latest Advancements for Transportation Electrification, Machines 2022, 10, 563. https://doi.org/10.3390/machines10070563