

UNIVERZA V LJUBLJANI  
NARAVOSLOVNOTEHNIŠKA FAKULTETA

# **DIPLOMSKO DELO**

SIMON MIHELČIČ

LJUBLJANA 2016

UNIVERZA V LJUBLJANI  
NARAVOSLOVNOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA MATERIALE IN METALURGIJO

**PREIZKUŠANJE CELICE ZA ENOSTAVNO  
TERMIČNO ANALIZO**

DIPLOMSKO DELO

SIMON MIHELČIČ

LJUBLJANA, september 2016

UNIVERSITY OF LJUBLJANA  
FACULTY OF NATURAL SCIENCES AND ENGINEERING  
DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALURGY

**TESTING OF MEASURING CELL FOR  
SIMPLE THERMAL ANALYSIS**

DIPLOMA WORK

SIMON MIHELČIČ

LJUBLJANA, September 2016

## **PODATKI O DIPLOMSKEM DELU**

Število listov: 56

Število strani: 44

Število slik: 34

Število preglednic: 5

Število literaturnih virov: 19

Študijski program: Visokošolski strokovni program Metalurške tehnologije

### **Komisija za zagovor diplomskega dela:**

Predsednik: *prof. dr. Peter Fajfar*

Mentor: *prof. dr. Primož Mrvar*

Član: *prof. dr. Jožef Medved*

Ljubljana, .....

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se svojemu mentorju prof.dr. Primožu Mrvarju za občutek kolegialnosti in strokovnosti pri izbiri naslova diplomske naloge ter profesionalnega pristopa pri razpravah in odgovorih med pisanjem diplomske naloge. Zahvaljujem se tudi dr. Mitju Petriču ter strokovnemu sodelavcu Tomažu Martinčiču za uspešno izvedene meritve in pomoči pri delu v laboratoriju.

Posebno se zahvaljujem moji družini za moralno podporo. Mojemu dobremu prijatelju dipl.ing. Matjažu Marčetiču se zahvaljujem za pomoč in strokovnost.

Zahvaljujem se tudi moji puncu Zrinki za podporo in razumevanje med pisanjem diplomske naloge.

## **IZVLEČEK**

V livarstvu igrajo pomembno vlogo tudi kontrolne metode. Poleg določitve kemijske sestave je pomembna tudi metoda »in situ« enostavne termične analize za ugotavljanje in krmiljenje nukleacijskega potenciala.

Pri tem je pomembno, kakšno prostornino ima merilna celica, kje je nameščen termoelement, s čim je le ta obdan, kakšna ohlajevalna hitrost se doseže med preizkusom, gostota, beleženja podatkov itd.

V okviru diplomskega dela smo eksperimentalno preizkusili nekaj različnih merilnih celic, izdelanih po postopku "Croning", pri čemer smo preizkusili več različnih premazov termočlenov. Pri tem smo posneli ohlajevalne krivulje različnih zlitin iz skupine sivih litin in Al zlitin.

Ključne besede: livarstvo, enostavna termična analiza, termoelement, premaz

## **ABSTRACT**

In the field of foundry Quality control and its methods are important. Additionally, to chemical analyses in situ simple thermal analysis play a big part.

Important parameters for simple thermal analyses are the volume of the measurement cell, position of the thermo-couple and its coating, achieved cooling rate during the measurement, data acquisition rate, etc.

In the thesis couple of different simple thermal analyses cells made by the Croning process were made and tested. Recorded data (cooling rate curve) was be made on laboratory scale.

Key words: foundry, simple thermal analyses, thermo-couple, coating

## VSEBINSKO KAZALO

|                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. UVOD .....                                                                                                                                                        | 1  |
| 2. TEORETIČNI DEL.....                                                                                                                                               | 2  |
| 2.1. Uvod v zgodovino železa .....                                                                                                                                   | 2  |
| 2.2. Opredelitev jekla in jeklenih zlitin .....                                                                                                                      | 4  |
| 2.3. Lito železo .....                                                                                                                                               | 5  |
| 2.4. Siva litina.....                                                                                                                                                | 7  |
| 2.5. Aluminijeve zlitine.....                                                                                                                                        | 9  |
| 3. TERMOČLENI IN MERJENJE TEMPERATURE .....                                                                                                                          | 11 |
| 3.1. Merjenje temperature .....                                                                                                                                      | 11 |
| 3.2. Zgodovina termočlena.....                                                                                                                                       | 11 |
| 3.2.1. Termočlen .....                                                                                                                                               | 13 |
| 3.2.2. Ohišje NI cDAQ-9172 .....                                                                                                                                     | 16 |
| 3.2.3. Modul NI 9213.....                                                                                                                                            | 17 |
| 3.2.4. Lab view.....                                                                                                                                                 | 17 |
| 3.2.5. Standardni pari termoelementov .....                                                                                                                          | 17 |
| 3.2.6. Zgradba termočlena.....                                                                                                                                       | 18 |
| 3.2.7. Uporaba .....                                                                                                                                                 | 19 |
| 3.2.8. Prednosti in pomanjkljivosti termočlena .....                                                                                                                 | 19 |
| 3.3. Premazi v livarstvu .....                                                                                                                                       | 20 |
| 3.4. Toplotna prevodnost .....                                                                                                                                       | 22 |
| 4. EKSPERIMENTALNO DELO .....                                                                                                                                        | 24 |
| 4.1. Merilna celica za enostavno termično analizo [ Quick-cup ] .....                                                                                                | 26 |
| 4.1.1. Izdelava lončka .....                                                                                                                                         | 26 |
| 4.1.2. Preizkus vzdržljivosti preiskovanih premazov na termočlenu je potekalo z<br>ulivanjem aluminijeve litine (AlMg9-349) in sive litine z lamelnim grafitom ..... | 27 |
| 5. REZULTATI IN RAZPRAVA .....                                                                                                                                       | 30 |
| 5.1. Preizkušanje premazov termočlenov z ETA pri litju Al zlitine .....                                                                                              | 30 |
| 5.2. Preizkušanje premazov termočlenov z ETA pri litju sive litine .....                                                                                             | 36 |
| 6. ZAKLJUČEK.....                                                                                                                                                    | 42 |
| 7. LITERATURA .....                                                                                                                                                  | 43 |

## SEZNAM SLIK

|                                                                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1: Fazni diagram železo ogljik (4) .....                                                                                                                                                          | 5  |
| Slika 2: Razdelitev mikrostruktur sive litine v odvisnosti od hitrosti ohlajanja .....                                                                                                                  | 7  |
| Slika 3: Razdelitev aluminijevih zlitin glede na vrsto legiranega sistema.....                                                                                                                          | 9  |
| Slika 4: Seebeckov prikaz termo elementa Fe in Cu (8).....                                                                                                                                              | 12 |
| Slika 5: Osnovna sestava termočlena (8).....                                                                                                                                                            | 13 |
| Slika 6: Nastanek dveh novih termo elementov ob vezavi voltmetra (8).....                                                                                                                               | 14 |
| Slika 7: Vezje treh različnih materialov (8).....                                                                                                                                                       | 14 |
| Slika 8: Merilna shema za merjenje absolutne temperature toplega spoja (8) .....                                                                                                                        | 15 |
| Slika 9: Shema merilne naprave z uporabo analognega ter digitalnega pretvornika (8).....                                                                                                                | 16 |
| Slika 10: Različni načini spojev obeh termo parov (8).....                                                                                                                                              | 18 |
| Slika 11: Postavitev termoelementa glede na način vgradnje v zaščitno ohišje (8).....                                                                                                                   | 19 |
| Slika 12: Shematski prikaz toplotne prevodnosti nekaterih materialov (14) .....                                                                                                                         | 22 |
| Slika 13: Diagram nekaterih keramičnih materialov v odvisnosti od temperature .....                                                                                                                     | 23 |
| Slika 14: Toplotna prevodnost kvarca v odvisnosti od temperature (16).....                                                                                                                              | 23 |
| Slika 15: Premazi AA, AAS, AASGF, AAGF in AG .....                                                                                                                                                      | 25 |
| Slika 16: Premazi AZ, AZ4, AZG in ATE .....                                                                                                                                                             | 25 |
| Slika 17: Standardna merilna celica za ETA izdelana po postopku croning (10).....                                                                                                                       | 26 |
| Slika 18: Posnetek merilne celice s štirimi termočleni .....                                                                                                                                            | 28 |
| Slika 19: Shema delovanja meritev po sistemu ATAS.....                                                                                                                                                  | 28 |
| Slika 20: Shematski prikaz meritve železa z uporabo quick-cup lončka,.....                                                                                                                              | 29 |
| Slika 21: Ohlajevalni krivulji Al-zlitine AlMg9, posneti z uporabo termočlena.....                                                                                                                      | 31 |
| Slika 22: Ohlajevalni krivulji Al-zlitine AlMg9, posneti z uporabo termočlena NiCr/Ni brez premaza in s premazom z oznako AAGF .....                                                                    | 32 |
| Slika 23: Ohlajevalne krivulje Al-zlitine AlMg9, posnete z uporabo termočlena NiCr/Ni brez premaza in s premazom z oznako AAS, AG in ATE .....                                                          | 34 |
| Slika 24: Mikrostruktura zlitine AlMg9 , polirano .....                                                                                                                                                 | 35 |
| Slika 25: Mikrostruktura zlitine AlMg9 polirano, posnetek intermetalne spojine FeMnAlSi (levo-rjava faza) in intermetalne spojine Mg2Si (desno- temna faza) .....                                       | 35 |
| Slika 26: Ohlajevalne krivulje sive litine z lamelastim grafitom , posnete z uporabo merilne celice, merjene s programom ATAS brez premaza (kvarc) in s premazom z oznako ATE+AG+AZG in 2XAZ4+AZG ..... | 36 |
| Slika 27 : Ohlajevalne krivulje sive litine z lamelastim grafitom , posnete z uporabo merilne celice, merjene s programom ATAS brez premaza (kvarc) in s premazom z oznako 2XAZ4 in AAS+AASGF .....     | 37 |
| Slika 28: Nejedkani vzorec 2XAZ4.....                                                                                                                                                                   | 38 |
| Slika 29: Nejedkani vzorec AAS+AASGF.....                                                                                                                                                               | 38 |
| Slika 30: Jedkani vzorec z nitalom 2XAZ4 .....                                                                                                                                                          | 38 |



|                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 31: Jedkani vzorec z nitalom S+AASGF .....                                                                                                                                              | 38 |
| Slika 32: Ohlajevalne krivulje sive litine z lamelastim grafitom , posnete z uporabo merilne celice, merjene s programom ATAS brez premaza (kvarc) in s premazom z oznako 2XAZ in 2XAA.....   | 39 |
| Slika 33: Ohlajevalne krivulje sive litine z lamelastim grafitom , posnete z uporabo merilne celice, merjene s programom ATAS brez premaza (kvarc) in s premazom z oznako 2XAAS in AZ+AG..... | 40 |
| Slika 34: Ohlajevalni krivulji sive litine z lamelastim grafitom , posneti z uporabo merilne celice, merjene s programom ATAS brez premaza (kvarc) in s premazom z oznako AA+AAGF .....       | 41 |

## SEZNAM PREGLEDNIC

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Razdelitev aluminijevih zlitin glede na primarni ter sekundarni legirani element .. | 10 |
| Tabela 2: Standardni tipi termoelementov (11) .....                                           | 18 |
| Tabela 3: Fizikalne lastnosti premazov Thermocoat proizvajalca Termit. ....                   | 25 |
| Tabela 4: Prikazane likvidus in maksimalne temperature za posamezne meritve .....             | 34 |
| Tabela 5: Nekateri rezultati meritev premazov s sistemom ATAS .....                           | 41 |

## SEZNAM OKRAJŠAV IN POSEBNIH SIMBOLOV

ETA → enostavna termična analiza

Al → aluminij

AlMg9 → zlitina aluminij magnezij 9

Fe → železo

P → fosfor

S → žveplo

Pb → Svinec

Bi → bizmut

Mn → mangan

Si → silicij

Cr → krom

Mo → molibden

Ni → nikelj

C → ogljik

Pd → paladij

Pt → platina

Ti → titan

Mg → magnezij

Zn → cink

Cu → baker

Hg → živo srebro

Sn → kositer

Rh → rodij

Ir → iridij

Au → zlato

Ag → srebro

W → volfram

Cd → kadmij

As → arzen

Sb → antimon

Te → telur

$Fe_3C$  → železov karbid

$\gamma \rightarrow$  avstenit  
 $\alpha \rightarrow$  ferit  
 $(\gamma + Fe_3C) \rightarrow$  ledeburit  
 $T_1 \rightarrow$  merilna temperatura  
 $T_2 \rightarrow$  primerjalna temperatura  
 $T_0 \rightarrow$  sprememba primerjalne temperature  
 $U \rightarrow$  napetost [V]  
 $k_{AB}, k_{CA}, k_{BC} \rightarrow$  termoobčutljivost  
 $k \rightarrow$  Boltzmannova konstanta  
NIST  $\rightarrow$  National Institute of Standards and Technology  
 $(\alpha - Fe_2O_3) \rightarrow$  hematit  
 $(\alpha - FeOOH) \rightarrow$  göthit  
 $Na_2CO_3 \rightarrow$  soda  
BeO  $\rightarrow$  berilijev oksid  
MgO  $\rightarrow$  magnezijev oksid  
 $Al_2O_3 \rightarrow$  aluminijev oksid  
 $ZrO_2 \rightarrow$  cirkonijev oksid  
 $k$  ali  $\lambda \rightarrow$  toplotna prevodnost [W/(m·K)]  
ATAS  $\rightarrow$  Adaptive Thermal Analysis System  
 $T_L \rightarrow$  likvidus temperatura  
 $T_{max} \rightarrow$  maksimalna temperatura  
 $T_S \rightarrow$  solidus temperatura

## 1. UVOD

Namen diplomskega dela je preučiti možnost uporabe alkoholnih premazov za zaščito termoelementov, ki se uporabljajo pri enostavni termični analizi (ETA). V tehnološki praksi se uporabljajo predvsem kvarčne cevke kot fizične bariere pred delovanjem preiskovane taline na termoelement.

Namen premaza je v preprečitvi fizičnega stika med preiskovano talino in termoelementom. Na ta način se prepreči raztapljanje termoelementa v talini ulivane zlitine. Z različnimi alkoholnimi premazi smo proučili možnost nadomestitve kvarčne cevke z alkoholnim premazom. Preizkuse ETA smo izvedli na sivi litini z lamelnim grafitom ter Al zlitini AlMg9. Preizkusi so primerjalno podali tudi odgovor na občutljivost termoelementa relativno na standardno kvarčno cevko.

## 2. TEORETIČNI DEL

### 2.1. Uvod v zgodovino železa

Prve najdbe in uporaba železa segajo v obdobje Grkov, kjer grški pesnik Homer omenja železo kot dragoceno kovino, ki je enakovredna zlatu. Perzijci so ga uporabljali za izdelavo sabelj za vojne z Grki. Večino železa se je namenjalo v vojaške namene. In tako so kmalu spoznali, da za redukcijo Fe rude potrebujejo visoke temperature. Za doseganje tališča železa so morali dodatno vpihovati zrak v gorišče. Pri Egipčanih je bila predelava čistega železa izvedena predvsem v kovaštvu.

Zgodovinsko gledano najstarejše pridobivanje železa izhaja iz 13. stoletja pred našim štetjem. Civilizacija Hetitov iz Anatolije je že uporabljala postopek kaljenja jekla. Železo so ločili iz železove rude ter ga kovali pri 800 °C. S tem so dodatno izločili nečistoče v obliki tekoče žlindre. Dobili so kovano železo, ki so ga uporabili za trgovanje z Asirci za srebro. Rimljani so ga uporabljali za izdelavo mečev vedoč, da ima veliko natezno trdnost.

Ljudje, ki so se ukvarjali s predelavo železa so izkoristili tekočo vodo za vrtenje velikih vodnih koles, ki so poskrbela za poganjanje velikih kladiv v kovačnicah. Prelomni trenutek je pomenila iznajdba meha, s katerim so lahko podpihovali ogenj v peči. To je bil eden prvih nastankov plavža. To jim je omogočilo pridobivanje večje količine surovega železa.

Zelo zanimivo je bilo pridobivanje železa pri Indijcih, ki so za damasciranje uporabljali jeklo po imenu Wootz, ki je vsebovalo veliko ogljika. Izdelovali so ga okoli 3. stoletja pr.n.št.. Jeklo so pridobivali tako, da so železovo rudo karbonizirali, da so jo stalili in nato še dekarbonizirali, do vsebnosti ogljika od 1-1,6 mas. % C. Skrivnost izdelave se je obdržala vse do 17. stoletja do prenehanja njegove proizvodnje.

Zelo inovativni so bili tudi Kitajci, ki so železo in jeklo pričeli uporabljati približno 1000 let kasneje kot Hetiti. Uporaba se je močno razširila v vojaške in konstrukcijske namene, za orodja in posode. Njihova tehnologija prečiščevanja staljenega železa in preoblikovanja je bila okoli 500 let pr.n.št. že zelo razvita, kajti Evropejci so enako tehnologijo začeli uporabljati šele 2000 let kasneje.

Zaradi izuma topa in železnic se je v Evropi v 14. stol. povečala uporaba litega železa. S tem se je povečala tudi poraba oglja. Posledica je bila ogromno krčenje gozdov, zato je v 17. stol. prišlo do zamenjave oglja s koksom, ki so ga pridobili iz premoga. Leta 1781 je švedski kemik Torbern Olof Bergman razkril pomembno vlogo ogljika v železovi zlitini in tako pojasnil razliko med železom in jeklom.

Zaradi velike potrebe po kvalitetnem jeklu je bilo jeklo v 19. stol. v industrijskem razvoju, kjer so sodelovali James Watt, George Stephenson in drugi. Na voljo je bilo le lito železo, ki ga je bilo mogoče taliti in ulivati v različne oblike in kovno železo (jeklo), ki so ga preoblikovali na različne načine.

Ključni trenutek je prišel, ko je Henry Bessemer v staljeno železo vpihoval mrzel zrak ter s postopkom razogličanja dobil kovno železo. S to tehnologijo je omogočil, da je proces hitrejši, izdelek pa trdnjši in cenejši.

Dokončno se je tehnologija razvila tako daleč, da je leta 1900 Francoz Paul L. T. Heroult razvil prvo elektroobložno peč. Princip delovanja je, da s pomočjo ogljikovih elektrod, ki so tik nad surovinami, ob dotiku ustvarimo električni oblok, ki je talil surovine ter zgoreval ogljik. S tem načinom ni bilo potrebno dovajati zraka za razogličanje. Izum elektroobložne peči je omogočil izdelavo visokokakovostnih in posebnih vrst jekel, ki so jih uporabljali za orodja in vzmeti.

Danes se večina konstrukcijskega jekla pridobiva z oksidacijskem postopkom, ki je izboljšana metoda Bessemerjevega procesa v t.i. LD - konvertorju. Z vpihovanjem čistega kisika na surovo železo se temperatura dvigne na okoli 1700 °C. Tako se nam zmanjša vsebnost ogljika v talini. Na ta način pridobivamo različne vrste konstrukcijskih jekel. Za razliko od Bessemerjevega postopka je v tem, da namesto zraka uporabimo kisik, ki skupaj z modernim prečiščevalnim procesom, zagotavlja dobro zrnastost in dobro varljiv material z enakomerno trdnostjo in žilavostjo.

Pri izdelavi navadne železove zlitine je naloga peči, da dosežemo zadosti visoke temperature, da se v njej raztali ves vložek. Naloga peči je tudi da nam omogoča potrebno legiranje in prepreči dostop nečistoč do taline ter s tem zaščiti talino pred oksidacijo. Za taljenje grodlja se v praksi največ uporabljajo peč kupolka, bobnasta rotacijska peč in električna oksidacijska peč. (1)

## 2.2. Opredelitev jekla in jeklenih zlitin

V današnjem času delimo železove zlitine na navadne in legirane zlitine. Pri obeh je prvi legirani element ogljik. Navadne železove zlitine vsebuje poleg železa in ogljika še določene količine drugih elementov nečistoč, ki so lahko nečistoče (P, S, Pb, Bi) in drugih legirnih elementov (Mn, Si). Pri legiranih ali konstrukcijskih jeklih namerno dodajamo zlitinske elemente, da bi izboljšali nekatere lastnosti jeklenega materiala, kot so magnetne lastnosti, odpornost proti koroziji, mehanske lastnosti, prekaljivost itd. Za razliko od navadnih jekel vsebujejo še določene količe Cr, Mo, Ni, itd. Poznamo tudi posebna legirana jekla, bolj znana po imenu nerjaveča jekla z vsebnostjo 11,5 % mas. % Cr. V svojo skupino ločimo tudi orodna jekla, namenjena za odrezovanje in oblikovanje kovinskih ter nekovinskih materialov v želeno obliko. Legirana jekla delimo na tri skupine in sicer na maloogljična ali podevtektoidna z vsebnostjo do 0,76 mas. % C, evtektoidna ali srednjeogljična z vsebnostjo ogljika 0,76 mas. % C in visokoogljična ali nadevtektoidna z vsebnostjo ogljika med 0,76 - 2,14 mas. % C. Večina legiranih jekel dobijo končno obliko z gnetenjem. Železove litine vsebujejo mnogo več ogljika in silicija kot jekla. Navadna jekla razdelimo na podevtekske grodlje z 2,14 - 4,30 mas. % C, evtekske grodelje s 4,30 mas. % C in nadevtekske grodlje z 4,30 - 6,67 mas. % C. (2) (3)



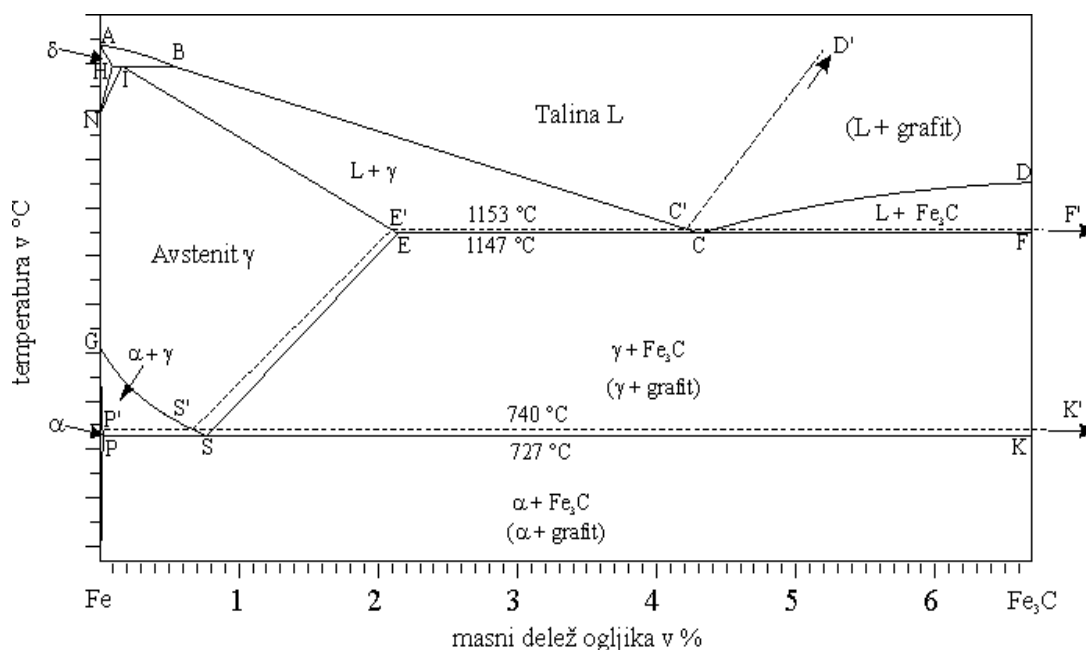
## 2.3. Lito železo

V zgodovini je lito železo prisotno že več kot 2500 let. Na stari celini pa ga poznamo že tisočletje. Zaradi izrednega zanimanja znanstvenikov je postala zlitina železo - ogljik eden od najpomembnejših in najbolj razširjenih tehničnih zlitin in najpomembnejši livni material. Priljubljen je postal zaradi svojega širokega območja mehanskih in fizikalnih lastnosti ter nizki ceni. V današnjem času smo sivo litino spoznali kot kompozit. Omogoča nam načrtovanje zaradi širokega spektra lastnosti. Na lastnosti materiala vplivamo poleg osnovne sestave še s hitrostjo ohlajanja, z nukleacijo, z legiranjem in mikrolegiranjem.

Sistem železo - ogljik vsebuje poleg železa še ogljik, ki je glavni legirni element in sicer z vsebnostjo od 0,1 – 4 mas. % C. Poleg železa in ogljika so litine legirane še z dodatki silicija in mangana. Dodatno vsebujejo še žveplo in fosfor. Tehnično pomembne zlitine se nahajajo v enofaznem območju ali v območju do evtektiske točke.

Železove zlitine ločimo po količini ogljika in sicer zlitine, ki se strjujejo brez evtektika. V to skupino spada jeklena litina ter zlitine, ki se strjujejo z evtektikom. V to skupino spadajo temprana, siva, bela litina in posebne železove litine.

V ravnotežnem diagramu Fe-C je meja med obema vrstama pri približno 2 mas. % C, ki pa se ob dodatku drugih elementov spreminja. Zlitine, ki se strjujejo z evtektikom, se uporabljajo izključno za livarske gnetne zlitine. Zlitine, ki se strjujejo brez evtektika, se uporabljajo v jeklarstvu za izdelavo polizdelkov, kot so pločevina, profili ali žice itd.



Slika 1: Fazni diagram železo ogljik (4)

Lito železo razdelimo po lastnostih in po izgledu prelomne površine. Poznamo sivo, belo, temprano in melirano litino. Pri sivi litini se večji del ogljika nahaja v strukturi v obliki grafita, ki daje po prelomu značilno sivo barvo. Pri beli litini je pretežen del ogljika vezan v železov karbid ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), ki daje značilen bel in krhek prelom. Posebnost melirane litine je, da je mešanica obeh struktur. Preostanek ogljika je vezan v obliki cementita, preostanek ogljika pa je raztopljen v avstenitu.

Melirana litina se strjuje tako po stabilnem in nestabilnem sistemu, katerega produkt je grafit, kot tudi po metastabilnem sistemu, katerega produkt je ledeburit ( $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ ). (2) (3)

## 2.4. Siva litina

Siva litina je inženirski material, ki je zaradi svoje kemične sestave cenovno ugodna. Odlikujejo jo uporabne tehnološke in mehanske lastnosti ter enostavna izdelava. Ima dobro toplotno prevodnost in veliko trdnost, odporna je na obrabo, obenem pa ima dobro obdelovalnost.

Lastnosti sive litine so odvisne od same mikrostrukture, ki pa je odvisna od kemične sestave ter pogojev samega strjevanja taline. Največji vpliv na mikrostrukturo ima vsebnost ter porazdelitev ogljika.

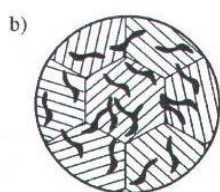
Sive litine razdelimo na obliko, velikost ter porazdelitev grafita. Sivo litino razlikujemo po lamelnarnim, kroglastim ter vermikularnim grafitom. Glede na merilo matrice pa razlikujemo litine s feritno matrico, perlitno - feritno matrico, perlitno matrico ter avstenitno matrico.

Katero vrsto litine dobimo, je najbolj odvisno od deleža silicija ter od hitrosti ohlajanja. Večji delež silicija in počasnejšo ohlajanje ima za posledico sivo strjevanje (meta stabilen sistem) oziroma potek procesov skladno z diagramom Fe - C, v Slika 2.

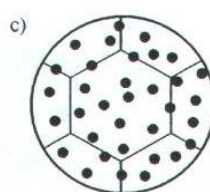


Siva litina z lamelnim grafitom in feritno osnovo.

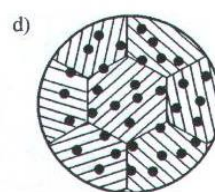
Natezna trdnost med 100 in 400 MPa. Raztezek ob porušitvi je praktično enak nič.



Siva litina z lamelnim grafitom ter perlitno osnovo.



Siva litina s kroglastim grafitom ter feritno osnovo. Vsebuje < 0,2 mas. % Mn. Natezna trdnost med 400 in 550 MPa. Raztezek ob porušitvi med 10 in 20 % začetne merilne dolžine..



Siva litina s kroglastim grafitom ter perlitno osnovo. Vsebuje do 0,5 mas. % Mn. Natezna trdnost med 600 in 800 MPa. Raztezek ob porušitvi med 2 in 7 % začetne merilne dolžine.

Slika 2: Razdelitev mikrostruktur sive litine v odvisnosti od hitrosti ohlajanja

Grafit je termodinamsko stabilnejši kot cementit, zato so ravnotežne črte pomaknjene k višjim temperaturam in k manjšim deležem ogljika. Glede na hitrosti ohlajanja in različnih dodatkov v sivi litini lahko pri ravnotežnem ohlajanju dobimo več različnih oblik grafita (lamelni ter kroglasti). Najbolj ugodna je kroglasta oblika (ima najvišje mehanske lastnosti natezno trdnost, raztezek ter mejo tečenja), ker oblika izločenega grafita ne povzroča zarezne učinka, ki je prisoten pri sivi litini z lamelnim grafitom. Kroglasti grafit nastane kot posledica obdelave taline z Mg, pri čemer le to razžveplamo ter dezoksidiramo.

Podvtektška siva litina pa začne strjevanje s kristalizacijo primarnega avstenita, ki s časom in ohlajevalno temperaturo raste, preostala prosta talina pa se strjuje do evtektške temperature. V tej točki se preostala talina strdi v avstenit + grafit po stabilnem sistemu.

Metastabilno strjevanje, ki bi lahko potekalo pri hitrem ohlajanju, je zaradi izjemno visoke trdote cementita iz ledeborita prepovedana. Po končanem strjevanju, v skladu z faznim diagramom Fe–C, avstenit spreminja sestavo v skladu s solvus črto ES. Pri tem se izloča sekundarni grafit na obstoječe grafitne delce. Avstenit pod evtektoidno temperaturo ni več obstojen, zato transformira v ferit in grafit ali v heterogeni zlog perlita. V sivi litini z lamelnim grafitom si želimo predvsem perlitne matrice, saj grafitne lamele ostro zarežejo kovinsko osnovo in le te najpomembneje vplivajo na mehanske lastnosti sive litine z lamelnim grafitom. (2) (3) (5)

## 2.5. Aluminijeve zlitine

Aluminijeve zlitine odlikuje relativno veliko razmerje med trdnostjo in gostoto ob ostalih lastnostih, kot je dobra odpornost proti koroziji, dobra električna in toplotna prevodnost ter dobro obdelovalnost.

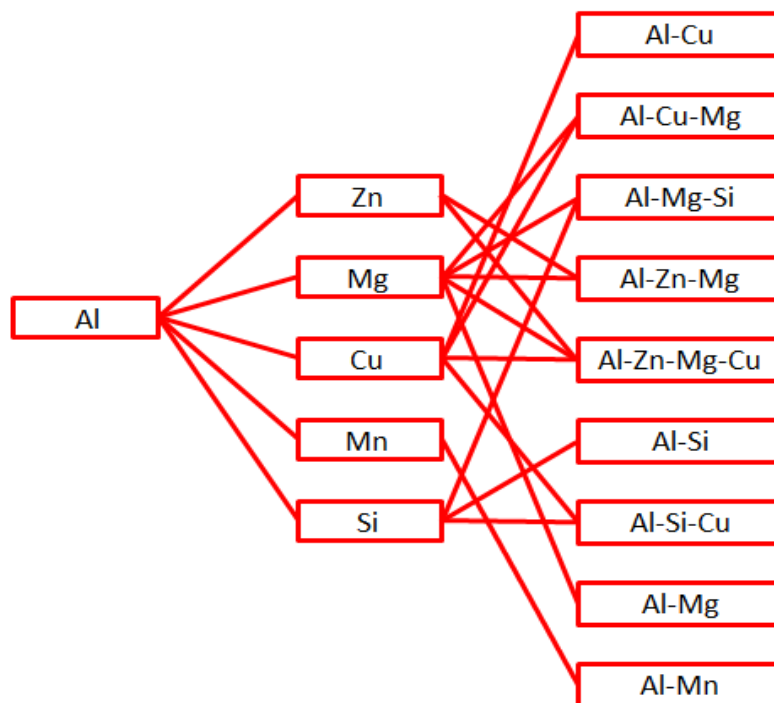
Glavni legirni elementi aluminijevih zlitin so silicij, baker, magnezij ter cink. Zlitine, ki se uporabljajo v tehnologiji, nastopajo v večkomponentnih sistemih.

Al zlitine se predelujejo z gnetenjem ali pa so narejene za generiranje oblike z livarsko tehnologijo (gnetne zlitine, livarske zlitine). Določene zlitine še dodatno toplotno obdelujemo z namenom izločevalnega utrjevanja

Na Sliki št. 3 je prikazana shema značilnih Al zlitin tako za gnetenje kot za livarstvo.

Izdelava aluminijevih zlitin je z litjem ter gnetenjem z dodatno toplotno obdelavo (topilno žarjenje, izločevalno žarjenje oz. staranje).

Uporaba aluminijevih zlitin je pogosta predvsem v avto, transportni, letalski, živilski, farmacevtski in gradbeni industriji. (6) (7)



Slika 3: Razdelitev aluminijevih zlitin glede na vrsto legiranega sistema

Tako aluminijeve zlitine delimo v več skupin prikazanih v Tabeli 1. (6)

Tabela 1: Razdelitev aluminijevih zlitin glede na primarni ter sekundarni legirani element

| Oznaka skupine | Glavni ter stranski legirni elementi      | Oznaka skupine | Glavni ter pomožni legirni elementi                          |
|----------------|-------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------|
| 1xxx           | Čisti Al brez dodatnih legirnih elementov | 5xxx           | Zlitine z magnezijem                                         |
| 2xxx           | Zlitine legirane z bakrom ter silicijem   | 6xxx           | Zlitine s silicijem in magnezijem                            |
| 3xxx           | Zlitine z manganom                        | 7xxx           | Zlitine s cinkom ter bakrom, magnezijem kromom in cirkonijem |
| 4xxx           | Zlitine s silicijem                       | 8xxx           | Zlitine s kositrom ter litijem                               |

### **3. TERMOČLENI IN MERJENJE TEMPERATURE**

#### **3.1. Merjenje temperature**

Temperatura je spremenljivka, s katero izražamo termično ali termodinamiko stanje teles oziroma snovi in njihovo sposobnost prenosa toplote na drugo telo.

Toplota je energija oziroma energijski tok, ki se prenaša iz teles na okolico ali obratno, odvisno od temperaturnih stanj. Tok toplote je usmerjen vedno iz telesa z višjo temperaturo na telo z nižjo temperaturo. Temperatura je v procesu prenosa energije le spremenljivka, ki popisuje makro stanje telesa in določa smer toplotnega toka. (8)

Prenos toplote je izveden s:

- prevajanjem,
- konvekcijo in
- sevanjem.

Toplotni tok je izveden s prevodom toplote skozi toga telesa, tekočine in pline.

Sprememba temperaturnih stanj so vzrok mnogim fizikalnim spremembam, ki se lahko izkoristijo za merjenje temperature. (8)

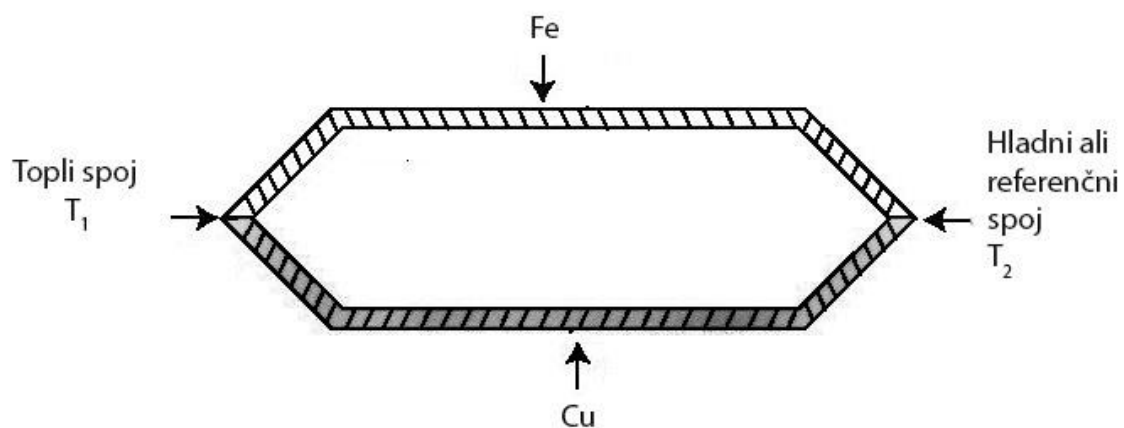
Najvažnejše so:

- odvisnost dimenzijskih sprememb od temperature,
- odvisnost električne upornosti od temperature,
- odvisnost energije sevanja teles od temperature,
- odvisnost električnega potenciala od temperature.

#### **3.2. Zgodovina termočlena**

Leta 1821 je Thomas Johann Seebeck ugotovil, da krog, sestavljen iz različnih kovin na stičišču ali križišču z različnimi temperaturami, odkloni iglo kompasa. Sprva je menil, da je to posledica magnetne sile oziroma magnetizma zaradi razlik v temperaturah. Kmalu se je zavedal, da je to zmotno mišljenje.

Seebeck je opazoval dve žici iz različnih kovin, ki ju je povezal na prostih koncih. Pri tem imata stični mesti temperaturo  $T_1$  in  $T_2$ . Nato je segreval le eno stično mesto  $T_1$ , drugo pa je imelo temperaturo okolja  $T_2$ . Zaradi segrevanja enega dela žice to povzroči večjo kinetično energijo pri elektronih in s tem več trkov in večje razdalje med njimi. To povzroči manjšo gostoto elektronov na toplem delu, saj se pomikajo proti hladnemu delu. Ker je zaradi tega več elektronov v hladnem delu kot v toplem, se pojavi razlika potencialov. Na vezje je priključil galvanometer in uvidel, da se zaradi razlik v temperaturah pojavi električni potencial. To imenujemo Seebeckov pojav. Velikost napetosti je premosorazmerna z razliko temperatur na vročem in hladnem koncu. Na podlagi tega principa je možno izmeriti razliko temperatur. (8) (9) (10)



Slika 4: Seebeckov prikaz termo elementa Fe in Cu (8)

Njegove raziskave električnega toka so pokazale, da dobimo pri različnih materialih različne termo napetosti. Upoštevajoč smer toka je sestavil tabelo termo potencialov.

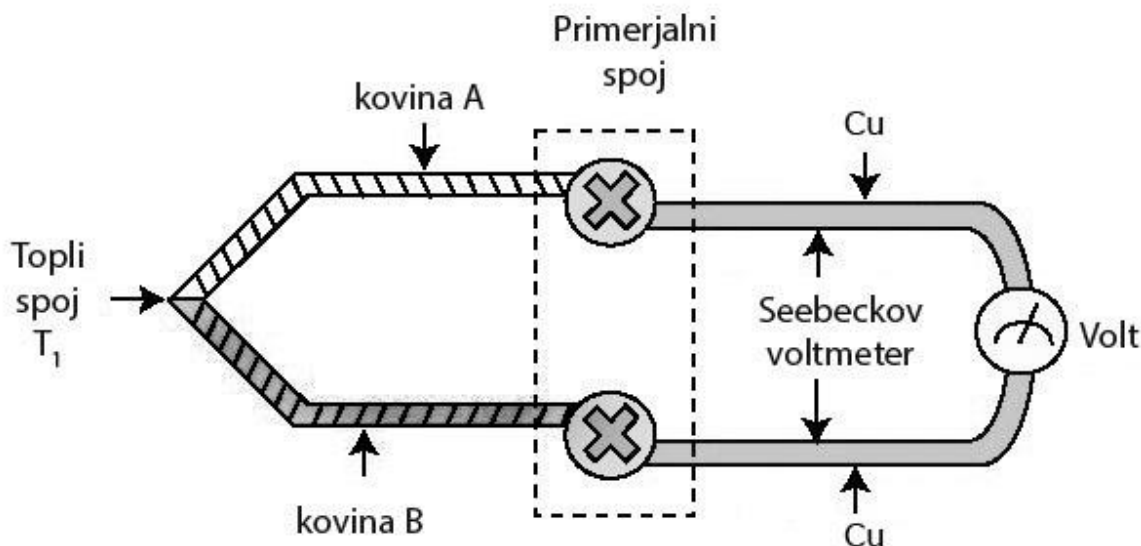
Bi - Ni - Co - Pd - Pt - U - Cu - Mn - Ti - Hg - Pb - Sn - Cr - Mo - Rh - Ir - Au - Ag - Zn - W - Cd - Fe - As - Sb - Te.

Električni tokokrog poznamo kot termostik, električna napetost, ki se pri tem ustvari, pa kot električno napetost ali krajše termonapetost. Poznejše raziskave pojava termoelektrične napetosti so pokazale, da ima ta dejansko dva vpliva. Peltierov efekt in Thomsonov efekt. Delne termoelektrične napetosti, pridobljene po teh efektih, so dobile ime Peltierova in Thomsonova termonapetost. Peltierova termonapetost nastane zaradi potencialne razlike na stičnem mestu dveh kovin, ki sta na različnih temperaturah, Thomsonova termonapetost pa zaradi potencialne razlike v delu vodnika, vzdolž katerega obstaja gradient temperature.



Iz dosedanjih pojasnil lahko ugotovimo zelo pomembno lastnost termočlena, in sicer, da termočlen meri razliko temperatur med merilnim in primerjalnim stičnim mestom.

To pomeni, da moramo za merjenje poznati temperaturo hladnega spoja  $T_2$ , če želimo pomeriti omenjeno temperaturno razliko oziroma razliko napetosti, moramo tokokrog prekiniti in nanj priključiti voltmeter. Tako pridemo do naprave, ki jo imenujemo termometer. (8)



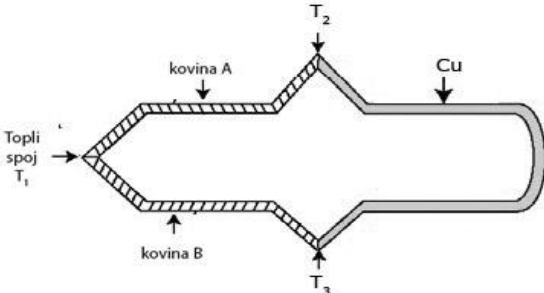
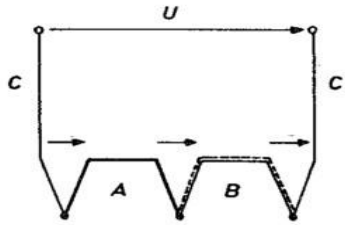
Slika 5: Osnovna sestava termočlena (8)

### 3.2.1. Termočlen

Termoelement tudi termočlen (angl. Thermocouple ) je v osnovi senzor temperature. Meritev s termočlenom je najpogostejša industrijska meritev.

Termočlen je sestavljen iz dveh žic, znanih kot "termožici" (iz različnih materialov), ki sta na enem koncu zavarjeni. To mesto poznamo kot "vroči" konec, torej tisto stično mesto, ki ima merilno temperaturo ( $T_1$ ). Zaradi tega zanj bolj upravičeno uporabljamo oznako "merilni konec" ali "merilno stično mesto". Drugi odprti konec termoelementa je namenjen priključitvi merilnika napetosti. Ta del termoelementa imenujemo "hladni konec" ali boljše "primerjalno merilno mesto", ki ima neko primerjalno temperaturo ( $T_2$ ).

Voltmeter s priključnimi žicami ustvari dva dodatna termična člena, kot to kaže Slika 6. (8)  
(9)

|                                                                                   |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |
| <p>Slika 6: Nastanek dveh novih termoelementov ob vezavi voltmetra (8)</p>        | <p>Slika 7: Vezje treh različnih materialov (8)</p>                                |

Termočlena, ki nastaneta na obeh priključnih sponkah, sta v strokovni literaturi označena kot parazitna. Za splošno obravnavo razmer v merilnem tokokrogu uporabimo za izhodišče vezje treh različnih materialov A, B in C, kot je to pokazano na Sliki 7.

Vsota napetosti tokokroga je: (8)

$$U_1 + U_2 + U_3 - U = 0 \quad (8)$$

$U$  ... napetost  $\rightarrow$  enota [V],

pri čemer lahko kot primerjalni potencial izberemo potencial bakra (Cu), zapišemo posamezne napetosti: (8)

$k_{AB}$  ... termoobčutljivost

$k$  ... Boltzmannova konstanta

$$U_1 = k_{AB} \times T_1 = (k_{ACu} - k_{BCu}) \times T_1 \quad (8)$$

$$U_2 = k_{CA} \times T_2 = (k_{CCu} - k_{ACu}) \times T_2 \quad (8)$$

$$U_3 = k_{BC} \times T_3 = (k_{BCu} - k_{CCu}) \times T_3 \quad (8)$$

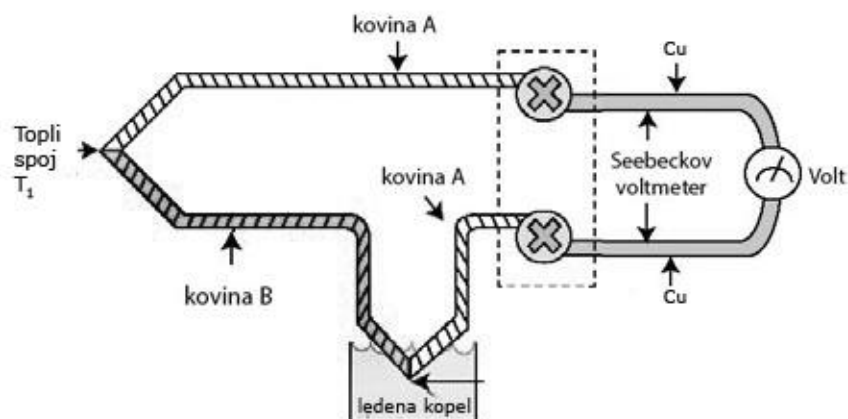
ter po uvrstitvi zadnjih vrednosti in ureditvi:

$$U = U_2 + U_1 + U_3 = k_{CCu}(T_2 - T_3) + k_{ACu}(T_1 - T_2) + k_{BCu}(T_3 - T_1) \quad (8)$$

V primeru, ko sta temperaturi stičnih točk II in III enaki, ko je torej  $T_2 = T_3 = T_0$ , postane vrednost  $(T_2 - T_3) = 0$  in dobi zgornja enačba obliko: (8)

$$\begin{aligned} U &= k_{ACu} \times (T_1 - T_0) + k_{BCu} \times (T_0 - T_1) = \\ &= k_{ACu} \times T_1 - k_{BCu} \times T_1 - k_{ACu} \times T_0 + k_{BCu} \times T_0 = \\ &= (k_{ACu} - k_{BCu}) \times T_1 - (k_{ACu} - k_{BCu}) \times T_0 = k_{AB} \times (T_1 - T_0) \quad (8) \end{aligned}$$

V primeru, če želimo pomeriti absolutno temperaturo, moramo poznati temperaturo referenčnega spoja. Najenostavneje je to realizirati tako, da spojno mesto, kjer so priključne sponke, potopimo v ledeno kopel. Ugodnejšo rešitev, kjer spojke niso izpostavljene vlagi, kaže spodnja Slika 8. (8)

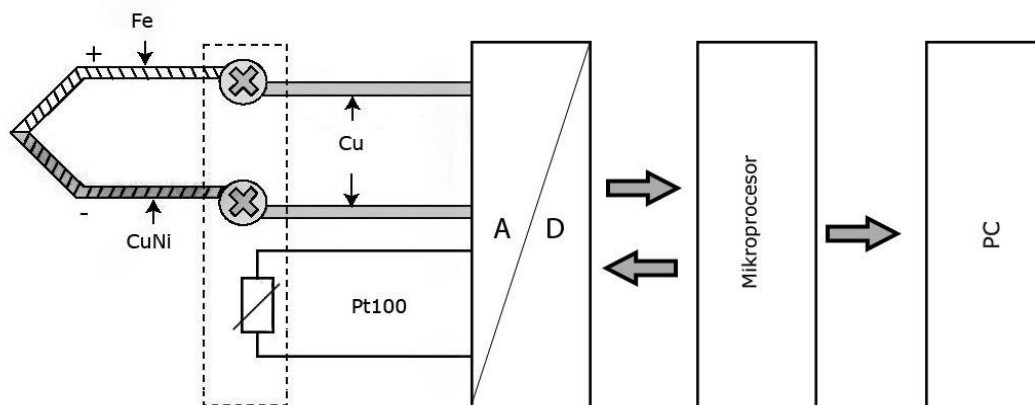


Slika 8: Merilna shema za merjenje absolutne temperature toplega spoja (8)

V ta namen prvemu termočlenu dodamo še enega, katerega spojno mesto potopimo v ledeno kopel, ki tvori referenčni spoj s temperaturo 0 °C. Prikazani način je v praksi zelo dobrodošel, saj so vse tabele (izdaja jih NIST- National Institute of Standards and Technology) termičnih napetosti izražene glede na referenčno temperaturo 0 °C. Priključni spojki ne tvorita termočlena, saj sta oba spoja sestavljena iz enakih kovin, pri čemer se spoja nahajata tudi na isti temperaturi.

V praksi je takšna rešitev enostavna, zato pogosteje uporabljamo vezavo s Slike 8. Odčitek merilnega instrumenta je tedaj premo sorazmeren temperaturni razliki, zato moramo, če

želimo pomeriti absolutno vrednost temperature na vroči spojki, izmerjenemu odčitku prišteti še vrednost, ki je premosorazmerna referenčni temperaturi, na kateri se nahajata priključni spojki. Omenjeni postopek imenujemo kalibracija ničelne točke (Cold Junction Compensation). (8)



Slika 9: Shema merilne naprave z uporabo analognega ter digitalnega pretvornika (8)

Pri posebnih integriranih vezjih lahko spremembo primerjalne temperature  $T_0$  kompenziramo na nivoju osnovne termoelektrične napetosti termočlena ali na nivoju ojačanja termoelektrične napetosti, saj s takimi vezji običajno hkrati kompenziramo, ojačamo, zaščitimo, itd. Z ojačenjem pripeljemo termonapetost na vrednosti, ki so dobro merljive in niso več tako občutljive na zunanje motnje.

Prvi način s kompenzacijo vpliva spremembe  $T_0$  pred ojačenjem najpogosteje realiziramo z uporabo posebnih integriranih vezij za merjenja s termočleni.

Kot primer lahko navedemo temu namenjena znana vezja proizvajalca "Analog Devices" serije AD 594 ... AD 597. Pri tem so vezja AD 594 in AD 596 umerjena za termočlene tipa J (Fe-CuNi) in vezja AD 595 in AD 597 za termočlene tipa K (NiCr-Ni). V našem primeru smo uporabili modul National Instruments 9213 v ohišju NI cDAQ-9172 za termočlen tipa K (NiCr-Ni). Pri takih vezjih priključimo žice termočlena neposredno na vezje. (8) (9)

### 3.2.2. Ohišje NI cDAQ-9172

NI cDAQ-9172 je osem režno NI CompactDAQ ohišje, v katerega lahko vstavimo do osem (vhodnih ali izhodnih) merilnih modulov serije C. Ohišje NI cDAQ-9172 deluje v razponu od

11 do 30V, priključimo pa ga na 230V omrežje s konverterjem, ki pretvori električno energijo na potrebno vrednost. Ohišje priklopimo na računalnik s kablom USB 2.0. Ohišje vključuje tudi dve reži (reža 5 in reža 6) za primerna modula, katera imata vgrajena dva 32-bitna števec, ki se lahko uporabljata za merjenje časa, za funkcije, kot so štetje dogodkov, generiranje ali merjenje pulzov, valov itd. (10)

### **3.2.3. Modul NI 9213**

Vhodni modul NI 9213 C Series je namenjen za priključitev termoelementov, za uporabo z NI CompactDAQ in CompactRIO ohišjem. Vključuje filter za glajenje robov, zaznavo odprtih termoelementov in kompenzacijo hladnega člena za visoko natančne meritve temperature. Na njega lahko priključimo 4 termoelemente ali  $\pm 78\text{mV}$  analogne vhode. Ima 24-bitno razločljivost in je primeren za uporabo v okolju s temperaturo od  $-40$  do  $70^{\circ}\text{C}$  [10]. Omogoča merjenje termočlenov J, K, T, E, N, B, R in S. (10)

### **3.2.4. Lab view**

Lab view je programska oprema, ki uporablja tako imenovani grafični način programiranja. Programska oprema se uporablja za spajanje različnih modulov, ki nam registrirajo temperaturo, vlago ipd. V našem primeru smo jo uporabili za merjenje temperature in časa. (10)

### **3.2.5. Standardni pari termoelementov**

V industriji kot praktične izvedbe termoelementov srečamo različne standardne kombinacije materialov A, B z dobrimi lastnostmi (T, t, stabilnost itd.).

Oznake standardnih parov so urejene po črkah: tip T, tip J, tip E itd. Vsak standardni termoelement ima svoje prednosti in slabosti. Nekaj najpogostejših parov oziroma tipov termoelementov z osnovnimi lastnostmi je prikazanih v Tabeli 2.

Omejitve uporabe:

Pri izbiri termoelementa za dano aplikacijo je treba paziti tudi na omejitve določenih materialov na razna okolja (vlaga, atmosfera, redukcija, temperatura okolja uporabe itd.). (11)

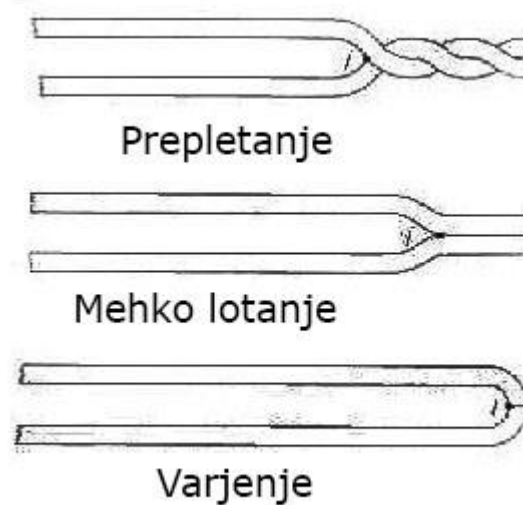
Tabela 2: Standardni tipi termoelementov (11)

| Tip | Mat A/B       | Temperaturno območje uporabe [°C] | S [mV/K] |
|-----|---------------|-----------------------------------|----------|
| T   | Cu/Konst.     | -270% +600                        | 40,9     |
| J   | Fe/Konst.     | -270% +100                        | 51,7     |
| K   | Cr/Alumel     | -270% +1300                       | 40,6     |
| E   | Cr/Konst.     | -100% +1000                       | 60,9     |
| S   | Pt:Rh(10%)/Pt | 0% 1550                           | 6,0      |
| R   | 13%           | 0% 1600                           | 6,0      |

### 3.2.6. Zgradba termočlena

Za termočlen je značilen spoj dveh kovin, ki je lahko izveden na enega izmed načinov (Slika 10): (8)

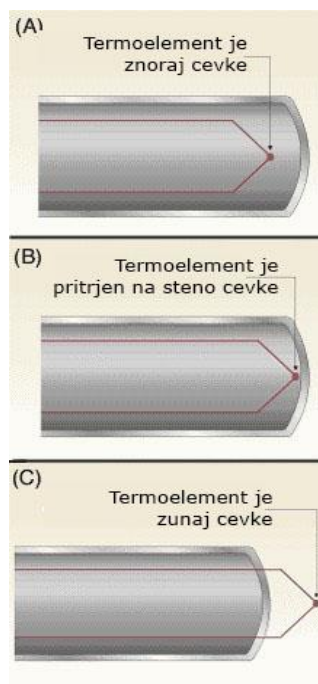
- S prepletanjem ( slaba možnost z nesigurnim spojem)
- Mehki lot ( vključuje še tretji material za merjenje nizkih temperatur do 200 °C, dokler imata kovini enaki temperaturi, ni možnosti napak)
- Varjeni spoj ( najboljši spoj-paziti moramo na taljenje spoja, da ne spremenimo lastnosti žice)



Slika 10: Različni načini spojev obeh termo parov (8)

Glede na način vgradnje v zaščitno ohišje delimo termočlene: (8)

- Neozemljene ( spoj se ne dotika ohišja, na ta način je dosežena električna izolacija na račun večjega odzivnega časa termočlena)
- Ozemljene ( termočlen je spojen z ohišjem)
- Neizoliran ( boljši odzivni čas, večja izpostavljenost koroziji, mehanskim poškodbam )



Slika 11: Postavitev termoelementa glede na način vgradnje v zaščitno ohišje (8)

### 3.2.7. Uporaba

Termoelement ima zelo širok spekter uporabe, saj se lahko uporablja za merjenje temperature kovin, tekočin in plinov. V industriji se predvsem uporablja za merjenje temperature tekočih kovin, za merjenje temperature v talilnih pečeh in za merjenje temperature v različnih reaktorjih. (8)

### 3.2.8. Prednosti in pomanjkljivosti termočlenov

So dokaj poceni in vsestransko uporabni. Lahko se uporabljajo v merilnem območju od 73 K (-200 °C) pa vse do 2273 K (2000 °C), kjer pa je natančnost pogojena z izbiro materialov. Imajo dokaj hiter odziv na spremembo temperature, a niso tako natančni kot so uporovni

termometri. Ena izmed njihovih glavnih prednosti je ta, da se lahko uporabljajo za merjenje temperature zelo majhnih predmetov, kot so na primer polprevodniški elementi. Termočleni so pogosto uporabljeni v skupinah, s čimer povečamo njihovo občutljivost. (8)

### 3.3. Premazi v livarstvu

Površino form in jeder, ki pridejo v stik s tekočo talino, moramo pogosto še dodatno premazati z zaščitno plastjo, da na ta način zagotovimo gladko površino ulitkov. Premaze nanašamo s premazovanjem, z brizganjem, s potapljanjem in z oblivanjem. Debelina premaza znaša od 0,1 do 2mm in je odvisna od velikosti zrn peska, iz katerega je izdelana forma. Čim večja so zrna, tem debelejši mora biti zaščitni premaz, ravno tako je odvisna tudi od tlaka taline in termične obremenitve veziva. (3)

Premazi delujejo na različne načine:

- Imajo toplotno izolacijski učinek, ki prepreči izmenjavo med talino in formo, posebno če ima litina ali forma veliko toplotno prevodnost (dosežena temperatura površine forme je tako nižja in zavre medsebojne reakcije).
- Premazi izgledajo površino forme in doseže se bolj gladka površina ulitkov, penetracija taline v formo se zmanjša.
- Glavna naloga je boljše ločevanje forme od ulitka, odnosno zmanjšanje pripekanja.
- Obrabna obstojnost forme je večja in prepreči erozijo forme.
- Deluje kot zapora za prehod plinov, ki bi sicer prehajali iz forme v litino.

Pri nekaterih postopkih izdelave premazov se uporabljajo žveplove spojine, ki bi lahko škodljivo delovale na izoblikovanje strukture v površini ulitka, npr. pri nodularni litini. S premazom preprečimo škodljivo delovanje taline na ulitek ter izboljšamo kvaliteto površine ulitka. Tako ločimo izolacijske, izglajevalne, ločilne, zaporne in utrjevalne premaze in njihove kombinacije. (3)

Premaz je sestavljen iz naslednjih osnovnih ognjevdržnih materialov, ki je lahko grafit, koks, kremen, cirkon, magnezit, korund, šamot itd.

Grafit je zelo pogosto uporabljen material z dodatkom glinice, kremenove moke in drugih dodatkov dobimo premaze, ki so namenjeni za boljše ločevanje in glajenje forme. Koloidalni



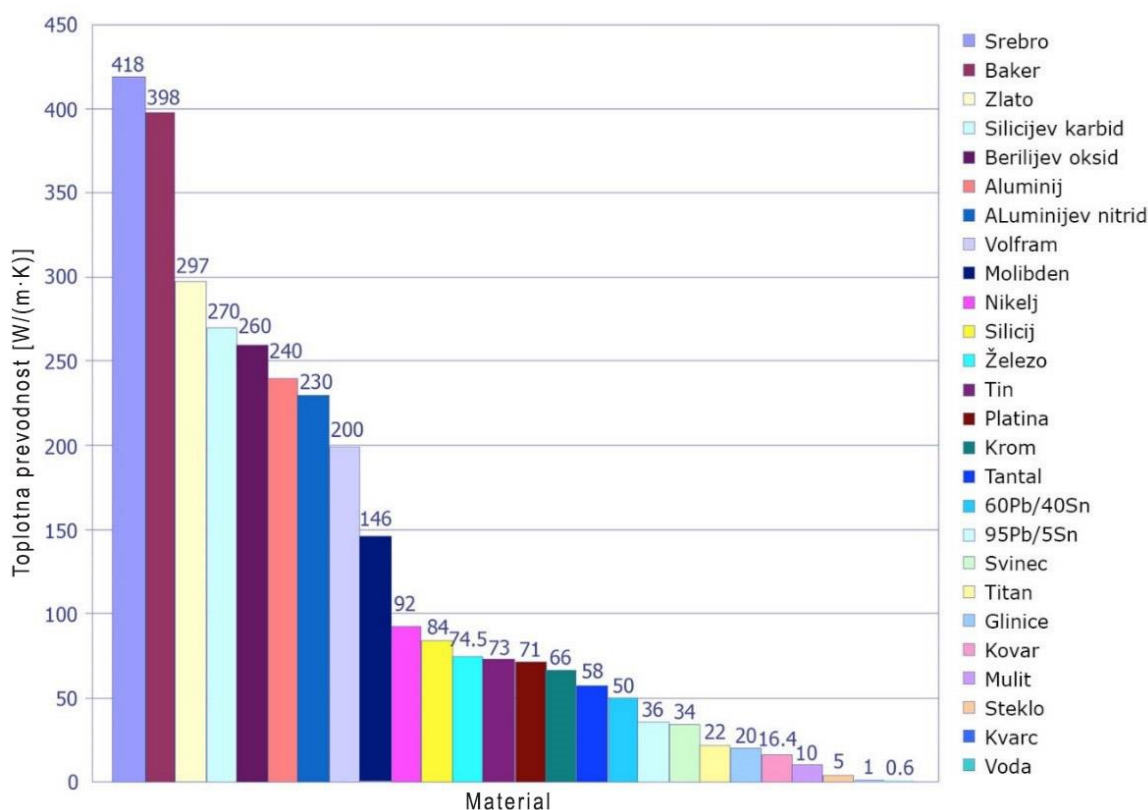
grafitni premazi so namenjeni tudi za kokilno litje, ki zmanjšuje reakcije med formo in talino in povečujejo kakovost površine (zmanjševanje hlapov). Poleg premazov z grafitom, ki so črne barve, poznamo tudi bele premaze, ki so na osnovi preostalih materialov in ne vsebujejo ogljičnih snovi. Ti so predvsem na oksidni in silikatni osnovi. Poleg osnovnih materialov dodajo tudi elemente oziroma spojine, ki metalurško delujejo na površino forme (telur, bizmut, krom, silicij, aluminij, kobalt).

- Iz tekočine, s katero izdelamo suspenzijo, da jo lahko nanesemo na površino forme. Običajno sta to voda ali alkohol. Po osnovni tekočini ločujemo tudi premaze na alkoholni in vodni osnovi. Alkoholne po nanašanju zažgemo, vodne pa moramo dodatno sušiti.
- Iz suspenzijskih sredstev, ki preprečujejo razslojevanje premazov, oziroma usedanje osnovnega materiala na dno. Običajno so to snovi, ki gelirajo, odnosno zgostijo suspenzijo: gline (bentonit), organsko modificirane gline, celuloza itd.
- Iz veziva, ki omogoča, da se premaz veže na površino in veže tudi na zrna v ognjevzdržnega materiala med seboj, najbolj uporabljena so: umetne smole, derivati dekstrina in škrobov, ligninski derivati.

Poleg navedenih dodajamo premazom tudi druge dodatke npr. železov oksid, s katerim zmanjšujemo napake zaradi termičnega širjenja forme. Dodatek znaša 2 do 7 %. Večji dodatki premočno znižajo ognjevzdržnost. Pri temperaturah nad 1200 °C sprošča železov oksid, kisik, ki se veže z vodikom in dušikom in preprečuje raztapljanje v talini. Dodajamo hematit ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ali göthit ( $\alpha$ -FeOOH) v obliki prizmatičnih ali igličastih kristalov s specifično površino 10 m<sup>2</sup>/g. Naslednji dodatek je soda (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), s katero uravnavamo pH-vrednost, odnosno nabrekanje bentonita. (3) (12) (13)

### 3.4. Toplotna prevodnost

Parameter  $k$   $W/(m \cdot K)$  je toplotna prevodnost snovi, ki je v splošnem odvisna od vrste snovi, temperature in tlaka. Pri zmernih tlakih je za trdne snovi, kapljevine in celo pline odvisna le od temperature. Na Sliki 12 je prikaz vrednosti toplotne prevodnosti za nekatere snovi pri sobni temperaturi in atmosferskem tlaku.

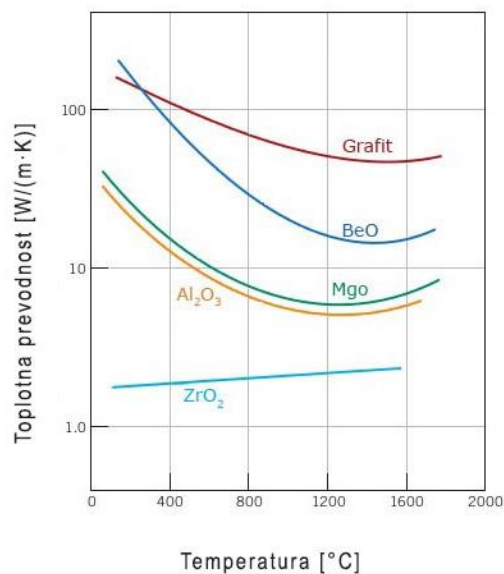


Slika 12: Shematski prikaz toplotne prevodnosti nekaterih materialov (14)

Največjo toplotno prevodnost imajo trdne snovi. V teh se toplota prenaša z vibracijo strukturne mreže, v kovinah pa predvsem z gibanjem prostih elektronov. Ker so v kovini nosilci električnega toka elektroni, so dobri električni prevodniki hkrati tudi dobri prevodniki toplote. Kovine imajo toplotno prevodnost velikosti nekaj 20 do nekaj 400  $W/(m \cdot K)$ . Primesi in nečistoče znižujejo prevodnost. Prevodnost čistih kovin z rastočo temperaturo praviloma pada, zlitin pa raste.

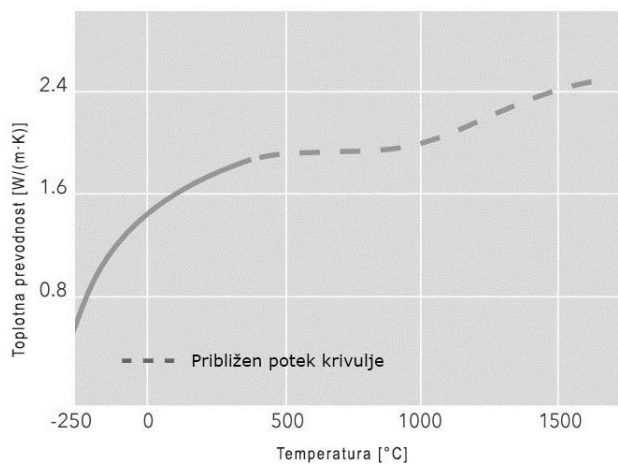
Pri keramičnih materialih se toplotna prevodnost giblje približno od 2-50  $W/(m \cdot K)$ . Keramika z amorfno strukturo (steklo) ima nižjo toplotno prevodnost od keramike s kristalno strukturo. Saj toplotna prevodnost hitreje potuje, če je kristalna struktura popačena ali dezorientirana.

Keramičnim materialom pri povišani temperaturi pada toplotna prevodnost kot kaže Slika 13. (15)



Slika 13: Diagram nekaterih keramičnih materialov v odvisnosti od temperature in toplotne prevodnosti

Poroznost keramičnih materialov ima velik vpliv na toplotno prevodnost. Povečanje velikosti por nam poslabša in zmanjšuje toplotno prevodnost. Večina keramičnih materialov, ki jih uporabljamo za toplotno izolacijo, je porozna. Prenos toplote skozi pore je običajno slaba in neučinkovita, ker pore vsebujejo tudi zrak, ki pa je zelo slabo toplotno prevoden. Zato pri našem primeru, pri čemer smo za meritev uporabljali kvarc, ki ima max. delovno temperaturo pri približno 1300 °C in temperaturo tališča pri 1700 °C. Iz Slike 14 vidimo, da ima zelo slabo toplotno prevodnost v območju med 1-2,7 W/(m·K). (15)



Slika 14: Toplotna prevodnost kvarca v odvisnosti od temperature (16)

## 4. EKSPERIMENTALNO DELO

V diplomskem delu smo uporabili več različnih premazov podjetja Termit s komercialno oznako "thermocoat":

- **AA** je alkoholni premaz z aluminatnim polnilom. Uporabljamo ga kot prvi sloj za premazovanje kromitnih peščenih form in jeder pri vlivanju zahtevnih pozicij sive, nodularne in jeklene litine. Kot drugi sloj premaza, sloj je v stiku s talino, pa uporabljamo premaz AZ. Plast premaza AA predstavlja vmesno plast med kromitnim peskom in cirkonskim premazom in prepreči reakcijo med peskom in talino.
- **AAGF** je alkoholni premaz na bazi korunda, grafita in železovega oksida. Uporabljamo ga za premazovanje form in jeder pri vlivanju sive in nodularne litine.
- **AAS** je alkoholni premaz z alumo-silikatnim polnilom. Uporabljamo ga za premazovanje form in jeder pri vlivanju sive, nodularne in jeklene litine.
- **AASGF** je premaz, izdelan na bazi alumosilikatnega polnila, grafita, železovega oksida in alkohola. Med procesom ulivanja tvori majhno količino plinov, ščiti peščeno mešanico pred termo šoki in ne razpoka.
- **AG** je premaz izdelan na bazi alkohola in polnila. Uporabljamo ga za premazovanje peščenih form in jeder za ulivanje barvnih kovin in sive litine.
- **ATE** je premaz, izdelan na bazi izopropanola, različnih silikatov, Fe oksida in telurja. Dodatek telurja omogoča ohlajevalni efekt pri vlivanju. Uporablja se pri vlivanju aluminijevih litin, sive in nodularne litine. Priporočamo ga na delih ulitka kjer je potreben hladilni efekt.
- **AZ** je alkoholni premaz na bazi cirkona. Uporabljamo ga za premazovanje peščenih form in jeder pri vlivanju zahtevnih ulitkov iz sive, nodularne in jeklene litine. Odlikuje ga visoka ognjevzdržnost.
- **AZG** je premaz, izdelan na bazi grafita, cirkona in izopropilnega alkohola. Uporabljamo ga za premazovanje peščenih form in jeder, izdelanih po vseh postopkih, razen pri izdelavi jeder iz olj. Uporablja se pri vlivanju barvnih kovin, sive in nodularne litine.

Fizikalne lastnosti premazov so prikazane v Tabeli 3.

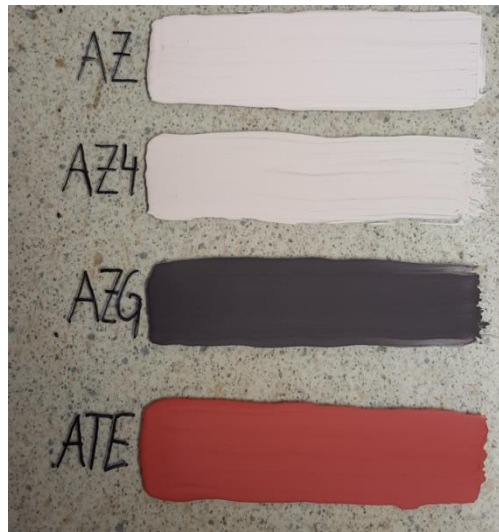
Tabela 3: Fizikalne lastnosti premazov Thermocoat proizvajalca Termit.

| <b>Thermocoat</b>                      | <b>AA</b>      | <b>AAGF</b>    | <b>AAS</b>     | <b>AASGF</b>   | <b>AG</b>      | <b>ATE</b>     | <b>AZ</b>      | <b>AZG</b>     |
|----------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Gostota: sp.<br>T [kg/m <sup>3</sup> ] | 1950 –<br>2100 | 1400 –<br>1500 | 1400 –<br>1500 | 1300 –<br>1500 | 1150 –<br>1250 | 1350 –<br>1450 | 1700 –<br>1900 | 1300 –<br>1400 |
| Suha trdna<br>snov [%]                 | 74 –<br>77     | 60 – 64        | 60 –<br>63     | 58-62          | 52 –<br>55     | 59-63          | 67-70          | 57 - 60        |
| Posedanje<br>po 24 urah<br>[%]         | > 3            | > 3            | > 3            | > 3            | > 3            | > 3            | > 3            | > 3            |

Na Slikah 15 in 16 je prikazan posnetek preiskovanih premazov, ki so bili nanešeni na stekleno podlago:



Slika 15: Premazi AA, AAS, AASGF, AAGF in AG



Slika 16: Premazi AZ, AZ4, AZG in ATE

## 4.1. Merilna celica za enostavno termično analizo [ Quick-cup ]



Slika 17: Standardna merilna celica za ETA izdelana po postopku croning (10)

Lonček za izvedbo meritev je izdelan po postopku croning. Uporabljamo ga za merjenje termičnih analiz. Je narejen po standardu electronite QC-4010. Dimenzije lončka so 21x21x42mm. Masa ulitka, ki se pridobi z litjem v merilno celico v primeru sive litine znaša 0,315 kg. Po sredini lončka je vstavljena kvarčna cevka, znotraj nje pa nameščen termočlen NiCr/Ni – K TIP. (10)

### 4.1.1. Izdelava lončka

Postopek croning je uvrščen med postopke z utrjevanjem v vročem. Uporabljamo ga za izdelavo votlih jeder in tankih form. Poteka tako, da zrna kremenovega peska v posebnem obratu najprej oplaščimo z novotlačno fenolno smolo od 2 – 3,5 % in z utrjevalcem heksametilentetraminom od 10 – 12 % od mase smole. Za boljše ločevanje mask in jeder od modela in za boljše tekočnost dodajamo še kalcijev stearat od 2 – 4 mas. % od mase smole. Pripravljeni oplaščeni pesek nasipamo v livarni na ogrete modele ali jedrnike, ki so ogreti na temperaturi utrjevanja med 230 ter 290 °C. Pri tem postopku nastajajo tri plasti in sicer plast nataljevanja, plast utrjevanja in že dokončna utrjena plast. Temperatura tališča smole znaša od 60 °C do 105 °C. Reakcija utrjevalca se prične pri temperaturi nad 117 °C. Ustrezna hitrost utrjevanja se prične šele pri višjih temperaturah, ki so nad ravnotežno.

Z daljšim časom sintranja se popolnoma utrjena plast debeli, preostali dve plasti, kjer je smola, natali in nato utrjuje, pa prodirata globlje v nasuto plast. Da se med zrna oplaščenega peska lahko tvorijo vezi, se mora smola nataliti, pri tem se izoblikujejo vezi, ki se nato utrdijo.

V začetku se trda smola z ogrevanjem natali, viskoznost se zmanjša, peščena struktura se dodatno zgosti. Vezi se utrdijo reverzibilno, na visokih temperaturah nato razpadejo, odnosno zgorijo.

Croning postopek se uporablja za izdelavo mask kot jeder in omogoča dobro površino ulitkov in velikoserijsko izdelavo. Primeren je za izdelavo majhnih in srednjih velikoserijskih ulitkov. Mešanica je suha in sipka ter omogoča dobro polnjenje tudi tankih reber in drugih zapletenih oblik, ker ne vsebuje tekočih veziv, ki zmanjšajo tekočnost. Slaba stran postopka je dodatno ogrevanje jeder, zato so tudi stroški izdelave dražji. Zaradi tega izdelujejo tanke maske in votla jedra, da se omejijo stroški izdelave. Je zdravju škodljiv postopek in se pri izdelavi jeder pri litju sproščajo hlapi prostega fenola, ki mora biti zato v fenolni smoli v čimmanjšem deležu pod 0,5 %. V odpadnem pesku je mogoče ugotoviti še dodatne škodljive snovi. (3)

Moj namen diplomske naloge je dokazati, da tudi premazi povzročijo toplotno izolacijski učinek, ki prepreči izmenjavo med talino in formo, posebno če ima litina ali forma veliko toplotno prevodnost. Tako dosežena temperatura površine forme je nižja in zavre medsebojne reakcije. Dokazati hočem tudi, ali premazi, ki so narejeni na bazi različnih kovin in na osnovi alkohola, povzročajo prevodnost. Preizkušal sem različne premaze, ki sem jih naključno izbiral. Premaze sem dobil iz podjetja Termit, Moravče. Potrebne merilne celice sem pridobil iz podjetja Novacast.

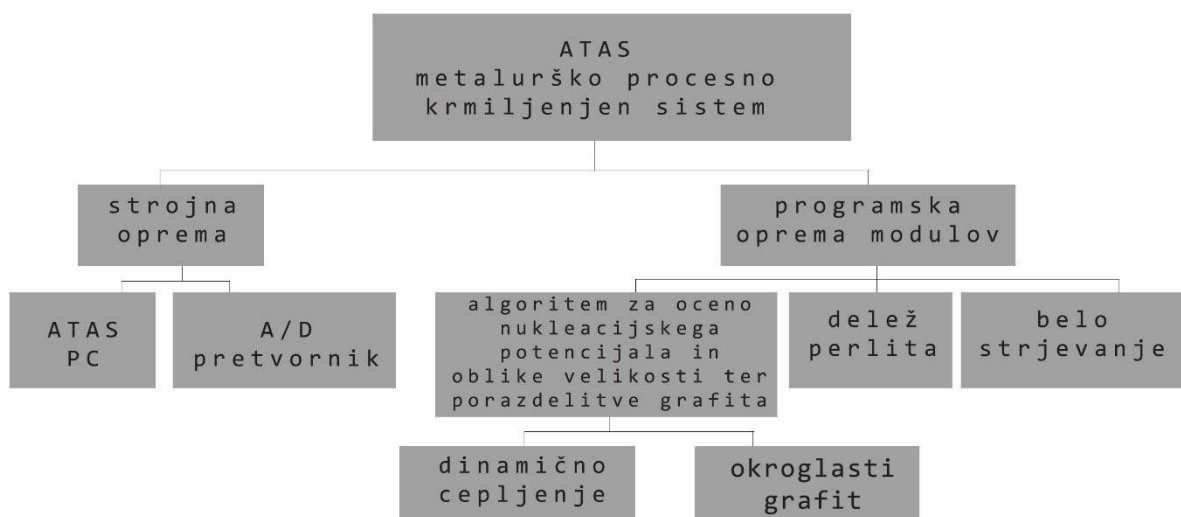
#### **4.1.2. Preizkus vzdržljivosti preiskovanih premazov na termočlenu je potekalo z ulivanjem aluminijeve litine (AlMg9-349) in sive litine z lamelnim grafitom**

Pri prvem preizkusu z aluminijevo litino smo uporabili merilno celico quick-cup, ki ima posredi vstavljen termoelement NiCr/Ni, ki je obdan s kvarčno cevko. Ta termoelement smo potegnili ven, dodatno naredili še dve luknji ter na novo vstavili štiri termočlene tipa K, obložene z alumo-silikatno cevko. Kot se vidi iz slike, so trije termoelementi premazani in eden ne. Na ta način smo merili vse štiri termočlene naenkrat, kar nam omogoča dovolj dobro primerjavo med njimi. Meritev je potekala tudi samo z dvema termočlenoma. Termoelemente sem naredil sam z prepletanjem. Vsi štirje termoelementi so povezani s kompenzacijskimi kabli do ohišja NI cDAQ-9172, v katerem je vstavljen modul NI 9213, ki meri temperaturno razliko termočlenov.



Slika 18: Posnetek merilne celice s štirimi termočleni

Pri drugem preizkusu s sivo litino je meritev potekala v livarni Livar v Ivančni Gorici. Za meritev smo uporabili quick-cup merilno celico, ki ima po sredi vstavljen termoelement NiCr/Ni, ki je obdan s kvarčno cevko. Ta termoelement sem potegnil ven, odstranil kvarčno cevko ga premazal s premazom in ponovno vstavil na mesto. Meritev je potekala na ATAS (Adaptive Thermal Analysis System) napravi. Potek meritve kaže slika 19. Rezultate meritev dobimo preko metstar programa.



Slika 19: Shema delovanja meritev po sistemu ATAS



ATAS MetStar je enostaven za uporabo, je prilagodljiv metalurško procesno krmiljen sistem za analizo, stabilizacijo in optimizacijo metalurških proizvodnih procesov. ATAS MetStar je temeljno orodje za livarne za izboljšanje kakovosti, nadzora in povečanje stabilnosti metalurških parametrov. Napoveduje morebitno tveganje za napake v ulitkih, kot so mikro-krčenje ali poroznost, makro-krčenje ali poroznost, določitev izločanja cementita, vsebnost kisika in mehanske lastnosti.



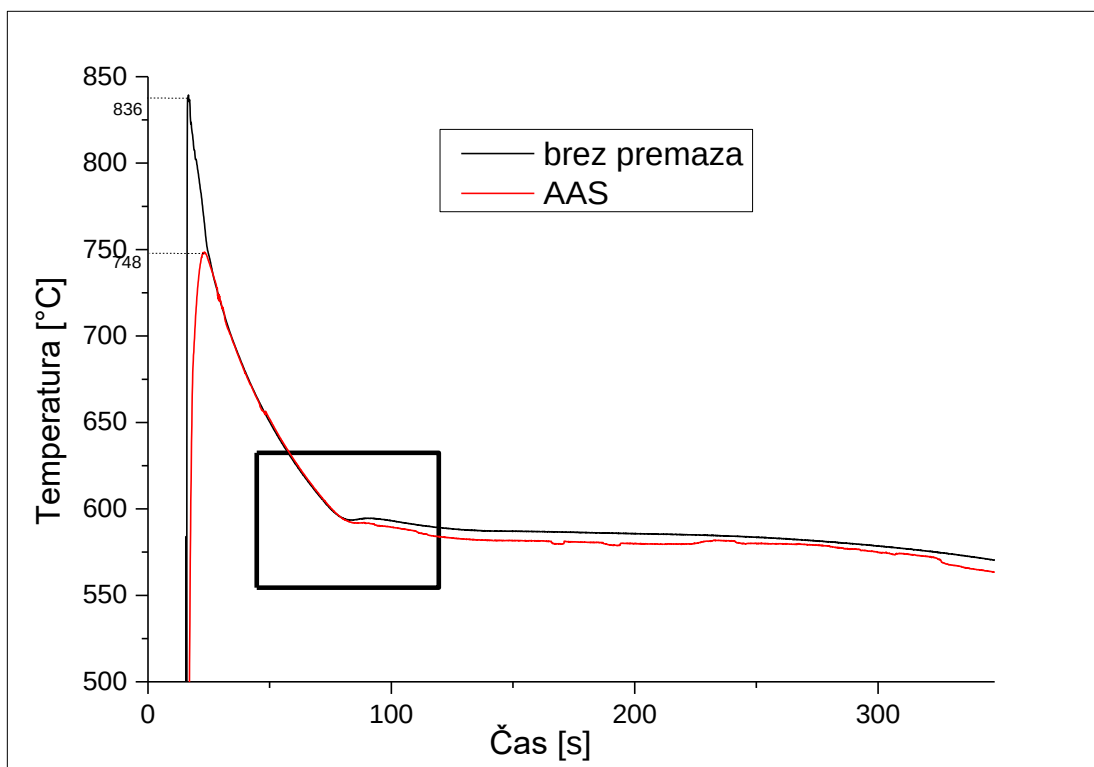
Slika 20: Shematski prikaz meritve železa z uporabo quick-cup lončka, povezanega preko A/D pretvornika na računalnik

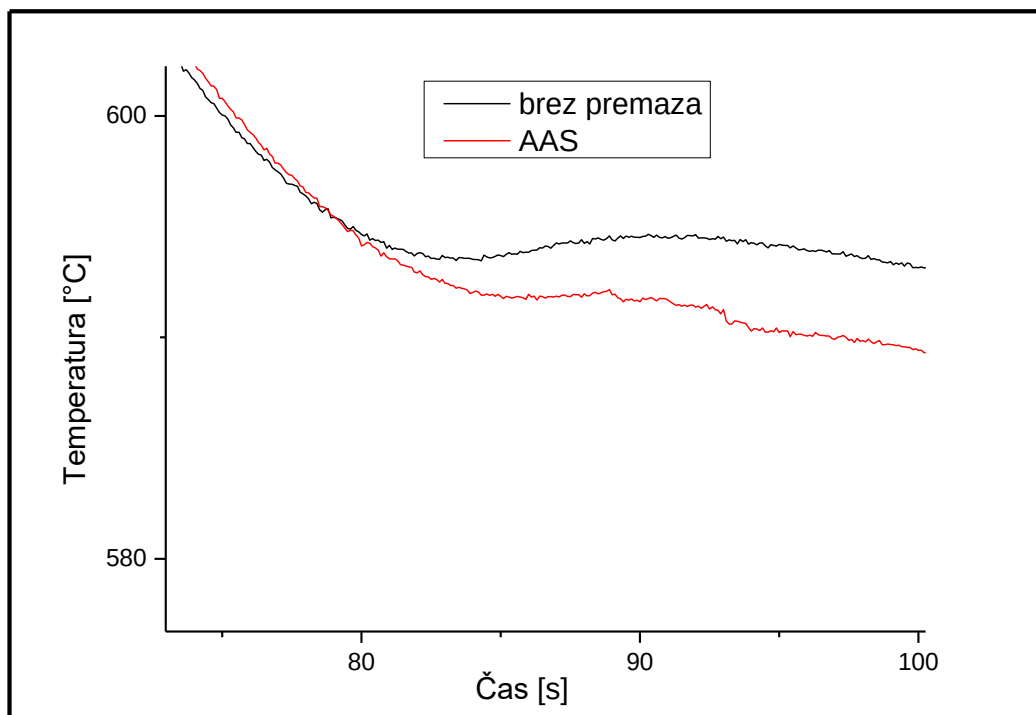
## 5. REZULTATI IN RAZPRAVA

### 5.1. Preizkušanje premazov termočlenov z ETA pri litju Al zlitine

Na sliki 21 sta prikazani ohlajevalni krivulji zlitine AlMg9 posneti s termočlenom NiCr/Ni v izvedbi brez premaza in s premazom AAS, kot je prikazano na sliki 18. Kot je razvidno iz slike, sta bila oba termočlena nameščena v toplotno središče merilne celice. Iz maksimalne zaznane livne temperature (livna votlina) se vidi, da je premaz z oznako AAS povzročil slabšo odzivnost termočlena. Področje ohlajevalne krivulje je zelo skladno registrirano vse do likvidus temperature. Le-ta (likvidus temp.) je registrirana v primeru meritve s premazanim termoelementom (AAS) nekoliko pri nižji temperaturi. Vse do konca meritve čez celotno področje strjevanja je vidna pomembna razlika v referenčnih temperaturah s področja strjevanja, ki znaša od 591,7-592,1 °C.

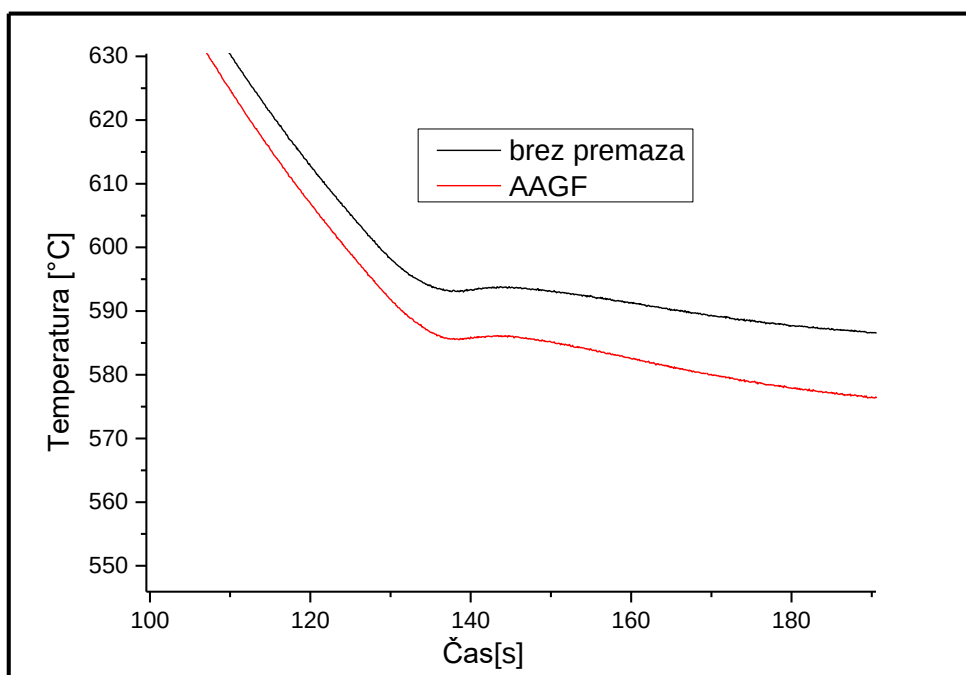
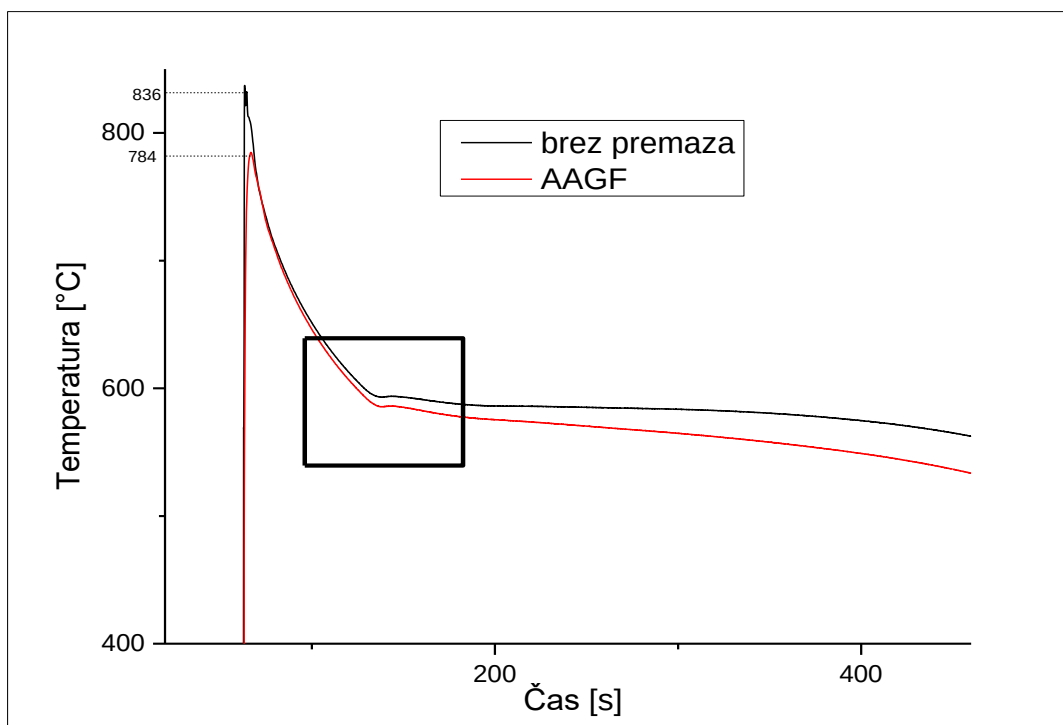
Izgleda, da je vzrok za odstopanje v slabši odzivnosti premazanega termoelementa, kot tudi delno v spremenjenih električnih lastnostih v okolici premazanega termočlena, ki se kažejo v delno nezvezni krivulji v področju strjevanja.





Slika 21: Ohlajevalni krivulji Al-zlitine AlMg9, posneti z uporabo termočlena NiCr/Ni brez premaza in s premazom z oznako AAS

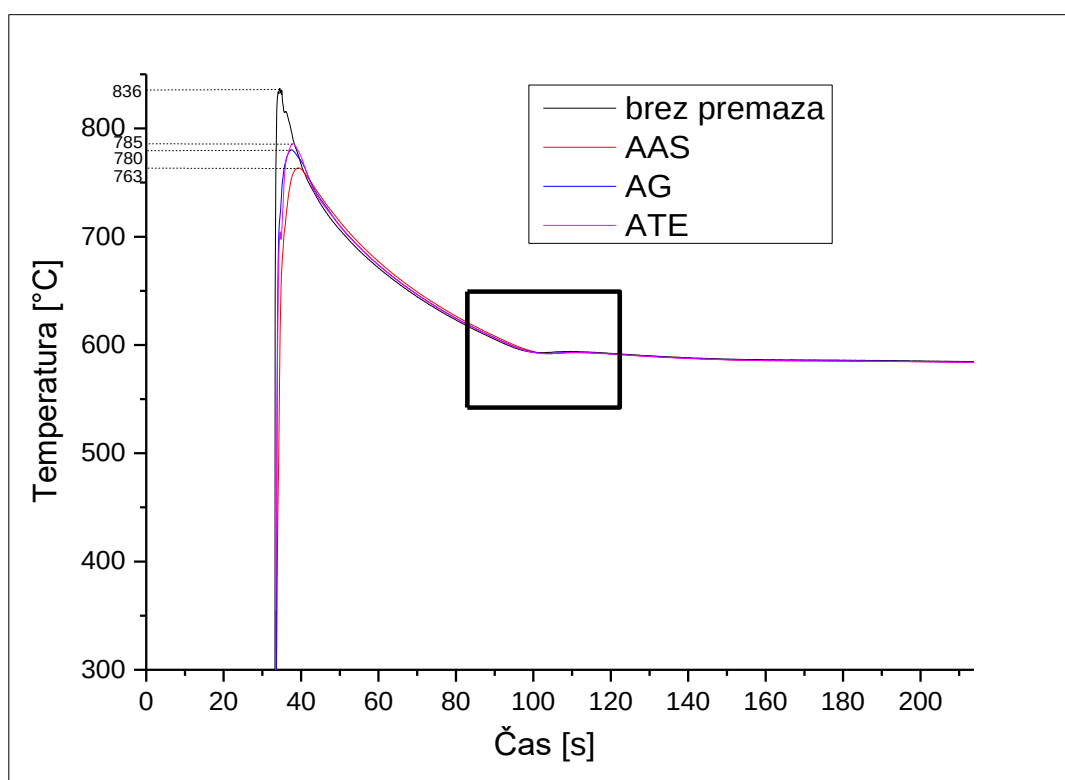
Na Sliki 22 sta prikazani ohlajevalni krivulji zlitine AlMg9, posneti s termočlenom NiCr/Ni v izvedbi brez premaza in s premazom AAGF, kot je bilo povedano že pri prejšnji Sliki 21. Postopek je potekal enako kot pri meritvi s premazom AAS, kjer sta bila oba termočlena nameščena v toplotno središče merilne celice. Iz Slike 22 se vidi, da je iz maksimalne zaznane livne temperature termočlena, premazanega s premazom AAGF, povzročil slabšo odzivnost termočlena. Potek obeh krivulj je zelo skladno registrirano vse do likvidus temperature. V primeru meritve s premazom AAGF je likvidus temperatura registrirana nekoliko pri nižji temperaturi 585,5 °C, kot se zelo dobro vidi iz Slike 22. Vse do konca meritve čez celotno področje strjevanja je vidna pomembna razlika v referenčnih temperaturah s področja strjevanja, ki znaša od 585,5-586,1 °C.

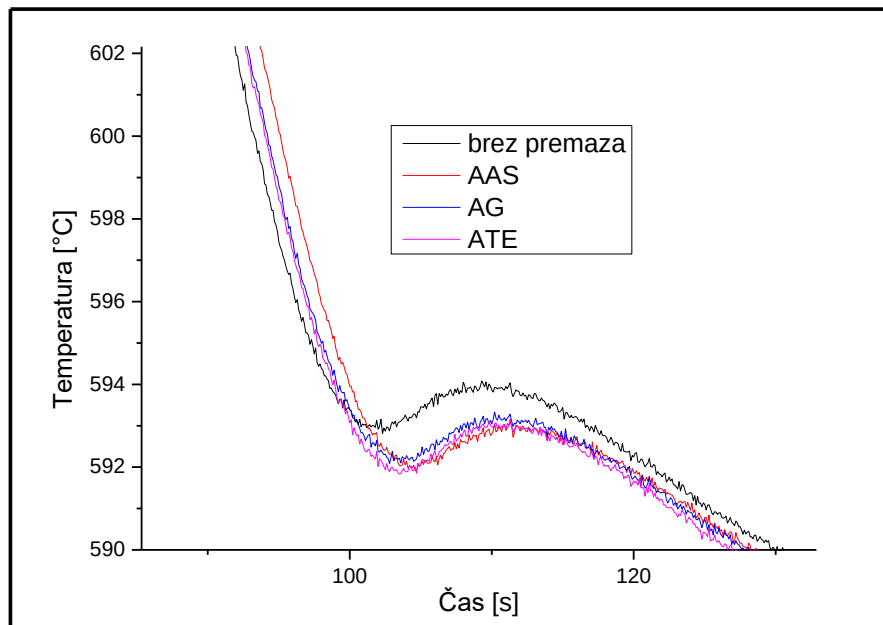


Slika 22: Ohlajevalni krivulji Al-zlitine AlMg9, posneti z uporabo termočlena NiCr/Ni brez premaza in s premazom z oznako AAGF

Na sliki 23 so prikazane ohlajevalne krivulje zlitine AlMg9, posnete s termočlenom NiCr/Ni v izvedbi brez premaza in s premazom AAS, AG in ATE. Kot je razvidno iz slike 18 so bili vsi štirje termočleni nameščeni v toplotno središče merilne celice. Iz maksimalne zaznane livne temperature se vidi, da so premazi z oznako AAS, AG in ATE povzročili slabšo odzivnost termočlena. Področje ohlajevalne krivulje je zelo skladno registrirano vse do likvidus temperature. Likvidus temperatura je registrirana v primeru meritve s premazanim termočlenom AAS, AG ter ATE nekoliko pri nižji temperaturi. Vse do konca meritve čez celotno področje strjevanja je opazna majhna razlika v referenčnih temperaturah s področja strjevanja, ki znaša od 591,8-592,8 °C.

Izmerjene krivulje so sočasno zvezne. Primerjava med referenčno temperaturo s področja strjevanja za posamezne termo člene z AAS, AG in ATE pa kaže dobro skladanje skozi celotno področje ohlajanja in strjevanja vzorca.





Slika 23: Ohlajevalne krivulje Al-zlitine AlMg9, posnete z uporabo termočlena NiCr/Ni brez premaza in s premazom z oznako AAS, AG in ATE

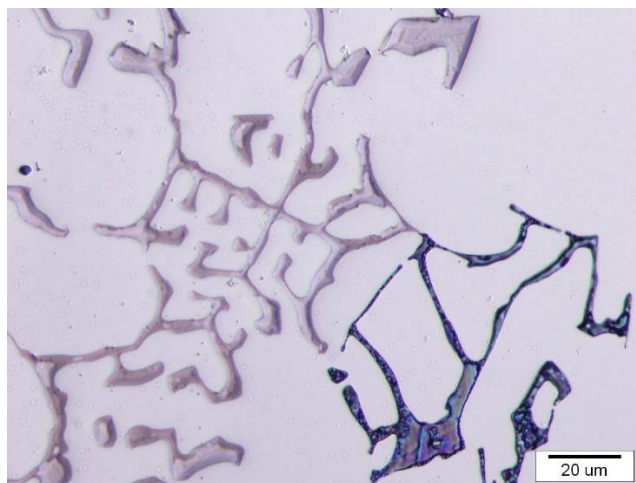
Tabela 4: Prikazane likvidus in maksimalne temperature za posamezne meritve

| Slika 21                                                                                            | Slika 22                                                                                            | Slika 23                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Brez premaza<br>$T_L - 593,4\text{ }^{\circ}\text{C}$<br>$T_{\max} - 594,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ | Brez premaza<br>$T_L - 593,0\text{ }^{\circ}\text{C}$<br>$T_{\max} - 593,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ | Brez premaza<br>$T_L - 592,9\text{ }^{\circ}\text{C}$<br>$T_{\max} - 594,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| AAS<br>$T_L - 591,7\text{ }^{\circ}\text{C}$<br>$T_{\max} - 592,1\text{ }^{\circ}\text{C}$          | AAGF<br>$T_L - 585,5\text{ }^{\circ}\text{C}$<br>$T_{\max} - 586,1\text{ }^{\circ}\text{C}$         | AAS<br>$T_L - 592,0\text{ }^{\circ}\text{C}$<br>$T_{\max} - 593,0\text{ }^{\circ}\text{C}$          |
|                                                                                                     |                                                                                                     | AG<br>$T_L - 592,1\text{ }^{\circ}\text{C}$<br>$T_{\max} - 593,3\text{ }^{\circ}\text{C}$           |
|                                                                                                     |                                                                                                     | ATE<br>$T_L - 591,8\text{ }^{\circ}\text{C}$<br>$T_{\max} - 593,1\text{ }^{\circ}\text{C}$          |

Na Sliki 24 in Sliki 25 je predstavljena mikrostruktura zlitine AlMg9. Vidi se primarne zmesne kristale  $\alpha$ -Al, ki so dendritsko izoblikovani (svetla področja) in evteksične faze  $\text{Mg}_2\text{Si}$  ter FeMnAlSi.



Slika 24: Mikrostruktura zlitine AlMg9, polirano

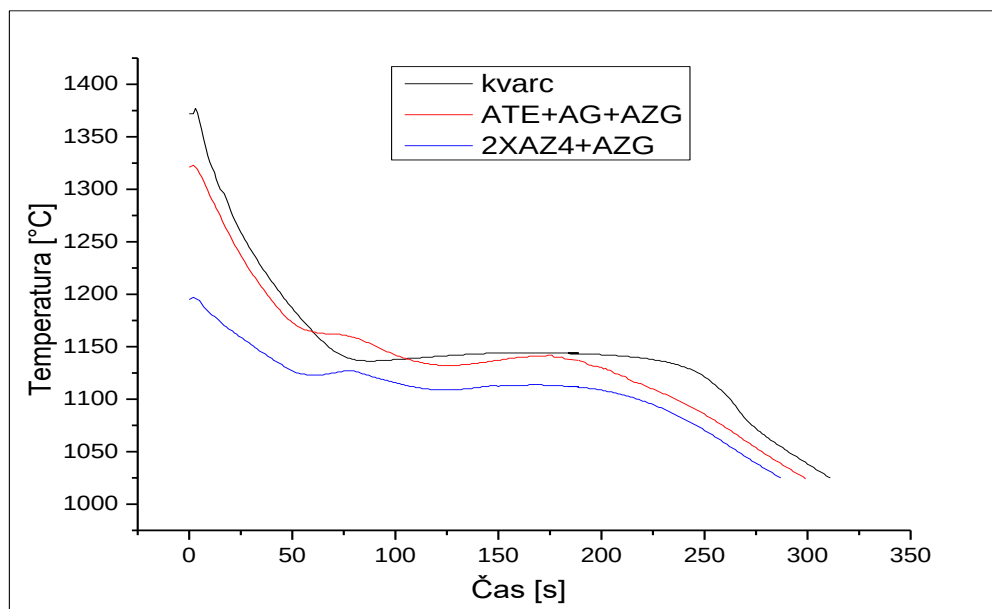


Slika 25: Mikrostruktura zlitine AlMg9 polirano, posnetek intermetalne spojine FeMnAlSi (levo-rjava faza) in intermetalne spojine  $\text{Mg}_2\text{Si}$  (desno- temna faza)

## 5.2. Preizkušanje premazov termočlenov z ETA pri litju sive litine

Izvedli smo 10 meritev. Primerjali smo termoelement obdan s kvarčno cevko s termoelementi, premazanimi z naključnimi premazi. Nekateri termoelementi so premazani z dvojnimi slojem enega premaza, z dvema različnima premazoma, nekateri tudi s tremi različnimi premazi.

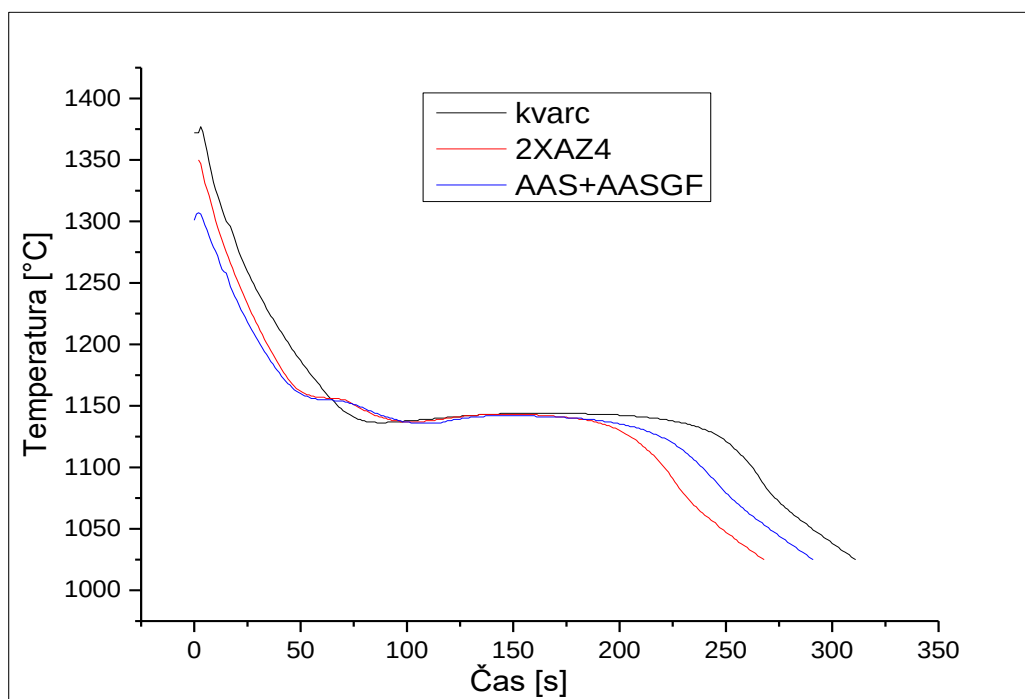
Pri Sliki 26 se maksimalna evtektska temperatura ne sklada za posamezne premaze v primerjavi s kvarcem. Zelo dobro se vidi, da uporaba premaza ATE+AG+AZG na termočlenu, ko je ulivana zlitina siva litina z lamelastim grafitom, izkazuje čisto drugačno obliko krivulje. Potek krivulje 2XAZ4+AZG prikazuje tudi različen potek krivulje, vendar je bila ta meritev od začetka merjenja nekoliko slabša, saj se to opazi na Sliki 26. Pomembna razlika se vidi, da je registrirana likvidus temperatura v primerjavi z uporabljenimi premazi ATE+AG+AZG pri višji temperaturi relativno na izvorno ohlajevalno krivuljo, ki je bila posneta z uporabo kvarčne cevke. Izgleda, da gre izvorno za litino z rahlo podevtektsko sestavo, saj to nakazuje primarni del strjevanja. Zaradi relativno debele kvarčne cevke, ki ima slabšo toplotno prevodnost, povzroči zelo slabo odzivnost termočlena. Iz grafa se vidi, da primarno področje strjevanja ni vidno in registrirano. Tudi pri premazu termočlena s premazom 2XAZ4+AZG se opazi majhno področje primarnega strjevanja. Za to ohlajevalno krivuljo, kjer gre za izvorno za litino z rahlo nadevtektsko sestavo.



Slika 26: Ohlajevalne krivulje sive litine z lamelastim grafitom, posnete z uporabo merilne celice, merjene s programom ATAS brez premaza (kvarc) in s premazom z oznako ATE+AG+AZG in 2XAZ4+AZG



Na sliki 27 se maksimalna evtektška temperatura dobro sklada za posamezne premaze v primerjavi s kvarcem. Zanimivo je, da uporaba premaza na termočlenu, ko je ulivana zlitina siva litina z lamelastim grafitom, izkazuje čisto drugačno obliko krivulje. Registrirana likvidus temperatura je v primeru uporabljenih premazov 2XAZ4 in AAS+AASGF pri višji temperaturi relativno na izvirno ohlajevalno krivuljo, ki je bila posneta z uporabo kvarčne cevke. Izgleda, da gre izvirno za litino z rahlo pODEVTEKTSKO sestavo, saj to nakazuje primarni del strjevanja. Izgleda, da relativno debela kvarčna cevka in relativno slaba toplotna prevodnost kvarca povzroči zelo slabo odzivnost termočlena. Vidi se, da primarno področje strjevanja ni registrirano. Izmerjene evtektške krivulje pa so blizu skupaj.

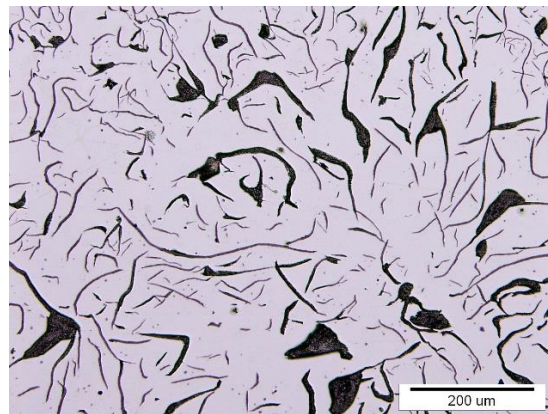


Slika 27 : Ohlajevalne krivulje sive litine z lamelastim grafitom , posnete z uporabo merilne celice, merjene s programom ATAS brez premaza (kvarc) in s premazom z oznako 2XAZ4 in AAS+AASGF

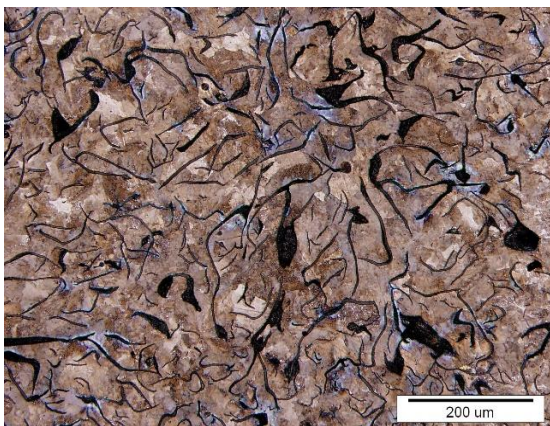
Na Slikah št. 28-31 so predstavljene mikrostrukture preiskovanih vzorcev bazne sive litine z lamelnim grafitom. Na Sliki 28 in 29 se vidi oblika, velikost in porazdelitev grafita v bazni litini. Gre za lamelni grafit oblike A, B, C. Na Sliki 30 je predstavljena mikrostruktura matrice bazne sive litine z lamelnim grafitom, ki je pretežno perlitno (temno rjavo področje med grafitnimi delci). Feritni delež je zelo majhen (belo področje).



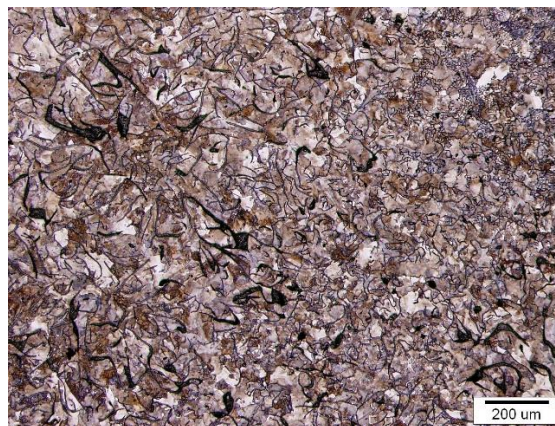
Slika 28: Nejedkani vzorec 2XAZ4



Slika 29: Nejedkani vzorec AAS+AASGF

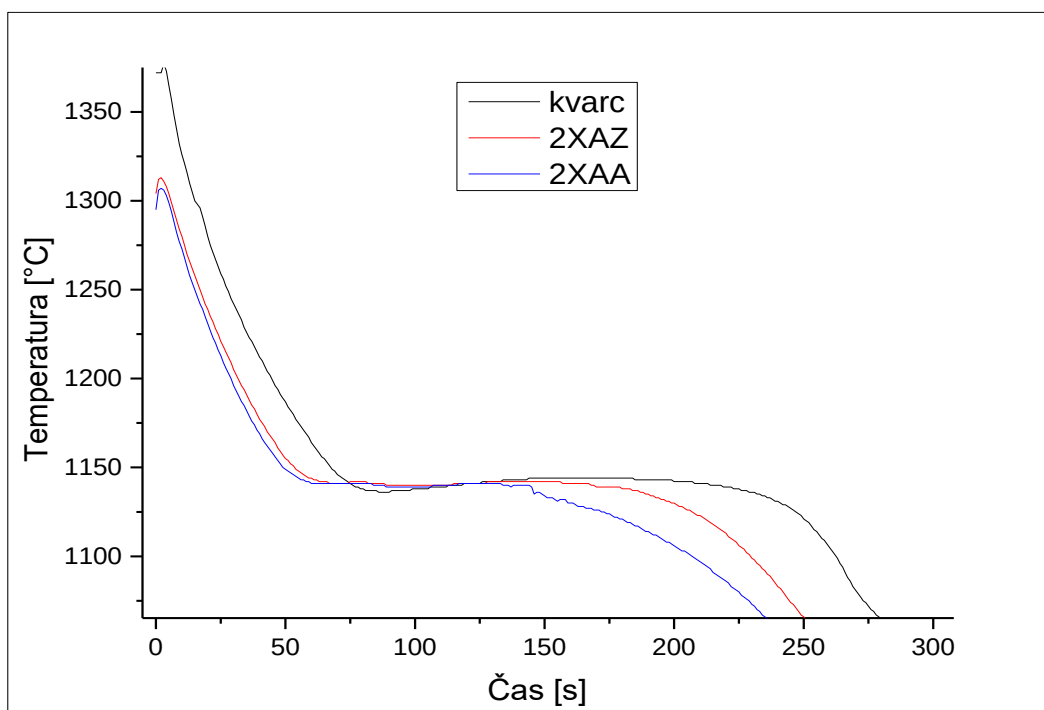


Slika 30: Jedkani vzorec z nitalom 2XAZ4



Slika 31: Jedkani vzorec z nitalom AAS+AASGF

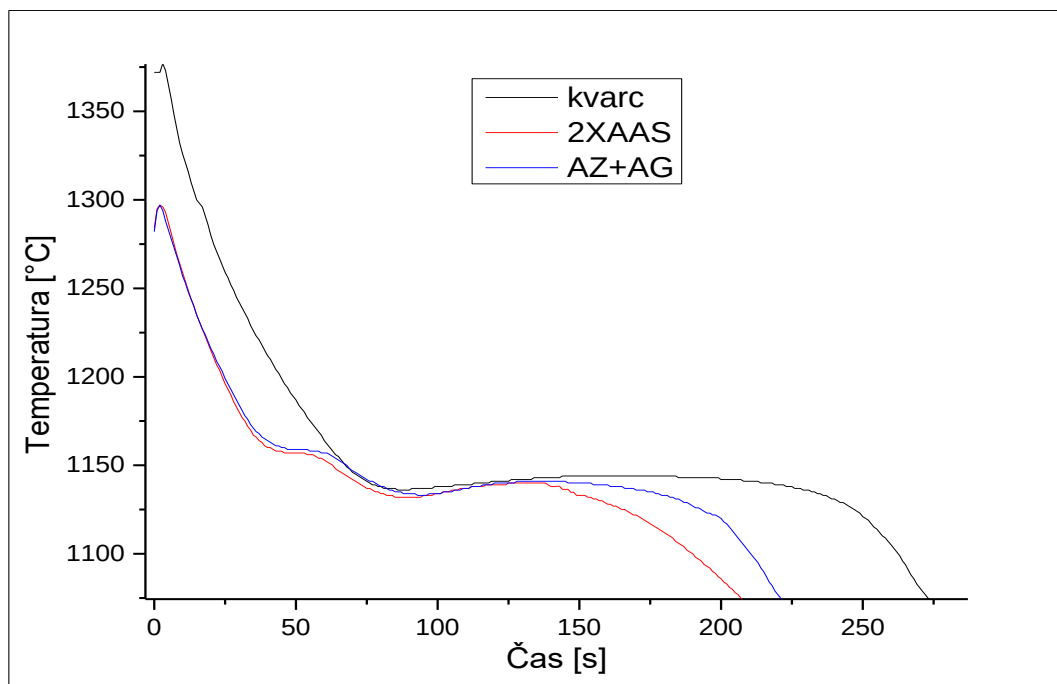
Pri Sliki 32 se maksimalna evtektska temperatura zelo sklada za posamezne premaze v primerjavi s kvarcem. Zelo dobro se vidi, da uporaba premaza 2XAZ in 2XAA na termočlenu ko je ulivana zlitina siva litina z lamelastim grafitom, izkazuje zelo podobno obliko krivulje. Registrirana likvidus temperatura je v primeru uporabljenih premazov 2XAZ in 2XAA pri višji temperaturi relativno na izvorno ohlajevalno krivuljo, ki je bila posneta z uporabo kvarčne cevke. Izgleda, da gre izvorno za litino z rahlo podevtektsko sestavo, vendar nam to ne prikazuje primarnega področja, kot je bilo vidno pri prejšnjih primerih. Izgleda, da imata oba premaza podobno toplotno prevodnost kot kvarčna cevka. Izmerjene evtektske krivulje pa so blizu skupaj.



Slika 32: Ohlajevalne krivulje sive litine z lamelastim grafitom , posnete z uporabo merilne celice, merjene s programom ATAS brez premaza (kvarc) in s premazom z oznako 2XAZ in 2XAA

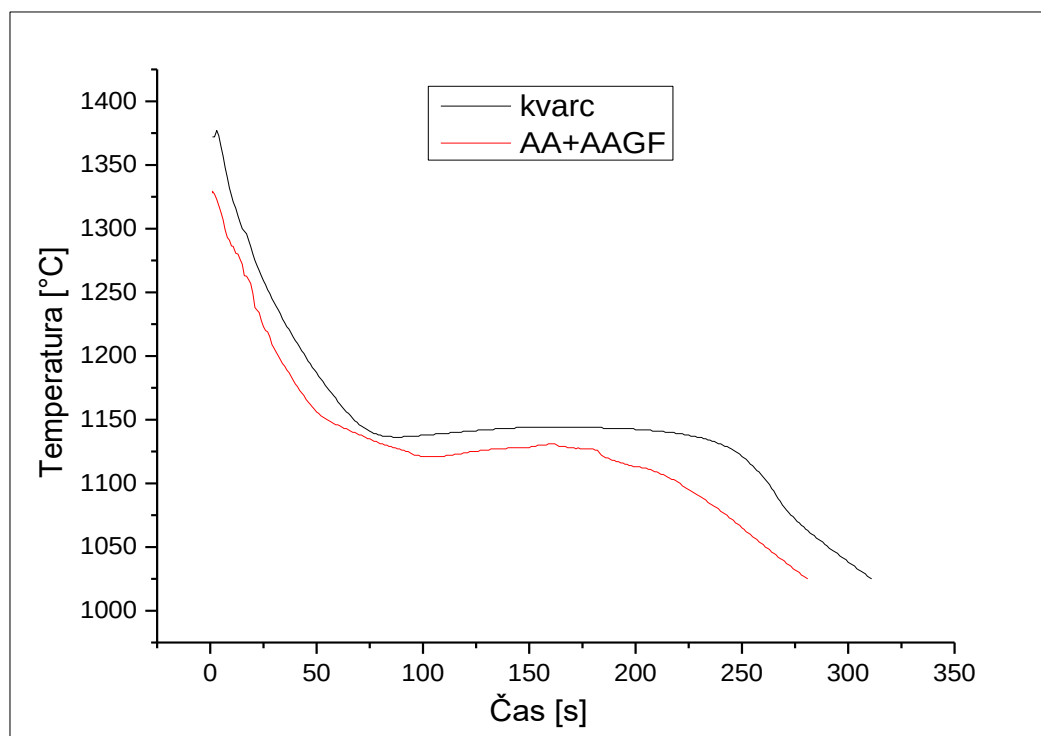
Pri Sliki 33 se maksimalna evtektska temperatura približno sklada za posamezne premaze v primerjavi s kvarcem. Zelo dobro se vidi, da uporaba premaza 2XAAS in AZ+AG na termočlenu ko je ulivana zlitina siva litina z lamelastim grafitom, izkazuje zelo podobno obliko krivulje. Registrirana likvidus temperatura je v primeru uporabljenih premazov 2XAAS in AZ+AG pri višji temperaturi relativno na izvorno ohlajevalno krivuljo, ki je bila

posneta z uporabo kvarčne cevke. Kot kaže krivulja gre izvirno za litino z rahlo podevtektsko sestavo, saj to nakazuje primarni del strjevanja pri obeh premazih. Zaradi relativno debele kvarčne cevke, ki ima relativno slabo toplotno prevodnost kvarca, povzroči zelo slabo odzivnost termočlena. Vidi se, da primarno področje strjevanja ni registrirano. Izmerjene evtektske krivulje pa so blizu skupaj.



Slika 33: Ohlajevalne krivulje sive litine z lamelastim grafitom , posnete z uporabo merilne celice, merjene s programom ATAS brez premaza (kvarc) in s premazom z oznako 2XAAS in AZ+AG

Na sliki 34 sta predstavljeni ohlajevalni krivulji merjeni tradicionalno s kvarcem (črna krivulja) in s premazom z oznako AA+AAGF. Vidi se veliko neskladanje med obema krivuljama, tako v kvantitativnem kot tudi v kvalitativnem pogledu. Izgleda, da je dvoslojni premaz z oznako AA+AAGF imel tudi električni vpliv na potek ohlajanja. Ugotovimo lahko, da izbran premaz ni primeren za aplikacijo meritve temperature. Del vzroka za neskladanje najdemo tudi v nepovsem enaki kemijski sestavi litine, pri kateri je bila posneta ohlajevalna krivulja z uporabo termočlena v kvarcu in termočlena s premazom AA+AAGF.



Slika 34: Ohlajevalni krivulji sive litine z lamelastim grafitom , posneti z uporabo merilne celice, merjene s programom ATAS brez premaza (kvarc) in s premazom z oznako AA+AAGF

Tabela 5: Nekateri rezultati meritev premazov s sistemom ATAS

| PREMAZI    | $T_L$<br>[°C] | $T_{ELow}$<br>[°C] | $T_{EHigh}$<br>[°C] | $T_{ES}$<br>[°C] | $T_S$<br>[°C] | Tip<br>krivulje | Tip strjevanja | $T_{max}$<br>[°C] |
|------------|---------------|--------------------|---------------------|------------------|---------------|-----------------|----------------|-------------------|
| AZ+AG      | 1159          | 1133               | 1141                | 1151             | 1087          | Siva            | Podevtektično  | 1297              |
| 2XAA       | 1141          | 1139               | 1141                | 1140             | 1069          | Siva            | Podevtektično  | 1307              |
| AAS+AASGF  | 1155          | 1136               | 1142                | 1148             | 1089          | Siva            | Podevtektično  | 1307              |
| 2XAZ4+AZG  | 1174          | 1123               | 1127                | 1155             | 1061          | Siva            | Nadevtektično  | 1197              |
| Kvarc      | 1136          | 1136               | 1144                | 1136             | 1091          | Siva            | Evtektično     | 1377              |
| ATE+AG+AZG | 1162          | 1132               | 1142                | 1151             | 1064          | Siva            | Podevtektično  | 1323              |
| 2XAZ4      | 1156          | 1137               | 1143                | 1151             | 1091          | Siva            | Podevtektično  | 1350              |
| 2XAZ       | 1141          | 1140               | 1142                | 1141             | 1078          | Siva            | Podevtektično  | 1313              |
| 2XASS      | 1157          | 1132               | 1140                | 1148             | 1075          | Siva            | Podevtektično  | 1297              |
| AA+AAGF    | 1139          | 1121               | 1131                | 1126             | 1067          | Siva            | Nadevtektično  | 1334              |

## 6. ZAKLJUČEK

Z uporabo sistema premaza različnih vrst smo na primeru preiskovane zlitine AlMg9 izvedli uspešno testiranje premazov za aplikacijo merjenja temperature. Ugotovili smo, da posamezni premaz spremeni odzivnost termočlena, kar se odraža na nižjih izmerjenih temperaturah s področja strjevanja.

Nadalje smo ugotovili, da je merjenje temperature v Al-zlitinah najprimerneje uporabiti termočlen brez premaza, ki je najbolj odziven, registrirana temperatura s področja strjevanja pa je približno od 0,8-0,9 °C višji kot v primeru premazanih termočlenov. Zveznost krivulj v primeru premazanih in nepremazanega termočlena je dobro časovno skladna.

Iz eksperimentov meritev ohlajevalnih krivulj na primeru bazne sive litine z lamelnim grafitom smo ugotovili, da je meritev ohlajevalne krivulje z uporabo določenih premazov, nanešenih na termočlen v dveh ali treh slojih, mogoča, registrirali pa smo določene pomembne razlike v poteku ohlajevalnih krivulj kot tudi v kvantitativnih vrednostih referenčnih temperatur s področja strjevanja. Ugotovili smo, da pri ulivanju sive litine z lamelnim grafitom premaza 2XAZ4 kot tudi AAS+AASGF izkazujeta drugačen potek krivulje (primarno in evtektsko strjevanje) nasprotno temu pa tradicionalna uporaba termočlena z zaščitno kvarčno cevko izkazuje le evtektsko strjevanje.

Eksperimentalni rezultati kažejo, da je občutljivost premazanih termočlenov boljša, kar ima za posledico bolj natančno in celovito informacijo o nukleaciji in strjevanju preiskovane litine.

Nadalje smo ugotovili, da z uporabo grafitnih premazov na aplikaciji termočlenov dobimo dobro toplotno prevodnost, ki ima za posledico boljšo odzivnost. Po drugi strani pa le ta lahko vpliva zaradi električne prevodnosti na potek meritve.

## 7. LITERATURA

1. NAPOTNIK, M. *Zgodovina jeklenih konstrukcij : diplomsko projektno delo*. Maribor, 2013, 42 str.
2. SPAIČ, S. *Fizikalna Metalurgija : binarni sistemi, metalografija zlitin*. Ljubljana : Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za materiale in metalurgijo, 2000, 365 str.
3. TRBIŽAN, M., MRVAR, P. *Livarstvo : interna skripta*. Ljubljana : Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za materiale in metalurgijo, 1996, 273 str.
4. FAZNA DIAGRAMA. *Fe-Fe<sub>3</sub>C in Fe-C [online]*. [citirano 3.8.2016].  
Dostopno na svetovnem spletu : <[http://fs-server.uni-mb.si/si/inst/itm/lm/GRADIVA\\_UC/Toplotna\\_obdelava\\_jekel/fazna\\_diagrama\\_fefe3c\\_in\\_fec.html](http://fs-server.uni-mb.si/si/inst/itm/lm/GRADIVA_UC/Toplotna_obdelava_jekel/fazna_diagrama_fefe3c_in_fec.html)>.
5. PERHOČ, M. *Izdelava in karakterizacija zavrznega diska iz sive litine : diplomsko delo*. Ljubljana, 2015, 34 str.
6. KOVAČIČ, J. *Karakterizacija zlitin AlMg9 in Silafont-36 : diplomsko delo*. Ljubljana, 2015, 49 str.
7. OBLAK, L. *Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo zlitine iz sistema Al-Si-Mg-Zr : diplomsko delo*. Ljubljana, 2015, 36 str.
8. MERJENJE TEMPERATURE [online]. Ljubljana : Fakulteta za elektrotehniko, 23 str. [citirano 3.8.2016].  
Dostopno na svetovnem spletu : <[http://lrmte.fe.uni-lj.si/lrmte/slo/UNIVSS/daja\\_pret/PREDAVANJE\\_6\\_Merjenje%20temperature\\_1del.pdf](http://lrmte.fe.uni-lj.si/lrmte/slo/UNIVSS/daja_pret/PREDAVANJE_6_Merjenje%20temperature_1del.pdf)>.
9. COTTRELL, M. S. *Temperature [online]*. Missouri University of Science and Technology, 49 str. [citirano 2.8.2016].  
Dostopno na svetovnem spletu :  
<<http://web.mst.edu/~cottrell/ME240/Resources/Temperature/Temperature.pdf>>.
10. VAN DER PERRE, IR. W. *Temperature measurement in liquid metal [online]*. Belgija : Heraeus Electro-Nite International N.V, 16 str. [citirano 28.7.2016].  
Dostopno na svetovnem spletu :  
<[https://www.heraeus.com/media/media/hen/media\\_hen/products\\_hen/iron/temperature\\_measurement\\_in\\_liquid\\_metal.pdf](https://www.heraeus.com/media/media/hen/media_hen/products_hen/iron/temperature_measurement_in_liquid_metal.pdf)>.

11. BELOVIČ, D. *Večkanalne meritve s programom Labview : diplomsko delo*. Maribor, 2011, 34 str.
12. TERMOELEKTRIČNI SENZORJI [online]. 19 str. [citirano 3.8.2016].  
Dostopno na svetovnem spletu : <<http://lms.fe.uni-lj.si/amon/literatura/SA/11.teS.pdf>>.
13. PRSTIĆ, A., AĆIMOVIĆ-PAVLOVIĆ, Z., ANDRIĆ, L., STOJANOVIĆ, J., TERZIĆ, A. *Zircon-based coating for the applications in lost foam casting process [online]*. Beograd : Association of the Chemical Engineers of Serbia AChE, 2012, 7 str. [citirano 2.8.2016].  
Dostopno na svetovnem spletu: <<http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/1451-9372/2012/1451-93721200034P.pdf>>.
14. VINGAS, G. J. *Mold and Core Coatings: Past, Present, and Future [online]*. North Chicago, IL, 2008, 14 str. [citirano 15.7.2016].  
Dostopno na svetovnem spletu, str.14: <<http://www.afsinc.org/files/19860691A.pdf>>.
15. SLIDEGUR. *Thermal properties:Thermal conductivity [online]*. ch:19, 12 str. [citirano 27.7.2016].  
Dostopno na svetovnem spletu,vol.19, str.12: <<http://slidegur.com/doc/4110408/chapter-19--thermal-properties>>.
16. SEMITRACKS, INC. *Coefficients of Thermal Expansion and Resistivity [online]*. [citirano 27.7.2016].  
Dostopno na svetovenm spletu: <<http://www.semitracks.com/reference-material/material-properties/material-properties.php>>.
17. FINKENBEINER, G., INC. *Glass properties: quartz properties: thermal properties [online]*. [citirano 28.7.2016].  
Dostopno na svetovnem spletu: <<http://finkenbeiner.com/fig12.gif>>.
18. ASMET. *Technical Introduction to Metallurgical Process Control Using ATAS Adaptive Thermal Analysis System [online]*. Anglija, 2011, 6 str. [citirano 15.7.2016].  
Dostopno na svetovenm spletu : <<http://www.asmet.com/wp-content/uploads/2014/04/asmet-tech-spec-atas.pdf>>.
19. HOSEINI-HOOSHYAR, H. *Thermal Analysis of Compacted Graphite : diplomsko delo*. Gothenburg, 2011, 47 str.