

# KONTINUIRNO LITJE NIKLJEVIH SUPERZLITIN V VAKUUMU

**Franc Zupanič**

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

## POVZETEK

S kontinuirnim litjem se ulije večina sedanje svetovne proizvodnje mnogih gnetnih kovin in zlitin. To so zlitine, ki jih po litju še preoblikujemo. Razlog izvira iz večje ekonomičnosti proizvodnje, doseganja večje čistosti zlitin, večje enakomernosti kemijske sestave in izboljšanja mehanskih lastnosti. Kontinuirno litje nikljevih superzlitin se je začelo uveljavljati šele v zadnjem desetletju, predvsem zato, ker vsebujejo številne zelo reaktivne elemente in jih je treba taliti in liti v vakuumu ali v varovalni atmosferi. V tem prispevku so opisane osnovne značilnosti postopkov, ki jih uporabljamo pri kontinuirnem litju teh za tehniko tako pomembnih zlitin.

## Continuous casting of nickel superalloys in vacuum

### ABSTRACT

Nowadays, continuous casting is used as a predominant process for casting of the greater part of world production of many wrought metals and alloys. The wrought alloys obtained their final shape by forming. The main benefits of continuous casting are increased productivity and quality of the products, as well as reduced production costs. Continuous casting of nickel-based superalloys, especially those used as castings, started approximately ten years ago. The main reason arises from the fact that nickel-based superalloys have rather high melting temperature and possess some very reactive elements, therefore they have to be melted and cast under vacuum or protective atmosphere. This article presents the basic characteristics of procedures used by continuous casting of Ni-based superalloys.

## 1 UVOD

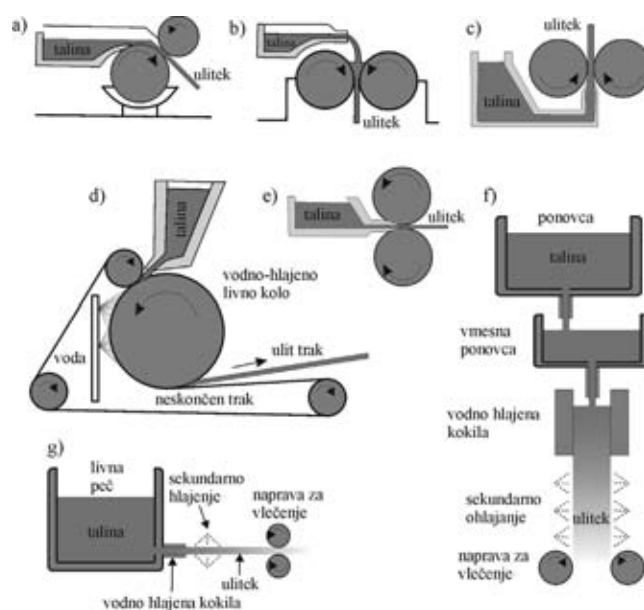
Po eni izmed definicij spada med kontinuirno litje vsak postopek, pri katerem je ulitek daljši kot kokila, v katero se uliva talina <sup>(1)</sup>. Če bi dosegli le tako dolge ulitke, kot so kokile, bi bila večina postopkov kontinuirnega litja neuporabna in povsem nerentabilna, saj se temeljne prednosti kontinuirnega litja uveljavijo tedaj, ko je ulitek bistveno daljši. Za primer naj navedem, da nekatere vrste bakrovih zlitin lijejo neprekinjeno tudi po več tednov.

Perspektivnost kontinuirnega litja preoblikovalnih zlitin, ki se lijejo v polizdelke različnih oblik in velikosti ter se nato plastično preoblikujejo, so spoznali že zdavnaj. Zato ni čudno, da je sedaj prevladujoč postopek litja preoblikovalnih zlitin prav kontinuirno litje. V strokovni literaturi <sup>(1)</sup> najdemo podatek, da je bil prvi postopek kontinuirnega litja patentiran že leta 1840 ter da v svetu vse od konca petdesetih let na leto prijavijo okoli 150 novih patentov s tega področja. Sheme nekaterih postopkov so prikazane na sliki 1.

Toliko zanimanje za kontinuirno litje ni presenetljivo, saj to bistveno prispeva k povečanju produktivnosti, izboljšanju kvalitete ulitkov ter zmanjšanju stroškov proizvodnje. Vendar je treba posebej

poudariti, da so prednosti, ki se dosežejo pri prehodu iz klasičnega litja na kontinuirnega, specifične za vsako vrsto zlitin. Za zmanjšanje stroškov proizvodnje navadno obstaja več vzrokov. Neredko se zgodi, da odpadejo številni delovni postopki, ki so bili potrebni pri klasičnem litju: zmanjša se količina človeškega dela, številne stopnje proizvodnje je mogoče avtomatizirati, zmanjša se delež povratnega materiala. Na izboljšanje preoblikovalnosti in kakovosti materiala bistveno vpliva zmanjšanje oziroma preprečitev nitaste poroznosti (to je poroznost v sredini ulitka), zmanjšanje makroizcejanja (to je razlika v kemijski sestavi med sredino in robom ulitka), nekovinski vključki so praviloma manjši in enakomernije porazdeljeni, z določenimi ukrepi je mogoče doseči enakomerno velikost kristalnih zrn (elektromagnetno mešanje, kemijska udrobnitev kristalnih zrn). Poleg tega so mere ulitkov manjše kot pri klasičnem litju ingotov in bram, zato je za izdelavo končnega proizvoda potrebno manj stopenj plastičnega preoblikovanja, kar dodatno zmanjša stroške proizvodnje.

Pri litju različnih kovin in zlitin se je kontinuirno litje začelo uveljavljati v različnih obdobjih ter se razvijalo in širilo z različno hitrostjo. Večino gnetnih aluminijevih zlitin so izdelali s kontinuirnim litjem že leta 1950, medtem ko so takrat kontinuirno ulili le manjši delež jekla. Toda že leta 1978 so kontinuirno ulili okoli petino svetovne proizvodnje jekla in ta delež nenehno narašča. Kontinuirno litje nerjavnih in drugih posebnih jekel ter kobaltovih in nikljevih zlitin,



Slika 1: Postopki kontinuirnega litja neželeznih kovin

ki se talijo in lijejo na zraku, se je začelo uvajati šele v osemdesetih letih <sup>(2,3)</sup>.

Po drugi strani so bile prve tone nikljevih superzlitin, ki se talijo ter ulivajo v vakuumu oziroma v varovalni atmosferi, prvič kontinuirno lite šele v prvi polovici leta 2000 <sup>(4)</sup>. Ti podatki nakazujejo, da je za uvedbo kontinuirnega litja zahtevnejših zlitin, ki imajo ali visoko tališče, ali vsebujejo močno reaktivne elemente, ali pa se postavljajo zelo visoke zahteve po kakovosti njihovih ulitkov, šele v zadnjih dveh desetletjih, ko je bila dosežena potrebna zelo visoka stopnja tehnološkega razvoja tudi na drugih področjih. Do sedaj so vakuumsko kontinuirno lili le redke zlitine, med njimi so malolegirane bakrove zlitine, ki pa imajo precej nižje tališče kot nikljeve superzlitine, zato tehnologija ni neposredno prenosljiva.

## 2 NIKLJEVE SUPERZLITINE

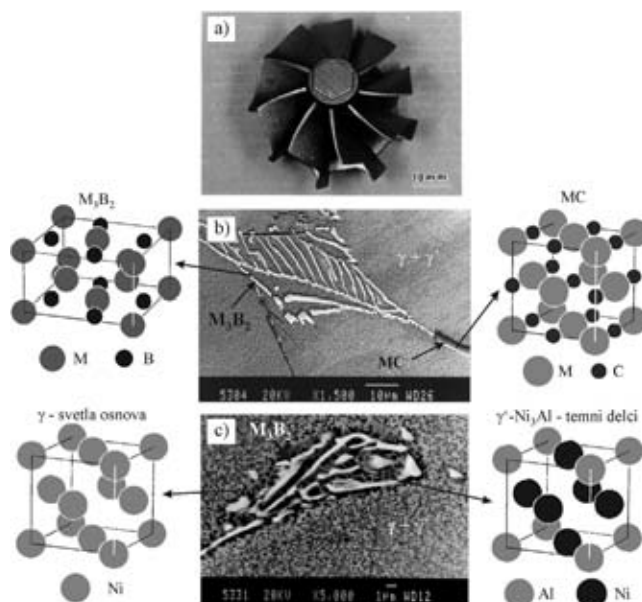
Vakuumsko taljene in lite nikljeve superzlitine se uporabljajo za močno mehansko in toplotno obremenjene komponente v letalski in avtomobilski industriji <sup>(6)</sup>. Najbolj značilni primeri uporabe so lopatice (slika 2) in drugi deli letalskih reaktivnih motorjev ter plinskih turbin, kakor tudi deli turbopolnilnikov v avtomobilskih motorjih (slika 3) <sup>(5)</sup>. Zaradi zanesljivosti, varnosti in ekonomičnosti njihovega obratovanja morajo superzlitine izpolnjevati številne stroge zahteve glede kemijske sestave, vsebnosti nekovinskih vključkov, kakor tudi kemijske in strukturne homogenosti. Čeprav je mogoče z različnimi postopki vroče in hladne predelave ter toplotne obdelave v širokih mejah spreminjati lastnosti nikljevih superzlitin, pa zahtevanih lastnosti ni mogoče doseči, če ulitek nima primerne kemijske sestave in mikrostrukture. To pa se lahko doseže s primerno tehnologijo proizvodnje superzlitin <sup>(6)</sup>.



Slika 2: Lopatica iz nikljeve superzlitine

Nikljeve superzlitine so večkomponentne in večinoma tudi večfazne. Njihova mikrostruktura je navadno sestavljena iz osnove  $\gamma$ , v kateri so izločki  $\gamma'$ , navzoči pa so še karbidi, nitridi in boridi (slika 3). Trdna raztopina  $\gamma$  ima tako kot čisti nikelj pri vseh temperaturah ploskovno centrirano kristalno zgradbo PCK <sup>(5)</sup>. Zlitinski elementi različno vplivajo na mikrostrukturo in lastnosti nikljevih zlitin. Nekateri elementi se v njih topijo v velikih količinah, zato prispevajo k raztopinskemu utrjanju, drugi pa tvorijo karbide in nitride, ki navadno nimajo posebnega utrjevalnega učinka. Določeni zlitinski elementi povzročijo nastanek krhkih *intermetalnih faz*, ki neugodno vplivajo na mehanske lastnosti (npr. Lavesove faze). Pri sodobnih izločevalno-utrjevalnih zlitinah je najpomembnejša navzočnost faze  $\gamma'$  –  $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ , ki ima urejeno kristalno zgradbo PCK. Ta faza je zelo stabilna in tvori z osnovo  $\gamma$  skoraj povsem koherentno (skladno) fazno mejo in je nosilec visoke trdnosti in odpornosti proti lezenju pri povišanih temperaturah; te zlitine imenujemo *superzlitine*, ker zadržijo pri povišanih temperaturah odlično odpornost proti lezenju ter koroziji. Karbidi in boridi so zelo pogosti v zlitinah, ki se uporabljajo za turbine v vročem delu turbopolnilnika (slika 3).

Najbolj uveljavljen postopek izdelave nikljevih superzlitin je vakuumsko indukcijsko taljenje, ki je v strokovni literaturi znano pod imenom VIM (iz angleščine: Vacuum Induction Melting) <sup>(7,8)</sup>. Nikljeve



Slika 3: Turbina za vroči del turbopolnilnika (a) s karakterističnimi mikrostrukturama (b, c) in osnovnimi celicami najpogostejših faz. Faza  $\gamma$  ima ploskovno centrirano kubično zgradbo in je trdna raztopina na osnovi niklja. Faza  $\gamma'$   $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$  ima urejeno zgradbo. Oglišča zasedajo atomi Al in Ti, medtem ko je na ploskvah Ni. V karbidu MC atomi niklja in drugi atomi s podobno velikostjo zasedajo enaka mesta kot v PCK-zgradbi, medtem ko so atomi ogljika na oktaedrskih intersticijskih mestih. Borid  $\text{M}_3\text{B}_2$  ima tetragonalno zgradbo.

**Tabela 1:** Lastnosti in kemijska sestava izbranih livnih nikljevih zlitin

ime zlitine	strjevalni interval / °C	Časovna trdnost 100 ur pri 815 °C / MPa	Časovna trdnost 1000 ur pri 815 °C / MPa	Časovna trdnost 100 ur pri 870 °C / MPa	Časovna trdnost 1000 ur pri 870 °C / MPa	okvirna kemijska sestava (masni deleži v odstotkih)
IN 713C	1260–1290	370	305	305	215	0,12 % C, 74 % Ni, 12,5 % Cr, 4,2 % Mo, 6 % Al, 0,8 % Ti, 1,75 % Nb, 0,1 % Zr, 0,9 % Nb, 0,012 % B
IN 738	1230–1315	470	345	330	235	0,17 % C, 61,5 % Ni, 16 % Cr, 8,5 % Co, 1,75 % Mo, 3,4 % Al, 3,4 % Ti, 2,6 % W, 0,1 % Zr, 2 % Nb, 0,01 % B
MAR-M 200	1315–1370	495	415	385	295	0,15 % C, 59 % Ni, 9 % Cr, 10 % Co, 1 % Fe, 5 % Al, 2 % Ti, 12,5 % W, 0,1 % Zr, 1 % Nb, 0,015 % B
Udimet 500	1300–1395	330	240	230	165	0,1 % C, 53 % Ni, 18 % Cr, 17 % Co, 4 % Mo, 2 % Fe, 3 % Al, 3 % Ti

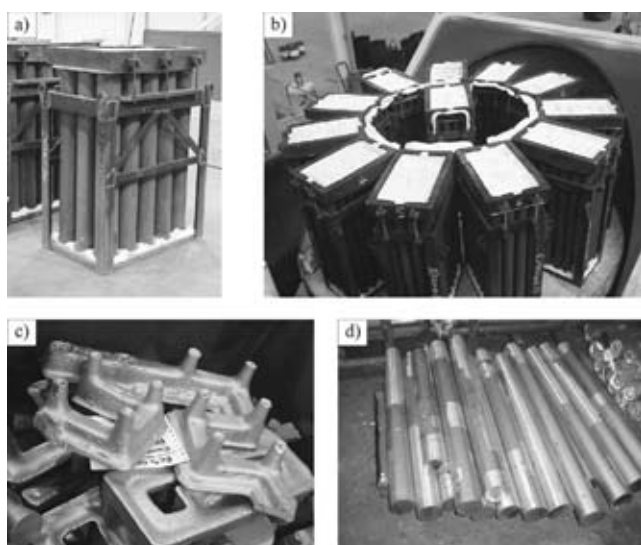
superzlitine se v vakuumu ali pod varovalno atmosfero ulivajo v palice s krožnim prečnim prerezom. Pri litju se vakuumska indukcijska peč nagne, tako da talina teče iz peči po livnem kanalu do vmesne ponovce. Vanjo je vgrajen *keramični filter*, ki odstrani nekovinske vključke nad določeno velikostjo, to je navadno delce nad 30 µm premera. Z uporabo keramičnih filtrov se bistveno zmanjša celotni delež nekovinskih vključkov, ki izvirajo iz vložka, obzidave peči, livnega sistema ali pa so nastali med taljenjem in rafinacijo z reakcijo med preostalim kisikom in dušikom v vakuumu ter reaktivnimi zlitinskimi elementi. Iz filtra talina steče v keramični razdelilnik (slika 4), iz tega pa v posamezne kokile. Te so pravzaprav cevi, ki so izdelane iz maloogljivega jekla (slika 4a). Njihov premer je med 40 mm in 250 mm, višina pa od 1000 mm do 1500 mm. Ob stiku s steno kokile se prične talina ohlajevati in strjevati, pogosto pa se pojavi še neželena reakcija med talino in steno kokile, pri kateri lahko nastane trden zvar med palico in kokilo. To se zgodi posebej pogosto pri uporabi

novih kokil. Zaradi reakcij med talino in kokilo ter močnih toplotnih obremenitev kokile le redko zdržijo več kot petkratno litje <sup>(9)</sup>.

Mere kokil in razmere pri ohlajanju bistveno prispevajo k nastanku napak in nehomogenosti med strjevanjem. Ker je dolžina palic precej večja od njihovega premera, je napajanje s talino oteženo. Zato v sredini palice pogosto nastane nitasta poroznost, ki ima lahko premer tudi 10 mm ali več, v dolžino pa meri nekaj 100 mm. Takšna poroznost naj ne bi vplivala na lastnosti končnih ulitkov, ker v livarnah končnih izdelkov palice pretalijo. Toda odjemalci kljub temu pogosto zavračajo palice s takšno poroznostjo, ker se lahko pri njihovem rezanju delci rezalnega orodja zadržijo v makroporah. Po izkušnjah se lahko zlitina onečisti z nekovinskimi vključki, spremeni pa se lahko tudi njena kemijska sestava. Zato se palice z nitasto poroznostjo navadno vrnejo v vakuumsko indukcijsko peč kot povratni material. Poleg tega nastane zaradi velikih dimenzij ulitkov in sorazmerno počasnega ohlajanja močno makroizcejanje zlitinskih elementov, kristalna zrna so različnih oblik in velikosti, nastanejo pa tudi grobi delci karbidov ali drugih vmesnih spojin.

Naštetih težav s sedanjo tehnologijo konvencionalnega litja ni mogoče odpraviti, vendar neenakomerna zrnatost, kemijska nehomogenost in nitasta poroznost v mnogih primerih niso pomembni. Ulite palice se namreč v livarnah nikljevih superzlitin, kjer ulivajo komponente avtomobilskih in letalskih motorjev, pretalijo in ulijejo po postopkih precizijskega litja <sup>(12)</sup>. Pri tem se talina ulije v keramične maske, izdelane s staljivimi ali izparljivimi modeli (v angleščini: Lost-wax precision casting process).

Pri najzahtevnejših materialih, ki se uporabljajo v letalski in vesoljski tehnologiji, se zaradi dodatnega povečanja homogenosti zlitin in zmanjšanja deleža nekovinskih vključkov ulitki dodatno rafinirajo po različnih postopkih pretaljevanja <sup>(7)</sup>. Najbolj uveljavljeni so pretaljevanje z elektronskim curkom – EBR (iz angleščine: Electron Beam Remelting), vakuumsko



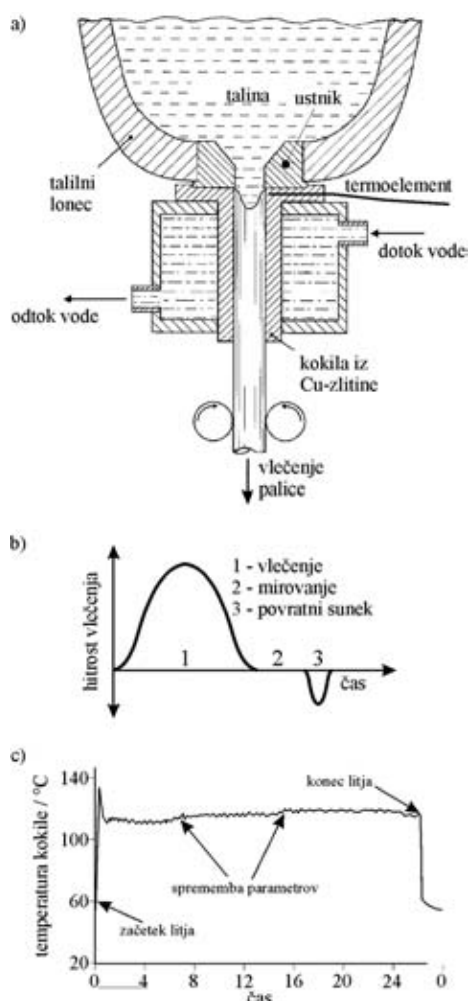
**Slika 4:** Klasični postopek litja Ni-superzlitin. a) Povezane jeklene kokile. b) Skupek povezanih jeklenih kokil pred litjem. c) Povratni material iz keramičnega razdelilnega sistema. d) Uliti drogovci po razrezu in brušenju.

obločno pretaljevanje – VAR (iz angleščine: Vacuum Arc Remelting) ali z elektropretaljevanjem pod žlindro – EPŽ (v angleščini ESR: Electro-Slag Remelting). Vsi postopki pretaljevanja bistveno podražijo izdelavo nikljevih superzlitin, zato ni čudno, da so proizvajalci zelo zainteresirani za razvoj in aplikacijo kontinuirnega litja.

### 3 KONTINUIRNO LITJE NIKLJEVIH SUPERZLITIN

Projekt kontinuirnega litja Ni-superzlitin se je začel v drugi polovici devetdesetih let prejšnjega stoletja v angleškem podjetju Ross & Catherall iz Sheffielda <sup>(10)</sup>. Pomemben del razvojnega dela je bil narejen za Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru, pri katerem je sodeloval tudi avtor tega prispevka.

Tudi pred kontinuirnim litjem se nikljevih superzlitine pretalijo z vakuumskim indukcijskim taljenjem. Kontinuirno se lahko lijejo v obliki palic, ki imajo



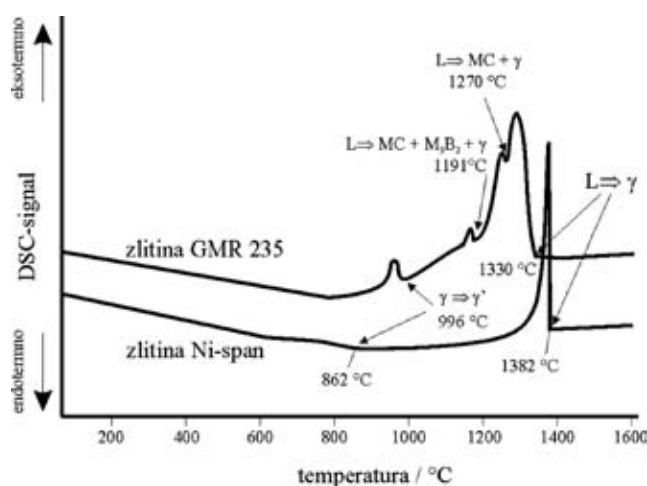
**Slika 5:** Vertikalno kontinuirno litje palic majhnih prerezov. a) Shematski prikaz kontinuirnega litja. b) Livni cikel je sestavljen iz treh delov: vlečenja, mirovanja in povratnega sunka. c) Spreminjanje temperature v kokili med litjem.

manjše premere, ali drogov, ki imajo lahko premere tudi 100 mm in več. Pri samem razvoju kontinuirnega litja je pomenila priključitev naprave za kontinuirno litje na vakuumsko indukcijsko peč ali na vmesno livno peč precejšen problem.

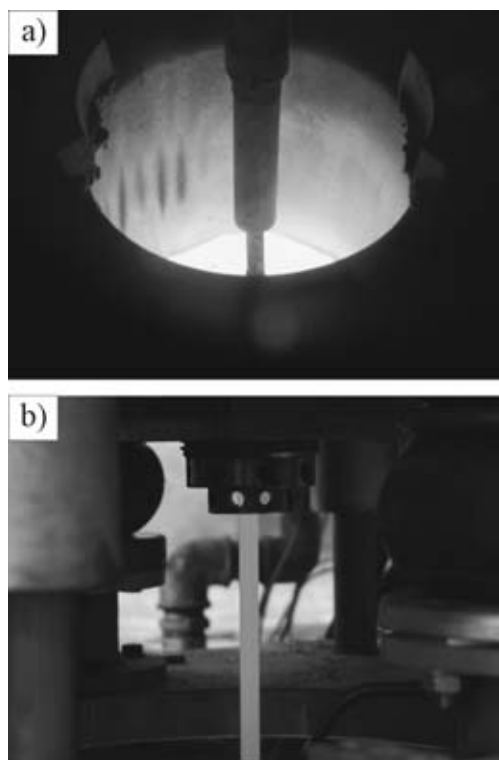
**Kontinuirno litje palic.** Palice imajo manjši premer, od 4 mm do 15 mm, in se večinoma ulivajo v napravi za vakuumsko taljenje in vertikalno kontinuirno litje (slika 5a). Takšna naprava je primerna predvsem za majhne šarže (1,5–2,5 dm<sup>3</sup>, to je med 12 kg in 20 kg nikljevih superzlitin) in tudi za eksperimentalno kontinuirno litje. V tej napravi je tlak okoli 10<sup>-1</sup> mbar.

Na osnovi rezultatov termične analize (DTA ali DSC, slika 6) se določi začetna temperatura litja, ki je po izkušnjah za 100–150 °C višja od temperature likvidusa. Povprečne livne hitrosti so od 600 mm/min do 1000 mm/min, medtem ko je dolžina livnega koraka 5–15 mm. Poudariti je treba, da vlečenje palice iz kokile ne poteka enakomerno, temveč v zaporedju poteg – mirovanje – povratni sunek (slika 5b). S takšnim načinom vlečenja se bistveno zmanjša možnost reakcije med talino in kokilo, kar bistveno podaljša njeno dobo trajnosti. Namen povratnega sunka je pogosto izboljšanje kakovosti površine (pri bakrovih zlitinah) in kompenzacija toplotnega skrčka, vendar smo pri litju Ni-superzlitin dosegli boljše rezultate, ko smo opustili povratni sunek.

Navadno se zahteva, da v sredini palice ni lunckerja, da ni vročega pokanja in razpok v hladnem, včasih sta pomembna parametra tudi primerna usmerjenost kristalnih zrn in ustrezna kakovost površine. To je še posebej pomembno, če se izdelane palice vroče ali hladno vlečejo. Pogosto so si zahteve glede značilnosti palic v medsebojnem nasprotju, kajti zgodi se lahko,



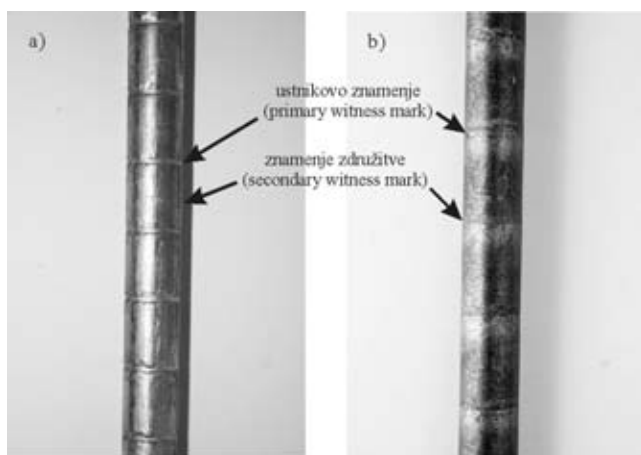
**Slika 6:** Ohlajevalni DSC-krivulji nikljevih zlitin Ni-span in GMR 235. Zlitina Ni-span se v glavnem strjuje kot enofazna zlitina, pri kateri se pri nižji temperaturi izločajo izločki γ'. Zlitina je večfazna, pri kateri pri strjevanju nastane več mikrostrukturnih sestavov. Temperatura litja je 100–150 °C nad temperaturo likvidusa; to je med 1480 °C in 1530 °C za zlitino Ni-span in 1430–1480 °C za zlitino GMR 235.



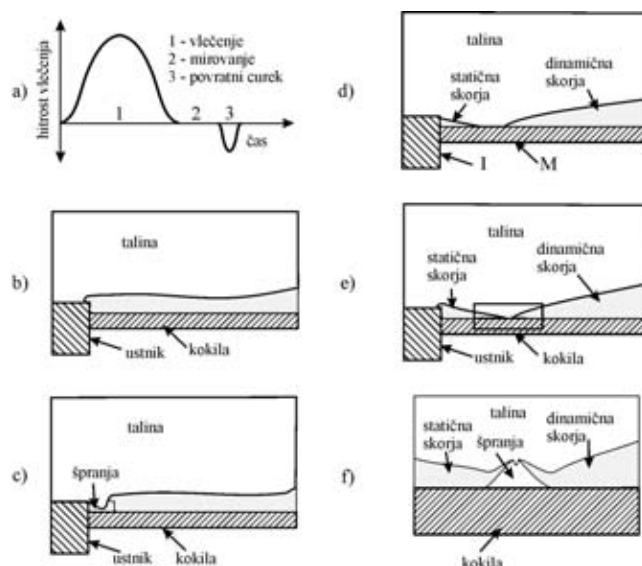
**Slika 7:** Vertikalno kontinuirno litje palic majhnih prerezov. a) Staljena kovina v keramičnem talilnem loncu s potopnim termoelementom. b) Ulita palica ob izhodu iz sekundarnega hladilnika, ki je na dnu vakuumske komore.

da se pri spremembi parametrov izognemo lunckerju v sredini palice, vendar se kakovost (gladkost) površine zmanjša. Slika 8 prikazuje, kako lahko z ustreznimi livnimi parametri dosežemo zelo gladko palico in enakomeren premer. Spreminjamo lahko veliko livnih parametrov, zato je za doseg ustreznosti kakovosti palice treba dobro poznati proces nastanka skorje med vlečenjem (slika 9).

Izmenični način vleka se izraža tudi v periodični makrostrukturi palice (slika 10). Strjevalna fronta ima navadno dendritno morfologijo, pri čemer prevla-



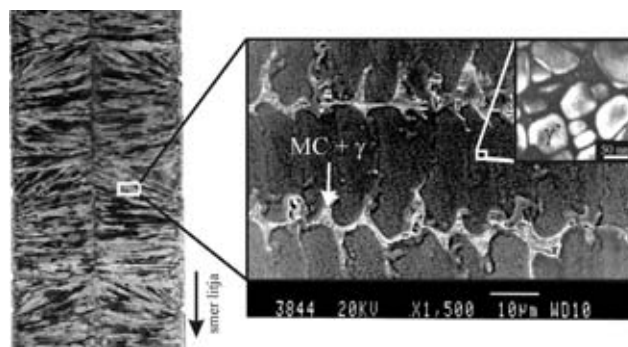
**Slika 8:** Površini palic po kontinuirnem litju: a) zmanjšanje premera palice pri ustrikovem znamenju je očitno, b) premer je po celotni dolžini palice enak



**Slika 9:** Shematičen prikaz nastanka skorje pri kontinuirnem litju palice. a) izmenični način vlečenja, b) skorja v celoti prekrije kokilo in raste tudi v ustniku, c) pri vlečenju nastane med ustnikom in kokilo špranja, d) ob ustniku raste statična skorja, na strjeni skorji, ki je nastala pri prejšnjem ciklu, pa dinamična skorja, e, f) statična in dinamična skorja se združita (tam se pojavi znamenje združitve).

dujejo usmerjena kristalna zrna. V meddendritnem prostoru je pogosto binarni evtektik ( $MC + \gamma$ )<sup>(9,11)</sup>, pri zlitinah, ki vsebujejo boride, pa tudi evtektik ( $M_3B_2 + \gamma$ )<sup>(12-14)</sup>. Pri ohlajanju se iz trdne raztopine  $\gamma$  izločajo izločki  $\gamma'$ .

Ker imajo palice majhne premere, je hitrost ohlajanja sorazmerno velika (10–100 °C/s), zato nastane zelo drobna mikrostruktura z ugodno kombinacijo mehanskih lastnosti. To pri začetnih poskusih kontinuirnega litja ni bilo pomembno, ker je bilo treba samo ugotoviti, ali se dajo zlitine na ta način liti ali ne. Pri poskusih kontinuirnega litja zlitin, ki so namenjene urarski industriji, je doseganje drobne in enakomerne mikrostrukture brez lunckerjev skrajno pomembno za končne lastnosti. Kljub temu, da se zlitine za urarsko industrijo še preoblikujejo z vlečenjem, ima začetna lita mikrostruktura odločilen vpliv na končne lastnosti zlitin.



**Slika 10:** Hierarhija mikrostruktur v kontinuirno uliti palici s premerom 10 mm (zlitina IN 713C)

#### 4 LITJE DROGOV

Drogovi so ulitki, ki imajo večji premer kot palice. Natančna meja ni definirana, navadno rečemo drog tistemu ulitku, ki ima večji premer od 25 mm (1 palec). Pred dobrim desetletjem v svetu še ni bilo tehnološkega postopka, s katerim bi kontinuirno lili droge v vakuumu, ker nobeden ni izpolnjeval osnovnih zahtev, ki sta značilni za vakuumsko taljene nikljeve superzlitine:

- vsi postopki pri taljenju, prenosu taline, litju in strjevanju morajo potekati v vakuumu ali v varovalni atmosferi;
- materiali, ki se pri tem uporabljajo, morajo dolgočasno vzdržati temperature vsaj do 1600 °C in ne smejo reagirati s talino.

Kot najprimernejša se je izkazala tehnologija horizontalnega kontinuirnega litja (slika 1g), ki se je uveljavila pri kontinuirnem litju posebnih jekel ter kobaltovih in nikljevih zlitin, ki se talijo in ulivajo na zraku <sup>(2,3)</sup>. Osrčje te proge za kontinuirno litje je kristalizator, ki so ga razvili pri General Motors Cor. in posodobili pri nemškem podjetju Demag Technica (slika 11). Progo sestavljajo še značilni sistemi na progah za kontinuirno litje, kot so naprave za vlečenje in razrez palic, hladilni bazen ter naprava za peskanje. Vsi ti sistemi so lahko ročno ali računalniško krmljeni. Bistvenega pomena za varno in zanesljivo obratovanje te proge je pritrnitev kristalizatorja na livno peč (slika 12). Pri litju na zraku s tem ni večjih težav, saj je operaterju omogočen dostop do vseh ključnih delov, kakovost pritrditve pa lahko tudi preveri.

To pa ni mogoče, ko je livna peč v vakuumu, torej v vakuumski komori. Toda tudi v tem primeru je nujno zagotoviti neprepusten spoj za talino med obzidavo peči in kristalizatorjem, kakor tudi vakuumsko tesen spoj med kristalizatorjem in vakuumsko komoro livne peči. Na progi za kontinuirno litje se lahko kristalizator premika le vzdolžno v horizontalni smeri. Premiki v vertikalni smeri, prečni horizontalni smeri in nagibanje niso dovoljeni, ker mora ostati poravnana z drugimi pomožnimi napravami na progi. Ker manevriranje s kristalizatorjem ni dovoljeno, se je postavila zahteva, da morata biti obzidava livne peči, kakor tudi celotna vakuumsko komora, v kateri se nahaja livna peč, izdelani tako, da bosta omogočila zanesljivo in varno pritrnitev kristalizatorja.

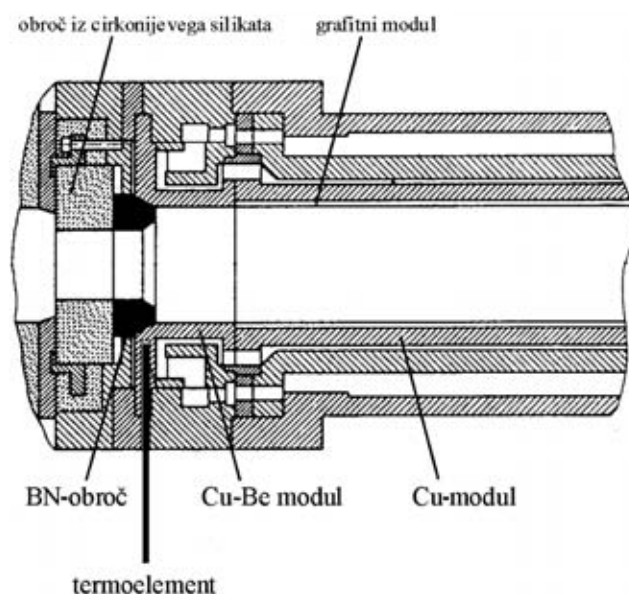
Z upoštevanjem naštetih dejstev in meril za varno delo so bile postavljene naslednje zahteve, ki jih mora izpolnjevati obzidava vzdrževalne peči:

- obzidava mora zdržati dolgotrajne obremenitve pri temperaturah okoli 1600 °C;
- enostavna gradnja obzidave in vzdrževanje peči;
- natančne dimenzije in položaj livne odprtine;
- zanesljiva in enostavna pritrnitev kristalizatorja na livno peč;

- odprtina za zasilni izpust taline na dnu peči;
- da se ne kruši in zato ni nevarnosti, da bi odkruški zamašili livno odprtino.

Livna peč, kakor tudi VIM-peči, se lahko obzidajo na dva načina: (1) z modulno obzidavo <sup>(15)</sup> ali (2) s phanjem. Izbrana je bila modulna obzidava, katere značilnosti so opisane v nadaljevanju. Pri modulni gradnji peči se za obzidavo uporabljajo že izdelani keramični moduli, ki se v peči samo sestavijo. Modulna gradnja peči se je pojavila šele v zadnjem času, ko se je razvila tehnologija oblikovanja modulov z brizganjem prahov (v angleščini: Powder Injection Moulding), ki omogoča izdelavo modulov različnih oblik z majhno toleranco mer, kar je prvi pogoj za dobro skladanje modulov. V nasprotnem primeru bi lahko skozi špranje med moduli pronicala talina, to pa bi zahtevalo takojšnjo prekinitve litja in verjetno tudi zamenjavo obzidave.

Tehnologija oblikovanja z brizganjem prahov omogoča natančno izdelavo livne odprtine ter tiste za zasilni izpust taline, kakor tudi zanesljivo pritrnitev kristalizatorja na obzidavo. Med slabosti modulne obzidave lahko prištejemo visoko ceno modulov, ki je dva- do trikrat višja od cene phalne mase, ter nujnost počasnega predgrevanja obzidave na delovno temperaturo. Prehitro segrevanje povzroči velike notrane napetosti v keramičnih moduli, le-te pa lahko povzročijo pokanje modulov in skrajšajo dobo trajanja obzidave. Mnenje je, da mora obzidava za rentabilno obratovanje livne peči zdržati od dvajset do trideset šarž. Pri taljenju in litju superzlitin so keramični moduli izdelani iz materiala, ki vsebuje več kot 95 %  $Al_2O_3$  in okoli 4 %  $SiO_2$ . Ta zdrži dolgotrajne obremenitve pri temperaturah okoli 1600 °C; to pa je tudi ena od osnovnih zahtev za obzidavo livne peči.



Slika 11: Skica kokile, ki so jo razvili pri General Motors. Tako v osnovni kot tudi v modificiranih oblikah se uporablja pri horizontalnem kontinuirnem litju številnih zlitin.

Livna peč je sestavljena iz obzidave peči, srednje-frekvenčnega indukcijska navitja za segrevanje taline ter grafitnega susceptorja, sistema za dovod taline, vakuumskega sistema, sistema za zasilni izpust taline, hladilnega sistema, sistema za merjenje temperature in sistema za predgrevanje obzidave. Za predgrevanje obzidave se uporablja grafitni susceptor, ki jo postopoma segreva. Hitrost segrevanja ne sme biti prevelika, da se ne bi pojavilo pokanje obzidave.

Sistemi pred progo za kontinuirno litje morajo zagotoviti, da talina popolnoma zapolni livno odprtino ter da ima ob vstopu v kristalizator pravilno livno temperaturo. S stališča kontinuirnega litja pa je bistvenega pomena, kaj se dogaja v kristalizatorju, kako lahko dogajanje v njem spremljamo in kakšne možnosti imamo pri spreminjanju livnih parametrov, da zagotovimo zanesljivo in nepretrgano kontinuirno litje ter optimalno kakovost ulitih drogov.

Največ napak in tudi prekinitev kontinuirnega litja se pojavi ob pričetku. Razloga sta vsaj dva. Kot prvo, na začetku se pokažejo vse pomanjkljivosti, ki so nastale zaradi nepravilne pritrditve hladilnika na kokilo. Kot drugo pa so razmere v tej stopnji kontinuirnega litja nestacionarne, zato je avtomatsko vodenje procesa težavnejše. Zato je uspešnost ali neuspešnost začetka litja v veliki meri odvisna od usposobljenosti in izkušenosti operaterjev.

Tudi pri industrijski napravi se uporablja izmenični način vlečenja. Nastavitve parametrov so sicer enostavnejše kot pri laboratorijski napravi, vendar je izbira možnosti kvalitativno enaka. Sodobni sistemi omogočajo shranjevanje podatkov v elektronski obliki ter precejšnjo fleksibilnost pri nastavljanju livnih parametrov in tudi njihovo spreminjanje med kontinuirnim litjem; npr. na začetku kontinuirnega litja je praviloma srednja hitrost litja manjša. Livni parametri, ki so najboljši za dano zlitino, so praviloma rezultat optimizacije med produktivnostjo litja, zeleno kvaliteto ulitkov ter zanesljivostjo in varnostjo kontinuir-

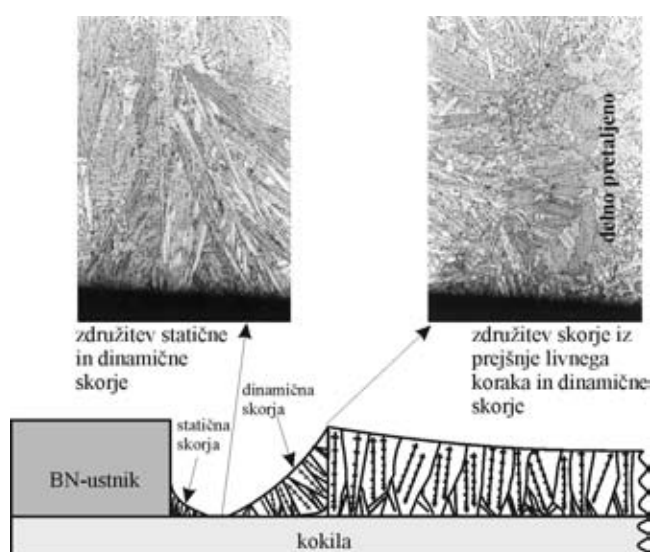


**Slika 12:** Industrijska naprava za kontinuirno litje (1 – livna peč, 2 – hladilnik s kokilo, 3 – uliti drog, 4 – vlečna naprava)

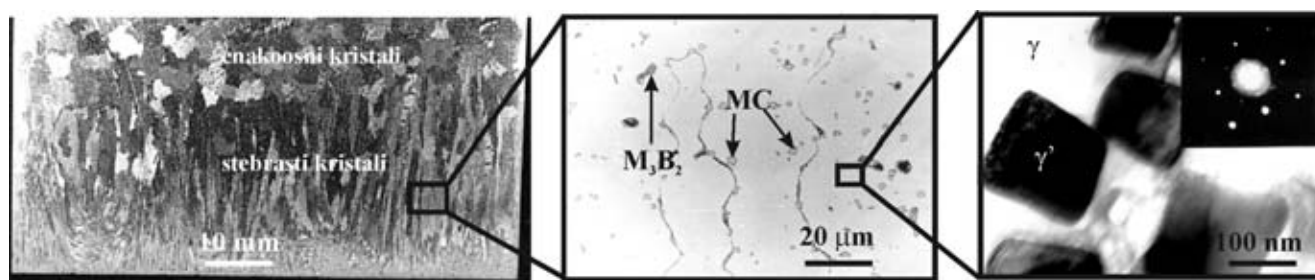
nega litja. Ob uvajanju litja novih zlitin je praviloma potrebno kar nekaj časa, da se določijo optimalni livni parametri.

Za smiselno nastavljanje livnih parametrov je nujno – vsaj kvalitativno – vedeti, kateri procesi potekajo v kristalizatorju in kako vplivajo na njih posamezni parametri kontinuirnega litja. Slika 13 prikazuje, da se po potegu talina strjuje ob notranji površini BN-obroča, ob že strjeni skorji ulitka ter ob steni kokile. Razvidno je tudi, da se zgornji rob strjene skorje delno stali. Stik med že strjeno palico in na novo kristaliziranim delom je opazen tudi na površini palice. Imenuje se primarna površinska oznaka (v angleščini: primary witness mark). Empirično je ugotovljeno, da je globina te oznake obratno sorazmerna temperaturi pregretja taline nad likvidusno temperaturo zlitine ter srednji hitrosti litja <sup>(3)</sup>.

Za uspešnost kontinuirnega litja je pomembno, da se statična in dinamična skorja dobro sprimeta; na tistem mestu zvara se pojavi znamenje združitve (v angleščini: secondary witness mark; slika 13). Povratni sunek se pri litju nikljevih superzlitin ne uporablja. Trdnost znamenja združitve pomembno vpliva na možnost prekinitve kontinuirnega litja. Trdnost je odvisna tudi od lastnosti zlitine, kot so občutljivost na vroče in hladno pokanje, odpornost proti lezenju pri temperaturah blizu tališča... Če se strjena skorja pretrga, je bistveno, da se to čim prej ugotovi. V ta namen je v kokilo vgrajen termoelement. Ob pretrgu strjena skorja, ki je nastala ob BN-obroču, ostane na mestu in se debeli. S tem se toplotni upor poveča in temperatura stene kokile se hitro niža. Termoelement, vgrajen v steno kokile, to zazna. V sodobnih napravah se trenutno spremenijo livni parametri – aktivira se t. i.



**Slika 13:** a) Kokila, ki so jo razvili pri General Motors. Danes se uporablja pri kontinuirnem litju ogljikovih, nerjavnih, nekaterih orodnih jekel in nikljevih superzlitin. b) Način vleka: poteg-postanek-povratni sunek, c) Proces v kokili, ki vodijo do nastanka ustnikovega znamenja in znamenja združitve



Slika 14: Hierarhija mikrostruktur pri kontinuirnem litju droga s premerom 40 mm

obnovitveni livni cikel, v katerem se povprečna hitrost litja bistveno zmanjša. To naj bi omogočilo ponovno zavaritev palice na pretrganih mestih. Dosedanje izkušnje kažejo, da se to zgodi v večini primerov (nad 75 %). V nasprotnem primeru imajo operaterji še nekaj možnosti, da z ročnim vodenjem naprave uspejo zavariti oba dela; drugače pa se kontinuirno litje dokončno prekine.

Za uspešno in zanesljivo kontinuirno litje je pomembna optimizacija livnih parametrov za vsako vrsto zlitine. Od teh sta gotovo najpomembnejša livna temperatura in srednja hitrost litja. S stališča produktivnosti bi bilo seveda najboljšo, če bi bila srednja hitrost litja čim višja. Hitrejša litje pomeni, da se palica zadržuje krajši čas v hladilniku, zato se lahko odvede iz nje manjša količina toplote. Iz tega izhaja, da je debelina skorje ob izhodu iz kristalizatorja manjša, površinska temperatura oziroma temperatura trdne skorje pa višja. Na strjeno skorjo delujejo poleg napetosti, ki se pojavijo zaradi toplotnega krčenja palice, še mehanske napetosti zaradi vlečenja palice. Pri višji temperaturi in manjši debelini skorje je nosilnost strjenega dela zmanjšana. To pa lahko povzroči prekomerno plastično deformacijo skorje ali v najslabšem primeru pretrganje skorje in izlitje taline, ki zahteva takojšnje prekinitev litja in zasilni izpust taline. V vsakem primeru pa mora biti hitrost litja dovolj majhna, da se drog strdi po celotnem prerezu pred napravo za rezanje.

Zaradi večjega premera drogov je hitrost ohlajanja manjša in posledično je mikrostruktura bolj groba kot v palicah (slika 14). Značilna mikrostruktura je sestavljena iz drobnih enakoosnih zrn na površini, radialno rastočih stebrastih kristalnih zrn in enakoosnih zrn v sredini. Včasih se pojavijo tudi poroznost v sredini ter razpoke. Kristalna zrna rastejo v obliki dendritov, v meddendritnem prostoru pa sta dvofazna zloga ( $MC + \gamma$ ) in ( $M_3B_2 + \gamma$ )<sup>(16)</sup>.

Sedaj se kontinuirno lije več zlitin, ki so dostopne tudi na trgu (IN 713C, Hastelloy X, GMR 235 ...) (17).

## 5 SKLEP

Na zraku taljene nikljeve in kobaltove zlitine so začeli kontinuirno ulivati v osemdesetih letih dvajsetega stoletja. Razvoj vakuumsko taljenih nikljevih superzlitin se je začel pred desetimi leti. Nekatere zlitine se sedaj uspešno proizvajajo in se prodajajo predvsem v avtomobilsko industrijo. Razvoj drugih zlitin poteka uspešno, saj so številni proizvajalci spoznali prednosti kontinuirno ulitih palic. Pričakujemo lahko, da se bo v naslednjih letih delež tovrstnih zlitin, izdelanih s kontinuirnim litjem, hitro povečeval.

## 6 LITERATURA

- <sup>1</sup>E. Herrmann, D. Hoffmann (urednika): Handbook on Continuous Casting, Aluminium Verlag Düsseldorf, 1980, V
- <sup>2</sup>H. A. Krall, B. Schmitz, E. Fischer: World Steel & Metalworking, 5 (1983) 122–128
- <sup>3</sup>J. Zalner, S. E. Taylor: Iron and Steel Engineer, February, 1985, 37–44
- <sup>4</sup>F. Zupanič, T. Bončina, A. Križman: Structure of the Ni-base superalloy IN 713C after continuous casting, Superalloys 2000, Proceedings of the Ninth international symposium on superalloys, (ed. T. M. Pollock, R. D. Kissinger, R. R. Bowman, K. A. Green, M. McLean, S. L. Olson, J. J. Schirra), TMS Warrendale, 2000, 239–246
- <sup>5</sup>M. Durand-Charre: The Microstructure of Superalloys, Gordon and Breach Science Publishers, 1997, 53
- <sup>6</sup>J. Davies, (urednik): Heat Resistant Materials, ASM International, Materials Park, Ohio, Metallurgy, Processing and Properties of Superalloys, 221–254
- <sup>7</sup>J. W. Pridgeon, F. N. Darmara, J. S. Huntington, W. H. Sutton: Metallurgical Treatises, 1981, 261–276
- <sup>8</sup>F. Zupanič, Vakuunist, 27 (2007) 4, 4–8
- <sup>9</sup>F. Zupanič, T. Bončina, A. Križman, F. D. Tichelaar, Mater. sci. technol., 18 (2002), 811–819
- <sup>10</sup>Horizontal casting of superalloy bar. (Materials alert). Advanced Materials & Processes
- <sup>11</sup>F. Zupanič, T. Bončina, A. Križman, F. D. Tichelaar, J. alloys compd. 329 (2001), 290–297
- <sup>12</sup>F. Zupanič, T. Bončina, A. Križman, B. Markoli, S. Spaić. Scr. mater., 46 (2002), 667–672
- <sup>13</sup>T. Bončina, F. Zupanič, A. Križman, B. Markoli, S. Spaić. Prakt. Metallogr., 41(2004) 8, 373–385
- <sup>14</sup>F. Zupanič, T. Bončina, G. Lojen, B. Markoli, S. Spaić. J. mater. process. technol. 186 (2007) 1/3, 200–206
- <sup>15</sup>Blasch Precision Ceramics, Modular induction lining system, <http://www.blaschceramics.com/>
- <sup>16</sup>F. Zupanič, T. Bončina, A. Križman. Mater. tehnol., 38(2004) 3/4, 155–159
- <sup>17</sup><http://www.doncasters.com/groupcompanies/?s=5&p=4&sp=21&id=30>