

Materiali z visoko entropijo – materiali prihodnosti

Tina Skalar, Marjan Marinšek

Materiali z visoko entropijo (angleško *High entropy materials, HEM*) so poznani že nekaj desetletij. Šele v zadnjih letih pa sta se povečala njihova prepoznavnost v svetu in zanimanje zanje tudi na raziskovalnem področju. Zadnje je v veliki meri posledica potrebe po iskanju novih materialov predvsem na področju izkoriščanja obnovljivih virov in razvoja za to potrebne infrastrukture. Materiale z visoko entropijo lahko uporabimo v najrazličnejše namene, povezane s katalizo, baterijami in podobnimi materiali za shranjevanje energije. Na tem mestu najbrž ni treba posebej poudarjati pomena tovrstnega razvoja za čim hitrejši in učinkovitejši zeleni prehod in s tem zmanjševanje odvisnosti od fosilnih goriv.

Življenje ljudi je v veliki meri odvisno od materialov, ki jih človeške združbe uporabljajo. Prav tako pa je tudi napredek človeške civilizacije odvisen od razvoja materialov (slika 1). V začetku so ljudje uporabljali predvsem materiale, ki so jih našli v naravi – od kamna, lesa, usnja in kosti do prvotnih površinsko lahko dostopnih kovin (zlata, srebra, bakra). Že v kameni dobi so ljudje z

obdelovanjem glin na osnovi alumosilikatov (soli aluminijevega in silicijevega oksida s kovino) pripravili materiale, ki so jih v tako imenovanem zelenem stanju z lahkoto oblikovali, po žganju (toplotni obdelavi) pa so iz njih lahko pripravili utrjene in uporabne izdelke (na primer posode za shranjevanje živil). Drugače povedano, v tistem času so začeli uporabljati posebej pripravljene kera-



Slika 1: Shema inženirstva materialov.

mične materiale. Kasneje so se ljudje naučili iz Zemljinega bogastva izločevati železo in baker ter ju ločeno uporabljati pri zadovoljevanju potreb vsakdanjega življenja. V bronasti dobi so bakru dodajali kositer in s tem dobili trajnejši in uporabnejši material. Železna doba, ki je sledila bronasti dobi, je postala zibelka jeklarske industrije. Orodje in orožje iz železa so izboljšali z dodatkom ogljika. S kopičenjem znanja so ljudje nato ugotovili, da je lastnosti končnega materiala mogoče izboljšati, če osnovnemu elementu v manjši količini primešajo tudi druge elemente (temu danes pravimo priprava zlitin). Ideja o mešanju različnih kovinskih sestavin tako ni tako nova, kot bi si mislili. Kdo bi verjel, da so že pred tisočletji poznali nekatere zakonitosti o mešanju različnih kovinskih elementov ali sestavin in tako ustvarjali končni material, ki je imel boljše lastnosti od prvotnih surovin. Različne železove, nikljeve in aluminijeve zlitine še vedno uporabljamo tudi danes. V zadnjem stoletju v metalurgiji prevladujejo posebna jekla, super zlitine, zlitine na osnovi titana in aluminija, kovinska stekla, intermetalne spojine, kompoziti ... Vendar pa vse bolj postaja jasno, da tudi ti materiali niso več uporabni v biomedicini, iz njih ni več mogoče izdelovati ultratankih elektronskih sestavnih delov in podobno.

Leta 2004 sta bila objavljena dva neodvisna znanstvena članka, kjer sta bila kot avtorja podpisana Yeh in sodelavci ter Cantor in sodelavci (Yeh, Chen, Lin in sod., 2004; Cantor, Chang, Knight in sod., 2004). V člankih opisujeta pripravo večkomponentne zlitine, sestavljene iz dvajsetih oziroma šestnajstih različnih elementov. Rezultati so bili presenetljivi, saj so namesto pričakovane steklaste faze dobili večfazni, kristalinični proizvod, ki je kazal krhkost. Prevladujoča faza je imela ploskovno centrirano kubično celico (PCK) (angleško *face-centered cubic*, FCC), kjer je bilo prisotnih veliko elementov, predvsem kovin prehoda. Pri tem so ugotovili, da je bilo skupno število faz v

sistemu manjše od ravnotežnega števila faz, izračunanim iz Gibbsovega faznega pravila. Entropija mešanja je namreč za zlitine, sestavljene iz petih ali več elementov, visoka, kar nakazuje tendenco nastajanja naključne trdne raztopine. Zaradi tega so tem zlitinam nadeli posebno ime – zlitine z visoko entropijo. V isti raziskavi so ugotovili tudi, da imajo tovrstni materiali izboljšane nekatere funkcionalne lastnosti: visoko trdoto, odpornost proti zmečkanju ter odpornost proti oksidaciji in obrabi. Posledično jih zato lahko uporabljamo v agresivnejših in bolj zahtevnih okoljih: na primer orodja, kalupe, matrice, korozijsko odporni deli z visoko trdoto v kemijskih tovarnah, livarnah, integriranih vezjih ...

Med materiale z visoko entropijo uvrščamo poleg zlitin z visoko entropijo (*high entropy alloys*, HEA) tudi keramiko z visoko entropijo (*high entropy ceramic*, HEC), okside z visoko entropijo (*high entropy oxides*, HEO), nitride z visoko entropijo, karbide z visoko entropijo in druge materiale z visoko konfiguracijsko entropijo.

Entropija je pojem, znan v termodinamiki, informatiki in tudi sociologiji. V védi o materialih z njim opisujemo urejenost sistemov. Kot sistem lahko, splošno gledano, obravnavamo katero koli okolje. Otroška soba na primer je lahko lepo pospravljena ali pa razmetana, neurejena. Atomi nekega materiala lahko sprva sestavljajo urejeno kristalno zgradbo, kateri z dodajanjem vse več in več različnih elementov narašča entropija, z drugimi besedami, zgradba z vsakim dodatkom postaja vse bolj neurejena. Prav za to pri materialih z visoko entropijo, poenostavljeno povedano, gre: z dodajanjem različnih elementov v že urejeni sistem povečujemo nered in s tem materialu povečamo entropijo (Brechtl, Liaw, 2021).

Po definiciji, ki temelji na sestavi, med materiale z visoko entropijo prištevamo tiste, ki vsebujejo vsaj pet glavnih elementov, katerih atomski delež se giblje od 35 do 5 odstotkov. Taki materiali imajo več tako

imenovanih glavnih elementov, ki so zastopani v večjem deležu (Zhou, Xiang, Dai, 2023). Druga definicija materialov z visoko entropijo pa izvira iz entropije mešanja (imenovane tudi konfiguracijske entropije) in Boltzmannove definicije entropije (enačba 1), kjer je k Boltzmannova konstanta, w pa termodinamska verjetnost (Zhou, Xiang, Dai, 2023).

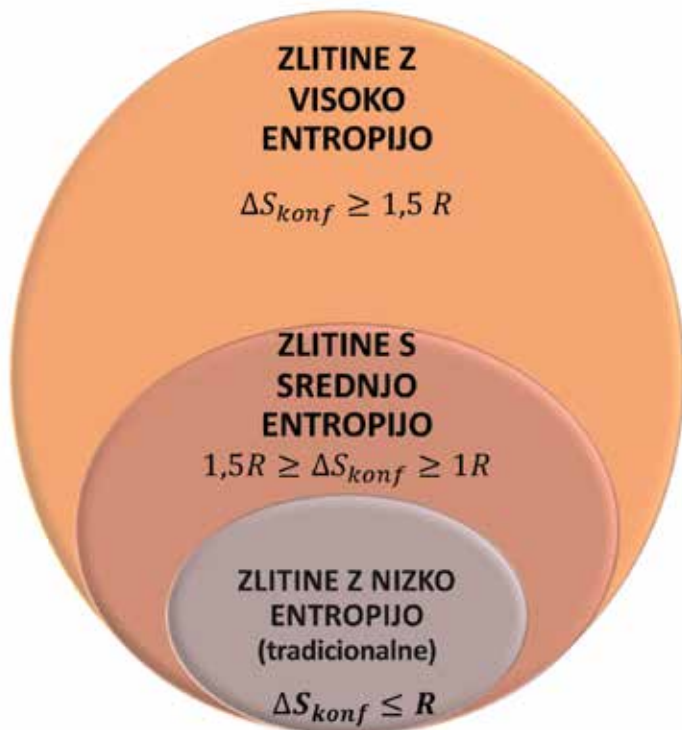
$$S = k \ln w \quad \text{(Enačba 1)}$$

Termodinamska verjetnost predstavlja celokupno število možnih mikroskopskih stanj, ki ustrezajo istemu makroskopskemu stanju. Če ta vrednost narašča, narašča tudi konfiguracijska entropija sistema. Za idealno trdno raztopino, sestavljeno iz i komponent, velja enačba 2, kjer je R plinska konstanta, n_i množina v molih in X_i molski delež posameznega elementa.

$$\Delta S_{mix} = -R[n_1 \ln X_1 + n_2 \ln X_2 + \dots + n_i \ln X_i] \quad \text{(Enačba 2)}$$

Entropija mešanja doseže največjo vrednost, ko je razmerje med elementi ekvimolarno. Profesor dr. Jien-Wei Yeh (Yeh, Chen, Lin in sod., 2004) z Nacionalne tajvanske univerze je izračunal konfiguracijske entropije zlitin, ki vsebujejo do trinajst različnih elementov v ekvimolarnem razmerju. Izračunana velikost entropij je bila podlaga za razvrstitev zlitin v tri razrede: zlitine z nizko entropijo (sem uvrščamo tradicionalne zlitine), zlitine s srednjo entropijo in zlitine z visoko entropijo (slika 2).

Na podlagi osnovnih raziskav so v nadaljevanju povzeli štiri glavne učinke za zlitine z visoko entropijo: i) termodinamski učinek (visokoentropijski učinek), ii) strukturni učinek



Slika 2: Razvrstitev zlitin z visoko entropijo glede na velikost entropije.

nek (popačenje mreže - kristalne strukture),
iii) kinetični učinek (počasna difuzija) in iv)
tako imenovani koktajl učinek (Yeh, 2016).

Visokoentropijski učinek

Visokoentropijski učinek (Pan, Liu, Tu in sod., 2023) je najpomembnejši (vendar ne edini) vzrok za tvorbo materialov z visoko entropijo. Spodbuja tvorbo trdnih raztopin z naključno sestavo in enostavno kristalno strukturo. Ravnotežno stanje v materialih z visoko entropijo dosežemo, ko je prosta energija mešanja (ΔG_{mix}) najmanjša. Odvisna je od entalpije mešanja (ΔH_{mix}) in entropije mešanja (ΔS_{mix}) po enačbi 3.

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T \Delta S_{mix}$$

(Enačba 3)

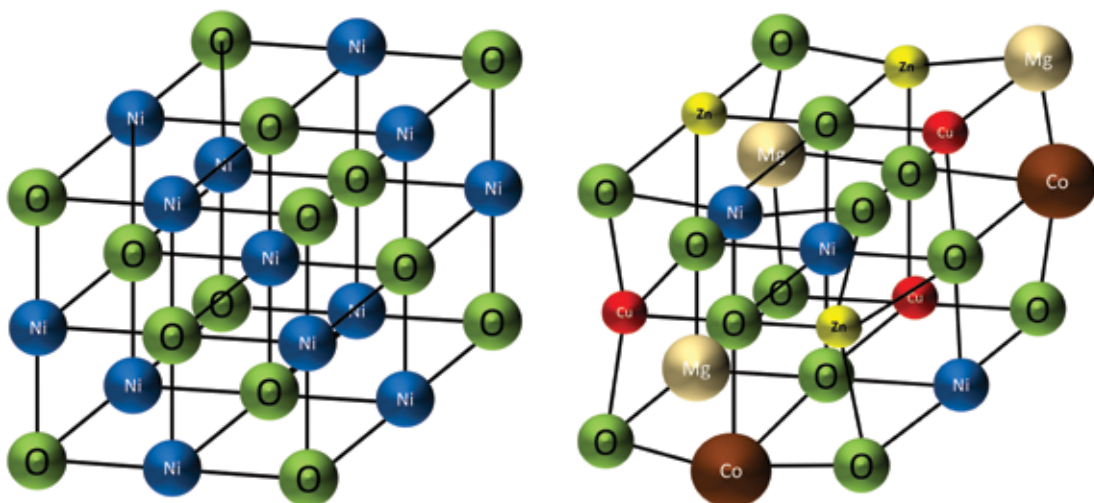
Visoka entropija mešanja znatno poveča območje medsebojne topnosti faz v končni večelementni trdni raztopini. Nastanek materialov z visoko entropijo v skladu z Gibbsovim faznim pravilom, ki pravi, da število faz v ravnotežju narašča s številom komponent, pravzaprav zmanjša število faz, pris-

tnih v sistemu. Trdna raztopina materialov z visoko entropijo je torej sestavljena iz elementa, ki je topilo, in enega ali več drugih elementov kot topljencev. V primeru materialov z visoko entropijo pa so elementi v ekvimolarnem razmerju in je težko med njimi določiti topljence in topilo. Raziskovalci so eksperimentalno potrdili, da je število dejansko tvorjenih faz pri materialih z visoko entropijo v resnici manjše od teoretične vrednosti, izračunane z Gibbsovim faznim pravilom (Zhang, Zhou, Hui, in sod., 2008; George, Raabe, Ritchie, 2019).

Strukturni učinek popačenja mreže

Materiali imajo različne razporeditve atomov v prostoru. Če je material kristaliničen, se neki osnovni vzorec razporeditve atomov, določen v majhnem volumenskem elementu – osnovni celici, ponavlja povsod v kristalu. Popačenje mreže (dejansko popačenje osnovne celice), ki se zgodi v materialih z visoko entropijo, je posledica kombinacije naključne porazdelitve gradnikov (na primer atomov) z različnimi velikostmi, njihove različne elektronegativnosti ali dolžine

Slika 3: a) Prikaz razporeditve ionov v nikljevem oksidu, b) prikaz možne razporeditve ionov v materialu z visoko entropijo ($Mg_{0,2}Co_{0,2}Ni_{0,2}Cu_{0,2}Zn_{0,2}O$).



medčlenskih vezi. Če primerjamo strukturo nikljevega oksida (NiO), ki je na sliki 3a, s strukturo materiala z visoko entropijo ($(\text{Mg}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Ni}_{0,2}\text{Cu}_{0,2}\text{Zn}_{0,2})\text{O}$) na sliki 3b, je razlika očitna. Pri nikljevem oksidu se iona elementov niklja (Ni^{2+}) in kisika (O^{2-}) izmenično vgrajujeta v strukturo, da se uravnava njun nasprotni naboj. Razdalje med gradniki so zato dobro definirane ne glede na to, v kateri smeri opazujemo takšen kristal. Razporeditev gradnikov v nikljevem oksidu je taka, da lahko osnovni ponavljajoči vzorec opišemo s kubično kristalno strukturo z dobro definirano dolžino roba osnovne celice. Pri dodajanju drugih elementov, ki so sicer glede na oksidacijsko stanje podobni, pa se struktura deformira (popači). V tem primeru (slika 3b) se v strukturo na mesto, kjer je bil prej nikljev ion, vgrajujejo drugi kovinski ioni z različnim polmerom (lahko večjim ali manjšim) glede na nikelj.

Ioni se razporedijo tako, da zadostijo potrebam po uravnavanju nasprotnega naboja. Hkrati pa tekmujejo med gradniki odbojne in privlačne sile, ki so odvisne tudi od velikosti posameznih ionov in njihovega naboja. Končni rezultat je popačena kristalna mreža in posledično nastanek tako imenovane napete kristalne strukture, kar ima za posledico tudi spremenjene funkcionalne lastnosti materiala. Popačena mreža (napeta kristalna struktura) je ovira za potovanje dislokacij, kar zvišuje trdnost in znižuje duktilnost takšnega materiala. (Duktilnost je lastnost materiala, da prenese plastično deformacijo, ne da bi se zlomil. Večjo deformacijo kot je material sposoben prenesti brez preloma zaradi krhkosti, bolj je duktilen. Duktilnost se največkrat meri pri zlitinah in ostalih konstrukcijskih elementih.)

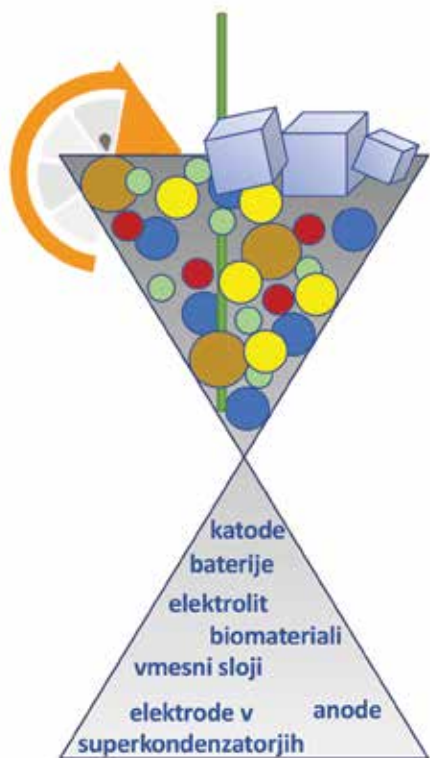
Hkrati pa popačena mreža poslabša toplotno odpornost materiala ter zniža električno in toplotno prevodnost materialov z visoko entropijo. V skrajnem primeru sta zaradi prevelikih razlik v velikosti ionov možna tudi porušitev kristalne strukture in nastanek amorfnе faze.

Kinetični učinek upočasnjene difuzije *(«sluggish diffusion effect»)*

V materialu se z difuzijo velikega števila atomov raznovrstnih elementov tvorijo nove faze. Pri tem sodelujejo praznine (vakance), ki so del realne zgradbe kristalov in so kot takšne potrebne za substitucijsko difuzijo. Vsaka taka praznina močno zviša entropijo mešanja in hkrati zvišuje tudi konfiguracijsko entalpijo, kar pri določeni temperaturi in koncentraciji zmanjša prosto energijo mešanja (enačba 3). Ko konfiguracijska entropija mešanice narašča, se prosta energija tvorbe trdne raztopine zmanjša. Takšen proces je spontan oziroma je tvorba materialov z visoko entropijo lažja, še posebej pri povišanih temperaturah. Koeficienti hitrosti difuzije v različnih sistemih, ki jih je izračunal Yeh, si sledijo v razmerju: zlitine z visoko entropijo < nerjavna jekla < čiste kovine (Yeh, 2006). Ugotovitev poudarja pomen počasne difuzije za nadzorovani nastanek faz v materialih z visoko entropijo.

Učinek koktajla

Za pojasnitev tega učinka se bomo podali v svet koktajlov, kjer so raziskovalci tudi dobili navdih za ime. V svetu barmanstva so komponente večinoma v tekočem agregatnem stanju (z izjemo ledu ali sadja). Vsaka sestavina ima svoj okus, vonj in barvo, torej individualne lastnosti. Mešanje z drugimi sestavinami pa ima za posledico popolnoma novo barvo, okus in končni videz. Izkušeni barman ve, da je izbira primernih sestavin in njihovega razmerja ključna za zadovoljiv končni izdelek (koktajl). Torej lahko s spremembo samo teh dveh spremenljivk vplivamo na končne lastnosti materiala. Pri inženirstvu materialov z visoko entropijo je zgodba zelo podobna. V obeh primerih gre za učinek sinergije, kjer mešanje posameznih sestavin ustvari materiale z visoko entropijo s funkcionalnimi lastnostmi, ki presega funkcionalne lastnosti vsote posameznih sestavin. Rezultat učinka koktajla so tako izboljšani novi materiali z zelo široko



Slika 4: Mešanje različnih komponent, prikazan s primerom koktajla, in nekateri primeri uporabe tako dobljenih materialov.

možnostjo uporabe: na primer kot anodni materiali, trdni elektroliti, katodni materiali v baterijah, vmesni sloji, kot elektrode v superkondenzatorjih, biomateriali, katalizatorji ... (slika 4).

Prav velik nabor elementov, včasih sicer nekompatibilnih, nam omogoča kombinacije, ki rezultirajo v materialih z zelo različnimi končnimi funkcionalnimi lastnostmi.

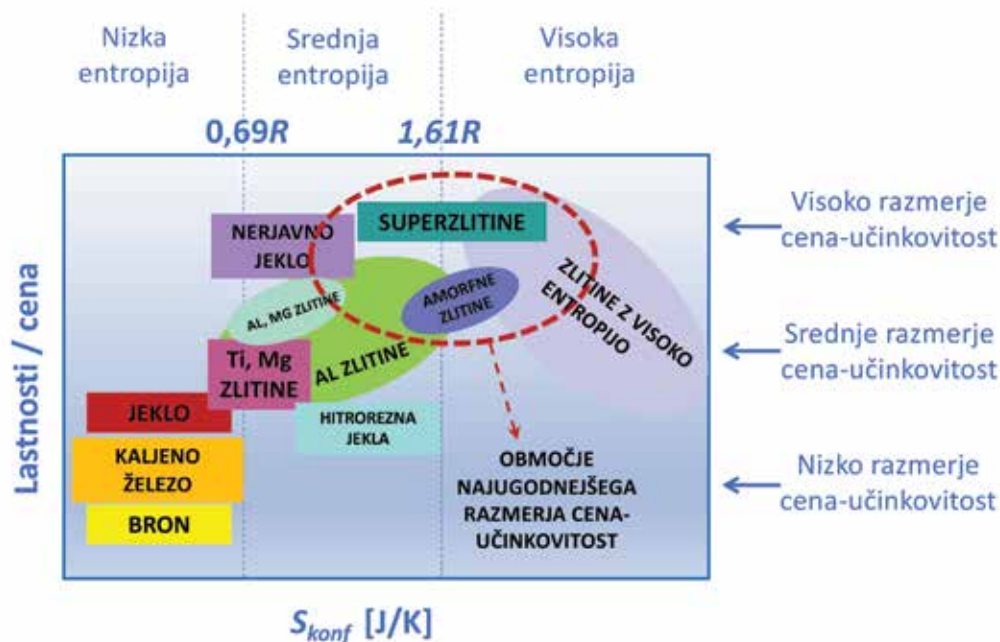
Sinteze

Za sintezo materialov z visoko entropijo uporabljajo različne postopke, med katerimi so najpogostejši: sinteze v trdnem, mokre sinteze (sol-gel sinteze), priprava z legiranjem, laserska ablacija, elektrokemijska sinteza in še vrsto drugih. Nešteto možnosti priprave materialov z visoko entropijo

pomenijo nešteto možnih poskusov in sintez, kar je lahko v laboratoriju časovno zelo potratno in cenovno negospodarno. Pri pripravi materialov z visoko entropijo zato še posebej pride do veljave tako imenovano krojenje končnih materialov z uporabo strojnega učenja (*machine learning*, ML) (Zhou, Xiang, Dai, 2023) in analizo podatkov. Prav zapletene kombinacije sestav in mikrostruktur povzročajo težave pri izbiri in načrtovanju materialov. Tradicionalna pot inženirstva materialov z zelo široko shemo poskusov in napak je v tem primeru ekonomsko manj učinkovita. Potrebe po drugačni vrsti »eksperimentiranja« so leta 2011 sprožile nastanek tako imenovane Iniciative za genom materialov (*Materials Genome Initiative*, MGI) (Materials Genome Initiative | WWW.MGI.GOV). S tem se je odprl nov vzorec načrtovanja, oblikovanja, razvoja in uporabe materialov s pomočjo strojno generiranih eksperimentov, ki temelji na računalniškem modeliranju in virtualni izvedbi eksperimentov. Dostopnost naprav z večjimi računskimi zmogljivostmi in razvoj umetne inteligence sta namreč tudi na področju inženirstva materialov omogočila razvoj pri načrtovanju novih materialov z razvojem vzporednih simulacij s pomočjo strojnega učenja. Zbirke podatkov o materialih z visoko entropijo so za uporabo v visokozmogljivih modelih sicer še v fazi razvoja. So pa na primer pri karbidih z visoko entropijo že izvedli simulacije z metodo teorije funkcionalne gostote (*Density functional theory*) kot eno izmed tehnik strojnega učenja. V zadnjem primeru je raziskovalce zanimalo predvsem, ali je določeno sestavo karbidov z visoko entropijo možno tudi dejansko sintetizirati in pod kakšnimi pogoji, ter v nadaljevanju fazna obstojnost pri ognjevzdržnih zlitinah z visoko entropijo.

Uporaba

Kljub dejstvu, da je od odkritja materialov z visoko entropijo do danes minilo razmeroma malo časa, materiale z visoko entropijo tudi

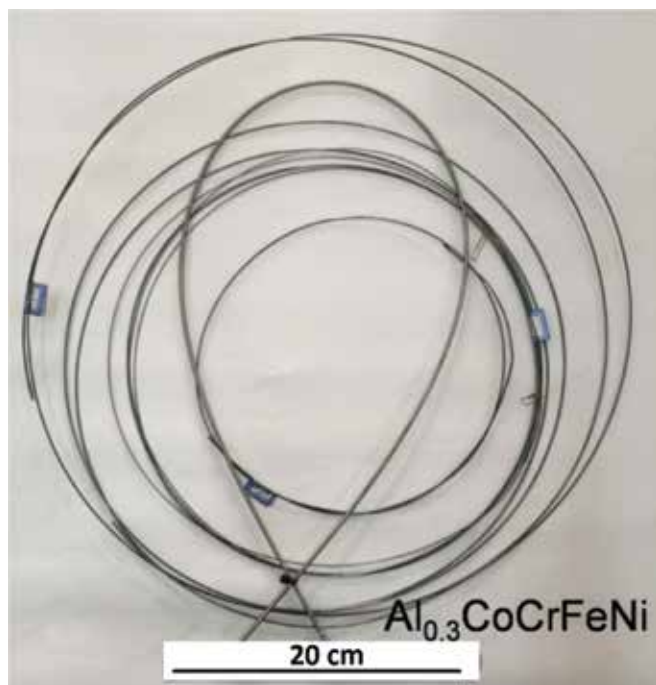


Slika 5: Razmerje med ceno in lastnostmi najpogostejših materialov z različno stopnjo entropije.

že industrijsko proizvajajo. Zaradi potreb po vedno novih izboljšanih materialih so inženirji hitro prepoznali prednosti in kakovost materialov z visoko entropijo ter jih vključili v različne aplikacije. Uporabi materialov z visoko entropijo ne nazadnje daje prednost tudi razmerje med funkcionalnimi lastnostmi končnih materialov ter njihovo ceno (slika 5), ki je za materiale z visoko entropijo zelo ugodno. Ena izmed najperspektivnejših aplikacij materialov z visoko entropijo je priprava tako imenovanih tankih plasti. Tanke plasti zlitin z visoko entropijo tako uporabljajo kot prevleke, odporne proti obrabi in povišani temperaturi, ter kot trde prevleke za rezalna orodja. Še vedno so postopki priprave materialov z visoko entropijo nekoliko nedodelani, kar omejuje njihovo širšo uporabo v večjih sistemih, zato se v tem trenutku materiali z visoko entropijo uporabljajo v bolj specialnih, majhnih in dragih aplikacijah.

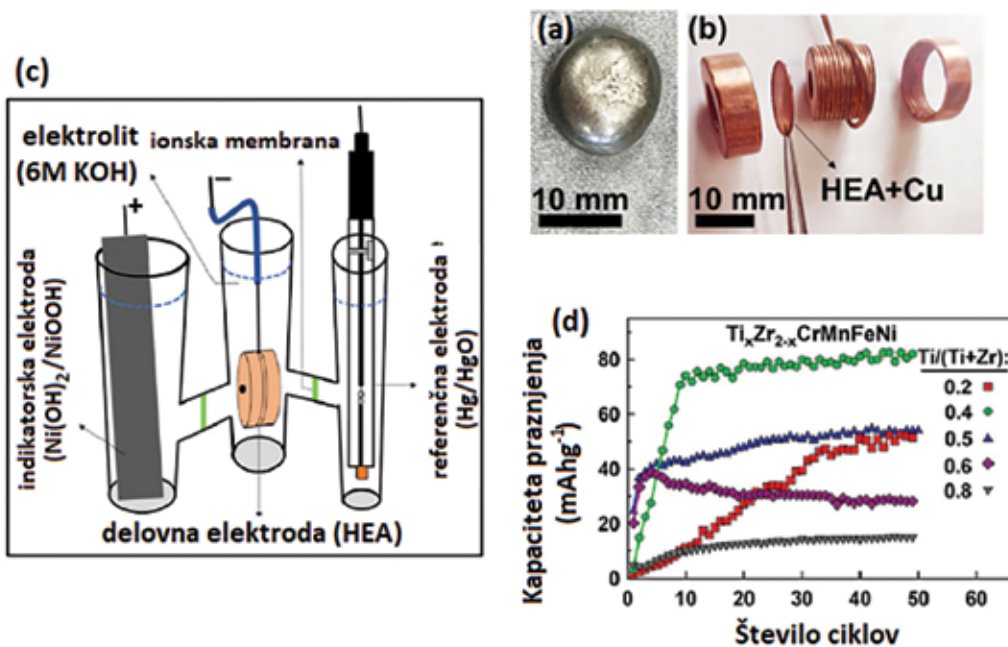
Tudi na področju priprave vlaken imajo ma-

teriali z visoko entropijo zavidljive lastnosti. Tukaj prevladujejo predvsem njihove dobre mehanske lastnosti, kjer izstopata visoka trdnost in zadovoljiva duktilnost, kar se je pokazalo tudi pri $\text{Al}_{0,3}\text{CoCrFeNi}$ (slika 6). Li in sodelavcem (Li, Li, Feng in sod., 2017) iz Laboratorija za napredne kovine in materiale Univerze v Pekingu je uspelo pripraviti vlakna z omenjeno sestavo s premerom od 1 do 3,15 milimetra in izredno natezno trdnostjo ≈ 1200 megapaskalov pri temperaturi 77 kelvinov (-196 stopinj Celzija), ki pa z zniževanjem temperature še naraste. Študije (Lu, Wang, Chen in sod., 2015; Wang, 2022) potrjujejo še druge izjemne lastnosti zlitin z visoko entropijo v primerjavi z običajnimi zlitinami: visoko toplotno obstojnost, odpornost proti utrujanju, obrabi in koroziji, večjo trdoto ter izjemne lastnosti pri povišanih in nizkih (krio)temperaturah. Možnosti uporabe teh materialov se zaradi tega še povečajo. Uspešno kljubujejo ekstremnim razmeram, ki smo jim priča



Slika 6: *Vlakna, pripravljena iz $Al_{0.3}CoCrFeNi$ (Li, Li, Feng in sod., 2017).*

Slika 7: *a) Slika ingota, zlitine z visoko entropijo, b) nikelj-metalhidridna anoda, c) shema elektrokemijske celice s tremi elektrodami in d) značilnosti (odvisnost kapacitete praznjenja od števila ciklov) zlitin z visoko entropijo z različnim razmerjem elementov (Edalati, Mohammadi, Li in sod., 2022).*



v jedrski in vesoljski tehnologiji ter v turbinskih sistemih.

Zlitinam z visoko entropijo se odpirajo možnosti uporabe tudi pri shranjevanju energije, na primer shranjevanju vodika v obliki hidridov in shranjevanju energije v baterijah. Zlitine z visoko entropijo so primerni kot novi anodni materiali za nikelj-metalhidridne (Ni-MH) baterije (Edalati, Mohammadi, Li in sod., 2022). V tem primeru so uporabili $\text{Ti}_x\text{Zr}_{2-x}\text{CrMnFeNi}$ z različnim molskim razmerjem med titanom in cirkonijem. Najboljše karakteristike sta pokazala materiala z razmerjem $\text{Ti}/(\text{Ti}+\text{Zr})$ 0,4 in 0,5 (slika 7d). Take ugotovitve na široko odpirajo vrata materialom z visoko entropijo tudi na področju baterij.

Krojenje materialov lahko prikažemo z dvema stranema medalje. Ena stran medalje materialov z visoko entropijo ponuja skoraj neskončno možnost kombinacij komponent ter posledično priprave neskončno različnih inovativnih mikrostruktur. Drugo stran pa predstavlja prav toliko različnih funkcionalnih lastnosti in možnosti uporabe materialov z visoko entropijo, ki so posledica sinteznih parametrov prve strani. Odvisnost je tudi v obratni smeri, saj s ciljanjem na določene lastnosti prilagajamo sestavo materiala. Prekletstvo ali izziv? Oboje. Obe strani medalje sta med seboj povezani in nerazdružljivi v nadaljnjem raziskovalnem delu. Lahko bi rekli, da imamo na področju materialov z visoko entropijo še veliko možnosti za raziskovanje, več, kot se jih trenutno lahko zavedamo.

Literatura:

- Brecht, J., Liaw, P. K., 2021: *High-entropy materials: Theory, experiments, and applications*. Springer International Publishing.
- Cantor, B., Chang, I. T. H., Knight, P., in sod., 2004: *Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys*. *Materials Science and Engineering: A* 375–377 (1): 213–218, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>.
- Edalati, P., Mohammadi, A., Li, Y., in sod., 2022:

High-entropy alloys as anode materials of nickel – metal hydride batteries. *Scripta Materialia*, 209: 114387, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2021.114387>

George, E. P., Raabe, D., Ritchie, R. O., 2019: *High-entropy alloys*. *Nature Reviews Materials*, 4 (8): 515–534, doi: [10.1038/s41578-019-0121-4](https://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4).

Li, D., Li, C., Feng, T., in sod., 2017: *High-entropy $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ alloy fibers with high tensile strength and ductility at ambient and cryogenic temperatures*. *Acta Materialia*, 123 (5): 285–294, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.10.038>.

Lu, Z. P., Wang, H., Chen, M. W., in sod., 2015: *An assessment on the future development of high-entropy alloys: Summary from a recent workshop*. *Intermetallics*, 66: 67–76, doi: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2015.06.021>.

Materials Genome Initiative | WWW.MGI.GOV.

Pan, Y., Liu, J.-X., Tu, T.-Z., in sod., 2023: *High-entropy oxides for catalysis: A diamond in the rough*. *Chemical Engineering Journal*, 451 (2): 138659, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138659>.

Wang, Y., 2022: *Processing and properties of high entropy carbides*. *Advances in Applied Ceramics*, 121 (2): 57–78, doi: [10.1080/17436753.2021.2014277](https://doi.org/10.1080/17436753.2021.2014277).

Yeh, J.-W., Chen, S.-K., Lin, S.-J., in sod., 2004: *Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes*. *Advanced Engineering Materials*, 6 (5): 299–303, doi: <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>.

Yeh, J.-W., 2006: *Recent progress in high-entropy alloys*. *European Journal of Control*, 31 (6): 633–648, doi: [10.3166/acsm.31.633-648](https://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648).

Yeh, J.-W., 2016: *Overview of High-Entropy Alloys. V: Gao, M. C., Yeh, J.-W., Liaw, P. K., in sod., uredniki: High-Entropy Alloys: Fundamentals and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 1–19.

Zhang, Y., Zhou, Y., Hui, X., in sod., 2008: *Minor alloying behavior in bulk metallic glasses and high-entropy alloys*. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, 51 (4): 427–437, doi: [10.1007/s11433-008-0050-5](https://doi.org/10.1007/s11433-008-0050-5).

Zhou, Y., Xiang, H., Dai, F.-Z., 2023: *High-Entropy Materials: From Basics to Applications*. Wiley.

Slovarček:

Zlitina. Zmes dveh ali več kovin, ki jih najpogosteje pripravljajo s taljenjem in mešanjem.

Intermetalna spojina. Nova samostojna spojina, ki se tvori pri mešanju dveh ali več elementov. Primer intermetalne spojine je cementit (Fe_3C) v faznem diagram Fe-C (železo-ogljik).

Ekvimolarnost. Enaka množina komponent.

Elektronegativnost. Zmožnost atoma, da privlači elektrone. Bolj kot je atom elektro-negativen, bolj privlači elektrone. Najbolj elektronegativen element je fluor.

Duktilnost. Lastnost materiala, da prenese plastično deformacijo brez zloma.



Tina Skalar je docentka na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo Univerze v Ljubljani. Leta 2008 je diplomirala, leta 2014 pa doktorirala na temo gorivnih celic. V času doktorskega študija se je ukvarjala s sintezo, karakterizacijo in pripravo materialov za gorivne celice s trdnim elektrolitom, njeno konstrukcijo in načrtovanjem ter postavitvijo testnega sistema. Trenutno je zaposlena na Katedri za materiale in polimerno inženirstvo na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo na Univerzi v Ljubljani. Poleg raziskovalnega opravlja tudi pedagoško delo pri predmetih s področja materialov, kjer je mentorica diplomskim in magistrskim študentom. Vključena je v programsko skupino Napredna anorganska kemija in projekte s področja mikroplastike. Raziskuje sintezo perovskitnih materialov, določevanje parametrov prašnih eksplozij in karakterizacijo materialov (mikroplastike, lesa, titanovega dioksida), predvsem z uporabo termooanalitskih tehnik, mikroskopije in drugih metod, ki omogočajo študij morfologije.



Marjan Marinšek je diplomiral leta 1992, magistriral leta 1996 in dokončal doktorat leta 1998 z nalogo Kompozitni anodni materiali za visokotemperaturne gorivne celice s trdnim elektrolitom. Vsi nazivi so bili podeljeni na Univerzi v Ljubljani. Po dokončanem doktoratu je opravil podoktorsko izobraževanje leta 2005 na Oddelku za raziskovanje materialov v Nacionalnem laboratoriju Risoe na Danskem, leta 2006 na Katedri za energetske sisteme na Tehniški univerzi v Münchnu v Nemčiji in leta 2018 na Oddelku za gradbeništvo in geodezijo Fakultete tehniških znanosti na Univerzi v Novem Sadu.

Trenutno je Marjan Marinšek zaposlen kot redni profesor za področje materialov na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo Univerze v Ljubljani.

Pomembna strokovna področja delovanja Marjana Marinška:

- Priprava in karakterizacija novih keramičnih in kermetnih materialov: predvsem materiali za tehnologijo SOFC, na primer Ni-YSZ, Ni-GDC, Ni-SDC, LSM, dopirani lantanovi galati in kisikovi ionski prevodniki, na primer YSZ, GDC, SDC.
- Raziskave minimizacije depozicije ogljika na anodnem materialu SOFC.
- Sinteza nanodelcev ZnO ter priprava kompozitov ZnO/polimer.
- Nanodisperzije Pd-C kot katalizatorji za elektrooksidacijo mravljične kisline.
- Alkalno-karbonatna reakcija v hidravličnih vezivih, kot je na primer beton. Staranje betonov, opis degradacijskih mehanizmov v različnih betonih in maltah.
- Priprava različnih perovskitnih materialov.