

TANJA P. BRDARIĆ<sup>1</sup>  
LJILJANA LJ.  
STAMENKOVIĆ<sup>2</sup>  
NIKOLA B. NOVAKOVIĆ<sup>3</sup>  
JASMINA D. GRBOVIĆ  
NOVAKOVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratorija za materijale,  
Institut za nuklearne nauke  
"Vinča", Beograd

<sup>2</sup>Laboratorija za radioizotope,  
Institut za nuklearne nauke  
"Vinča", Beograd

<sup>3</sup>Laboratorija za nuklearnu i  
plazma fiziku, Institut za  
nuklearne nauke "Vinča",  
Beograd

NAUČNI RAD

66.017:620.1:544.723.3+546.11 +  
+544.4:536.6

## DESORPCIJA VODONIKA SA NANOSTRUKTURNIH KOMPOZITA NA OSNOVI MAGNEZIJUM HIDRIDA\*

*Nanostrukturni kompoziti  $MgH_2$ -Me (Me = Fe, Co i Ni) sintetisani su mehaničkim mlevenjem u mlinu sa kuglama u atmosferi argona. Ispitivan je katalitički uticaj prirode aditiva (Me) na brzinu desorpcije vodonika. Mikrostruktura i morfologija kompozita su ispitivani rendgenostrukturalnom i SEM analizom, dok je desorpcija vodonika praćena diferencijalnom skenirajućom kalorimetrijom. Primećeno je da najbolje osobine za čuvanje vodonika ima kompozit  $MgH_2$ -Fe kod koga je temperatura desorpcije snižena za 120 stepeni u odnosu na referentni  $MgH_2$ . Izračunate aktivacione energije za disocijaciju brojčano odgovaraju difuzijom kontrolisanom procesu dehidriranja.*

O vodoniku se u poslednje dve decenije s razlogom govori kao o gorivu budućnosti kako za stacionarnu tako i za mobilnu primenu. Sačuvana toplotna energija po masi vodonika je oko tri puta veća od energije sačuvane u gorivima koja se danas koriste i iznosi 142 MJ/kg. Međutim, iako je čist izvor energije, jer je produkt njegovog sagorevanja sa kiseonikom samo vodena para, šira praktična primena vodonika je ograničena načinom skladištenja. Sa stanovišta skladištenja vodonične energije magnezijum i legure na bazi magnezijuma u poslednjih nekoliko godina privlače sve veću pažnju, jer magnezijum hidrid ( $MgH_2$ ) ima visok volumetrijski ( $130 \text{ kgH}_2/\text{m}^3$ ) i gravimetrijski (7.6 mas.%) kapacitet, i relativno je jeftin. Međutim, praktična primena magnezijuma, njegovih legura i kompozita limitirana je sporom kinetikom sorpcije vodonika i visokom temperaturom razlaganja  $MgH_2$  [1–3]. U praksi, magnezijum treba aktivirati na temperaturama višim od 300 °C nekoliko sati da bi došlo do sorpcije [4,5]. U poslednjih nekoliko godina mehaničko mlevenje magnezijum hidrida sa prelaznim metalima jedan je od načina da se ubrza kinetika procesa hidriranja [6–9].

Cilj ovog rada je da se ispita katalitički uticaj dodatka 3d metala Fe, Co i Ni, na temperaturu desorpcije vodonika, kao i da se ispita kinetika reakcije dehidriranja.

\*Rad saopšten na skupu "Peti seminar mladih istraživača", Beograd, Decembar 25–26, 2006.

Adresa autora: J.D. Grbović Novaković, Laboratorija za materijale  
Institut za nuklearne nauke "Vinča", P. Fah 522, 11000 Beograd  
E-mail: jasnag@vin.bg.ac.yu  
Rad primljen: Decembar 25, 2007.  
Rad prihvaćen: Januar 31, 2007.

### EKSPERIMENTALNI DEO

Polazni materijali tretirani u okviru ovog rada bili su komercijalni  $MgH_2$  (Th. Goldschmit), čistoće 95% sa sadržajem slobodnog Mg od 5%, i veličine čestica 60  $\mu\text{m}$ , prah Fe čistoće 98% (NewMet KOCH, 60  $\mu\text{m}$ ), Co (Aldrich Chemical Company, 99,9%, 70  $\mu\text{m}$ ) Ni (NOAH Chemical, 99,999%, 60  $\mu\text{m}$ ) i Ar čistoće 99,9995%.

Mehaničko mlevenje vršeno je u kugličnom mlinu SPEX8000 tokom 10 sati u atmosferi argona. Odnos mase kugli i mase uzorka bio je 10:1, a brzina rotacije mlina bila je 863 rps. S obzirom da je magnezijum duktilan korišćenje su kugle od tvrdog čelika prečnika 8 mm i mase 13.5 g da bi se izbegla adhezija praha na zidove suda i kugli. Ukupna masa uzoraka bila je 1,6 g.

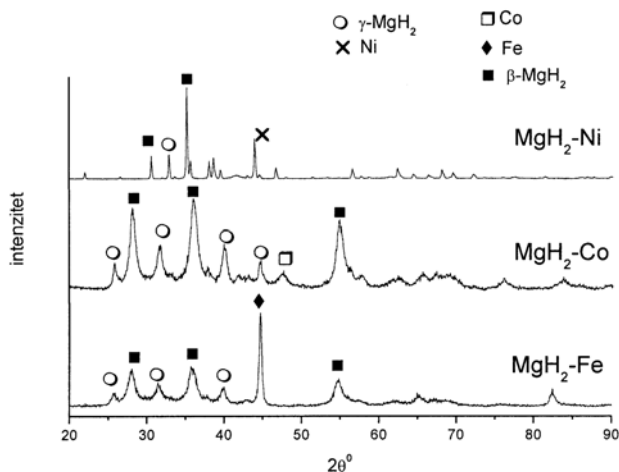
Mikrostruktura uzoraka karakterisana je rendgenskom difrakcijom na Rigaku DMAX IIC Bragg-Brentano difraktometru za prah sa  $\text{Cu-K}\alpha$  zračenjem i grafitnim monohromatorom.

Morfološka i mikroanalitička ispitivanja izvršena su korišćenjem SEM tehnike na mikroskopu Cambridge 250 MKIII sa energijskom disperzionom spektroskopskom (EDS) mikroanalizom. Da bi se ispitala homogenost uzorka i disperzija katalizatora korišćena je tehnika povratno rasutih elektrona (BSE) SEM analize na ispoliranim ravnim uzorcima. Uzorci za ovu analizu dobijeni su klasičnim metalografskim postupkom: zatapanjem polaznih prahova u epoksidnu smolu, pa naknadnim poliranjem. Poliranje uzorka završeno je dijamantskom pastom granulacije 0,25  $\mu\text{m}$ . Nakon poliranja na uzorke je radi provodnosti nanesen sloj grafita. Veličina čestica metalnog aditiva određivana je sa SEM fotografija korišćenjem modifikovanog programa ImageJ (rsb.info.nih.gov/ij/). Da bi se pratile desorpcione osobine sistema korišćen je kalorimetar DSC2010

(TA Instruments) sa brzinom zagrevanja od 20 K/min u atmosferi argona.

## REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 1 predstavljeni su difraktogrami kompozita  $MgH_2$ -Me. Na svim difraktogramima uočava se postojanje obe faze  $MgH_2$  ( $\gamma$  i  $\beta$ ). Pikovi koji potiču od  $\beta$ - $MgH_2$  na  $2\theta$  27.97°, 35.77°, 40° i 55° su široki što znači da je veličina kristalita mala što je potvrđeno Ritveldovom analizom. Pikovi odgovaraju difrakcijama sa ravnima (110), (101), (200) i (211). Obe faze hidrida su jako slične;  $\gamma$ - $MgH_2$  se može smatrati distorzijom  $\beta$ - $MgH_2$ , tako da je vrlo verovatno da u sistemu postoje dva konkurentna procesa:  $\gamma \rightarrow \beta$  i  $\beta \rightarrow \gamma$  transformacija [10]. Takođe se mogu uočiti pikovi koji potiču od Fe, Co i Ni.

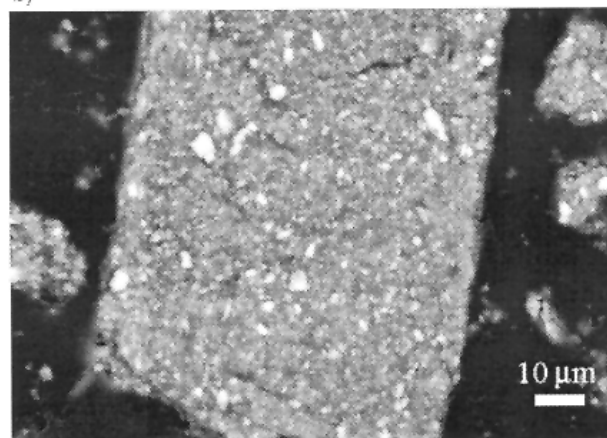
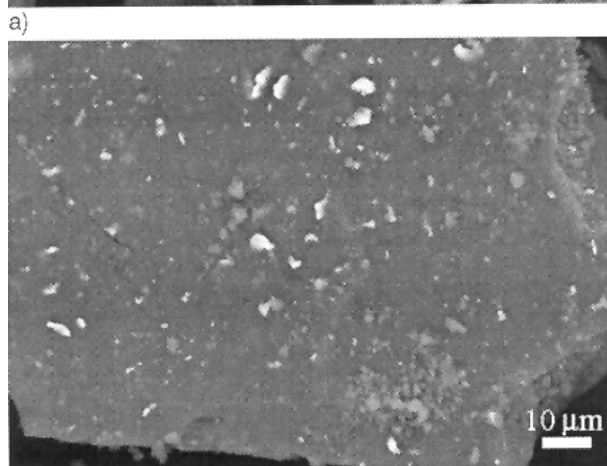
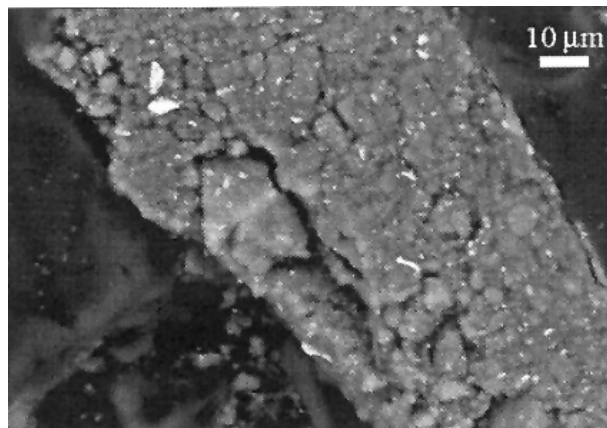


Slika 1. Rendgenostrukturni dijagrami kompozita  $MgH_2$ -Me (Me = Fe, Co i Ni). Sa difraktograma se vidi da pri ovim uslovima nije došlo do građenja trenarnih hidrida  
Figure 1. XRD diagrams of  $MgH_2$ -Me (Me = Fe, Co i Ni) composites. As one can see, there is no formation of ternary hydrides under these conditions

Sa difraktograma se uočava da nije došlo do stvaranja novih faza između magnezijum hidrida i metalnih katalizatora, tj. pikovi koji potiču od nove hidridne faze nisu detektovani. Na slici 2a-c date su SEM fotografije dobije tehnikom povratno rasutih elektrona sa uzoraka  $MgH_2$ -X (X = Fe, Co, Ni).

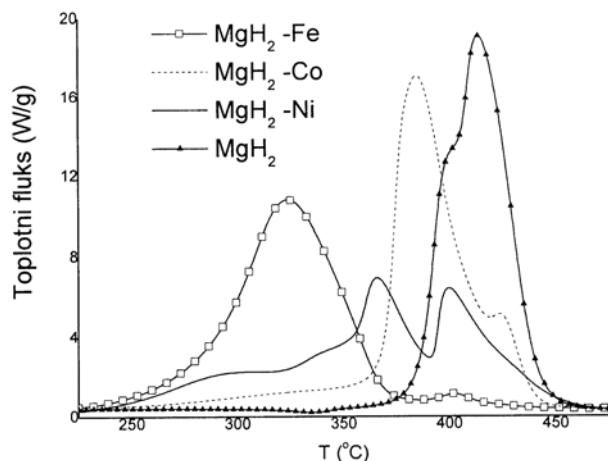
Sa fotografija se može uočiti da je disperzija i veličina katalizatora na površini materijala različita, što se odražava na desorpciju vodonika datu na slici 3. Koristeći program Image J određena je veličina čestica,  $d$  (tabela 1).

Kao što se vidi sa slike 3, DSC krive koje potiču od dehidriranja kompozita  $MgH_2$ -Me pokazuju slično ponašanje kao i prah čistog magnezijum hidrida mlevenog tokom 10 sati [11-13].



Slika 2. SEM fotografije kompozita  $MgH_2$ -Me (Me = Fe, Ni, Co) dobijene BSE tehnikom. Odnos  $MgH_2$ : Me bio je 90 : 10 mas.%. (a)  $MgH_2$ -Fe; (b)  $MgH_2$ -Co,  $MgH_2$ -Ni  
Figure 2. SEM (BSE) micrographs of  $MgH_2$ -Me composites (Me = Fe, Ni, Co) with the  $MgH_2$ : Me ratio 90 : 10 mass%. (a)  $MgH_2$ -Fe; (b)  $MgH_2$ -Co,  $MgH_2$ -Ni

S obzirom da je kod kompozita  $MgH_2$ -Fe temperatura desorpcije snižena za 120 °C u odnosu na referentni prah  $MgH_2$ , kod ovog kompozita, kao i kod referentnog hidrida praćena je kinetika procesa dehidriranja. Kinetika dehidriranja ispitivana je ko-



Slika 3. DSC kriva za kompozite  $MgH_2-Me$  ( $Me = Fe, Ni, Co$ )  
Figure 3. DSC curve of  $MgH_2-Me$  ( $Me = Fe, Ni, Co$ ) composites

Tabela 1. Karakteristike kompozita  $MgH_2-Me$  ( $Me = Fe, Co, Ni$ )  
Table 1. Characteristics of  $MgH_2-Me$  composites ( $Me = Fe, Co, Ni$ )

Uzorak	$T$ (°C)	Toplotni fluks (J/g)	$A_n$	$d$ (μm)
$MgH_2$	413	2209	1	
$MgH_2-Fe$	324	1847	0,836	2
$MgH_2-Co$	384	1994	0,902	3
$MgH_2-Ni$	366	1746	0,798	1

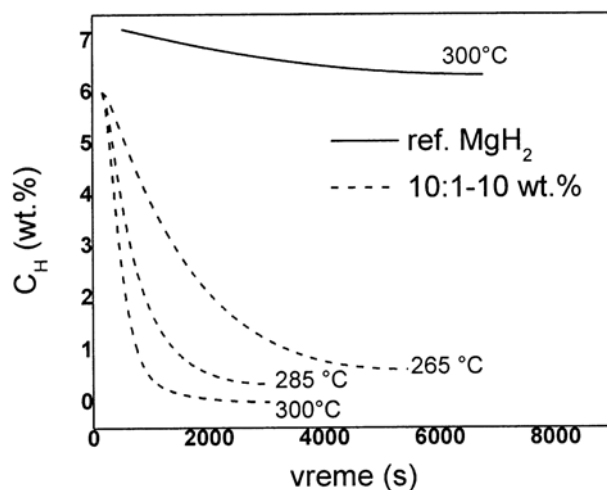
risteći DSC izoterme. Integralni signal  $A_{iso}(t)$  je konvertovan u gravimetrijski kapacitet za vodonik koristeći relaciju:

$$C_H(t) = 7,6 \times (A_n - A_{iso}(t) / A_{tot})$$

gde 7,6 predstavlja teorijski kapacitet u masenim procentima.

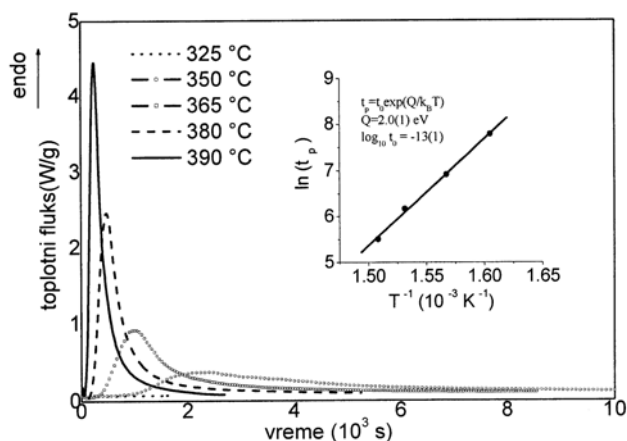
Pošto je prethodnim ispitivanjima ustanovljeno da se najbolji rezultati u smislu kinetike desorpcije postižu kada je BPR 10 : 1, i kada u sistemu ima 10% Fe, za ovaj materijal je određen i gravimetrijski kapacitet. Kao što se vidi sa slike 4, na kojoj su predstavljene krive  $C_H(t) = f(t)$  za različite temperature, gravimetrijski kapacitet dostiže 6% što je blisko teoretskoj vrednosti od 7,6%. Koristeći Džonson-Mel-Avranijevu (JMA) jednačinu i Kisindžerov metod analize, fitovanjem DSC izoterme određene su vrednosti parametara  $k$  – konstanta brzine i  $n$  – Avramijev eksponent, a potom i energija aktivacije za proces dehidriranja.

Na svakoj temperaturi na kojoj je praćena reakcija, posmatrana je promena izreagovane količine materijala u funkciji vremena; sa ovih krivih određeni su parametri  $k$  i  $n$ . Parametar  $n$  iznosi 3 i dobro se slaže sa rezultatima dobijenim u literaturi [10,14], i govori o tome da je proces trenutne nukleacije praćen procesom rasta kristala u sve tri dimenzije koji je kontrolisan procesima na površini (slika 5).



Slika 4. Količina desorbovanog vodonika u funkciji vremena kod kompozita  $MgH_2-Fe$

Figure 4. The quantity of hydrogen desorbed from the  $MgH_2-Fe$  composite as a function of time



Slika 5. Toplotni fluks u funkciji vremena na različitim temperaturama (od 325 do 390 °C) za  $MgH_2$ . Istim postupkom određena je energija aktivacije za desorpciju kog  $MgH_2-Fe$  sistema  
Figure 5. Heat flow as a function of temperature for pure  $MgH_2$ . The same experimental set up was used to calculate the activation energy of the  $MgH_2-Fe$  composite.

Sa druge strane, vrednost ovog parametra može biti pripisana takođe procesima kontrolisanim difuzijom. Prema tome, ako se za Avramijev eksponent uzme vrednost 3 i ponovi postupak predstavljajući  $\ln k = f\left(\frac{1}{T}\right)$  (Arenijusova kriva) može se dobiti energija aktivacije za proces dehidriranja. Kod čistog praška  $MgH_2$  mlevenog 10 sati energija aktivacije za dehidraciju iznosi 160 kJ/mol, dok za kompozit  $MgH_2-Fe$  mleven pod istim uslovima 120 kJ/mol, što govori da difuzija kontroliše proces dehidratacije.

## ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je da se ispita uticaj 3d metala (Fe, Co i Ni), na temperaturu desorpcije vodonika sa nanokompozita  $MgH_2$ -Me i da se ispita kinetika reakcije dehidriranja. Da bi se dobili pomenuti materijali korišćeno je mehaničko mlevenje u inertnoj atmosferi polazeći od  $MgH_2$ . Prednosti korišćenja ove metode su neraktivnost hidrida prema vazduhu, kao i kraće vreme sinteze, i izbegavanje hidriranja. Kod kompozita  $MgH_2$ -Fe temperatura desorpcije snižena je u odnosu na referentni prah  $MgH_2$ , za 120 °C. U slučaju Fe kao katalizatora gravimetrijski kapacitet je 6%, što je blisko teoretskoj vrednosti od 7,6% za  $MgH_2$ , a energija aktivacije za desorpciju je reda veličine  $10^2$  kJ/mol što ukazuje da difuzija kontroliše proces dehidriranja.

## ZAHVALNICA

Rad je finansijski pomognut od strane Ministarstva za nauku i zaštitu životne sredine Republike Srbije u okviru projekta 142027.

## LITERATURA

[1] A. Züttel, *Materials Today* **9** (2003) 24–33.

- [2] V.A. Yartys, I.R. Harris, V.V. Panasyuk, *J. Mater. Sci.* **37** (2) (2001) 219–240.
- [3] A. Züttel, *Naturwissenschaften* **91** (2004) 157–172.
- [4] L. Zaluski, A. Zaluska, J.O. Strom-Olsen, *J. Alloys Comp.* **253–254** (1997) 70–79.
- [5] A. Zaluska, L. Zaluski, J.O. Ström-Olsen, *Appl. Phys. A* **72** (2001) 157–165.
- [6] S. Bouaricha, J-P. Dodelet, D. Guay, J. Huot, R. Schulz, *J. Mater. Res.* **6** (10) (2001) 2893–2905.
- [7] N. Hanada, S. Orimo, H. Fujii, *J. Alloys. Comp.* **356–357** (2003) 429–432.
- [8] T. Fukunaga, K. Itoh, S. Orimo, H. Fujii, *Physica B* **311** (2002) 95–101.
- [9] F. von Zeppelin, H. Reule, M. Hirscher, *J. Alloys. Comp.* **330–332** (2002) 723–726.
- [10] J. Huot, G. Liang, S. Boily, A. Van Neste, R. Schulz, *J. Alloys Comp.* **293–295** (1999) 495–500.
- [11] A. Bassetti, E. Bonetti, A.L. Fiorini, J. Grbovic, A. Montone, L. Pasquini, M. Vittori Antisari, *Mat. Sci Forum* **453–454** (2004) 205–212.
- [12] A. Bassetti, E. Bonetti, L. Pasquini, A. Montone, J. Grbovic, M. Vittori Antisari, *Eur. Phys. J. B* **43** (2005) 19–27.
- [13] A. Montone, J. Grbovic, Lj. Stamenkovic, A.L. Fiorini, L. Pasquini, E. Bonetti, M. Vittori Antisari, *Mat. Sci. Forum* **518** (2006) 325–330.
- [14] G. Liang, J. Huot, S. Boily, R. Schulz, *J. Alloys Comp.* **305** (2000) 239–245.

## SUMMARY

### HYDROGEN DESORPTION FROM NANOSTRUCTURED MAGNESIUM HYDRIDE COMPOSITES

(Scientific paper)

Tanja P. Brdarić<sup>1</sup>, Ljiljana Lj. Stamenković<sup>2</sup>, Nikola B. Novaković<sup>3</sup>, Jasmina D. Grbović Novaković<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Nuclear Sciences "Vinča", Materials Science Laboratory, Belgrade

<sup>2</sup>Institute of Nuclear Sciences "Vinča", Laboratory for radioisotope, Belgrade

<sup>3</sup>Institute of Nuclear Sciences "Vinča", Laboratory for nuclear and plasma physics, Belgrade

The influence of 3d transition metal addition (Fe, Co and Ni) on the desorption properties of magnesium hydride were studied. The ball milling of  $MgH_2$ -3d metal blends was performed under Ar. Microstructural and morphological characterization were performed by XRD and SEM analysis, while the hydrogen desorption properties were investigated by DSC. The results show a strong correlation between the morphology and thermal stability of the composites. The complex desorption behavior (the existence of more than one desorption peak) was correlated with the dispersion of the metal additive particles that appear to play the main role in the desorption. The desorption temperature can be reduced by more than 100 degrees if Fe is added as additive. The activation energy for  $H_2$  desorption from the  $MgH_2$ -Fe composite is 120 kJ/mol, implying that diffusion controls the dehydration process.

Key words: Hydrogen storage • Nanostructured materials • Magnesium hydride • Catalysis • Morphology •

Ključne reči: Čuvanje vodonika • Nanostrukturni materijali • Magnezijum hidrid • Kataliza • Morfologija •