

Pregled razvoja magnetnega hlajenja na fakulteti za strojništvo (UL)

Jaka TUŠEK, Samo ZUPAN, Alen ŠARLAH, Aleksander NOVAK, Urban TOMC, Andrej KITANOVSKI, Ivan PREBIL, Alojz POREDOŠ

Izvleček: Prispevek opisuje pregled razvoja tehnologije magnetnega hlajenja na Fakulteti za strojništvo (UL) v zadnjih šestih letih (2006–2012). Kot uvod v obravnavano tematiko so najprej predstavljene osnove magnetnega hlajenja in pregled stanja na obravnavanem področju. Drugi del prispevka opisuje razvoj rotirajočega prototipa magnetnega hladilnika, razvitega na Fakulteti za strojništvo. Opisani so osnovni principi delovanja, analiza strukture za ustvarjanje magnetnega polja ter nekatere konstrukcijske težave, ki otežujejo učinkovito delovanje. V tretjem delu prispevka je opisana razvita in izdelana eksperimentalna proga za testiranje aktivnih magnetnih regenerativnih (AMR) kot osnovnega elementa magnetnega hladilnika. Ugotovljen je bil izjemen vpliv geometrije AMR-ja na delovanje magnetnega hladilnika. Nadalje je opisana inovativna metoda za izdelavo AMR-ja, ki temelji na tehnologiji laserskega varjenja. V zaključnem delu je predstavljeno nadaljnje delo na tem področju, ki med drugim zajema alternativno rešitev za hitrejši prenos toplote v AMR-ju z uporabo toplotnih diod.

Ključne besede: magnetno hlajenje, magnetokalorični učinek, aktivni magnetni regenerativni, magnetno polje

1 Uvod

Magnetno hlajenje temelji na izkoriščanju magnetokaloričnega učinka, ki se kaže kot segrevanje magnetnega materiala, ko ta pride pod vpliv magnetnega polja, oziroma njegovo ohlajanje, ko se magnetno polje odstrani. Magnetokalorični učinek je v bolj ali manj izraziti obliki lastnost vseh magnetnih materialov. Najbolj je izrazit pri temperaturi fazne spremembe materiala med feromagnetnim in paramagnetnim področjem (Curiejeva temperatura). V zadnjem času se je v literaturi na področju magnetnega hlajenja uveljavil izraz magnetokalorični material, ki se

uporablja za magnetne materiale z izrazitim magnetokaloričnim učinkom.

Magnetokalorični učinek je v splošnem analogen kompresiji in ekspanziji hladiva v dandanes široko uporabljeni parno-kompresorski tehnologiji hlajenja. Cilj razvoja tehnologije magnetnega hlajenja je, da bi ta tehnologija predstavljala alternativo parno-kompresorskemu hladilniku, ki je energetsko precej potraten, okolju neprijazen zaradi uporabe ozonu bolj ali manj škodljivih hladiv ter za mnoge aplikacije akustično neprimeren. Vse te slabosti bi lahko izboljšali oziroma izničili z uporabo magnetnega hlajenja.

Nekaj desetletij po odkritju magnetokaloričnega učinka, ki ga je leta 1881 v železu odkril nemški fizik Warburg [1], so raziskovalci ta učinek prepoznali kot možno aplikacijo za potrebe hlajenja. V dvajsetih in tridesetih letih prejšnjega stoletja sta Debye [2] in Giauque [3] nakazala možnost izkoriščanja magnetoka-

loričnega učinka za hlajenje pri zelo nizkih temperaturah (tudi v bližini 0 K). V kasnejših letih je bilo opravljenih veliko raziskav na področju magnetnega hlajenja oziroma izkoriščanja magnetokaloričnega učinka, ki pa so se praviloma nanašale na nizke temperature (kriotehnika).

Za začetek razvoja magnetnega hlajenja pri temperaturi okolice velja izdelava prvega prototipa magnetnega hladilnika za hlajenje pri temperaturi okolice, ki ga je leta 1976 predstavil Brown [4]. Pri tem je kot magnetokalorični material oziroma hladivo uporabil gadolinij, kot vir magnetnega polja pa superprevodni magnet. Za povečanje temperaturnega razpona Brownov hladilnik vsebuje še regenerativni proces oziroma regeneracijo toplote. Magnetokalorični učinek materialov s fazno spremembo v bližini temperature okolice je namreč relativno majhen, zato ga ni možno direktno aplicirati v hladilni sistem. Leta 1982 sta Barclay in Steyert [5] predstavila uporabo aktivnega magnetnega regenerativnega

Dr. Jaka Tušek, univ. dipl. inž., dr. Samo Zupan, univ. dipl. inž., dr. Alen Šarlah, univ. dipl. inž., Aleksander Novak, dipl. inž., Urban Tomc, univ. dipl. inž., doc. dr. Andrej Kitanovski, univ. dipl. inž., prof. dr. Ivan Prebil, univ. dipl. inž., prof. dr. Alojz Poredoš, univ. dipl. inž.; vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

ja (AMR), ki deluje kot regeneratorska naprava, pri čemer je magnetokalorični material hkrati v funkciji regenerativnega materiala. AMR je torej v magnetnem hladilniku tako v vlogi regeneratorske kot v vlogi hladilne. Princip AMR-ja se je v kasnejših letih izkazal za najučinkovitejši način izkoriščanja magnetokaloričnega učinka pri temperaturi okolice.

Da bi tehnologija magnetnega hlajenja lahko postala alternativa klasični kompresorski tehnologiji hlajenja, dokazuje 41 izdelanih laboratorijskih prototipnih magnetnih hladilnikov [6]. Prototipi dosegajo hladilne moči do 800 W in temperaturne razpone do 30 K, odvisno od gostote magnetnega polja ter količine in oblike uporabljenega magnetokaloričnega materiala oziroma AMR-ja. Večina novejših prototipov, izdelanih v zadnjih 10 letih, temelji na principu AMR-ja in za ustvarjanje magnetnega polja uporablja permanentne magnetne, ki so z energetskega stališča veliko ustrežnejši kot elektromagnetne naprave.

1.1 Princip delovanja magnetnega hladilnika

Za lažje razumevanje delovanja magnetnega hladilnika na principu AMR-ja je na *sliki 1* prikazano shema njegovega delovanja. AMR je porozna struktura iz magnetoka-

loričnega materiala in predstavlja »srce« magnetne hladilne naprave. Poleg AMR-ja magnetni hladilnik vsebuje še vir magnetnega polja, ki ga lahko ustvarjajo permanentni magneti ali elektromagneti oziroma superprevodni magneti, dva zunanja prenosnika toplote ter tekočino za prenos toplote, ki prenaša toploto iz magnetokaloričnega materiala v AMR-ju preko zunanjih prenosnikov toplote na okolico. V splošnem poteka krožni proces z AMR-jem v naslednjih štirih fazah:

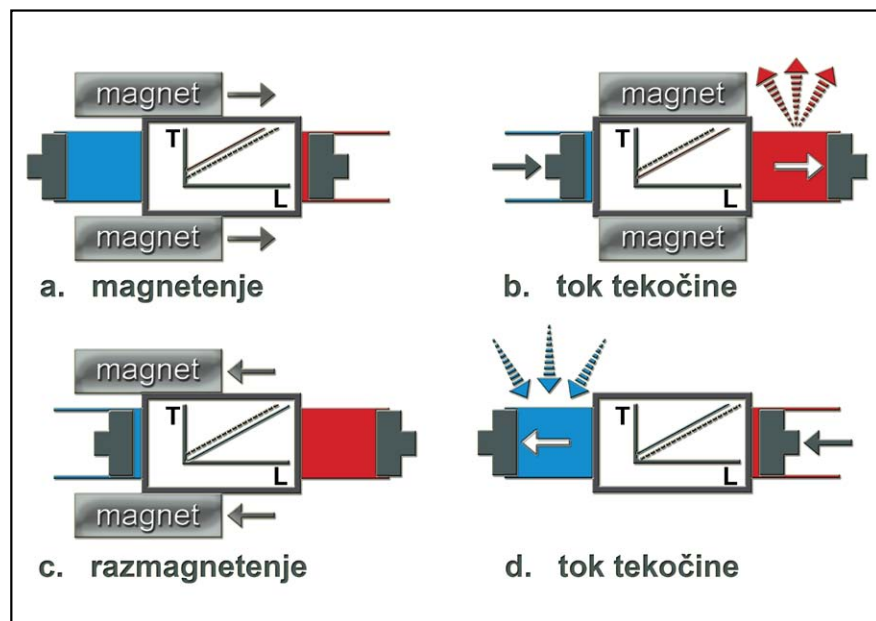
- Magnetenje*, pri čemer se magnetokalorični material zaradi magnetokaloričnega učinka v AMR-ju segreje; dosežemo ga s premikom AMR-ja v magnetno polje oziroma z vključitvijo magnetnega polja.
- Tok tekočine iz hladnega prenosnika toplote (HPT) v tople prenosnik toplote (TPT)* ob konstantnem (visokem) magnetnem polju preko (oz. skozi) segretega AMR-ja. Tekočina za prenos toplote se pri tem segreje (magnetokalorični material v AMR-ju pa ohladi) in vstopa v TPT s temperaturo, ki je nekoliko višja od temperature okolice, pri čemer se toplota odda v okolico.
- Razmagnetenje*, pri čemer se magnetokalorični material zaradi magnetokaloričnega učinka v AMR-ju ohladi; AMR prema-

knemo izven magnetnega polja oziroma magnetno polje izključimo.

- Tok tekočine iz TPT v HPT* (proti točno glede na fazo B) ob konstantnem (nizkem) magnetnem polju preko ohlajenega AMR-ja. Tekočina za prenos toplote se pri tem ohladi (magnetokalorični material v AMR-ju pa segreje) in vstopa v HPT s temperaturo, ki je nekoliko nižja od temperature hlajenega prostora, ter s tem iz njega absorbira toploto.

1.2 Magnetokalorični materiali

V preteklih letih se je kot referenčni oziroma prototipni magnetokalorični material uveljavil gadolinij (Gd), na osnovi katerega je bila opravljena tudi večina eksperimentalnih in teoretičnih analiz. Bistven napredek pri razvoju magnetokaloričnih materialov s fazno spremembo pri temperaturi okolice je bil narejen leta 1997, ko sta Pecharsky in Gschneidner [7] predstavila odkritje tako imenovanega velikega magnetokaloričnega učinka (angl. giant magnetocaloric effect) v zlitini $Gd_5Si_2Ge_2$. Velik magnetokalorični učinek je posledica fazne spremembe prvega reda v materialu in je lahko tudi do 50 % večji od magnetokaloričnega učinka materialov s fazno spremembo drugega reda (npr. gadolinij). Raziskovanje magnetokaloričnih materialov s fazno spremembo prvega reda se je s tem zelo razširilo na številne inštitute in univerze po svetu. Tako je bilo v zadnjih desetih letih odkritih več materialov z velikim magnetokaloričnim učinkom. Med njimi sta za potrebe magnetnega hlajenja pri temperaturi okolice trenutno najbolj zanimivi zlitine na osnovi La-Fe-Si (npr. La-Fe-Co-Si, La-Fe-Si-H in La-Fe-Mn-Si) in Mn-Fe (npr. Mn-Fe-P-Si in Mn-Fe-As), trenutno pa še ni mogoče potrditi, kateri od materialov se bo uveljavil kot najprimernejši. Veliko je namreč odvisno tudi od končne tržne cene in mehanskih ter fizikalnih lastnosti, ki omejujejo tehnološke možnosti predelave teh materialov.



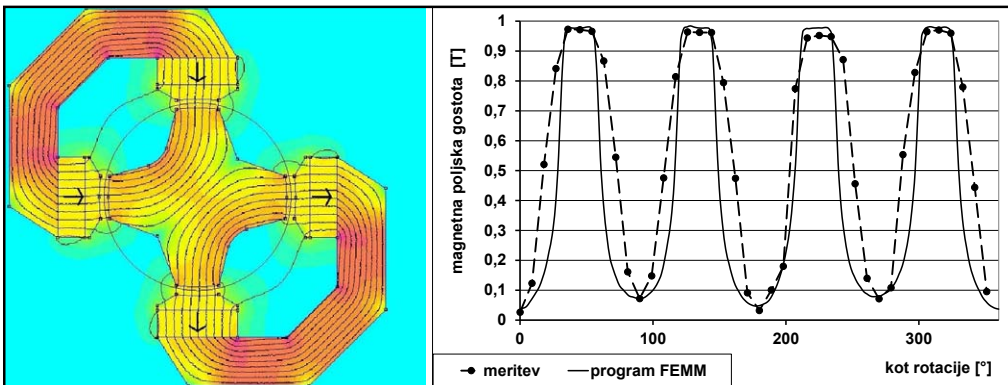
Slika 1. Shematski prikaz delovanja magnetnega hladilnika na osnovi AMR-ja

■ 2 Prototip rotirajočega magnetnega hladilnika

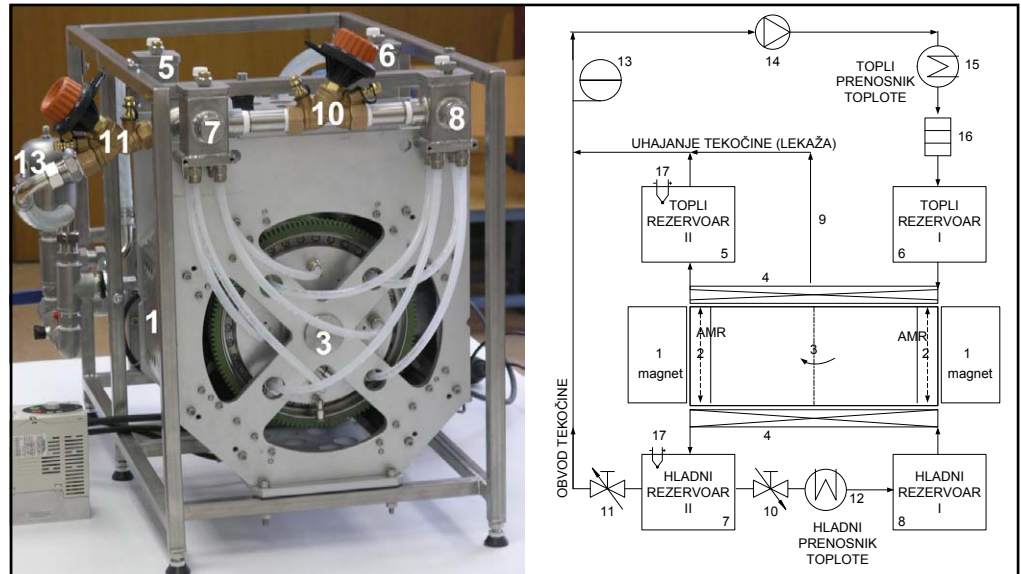
V želji po razvoju prototipa magnetnega hladilnika, ki bi lahko bil konkurenčen kompresorskim hladilnim napravam, smo v Laboratoriju za hlajenje in daljinsko energetiko (LAHDE) v sodelovanju s Centrom za modeliranje elementov in konstrukcij (CEMEK) izdelali prototip rotirajočega magnetnega hladilnika [8, 9]. Ta je bil v času funkcionalnega zagona eden izmed prvih 8 rotirajočih prototipov na svetu.

2.1 Zasnova in princip delovanja prototipa

Razviti magnetni hladilnik temelji na rotirajočem gibanju AMR-jev (34 AMR-jev, nameščenih v rotirajočem bobnu) v magnetnem polju, ki ga ustvarja struktura iz permanentnih magnetov Nd-Fe-B. Kot je prikazano na *sliki 2*, štiri permanentni magneti s fokusnimi elementi zunaj in znotraj rotirajočega bobna s pomočjo povezovalnih elementov iz mehkega feromagnetnega materiala v štirih zračnih režah zagotavljajo močno in homogeno magnetno polje. Med štirimi takšnimi področji so na obsegu bobna še štiri nekoliko širša območja razmagnetjenja z zelo šibkim magnetnim poljem. Struktura za ustvarjanje magnetnega polja, simulirana oziroma preračunana v



Slika 2. Analiza porazdelitve magnetne poljske gostote v strukturi iz štirih permanentnih magnetov (smer magnetenja je označena s puščicami) v rotirajočem magnetnem hladilniku



Slika 3. Slika (levo) in shema (desno) magnetnega hladilnika

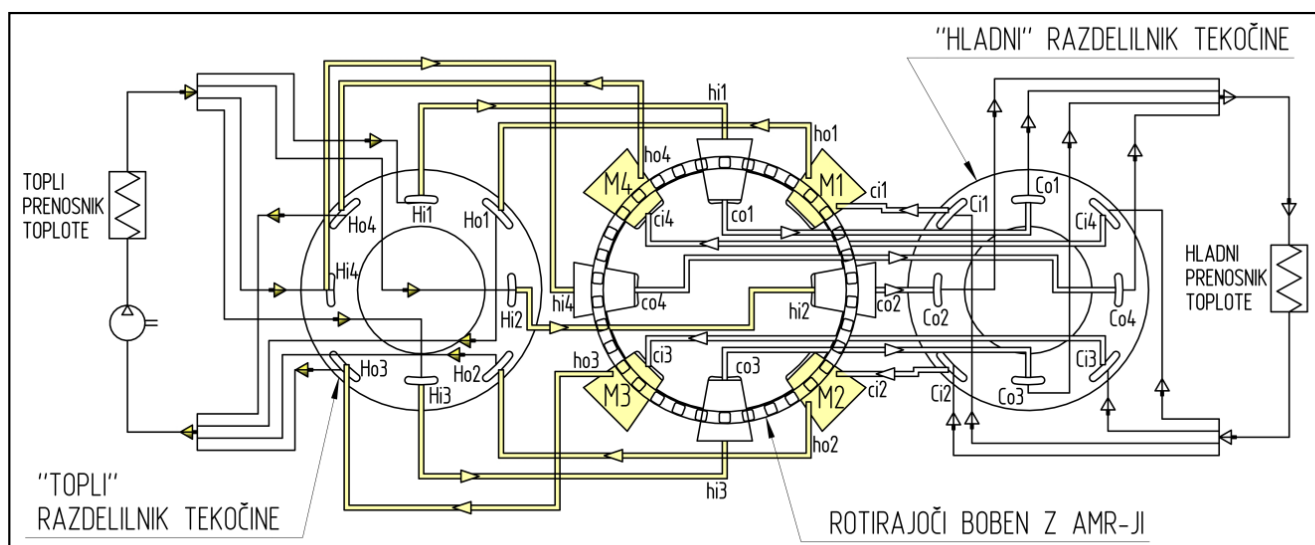
programu FEMM, je prikazana na *sliki 2 (levo)*, medtem ko je na *sliki 2 (desno)* prikazana primerjava med izračunano gostoto magnetnega polja ter njenimi izmerjenimi vrednostmi z uporabo triosne Hallove sonde [10].

Slika in shema celotnega sistema magnetnega hladilnika sta prikazani na *sliki 3* in *4*. Osnovni princip delovanja magnetnega hladilnika je sledeč: Tekočina (npr. voda) se pretaka iz toplega rezervoarja 1 (poz. 6) preko ohlajenih AMR-jev, ki se v danem trenutku nahajajo v območjih razmagnetjenja, v hladni rezervoar 2 (poz. 7). Od tu se tekočina preko hladnega prenosnika toplote (kjer tekočina absorbira toploto iz okolice) pretaka v hladni rezervoar 1 (poz. 8) ter nadalje preko segretyh AMR-jev, ki se v danem trenutku nahajajo v območju magnetenja, v topli rezervoar 2 (poz. 5). Od tu dalje

se tok tekočine nadaljuje preko ekspanzijske posode (poz. 13) in obtočne črpalke (poz. 14) v topli prenosnik toplote (kjer tekočina odda toploto v okolico). Nato se tekočina preko filtra (poz. 16) vrne v topli rezervoar 1, s čimer se tokokrog zaključí. Smer toka tekočine preko AMR-jev uravnavamo z rotirajočim razdelilnikom (poz. 4), ki z relativnim gibanjem dveh plošč usmerja tekočino protitočno v pravilne prekate oziroma v pravilno postavljene AMR-je glede na njihov trenutni položaj v magnetni strukturi.

Pogon bobna z AMR-ji je izveden z zobniškim prenosom. Pastorek je montiran neposredno na izstopno gred asinhronskega EM, zobati venec pa je izdelan na obodu čelne plošče bobna (PA6 z mineralnim oljem).

Za zagotavljanje protitočnega delovanja AMR-jev oziroma za krmljenje toka tekočine je na vsaki strani bobna potreben razdelilnik tekočine oziroma ventil (*slika 4*). Pri oblikovanju razdelilnikov je bil eden od ciljev čim manjša širina celotnega sistema oz. čim krajši kanali za tekočino. Razdelilnik je zato izdelan v obliki aksialnega drsnega ležaja, kjer je pritiska sila kontrolirana s kompletom tlačnih vzmeti. Kot drsni par sta bila najprej uporabljena



Slika 4. Pretočna shema s toplim (levo) in hladnim (desno) razdelilnikom tekočine ter rotirajočim bobnom z AMR-ji (sredina)

nerjavno jeklo in plošča iz poliamida, kar pa se, zaradi prevelikega uhajanja tekočine (lekaža), ni izkazalo kot dobra rešitev. Kasneje smo poliamid zamenjali z oblogo PTFE, nalepljeno in obdelano na osnovni plošči iz Al-zlitine. Tesnjenje med vrtečimi se in mirujočimi deli smo izvedli s standardnimi radialnimi grednimi tesnili, tesnjenje v sestavi bobna (čelni plošči-bobnen z AMR-ji) pa z lasersko izrezanimi ploščatimi tesnili, ki sta stisnjeni z vijačno zvezo.

2.2 Obratovalne in konstrukcijske težave ter nadaljnji razvoj

Po opravljeni montaži in nekaj korekcijah je izvedba delovala v okviru pričakovanj, pokazalo pa se je tudi nekaj pomanjkljivosti. Vsako generiranje toplote zaradi trenja v razdelilniku tekočine ter tesnilih povzroča težave, kar smo delno tudi pričakovali. Pri tem je precej težav izviralo tudi iz tehnologije obdelave.

Oblikovna in dimenzijska stabilnost in točnost delov, izdelanih iz poliamida, sta močno odvisni od temperature in absorpcije vlage. Največja možna dosežena točnost pri odrezavanju je zato zaradi generiranja toplote močno omejena že pri izdelavi. Med samim delovanjem pa se predvsem zaradi prisotnosti tekočine (vlaga) in lokalnega generiranja toplote (trenje) stanje še poslabšuje. Ključni deli bi zato morali biti izdelani iz časovno in temperaturno stabilnih ter toplotno slabo prevodnih materialov (keramika).

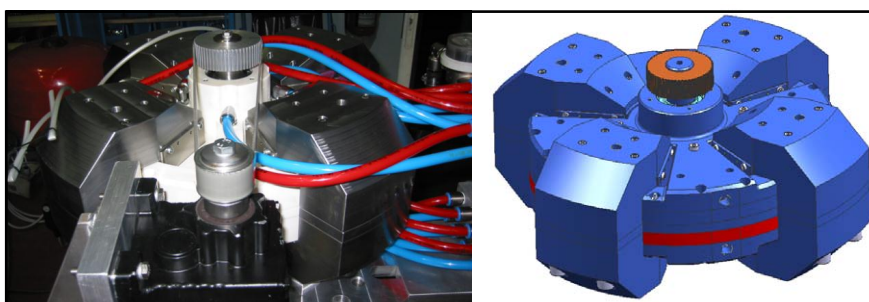
Uporaba standardnih grednih tesnil je sicer za izdelavo prototipa cenovno ugodna, vendar funkcionalno ne najbolj primerna. Zunanje tesnilo je zaradi velikosti preveč robustno in povzroča prevelik vrtilni upor kljub prilagajanju toleranc. Podobno velja tudi za razdelilnik tekočine (velik premer in površina). To je bilo sicer pri določanju moči pogona predvideno, vendar se žal zaradi trenja v tesnilih in v drsnih razdelilnikih generira precej toplote, ki kvira učinek

hladilnika. Pri zmanjševanju trenja (manjše pritiskne sile) pa se pojavlja večji delež uhajanja tekočine (lekaža), ki se sicer vrača nazaj v sistem, vendar prav tako poslabšuje učinek. Izkazalo se je, da je z izbranimi materiali in tehnologijami obdelave težko doseči ustrezno oblikovno točnost (ploskost) dotičnih površin drsnega razdelilnika, pri kateri bi ta lahko deloval z ustrezno majhno pritiskno silo in minimalno lekažo.

S prvimi opravljenimi meritvami smo dokazali princip delovanja in pri tem ustvarili določen temperaturni razpon med toplo in hladno stranjo magnetnega hladilnika. Boljši rezultati pa so bili zaradi zgoraj omenjenih težav do tega trenutka onemogočeni. Nekatere slabosti in prednosti razvitega prototipa so bile upoštevane pri zasnovi drugega rotirajočega prototipa (slika 5), ki je trenutno še v fazi razvoja in je plod sodelovanja laboratorijev LAHDE in CEMEK ter slovenske industrije.

3 Eksperimentalna naprava za testiranje aktivnih magnetnih regeneratorjev

Ključni in osrednji element celotnega sistema magnetnega hladilnika predstavlja AMR, zato je njegovo optimiranje pri razvoju magnetnega hladilnika bistvenega pomena. V želji po podrobnejši analizi delovanja AMR-ja sta bila v laboratoriju



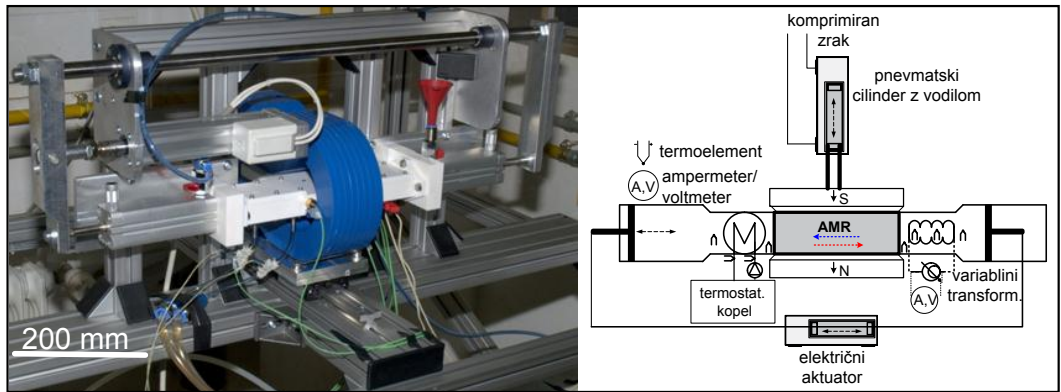
Slika 5. Fotografija (levo) in model (desno) rotirajočega prototipa magnetnega hladilnika druge generacije

LAHDE razvita dva numerična modela za simuliranje in optimiranje AMR-ja [11, 12, 13]. Poleg tega je bila v želji po optimiranju geometrije in obratovalnih pogojev AMR-ja v sodelovanju s Centrom za modeliranje elementov in konstrukcij (CEMEK) ter slovensko industrijo razvita eksperimentalna naprava za testiranje AMR-jev, ki je prikazana na *sliki 7* [14].

3.1 Zasnova in princip delovanja eksperimentalne naprave

Eksperimentalna naprava je sestavljena iz premične strukture za ustvarjanje magnetnega polja iz permanentnih magnetov Nd-Fe-B (*slika 6*), iz statičnega AMR-ja in iz sistema za protitočno prečrpavanje tekočine. AMR je nameščen v osrednji del naprave, poleg njega pa se v osrednjem delu nahaja še prenosnik toplote, ki na topli strani AMR-ja zagotavlja temperaturo okolice (oziroma želeno konstantno temperaturo), ter električni grelnik, ki preko regulirane električne moči deluje kot simulator hladilne moči.

Delovanje eksperimentalne naprave temelji na recipročnem gibanju magnetne strukture, ki s tem zagotavlja magnetenje in razmagnetenje magnetokaloričnega materiala v AMR-ju. Gibanje magnetne strukture omogoča pnevmatski cilindar.



Slika 7. Slika (levo) in shema (desno) eksperimentalne naprave za testiranje AMR-jev

Protitočni pretok tekočine skozi AMR preko dveh batov v predelanih pnevmatskih valjih zagotavlja električni aktuator z nastavljivo hitrostjo in dolžino hoda. Eksperimentalna proga izvaja štiri osnovne faze krožnega procesa AMR-ja: magnetenje – tok tekočine – razmagnetenje – tok tekočine (protitočno). Naprava uspešno deluje že od sredine leta 2010, na njej se praktično vsak dan izvajajo različne meritve in je do danes opravila že skoraj 10 milijonov krožnih procesov.

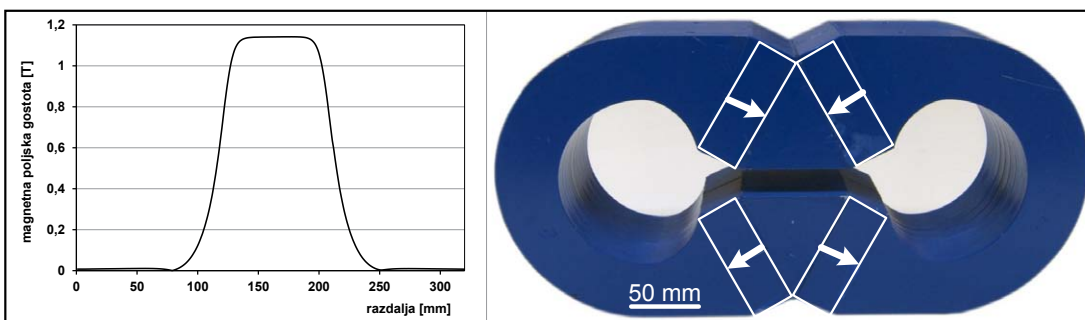
V primerjavi z rotirajočim magnetnim hladilnikom je delovanje predstavljene eksperimentalne naprave počasnejše (manjša obratovalna frekvenca oziroma manjše število opravljenih krožnih procesov v enoti časa) in – zaradi recipročnega gibanja magnetne strukture – manj učinkovito. Velika prednost takšne naprave pa je v manjših izgubah, ki so povezane z zagotavljanjem protitočnega delovanja AMR-ja, saj pri tem ne potrebujemo več razdelilnika toka tekočine, ter v enostavni in hitri menjavi obratovalnih pogojev, kar je za izvajanje večjega števila meritev bistvenega pomena.

3.2 Opis eksperimentalne analize AMR-jev

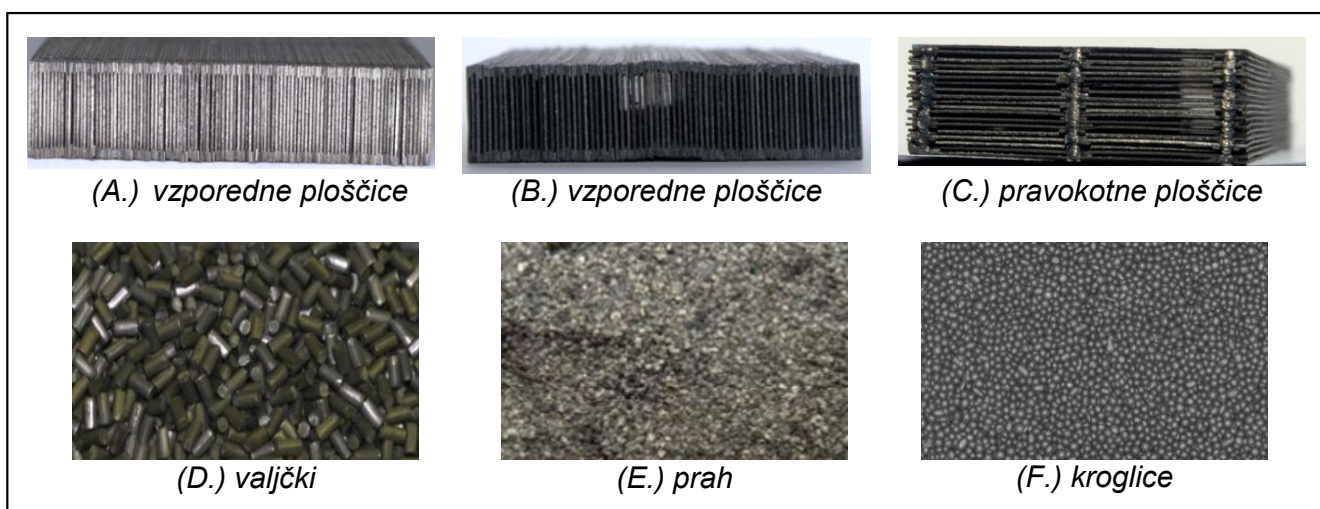
Na predstavljeni eksperimentalni napravi je bila opravljena obsežna analiza šestih različnih oblik AMR-ja z gadolinijem kot magnetokaloričnim materialom (*slika 8*). Analizo AMR-jev smo zasnovali na štirih osnovnih oblikah gadolinija, in sicer: ravne ploščice, kroglice, prah in valjčki. V splošnem lahko analizirane geometrije AMR-jev razdelimo v dve skupini, to so urejene strukture oziroma ravne ploščice (A, B in C) ter nasute strukture (D, E in F). V sklopu urejenih struktur smo analizirali tri različne AMR-je iz ravnih ploščic vzporedno z magnetnim poljem in enega, ki ima ploščice postavljene pravokotno nanj. Ploščice so v vseh treh primerih debele 0,25 mm, pri tem pa ima AMR (A) razmik med ploščicami 0,1 mm, AMR (B) in (C) pa 0,25 mm. Valjčki imajo dolžino 4 mm in premer 2,5 mm, medtem ko imajo prah in kroglice največjo dimenzijo oziroma premer med 0,35 in 0,5 mm. Predmet analize je bil vpliv obratovalne frekvenca

in masnega pretoka tekočine na dosežen temperaturni razpon in hladilno moč posameznega AMR-ja.

Najboljše hladilne karakteristike (temperaturni razpon in hladilna moč) so bile izmerjene z AMR-jem (A), ki ima



Slika 6. Fotografija strukture iz štirih permanentnih magnetov (smer magnetenja je označena s puščicami), uporabljene v eksperimentalni napravi (levo), in rezultati meritve magnetne poljske gostote s triosno Hallovo sondo (desno)



Slika 8. Fotografije analiziranih AMR-jev iz gadolinija

najboljše lastnosti prenosa toplote (velika površina za prenos toplote in majhen hidravlični premer). Sledita AMR (B) in (C). Med nasutimi strukturami se je za najboljšega izkazal AMR (F), ki je v splošnem primerljiv z AMR-jem (B). Precej slabše hladilne karakteristike so bile izmerjene s prahom in valjčki, saj imajo za razliko od kroglic več kot eno prostorsko stopnjo. To pomeni, da se lahko takšni delčki znotraj AMR-ja poljubno orientirajo, kar poslabša homogenost porazdelitve materiala ter enakomernost pretoka tekočine in posledično učinkovitost regeneracije toplote. *Slika 9* prikazuje vzpostavitev temperaturnega razpona med toplo in hladno stranjo AMR-

-ja (A), pri čemer smo dosegli 20 K temperaturnega razpona. To je glede na dostopno literaturo v svetovnem merilu največji do sedaj izmerjen temperaturni razpon AMR-ja iz ploščic, pri čemer magnetno polje ustvarjajo permanentnimi magneti.

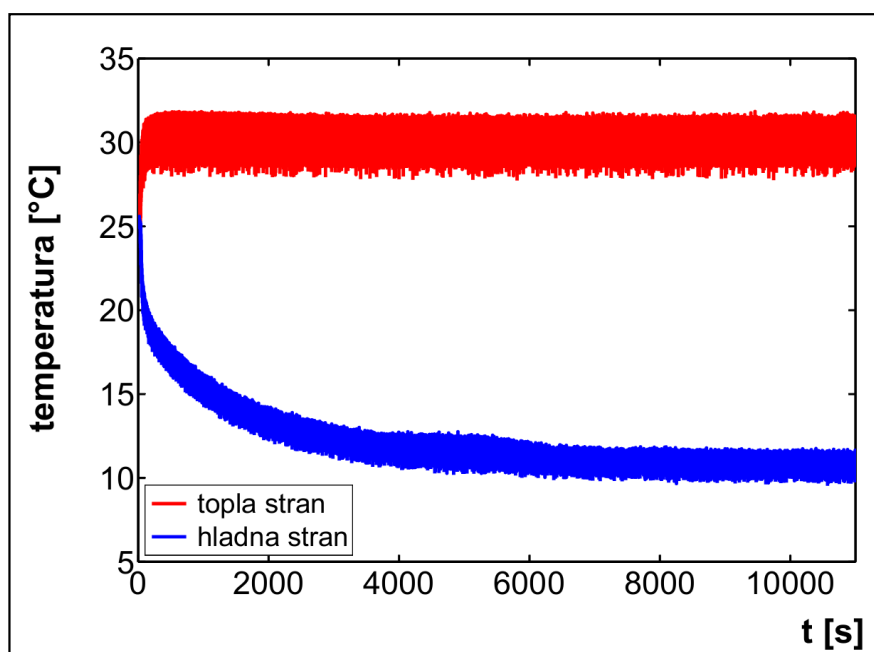
3.3 Inovativna metoda postopka izdelave AMR-ja

V želji po izdelavi AMR-ja s čim boljšimi lastnostmi prenosa toplote (čim tanjše magnetokalorične ploščice in čim manjši razmik med njimi) smo urejene AMR-je, predstavljene na *sliki 8*, izdelali s postopkom laserskega varjenja [15].

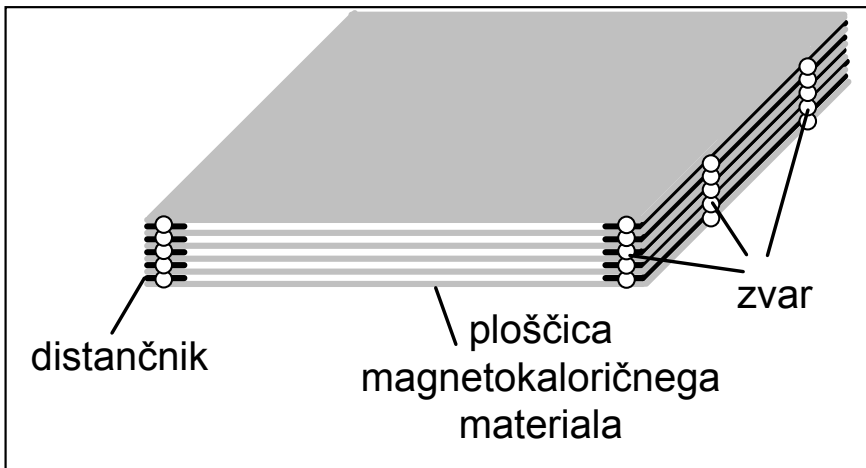
Shema AMR-ja, izdelanega po tem postopku, je prikazana na *sliki 10*. Postopek izdelave je sledeč. Na ploščico iz magnetokaloričnega materiala se na njen rob lasersko privari distančnik iz poljubnega, z magnetokaloričnim materialom varivega materiala. Distančnik naj bo čim tanjši, saj zmanjšuje površino za prenos toplote med magnetokaloričnim materialom in tekočino, ki se pretaka preko AMR-ja. Debelina distančnika, ki definira razmik med ploščicami magnetokaloričnega materiala, pa naj bo s stališča prenosa toplote čim manjša. V naslednjem koraku na distančnik, privarjen na ploščico magnetokaloričnega materiala, privarimo naslednjo ploščico magnetokaloričnega materiala, na katero ponovno privarimo distančnik. Ta postopek ponavljamo, dokler ne dosežemo želene višine AMR-ja. Takšen način izdelave AMR-ja se je glede na meritve, opravljene v eksperimentalni napravi, izkazal za najprimernejšega, saj lahko s tem zagotovimo poljubno majhno debelino distančnika ter popolnoma enake razmike med ploščicami, kar je za delovanje AMR-ja in posledično magnetnega hladilnika izjemnega pomena.

4 Aktivni magnetni regenerator z uporabo toplotnih diod

V zadnjem letu v laboratoriju LAHDE potekajo intenzivne raziskave alternativne rešitve AMR-ja z uporabo



Slika 9. Prikaz ustvarjenega temperaturnega razpona med toplo in hladno stranjo AMR-ja za primer AMR-ja (A)



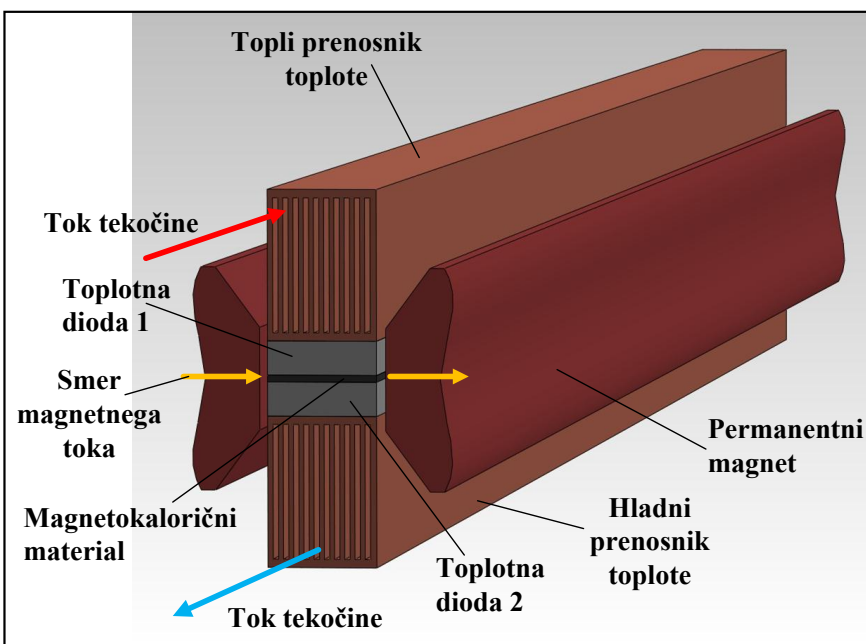
Slika 10. Shema lasersko zavarjenega AMR-ja

toplotnih diod. Glavna slabost do sedaj poznane AMR-ja je predvsem nizka frekvenca obratovanja (število termodinamičnih ciklov na enoto časa), ki je med drugim posledica slabih preoblikovalnih lastnosti večine magnetokaloričnih materialov ter relativno nizke toplotne prestopnosti med magnetokaloričnim materialom in delovno tekočino. Ena od alternativ oziroma rešitev omenjenega problema je uporaba toplotnih diod kot dela AMR-ja. Kot nakazujejo začetni teoretični rezultati, bi lahko s tem drastično zvišali hitrost prenosa toplote iz magnetokaloričnega materiala oz. vanj ter s tem frekvenco obratovanja celotne naprave in posledično hladilno moč. Poleg tega je prednost takšnega koncepta tudi v enostav-

nosti izvedbe, saj ne potrebujemo več protitočnega pretoka tekočine preko AMR-ja ter s tem povezanih razdelilnikov toka tekočine. Funkcijo protitočnega delovanja namreč prevzame toplotni diodi, zato se tekočina v prenosnikih toplote lahko pretaka kontinuirano [16, 17].

Toplotna dioda je fizikalni pojav, mehanizem ali naprava, s katero je moč manipulirati smer in intenziteto toplotnega toka. Toplotne diode izhajajo iz različnih fizikalnih področij, kot na primer fizika trdne snovi, magneto-hidrodinamika in elektro-hidrodinamika. Tipičen primer toplotne diode je na primer Peltierov element.

Slika 11 prikazuje shemo AMR-ja z uporabo toplotnih diod. Način de-



Slika 11. Koncept aktivnega magnetnega regeneriratorja z uporabo toplotnih diod

lovanja je v splošnem podoben delovanju klasičnega AMR-ja. Po fazi magnetenja magnetokaloričnega materiala se vklopi toplotna dioda 1 (pri tem deluje toplotna dioda 2 kot toplotni izolator) in prične pospešeno črpati toploto iz magnetokaloričnega materiala na toplo delovno tekočino. Po fazi razmagnetanja magnetokaloričnega materiala se vklopi toplotna dioda 2 (pri tem toplotna dioda 1 deluje kot toplotni izolator) in prične pospešeno črpati toploto iz hladne delovne tekočine v magnetokalorični material.

■ 5 Zaključek

Opravljenе raziskave in razvoj na področju tehnologije magnetnega hlajenja v zadnjih letih so Fakulteto za strojništvo (UL) postavile v sam svetovni vrh tega področja. Vsekakor pa bo za preboj te tehnologije na trg potrebnih še veliko nadaljnjih raziskav, in sicer tako na področju razvoja rotirajočih magnetnih hladilnikov oziroma ustreznega razdelilnika toka tekočine, ki bi deloval ob čim manjših izgubah, kot razvoja učinkovitejšega AMR-ja, ki bi bil zmožen obratovati pri čim višjih obratovalnih frekvencah. Trenutno je v želji po komercializaciji magnetnega hlajenja ena glavnih omejitev cena permanentnih magnetov in magnetokaloričnih materialov. Ti v večini temeljijo na redkih zemljah (angl. rare earths), katerih cena v zadnjih letih močno raste. Iz tega vidika je torej še toliko bolj pomembno, da sta tako AMR kot celotna magnetna hladilna naprava čim bolj optimirana. To pomeni, da iz določene mase permanentnega magneta in magnetokaloričnega materiala AMR oziroma magnetni hladilnik ustvari čim večji temperaturni razpon in hladilno moč ob čim večji učinkovitosti oziroma hladilnem številu (COP).

Literatura

- [1] E. Warburg. Magnetic investigations (In German). *Annalen der Physik und Chemie*, 13: 141–164, 1881.
- [2] P. Debye. Einige bemerkungen zur

- magnetisierung bei tiefer temperatur. *Annalen der Physik und Chemie*, 81: 1154–1160, 1926.
- [3] W. Giauque. A thermodynamic treatment of certain magnetic effect. A proposed method of producing temperatures considerably below 1 degrees absolute. *Journal of the American Chemical Society*, 49: 1864–1870, 1927.
- [4] G. Brown. Magnetic heat pumping near room temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 47: 3673–3680, 1976.
- [5] J. A. Barclay in W. A. Steyert. Active magnetic regenerator. U.S. Patent No. 4.332.135, 1982.
- [6] B. Yu, M. Liu, P. W. Egolf, in A. Kitanovski. A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010. *International Journal of Refrigeration*, 33: 1029–1060, 2010.
- [7] V. K. Pecharsky in K. A. Gschneidner Jr. Giant magnetocaloric effect in $Gd_5(Si_2Ge_2)$. *Physical Review Letters*, 78: 4494–4497, 1997.
- [8] J. Tušek, S. Zupan, A., I. Prebil in A. Poredoš. Magnetic cooling – Development of Magnetic Refrigerator. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 55, 2009.
- [9] J. Tušek, S. Zupan, A. Šarlah, I. Prebil in A. Poredoš. Development of a rotary magnetic refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 33: 294–300, 2010.
- [10] J. Tušek, A. Šarlah, A. Poredoš in D. Fefer. Optimization of the magnetic field in a magnetic refrigerator. *Informacije MIDEM*, 39: 105–110, 2009.
- [11] A. Šarlah in A. Poredoš. Dimensionless numerical model for simulation of active magnetic regenerator refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 33: 1061–1067, 2010.
- [12] A. Šarlah, J. Tušek in A. Poredoš. Comparison of Thermo-Hydraulic Properties of Heat Regenerators Applicable to Active Magnetic Refrigerators. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 58: 16–22, 2009.
- [13] J. Tušek, A. Kitanovski, I. Prebil in A. Poredoš. Dynamic operation of an active magnetic regenerator (AMR): Optimization of a packed-bed AMR. *International Journal of Refrigeration*, 34: 1507–1517, 2011.
- [14] J. Tušek, S. Zupan, A. Kitanovski, I. Prebil in A. Poredoš. A comprehensive experimental analysis of gadolinium active magnetic regenerators. *Poslano v znanstveno revijo Applied Thermal Engineering*.
- [15] J. Tušek, K. Pompe, A. Kitanovski, J. Tušek in A. Poredoš. Postopek izdelave aktivnega magnetnega regenerators. Patentna prijava P-201200342.
- [16] A. Kitanovski in P. W. Egolf. Innovative ideas for future research on magnetocaloric technologies, *International Journal of Refrigeration* 33: 449–464, 2010.
- [17] U. Tomc, J. Tusek, A. Kitanovski in A. Poredos. Thermoelectric-magnetocaloric energy conversion, Fifth IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Thermag V, Grenoble, France, 2012.

A Review of the Development of Magnetic Refrigeration at the Faculty of Mechanical Engineering (UL)

Abstract: The paper describes an overview of the development of the magnetic refrigeration technology at the Faculty of Mechanical Engineering (UL) in the last six years (2006-2012). The short review and the basics of the magnetic refrigeration technology are described in the introduction of the paper. The second part of the paper presents the development of the prototype of the rotary magnetic refrigerator developed at the Faculty of Mechanical Engineering. The basic operational principle and the analysis of the magnet assembly of the prototype are shown, and furthermore, some constructional problems which enable efficient operation are described as well. In the third part of the paper the developed and built experimental device for the analysis of the active magnetic regenerator (AMR), as the key element of the magnetic refrigerator, is presented. It has been shown that the geometry of the AMR has a crucial impact on the operation of the magnetic refrigerator. The innovative technology for the construction of the AMR based on the laser welding is presented and described as well. The final part of the paper presents the future work in the field of magnetic refrigeration, which includes the alternative solution for a faster heat transfer in the AMR by using thermal diodes.

Keywords: magnetic refrigeration, magnetocaloric effect, active magnetic regenerator, magnetic field

Zahvala

Avtorji prispevka se zahvaljujemo Agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS) za financiranje aplikativnega raziskovalnega projekta RAZVOJ MAGNETNEGA HLADILNIKA (L2-2146 (B)).

Zahvala za sodelovanje pri razvoju gre tudi podjetju SMM proizvodni sistemi, d. o. o., podjetju Horjak - Precise, d. o. o., Domžale, in podjetju TKC, d. o. o. iz Ljubljane.