

Korelacija procesa kristalizacije i termičkog širenja amorfne masivne metalne legure FeCrMoGaPCB

Bratislav Čukić, Nebojša Mitrović, Nebojša Labus, Borivoje Nedeljković, Marko Popović, Milentije Luković, Mihai Stoica

Најбољи рад на секцији NM

Apstrakt— Uzorci amorfne masivne metalne legure sastava $\text{Fe}_{65,5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{C}_5\text{B}_{5,5}$ dobijeni su tehnologijom livenja rastopa u bakarne kalupe prečnika 1,5 mm i 1,8 mm. DTA analizom je utvrđena temperatura kristalizacije $T_x = 810$ K. S ciljem ispitivanja procesa termičkog širenja (dilatacije) sprovedeni su višestruki termički tretmani do oko 200 K iznad temperature kristalizacije. Uticaj procesa kristalizacije na termičko širenje je izučavan preko temperaturske zavisnosti koeficijenta termičkog širenja koji pokazuje evidentne promene tokom kristalizacije za razliku od skoro konstantne vrednosti kod legure u iskristalisanom stanju. Stereološkom i XRD analizom su praćene promene strukture iz amorfne u mikrokristalnu. S obzirom na sastav legure kojim se težilo poboljšanju mehaničkih svojstava sprovedena su kontrolna merenja tvrdoće koja su pokazala povećanje HV1 sa vrednosti od oko 713 u amorfnom stanju do preko 876 u mikrokristalnom stanju

Ključne reči— amorfna masivna metalna legura; dilatacija; koeficijent termičkog širenja, rendgenostrukturalna analiza; tvrdoća.

I. UVOD

AMORFNE masivne metalne legure (AMML) na bazi gvoždja predmet su značajnog naučnog interesovanja zbog svojih izuzetnih fizičkih, hemijskih i mehaničkih svojstava [1-3], a komercijalno su veoma važne jer su jeftinije od drugih tipova masivnih amornih legura. Sistem AMML FeCrMoGaPCrB se proučava zbog kombinacije odličnih magnetno mekih karakteristika i poboljšanih mehaničkih i korozionih svojstava u odnosu na druge sisteme na bazi gvoždja.

Fizička svojstva AMML značajno zavise od termičkog ili kombinovanog termomagnetnog tretmana čijom primenom se može dobiti materijal poboljšanih svojstava. Optimalnim tretmanom mogu se postići izuzetna mehanička, magnetna i električna svojstva, a kao posledica transformacije polazne amorfne strukture [4-6].

Bratislav Čukić – Visoka škola tehničkih strukovnih studija Čačak, Svetog Save 65, Srbija (e-mail: bracocukic@gmail.com).

Nebojša Mitrović – Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka Čačak, Svetog Save 65, Srbija (e-mail: nebojsa.mitrovic@ftn.kg.ac.rs).

Nebojša Labus – Univerzitet u Beogradu, Institut tehničkih nauka SANU, Knez Mihailova 35, Srbija (e-mail: nebojsa.labus@itn.sanu.ac.rs).

Borivoje Nedeljković – Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka Čačak, Svetog Save 65, Srbija (e-mail: borivoje.nedeljkovic@ftn.kg.ac.rs).

Marko Popović – Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka Čačak, Svetog Save 65, Srbija (e-mail: marko.popovic@ftn.kg.ac.rs).

Milentije Luković – Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka Čačak, Svetog Save 65, Srbija (e-mail: milentije.lukovic@ftn.kg.ac.rs).

Mihai Stoica – IFW Dresden, Institute for Complex Materials, Germany (e-mail: m.stoica@ifw-dresden.de).

Ispitivanje termičkog širenja AMML je veoma bitno za njihovu primenu jer se strukturnom relaksacijom i kristalizacijom mnoga svojstva menjaju.

U poslednjih deset godina proces termičkog širenja (dilatacije) ispitivan je kod čitavog niza AMML:

- $\text{Ni}_{25}\text{Zr}_{55}\text{Al}_{20}$, koja pokazuje identičnu zavisnost dilatacije tokom prvog i ponovljenog grejanja do temperatura u okolini temperature kristalizacije (600-800 K) [7].

- $\text{Zr}_{52}\text{Ti}_5\text{Cu}_{18}\text{Ni}_{15}\text{Al}_{10}$ i $\text{Zr}_{60}\text{Ti}_2\text{Cu}_{20}\text{Ni}_8\text{Al}_{10}$, kod kojih je registrovano je dvostepeno linearno širenje a naročito u temperaturskom intervalu od T_g (656 K) do T_x (733 K) je zapaženo intenzivno izduženje uzorka, dok od T_x otpočinje intenzivno smanjenje dimenzija kao posledica procesa kristalizacije [8].

- $(\text{Fe}_{0,36}\text{Co}_{0,36}\text{B}_{0,192}\text{Si}_{0,048}\text{Nb}_{0,04})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x = 0; 0,5; 0,75; 1$) gde je utvrđeno da se povećanjem udela Cu u leguri temperatura ostakljivanja T_g pomera ka nižim temperaturama, a dilatacija i koercitivnost smanjuju [9].

- $\text{Zr}_{41}\text{Ti}_{14}\text{Cu}_{12,5}\text{Ni}_{10}\text{Be}_{22,5}$, gde je prilikom dva uzastopna grejanja do 300 °C utvrđen mali porast linearne zavisnosti dilatacije tokom drugog grejanja [10].

- $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$, gde je utvrđeno da je koeficijent termičkog širenja α na temperaturama u oblasti između temperature ostakljivanja T_g i temperature kristalizacije T_x oko 2,5 puta veći nego na temperaturama nižim od T_g [11].

- $\text{Sm}_{55}\text{Al}_{25}\text{Cu}_{10}\text{Co}_{10}$ [12] i $\text{Mg}_{65}\text{Cu}_{25}\text{Tb}_{10}$, gde je evidentirano intenzivno smanjenje dimenzija kao posledica procesa kristalizacije [13].

Legura $\text{Fe}_{65,5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{Cr}_5\text{B}_{5,5}$ pripada klasi magnetno mekih materijala (tj. odlikuju se niskim vrednostima koercitivnog polja (H_c) i velikim vrednostima relativne magnetne permeabilnosti (μ_{rm}).

U ovom radu je razmatran uticaja procesa kristalizacije na termičko širenje AMML sastava $\text{Fe}_{65,5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{C}_5\text{B}_{5,5}$ s obzirom da za legure iz ovog sistema do sada nisu sprovedena eksperimentalna istraživanja dilatacije.

II. EKSPERIMENTALNI DEO

AMML sastava $\text{Fe}_{65,5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{Cr}_5\text{B}_{5,5}$ dobijena je livenjem je u bakarne kalupe u zaštitnoj atmosferi argona, a dobijeni odlivci su obliku valjka prečnika 1,5mm i 1,8 mm. Najpre su ispitivana termijska svojstva primenom DTA analize (DTA SHIMADZU 50).

Na uzorcima su ispitivane promene mikrostrukture i sprovedena merenja tvrdoće. Mikrostruktura je praćena na optičkom mikroskopu POLIVAR MET/ REICHERT sa automatskim uređajem za analizu slike LEICA Q 500 MC, a

sprovedena je i XRD analiza na uređaju PHILIPS PW-1050. Merenje tvrdoće HV_1 ($F = 9,81N$) vršeno je na uređaju Reichert.

Na ispitivanim uzorcima merena je dilatacija od sobne do unapred određene maksimalne temperature grejanja na dilatometru (Bähr Gerätebau GmbH Typ 702 s) na uzorcima dužine oko 3 mm pri brzinama grejanja 5 i 20 K/min. Praćene su temperaturske zavisnosti relativne promene dužine uzorka i koeficijenta termičkog širenja.

III. REZULTATI I DISKUSIJA

Temperaturska zavisnost relativne promene dužine uzorka $\Delta l/l_0$ definiše se jednačinom:

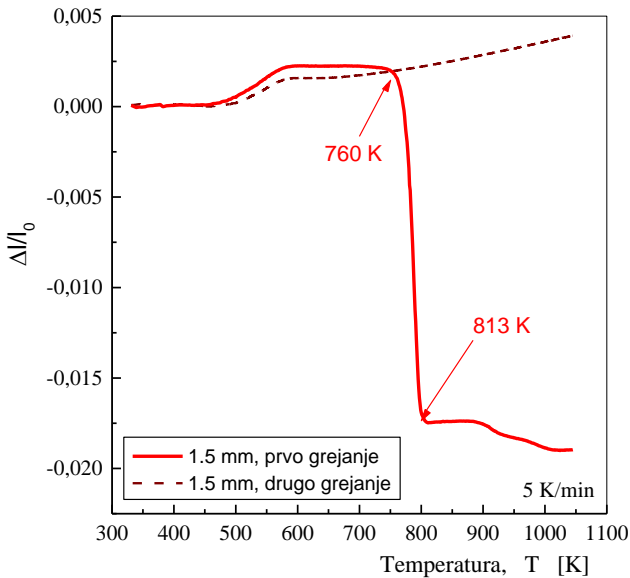
$$\Delta l/l_0 = \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

$\Delta l/l_0$ – relativna promena dužine, α – koeficijent termičkog širenja i ΔT – razlika temperatura ($\Delta T = T - T_0$).

Numerička vrednost koeficijenta termičkog širenja α određivana je diferenciranjem :

$$\alpha = \frac{d(\Delta l / l_0)}{dT} \quad (2)$$

Na slici 1. su prikazani dijagrami relativne promene dužine uzorka AMML $Fe_{65,5}Cr_4Mo_4Ga_4P_{12}C_5B_{5,5}$, prečnika 1,5 mm tokom prvog i drugog grejanja do 1045 K (brzina 5 K/min.)



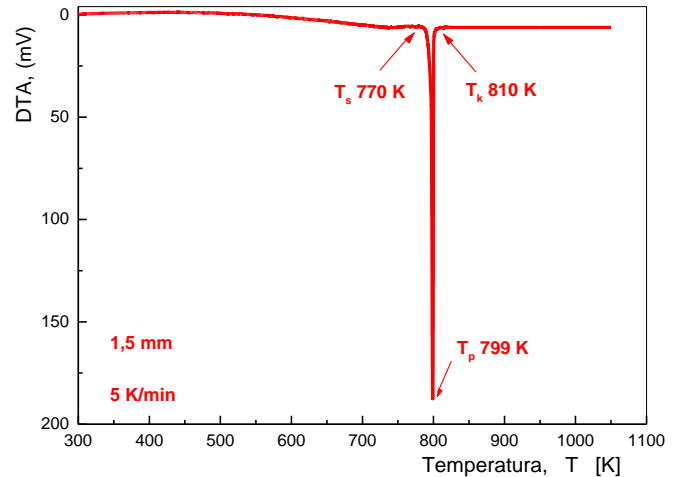
Sl. 1. Dijagram relativne promene dužine uzorka AMML $Fe_{65,5}Cr_4Mo_4Ga_4P_{12}C_5B_{5,5}$ prečnika 1,5 mm tokom prvog i drugog grejanja.

Tokom prvog grejanja na 560 K imamo izduženje uzorka od oko $2,5 \cdot 10^{-3}$ i ta vrednost se zadržava sve do oko 760 K. Proces kristalizacije koji zatim sledi je praćen intenzivnim skraćivanjem uzorka koje na 813 K iznosi oko $-17,5 \cdot 10^{-3}$.

Tokom drugog grejanja registrovana je linearna promena sa sa promenom nagiba krive pri temperaturi oko 560 K; dilatacija na 560 K iznosi oko $2 \cdot 10^{-3}$ a na konačnih 1045 K je oko $4 \cdot 10^{-3}$.

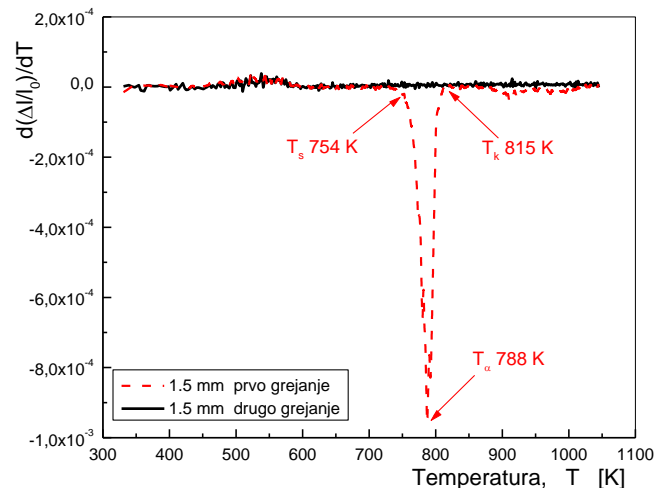
Odavde je moguće zaključiti da je struktura stabilna a proces kristalizacije je završen.

Na slici 2. je prikazan DTA termogram iz koga se vidi egzotermna reakcija procesa kristalizacije koji se odvija u temperaturskom intervalu (ΔT_{kr}), ($\Delta T_{kr} = T_k - T_s = 810 K - 770 K = 40 K$), što je u potpunoj korelaciji sa procesom kristalizacije identifikovanom pomoću krive dilatacije na slici. 1.



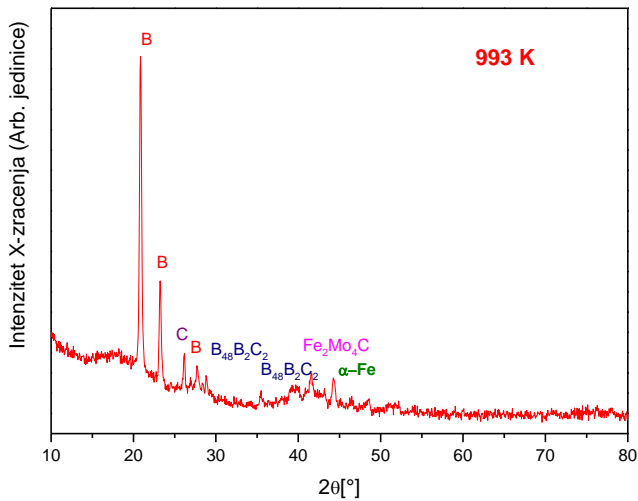
Sl. 2. DTA termogram za uzorak AMML $Fe_{65,5}Cr_4Mo_4Ga_4P_{12}C_5B_{5,5}$, prečnika 1,5 mm (5 K/min.)

Na slici 3. prikazan je koeficijent termičkog širenja tokom prvog i drugog grejanja. Tokom prvom grejanja dobijen je izraženi pik u oblasti oko temperature kristalizacije ΔT_{kr} , dok je tokom drugog grejanja dobijena konstantna vrednost koeficijenta termičkog širenja kao rezultat završetka procesa kristalizacije.



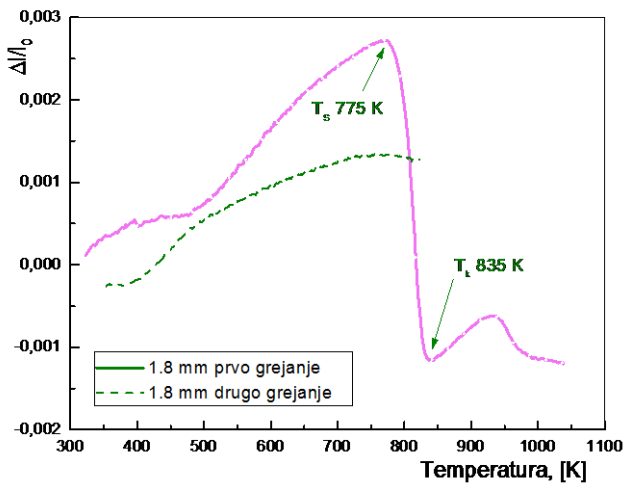
Sl. 3. Koeficijent termičkog širenja uzorka AMML $Fe_{65,5}Cr_4Mo_4Ga_4P_{12}C_5B_{5,5}$, prečnika 1,5 mm tokom prvog i drugog grejanja.

Na slici 4. prikazan je rendgenogram uzorka prečnika 1,5 mm grejanog do 993 K. Registrovana je pojava intenzivnih difrakcionih pikova kao rezultat procesa kristalizacije i formiranja nekoliko jedinjenja kao što su: Fe_2Mo_4C , α -Fe i $B_{48}B_2C_2$.



Sl. 4. Rendgenogram za uzorak AMML $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{C}_5\text{B}_{5.5}$, prečnika 1,5 mm posle grejanja do 993 K.

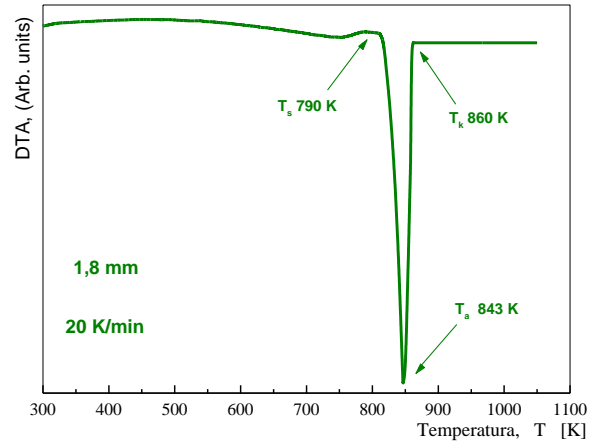
Na slici 5. su prikazani dijagrami relativne promene dužine uzorka AMML $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{C}_5\text{B}_{5.5}$, prečnika 1,8 mm tokom prvog (1045 K, brzina 20 K/min.) i drugog grejanja.



Sl. 5. Dijagram relativne promene dužine uzorka AMML $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{C}_5\text{B}_{5.5}$, prečnika 1,8 mm tokom prvog i drugog grejanja.

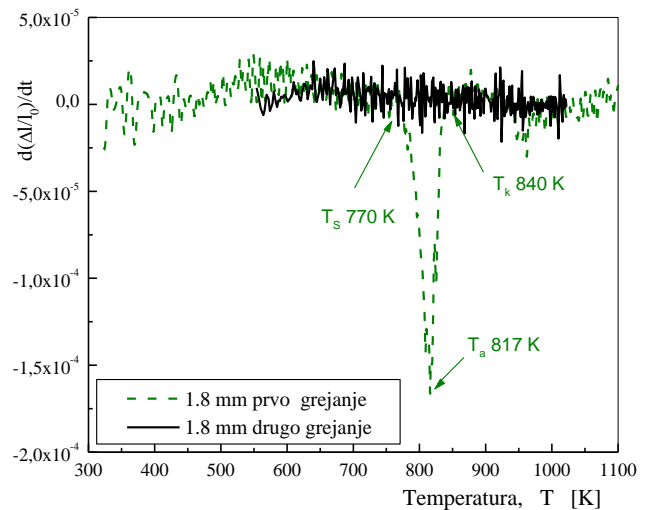
Tokom prvog grejanja na 460 K imamo izduženje uzorka od oko $6 \cdot 10^{-4}$, a maksimum istežanja od oko $2,8 \cdot 10^{-3}$ registrovan je na temperaturi T_S oko 775 K. Proces kristalizacije koji zatim sledi je praćen skraćanjem uzorka koje na $T_k = 835$ K iznosi oko $-1,2 \cdot 10^{-3}$.

Tokom drugog grejanja registrovana je linearna promena sa sa promenom nagiba krive pri temperature oko 470 K; dilatacija na 470 K iznosi oko $5 \cdot 10^{-4}$, a zatim raste do na $1,2 \cdot 10^{-3}$. Odavde je moguće zaključiti da je struktura nestabilna a proces kristalizacije još nije završen.



Sl. 6. DTA termogram za uzorak AMML $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{C}_5\text{B}_{5.5}$, prečnika 1,8 mm (20 K/min.).

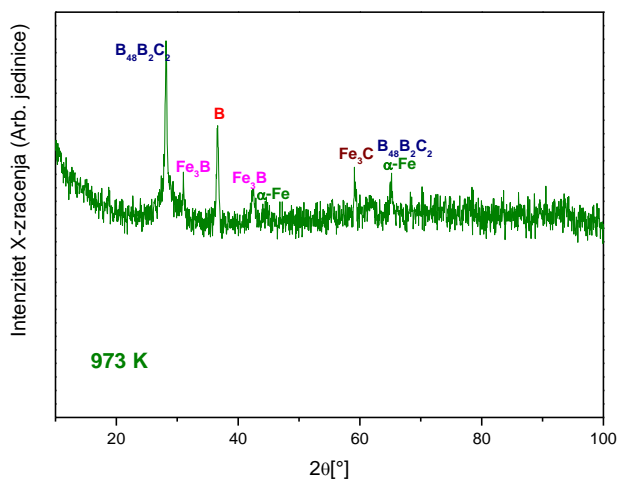
Na slici 6. je prikazan DTA termogram iz koga se vidi egzotermna reakcija procesa kristalizacije koji se odvija u temperaturnom intervalu (ΔT_{kr}), ($\Delta T_{kr} = T_k - T_s = 880 \text{ K} - 790 \text{ K} = 90 \text{ K}$), što je u zadovoljavajućoj korelaciji sa procesom kristalizacije identifikovanom pomoću krive dilatacije na slici. 5.



Sl. 7. Koeficijent termičkog širenja uzorka AMML $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{C}_5\text{B}_{5.5}$, prečnika 1,8 mm tokom prvog i drugog grejanja.

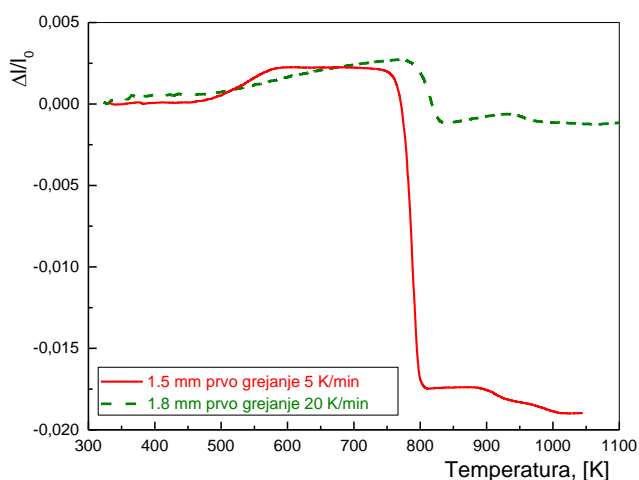
Na slici 7. Prikazani su koeficijenti termičkog širenja tokom prvog i drugog grejanja iz koga se vidi da u prvom grejanju imamo izraženi pik u oblast temperatura kristalizacije, dok u drugom grejanju zbog završene kristalizacije imamo konstantne vrednosti termičkog širenja.

Na slici 8. prikazan je rendgenogram uzorka prečnika 1,8 mm odgrevanog do 973 K tj. iznad temperature kristalizacije. Registrovana je pojava slabih difrakcionih pikova koji potiču od nekoliko jedinjenja kao što su: Fe_3B , Fe_3C i $\text{B}_{48}\text{B}_2\text{C}_2$.



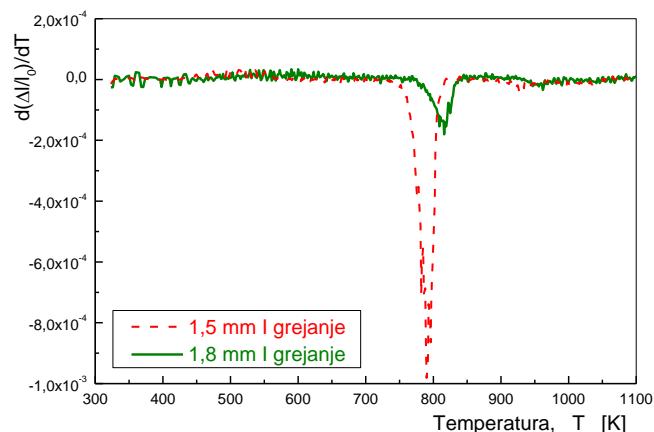
Sl. 8. Rendgenogram za uzorak AMML $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{C}_5\text{B}_{5.5}$, prečnika 1,8 mm posle grejanja do 973 K.

Na slici 9. prikazani su uporedni dijagrami relativne promene dužine uzorka za oba ispitivana uzorka prečnika 1,5 mm i 1,8 mm. Istezanja oba uzorka u temperaturskom intervalu od sobne do temperature kristalizacije je skoro identična ali je smanjenje dimenzija tokom kristalizacije znatno veće kod uzorka prečnika 1,5 mm. To je evidentno i na slici 10. gde su dati uporedni dijagrami koeficijenta termičkog širenja, tj. kod uzorka prečnika 1,5 primetan je znatno intenzivniji pik u oblasti kristalizacije u odnosu na uzorak prečnika 1,8 mm.



Sl. 9. Dijagram uporednog prikaza relativne promene dužine uzorka AMML $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{C}_5\text{B}_{5.5}$, prečnika 1,5 mm i 1,8 mm tokom prvog grejanja.

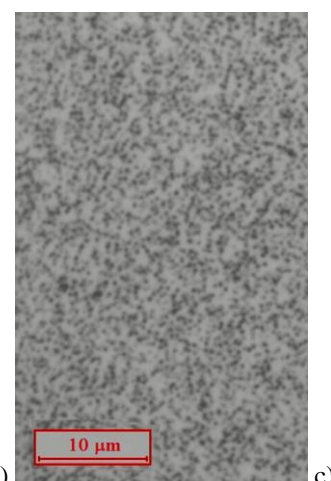
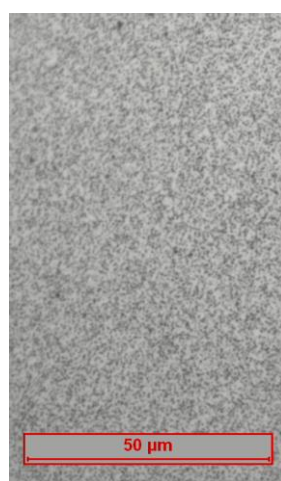
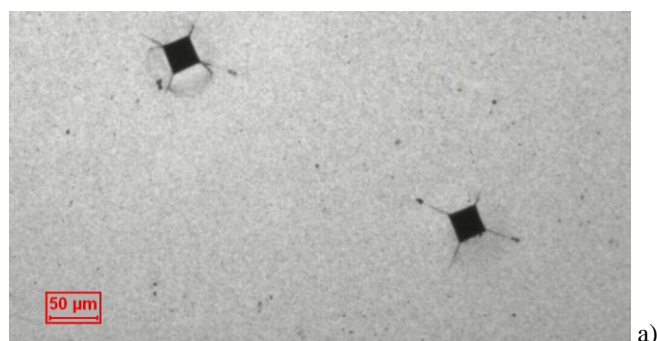
Na slici 11. su prikazane mikrostrukture i ispitivanja tvrdoće HV_1 za uzorak prečnika 1,5 mm koji je grejan do 1123 K. Kod neodgrevanog uzorka registrovana je vrednost tvrdoće od oko $\text{HV}_1 = 713$. Mikrostrukture prikazuju promene strukture iz amorfne (neodgrevane) u mikrokristalnu (odgrevanu datu na sl. 11.a, b i c), a što je praćeno rastom tvrdoće prikazanim u Tabeli I.



Sl. 10. Uporedni prikaz koeficijenta termičkog širenja uzorka AMML $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{C}_5\text{B}_{5.5}$ prečnika 1,5 mm i 1,8 mm posle prvog grejanja.

TABELA I
VREDNOSTI TVRDOĆE AMML $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{C}_5\text{B}_{5.5}$ ZA RAZLIČITE TEMPERATURE GREJANJA.

Prečnik	Maksimalna temperatura grejanja, [K]	Tvrdoća HV_1
1,5 mm	Neodgrevan	713
	1123 sa brzinom 5 K/min.	1066
1,8 mm	Neodgrevan	713
	1049 sa brzinom 20 K/min.	1012

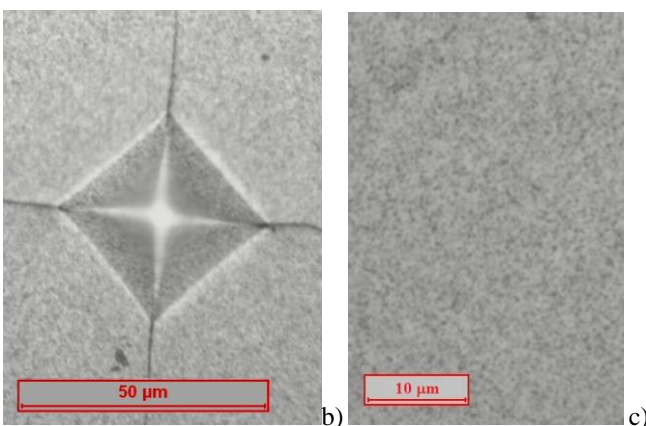
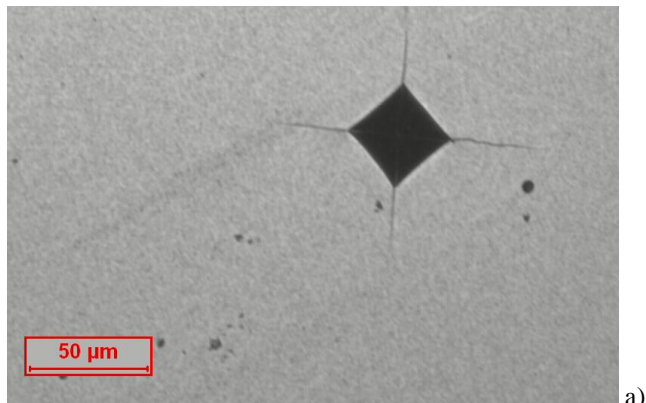


Sl. 11. Mikrostrukture i ispitivanje tvrdoće AMML $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{C}_5\text{B}_{5.5}$, prečnika 1,5 mm za uzorak grejan do 1123 K a) uveličanje 100X, b) uveličanje 500 X, c) uveličanje 1000 X.

Na slici 12. su prikazane mikrostrukture i ispitivanja tvrdoće HV_1 za uzorak prečnika 1,8 mm grejan do 1049 K.

Kod neodgrevanog uzorka registrovana je vrednost tvrdoće od oko $HV_1 = 713$.

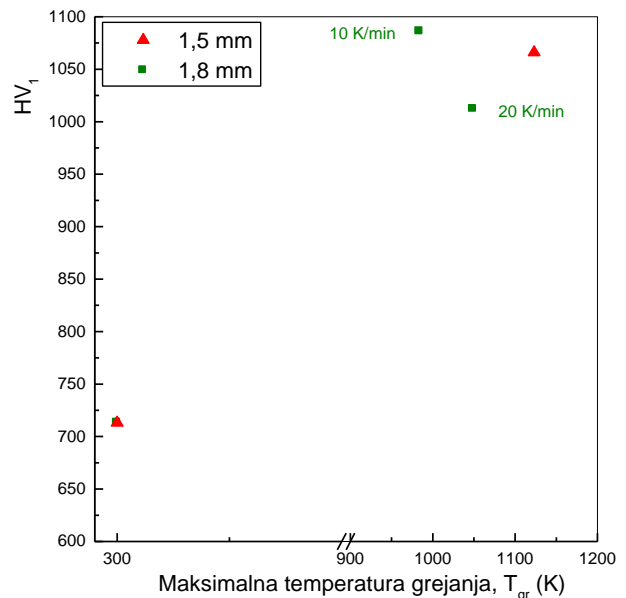
Prikazane mikrostrukture potvrđuju promene strukture iz amorfne u mikrokristalnu (sl. 12 a, b i c, a što ima za posledicu rast tvrdoće, što je prikazano u Tabeli I.



Sl. 12. Mikrostrukture i ispitivanje mehaničkih svojstava AMML $Fe_{65.5}Cr_4Mo_4Ga_4P_{12}C_5B_{5.5}$, prečnika 1,8 mm uzorka grejanog do 1049 K a) uveličanje 200 X, b) uveličanje 500 X, c) uveličanje 1000 X.

Mikrokristalna struktura je uglavnom homogena po celoj površini uzorka. Kod uzorka prečnika 1,5 mm grejanog do 1123 K brzinom 5 K/min mikrokristali su nešto krupniji u odnosu na one koji su evoluirali kod uzorka prečnika 1,8 mm grejanog do 1049 K brzinom 20 K/min. Niža brzina grejanja i veća maksimalna temperatura grejanja kod uzorka prečnika 1,5 mm omogućavaju uspešniju nukleaciju i kristalizaciju, tj. intenzivniji rast kristalita.

Proces kristalizacije praćen je i rastom tvrdoće kod ispitivanih uzoraka oba prečnika 1,5 i 1,8 mm, a što je prikazano na slici 13. Već uočena niža brzina grejanja koja omogućava uspešniju nukleaciju i kristalizaciju, tj. intenzivniji rast kristalita rezultiraju nešto većom vrednošću tvrdoće kod uzoraka prečnika 1,8 mm pri nižoj brzini grejanja ($HV_1 = 1086$ pri 10 K/min do 984 K u odnosu na $HV_1 = 1012$ pri 20 K/min do 1049 K).



Sl. 13. Uporedni prikaz tvrdoća (HV_1) AMML $Fe_{65.5}Cr_4Mo_4Ga_4P_{12}C_5B_{5.5}$ prečnika 1,5 mm i 1,8 mm u neodgrevanom-amorfnom stanju i posle grejanja tj. odigrane kristalizacije.

IV. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati uticaja procesa kristalizacije na termičko širenje uzoraka AMML $Fe_{65.5}Cr_4Mo_4Ga_4P_{12}C_5B_{5.5}$ u obliku valjka prečnika 1,5 mm i 1,8 mm. Termička dilatacija tokom prvog grejanja, do temperature kristalizacije, kao kod većine AMML pokazuje standardnu dvostepenu linearnu zavisnost sa pozitivnim temperaturnim koeficijentima. Tokom procesa kristalizacije zapaženo je naglo smanjenje dimenzija, koje je znatno izraženije kod uzorka manjeg prečnika 1,5 mm. Tokom drugog grejanja u celom temperaturnom intervalu je registrovana pozitivna linearna dilatacija kao rezultat odigrane kristalizacije. Transformacija strukture iz polazne amorfne ka nastaloj mikrokristalnoj je praćena i porastom tvrdoće od preko 40%.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je delimično finansiran od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (projekat osnovnih istraživanja br. 172057 i projekat tehnološkog razvoja br. 35037).

Autori se najsrdačnije zahvaljuju dr Jirgenu Ekertu Institut za fiziku čvrstog stanja i materijale, Drezden, SR Nemačka uz čiju saradnju su nastali rezultati prezentovani u ovom radu. Dr Nebojša Mitrović se zahvaljuje i Servisu za razmenu akademskih radnika SR Nemačke (DAAD) na neophodnoj finansijskoj pomoći tokom studijskih boravaka obavljenih u SR Nemačkoj.

LITERATURA

- [1] K. Amiya and A. Inoue "Fe-(Cr,Mo)-(C,B)-Tm bulk metallic glasses with high strength and high glass-forming ability" *Rev. Adv. Mater. Sci.* vol. 18, pp. 27-29, 2008.
- [2] H.X. Li, S.L. Wang, S.Yi, Z.B. Jiao, Y.Wu, Z.P.Lu "Glass formation and magnetic properties of Fe-C-Si-B-P-(Cr-Al-Co) bulk metallic glasses fabricated using industrial raw materials" *J. Magn. Magn. Mater.* vol. 321, pp. 2833-2837, 2009.
- [3] T. D. Shen, and R. B. Schwartz, "Bulk ferromagnetic glasses prepared by flux melting and water quenching", *Appl. Phys. Lett.* vol. 75, pp. 49-51, 1999.
- [4] N. Mitrović, B. Čukić, N. Obradović, M. Kićanović, M. Stoica "Kinetics of crystallization process of bulk metallic glass FeCrMoGaPCB prepared by cooper mold casting". Materials Research Society of Serbia YUCOMAT 2012, Conference Herceg Novi, September 3-7, 2012.
- [5] B. Čukić, B. Nedeljković, N. Mitrović, M. Popović, S. Roth, M. Stoica "Mehanička i magnetna svojstva termički tretirane masivne metalne legure $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{C}_5\text{B}_{5.5}$ " Zbornik radova 56 Konferencije Zlatibor, rad br. NM 1.4, pp. 1-4, 6-9 Juna, 2012.
- [6] B. Čukić, N. Mitrović, A. Maričić, B. Nedeljković, M. Popović, M. Stoica "Uticaj odgrevanja na magnetnu permeabilnost, mikrostrukturu i tvrdoću amorfne legure FeCrMoGaPCB" Zbornik radova 57 Konferencije Zlatibor, rad br. NM1.5, pp.1-5, 3-6 Juna, 2013.
- [7] G. Vlasak, P. Svec, P. Duhaj "Application of isochronal dilatation measurements for determination of viscosity of amorphous alloys". *J. Mater. Sci.Eng A.* vol. 304-306, pp. 472-475, 2001.
- [8] N. Matern, U. Kuhn, H. Hermann, S. Roth, H. Vinzelberg, J. Eckert "Thermal behavior and glass transition of Zr-based bulk metallic glasses". *J. Mater. Sci.Eng A.* vol. 375-377, pp. 351-354, 2004.
- [9] M. Aykol, M. V. Akdeniz, A. O. Mekhrabov "Solidification behavior, glass forming ability and thermal characteristics of soft magnetic Fe-Co-B-Si-Nb-Cu bulk amorphous alloys". *Intermetallics* vol. 19, pp. 1330-1337, 2011.
- [10] Q. Jing, R. P. Liu, G. Li, W. K. Wang "Thermal expansion behavior and structure relaxation of ZrTiCuNiBe bulk amorphous alloy". *Scripta Mater.* vol. 49, pp. 111-115, 2003.
- [11] N. Mattern, M. Stoica, G. Vaughan, J. Eckert "Thermal behavior of $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$ bulk metallic glass". *Acta Mater.* vol. 60, pp. 517-524, 2012.
- [12] G. Jing, B. Xiufang, L. Tao, Z. Yan, T. Li, Z. Bo, S. Baoan "Formation and interesting thermal expansion behavior of novel Sm-based bulk metallic glasses" *Intermetallics* vol. 15, pp. 929-933, 2007.
- [13] G. Li, Y. C. Li, Z. K. Jiang, T. Xu, L. Huang, J. Liu, T. Zhang, R. P. Liu "Elasticity, thermal expansion and compressive behavior of $\text{Mg}_{65}\text{Cu}_{25}\text{Tb}_{10}$ bulk metallic glass". *J. Non-Cryst. Solids* vol. 355, pp. 521-524, 2009.

ABSTRACT

Bulk metallic glass with nominal composition $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{C}_5\text{B}_{5.5}$ was prepared by cooper mold casting with 1.5 mm and 1.8 mm diameter cylinders. Crystallization temperature $T_x = 810$ K was observed by DTA analysis. Repeated thermal treatments were performed to about 200 K over the crystallization temperature in order to investigate thermal dilatation effects. Structural changes were examined by optical microscopy and XRD analysis. Intensive changes of thermal dilatation coefficient was observed during crystallization process of amorphous structure. However, during the second heating run already crystalline structure exhibit almost constant value of thermal dilatation coefficient. Hardness test shows the increase of HV1 value from about 713 for as-cast samples to about 876 in microcrystalline state.

Correlation of crystallization process and thermal dilatation behavior in FeCrMoGaPCB bulk metallic glass

Bratislav Čukić, Nebojša Mitrović, Nebojša Labus, Borivoje Nedeljković, Marko Popović, Milentije Luković, Mihai Stoica