

VAKUUMSKO INDUKCIJSKO TALJENJE

Franc Zupanič

Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru, Smetanova 17, 2000 Maribor

POVZETEK

Pri vakuumskem indukcijskem taljenju talimo kovinske materiale z električno indukcijo v vakuumu. Postopek je primeren skoraj za vse kovinske materiale, prednostno pa se uporablja za primarno taljenje zlitin, ki vsebujejo zelo reaktivne elemente, saj zagotavlja njihov dober izkoristek ter ponovljivo doseganje načrtovane kemijske sestave. Prav tako je nepogrešljiv za visokotehnoško zahtevne zlitine, kjer se zahteva izredno majhna vsebnost plinov, lahkoizparljivih elementov ter majhen delež nekovinskih vključkov. Kljub številnim dobrim stranem vakuumskega indukcijskega taljenja kakovost ulitkov po taljenju in litju ni zadostna pri najzahtevnejših rabah, zato se v teh primerih ulitki ponovno pretalijo (npr. z vakuumskim obločnim taljenjem, taljenjem z elektronskim curkom) in nato preoblikujejo.

Vacuum induction melting

ABSTRACT

Vacuum induction melting (VIM) is used for melting of metallic materials by using electrical induction under vacuum conditions. The process is appropriate for almost all metallic materials and is preferentially used for primary melting of alloys that contain very reactive elements (superalloys, titanium alloys, tool and magnetic steels). It assures high yield of reactive alloying elements and reproducible attainment of required chemical composition. VIM is also inevitable for production of demanding high-performance alloys that must contain very small amounts of gases, harmful trace elements and non-metallic inclusions. Despite numerous advantages of VIM the quality of castings is often insufficient for highly demanding applications, therefore castings must be remelted (e. g. by vacuum arc remelting and electron beam melting) and exposed to forming operations.

1 UVOD

Vakuumsko indukcijsko taljenje je postopek taljenja kovin z električno indukcijo v vakuumu. Čeprav segajo začetki vakuumskega indukcijskega taljenja že v konec devetnajstega stoletja ⁽¹⁾, je postal postopek industrijsko pomemben šele v petdesetih letih dvajsetega stoletja. Pomemben razlog za to je bil tudi razvoj zelo učinkovitih vakuumskih črpalk, ki so jih razvili v okviru ameriškega jedrskega programa ⁽²⁾. Predvsem pa so se povečale zahteve pri izdelavi zlitin, odpornih proti visokim temperaturam, in superzlitin¹, ki vsebujejo velike količine reaktivnih elementov, kot sta aluminij in titan, in ki morajo imeti veliko trajnost in zanesljivost. Zaradi uporabe vakuumskega indukcijskega taljenja sta se zmogljivost in vzdržljivost reaktivnih motorjev zelo povečala ^(3,4). To je bilo zelo pomembno tako za vojaško kot tudi za civilno letalstvo. Uspeh pri proizvodnji superzlitin z vakuumskim indukcijskim taljenjem je spodbudil tudi proizvodnjo drugih strateško pomembnih zlitin, ki se uporabljajo v

jedrskih reaktorjih ter v elektroniki. Še dodatna dobra stran je, da se zaradi majhnih izgub elementov uporablja pri izdelavi drugih zlitin, pri katerih odsotnost plinov in nekovinskih vključkov ne igra tako pomembne vloge.

Vakuumsko indukcijsko taljenje je najbolj fleksibilno med postopki vakuumskega taljenja, ker omogoča neodvisno spreminjanje temperature, tlaka in masnega transporta. Slednje omogoča mešanje taline, ki jo povzročajo inducirani tokovi. Zato lahko pri vakuumskem taljenju ponovljivo dosežemo želeno kemijsko sestavo taline v zelo ozkih tolerančnih mejah; in to ne le deleže želenih zlitinskih elementov, temveč tudi deleže koristnih in škodljivih elementov v sledovih.

Zlitine, ki jih vakuumsko indukcijsko talimo, so:

- nikljeve superzlitine ⁽²⁻⁶⁾
- kobaltove zlitine ^(3,4)
- bakrove zlitine, predvsem malolegirane s Cr, Zr ⁽⁷⁾
- orodna jekla ⁽³⁾
- nerjavna jekla ⁽⁸⁾
- magnetne zlitine ⁽³⁾
- titanove zlitine ⁽⁹⁾
- intermetalne zlitine ⁽¹⁰⁾
- posebne aluminijeve zlitine ⁽¹¹⁾

2 VAKUUMSKE INDUKCIJSKE PEČI

Vakuumske indukcijske peči se močno razlikujejo po velikosti ^(2,5). Na razpolago so majhne laboratorijske peči (slika 1 a), v katerih lahko stalimo le nekaj kilogramov zlitine, do velikih industrijskih peči (slika 1 b), ki imajo kapaciteto tudi do 60 t. Shematičen prikaz vakuumске komore je na sliki 2.

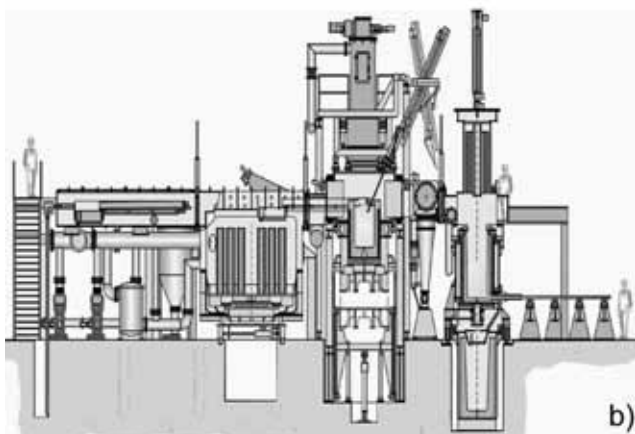
Vakuumska komora je navadno iz vodno hlajene jeklene konstrukcije. Pri manjših pečeh je enokomorna, to pomeni, da poteka taljenje in litje v isti komori, pri večjih pa je navadno dvokomorna, kjer potekata taljenje in litje v različnih komorah. Na sliki 1b je prikazana celo trikomorna izvedba, kjer je v sredinski komori indukcijska peč, levo je komora za klasično litje ingotov, desno pa komora za horizontalno kontinuirno litje.

Primeren vakuum se doseže navadno z **mehanskimi vakuumskimi črpalkami**, ki imajo hitrost črpanja do 5 000 L/s. Tlak v komori je v območju srednjega vakuumu (10^{-3} – 10^{-1} mbar). Pred začetkom

¹ Superzlitine so zlitine, ki imajo veliko trdnost pri povišani temperaturi ter so hkrati odporne proti visokotemperaturni koroziji. Med te spadajo zlitine na osnovi niklja, železa in niklja ter kobalta.



a)

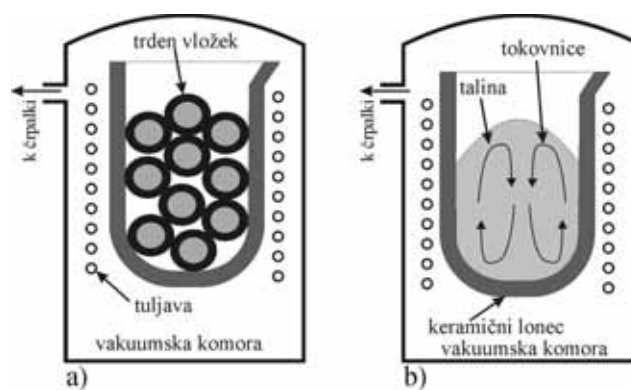


b)

Slika 1: Vakuumski indukcijski peči. a) Laboratorijska peč na Inštitutu za tehnologijo materialov, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru. b) Shematičen prikaz šesttonske vakuumske indukcijske peči, v kateri je mogoče vakuumsko litje ingotov in horizontalno kontinuirno litje (takšno peč imajo v podjetju Ross & Catherall, Sheffield, Velika Britanija).

vakuumiranja se peč založi s trdnim **vložkom**, ki je sestavljen iz deviškega vložka ter povratnega materiala. Pri izdelavi bakrovih zlitin je lahko vložek izjemoma tudi tekoč, kar bistveno zmanjša porabo energije za taljenje ⁽⁷⁾.

Talilni lonci so iz oksidne keramike, najpogosteje iz MgO, ZrO₂ in Al₂O₃. Manjši lonci so iz enega dela, nekoliko večji pa so obzidani z opeko. Pogosto se lonci izdelajo tudi z nabijanjem (phanjem) ter se morajo sintirati na mestu pred prvim taljenjem. **Moč** indukcijskih peči se giblje v širokem razponu od 30 kW ter tudi do 10 MW. **Frekvenca** izmeničnega toka je lahko mrežna (50 Hz), srednja (nekaj tisoč hercov) in visoka (nad 10 000 Hz). Uporabljena frekvenca je odvisna od vložka, ki ga uporabljamo, ter od stopnje mešanja taline, ki jo želimo doseči. Velja, da je višja frekvenca primerna za taljenje drobnejšega vložka,

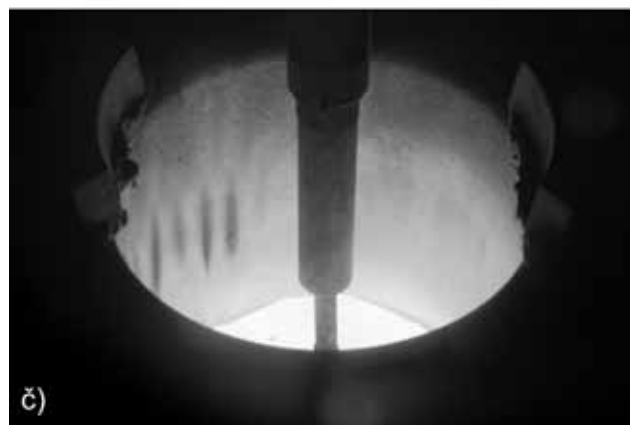


a)

b)



c)



č)

Slika 2: Vakuumska indukcijska peč: Shematičen prikaz delovanje vakuumske indukcijske peči. Taljenje poteka v vakuumski komori pri tlaku 10^{-3} – 10^{-2} mbar. a) V vložku nastanejo vrtinčni tokovi, ki so zaradi kožnega pojava zgoščeni na površini vložka. b) Po stalitvi vrtinčni tokovi povzročijo dobro mešanje taline. Talilni lonec srednjefrekvenčne vakuumske indukcijske peči c) pri segrevanju vložka v obliki palic in č) po stalitvi; v talino je potopljen termoelement.

medtem ko je mešanje taline pri višji frekvenci manj intenzivno.

3 PROCESI PRI TALJENJU

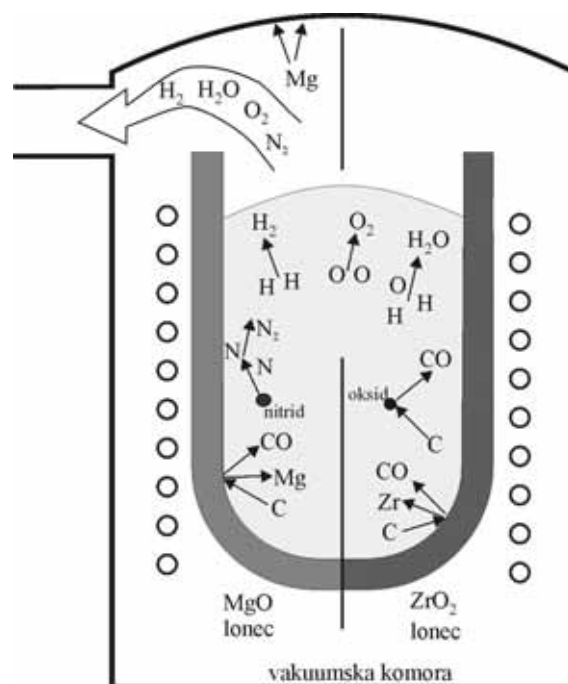
Pri segrevanju in taljenju vložka teče skozi ovoje vodno hlajene tuljave (slika 2) izmenični električni tok. V tuljavi nastane spremenljivo in nehomogeno



Slika 3: Spreminjanje tlaka v vakuumski komori vakuumske indukcijske peči pri taljenju nikljeve superzlitine

magnetno polje, ki v električno prevodnem vložku inducira vrtilne tokove. Zaradi njih se sprošča Joulova energija, ki segreva vložek. Zaradi kožnega pojava (skin efekta) vrtilni tokovi tečejo pretežno po površini kosov, pri čemer je prodorna globina obratno sorazmerna frekvenci. Po stalitvi elektromagnetne sile povzročajo mešanje taline (slika 2 b). V novejšem času je eden izmed pomembnih ciljev napovedati in obvladovati tokove v talini, zato se uporabljajo računalniške simulacije, pri katerih je treba hkrati reševati Maxwellove in Navier-Stokesove enačbe. Mešanje taline ima več pozitivnih učinkov: raztapljanje zlitinskih elementov je hitrejšo, talina je bolj homogena, odstranjevanje plinov in nekovinskih vključkov je hitrejšo.

Procese, ki potekajo pri taljenju nikljevih superzlitin, lahko spremljamo, če merimo skupni tlak v komori kakor tudi koncentracijo elementov (slika 3). Najpomembnejši procesi potekajo med rafinacijo. Shematično jih prikazuje slika 4. Pri tem je temeljni proces nastajanje CO. Plin CO lahko nastaja z reakcijo ogljika z raztopljenim kisikom, ob redukciji oksidnih vključkov v talini ter pri reakciji ogljika z obzidavo peči. Tako se deleža ogljika in kisika v talini lahko močno zmanjšata. V začetku CO izhaja iz taline v obliki mehurčkov, pravimo, da talina vre. Vrenje je lahko tako močno, da izvrže talino iz lonca. Da bi to preprečili, je treba ob intenzivnejšem vrenju povečati tlak v komori. V zadnji stopnji rafinacije se CO izloča iz taline z desorpcijo s površine. Drugi raztopljeni plini (npr. vodik in dušik) se prav tako izločajo iz taline. Pri tem je koncentracija raztopljenega plina (npr. vodika) sorazmerna delnemu tlaku plina v komori (v primeru vodika delnemu tlaku H_2). To pomeni, da bo v talini tem manj raztopljenega plina, čim manjši bo tlak v komori. Nizek tlak v komori tudi olajša izparevanje lahkohlapljivih elementov, zato lahko koncentracijo elementov, kot so Pb, Bi, Mg,



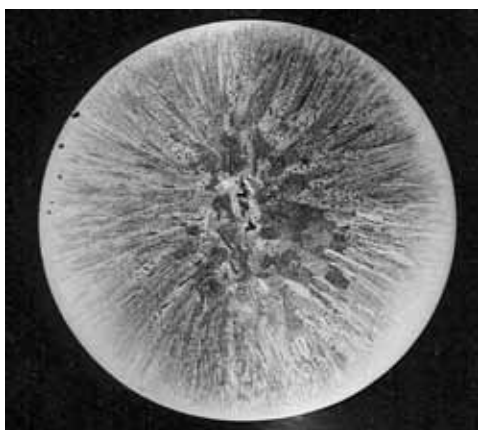
Slika 4: Shematičen prikaz procesov, ki potekajo pri rafinaciji nikljeve superzlitine, če jo talimo v loncu iz MgO oziroma ZrO_2

močno zmanjšamo. Zaradi redukcije oksidov z ogljikom se močno zmanjša tudi delež nekovinskih vključkov v talini, vendar njihovega deleža ne moremo povsem odpraviti. Namreč, ogljik reagira tudi z materialom lonca, zato postane le-ta na stiku s talino porozen, in delčki (oksidi) se luščijo v talino. Ko koncentracija kisika v talini pade pod določeno mejo, se dodajo reaktivni elementi.

To so elementi, ki tvorijo bolj termodinamsko stabilne okside, ki jih ogljik ne more reducirati (12). Preverjanju kemijske sestave sledi litje. Pri nikljevih superzlitinah je najpogostejše klasično litje drogov, ki imajo okrogel prečni prerez ter premer od 30 mm do 300 mm. V zadnjem času poteka intenziven razvoj kontinuirnega litja nikljevih in kobaltovih superzlitin,



Slika 5: Kokile za litje drogov



Slika 6: Makrostruktura ulitega droga. V sredini je lunker. Prevladujejo usmerjena kristalna zrna, le na sredi je nekaj enakoosnih.

medtem ko je kontinuirno litje bakrovih zlitin že dolgo standard.

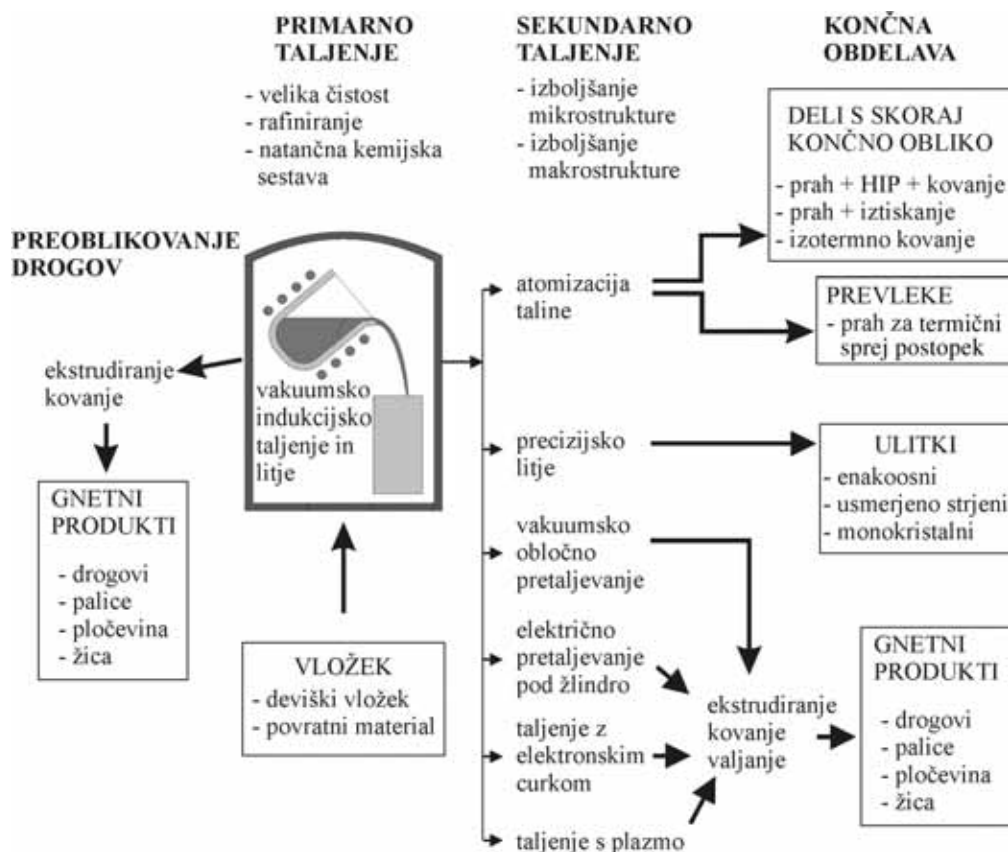
Pri klasičnem litju drogov je makrostruktura sestavljena iz grobih usmerjenih zrn z nekaj enakoosnimi v sredini (slika 6). V njej se pogosto pojavlja lunker, kjer se nahajajo nekovinski vključki in druge nečistoče. Kakovost takšnih ulitkov v glavnem ni zadostna za uporabo takoj po litju oziroma po kasnejšem preoblikovanju, temveč jih je treba še enkrat pretaliti (slika 7). Po sekundarnem taljenju lahko

talino atomiziramo, da dobimo prahove za prašno metalurgijo, ali precizijsko lijemo, da dobimo ulitke z ustrežno mikrostrukturo in lastnostmi. S postopki vakuumskega obločnega pretaljevanja, električnega pretaljevanja pod žlindro, taljenja z elektronskim curkom in taljenja s plazmo zlitino še dodatno rafiniramo, to pomeni, da odstranimo nekovinske vključke ter zmanjšamo koncentracijo plinov in drugih neželenih elementov. Po teh rafinacijskih postopkih zlitino preoblikujemo in dobimo produkte, ki jih lahko uporabimo za najzahtevnejše aplikacije.

4 OSNOVNE ZNAČILNOSTI VAKUUMSKEGA INDUKCIJSKEGA TALJENJA

Čistost taline. Pri taljenju v vakuumu preprečimo stik in reakcije z zrakom (s kisikom in z dušikom). Talina je čista, delež nekovinskih vključkov se močno zmanjša. Nadzorujemo lahko tlak in pline, ki se nahajajo v sistemu, uporabljamo lahko tudi varovalne pline, kot je npr. argon. Ulitki imajo bistveno boljše lastnosti, kot tisti, ki so bili taljeni na zraku.

Pospešitev rafinacije taline. Odstranitev raztopljenih plinov in izparljivih sestavin je v vakuumu mnogo učinkovitejša. Vakuum pospešuje razpad spojin, kot so oksidi in nitridi, in omogoča, da nekatere reakcije potečejo do konca (npr. dezoksi-



Slika 7: Značilnosti vakuumskega indukcijskega taljenja ter možni produkti

dacija). Omogoča pretaljevanje odpadnega materiala. Zlitinski elementi postanejo bolj učinkoviti, saj se ne vežejo v neželene spojine.

Induktivno mešanje homogenizira taline. Mešanje dviga reaktante do površine taline, kar pospešuje reakcije. Zagotovljen je izreden nadzor nad kemijsko sestavo. Omogoča izredno ponovljivost kemijske sestave in lastnosti.

Litje elektrod ali ingotov. Pri tem nastanejo kristalne in blokovne izceje zlitinskih elementov med strjevanjem. Strjevanje povzroči nastanek grobih kristalnih zrn, ki so neenakomerno velika, ter pojav lunkeja v sredini ingota.

Reakcije med talino in materialom lonca. Talina se onesnaži zaradi ponovne oksidacije zlitinskih elementov. Nastajajo vključki, čeprav v mnogo manjši meri kot pri taljenju na zraku.

V strokovni literaturi se za vakuumsko indukcijsko taljenje uporablja kratica VIM (iz angl. Vacuum Induction Melting). Za izvedenke VIM se uporabljajo še naslednje kratice:

VIM-VIDP: VIM with Vacuum Induction Degassing and Pouring (VIM z vakuumskim indukcijskim razplinjanjem in litjem)

VID: Vacuum Induction Degassing (vakuumsko indukcijsko razplinjanje)

VIM-HCC: VIM with Horizontal Continuous Casting (VIM s horizontalnim kontinuirnim litjem)

VIM-VCC: VIM with Vertical Continuous Casting (VIM z vertikalnim kontinuirnim litjem)

VIM-DS: VIM with Directional Solidification (VIM z usmerjenim strjevanjem)

5 SKLEPI

Vakuumsko indukcijsko taljenje se v industrijski praksi uporablja kot najfleksibilnejši postopek primar-

nega taljenja več kot petdeset let. Uporaba vakuuma omogoča izdelavo zlitin z natančno kemijsko sestavo, z majhnim deležem plinov in nekovinskih vključkov. Talimo lahko skoraj vse kovinske materiale, predvsem pa takšne, ki vsebujejo reaktivne zlitinske elemente. Izdelava teh bi bila pri taljenju na zraku praktično nemogoča, v vsakem primeru pa bolj neekonomična. Kakovost vakuumsko indukcijsko taljenih zlitin lahko še dodatno izboljšamo s sekundarnim taljenjem.

Glede na značilnosti vakuumskega indukcijskega taljenja lahko pričakujemo, da se bo postopek še dolgo uporabljal v industrijski praksi.

LITERATURA

- ¹S. Južnič: Zgodovina raziskovanja vakuuma in vakuumskih tehnik, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Ljubljana 2004, str. 107–108
- ²J. W. Pridgeon, F. N. Darmara, J. S. Huntington, W. H. Suttun: Principles and practice of vacuum induction melting and vacuum arc remelting, The metallurgical society of AIME, 1981, str. 201–216
- ³Heat Resistant Materials (ur. J. R. Davies), ASM International, 1997, 221–235
- ⁴S. J. Patel: A Century of Discovery, Inventors, and New Nickel Alloys, JOM, 2006, str. 18–20
- ⁵<http://web.ald-vt.de/cms/vakuum-technologie/anlagen/vimvidp/>
- ⁶C. Hays, Journal of materials engineering and performance 16 (6) (2007) 730–735
- ⁷H. Rupp, Metall, 42 (1988), 356–363
- ⁸H. B. Li, Z. H. Jiang, M. H. Shen, Journal of iron and steel research international 14 (2007) 3, 63–68
- ⁹A. Mitchell, A. Kawakami, S. L. Cockcroft, High temperature materials and processes 26 (2007) 1, 59–77
- ¹⁰R. Krein, A. Schneider, G. Sauthoff, Intermetallics 15 (2007) 9, 1172–1182
- ¹¹N. Nayan, K. S. Govind, Materials science and engineering 454 (2007), 500–507
- ¹²A. Rosina: Teorija metalurških procesov, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za materiale in metalurgijo, Ljubljana 1997, str. 157