Istraživanje mehanizma nastanka odlupljivanja u kalupu

Solenički, Goran

Doctoral thesis / Disertacija

2007

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:450599

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ISTRAŽIVANJE MEHANIZMA NASTANKA ODLUPLJIVANJA U KALUPU

DOKTORSKI RAD

Prof.dr.sc. IVAN BUDIĆ

Mr.sc.GORAN SOLENIČKI, dipl.ing.

ZAGREB, 2006.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK:	621.742.
Ključne riječi:	Odlupljivanje, tlačna naprezanja, zrnatost pijeska, kaluparski pijesak, matematički model
Znanstveno područje:	Tehničke znanosti
Znanstveno polje:	Strojarstvo
Institucija u kojoj je rad izrađen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje (FSB), Sveučilište u Zagrebu
Mentor rada:	Prof.dr.sc. Ivan Budić
Broj stranica:	165
Broj slika:	125
Broj tablica:	19

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 71

Datum obrane:

Povjerenstvo:	Prof.dr.sc. Miljenko Math (FSB, Zagreb) Prof.dr.sc. Ivan Budić, (SFSB, Slavonski Brod) Doc.dr.sc. Ivanka Boras (FSB, Zagreb) Prof.dr.sc. Branimir Matijašević (FSB, Zagreb) Prof.dr.sc. Faruk Unkić (Metalurški fakultet, Sisak)
Institucija u kojoj je rad pohranjen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje (FSB), Sveučilište u Zagrebu

ZAHVALA

Doktorski rad je izrađen na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu pod vodstvom prof.dr.sc. Ivana Budića. Eksperimentalni dio iz područja dilatometrijskih ispitivanja načinjen je na Strojarskom fakultetu u Slavonskom Brodu, a preostali dio eksperimentalnih istraživanja u Laboratoriju za ljevarstvo Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Posebno se zahvaljujem prof.dr.sc. Ivanu Budiću, mojem mentoru, koji je svojim dugogodišnjim iskustvom u području ljevarstva pomogao u istraživanju mehanizma odlupljivanja.

Ovom prilikom želio bih zahvaliti i prof.dr.sc. Zdravku Viragu koji je svojim savjetima uvelike pomogao pri rješavanju matematičkog modela.

Veliko hvala svim osobama koje su mi pomogle svojom podrškom i stručnim savjetima u ostvarenju ovog zadatka

SADRŽAJ

Predgovor..... VI
Sažetak..... VII
Ključne riječi..... IX
Popis oznaka..... X
Popis slika..... XII
Popis tablica..... XVII
1. UVOD..... 1
1.1 Općenito o razvoju ljevarstva..... 1
1.2 Odlupljivanje..... 10
2. MEHANIZAM NASTANKA ODLUPLJIVANJA..... 12
2.1 Tlačna naprezanja..... 15
2.1.1 Mehanizam nastanka tlačnih naprezanja..... 16
2.2 Rekondenzacijska čvrstoća..... 17
3 KALUPARSKI PIJESAK..... 18
3.1 Vrste pjeskova..... 18
3.2 Kremeni pijesak..... 18
3.3 Granulometrijska analiza pijeska..... 21
4. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA..... 25
4.1 Kronološki pregled dosadašnjih istraživanja odlupina..... 25
4.2 Toplinska svojstva kalupnih mješavina..... 66
4.2.1 Mehanizam zagrijavanja kalupa..... 66
4.2.1.1 Mehanizam zagrijavanja suhog kalupa..... 67
4.2.1.2 Mehanizam zagrijavanja vlažnog kalupa..... 71
4.2.2 Toplinska vodljivost kalupne mješavine..... 74
4.3 Formulacija granulometrijskog sastava..... 75
5. HIPOTEZA..... 77
6. ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA TOPLINSKE VODLJIVOSTI KALUPNIH MJEŠAVINA..... 78
6.1 Eksperimentalno određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti..... 78
6.1.1 Ogrjevni spremnik..... 79
6.1.2 Rashladni spremnik..... 80
6.1.3 Mehanizam za držanje uzorka..... 80
6.1.4 Mikrokontrolerski regulator temperature..... 81
6.1.5 Spremnik za vodu..... 82

6.1.6 Spojne cijevi..... 82
6.1.7 Kućište..... 82
6.2 Rezultati mjerenja koeficijenta toplinske vodljivosti..... 84
6.3 Mjerna nesigurnost..... 87
6.3.1 Procjena B-tipa mjerne nesigurnosti..... 88
6.3.2. Procjena nesigurnosti iz graničnih pogrešaka..... 89
7. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE TEMPERATURNIH POLJA..... 91
7.1 Kalup s uzorcima..... 91
7.2 Oprema za mjerenje..... 93
7.3 Zagrijavanje uzorka litinom aluminija..... 95
7.4 Zagrijavanje uzorka litinom sivog lijeva..... 96
8. TEMPERATURNO ISTEZANJE KALUPNIH MJEŠAVINA 97
8.1 Određivanje temperaturnog istezanja kalupnih mješavina..... 97
8.2 Rezultati dilatomerijskih ispitivanja kalupne mješavine..... 99
9. ODREĐIVANJE SKLONOSTI ODLUPLJIVANJA KALUPNIH MJEŠAVINA..... 101
9.1 Uzorci pijeska korišteni u istraživanju..... 101
9.2 Matematička formulacija vrste pijeska..... 105
9.3 Regresijski model određivanja tlačnih naprezanja..... 110
9.4 Matematički model za određivanje sklonosti odlupljivanju..... 114
9.5 Klasifikacija ljevačkih pjeskova..... 116
9.6 Eksperimentalna potvrda klasifikacije ljevačkih pjeskova..... 118
10. NUMERIČKI MODEL ZAGRIJAVANJA UZORKA..... 122
10.1 Definiranje numeričkog modela za zagrijavanja uzorka kalupne mješavine različite granulacije..... 122
10.2 Zagrijavanje uzorka litinom aluminija..... 124
10.3 Zagrijavanje uzorka litinom sivog lijeva..... 127
10.4 Utjecaj koeficijenta toplinske vodljivosti na skrućivanje litine..... 131
10.5 Numerički model uzorka na mjernom uređaju za mjerenje koeficijenta toplinske vodljivosti..... 135
11. ZAKLJUČAK..... 140
12. ZAKLJUČAK DOKTORSKOGA RADA..... 142
13. PRILOZI..... 143
14. POPIS LITERATURE..... 159
ŽIVOTOPIS..... 164

PREDGOVOR

Lijevanje u jednokratne pješčane kalupe često susrećemo u procesu proizvodnje odljevaka. Velika zastupljenost ovog načina kalupljenja je u sposobnosti oblikovanja složenih geometrijskih oblika uz pomoć kalupnih materijala, tj. kalupne mješavine.

Pri lijevanju u jednokratne pješčane kalupe dolazi do neujednačenog zagrijavanja kalupa uslijed čega može doći do pojave odlupljivanja. Kako se kalupna mješavina sastoji od pijeska, veziva i dodataka, to su različitim istraživanjima određene metode za određivanje sklonosti kalupa prema odlupljivanju. Uglavnom su promatrani različiti udjeli i vrste veziva te njihovi dodaci. Tako se uvidom u dosadašnja recentna istraživanja došlo do zaključka da je sklonost odlupljivanju funkcija dva tehnološka parametra, tlačnih naprezanja i rekondenzacijske čvrstoće.

U ovom radu promatra se kako utjecaj zrnatosti pijeska utječe na pojavu tlačnih naprezanja u kalupu, a time i na sklonost odlupljivanju

Doktorski rad je posvećen numeričkom opisivanju tlačnih naprezanja uz pomoć matematičke formulacije zrnatosti pijeska što omogućava klasifikaciju ljevačkih pjeskova s obzirom na sklonost odlupljivanju.

SAŽETAK

Tema ovog rada je ispitivanje mehanizma nastanka odlupljivanja u kalupu. Provedena ispitivanja pokazuju da je granulometrijski sastav pijeska vrlo važan u procesu zagrijavanja jednokratnog pješčanog kalupa.

Pri lijevanju većih odljevaka, uslijed znatnog zagrijavanja, dolazi do pojave temperaturnih naprezanja unutar kalupa. Promjena volumena uzrokuje nastanak tlačnih naprezanja u kalupu, što rezultira deformacijom kalupne šupljine. Prilikom pojave deformacija, neki dijelovi kalupa mogu se odlomiti. Ukoliko se to dogodi, onda je posljedica neispravan odljevak s greškom koju nazivamo odlupina. Svojstva kalupa na neki način predodređena su načinom izrade kalupa, sastavom i morfološkim svojstvima kalupne mješavine. Nije moguće postići da sva svojstva budu maksimalna, prvenstveno zato, jer su neka međusobno suprotstavljena, te je zato poznavanje mehanizma nastanka odlupljivanja od primarne važnosti.

Na smanjenje pojave odlupljivanja može se utjecati smanjenjem temperaturnog istezanja kremenih zrna. Postizanjem kritične temperature, zrna kremenog pijeska povećavaju svoj volumen.

Deformacija kalupa ovisna je o svojstvu ugibivosti, koje ovisi o granulometrijskom sastavu kalupne mješavine. Poznavanjem zakonitosti između veličina koje definiraju svojstvo ugibivosti kalupne mješavine, te povezivanje sa mehanizmima izmjene topline prilikom ulijevanja, direktno se može utjecati na pojavu odlupljivanja.

Odabirom određene granulacije pijeska i određivanjem tehnološkog svojstva ugibivosti kalupa pjeskove različitih granulometrijskih sastava možemo klasificirati s obzirom na sklonost prema odlupljivanju.

RESEARCH OF SCABBING DEFECTS MECHANISM

SUMMARY

The topic of this work is the study of the occurrence of the scabbing phenomenon in the mould. The performed tests have shown that the granulometric composition of sand is very important in the heating process of a disposable sand mould.

In casting larger moulds, substantial heating causes temperature extension of the quartz grains within the mould. The temperature extension of the quartz grains causes pressure stress in the mould which in turn results in the deformation of the mould cavity. When deformation occurs, some parts of the mould can break off. Should this happen, the consequence is a faulty casting with the defect called a scab. The mould properties are in a way pre-determined by the method of mould fabrication, composition and morphologic properties of the mould mixture. It is impossible to achieve that all the properties of the mould mixture be maximal, primarily because some of them are mutually opposed. Therefore, knowing the mechanism which leads to scabbing is of primary importance.

The scabbing phenomenon may be reduced by the reduction in temperature extension of the quartz grains. The mould deformation depends on the property of flexibility which depends on the granulometric composition of the mould mixture. Knowing the laws among sizes that define the property of mould mixture flexibility, and combining with the heat exchange mechanisms during casting, may directly affect the occurrence of scabbing.

By selecting a certain sand granulation and by determining the technological properties of mould flexibility the sands of different granulometric compositions can be classified according to their scabbing tendency.

KLJUČNE RIJEČI

Odlupljivanje, tlačna naprezanja, zrnatost pijeska, kaluparski pijesak, klasifikacija pjeskova.

KEY WORDS

Scabbing, compressive stresses, granularity of sand, foundry sand, foundry sand classification.

POPIS OZNAKA

Oznaka	**Opis**	**Jedinica**
A	Površina	m^2
B	Udio bentonita	%
c	Specifični toplinski kapacitet	J/(kg K)
d	Udaljenost rekondenzacijskog sloja	m
L_w	Latentna toplina	J/kg
Nt	Tlačno naprezanje	N/m^2
P	Kumulativni propad	%
Sr	Rekondenzacijska čvrstoća	N/m^2
SV	Srednja veličina zrna	m
Str	Stupanj ravnomjernosti	%
T	Temperatura	K
t	Vrijeme	s
V	Udio vode	%
x	Udaljenost	m
q	Maseni protok	kg/s
Q	Apsorbirana toplina	J/m^2
W	Sadržaj vlage	kg/kg
ϑ	Temperatura	°C
α	Koeficijent difuzije	m^2/s
λ	Koeficijent toplinske vodljivosti	W/(m K)
ρ	Gustoća	kg/m^3
Φ_{uk}	Toplinski tok	W
Ostale oznake		
a_g	Parametar prilagodbe	
a_f	Parametar prilagodbe	
h_r	Parametar prilagodbe	
G	Granična pogreška	
n_g	Parametar prilagodbe	
m_f	Parametar prilagodbe	
n_f	Parametar prilagodbe	

u	standardna mjerna nesigurnost
U	proširena mjerna nesigurnost
KR	Koeficijent rasporeda
BF	Broj finoće
SO	Sklonost odlupljivanju
G1, G2, G3	Uzorci pijeska
M1, M2, M3	Uzorci kalupnih mješavina
erf	Funkcija pogreške
erfc	Komplementarna funkcija pogreške

POPIS SLIKA

Slika 1.1 Učešće odljevaka u masi stroja kod nekih grana strojogradnje [3]
Slika 1.2 Ovisnost cijene odljevka o veličini serije [1]
Slika 1.3 Prikaz ljevačke proizvodnje u Hrvatskoj od 1995. do 2005. godine
Slika 1.4 Struktura ljevačke proizvodnje u R. Hrvatskoj od 1995. do 2005. godine
Slika 1.5 Tipičan izgled odlupine
Slika 2.1 Povećanje volumena kod različitih struktura kremena u ovisnosti o temperaturi [2]
Slika 2.2 Promjena čvrstoće kalupne mješavine u ovisnosti o udjelu vode [1].
Slika 2.3 Prikaz nastanka odlupina
Slika 2.4 Shematski prikaz utjecajnih faktora na mehanizam odlupljivanja
Slika 2.5 Krupno zrno u procesu dilatacije
Slika 2.6 Sitno zrno u procesu dilatacije
Slika 3.1 Krivulje temperaturne promjene volumena više vrsta osnovnog materijala [1]
Slika 3.2 Silikatni tetraedar
Slika 3.3 Fazni dijagram kremenog pijeska [1]
Slika 3.4 Rešetalica [6]
Slika 3.5 Histogram zrnatosti uzorka
Slika 3.6 Primjer dijagrama kumulativnog propada
Slika 4.1 Test odljevak prema Hudsonu [8]
Slika 4.2 Promjena volumena kalupnih mješavina kod toplinskog udara pri 1370°C [9]
Slika 4.3 Eksperimentalni odljevak prema AFS [10]
Slika 4.4 Korelacija između tlačne čvrstoće pri 593 ^{o}C i dilatacije pri 1370 ^{o}C s pojavom orepina [10]
Slika 4.5 Krivulja dilatacije i krivulje deformacije kod čvrstoće u toplom stanju pri 593 ^{o}C (prema AFS) [10]
Slika 4.6 Odnos između faktora neusklađenosti dilataciji i sklonosti odlupinama (prema AFS) [10]
Slika 4.7 Odnos između protudilatacijskog opterećenja i sklonosti odlupinama [11]
Slika 4.8 Odnos između dilatacije pri toplinskom udaru i sklonosti odlupinama [11]
Slika 4.9 Uređaj za zagrijavanje uzorka: A-uzorak, B-ploče hlađene vodom, C-izolator, D-termoelement, E-promjenjivi kondenzator, F-vodič, G-izvor energije [12]
Slika 4.10 Uređaj za registraciju krivulje deformacija: FF-opterećenje, H-klip, B-kalibrirana poluga, S-uzorak, E-držač ogledala, MC-ogledalo, MR-rotaciono ogledalo, P-foto ploča, L-izvor svijetla, G-držač. [12]
Slika 4.11 Maksimalna napetosti sintetskog pijeska u ovisnosti o temperaturi [12]

Slika 4.12 Krivulja deformacija za dvije kalupne mješavine: A-sintetski pijesak, B –sintetski pijesak sa 2% piljevine [12]

Slika 4.13 Promjene u maksimalnoj čvrstoći raznih kalupnih mješavina u ovisnosti o temperaturi: A - sintetski pijesak sa 5% ugljene prašine; B - sintetski pijesak s 2% piljevine [12]

Slika 4.14 Temperaturno istezanje sintetske kalupne mješavine različite sabijenosti [13]

Slika 4.15 Utjecaj ugljene prašine i piljevine na temperaturno istezanje. A – sintetska kalupna mješavina, B – sintetska kalupna mješavina s 2 % piljevine, C - sintetska kalupna mješavina s 5% ugljene prašine [13]

Slika 4.16 Utjecaj temperature na indeks rasipljivosti [13]

Slika 4.17 Utjecaj ugljene prašine na indeks rasipljivosti: A – sintetska kalupna mješavina s 5% ugljene prašine, B – sintetska kalupna mješavina s 2 % piljevine [13]

Slika 4.18 Odnos između dilatacije i deformacije u ovisnosti o temperaturi za razne mješavine pijeskova: A – kremeni pijesak , B – olivin i kremeni pijesak, C – olivinski pijesak [13]

Slika 4.19 Približni raspored temperature kod mokrog (a) i suhog (b) kalupa pri različitim vremenima nakon početka ulijevanja [16]

Slika 4.20 Odnos između vremena zagrijavanja do pojave odlupljivanja i temperature za razne materijale: (b) sivi lijev; (c) čelični lijev; (a) isti odnos za pijesak s niskom temperaturom srašćivanja [16]

Slika 4.21 Vrijeme do pojave odlupljivanja za različite veličine zrna [16]

Slika 4.22 Odnos između vremena do pojave odlupljivanja i vlažnosti kalupa [16]

Slika 4.23 Utjecaj tvrdoće kalupa na pojavu odlupljivanja [16]

Slika 4.24 Test za ispitivanje sklonosti odlupljivanju prema Levelinku, (a) – spriječen u radijalnoj dilataciji, (b) slobodan u radijalnoj dilataciji [17]

Slika 4.25 Shema aparata za određivanje čvrstoće rekondenzacijskog sloja [18]

Slika 4.26 Shema ispitivanja čvrstoće rekondenzacijskog sloja [18]

Slika 4.27 Shematski prikaz nastanka odlupine s fotografijama [21]

Slika 4.28 Odnos između rekondenzacijske čvrsoće, količine sode za aktivaciju i učestalosti pojave orepina za njemački (Gb) i indijski (Ib) bentonit [21]

Slika 4.29 Shema uređaja za ispitivanje tlačnih napetosti [22]

Slika 4.30 Utjecaj sadržaja bentonita i dodatka 1% cerala na pojavu odlupljivanja [23]

Slika 4.31 Dijagram odlupljivanja različitih mješavina [24]

Slika 4.32 Odnos između skupljanja gline i pojave odlupljivanja za različite vrste kalupnih mješavina A,B – Na bentonit sa 30% vode; C – Ca bentonit sa 30% vode; F – glina sa 21% vode [26]

Slika 4.33 Najvjerojatniji prikaz nastajanja orepina [27]
Slika 4.34 Tip odlupine koji nastaje kod Aachenskog testa [27,28]
Slika 4.35 Model za test odljevak prema Kilshawu [29]
Slika 4.36 Test odljevak prema Kilshaw-u [29]
Slika 4.37 Presjek tipične odlupine [29]
Slika 4.38 Odnos između vremena ulijevanja i učestalosti pojave odlupina na Kilshaw test odljevku [29]
Slika 4.39 Kalupna mješavina sa A vrstom bentonita [30]
Slika 4.40 Kalupna mješavina sa B vrstom bentonita [30]
Slika 4.41 Kalupna mješavina sa C vrstom bentonita [30]
Slika 4.42 Kalupna mješavina sa D vrstom bentonita [30]
Slika 4.43 Shematski prikaz zagrijanog kalupa
Slika 4.44 Distribucija temperature suhog kalupa izrađenog od kremenog pijeska za vrijeme ulijevanja aluminija [31]
Slika 4.45 Specifična toplina kristala kremena i kremenog pijeska [31]
Slika 4.46 Specifična toplinski kapacitet za različite vrste pjeskova [31]
Slika 4.47 Shematski prikaz temperaturne distribucije unutar jednokratsnog pješčanog kalupa [31]
Slika 4.48 Izoterme pri zagrijavanju kalupa od kremenog pijeska pri lijevanju aluminija [31]
Slika 6.1 Skica mjernog uređaja za određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti λ
Slika 6.2 Slika mjernog uređaja za određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti λ
Slika 6.3 Shematski prikaz protjecanja vode kroz rashladni spremnik
Slika 6.4 Mehanizam za držanje uzorka
Slika 6.5 Regulator temperature N480
Slika 6.6 Mjerna oprema za eksperimentalno određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti
Slika 6.7 Izolirani uzorak kalupne mješavine za mjerenje toplinske vodljivosti
Slika 6.8 Shematski prikaz uzoraka na mjernom uređaju
Slika 6.9 Grafički prikaz rezultata mjerenja koeficijenta toplinske vodljivosti mješavina različitih granulometrijskih sastava
Slika 6.10. Shematski prikaz mjerne linije
Slika 7.1 Uzorci kalupne mješavine (50 mm x 50 mm) spremni za mjerenje
Slika 7.2 Umetanje uzorka u kalup
Slika 7.3 Shematski prikaz kalupa – presjek
Slika 7.4 Kalup s mjernim osjetilima i uzorkom
Slika 7.5 Unutrašnjost kalupa s mjernim osjetilima bez uzorka
Slika 7.6 Mjerna centrala HP 3852A

Slika 7.7 Postav mjerne opreme i kalupa
Slika 7.8 Aluminij prilikom mjerenja
Slika 7.9 Sivi lijev prilikom mjerenja
Slika 7.10 Zagrijavanje kalupa litinom aluminija, uljevne temperature 750°C
Slika 7.11 Zagrijavanje kalupa litinom sivog lijeva, uljevne temperature 1350 °C
Slika 8.1 Uzorci kalupne mješavine na kojima je mjereno temperaturno istezanje
Slika 8.2 Izgled elektroničkog dilatometra Netzsch 402 EP
Slika 8.3 Različita struktura pakiranja kalupne mješavine – ispitnih uzoraka
Slika 8.4 Rezultati dilatometrijskih ispitivanje kalupne mješavine
Slika 9.1 Histogramski prikaz zrnatosti uzorka G1
Slika 9.2 Histogramski prikaz zrnatosti uzorka G2
Slika 9.3 Histogramski prikaz zrnatosti uzorka G3
Slika 9.4 Dijagram kumulativnog propada uzorka G1
Slika 9.5 Dijagram kumulativnog propada uzorka G2
Slika 9.6 Dijagram kumulativnog propada uzorka G3
Slika 9.7 Grafička interpretacija regresijskog modela
Slika 9.8 Shematski prikaz klasifikacija ljevačkih pjeskova s obzirom na sklonost odlupljivanju
Slika 9.8 Kalup za lijevanje ploča za klasifikaciju lijevačkih pjeskova
Slika 9.9 Ploča iz kalupa izrađenog iz pijeska granulacije G2
Slika 9.10 Ploča iz kalupa izrađenog iz pijeska granulacije G1
Slika 9.11 Ploča iz kalupa izrađenog iz pijeska granulacije G3
Slika 10.1 Uzorak kalupne mješavine – domena
Slika 10.2 Mreža uzorka kalupne mješavine s litinom
Slika 10.3 Temperatura uzorka 10 sekundi nakon ulijevanja aluminija
Slika 10.4 Temperatura uzorka 20 sekundi nakon ulijevanja aluminija
Slika 10.5 Temperatura uzorka 40 sekundi nakon ulijevanja aluminija
Slika 10.6 Udio skrutnute frakcije nakon 40 s hlađenja
Slika 10.7 Temperatura uzorka 10 sekundi nakon ulijevanja sivog lijeva
Slika 10.8 Temperatura uzorka 20 sekundi nakon ulijevanja sivog lijeva
Slika 10.9 Temperatura uzorka 40 sekundi nakon ulijevanja sivog lijeva
Slika 10.10 Udio skrutnute frakcije nakon 40 s hlađenja
Slika 10.11 Distribucija temperatura u usi uzorka i odljevka
Slika 10.12 Temperaturna polja za λ=0,489 W/mK
Slika 10.13 Temperaturna polja za λ=0,83 W/mK
Slika 10.14 Skrućivanje nakon 60 s uz λ=0,489 W/mK

Slika 10.15 Skrućivanje nakon 60 s uz λ=0,83 W/mK

Slika 10.16 Shematski prikaz uzorka s rubnim uvjetima

Slika 10.17 Distribucija temperature u uzorku M1 nakon 6000 s u procesu mjerenja

Slika 10.18 Distribucija temperatura kroz uzorak M1

Slika 10.19 Distribucija temperature u uzorku M2 nakon 6000 s u procesu mjerenja

Slika 10.20 Distribucija temperatura kroz uzorak M2

Slika 10.21 Distribucija temperature u uzorku M3 nakon 6000 s u procesu mjerenja

Slika 10.22 Distribucija temperatura kroz uzorak M3

Slika 10.23 Usporedba eksperimentalnog mjerenja koeficijenta toplinske vodljivosti simulacijom

POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Otvori sita prema različitim standardima [5]
Tablica 3.2 Karakteristike pojedinih uzoraka pijeska
Tablica 4.1 Oznake ispitnih mješavina osnovne serije [30]
Tablica 4.2 Rezultati ispitivanja kalupne mješavine sa A – bentonitom [30]
Tablica 4.3 Rezultati ispitivanja kalupne mješavine sa B – bentonitom [30]
Tablica 4.4 Rezultati ispitivanja kalupne mješavine sa C – bentonitom [30]
Tablica 4.5 Rezultati ispitivanja kalupne mješavine sa D – bentonitom [30]
Tablica 6.1 Podaci o sastavu kalupnih mješavina i izmjerena temperaturna polja
Tablica 6.2 Vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti za tri kalupne mješavine različite granulacije
Tablica 9.1 Rezultati granulometrijske analize
Tablica 9.2 Karakteristike pojedinih uzoraka pijeska
Tablica 9.3 Koeficijenti i izračun točaka dijagrama kumulativnog propada prema određenom matematičkom modelu
Tablica 9.4 Tablični prikaz određivanja koeficijenata regresijskog modela
Tablica 10.1 Vrijednosti geometrije uzorka i rubnih uvijeta
Tablica 13.1 Rezultati zagrijavanja uzorka kalupne mješavine litinom aluminija
Tablica 13.2 Distribucija temperature u osi kalupa pri lijevanu aluminija
Tablica 13.3 Rezultati zagrijavanja uzorka kalupne mješavine litinom sivog lijeva
Tablica 13.4 Distribucija temperature u osi kalupa pri lijevanju sivog lijeva
Tablica 13.5 Temperature u uzorcima različitih granulacija

1. UVOD

1.1. Općenito o razvoju ljevarstva

Lijevanje je jedna od tehnologija oblikovanja predmeta od metala kojom se litina (rastaljeni metal) oblikuje ulijevanjem u kalupe. Litina poprima oblik i dimenzije kalupne šupljine i zadržava je nakon skrućivanja [1, 2].

Tehnologija lijevanja jedan je od najstarijih i najdjelotvornijih načina oblikovanja proizvoda. Usprkos različitim konkurentnim i novim tehnologijama proizvodnje, velika potražnja za odljevcima, zbog jednostavnosti proizvodnje nastavit će se i dalje [1]. Visoka produktivnost i laka mogućnost izrade istovrsnih proizvoda čine je iznimno pogodnom za serijsku i masovnu proizvodnju. Zbog velike proizvodnosti pogodna je i za automatizaciju, a kako se radi o proizvodnji karakteriziranoj transportom teških predmeta, neophodan preduvjet je mehanizacija iste. Ona je često jedina tehnologija za izradu vrlo složenih dijelova s unutrašnjim šupljinama (npr. blokova motora i dr.) ili za velika i masivna kućišta strojeva. Oblikovanje se vrši u tekućem stanju, a litina kao i sve tekućine zahtijeva minimalan utrošak energije za promjenu oblika, pogotovo što se kao uljevna sila najčešće koristi gravitacija. Ukupni utrošak energije ipak je znatan, jer materijal prethodno treba rastaliti. Budući da utrošena energija ovisi o utrošenoj masi, a ne o složenosti oblika, iskorištenje energije je povoljnije što je oblik složeniji. Zbog toga je lijevanje nenadomjestiva tehnologija u izradi proizvoda složenog oblika.

Izrada odljevaka u pravilu se sastoji od tri međusobno povezane operacije: taljenja, kalupljenja te ulijevanja litine. Nakon hlađenja odljevka u jednokratnom kalupu, slijedi njegovo istresanje iz kalupa, čišćenje, brušenje, završna obrada i kontrola te skladištenje i otprema odljevaka. Za vrijeme ulijevanja, skrućivanja i ohlađivanja, litina na kalup djeluje mehanički, kemijski i toplinski. Svako od navedenih djelovanja ima utjecaja na kvalitetu odljevka pa ih tijekom izrade odljevaka treba svesti na najmanju moguću mjeru.

Taljenje i poček litine danas se uglavnom obavlja u električnim pećima [2], a samo u iznimno velikim pogonima koristi se kemijska energija (ljevački koks kao gorivo kod kupolnih peći). S obzirom na tehnološke zahtjeve, kod kupolnih i sličnih peći nije ekonomična ugradnja filtara i druge skupe opreme pročišćavanja zraka za manje jedinice. Za taljenje nekih vrsta metala (npr. aluminijskih legura), koristi se loživo ulje, ali je ipak isplatljivije korištenje plina iz ekoloških razloga.

Kalupljenje jednokratnih kalupa danas se obavlja na automatskim kalupnim linijama za serijsku i masovnu proizvodnju, dok se kalupljenje pojedinačnih dijelova obavlja na

mehaniziranim kalupnim linijama manje proizvodnosti, gdje se kalup izrađuje kemijski očvrsnutim vezivom.

Lijev u stalne kalupe (tlačni, kokilni, centrifugalni lijev), u potpunosti je mehaniziran, robotiziran ili potpuno automatiziran, ovisno o vrsti lijeva. Problemi još uvijek postoje s obzirom na mehanizaciju i radne uvjete pri brušenju srha i čišćenju odljevaka jer je s obzirom na složenost oblika zahtjevna automatizacija u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji. Stoga se taj problem rješava minimalizacijom srha, pravilnom konstrukcijom i odgovarajućom tehnologijom kalupljenja.

Posebno su visoki zahtjevi za kvalitetom i točnošću odljevaka te mehaničkim i drugim svojstvima jer se dopušta samo do 5 % neispravnih odljevaka. Mehanička i dimenzijska svojstva te drugi posebni zahtjevi u pogledu kvalitete odljevaka postižu se skrućivanjem litine i promjenom agregatnog stanja, dakle još uvijek nedovoljno istraženim procesom, tako da je upravljanje kvalitetom vrlo složeno. To znači da izrada dobrih odljevaka traži veliku umješnost, tim više što se proces formiranja odljevka ne može pratiti vizualno jer litina ispunjava zatvoreni kalup.

Ljevarstvo još uvijek spada u rizične tehnologije jer je proces kontinuiran te ga je teško u cijelosti kontrolirati.

Problemi s kvalitetom odljevaka susretali su se prije šest tisuća godina, pojavom mjehuravosti pri lijevanju bakrenih legura. Do tehnološkog unapređenja lijevanja u zatvorene kalupe proteklo je skoro tisuću godina da bi se moglo primijeniti tek pri lijevanju bronce. Budući je tehnologija izrade kalupa bila uspješnija od mogućnosti proizvodnje litine, razvoj je bio usmjeren na nove konstrukcije peći za taljenje, jer je to bio osnovni preduvjet za proizvodnju odljevaka. Uvođenje prisilne cirkulacije zraka u peći za taljenje omogućilo je stabilniju proizvodnju i lijevanje novih materijala (npr. sivi lijev). Razvoj je bio brz, tako da su već tada poznati principi većine ljevarskih tehnologija koje se danas primjenjuju. Nakon zastoja, koji je pratio sve djelatnosti u prvoj polovici srednjeg vijeka, duhovna renesansa značila je i proizvodnu pa ljevarstvo proizvodi odljevke namjenjene za javne, državne i crkvene potrebe.

Iako je ljevačka proizvodnja namijenjena velikom broju korisnika, jer je pomoću modela moguće izraditi veliki broj istovrsnih proizvoda, neriješen problem mehaničke energije diktirat će orijentaciju prema pojedinačnoj proizvodnji. Zato je ljevarstvo sve do kraja XIX. stoljeća individualna "state of art" proizvodnja, gdje dominira majstor-pojedinac. Ovog sveznajućeg pojedinca-majstora-inženjera ljevarstvo se neće osloboditi sve do zadnjeg desetljeća XX. stoljeća.

Industrijskom revolucijom razriješen je problem mehaničke energije pa dolazi do naglog razvoja serijske proizvodnje odljevaka. Krajem XIX. i početkom XX. stoljeća, konstruirana je kupolna peć za taljenje metala, kao i temeljne konstrukcije kompletne mehanizacije ljevaonica. Intenzivna mehanizacija, prvenstveno na mehaničkim principima, dovela je do povećanja proizvodnosti, ali i do vrlo teških radnih uvjeta, prašine, buke i povišene temperature. Proizvedeni odljevci relativno su dobre kvalitete, a iskorištena su i proširena saznanja iz metalurgije. Zbog nedostatka kontrolnog instrumentarija onemogućena je proizvodnja odljevaka vrhunske kvalitete, kao i provedba efikasne kontinuirane industrijske kontrole kvalitete.

Početkom XX. stoljeća pojavljuje se koncepcija po kojoj je direktnu proizvodnju bolje bazirati na visokosofisticiranim strojevima, nego na visokokvalificiranim radnicima-majstorima. Stručna radna snaga potrebna je u pripremi proizvodnje, alatnici i održavanju. Ova koncepcija dovodi do intenzivne mehanizacije proizvodnih linija serijske proizvodnje, baziranih na treskalici.

Pored široke upotrebe električne energije, za taljenje se još uvijek koristi kemijska energija (kupolna peć).

Sredinom XX. stoljeća javljaju se općenite poteškoće koje mnoge ljevaonice nisu preživjele. Zahtijevaju se odljevci ujednačene kvalitete, visoke dimenzijske točnosti, a istodobno se postavljaju vrlo oštri zahtjevi u pogledu radnih i ekoloških uvjeta. Međutim, tehnički uvjeti u ljevaonicama ne mogu postići zadovoljavajuća rješenja. Nastaju radikalne promjene jer je nemoguća prilagodba pa dolazi do zatvaranja starih i gradnje novih ljevaonica. Ograničenja u pogledu buke iz upotrebe izbacuju treskalicu, a zamjenjuje ju HVAP (hidraulička visokotlačna automatska pritiskalica) izuzetne proizvodnosti. Razvoj elektronike omogućuje razvoj indukcijskih peći za taljenje, tako da se krajem XX. stoljeća u pogledu proizvodnih i ekoloških uvjeta ljevarstvo približava (gotovo izjednačuje) s drugim proizvodnim tehnologijama. Specijalizacija ljevaonica postaje sve izraženija. Problemi pojedinačne proizvodnje riješeni su upotrebom kemijski očvrstivog veziva, tako da u pojedinačnoj proizvodnji otpada sabijanje kalupa, a time i kalupilice. Postignuta je visoka fleksibilnost u pojedinačnoj proizvodnji, kao i na automatskim kalupnim linijama pojedinačne proizvodnje.

Iako će se nastaviti unapređenje ljevačke tehnologije (npr. impulsno sabijanje kalupa, izrada kalupa s modelima od polistirena, usmjereno skrućivanje da bi se dobila optimalna mehanička svojstva, odljevci od monokristala), ipak će glavne aktivnosti u budućnosti biti usmjerene na upravljanje kvalitetom. Primjena računala i mikroelektronike omogućit će direktno upravljanje proizvodnim procesom, što do sada nije bilo moguće ostvariti, tako da će ljevarstvo prestati biti rizična proizvodnja. Kao rezultat toga, odljevci će biti tanjih stijenki,

visoke dimenzijske točnosti, te ujednačene i zagarantirane kvalitete. Struktura ljevačke proizvodnje neće se znatnije promijeniti, osim što će doći do njenog znatnijeg prestrukturiranja. Povećat će se proizvodnja odljevaka od aluminijskog i nodularnog lijeva, a smanjiti proizvodnja sivog, kovkastog i čeličnog lijeva. Što se tiče novih materijala (plastike, keramike, polimernog betona, kompozita i dr.), ne treba očekivati da će oni biti zamjena za metale, već će se pojaviti nove konstrukcije u kojima će biti korišteni usporedno, pogotovo što su im svojstva komplementarna, a ne konkurentna.

Ljevačka tehnologija kretala se najprije od kvalitete oblika, zatim visoke produktivnosti, do već danas vrlo sofisticiranog vođenja proizvodnje, tako da proizvedeni odljevci imaju kvalitetu oblika, dimenzijsku točnost te vrlo fleksibilne rokove isporuke. U zadnjih dvadeset godina zahtjevi u pogledu mehaničkih svojstava porasli su za oko 60 %, a točnost dimenzija poboljšana je pet puta.

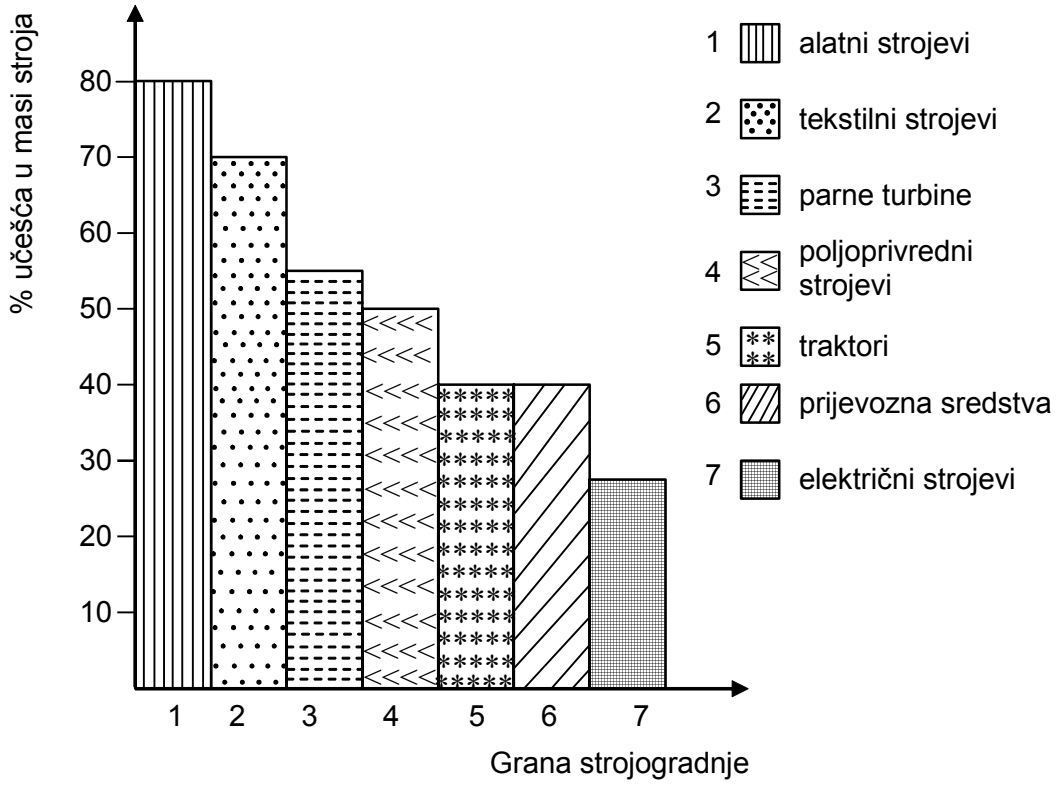
Smanjen je broj dijelova strojnih sklopova lijevanjem vrlo složenih odljevaka.

CIM (Computer Integrated Manufacturing) koncepcija danas u ljevarstvu uglavnom nije potpuno zaživjela. Sadašnje stanje u ljevaonicama odnosi se na *računalom podržane određene aktivnosti, ali ne i na integraciju svih aktivnosti u jednu cjelinu*, što podrazumijeva CIM. Ljevačka proizvodnja i dalje će se količinski povećavati, uz manji pad u industrijski razvijenim zemljama (do 10 %), ali će doći do većeg porasta (do 25 %) u zemljama koje su u industrijskom razvoju. Tako se predviđa da će ukupna ljevačka proizvodnja porasti s današnjih 80 Mt/god. na oko 120 Mt/god.

Ljevaonice u zapadnim zemljama su i u pojedinačnoj i u serijskoj proizvodnje visokomehanizirane ili automatizirane. Peći za taljenje u pravilu su električne indukcijske peći. Kalupljenje se obavlja na kalupnim linijama. Proizvodnost odljevaka je visoka, linije proizvode 150 … 200 kalupa na sat. Kvaliteta odljevaka i rokovi isporuke su pouzdani, a ekološki standardi su visoki.

Zemlje u tranziciji u koje spada i Republika Hrvatska, nastoje raniju proizvodnju prilagoditi tržišnim uvjetima privređivanja. U ljevarstvu će se morati prilagoditi struktura ljevova, konkretno smanjenjem proizvodnje sivog i čeličnog lijeva, a povećanjem proizvodnje nodularnog i aluminijskog lijeva. Bit će potrebno poboljšati kvalitetu odljevaka, a s tim u vezi modernizirati kontrolne instrumente (kemijski sastav, dimenzijska kontrola i kontrola mehaničkih svojstava), poboljšati upravljanje, smanjiti broj zaposlenih itd.

Bez obzira na tehnologiju proizvodnje, odljevci su značajno zastupljeni u širokom asortimanu mnogih grana strojogradnje, kako je to i prikazano histogramom na slici 1.1. [3]



Slika 1.1 Učešće odljevaka u masi stroja
kod nekih grana strojogradnje [3]

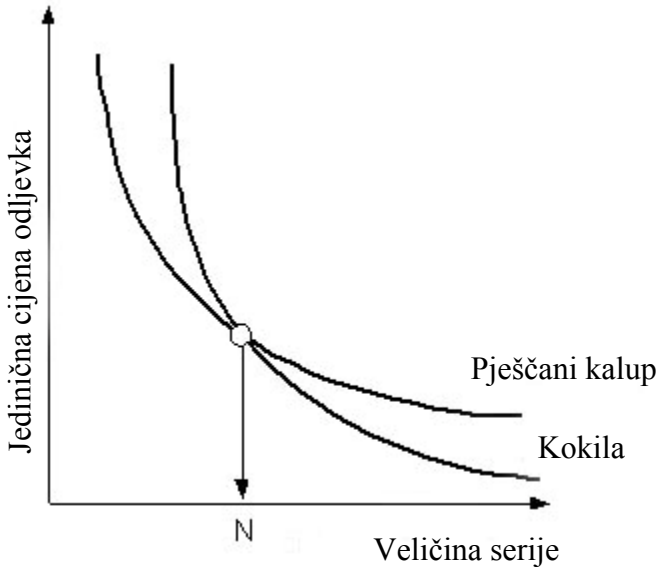
Na histogramu se vidi značajno učešće odljevaka u pojedinim granama strojogradnje. Odljevci u strojogradnji koriste se kao završni proizvodi ili se prije upotrebe obrađuju.

Najveće učešće odljevaka u masi stroja je kod alatnih strojeva (80 %), a najmanje kod električnih strojeva (30 %). Kod traktora i prijevoznih sredstava učešće odljevaka u masi proizvoda je (40 %), a s obzirom na velike proizvodne serije, proizvodnja odljevaka za ove grane strojogradnje je značajna.

Izbor tehnologije lijevanja ovisi o nizu parametara kao što su: masa odljevka, dimenzije odljevka, vrsta legure koju treba lijevati, veličini serije i dr. Treba odabrati onu tehnologiju lijevanja odljevaka koja će dati najmanju cijenu jednog odljevka, uvažavajući da se odabranom tehnologijom lijevanja mogu zadovoljiti traženi uvjeti kvalitete.

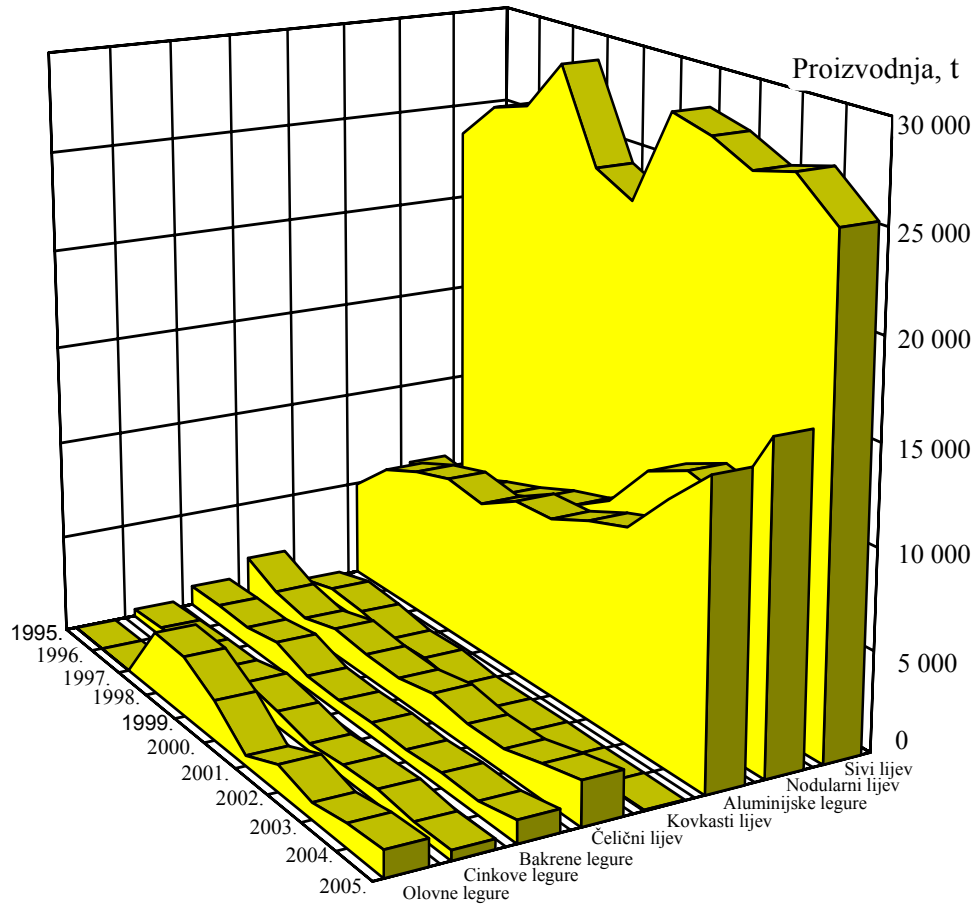
Obzirom na potrebe za odljevcima, danas se većina odljevaka lijeva u jednokratne meke pješčane kalupe. Međutim, cijena jednog odljevka između ostalog značajno ovisi o veličini serije.

Na slici 1.2 vidi se da je cijena jednog odljevka kod pojedinačne proizvodnje manja pri lijevanju u pješčani kalup, od cijene odljevka lijevanog u kokilu. Suprotno vrijedi za serijsku i masovnu proizvodnju. Kao granični broj može se uzeti N = 500 … 1000 komada, kada se od lijevanja u meki pješčani kalup prelazi na lijevanje u kokilu.



Slika 1.2 Ovisnost cijene odljevka o veličini serije [1]

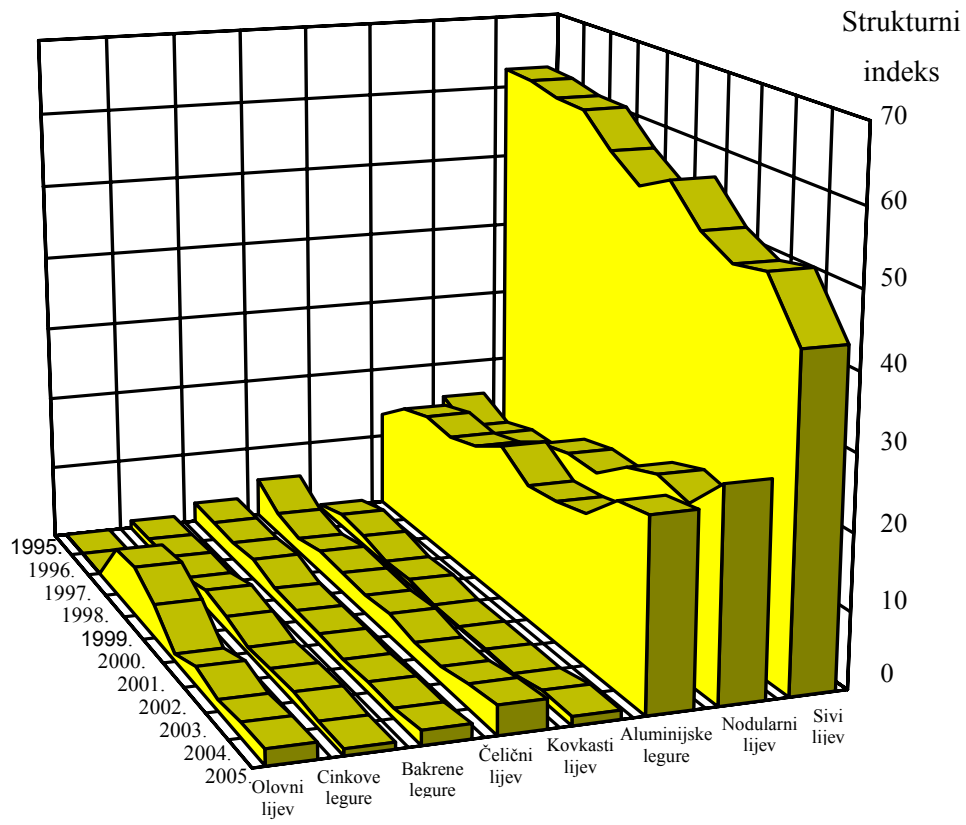
Iako su potrebe za odljevcima velike, od 1990. do 1995. godine u Republici Hrvatskoj bilježi se uglavnom pad ili stagnacija proizvodnje pojedinih vrsta odljevaka. Kretanje proizvodnje odljevaka od 1995. do 2005. prikazano je na slici. 1.3. Od 1995. do 2005. godine također se bilježi uglavnom pad ili stagnacija proizvodnje pojedinih vrsta odljevaka. Pad ili stagnacija još uvijek su rezultat prestrukturiranja u proizvodnji i poznatih problema u gospodarstvu zemalja u tranziciji.



Slika 1.3 Prikaz ljevačke proizvodnje u Hrvatskoj od 1995. do 2005. godine

Iznimku čini porast proizvodnje odljevaka od aluminijskih legura. Bilježi se i porast proizvodnje odljevaka od nodularnog lijeva, uz istovremeni pad proizvodnje od sivog i čeličnog lijeva. Naime, nodularni lijev po svojim mehaničkim svojstvima uspješno zamjenjuje sivi i čelični lijev pa i s tog stanovišta dolazi do ove pojave.

U većini pokazatelja prikazana je uglavnom ukupna godišnja proizvodnja, uzimajući u obzir i vrstu lijeva. Ovi pokazatelji jesu važni, ali nisu presudni jer nepotpuno definiraju buduće stanje. Procjena budućeg stanja izuzetno je važna. Na temelju poznavanja buduće strukture može se lakše procijeniti odvijanje buduće proizvodnje. Zatim se može utvrditi potreba za eventualnom rekonstrukcijom postojeće ljevaonice (npr. zamjena kupolnih peći s električnim pećima), ili za gradnjom nove ljevaonice. Tipični slučaj je smanjenje proizvodnje sivog lijeva, bez obzira što se ukupno proizvedena količina povećala radi korištenja nodularnog lijeva, aluminija i plastike u proizvodnji vozila.



Slika 1.4 Struktura ljevačke proizvodnje u R. Hrvatskoj
od 1995. do 2005. godine

Na temelju slike 1.4 može se zaključiti da je struktura različita od one u industrijski razvijenim zemljama. Ona uvelike odgovara strukturi proizvodnje u istočnoeuropskim zemljama, a karakterizirana je izuzetnim udjelom sivog lijeva i u apsolutnom i u relativnom odnosu na nodularni lijev [3]. Da bi se postigli odnosi kao što su u industrijski razvijenim zemljama, tada bi bilo potrebno smanjiti relativni udio sivog lijeva za oko 30 %, a za oko 50 % povećati relativni udio nodularnog lijeva. Industrijski razvijene zemlje održavaju odnos između sivog i nodularnog lijeva oko 2 : 1. Slična je situacija s lijevom aluminijskih legura gdje se može povećati proizvodnja za oko 50 %, jer se očekuje njihova velika primjena za blokove motora u automobilskoj industriji.

U industrijski razvijenim zemljama proizvodnost iznosi oko 30 … 65 tona lijeva po zaposlenom [3] , dok je kod nas oko 7 tona po zaposlenom.

U ljevarstvu Republike Hrvatske mogli bi se zacrtati neki prioritetni pravci razvoja te će za uspješno poslovanje biti nužno poduzeti određene aktivnosti kao što su:

- poboljšanje kvalitete odljevaka, što je moguće uz:
  - poboljšanje stručnog znanja zaposlenih
  - nabavku kontrolnog instrumentarija
  - primjenu informatičkih sustava (CIM koncepcija)
- usvajanje novih tehnologija, posebno nodularnog lijeva
- specijalizacija za određeni segment proizvodnje
- pored lijevanja uvođenje i strojne obrade odljevaka, kako bi se isporučivali gotovi dijelovi
- orijentaciju prema izvozu manjih serija i pojedinačne proizvodnje
- organizirano rješavanje zajedničkih problema kroz poslovno udruživanje ljevaonica
- osiguranje financijske podrške u izvozu
- poboljšanje pristupa i protoka tehnoloških informacija
- poboljšanje sigurnosti u radu i zaštiti okoliša
- prihvaćanje činjenice da pokazatelj uspješnosti nije fizički opseg proizvodnje, nego profitabilnost.

1.2 Odlupljivanje

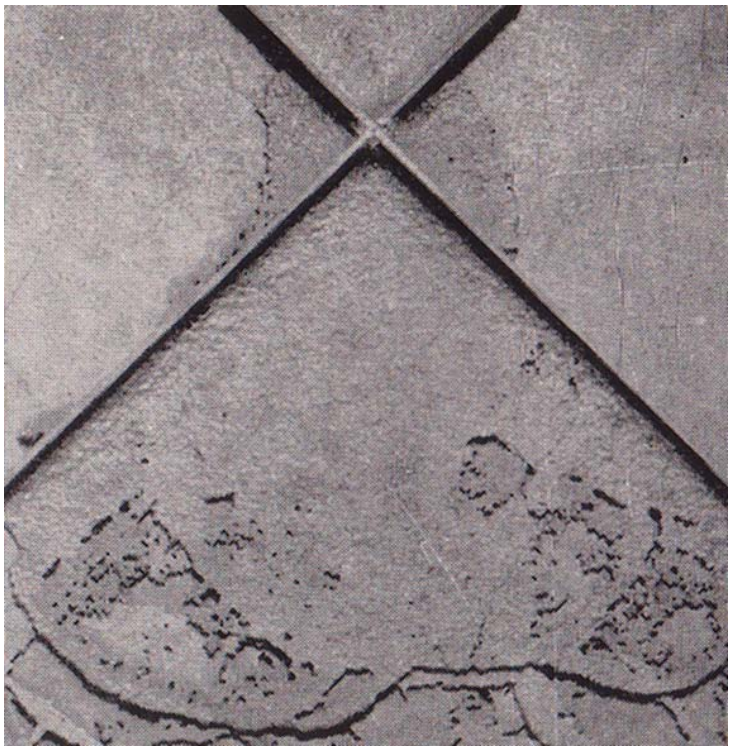
Kao opis pojave odlupljivanja mogla bi se prihvatiti definicija, da je odlupina 2 do 6 mm debeli površinski sloj koji se pod utjecajem dilatacijskih sila odvojio od kalupa. Korištenjem računalnih simulacija ulijevanja i skrućivanja u cilju optimalizacije ljevačke proizvodnje raste i interes za boljim poznavanjem svojstva materijala koji se koriste u procesu lijevanja. U svrhu povećanja točnosti simulacijskih paketa, posebno onih koji razmatraju skrućivanje i vremena hlađenja odljevaka, potrebno je preciznije definirati kalupne mješavine odnosno njihova svojstva koji se koriste za definiranje matematičkog modela. Danas se kalupne mješavine uz dodatke novih vrsta aditiva vrlo brzo razvijaju te je potrebno uložiti veliki napor u kvalitetno definiranje toplinskih svojstava kalupnih mješavina.

Godišnje izvješće Metalcasting Industry Technology Roadmap [4] izdano pod okriljem American Foundry Society (AFS) u svom dijelu koji se odnosi na metode kalupljenja i kalupnih mješavina postavlja zahtjev za što skorijim objašnjenjem nisko temperaturne ekspanzije kremenog pijeska, te postavljanje matematičkog modela te pojave unutar već poznatih simulacijskih programa. Osim ovog zahtjeva u izvješću se iznosi potreba za kvalitetnijim objašnjenjem termofizikalnih svojstava kalupnih mješavina poput toplinske vodljivosti i čvrstoće kalupne mješavine pri visokim temperaturama.Toplinska i fizikalna svojstva kalupnih mješavina vrlo su značajna za vrijeme skrućivanja u kalupu. O njima direktno ovise struktura i svojstva odljevka jer definiraju mehanizme rasprostiranja topline kroz kalup, a time i brzinu hlađenja odljevka. Osim utjecaja na odljevak termofizikalna svojsta imaju veliku važnost u održavanju integriteta kalupa tj. kalupne šupljine. Zagrijavanjem kalupa dolazi do znatnih promjena u termofizikalnim svojstvima kalupne mješavine. Najznačajnija promjena uzrokovana zagrijavanjem kalupa je alotropska modifikacija kremenog pijeska. Promjena iz α u β fazu zakreće kristale kremenog zrna te uzrokuje njegovo širenje. Promjena volumena nastala širenjem niza kristala koji su postigli temperaturu transformacije od 570 ^{o}C uzrokuje velika naprezanja u kalupu. Pri tom dolazi do deformacije prilikom ćega se mijenja geometrija kalupne šupljine što nakon popunjavanja kalupa, a za vrijeme skrućivanja unosi i naprezanja u samu strukturu odljevka te mijenja dimenzije njegove dimenzije. Za vrijeme popunjavanja kalupa litinom toplina prelazi iz litine u kalup uzrokujući tako zagrijavanje lica kalupa[1] što uzrokuje velika naprezanja u tankom sloju koji se odlupljuje i pada u litinu.

Uključina kalupne mješavine nastala procesom odlupljivanja tretira se kao ljevačka greška koju nazivamo odlupinom. Ovaj problem zaokupljao je mnoge znanstvenike, te su

[1] Unutarnja površina kalupa

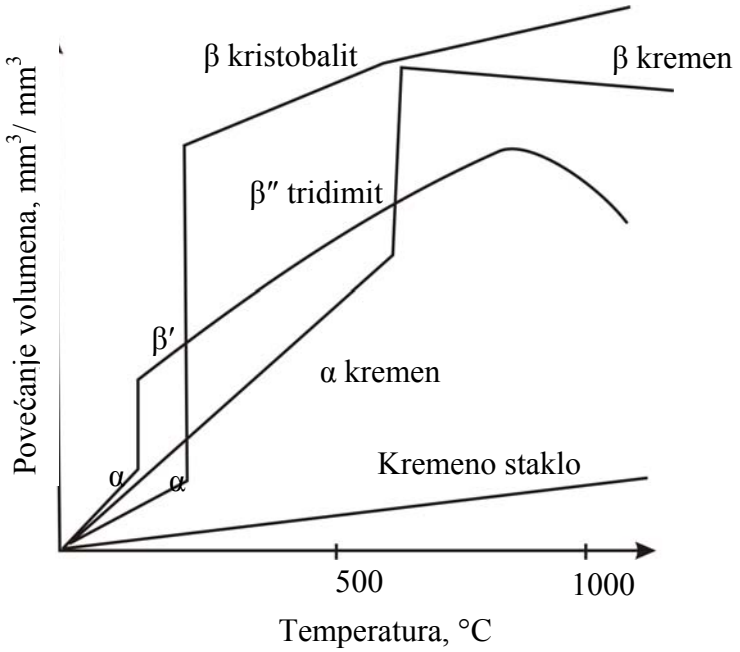
mnoga istraživanja provedena da se umanji ili spriječi pojava ovih defekata. Prikaz odlupina prikazan je na slici 1.5.



Slika 1.5 Tipičan izgled odlupine

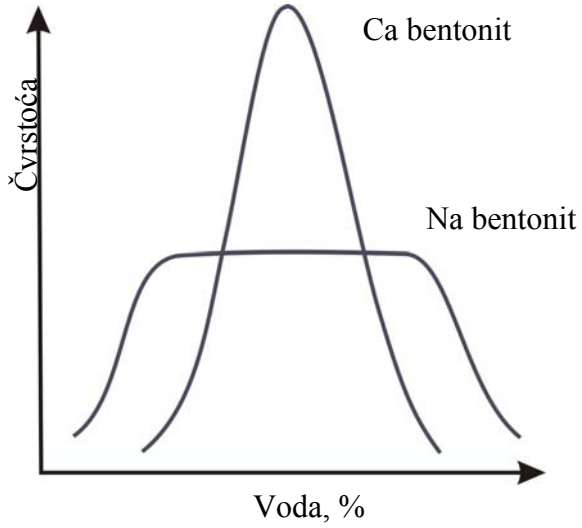
2. MEHANIZAM NASTANKA ODLUPLJIVANJA

Kalupna mješavina sastoji se od pijeska, veziva i dodataka koji poboljšavaju tehnološka svojstva kalupa. Pijesak kao osnovni materijal zauzima više od 78 % volumena kalupne mješavine. Približno 20 % kalupne mješavine upotpunjava svojim udjelom vezivo (bentonit, voda), dok dodaci sudjeluju sa svega cca 2 %. Za nastanak odlupina u kalupu za vrijeme njegovog zagrijavanja prilikom ulijevanja litine najodgovorniji je pijesak. Temperaturno istezanje pijeska uzrokuje stvaranje unutarnjih naprezanja koje nazivamo tlačnim naprezanjima. Promjena volumena kod različitih struktura kremena u ovisnosti o temperaturi prikazana je na slici 2.1.



Slika 2.1 Povećanje volumena kod različitih struktura kremena u ovisnosti o temperaturi [2]

Osim pijeska u nastanku odlupina sudjeluje i vezivo. Različiti udjeli vlage mijenjaju lokalnu čvrstoću kalupne mješavine što je prikazano na slici 2.2. Prilikom uljevanja dolazi do migracije vlage prema unutrašnjosti kalupa. Povećan udio vlage uzrokovan kondenzacijom u rekondenzacijskoj zoni ima za posljedicu smanjenje čvrstoće u toj zoni. Čvrstoća u rekondenzacijskoj zoni naziva se rekondenzacijska čvrstoća (S_r).

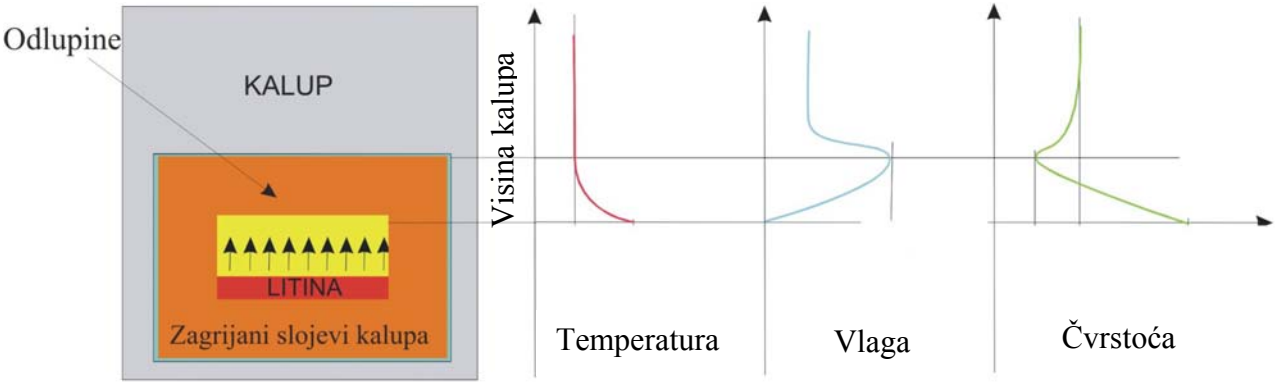


Slika 2.2 Promjena čvrstoće kalupne mješavine u ovisnosti o udjelu vode [1].

Pojava odlupina vezana je isključivo uz nastanak tlačnih naprezanja u slojevima kalupa koji su zagrijani na temperaturu veću od 100 °C, a u području izotermi oko 100 °C potpomognuta je i pojavom rekondenzacijske zone (slika 2.3). Smanjenje čvrstoće uzrokovano je porastom udjela vode u rekondenzacijskoj zoni. Rekondenzacijska zona nalazi se neposredno ispod površine kalupa, u dubini koju litina još nije ugrijala iznad 100 °C. U toj zoni rekondenzira se para, koja uzrokuje povećanje koncentracije vode. Sklonost odlupljivanju može se objasniti kao funkcija kvocijenta tlačnih naprezanja (N_t) i čvrstoće rekondenzacijskog sloja (S_r). Međutim, odlupina kao ljevačka greška može nastati i u suhom sloju kalupa, tj. sloju koji je zagrijan na temperaturu veću od 100 °C gdje se odvija proces alotropske modifikacije pijeska.

$$SO = f\left(\frac{N_t}{S_r}\right)$$

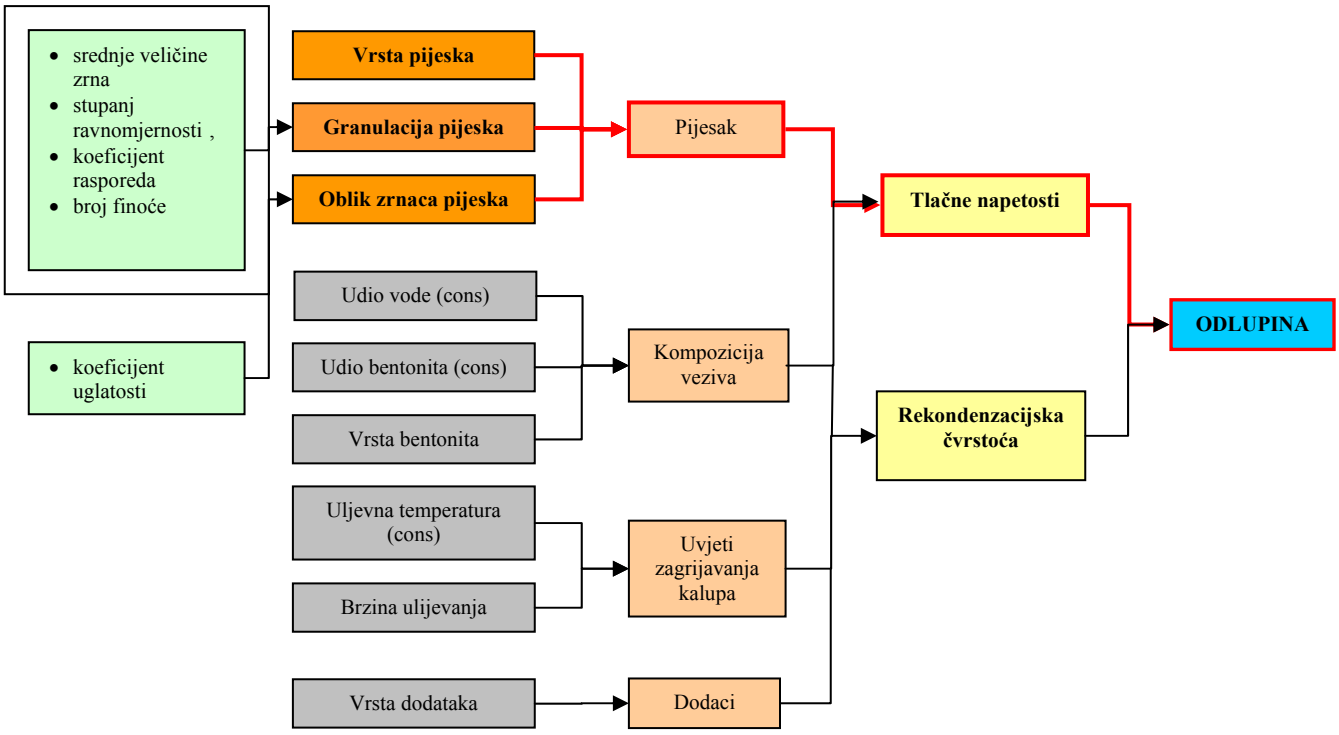
Sklonost odlupljivanju može se smanjiti na način da smanji iznos tlačnih naprezanja. To se postiže odgovarajućim izborom granulometrijskog sastava pijeska i tehnologijom izrade kalupa. Međutim, i vrijeme nastanka odlupine vrlo je važan faktor u proučavanju mehanizma odlupljivanja. Ukoliko odlupina nastane u trenutku kada se površinski sloj odljevka skrutne, njezina pojava nije relevantna. S druge strane, ako se odlupina pojavi za vrijeme ulijevanja dok je površina odljevka još uvjek u likvidus stanju, pojavit će se greška na odljevku koju nazivamo odlupina. Na vrijeme pojave odlupine najviše utječe uljevna temperatura i vrsta pijeska. Shematski prikaz mehanizma odlupljivanja prikazan je na slici 2.3.



Slika 2.3 Prikaz nastanka odlupina

Iz slike 2.4. vidljivo je kako na pojavu odlupljivnja može utjecati veći broj faktora.

U ovom radu posebni naglasak u istraživanju mehanizma odlupljivanja dat će se granulaciji pijeska. Vrsta i oblik zrna pjeska svojstveni su za određeno nalazište pijeska. Kako je za istraživanje korišten pijesak iz istog nalazišta, vrsta pijeska i oblik zrna pijeska imaju konstantnu vrijednost.



Slika 2.4 Shematski prikaz utjecajnih faktora na mehanizam odlupljivanja

Ostali utjecajni parametri nisu razmatrani jer su oni već dovoljno istaženi u recentnim radovima. Budući da je pijesak podložan promjeni volumena i da je glavni uzročnik nastanka tlačnih naprezanja, u ovom radu proučit će se njegov utjecaj na pojavu odlupljivanja.

2.1 Tlačna naprezanja

Kalupna mješavina, kao što je već spomenuto, sastavljena je od osnovnog materijala – pijeska i veziva. Kao vezivo u ovom se slučaju koristi bentonit koji se aktivira sa vodom. Lamele bentonita obavijaju zrna pijeska te uz pomoć električnih naboja povezuju slobodne katione sa dipolima vode tvoreći tako privlačnu silu između dva sloja gline, tj. između zrna pijeska. Tako sastavljenu mješavinu karakteriziraju tehnološka i mehanička svojstva poput čvrstoće, tvrdoće, propusnosti itd. Ukoliko se kalupna mješavina izloži djelovanju topline, ovisno o količini unešene topline, unutar nje dolazi do stanovitih promjena.

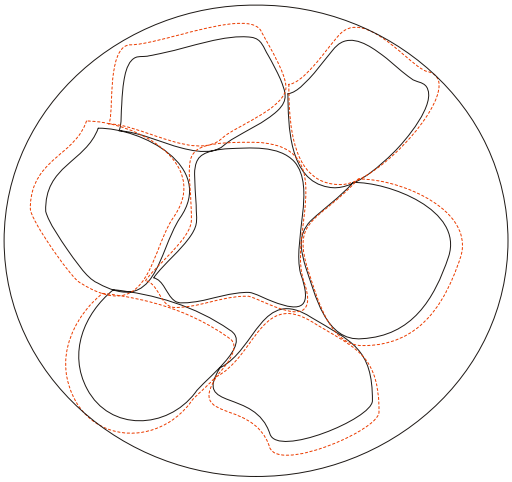
2.1.1 Mehanizam nastanka tlačnih naprezanja

Jedna od najvažnijih promjena je temperaturno istezanje kremenog zrna na povišenoj temperaturi koja nastaje prilikom α - β transformacije kristala kvarca. Kao rezultat dilatacije kremenih zrna javljaju se unutarnje naprezanja koje nazivamo tlačnim naprezanjama, a koje su glavni krivac pojave deformacije kalupne šupljine.

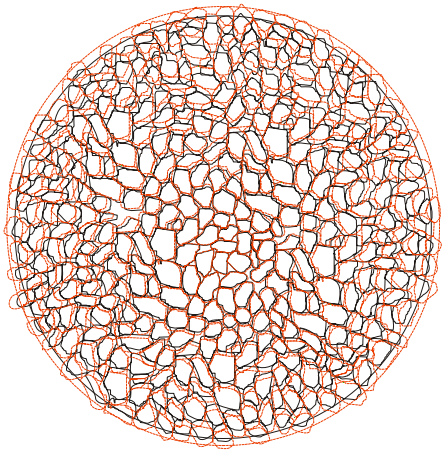
Tlačne naprezanja tj. dilatacijska sila koja je uzrokovana alotropskom modifikacijom kremenih zrna po iznosu nije jednaka za velika i mala zrna. Logično je zaključiti da mala zrna dilatiraju manje nego to čine velika. Također zrnu većeg volumena potrebno je duže vrijeme i više topline da postigne kritičnu temperaturu 570 ^{o}C. Manja zrna će znatno brže se zagrijati te će temperaturno istezanje kod njih biti manje po iznosu, ali znatno brže. Ukoliko promotrimo dva uzorka, jedan sa ekstremno krupnim zrnom (slika 2.5), te jedan s ekstremno sitnim (slika 2.6), može se zaključiti da će uzorak prikazan na slici 2.5 trebati više topline, tj. više vremena da dostigne kritičnu temperaturu. Zrna pijeska prikazana na slici 2.6 znatno će se brže zagrijati te će temperaturno istezanje nastupiti znatno ranije.

Razlika između krupnog i sitnog zrna postoji i u iznosu same dilatacije. Ukoliko je zrno krupno, temperaturno istezanje je veća. Veliki iznos dilatacije objašnjavamo uz pomoć malog broja kontaktnih površina koje su glavni nositelj sila po unutarnjoj strukturi.

Promjena dimenzija malih zrna prenose se preko mnogo kontaktnih površina. Prilikom tog prijenosa dolazi do velikih promjena u smjeru djelovanja dilatacije te se ona djelomično poništava za vrijeme prijenosa kroz unutarnju strukturu kalupne mješavine. Mnogo malih šupljina koje su prisutne pri kontaktu dva zrna pijeska također ublažavaju djelovanje sila te kompenziraju njihovo širenje.



Slika 2.5 Krupno zrno u procesu dilatacije



Slika 2.6 Sitno zrno u procesu dilatacije

Razlika u brzini provođenja topline kod malih i velikih zrna pijeska također je vrlo značajna. Može se pretpostaviti da prilikom zagrijavanja sitnog zrna u površinskim slojevima ono relativno brzo postiže temperaturu od 570 ^{o}C te temperaturno istezanje nastupa vrlo brzo. Nakon toga provođenje topline se usporava prolaskom kroz ostatak kalupa tako da se u udaljenijim slojevima od lica kalupa zrna pijeska sve sporije zagrijavaju. Krupnija zrna zbog njihovog velikog volumena potrebno je duže zagrijavati. Prolaz topline kroz krupnozrnatu strukturu je uvelike olakšano zbog malog broja kontaktnih površina.

2.2 Rekondenzacijska čvrstoća

Prilikom ulijevanja litine u kalupnu šupljinu dolazi do zagrijavanja površine kalupa. Zagrijavanjem površine kalupa vlaga isparava i prolazi prema unutrašnjosti kalupa. U zoni gdje je temperatura niža od 100 ºC para se kondenzira te tako kondenzirana ekstremno povećava udio vlage u kalupnoj mješavini. To mjesto u kalupu nazivamo rekondenzacijska zona. Povećanjem količine vlage u rekondenzacijskoj zoni čvrstoća kalupne mješavine brzo opada te se zagrijani sloj odlupljuje od ostatka kalupa uzrokujući nastanak odlupina. Nastanku odlupina znatno pomažu i pojava tlačnih naprezanja u zonama zagrijanim iznad 570 ºC. Čvrstoća kalupne mješavine u rekondenzacijskoj zoni naziva se rekondenzacijkska čvrstoća.

3. KALUPARSKI PIJESAK

Najraširenij materijal za izradu kalupa u ljevarstvu je ljevački pijesak. Riječ je uglavnom o vrstama pjeskova koji zbog svoje velike prisutnosti imaju nisku cijenu. Međutim, bez obzira na nisku cijenu najprisutniji je kremeni pijesak koji ima i svojih nedostataka. Kao jedan od njih je alotropska modifikacija iz α u β fazu koja u kalup unosi velike naprezanja koja uzrokuju deformacije kalupa prilikom lijevanja i skrućivanja odljevka.

3.1 Vrste pjeskova

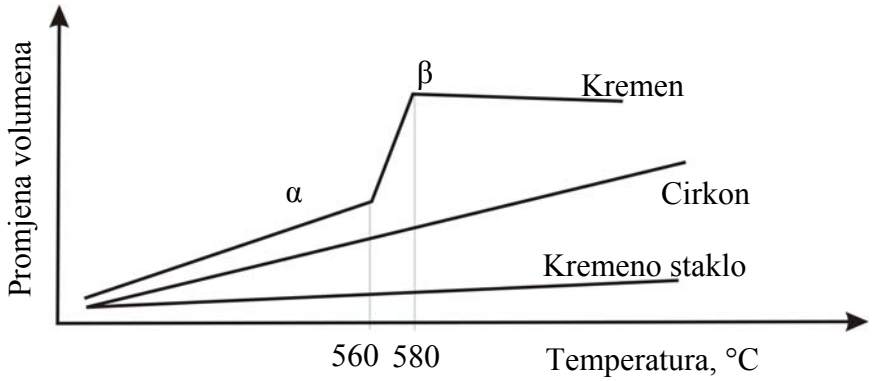
Cirkonski pijesci imaju više talište i bolju toplinsku vodljivost od kremenog pijeska. Stoga se koristi za izradu kalupa za lijevanje čeličnog lijeva jer se umanjuje pojava zapečenosti pijeska. Zbog vrlo visoke cijene cirkonski pijesak koristi se za izradu samo toplinski opterećenih dijelova kalupa, dok se ostali dio radi od kremenog pijeska.

Velika toplinska vodljivost i otpornost te malo temperaturno istezanje karakteristike su kromitnih pijeskova. Sastoje se od minerala kromita FeO Cr_2O_3. Od kromitnog pijeska izrađuju se dijelovi kalupa koji su toplinski vrlo jako opterećeni te se njihovom upotrebom želi izbjeći veća koncentracija topline u kalupu, a s time i pojava zapečenosti pijeska.

Olivinski pijesci imaju vrlo mali koeficijent temperaturnog istezanja. Sastoje se od minerala olivina koji je ortosilikat željeza i magnezija [1].

3.2 Kremeni pijesak

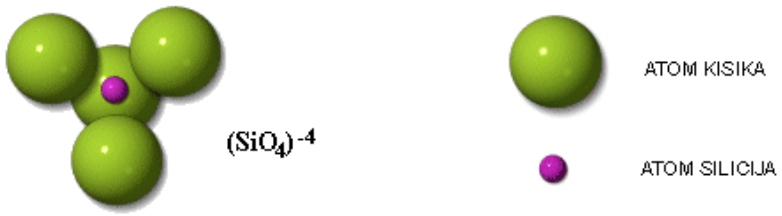
Nepovoljna karakteristika kremenog pijeska je njegova alotropska modifikacija pri temperaturi od 570 ºC. Pri ovoj temperaturi dolazi do povećanja volumena zrna pijeska koje uzrokuje deformaciju kalupa i uzrokuje grešku odlupljivanja. Osim dilatacije nepovoljna karakteristika je i mala toplinska vodljivost koja uzrokuje grešku zapečenosti tj. sraščivanja kalupa sa litinom na površini odljevka. Na slici 3.1 prikazane su krivulje promjene volumena za različite vrste osnovnog materijala.



Slika 3.1 Krivulje temperaturne promjene volumena više vrsta osnovnog materijala [1]

Kremeni pijesak koji koristimo za izradu pješčanih kalupa nastao je erozijom kremenih stijena. O čistoći kremenog pijeska ovisi i njegova toplinska otpornost. Zato udio kremenih zrnaca u osnovnom materijalu mora biti veći od 90% da bi se mogao koristiti u tehnologiji ljevarsta. Kao nečistoće najčešće se javljaju glinenci s oblim lomljivim česticama. Glinenci imaju nisko talište te se pri lijevanju sivog lijeva ne dozvoljavaju u udjelu većem od 10 %, a za lijevanje čeličnog lijeva udio im smije biti najviše do 2 %. Štetnije primjese kremenog pijeska su tinjac, željezno-magnezijski spojevi i kalcijev karbonat koji se provjerava kemijskom analizom u laboratoriju. Udio kalcijevog karbonata u pijesku ne smije prijeći 1 % jer pri 900 ºC kalcijev karbonat se raspada i razvija plinove koji utječu na svojstva kalupne mješavine [1].

Struktura kremena definirana ja kemijskim sastavom SiO_2. Atom silicija prema svojoj elektronskoj konfiguraciji rado se povezuje sa atomima kisika tvoreći čvrste veze. Sva četiri elektrona silicija imaju sličan energetski potencijal i usmjerene su u obliku tetraedra. Na taj način dolazi do povezivanja jednog atoma silicija koji oko sebe veže četiri atoma kisika tvoreći osnovnu strukturnu jedinicu silikata tkz. silikatni tetraedar $(SiO_4)^{4-}$ prikazan na slici 3.2.

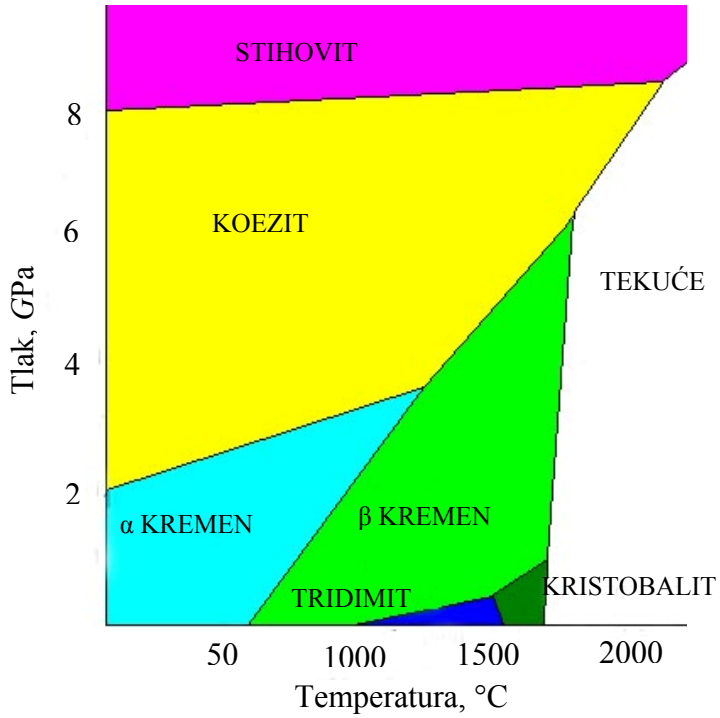


Slika 3.2 Silikatni tetraedar

U ovisnosti o temperaturi silikatni tetraedri međusobno se zakreću stvarajući tako različite strukture. Osnovne strukture kremenog pijeska su:

- α kremen ili primarni kremen stabilan do 570 ºC,
- β kremen ili sekundarni kremen stabilan iznad temperature od 570 ºC do 870 ºC,
- α tridimit – metastabilni obliku na temperaturama do 117 ºC,
- β tridimit - stabilan od 870 ºC do 1470 ºC,
- α kristobalit – može postojati u metastabilnom obliku do 275 ºC,
- β kristobalit – u metastabilnom obliku pojavljuje se na temperaturama od 275 ºC do 1470 ºC , a u stabilnom stanju od 1470 ºC do 1713 ºC tj. do točke taljenja,
- koezit – stabilna faza na pritiscima od 2,3 GPa do 7,8 GPa,
- stihovit – stabilna faza na pritiscima iznad 7,8 GPa.

Fazni dijagram strukturnih promjena kremenog pijeska prikazan je na slici 3.3.



Slika 3.3 Fazni dijagram kremenog pijeska [1]

S ljevačkog stanovišta najvažnija pretvorba kremena je α u β strukturu. Pri toj pretvorbi, kao što je već spomenuto, dolazi do znatnog porasta volumena kremenog zrna što uzrokuje pojavu naprezanja kalupnog materijala, deformacije, a time i greške na odljevcima. Ova transformacija je reverzibilna što znači da se prilikom ohlađivanja zrno s β strukture nazad vraća u α strukturu.

3.3 Granulometrijska analiza pijeska

Zrnatost pijeska ispituje se uređajem kojeg nazivamo rešetalica. Izgled rešetalice prikazan je na slici 3.4. Uređaj se sastoji od ukupno 11 sita postavljenih jedno na drugo. Svako sito ima različiti promjer okna te se postavljaju od najkrupnijeg (najveća okna) do najsitnijeg (najmanja okna). Veličina okna sita različita je s obzirom na promatrani standard. U tablici 3.1 prikazane su dimenzije okana sita prema razičitim standardima.

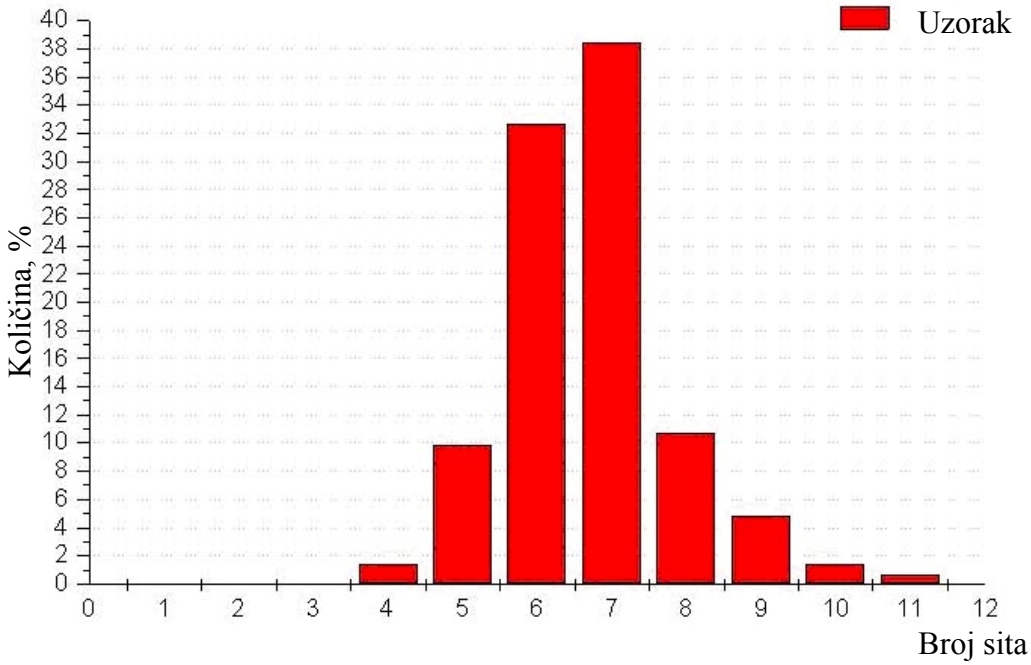
Tablica 3.1 Okna sita prema različitim standardima [5]

Broj sita	**Veličina okna sita (mm)**				**Veličina okana (in)**		
	HRN B.B5.011	***DIN***	***+GF+***	***GOST***	***USA***	***TYLER***	***Brit.stand.***
				2,5			
1	1,4	1,6	1,4	1,6	14 (1410)	12 (1397)	12 (1405)
2	1,0	1,0	1,0	1,6	18 (1000)	16 (991)	16 (1003)
3	0,63	0,63	0,71	0,63	30 (590)	28 (590)	25 (600)
4	0,40	0,40	0,50	0,40	40 (420)	35 (417)	44 (353)
5	0,30	0,315	0,355	0,315	50 (297)	48 (295)	52 (295)
6	0,20	0,20	0,25	0,20	70 (210)	65 (208)	72 (210)
7	0,15	0,16	0,18	0,16	100 (149)	100 (147)	100 (152)
8	0,125	0,125	0,125		120 (125)	115 (125)	120 (125)
9	0,10	0,10	0,09	0,10	140 (105)	150 (105)	150 (105)
10	0,075	0,08	0,063	0,06	200 (77)	200 (77)	200 (76)
11	0,063	0,063	dno	0,05	230 (62)	250 (62)	240 (66)
12	dno	-	-	-	-	-	-



Slika 3.4 Rešetalica [6]

Analiza zrnatosti dobiva se vaganjem zrna koji nakon sijanja ostaju na pojedinim sitima. Iz izvaganih količina dobivaju se podaci koji nam omogućavaju različite načine karakterizacije zrnatosti pijeska. Najjednostavniji prikaz izmjerenih rezultata prikazuje se histogramom. Histogramski prikaz dobivamo nanoseći na apscisu veličinu otvora sita, počevši od najvećeg, a na ordinatu postotke izvaganih ostataka na pojedinom situ. Takav prikaz ne daje točne brojčane pokazatelje, ali je s druge strane dosta zoran. Ukoliko je zastupljenost veća u lijevom dijelu dijagrama pijesak je grubozrnat, a ako su zastupljenije frakcije u desnom dijelu dijagrama, pijesak je sitnozrnat. Ukoliko je zbroj dviju susjednih frakcija preko 60% pijesak se smatra jednoličnim, a ako nema zastupljenih frakcija, pijesak smatramo nejednoličnim. Primjer histogramskog prikaza granulacije pijeska prikazan je na slici 3.5.



Slika 3.5 Histogram zrnatosti uzorka

Mnogo važnije podatke možemo interpretirati krivuljom kumulativnog propada. Ta se krivulje dobiva nanošenjem na apscisu u logaritamskom mjerilu veličine okana sita u mm, počevši od najmanje. Na ordinatu se nanose postoci ukupnog propada kroz pojedino sito. Uz pomoć krivulje kumulativnog propada mogu se odrediti četiri karakteristike koje u potpunosti definiraju zrnatost pijeska.

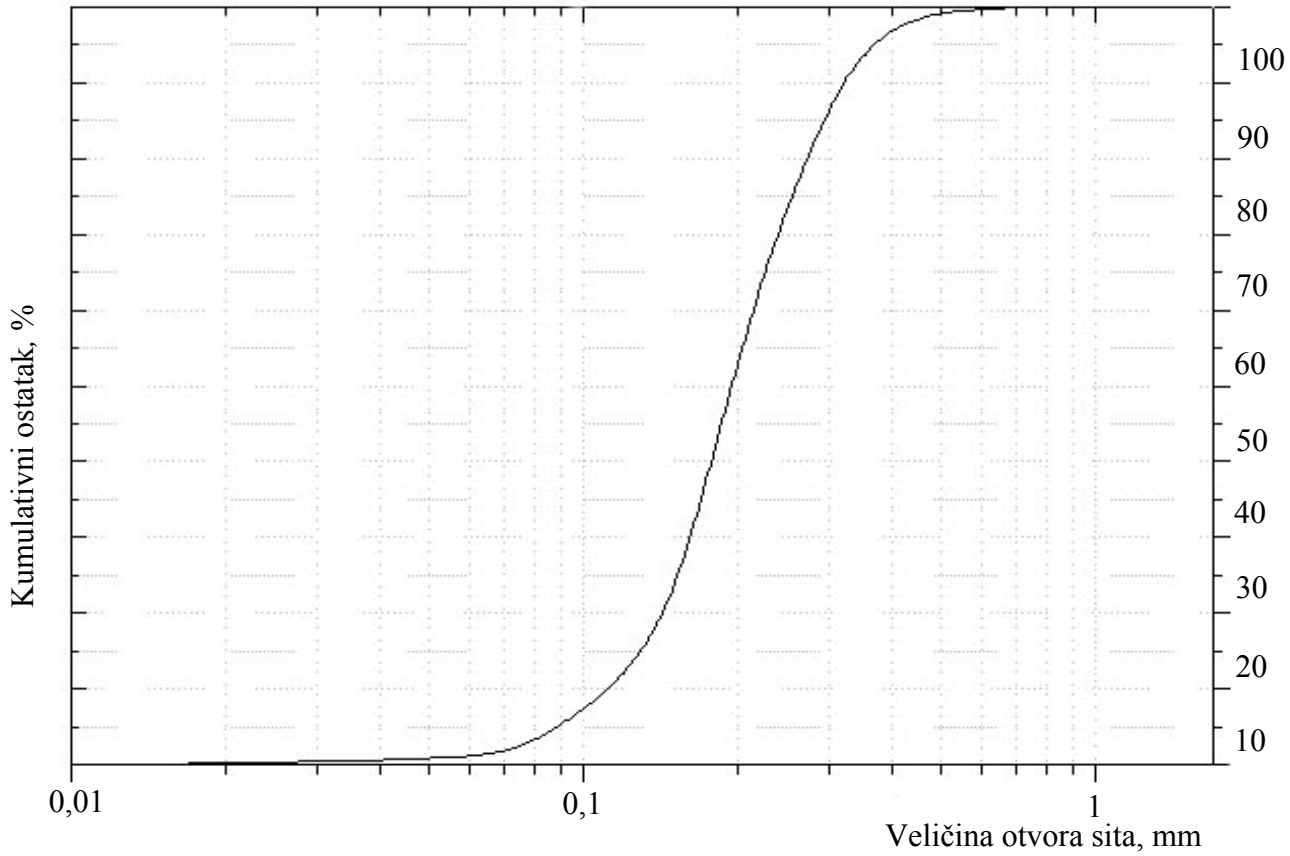
Prva karakteristika je srednja veličina zrna (SV). Srednju veličinu zrna dobiva se projekcijom sjecišta kumulativne linije propada s ordinatnom vrijednošću 50% na apscisu.

Druga karakteristika je stupanj ravnomjernosti (StR). Stupanj ravnomjernosti izračunava se kao razlika postotnog propada pri 4/3 (SV) i pri 2/3 (SV).

Treća karakteristika naziva se koeficijent rasporeda (KR). Koeficijent rasporeda dobiva se kao koeficijent veličine okana pri 75% i 25% propada. Što je koeficijent rasporeda manji to je krivulja kumulativnog propada strmija. Ta karakteristika često se kod zaobljenijih krivulja kumulativnog propada upotrebljava i za lakše određivanje stupnja ravnomjernosti.

Četvrta karakteristika je broj finoće (BF). Europski standardi su karakteristiku broja finoće (BF) preuzeli iz američkih standarda. Pokazatelj (BF) je najmanje važan od prethodno nabrojenih karakteristika. On u nekim slučajevima ima sličan smisao kao i srednja vrijednost (SV). Naime, srednja vrijednost (SV) raste s većim udjelom krupnijih zrna, dok broj finoće (BF) raste s većim udjelom sitnijeg zrna. Proračunavanje broja finoće (BF) je znatno složenije

te se ne može zorno prikazati u dijagramu kumulativnog propada. Primjer dijagrama kumulativnog propada uzorka pijeska prikazan je na slici 3.6.



Slika 3.6 Primjer dijagrama kumulativnog propada

Prethodno navedene karakteristike mješavine mogu se vidjeti iz tablice 3.2.

Tablica 3.2 Karakteristike pojedinih uzoraka pijeska

Naziv karakteristike	**Uzorak pijeska**
SV	0,63
StR	40
KR	2,39

4. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

4.1 Kronološki pregled dosadašnjih istraživanja odlupina

Pojava odlupljivanja definira se kao otkidanje 2 do 6 mm debele okorice na unutarnjoj površini kalupa za lijevanje. Otkidanje okorice nastaje uslijed pojave tlačnih naprezanja prilikom lijevanja zbog visoke temperature litine. Okorica se odvaja uzduž istovremeno nastale rekondenzacijske zone, u kojoj dolazi do smanjenja čvrstoće. Glavni uzrok temperaturnog istezanja kremenog zrna je transformacija kristala kvarca koja nastaje pri temperaturi od 570 ^{o}C, a uzrokovana je α - β transformacijom. Smanjenje čvrstoće u rekondenzacijskoj zoni uzrokovano je prirastom udjela vode u toj zoni iznad one sadržane u početnoj kalupnoj mješavini. Rekondenzacijska zona nalazi se odmah ispod unutarnje površine kalupa na dubini koju litina još nije ugrijala preko 100 ^{o}C. U toj se zoni rekondenzira para koja nastaje uslijed isparavanja vode u okorici koja je u kontaktu s litinom [6].

Sklonost odlupljivanje može se definirati kao funkcija kvocijenta tlačnih naprezanja (N_t) i rekondenzacijske čvrstoće (S_r).

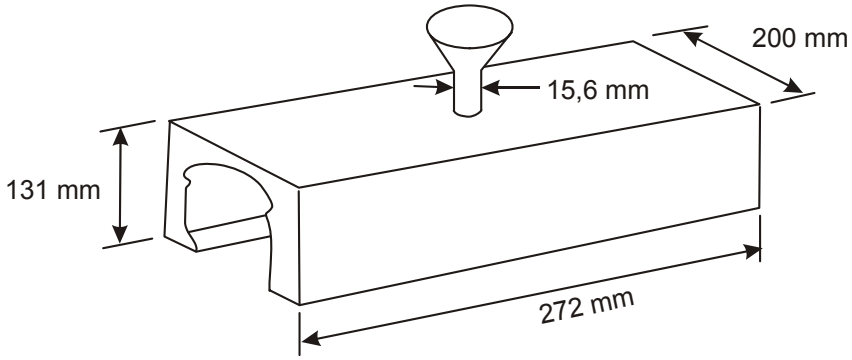
$$SO = f\left(\frac{N_t}{S_r}\right) \qquad [6]$$

Sklonost odlupljivanju može se smanjiti samo ako kvocijent N_t/S_r držimo što je moguće manji. Smanjenje kvocijenta postiže se odgovarajućim sastavom kalupne mješavine. Nije moguće na jednostavan način smanjiti vrijednost tlačnih naprezanja, a istovremeno povećati rekondenzacijsku čvrstoću.

A.D Morgan je proučio pojavu odlupina i smatra da je S.O.V. Nilsson [7] još 1933. godine započeo istraživati ovu pojavu. Istraživanja koja su provedena nisu direktno povezala pojavu odlupljivanja s temperaturnim istezanjem kremenog zrna u kalupu. Iste godine je F. Hudson [8] došao do zaključka da je pojava odlupljivanja ipak povezana sa dilatacijom kremenog zrna koja nastaje pri temperaturi od 570 °C.

α

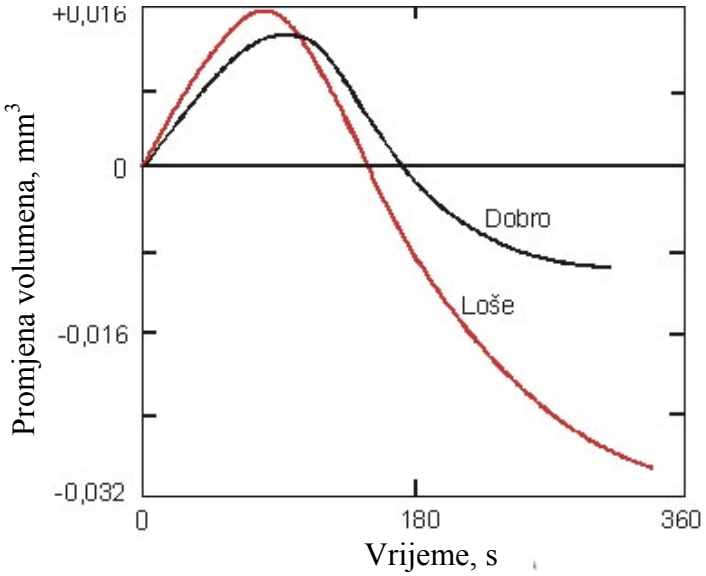
α



Slika 4.1 Test odljevak prema Hudsonu [8]

F. Hudson [8] prvi je od istraživača primijenio test s odljevkom (slika 4.1). Njegova konstrukcija ispitnog odljevka pokazuje neke nedostatke. Svojstva jezgre u donjaku nije lako kontrolirati te je sam oblik jezgre teško izraditi. Uljevni sustav postavljen je na mjestu gdje lako može doći do erozije donjaka u kojem su kasnije i primijećene pojave odlupljivanja. Hudson je također pokušao objasniti utjecaj ugljene prašine na smanjenje pojave tlačnih naprezanja razmišljajući kako ugljena prašina obavija zrna kremenog pijeska stvarajući plastičnu zonu koja kasnije, tj. prilikom ulijevanja smanjuje temperaturno istezanje klaupa.

H.Dietert [9] smatrao je da uslijed naglog ugrijavanja dolazi do toplinskog udara (slika 4.2) i naglog temperaturnog istezanja kremenih zrna koja uzrokuju grešku odlupljivanja.



Slika 4.2 Promjena volumena kalupnih mješavina kod toplinskog udara pri 1370 °C [9]

Na slici 4.2 prikazani su dijagrami dvije kalupne mješavine koje se razlikuju u udjelima dodane gline. Iz tog dijagrama H. Dietert naslutio je da se pojava odlupljivanja može

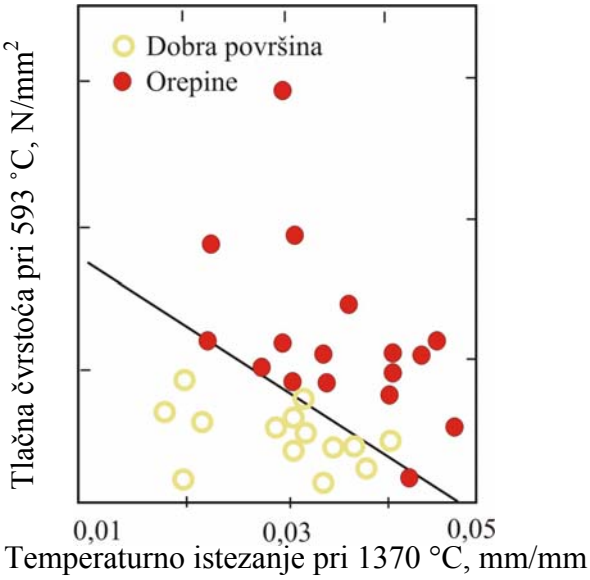
kontrolirati preko temperature urašćivanja. Kako veća količina gline smanjuje temperaturu srašćivanja i povećava kontrakciju, zaključio je da toplinska stabilnost kalupa ovisi i o početnoj čvrstoći stanju jer veća količina gline povećava čvrstoću kalupne mješavine. Dvije mješavine prikazane na slici 4.2 gdje je jedna označena "loše" , a druga "dobro". Mješavina označena "loše" ima veću čvrstoću pri temperaturi okoline od mješavine označene "dobro", veći sadržaj gline i nižu temperaturu srašćivanja, ali i mnogo veću kontrakciju. Zaključak istraživanja H. Dieterta bio je da veći postotak gline može smanjiti temperaturno istezanje, što je zanimljivo kod lijevanja manjih odljevaka gdje temperaturno istezanje ima veću ulogu zbog malog sadržaja topline u odljevku.

American Foundrymen's Society (1955) Committee [10] objavio je istraživanja na području promatranja pojave odlupljivanja. U istraživanju je korišten eksperimentalni odljevak prikazan na slici 4.3.



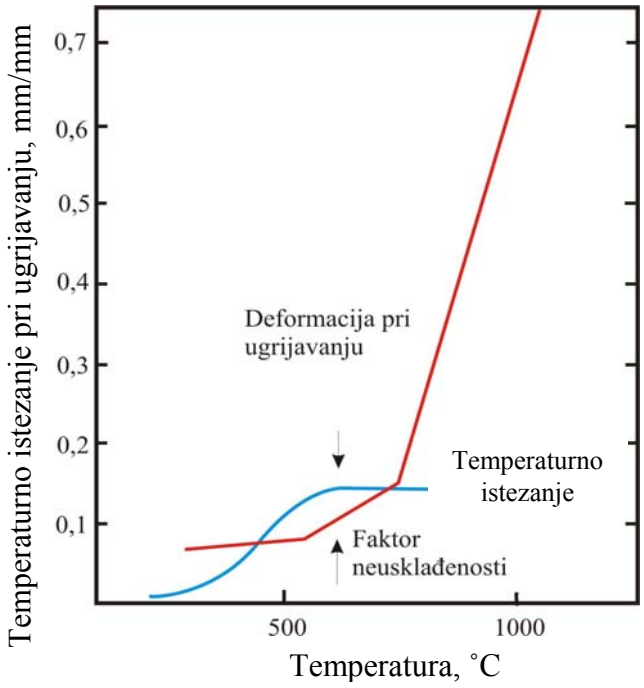
Slika 4.3 Eksperimentalni odljevak prema AFS [10]

Ispitivane su različite kalupne mješavine te se došlo do zaključka da samo dvije karakteristike laboratorijskih ispitivanja koreliraju sa tendencijom nastanka odlupina. To je tlačna čvrstoća u toplom stanju određena pri temperaturama od 30 ^{o}C, 593 ^{o}C i pri 1371 ^{o}C uz vrijeme zagrijavanja od 12 minuta i temperaturno istezanje mjereno naglim ugrijavanjem uzoraka u kvarcnoj cijevi na temperaturama od 816 ^{o}C ili 1370 ^{o}C. Na temelju ovih ispitivanja (slika 4.4) izveden je zaključak da je poželjna što niža vrijednost čvrstoće pri povišenoj temperaturi što se može postići upotrebom raznih dodataka kao što je piljevina, cereali, ugljena prašina ili dodatkom prirodnog pijeska.

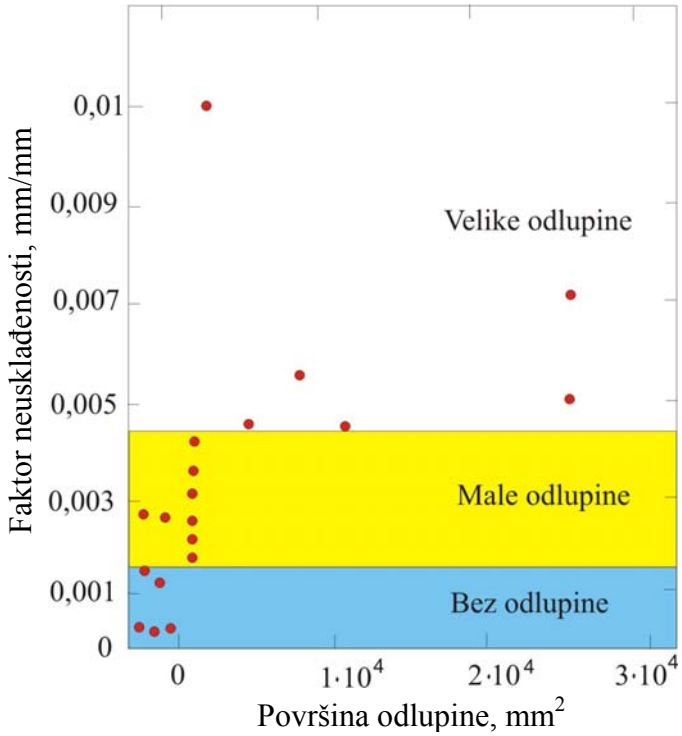


Slika 4.4 Korelacija između tlačne čvrstoće pri 593 ^{o}C i temperaturno istezanje pri 1370 ^{o}C s pojavom orepina [10]

Također su došli do zaključka da su potrebne česte kontrole vlažnosti i tvrdoće kalupa kako bi se čvrstoća pri povišenoj temperaturi održala što je moguće niža. AFS Committee nastavio je istraživanja na različitim kalupnim mješavinama i 1955. godine objavio poseban izvještaj u kojem je naročitu pažnju posvetio faktoru usklađenosti (unaccommodated expansion factor). Istraživanja su pokazala da se sklonost nastanka pojave odlupljivanja može ocijeniti iz krivulja temperaturnog istezanja i krivulje deformacije kod čvrstoće zagrijanog kalupa pri 593 ^{o}C. Primjeri takvih krivulja prikazane su na slici 4.5.

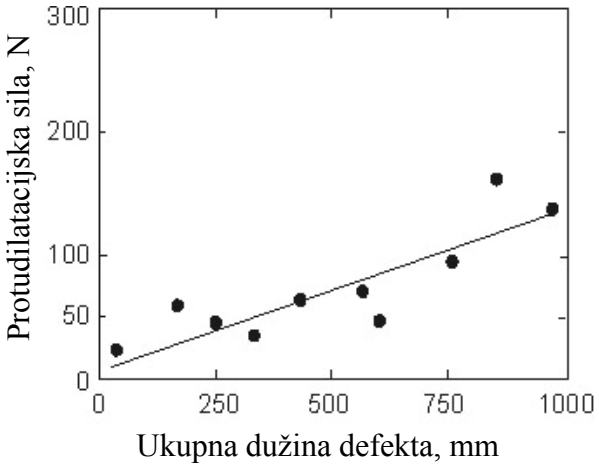


Slika 4.5 Krivulja temperaturnog istezanja i krivulje deformacije kod čvrstoće zagrijanog kalupa pri 593 ^{o}C (prema AFS) [10]

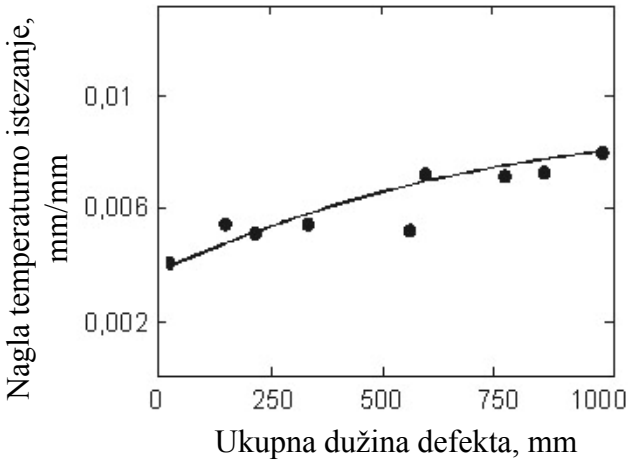


Slika 4.6 Odnos između faktora neusklađenosti dilataciji i sklonosti odlupinama (prema AFS) [10]

Konačno je zaključeno da je kod mješavina kod kojih krivulja deformacije zagrijanog kalupa (dobivena prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće prema AFS standardu) prelazi krivulju temperaturnog istezanja ne bi trebali očekivati sklonost pojavi odlupljivanja. Dodaci materijala na osnovi celuloze te materijala koji sadržavaju ugljenjaste supstance smanjuje temperaturno istezanje ispod nivoa deformacije kod čvrstoće zagrijanog kalupa. U daljem izvješću 1957. godine opisana su dva jednostavna testa koja bi trebala omogućiti mjerenje sklonosti nastanka odlupina. Prvim se testom mjeri sila koja je potrebna za ograničavanje temperaturnog istezanja uzorka dimenzija 28 x 50 mm pri zagrijavanju na 928 ^{o}C u trajanju od 5 minuta. Sila koja je potrebna da spriječi deformaciju proporcionalna je sa sklonosti odlupljivanju. Drugim ispitivanjem mjeri se temperaturno istezanje uzoraka dimenzije 28,5 mm x 50,8 mm pri temperaturi od 982°C. Najbolja korelacija postignuta je kod vremena zagrijavanja od 22,5 s. Krivulje temperaturnog istezanja prikazane su na slikama 4.7 i 4.8.

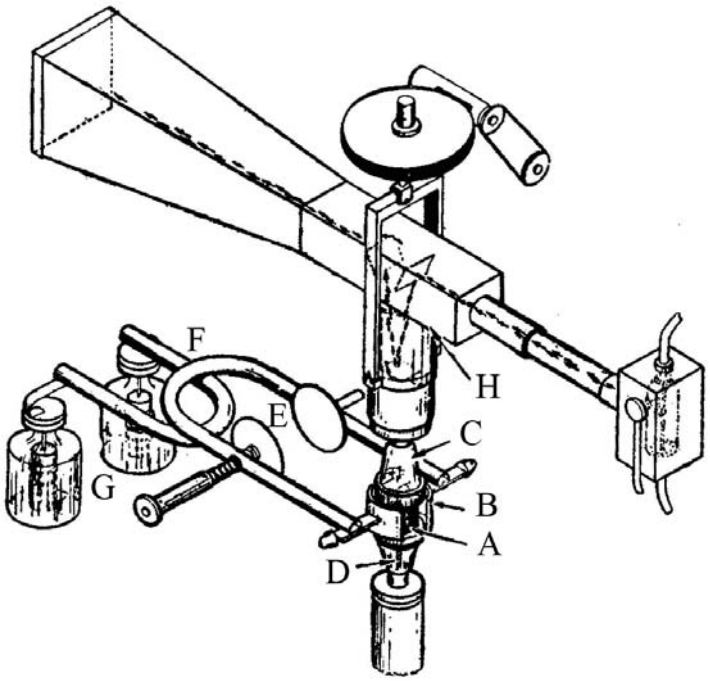


Slika 4.7 Odnos između protudilatacijskog opterećenja i sklonosti odlupinama [11]

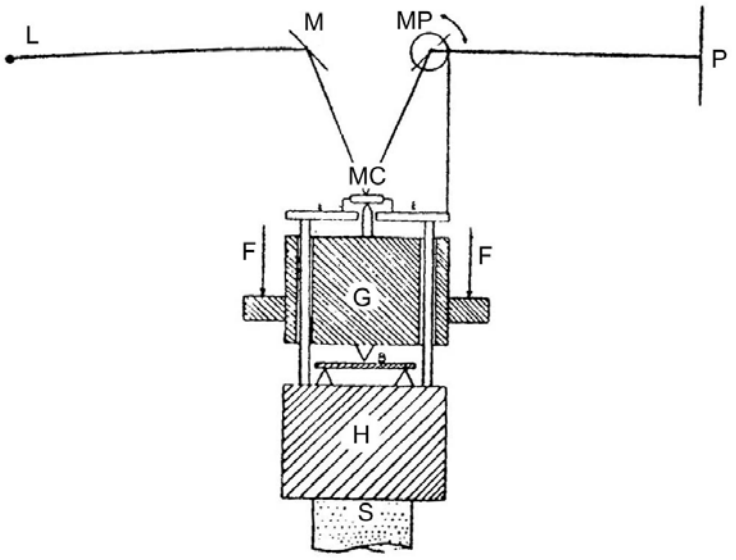


Slika 4.8 Odnos između temperaturnog istezanja pri toplinskom udaru i sklonosti odlupinama [11]

Osim AFS Committee i drugi istraživači su ispitivali svojstva pješčanih mješavina kod povišenih temperatura. Parkes i Godding [12] 1955. godine konstruirali su poseban uređaj koji dielektričnim putem zagrijava uzorak standardne dimenzije 50x50 mm na 1000 °C za vrijeme od dvije minute (slika 4.9 i 4.10).



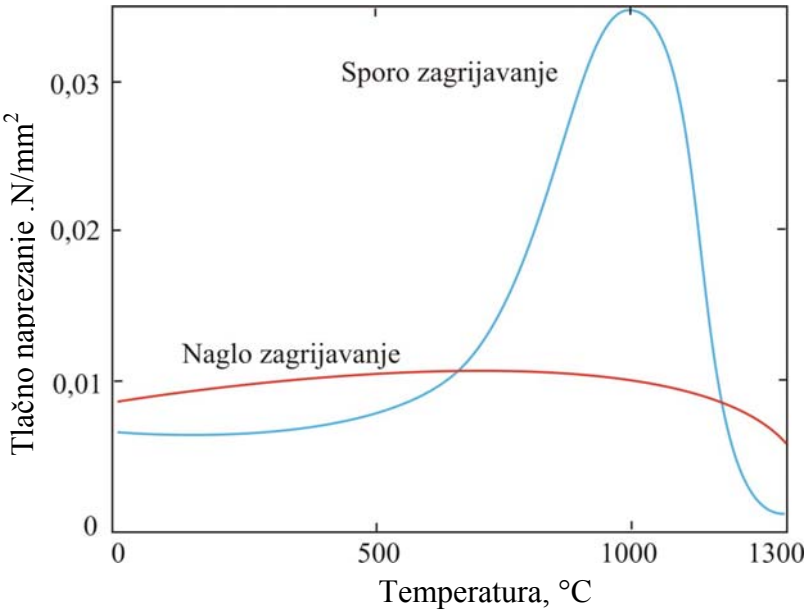
Slika 4.9 Uređaj za zagrijavanje uzorka: A-uzorak, B-ploče hlađene vodom, C-izolator, D-termoelement, E-promjenjivi kondenzator, F-vodič, G-izvor energije [12]



Slika 4.10 Uređaj za registraciju krivulje deformacija: FF-opterećenje, H-klip, B-kalibrirana poluga, S-uzorak, E-držač ogledala, MC-ogledalo, MR-rotaciono ogledalo, P-foto ploča, L-izvor svijetla, G-držač. [12]

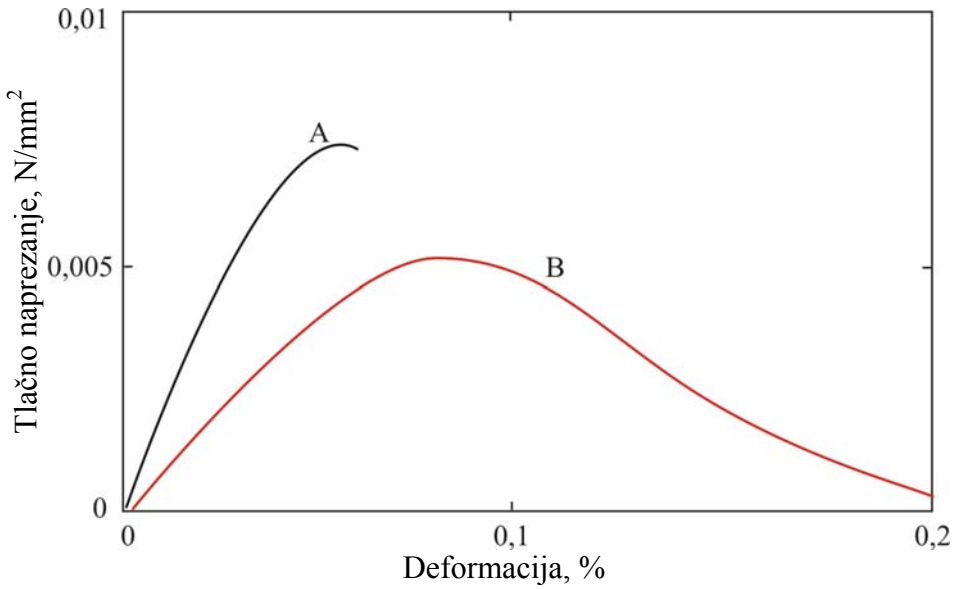
Uređaj je snimio krivulju opterećenja u ovisnosti o deformaciji iz kojih se vidi da pri naglom zagrijavanju uzorka ne postoji vrh kod snimanja krivulje čvrstoće pri temperaturi okoline kako su to istraživači ranije zaključili kod primjene sporijeg zagrijavanja uzorka. Iz dijagrama dobivenog ovim ispitivanjem (slika 4.11) može se zaključiti da se povećanje

čvrstoće kod sporo zagrijavanih uzoraka može zanemariti kod promatranja faktora koji utječu na ponašanje kalupa kod procesa punjenja litinom.



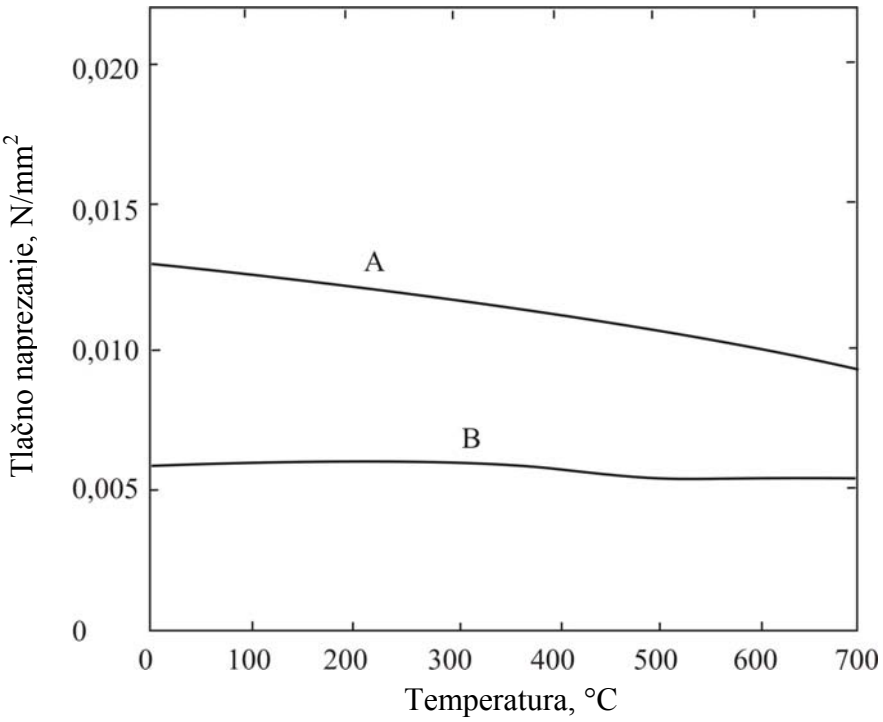
Slika 4.11 Maksimalna naprezanja sintetske kalupne mješavine u ovisnosti o temperaturi [12]

Na slici 4.12 autori su snimili krivulje tlačne čvrstoće - deformacija za dvije vrste kalupnih mješavina. Jedna mješavina sadržavala je 5% bentonita, dok je za drugu mješavinu upotrebljen isti pijesak samo uz dodatak 2% piljevine. Rezultati mjerenja prikazani su na slici 4.12 iz koje je vidljivo da kod kalupne mješavine bez dodatka piljevine tlačne čvrstoće zagrijanog kalupa pri ugrijavanju naglo rastu ali i naglo opadnu.



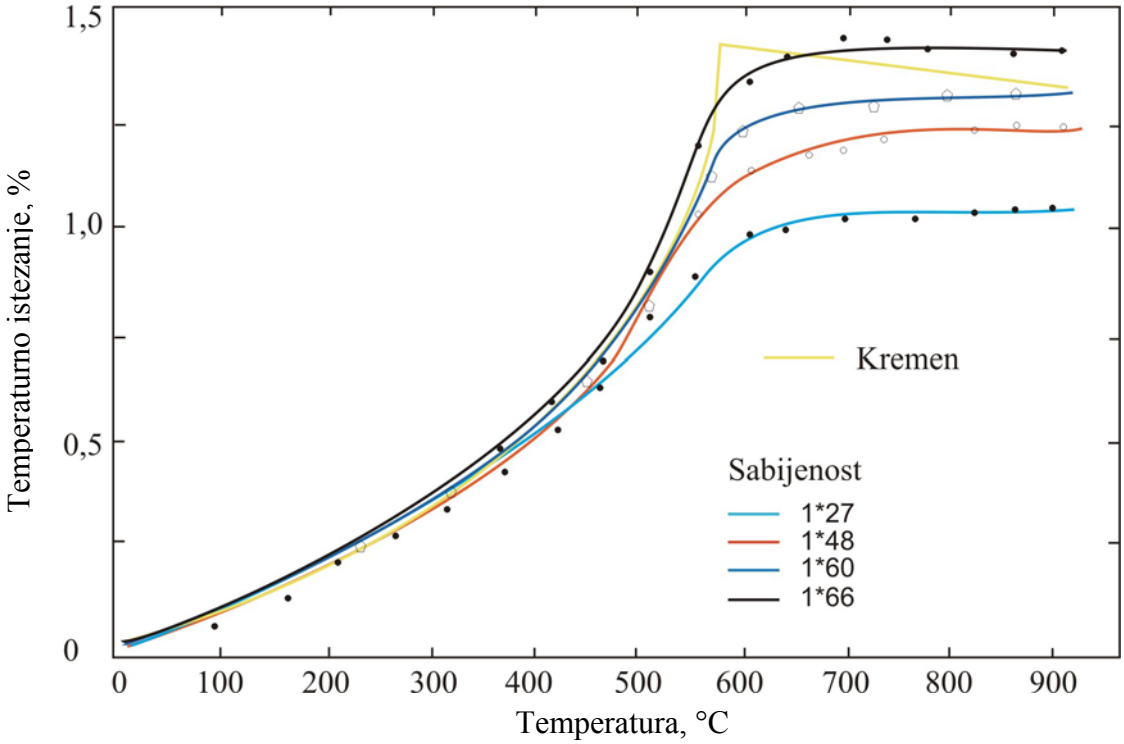
Slika 4.12 Krivulja deformacija za dvije kalupne mješavine: A-sintetska kalupna mješavina, B –sintetska kalupna mješavina sa 2% piljevine [12]

Druga kalupna mješavina koja u sebi sadrži 2% piljevine pokazuje sporiji rast te nakon postignutog maksimuma sporije opada. Prilikom ispitivanja posvećena je posebna pažnja drobljenju uzoraka koje je prisutno kod temperaturnog istezanja. Da bi se to utvrdilo uzorci su sabijeni na istu sabijenost i ispitivani na temperaturama 400 °C i 600 °C imajući na umu da se maksimalno temperaturno istezanje postiže pri temperaturi od 570 °C. Zato je mjerena veličina temperaturnog istezanja ucrtana na os deformacije. Kada veličina deformacije premaši veličinu temperaturnog istezanja dolazi do pojave raspadanja uzorka, a slična pojava se događa i u kalupu. Uzmimo na primjer ako temperaturno istezanje jedne od kalupnih mješavina na 580 °C iznosi 1,3 %, tada će se prva mješavina raspasti kada se zagrije na tu temperaturu, međutim to se neće dogoditi s drugom mješavinom koja u sebi sadrži 2% piljevine jer premda pri 1,3 % čvrstoća više nije maksimalna, mješavina još uvijek sadrži značajnu tlačnu čvrstoću. Parkes i Godding definirali su u ovom radu indeks rasipljivosti (brittlness index) kao kvocijent maksimalnog dekrementa naprezanja u sekundi kroz maksimalno naprezanje. Za ispitivanja provedena u ovom istraživanju dobiveni su indeksi maksimalne vrijednosti. Ispitivano je djelovanje i različitih dodataka na svojstva kalupnih mješavina. Tako je na slici 4.13 prikazan utjecaj piljevine i ugljene prašine na tlačnu čvrstoću u ovisnosti o temperaturi.



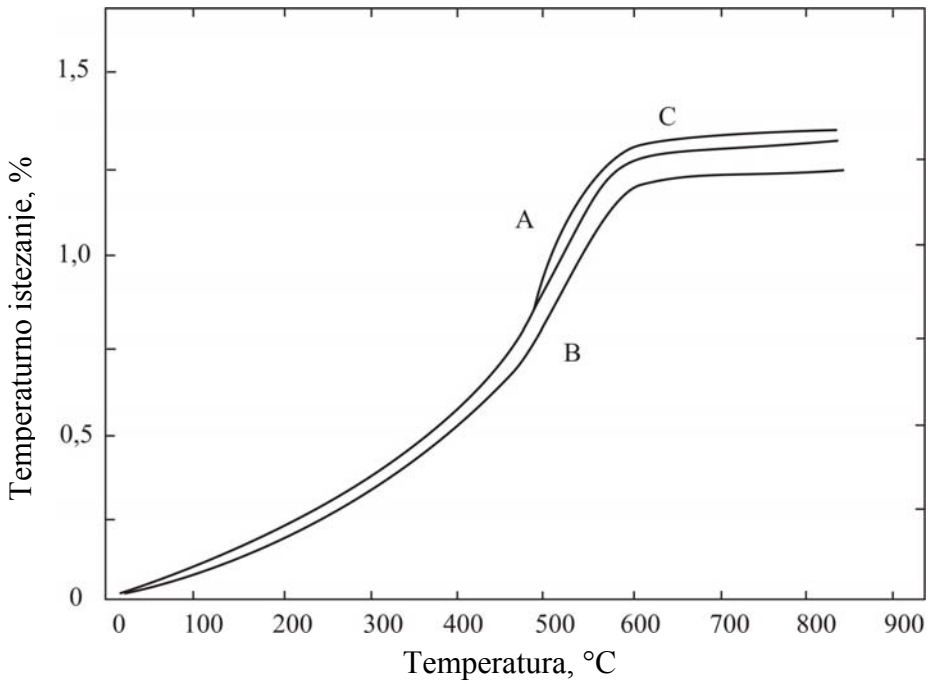
Slika 4.13 Promjene u maksimalnoj čvrstoći raznih kalupnih mješavina u ovisnosti o temperaturi: A - sintetska kalupna mješavina sa 5% ugljene prašine; B - sintetska kalupna mješavina s 2% piljevine [12]

Za sintetsku kalupnu mješavinu bez dodataka vrijedi dijagram sa slike 4.13. Usporedivši ove dvije krivulje možemo zaključiti da dodatak 2% piljevine smanjuje tlačnu čvrstoću u suhom stanju i pri sobnoj temperaturi, dok karakter krivulje pri zagrijavanju ostaje isti, ali s nešto nižim vrijednostima. Dodatak ugljene prašine u količini od 5% povisuje tlačnu čvrstoću pri sobnoj temperaturi, ali pri temperaturi od 350 °C ta čvrstoća počinje opadati. Ukupno je ispitano 16 uzoraka različite sabijenosti. Na slici 4.14 prikazani su rezultati od četiri ispitana uzorka.



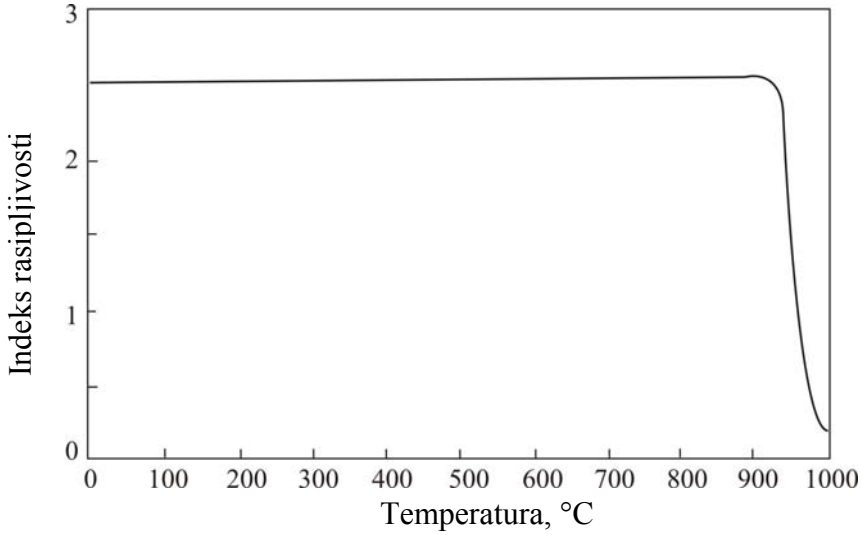
Slika 4.14 Temperaturno istezanje sintetske kalupne mješavine različite sabijenosti [13]

Krivulja za kremen nacrtana je prema Sosmanu [13] i odnosi se na čiste kremene kristale slučajne orijentacije. Iz ovog ispitivanja može se zaključiti da se veličina temperaturnog istezanja pješčane mješavine povećava sa sabijenošću. Osim toga, temperaturno istezanje mješavine koja sadrži oko 5% bentonita približno jednaka dilataciji čistog kremena. Utjecaj dodataka kretat će se u onom smislu u kojem oni otežavaju postizanje određene sabijenosti mješavine. Na primjer, ako se količina bentonita poveća sa 5% na 10%, mješavina će se teže sabijati, te će standardni uzorak, dobiven sa tri sabijanja, imati manju sabijenost. Na slici 4.15 prikazan je dijagram temperaturnog istezanja za sintetsku kalupnu mješavinu s dodatkom 5% ugljene prašine i sintetsku kalupnu mješavinu s dodatkom od 2% piljevine.



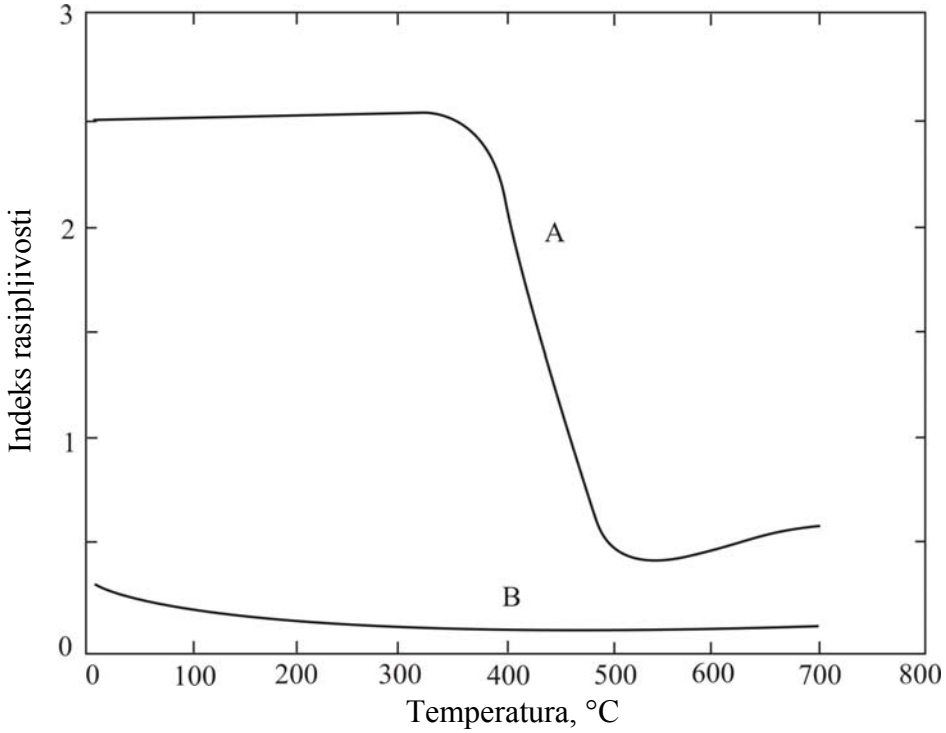
Slika 4.15 Utjecaj ugljene prašine i piljevine na temperaturno istezanje. A – sintetska kalupna mješavina, B – sintetska kalupna mješavina s 2 % piljevine, C - sintetska kalupna mješavina s 5% ugljene prašine [13]

Vidljivo je da dodatak ugljene prašine vrlo malo utječe na veličinu temperaturnog istezanja tako da se taj utjecaj može zanemariti s obzirom na varijacije koje nastaju pri normalnom kalupljenju u ljevaonici. Dodatak piljevine od 2% smanjuje temperaturno istezanje za oko 0,1%. Međutim piljevina znatno utječe na svojstvo kalupljivosti kalupne mješavine. Utjecaji piljevine kao dodatka smanjuju svojstvo kalupljivosti ako je u kalupnoj mješavini udio piljevine veći od 2%. Iz tog razloga je utjecaj ugljene prašine i piljevine na utjecaj smanjenja veličine temperaturnog istezanja kalupne mješavine u ljevaonici neznatan.



Slika 4.16 Utjecaj temperature na indeks rasipljivosti [13]

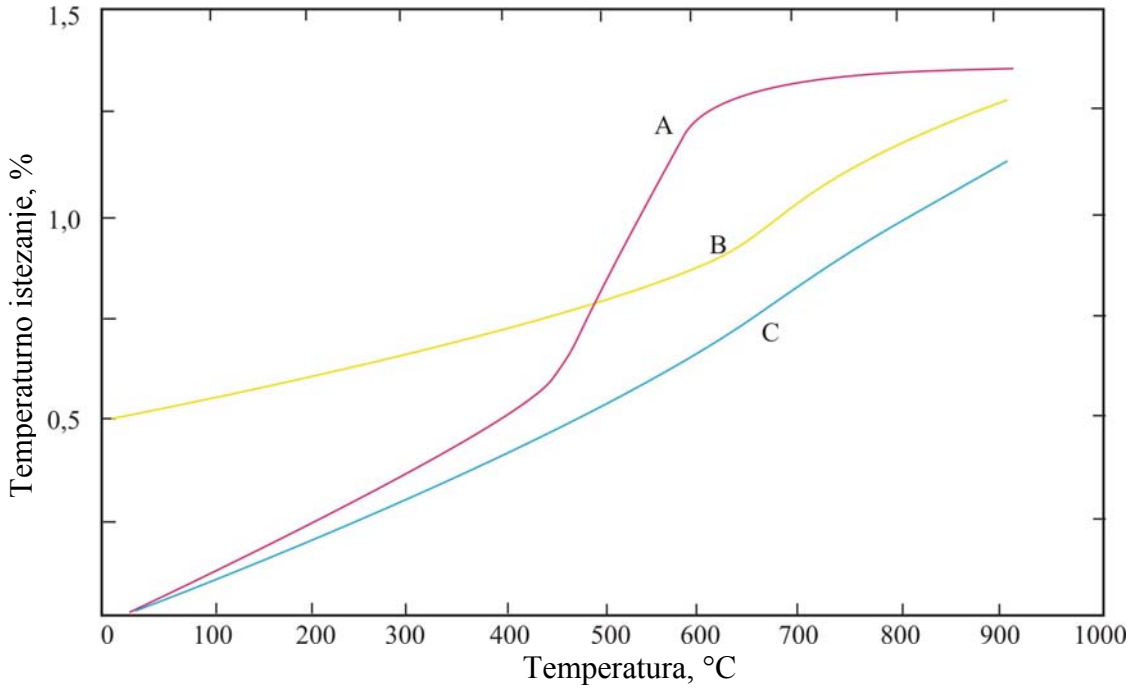
Kao što je vidljivo iz slike 4.16, indeks rasipljivosti ispitan je za sintetsku kalupnu mješavinu i konstantan je do temperature 900 °C, a zatim naglo opada. Za mješavine s dodacima rezultati su prikazani na slici 4.18 i to za sintetsku kalupnu mješavinu s 2% piljevine i sintetsku kalupnu mješavinu s 5% ugljene prašine.



Slika 4.17. Utjecaj ugljene prašine na indeks rasipljivosti: A – sintetska kalupna mješavina s 5% ugljene prašine, B – sintetska kalupna mješavina s 2 % piljevine [13]

Na temperaturama nižim od 350 °C ugljena prašina ima vrlo mali utjecaj na indeks rasipljivosti, dok na višim temperaturama od 350 °C do 500 °C taj indeks naglo opada, a zatim iznad 500 °C lagano raste. Na visokim temperaturama lako isparljiva ugljena prašina sadrži značajnu količinu tekuće faze koja iščezava pri isparavanju hlapljivih tvari. Indeks rasipljivosti djelomično je ovisan i o količini i viskoznosti tekuće faze, tako da se isparavanje tekuće faze može očekivati kod iste temperature, pa će maksimalna količina tekuće faze i "rasipljivost" mješavine ovisiti o brzini zagrijavanja i temperaturi na koju zagrijavamo uzorak. Sa 2% piljevine indeks rasipljivosti se smanjuje na vrlo nisku vrijednost te ne pokazuje značajne promjene sa promjenom temperature.

Parkes i Godding smatraju da se greške ne trebaju očekivati kada temperaturno istezanje kremenih zrna ne uzrokuje deformaciju kalupne mješavine. Prema tome oni predlažu dva smjera: povećanje deformabilnosti i smanjenje temperaturnog istezanja. Smanjiti temperaturno istezanje u kalupnim mješavinama na osnovi kremenog pijeska je vrlo teško. Jedino rješenje za smanjenje temperaturnog istezanja je korištenje druge vrste pijeska ili mješavine kremenog pijeska s materijalima koji imaju znatno slabije izraženo svojstvo temperaturnog istezanja. Takva kombinacija prikazana je na slici 4.18.

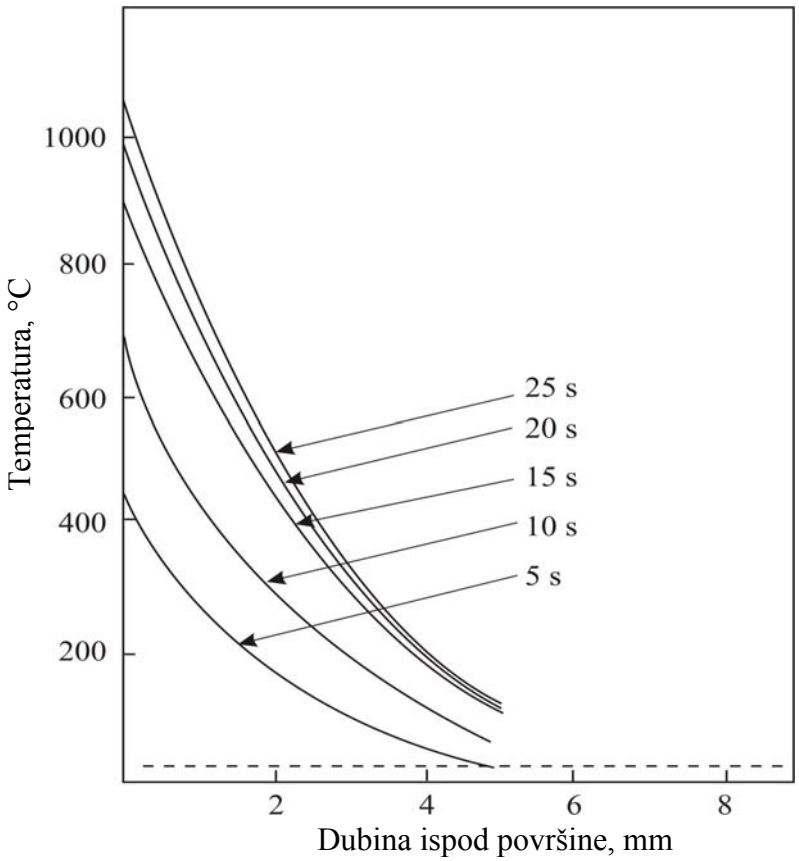


Slika 4.18 Odnos između temperaturnog istezanja i deformacije u ovisnosti o temperaturi za razne mješavine pijeskova: A – kremeni pijesak , B – olivin i kremeni pijesak C – olivinski pijesak [13]

Materijali koji bi došli u obzir su olivinski (magnezijsko željezni-ortosilikat) ili cirkonski pijesak. Olivin ne postoji u obliku pijeska stoga je potrebno prethodno drobljenje olivinskih stijena što znatno poskupljuje postupak. Drobljenjem se dobiva uglata struktura zrna te je prilikom procesa miješanja potrebno dodati više veziva. Cirkonski pijesak ima zadovoljavajuću geometriju zrna, ali mu je cijena dvostruko veća nego kremenom pijesku. Razni dodaci nemaju značajnog utjecaja na veličinu temperaturnog istezanja, a s obzirom na nisku gustoću već kod malog postotka znatno povećavaju volumen. Međutim, dodacima se može povećati deformabilnost kremenih kalupnih mješavina u temperaturnom području između 400 °C i 600 °C kada temperaturno istezanje premašuje deformabilnost. Najčešće se kao dodaci koriste katranske smole te ugljena prašina. Dodatkom ugljene prašine znatno se olakšava proces čišćenja odljevaka. Ostali dodaci mogu biti piljevina, različite ljuske sjemenja, nasjeckana slama, pljeva ili lan. Uglavnom su svi dodaci organskog podrijetla osim azbesta koji je također pokazao dobra svojstva. Međutim, upotreba dodataka zahtijeva pažljivu kontrolu upotrebljenog kalupnog materijala jer se prilikom raspadanja dodataka nakon procesa ulijevanja onečišćuje kalupni materijal. Takove kontrole već upotrebljenog kalupnog materijala su vrlo teške, dugotrajne i skupe. Ovaj rad Parkesa i Goddinga prikazan je dosta detaljno budući da su istraživači koristili vrlo skupu opremu te su za zagrijavanje uzoraka koristili samu litinu. Međutim unatoč skupim postupcima koje su koristili u ispitivanjima konstrukcija aparature nije dobro konstruirana. Uzorak je podvrgnut naglom zagrijavanju koje je jednoliko ali takvo zagrijavanje kalupa nije slika pravog proizvodnog postupka.

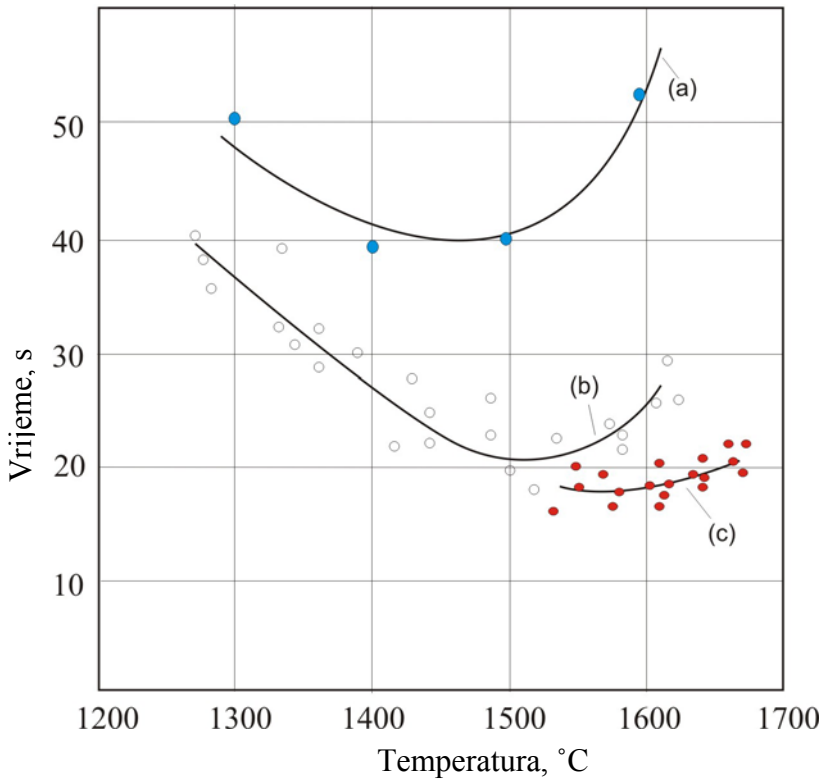
P. Nicolas [14] proveo je fundamentalno ispitivanje gdje je pokazao da se kod kalupa odlupljivanje može očekivati i pri ulijevanju na granici između osušenog i hladnog pijeska.J.H. Gittus [15] zamijetio je kretanje vlage sa zagrijanog sloja pijeska kao i da ta vlaga formira vlažni sloj oko lica kalupa. Godine 1955.

H. Pettersson [16] je prvi iznio svoja zapažanja na Internacionalnom kongresu ljevača. Pettersson je upotrijebio test sa odljevkom na kojemu se mogla pratiti pojava odlupljivanja sloja kalupa koji nije dolazio u dodir s litinom (slika 4.19).



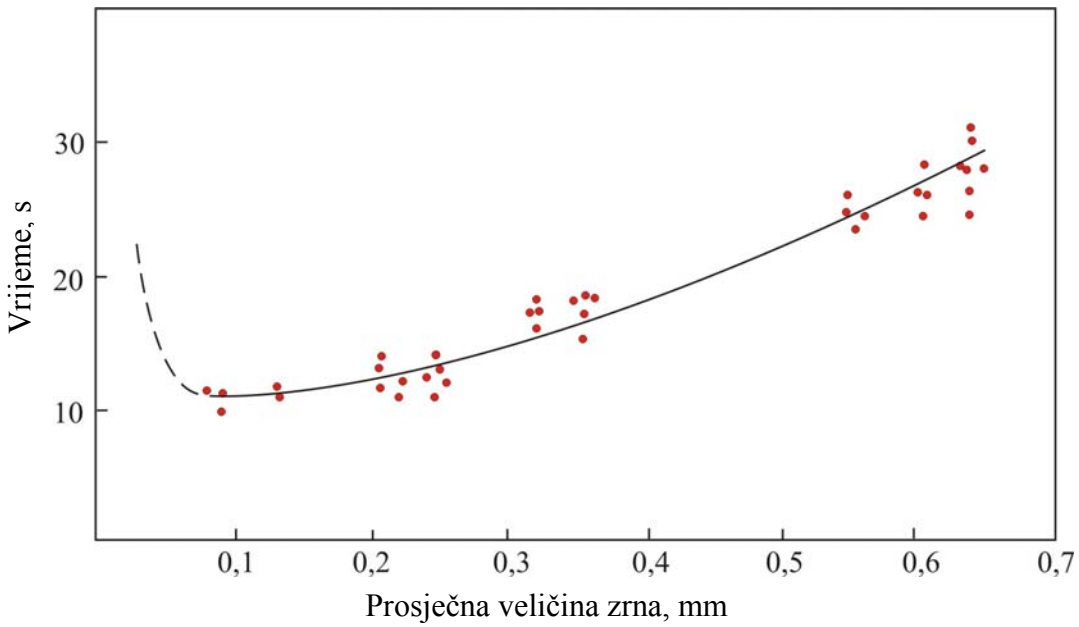
Slika 4.19. Približni raspored temperature kalupa pri različitim vremenima nakon početka ulijevanja [16]

Iz tog razloga dolazi do akumulacije vlage na izotermi koja odgovara temperaturi vrenja vode. Također je uočio i utjecaj koeficijenta zračenja topline: tako npr. kalup pokazuje veću otpornost k odlupljivanju pri lijevanju sivog lijeva nego kod lijevanja čelika premda je temperatura litine bila ista (slika 4.20) [16].



Slika 4.20. Odnos između vremena zagrijavanja do pojave odlupljivanja i temperature za razne materijale: (b) sivi lijev; (c) čelični lijev; (a) isti odnos za pijesak s niskom temperaturom srašćivanja [16]

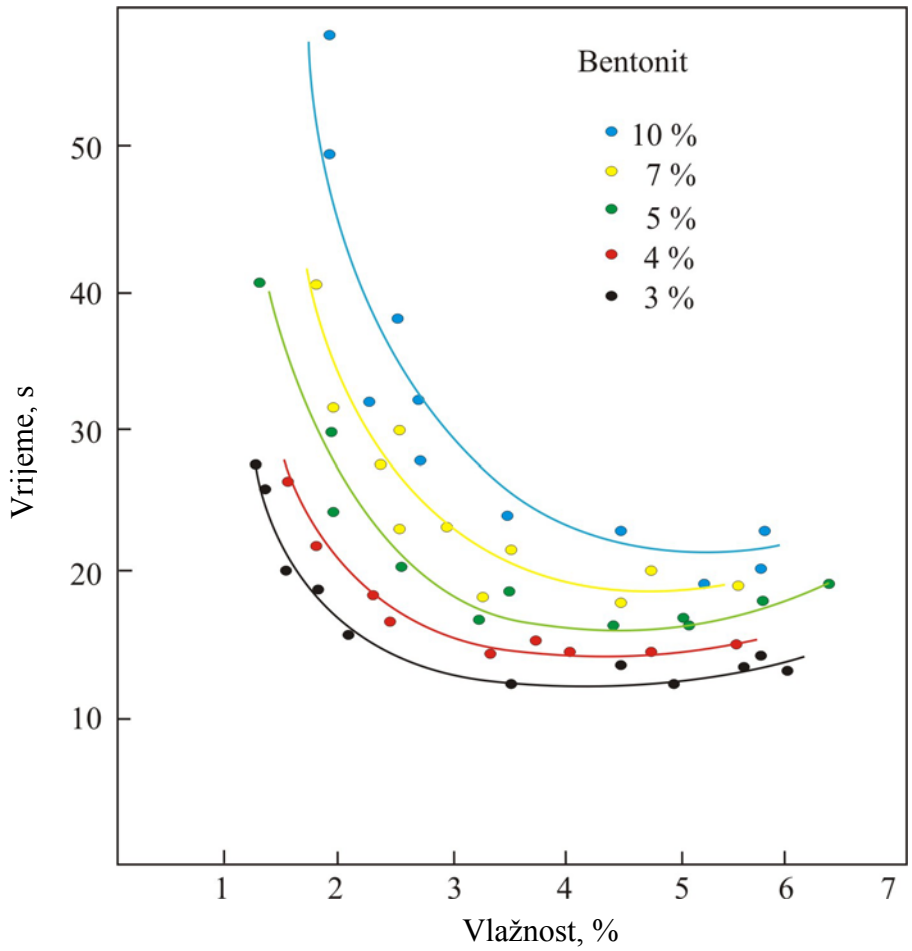
On je prvi puta promatrao i utjecaj veličine zrna na pojavu odlupljivanja te je zaključio da nejednolika granulacija ima veću otpornost odlupljivanju. Uočio je i da veća zna imaju veliku otpornost prema pojavi odlupljivanja, ali opet manju od mješavine nejednolike granulacije (slika 4.21) [16].



Slika 4.21 Vrijeme do pojave odlupljivanja za različite veličine zrna [16]

Razlog da zrna nejednolike granulacije pokazuju manju sklonost odlupljivanju je u tome što do temperaturno istezanje zrna ne dolazi simultano. Takva neujednačenost u veličini zrna povećava svojstvo kalupljivosti i čvrstoću rekondenzacijske zone. Za očekivati je da je također povećana otpornost klizanju između slojeva u toj zoni. Autor međutim nije našao optimalni granulometrijski sastav pijeska.

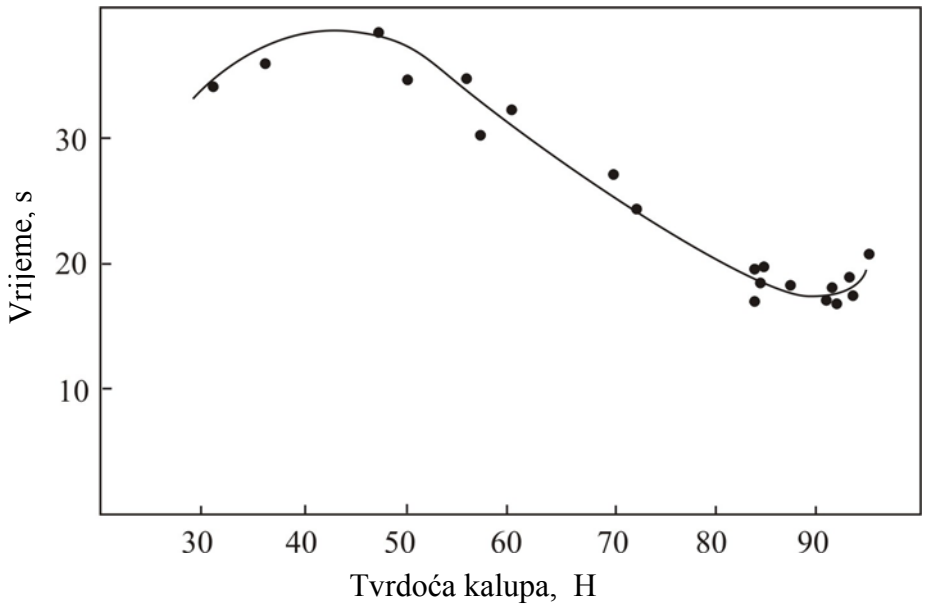
Povećanjem udjela veziva u kalupnoj mješavini raste i otpornost odlupljivanju kao što je vidljivo sa slike 4.22.



Slika 4.22 Odnos između vremena do pojave odlupljivanja i vlažnosti kalupa [16]

Mali udjeli vlage imaju veću otpornost odlupljivanju nego mješavine s većim udjelom vlage. Međutim, u tim slučajevima vlaga ne učestvuje kao vezivo. Kod normalnih vrijednosti udjela vlage dolazi do opadanja otpornosti odlupljivanju. Ova pojava mogla bi se objasniti time da iako se povećava se čvrstoća kalupne mješavine u usporedbi sa vrlo malim sadržajem vlage s jedne strane, a sa druge smanjuje se pokretljivost zrna pijeska. Ekstremno veliki udjeli vlage ne smanjuju otpornost odlupljivanju što se objašnjava većom gustoćom kalupa, a time i povećanje smične čvrstoće na granicama slojeva vlažnog i suhog pijeska (slika 4.22). Tvrdnje ostalih autora da se ugljena prašina dodaje da se poveća plastičnost materijala, autor smatra da ugljena prašina, katranska smola, dekstrin i šećer mogu djelovati jednako. Zajednička osobina tih dodataka je da stvaraju različite produkte destilacije na visokim temperaturama koji mogu djelovati kao neka vrsta viskoznog veziva. Slabi rezultati koji su se pokazali sa primjenom ugljene prašine, zbog male hlapljivosti, mogli bi potvrditi ovu tvrdnju.[16]

Što se tiče upotrebe suhih kalupa ili kalupa koji odstoje, ranije je spomenuto da vlaga nema velikih utjecaja na svojstvo olupljivanja osim ako se ne radi o udjelu manjem od 0,4%. Tako niska razina vlage u kalupu moguća je jedino uz sušenje kalupa u peći, a ne stajanjem u ljevaonici. Nadalje je ispitan utjecaj sabijenosti kalupa (tvrdoće).

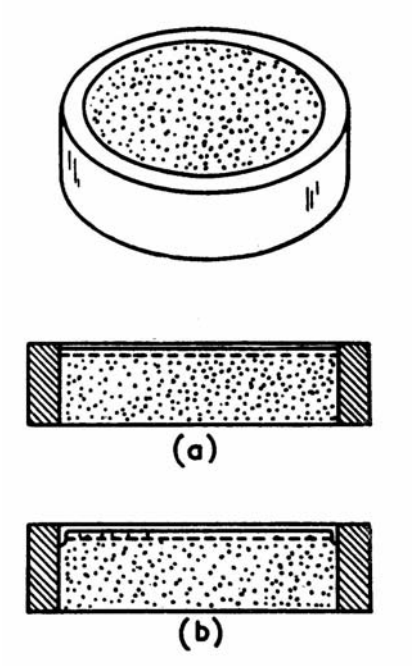


Slika 4.23. Utjecaj tvrdoće kalupa na pojavu odlupljivanja [16]

Iz slike 4.23 može se zaključiti da otpornost odlupljivanju pada s povećanjem sabijenosti kalupa. Ovo se objašnjava time da je kod gušće pakiranog, odnosno tvrđeg kalupa veći kontakt između pojedinih zrna te se deformacije zrna lakše manifestiraju kao globalna deformacija kalupa koja uzrokuje odlupljivanje.

Petterssonov test je bilo dosta teško provesti jer je bio vrlo skup. Stoga je 1958. godine H.G.Levelink [17] uz znatno jednostavniju postavu pokusa ispitao ponašanje pješčanih kalupnih mješavina pri naglom zagrijavanju. Ispitni uzorak prikazan je na slici 4.24 u dvije varijante, sa zapetim površinskim slojem te s nezapetim. Promatrajući oba radijalna uzorka smještena u čelični prsten te nakon toga zagrijana u peći na 1300 °C došao je do sljedećih zaključaka:

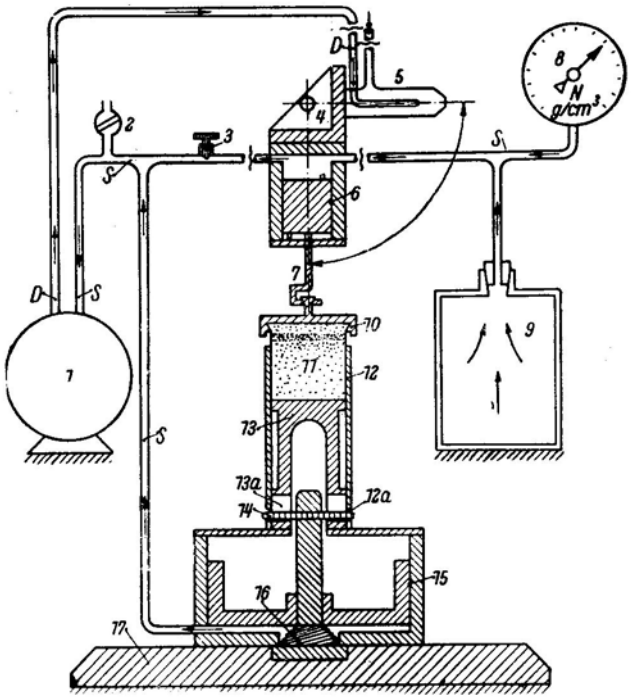
Uzorak koji nije bio radijalno zapet (slika 4.24) pokazao je različitu otpornost odlupljivanju prema različitim vrstama mješavine.



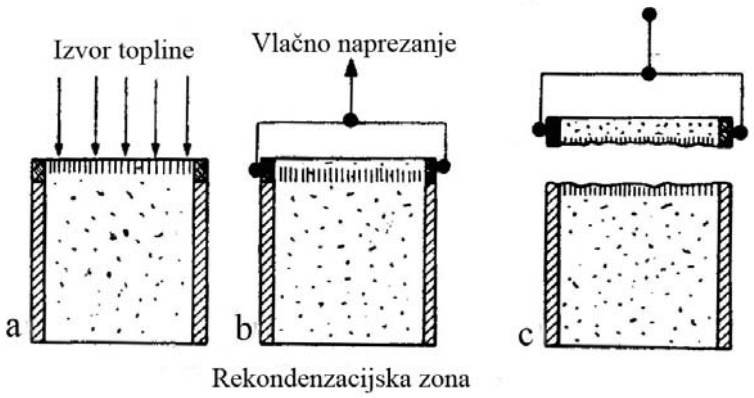
Slika 4.24 Test za ispitivanje sklonosti odlupljivanju prema Levelinku, (a) – spriječen u radijalnoj dilataciji, (b) slobodan u radijalnoj dilataciji [17]

Kod slabih mješavina odlupin se odvojila od podloge po rekondenzacijskom sloju. Nastalo temperaturno istezanje u posušenom sloju izazvala je smične sile na granici između osušenog i mokrog tj. neekspandiranog sloja. Kod čvršćih mješavina ova pojava nije dolazila do izražaja vjerojatno zbog veće čvrstoće u rekondenzacijskom sloju. Kod radijalno zapetih uzoraka (slika 4.24-a) pri naglom zagrijavanju odlupljivanje se pojavilo u dva oblika: kao izbočina čitavog površinskog sloja ili kao poprečna pukotina gdje je jedna strana napuknutog sloja prekrivala drugu. Dobre se mješavine i u ovom slučaju ne odlupljuju usprkos jednakih dilatacijskih sila kao i kod loših mješavina. To dokazuje da dilatacijske sile ne moraju stvoriti odlupinu ukoliko je čvrstoća u dilatacijskom sloju dovoljno velika. Poprečno pucanje i eventualno prekrivanje u dilatacijskom sloju nastaje kod izrazito loših mješavina uslijed različitih nehomogenosti u kalupnoj mješavini, stupnja sabijenosti ili zagrijavanja.

W.Patterson i D. Boenisch [18] pokušali su opisati problem mjerenja čvrstoće rekondenzacijskog sloja. U tu svrhu konstruirali su aparat koji je shematski prikazana na slici 4.25 i 4.26.



Slika 4.25 Shema aparata za određivanje čvrstoće rekondenzacijskog sloja, 1-vakuum pumpa s usisnim i potisnim vodovima, 2-glavni ventil, 3-ventil za regulaciju različitih brzina opterećenja, 4-pomični cilindar i nosač plamenika, 5-plamenik, 6-silindar i klip zauređaja za kidanje, 7-kuka za razvlačenje, 8-vakuummetar, 9-posuda za izjednačavanje tlaka, 10-poklopac uzorka s kopčom, 11-uzorak, 11a-rekondenzacijska zona, 12- cilindar uzorka s dva ureza, 13-izbijač s dva ureza, 14-svornjak za izvlačenje, 15-cilindar,klip i prenosni svornjak uređaja za opterećenje, 16-povratna opruga, 17-postolje [18]



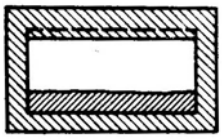
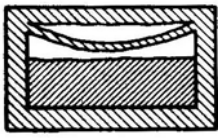
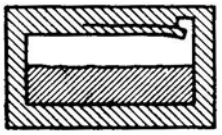
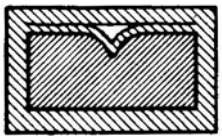
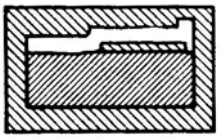
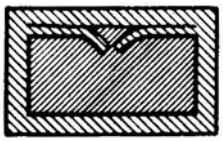
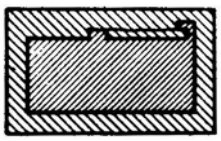
Slika 4.26 Shema ispitivanja čvrstoće rekondenzacijskog sloja [18]

Oni su zagrijavali standardni uzorak s jedne strane izazvavši pritom stvaranje rekondenzacijskog sloja svega nekoliko milimetara ispod površine. Nakon nekoliko vremena uzorak je opterećen silom koje je izazvala lom po nastalom rekondenzacijskom sloju. Sila koja je izazvala lom izražena je po jedinici površine ispitnog uzorka te je nazvana čvrstoćom

rekondenzacijskog sloja. Važan zaključak njihovog ispitivanja bio je da 100% aktiviran Na-bentonit daje maksimalnu čvrstoću rekondenzacijskog sloja.

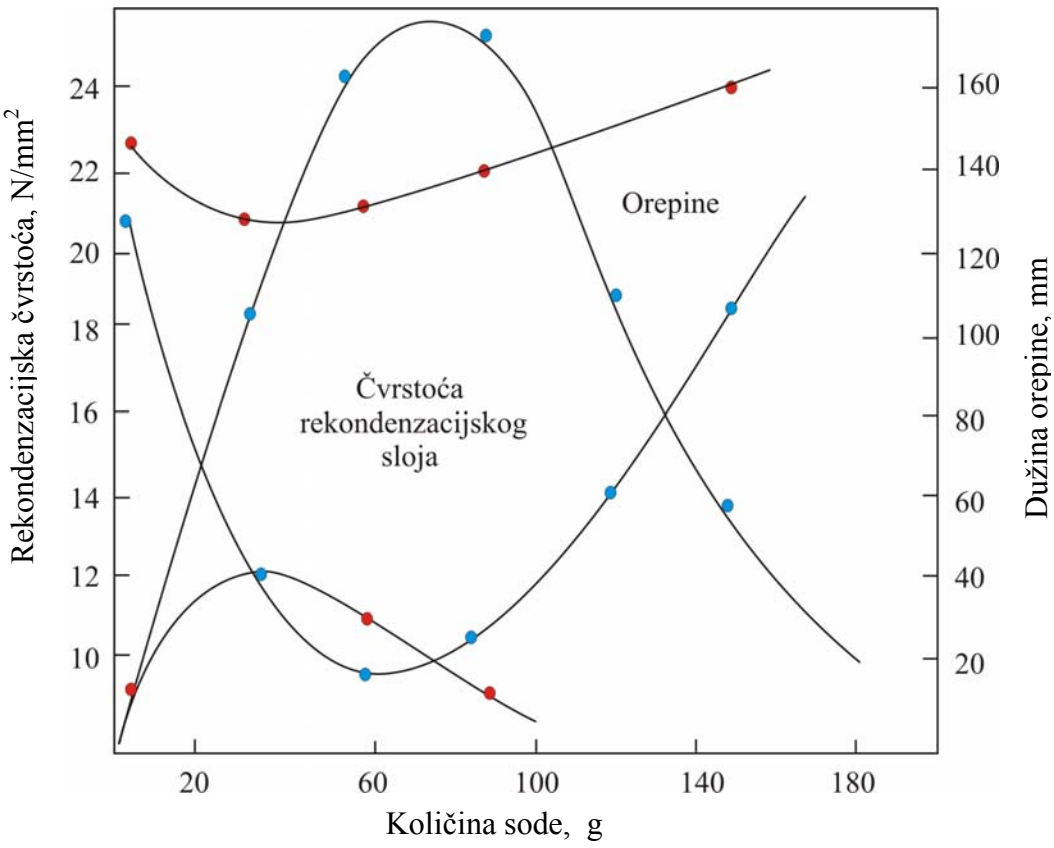
Kasnije je F. Hofmann [19] ispitao ovisnost vrste gline i stupnja aktivacije te sadržaja vlage. Ispitivanje je pokazalo da se do sličnih rezultata u pogledu optimalnog veziva i sadržaja vlage može doći i sa ispitivanjima na sobnoj temperaturi. Hofmann je zaključio da u rekodenzacijskoj zoni dolazi do smanjenja čvrstoće uslijed povećanja vlage stoga prednost imaju oni bentoniti koji pokazuju najmanje smanjenje čvrstoće pri povećanju udjela vlage. Na taj se način može ocijeniti optimalna aktivacija bentonita.

Godine 1960. Petterson, Boenisch i Khanna [20] na njemačkim i indijskim bentonitima. Patterson i Boenisch [21] su 1961. godine dokazali postojanje čvrste korelacije između čvrstoće rekondenzacijskog sloja i pojave orepina. Za svoja ispitivanja postavili su takozvani "Aachen-test" (slika 4.27).

Opis	Odlupina (uklještena)	Odlupina (slobodna)
1. Nastajanje rekondenzacijske zone uslijed zračenja topline.		
2. Odvajanje površinskog sloja s lica kalupa po rekondenzacijskoj zoni uslijed temperaturnog istezanja pijeska.		
3. Otisak greške na površini odljevka za vrijeme skrućivanja.		
		
4. Slika greške na odljevku.		

Slika 4.27 Shematski prikaz nastanka odlupine s fotografijama [21]

Ispitivanje se odvijalo na posebno konstruiranom odljevku te je za izvođenje pokusa bilo potrebno 45 sekundi. Faze izvođenja pokusa prikazane su na slici 4.28. Nakon nekoliko provedenih ispitivanja istraživači su modificirali test odljevak na način da su umjesto pojila napravili otvor za promatranje. Kroz taj otvor moglo se vidjeti gdje i nakon koliko vremena dolazi do pojave odlupljivanja. Tijekom pokusa ispitivane su različite kalupne mješavine tako da se aktivacija bentonita povisivala s dodatkom natrijeva karbonata. Grafički prikaz rezultata prikazan je na slici 4.28.



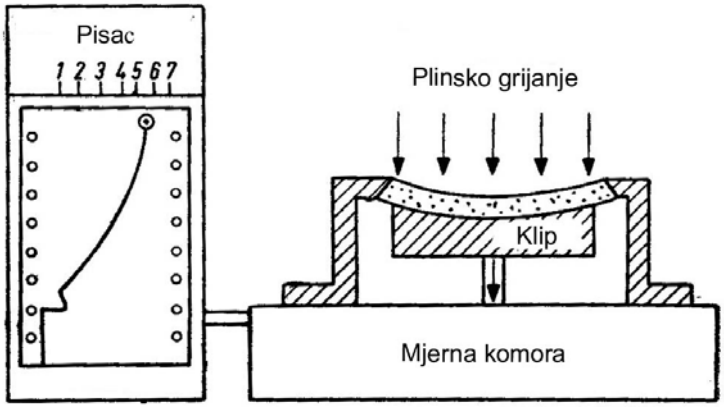
Slika 4.28 Odnos između rekondenzacijske čvrsoće, količine sode za aktivaciju i učestalosti pojave orepina za njemački (Gb) i indijski (Ib) bentonit [21].

Njemački bentonit označen s Gb pokazao je bolju aktivaciju, a s time i veću čvrstoću rekondenzacijskog sloja. Uz nabrojene prednosti pokazao je mnogo bolju otpornost pojavi orepina nego indijski bentonit.

Upotrebom modificiranog Aachenskog testa moguće je utvrditi tri tipa defekta: slobodno odlupljivanje, uklješteno odlupljivanje te orepine. Utvrđeno je da su ovi defekti nastali kao posljedica naprezanja koja se javljaju na površini, tj. licu kalupa. Tlačne naprezanja i čvrstoća rekondenzacijskog sloja važni su faktori u stvaranju odlupina.

Autori su u ovom dijelu istraživanja utvrdili da tlačne naprezanja i čvrstoća rekondenzacijskog sloja utječu na pojavu odlupljivanja. Te veličine ovisne su i o mnogo drugih faktora ali sklonost odlupljivanju nisu mogli numerički izraziti. Potrebno je bilo nekako izmjeriti vrijednosti tlačnih naprezanja za koje je bilo očito da nastaju prilikom temperaturnog istezanja kremenih zrna.

U daljnjim istraživanjima Patterson, Boenisch i Gabler [22] 1963. godine konstruirali su u Aachenskom ljevačkom institutu uređaj za mjerenje tlačne naprezanja uslijed zagrijavanja pijeska. Shema uređaja prikazana je na slici 4.29.



Slika 4.29 Shema uređaja za ispitivanje tlačnih naprezanja [22]

Iz sheme je vidljivo da se tanki okrugli uzorak smješta u čelični nosač na pomičnom klipu i zagrijava samo sa jedne strane. Uslijed nastalog temperaturnog istezanja javlja se deformacija koja se zbog geometrije uzorka prenosi na potporni klip koji prenosi silu na mjerač povezan sa pisačem. Postava ovog uređaja ima veliku sličnost sa Levelinkovim testom, samo što se u ovom slučaju mjeri sila nastala na konveksnoj gornjoj površini klipa. Provedeno je ispitivanje niza kalupnih mješavina na kojima su izvršena mjerenja tlačnih naprezanja, rekondenzacijske čvrstoće te je proveden Aachenski test.

Na osnovu ovih ispitivanja autori su došli do zaključka da je veličina odlupine proporcionalna tlačnim naprezanjima i udaljenosti rekondenzacijske zone od lica kalupa. i obrnuto proporcionalna rekodenzacijskoj čvrstoći prema empirijskoj relaciji [22]:

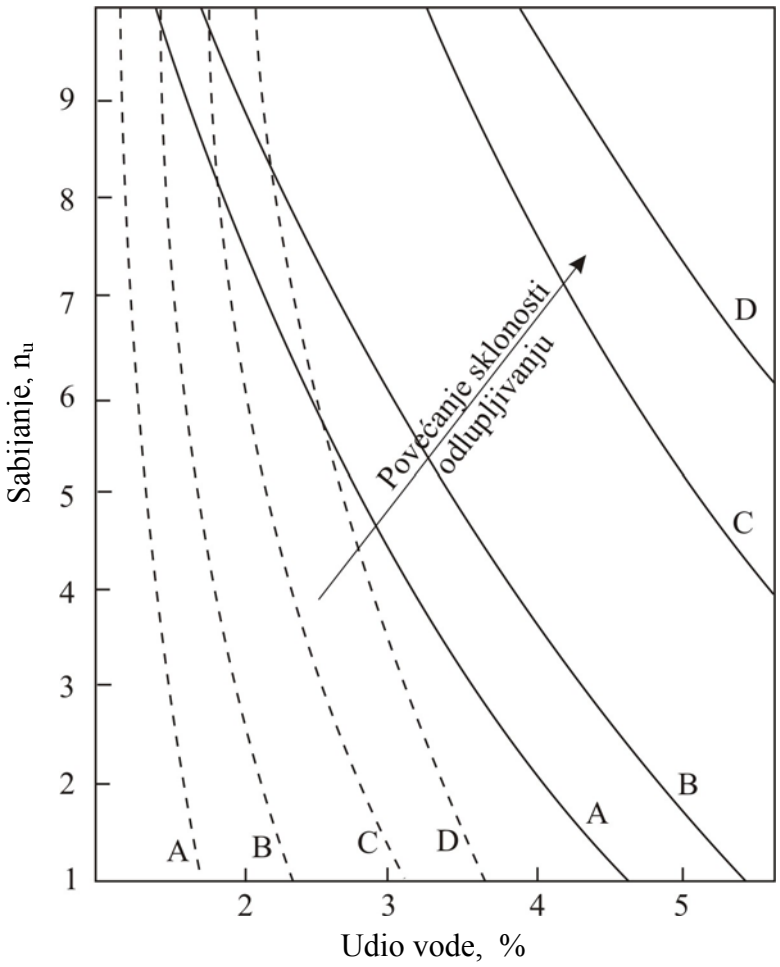
$$A = \frac{2 \cdot N_t \cdot d^2}{3 \cdot S_r} \qquad [22]$$

gdje je: A – površina pogreške, m^2,
N_t – tlačno naprezanje, N/m^2,
S_r – čvrstoća rekondenzacijskog sloja, N/m^2,
d – udaljenost rekondenzacijskog sloja, m.

Uz primjenu prethodne relacije može se zaključiti da se u kalupnoj mješavini, u cilju povećanja otpornosti nastanka odlupina, moraju upotrebljavati dodaci koji smanjuju pojavu tlačnih naprezanja, a povećavaju čvrstoću rekondenzacijskog sloja. Oni su u svojim radovima prethodno već naveli dodatke poput bitumena, tinjca, katranske smole, ugljene prašine te produkte žitarica. Prisutnost mrtve gline te frakcija prašine znatno povećava vrijednost tlačnih naprezanja. Sitna prašina služi kao dobar "vodič" deformacija nastalih kao posljedica

temperaturnog istezanja pješčanog zrna na 570 °C. Utvrđeno je da ugljena prašina djeluje znatno više na sprječavanje pojave orepina nego na samu pojavu odlupljivanja. To se objašnjava pojavom filma u obliku plina koji nastaje između litine i metala nakon punjenja kalupa. Smatraju da pojava tog filma smanjuje prijelaz topline između litine i metala te time usporavaju širenje topline od lica kalupa smanjujući ukupnu deformaciju. Taj utjecaj možemo susresti kod kapljice vode na vrućoj ploči. Ovim ispitivanjima utvrdili su da dodaci piljevine i treseta znatno smanjuju pojavu tlačnih naprezanja usprkos tome što smanjuju i rekondenzacijsku čvrstoću.

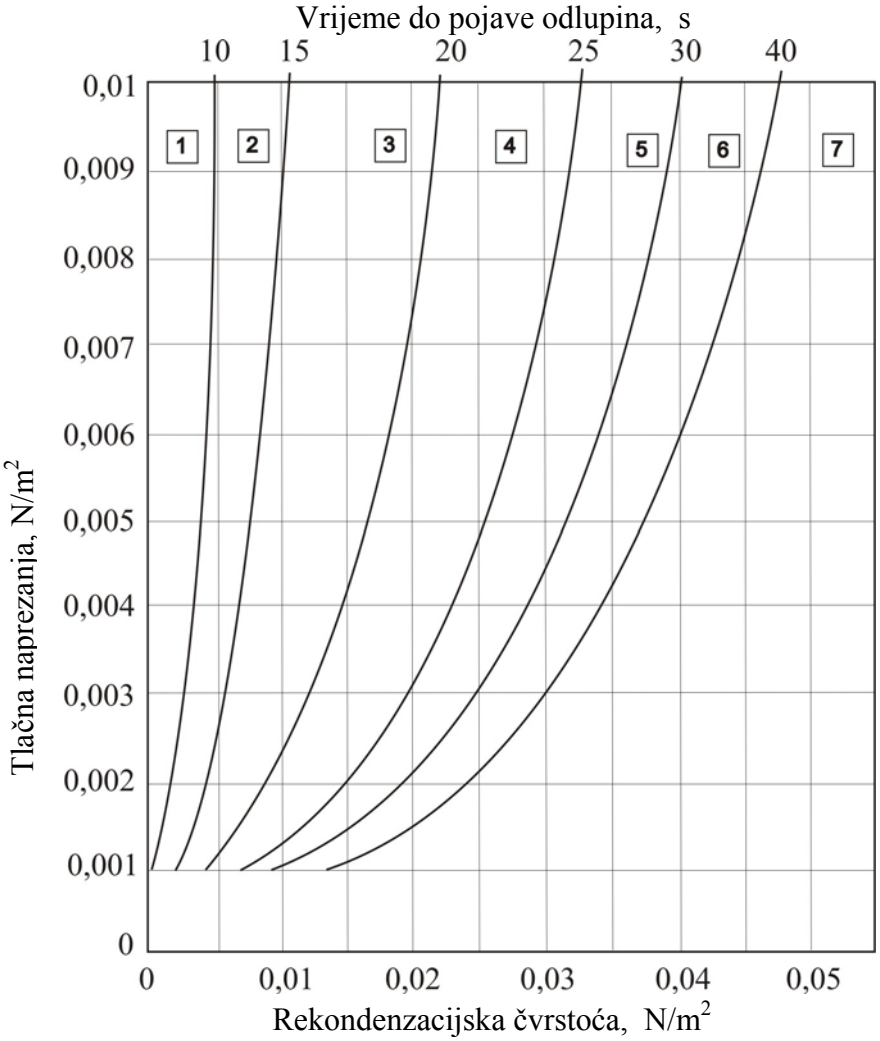
Godine 1963. A. H. Zrimsek i G. J. Vingas [23] ispitali su šest faktora na utjecaj kalupnih mješavina. Faktori koji su varirani su: vrsta bentonita, udio bentonita, pijesak, voda, sabijenost i način miješanja. Nakon provedenog istraživanja zaključili su da svojstva kalupne mješavine sastavljene od pijeska, bentonita i vode uglavnom ovise o udjelu vode. Međutim, s dodatkom cerealija svojstva kalupne mješavine ne mijenjaju se tako jako s obzirom na količinu vode. Ova konstatacija bila je vrlo važna kod pripreme kalupnih mješavina u ljevaonicama jer je kod realnih uvjeta dosta teško ostvariti konstantnu vlažnost. Između svojstva kalupa i pojave odlupljivanja autori nisu mogli pronaći neku značajnu vezu. Zaključili su da se sa povećanjem udjela bentonita uz dodatak cerealija znatno povećava otpornost odlupljivanju, ali konstatirali su i da cerealije više povećavaju svojstvo otpornosti prema odlupljivanju nego bentonit. Tvrde da stupanj sabijenosti i način miješanja ima također veliku ulogu u stvaranju odlupina.



Slika 4.30 Utjecaj sadržaja bentonita i dodatka 1% cerealija na pojavu odlupljivanja [23]

Na slici 4.30 prikazan je dijagram ovisnosti energije sabijanja (isprekidane linije) ili broja udaraca (pune linije), vlažnosti, te postotka bentonita (A,B,C,D) i dodatak cerealija. Na taj način nacrtali su dijagram u kojem je prikazano područje gdje se može očekivati pojava odlupljivanja, a to je površina desno od krivulje, dok lijevo od krivulje nema odlupljivanja. Međutim, iz njihova rada uočljivo je da je dosta teško kontrolirati udio cerealija u kalupnoj mješavini.

Nakon preciznije postave pokusa uz bolju opremu W. Patterson i D. Boenisch [24] uspjeli su kreirati tzv. "dijagram odlupljivanja" za različite kalupne mješavine. Dijagram kao takav primjenjiv je za sve kalupne mješavine jer daje odnos između tlačne naprezanja pri zagrijavanju, rekondenzacijske čvrstoće i vremena koje je potrebno da dođe do pojave odlupljivanja mjerenog modificiranim Aachenskim testom. Dijagram kao takav prikazan je na slici 4.31 dok su aparature za mjerenje rekondenzacijske čvrstoće i tlačnih naprezanja prikazane ne prethodnim slikama. Ispitivanje je provedeno na 160 pogonskih laboratorijskih mješavina.



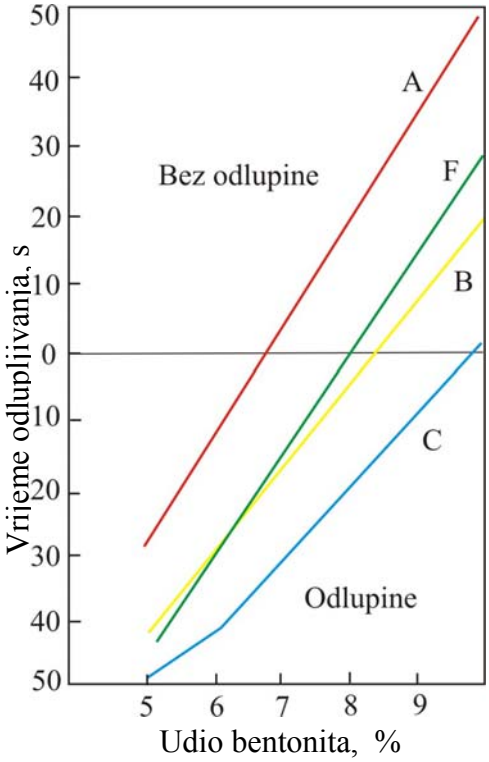
Slika 4.31 Dijagram odlupljivanja različitih mješavina [24]

Kao što se vidi iz dijagrama, na osi apscisa označene su vrijednosti čvrstoće rekondenzacijskog sloja u N/m^2, a na ordinati vrijednosti tlačnih naprezanja u N/m^2. Polje dijagrama podijeljeno je na sedam područja, empirijski određenim krivuljama koje određuju vrijeme proteklo do pojave odlupina. Pokusi su izvođeni sa sivim lijevom temperature 1350 °C. Kemijski sastav litine nije pokazao nikakav utjecaj na pokus. Iz dijagrama je vidljivo da su krivulje jednakih vremena do pojave odlupina razmjerno strme, naročito kod područja visokih tlačnih naprezanja, i to posebno krivulje kratkih vremena. Iz toga se zaključuje da je utjecaj rekondenzacijske čvrstoće kod malih čvrstoća kalupne mješavine mnogo značajniji od utjecaja tlačnih naprezanja. Međutim, s porastom rekondenzacijske čvrstoće raste i čvrstoća kalupne mješavine. To ukazuje da je racionalnije ograničiti vrijednosti tlačnih naprezanja, jer tada za postizanje kratkih vremena do pojave odlupina nisu potrebne velike rekondenzacijske čvrstoće, što se u pravilu postiže sa skupim kalupnim mješavinama. Autori su pokušali mjeriti i veličine

nastalih odlupina te taj podatak zamijeniti s vremenom potrebnim do pojave stvaranja odlupina. To, nažalost, nisu uspjeli učiniti zbog složenosti Aachenskog testa [25].

Pri ovim ispitivanjima razmatrane su različite vrste glina kao i različiti stupnjevi aktivacije, utjecaj sadržaja bentonita, vrste bentonita, različitih aktivacijskih sredstava, utjecaj mješavine za CO_2 postupak, te utjecaj vlažnosti pijeska i različitih dodataka.

B.C. Yearley [26] ispitivao je utjecaj stezanja gline na pojavu stvaranja odlupina. On je kao pretpostavku iznio da kalupna mješavina koja odolijeva nastanku odlupine u donjaku biti će dobra i za kalupljene gornjaka. Svojim analizama odredio je promjenu volumena za kombinacije različitih glina do 593 ^{o}C, te je iz tih rezultata izračunao minimalnu količinu gline koja je potrebna za kompenziranje temperaturnog istezanja kremenih zrna. Na slici 4.32 prikazani su rezultati ovog ispitivanja.



Slika 4.32 Odnos između skupljanja gline i pojave odlupljivanja za različite vrste kalupnih mješavina A, B – Na bentonit sa 30% vode; C – Ca bentonit sa 30% vode; F – glina sa 21% vode [26]

Različite mješavine, prikazane u dijagramu, bile su podvrgnute naglom zagrijavanju tako da je na površinu uzorka bilo prislonjeno grijalo od nikla promjera 75 mm i temperature 1316 °C, dok je vrijeme kontakta iznosilo od 10 do 15 sekundi. Ukoliko se nakon tog vremena nisu pojavile pukotine oko kontaktnog mjesta, uzorak je proglašen otpornim na odlupljivanjem. Ovakav način mjerenja nije bio dovoljno precizan. U svojem radu Yearley je potvrdio da treba

veliku pažnju posvetiti i stupnju sabijenosti kalupne mješavine. Postoci gline potrebni da bi kompenzirali tlačne naprezanja znatno su veći u njegovim proračunima od onih koji se upotrebljavaju u praksi. To nam potvrđuje da različiti dodaci koji se dodaju kalupnim mješavinama znatno utječu na smanjenje ukupnog temperaturnog istezanja i deformacije kalupa.

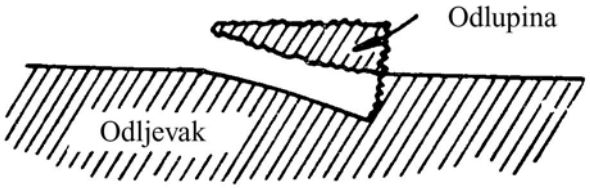
J.A Kilshaw [27,28] proveo je opsežno istraživanje o pojavi orepina (slika 4.33) .



Slika 4.33 Najvjerojatniji prikaz nastajanja orepina [27]

Ispitivanje je odlučio izvršiti na test odljevku koji je sudjelovao u Aachenskom testu, koji je bio vrlo sličan BICRA testu ali znatno manji te ekonomičniji. U svojem istraživanju Kilshaw je ispitivao utjecaj vrste gline, veličine zrna, vlažnosti, postotka gline, tvrdoće kalupa i različitih dodataka te je zaključio da je za pojavu orepina najutjecajnija glina. Natrijske ili aktivirane gline pokazuju mnogo povoljnija svojstva nego je to slučaj kod upotrebe kalcijevih ili prirodnih pijeskova. Orepine se povećavaju ako raste tvrdoća kalupa i vlažnost, a smanjuju ako koristimo grubozrnat pijesak i veću količinu veziva. Uočio je da se orepine javljaju vrlo brzo nakon ulijevanja dok je za pojavu odlupina na licu gornjaka potrebno mnogo duže vrijeme. Kilshaw je smatrao da je u mješavinu potrebno dodati dodatak koji ima svojstvo omekšavanja ili sagorijevanja istom brzinom kako teče pojava temperaturnog istezanja kremenih zrna. Neki dodatak morao bi se većom brzinom smekšati, a zatim izgoriti, pa bi prema tome katranska smola i ugljena prašina trebale pokazati bolja svojstva od piljevine ili treseta. Kod velikih brzina zagrijavanja i pod srednjim uvjetima temperaturnog istezanja ugljena prašina i katranska smola uspiju se smekšati i time kompenzirati pojavu temperaturnog istezanja. Lijevanje odljevaka malih dimenzija za čije se kalupljenje koriste ovi dodaci, pokazuju da je pojava orepina mnogo češća nego li je to pojava odlupina sa lica gornjaka. Uz to Kilshaw je provjerio tvrdnju koju je postavio Hofmann za određivanje optimalnog sastava mješavine, te utvrdio da postoji veza između čvrstoće rekondenzacijskog sloja i veličine orepina. Na račun ovog ispitivanja Kilshaw je uputio nekoliko ozbiljnih zamjerki. Kao prvo

odlupine nisu imale presjek V-oblika nego polu V (slika 4.34) što je karakteristično za pojavu orepina koje se javljaju na rubovima.



Slika 4.34 Tip odlupine koji nastaje kod Aachenskog testa [27,28]

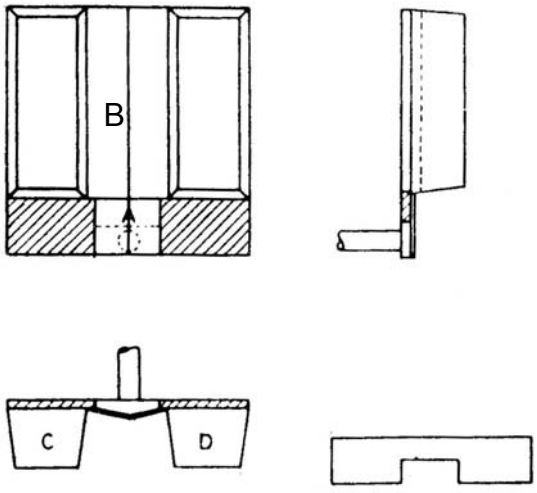
Pored toga orijentacija odlupina nije bila slučajna nego se je orijentirala prema rubovima odljevka. Ta pojava ovisna je o konstrukciji odljevka koji u svojem obliku sadržava rebra. Levelink [17] je ranije ukazao da rubovi pogoduju pojavi odlupina. Sa ovom konstrukcijom odljevka nije bilo ograničavanja bočnog temperaturnog istezanja suhe površine lica kalupa te su se pukotine formirale isključivo u zoni kondenzacije. Piljevina, treset, ugljena prašina i katranska smola smanjuju defekte nastale dilatacijom kremenih zrna, ali u ovom slučaju nije bilo ograničavanja temperaturnog istezanja pa prema tome nije bilo ni pojave stvaranja naprezanja te ova sredstva nisu djelovala smislu kompenziranja temperaturnog istezanja tako da se njihov utjecaj nije pokazao značajnim. Aachenski test stoga nije mogao dati pouzdane rezultate kada su se željeli ispitati utjecaji dodataka na smanjenje deformacije kalupa. Iz tog razloga Aachenski test je malo modificiran na način što su mu oduzeta rebra dok je sama procedura ostala ista. Nakon ispitivanja pokazalo se da se kod nove konstrukcije kalupa intenzitet defekata smanjio. Mješavine pripremljene s Wyoming bentonitom uopće nisu pokazale sklonost odlupljivanju. Ostale mješavine redovito su imale tendenciju stvaranja odlupina. Dodaci piljevine i treseta spriječili su odlupljivanje dok su različiti vlaknasti materijali samo smanjili učestalost pojave. Dodaci ugljene prašine i katranskih smola pokazali su lošije rezultate nego mješavine bez dodataka. Orijentacija ovih defekata bila je slučajna. Kod Aachenskog testa usmjerena orijentacija javila se uslijed rebara na odljevku premda su odlupine imale presjek polu V oblika.

Nakon provedenih ispitivanja Kilshaw je zaključio da kod Aachenskog testa dolazi do pojave vrlo jakog intenziteta zračenja, tako da se kod gotovo svih kalupnih mješavina javljaju odlupine. Prema tome, odlupljivanje se može javiti u neko određeno vrijeme koje je ovisno o odabranom testu, ako su uvjeti zračenja konstantni. Pojava odlupljivanja se u ovom slučaju manifestira kao opadanje sloja s lica gornjaka bez nekih dodatnih pojava. Utjecaji dodataka kod ovih testova nije onakav kao kod kalupa koji se koriste u ljevaonicama. Ovo nas navodi na

zaključak da uvjeti pod kojim se odvijao pokus nisu istovjetni onima u ljevaonici. Veliki nedostatak Aachenskog testa je što odnos između vremena ulijevanja i učestalosti pojave odlupljivanja pokazuje izrazitu "S" krivulju.

Ispitivanje je proveo Kilshaw prema tehnici koju su opisali H.H. Colins i A.G. Fuller [29], pri čemu je veličina odlupine bodovana od 1 do 10. Bodovalo se na osnovi odnosa između dobre i loše površine. Oblik krivulje pokazuje da stvarnu otpornost neke kalupne mješavine ne možemo ocijeniti samo uz provođenje jednog pokusa, odnosno uz samo jedno uljevno vrijeme. Ako je vrijeme ulijevanja kratko, do odlupine neće uopće doći. S druge strane ako je vrijeme ulijevanja veliko, onda će do pojave odlupina sigurno doći. Veličina defekta pokazuje samo površinu defekta, a ne i tendenciju prema pojavi odlupljivanja. Dodatak ugljene prašine ima pozitivan utjecaj i stvarno povećava vrijeme do pojave odlupina, ali i povećava veličinu odlupina kada do njih dolazi. Kilshaw u ovom radu kritizira Aachenski test jer ne simulira u dovoljnoj mjeri realni proces u ljevaonici.

On smatra da je vrijeme zagrijavanja kalupa u realnim uvjetima mnogo jače nego je to postignuto za vrijeme od 45 sekundi koliko traje Aachenski test. Ponukan nedostacima Aachenskog testa Kilshaw je konstruirao novi test odljevak koji treba dati tipičan V-presjek odlupine. Osim toga vrijeme ulijevanja je trebalo biti što je moguće brže, a da se prilikom ulijevanja ne izazove erozija površine kalupa s ciljem postizanja što je moguće većeg zagrijavanja kalupa zračenjem. Skica testa prikazana je na slici 4.36. Odljevak se puni kroz razvodnik B da bi nakon toga ispunio dva dijela odljevka C i D. Dimenzije uljevnog sustava su naročito važne. Samo ušće zauzima ¼ površine lica gornjaka dok jezgra sprječava eventualnu eroziju kalupa.

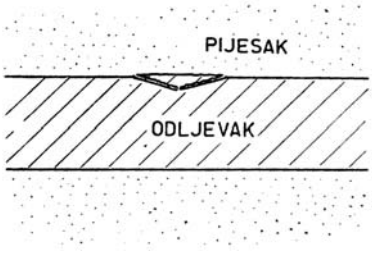


Slika 4.35 Model za test odljevak prema Kilshawu [29]



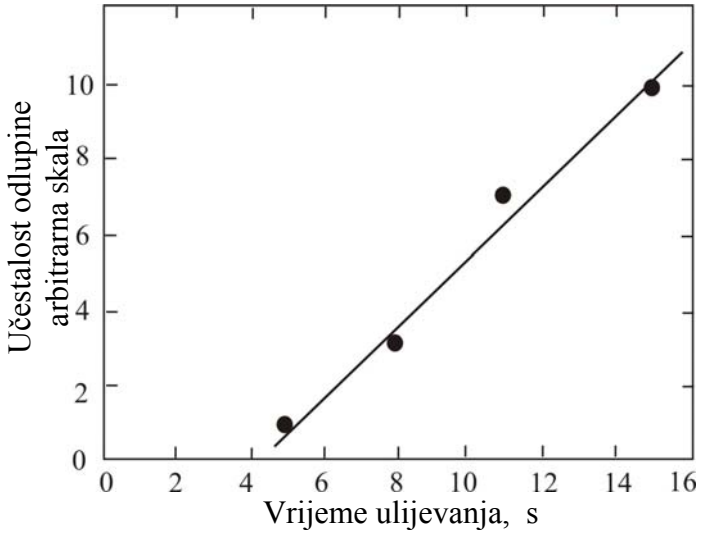
Slika 4.36 Test odljevak prema Kilshaw-u [29]

Donjak je moguće izraditi od prirodnog pijeska jer se promatraju samo pojave na gornjaku. Greške postignute na ovako konstruiranom odljevku imale se V ili kutni presjek kako je to shematski prikazano na slici 4.37.



Slika 4.37 Presjek tipične odlupine [29]

Uvjeti postavljeni na ovom testu najviše su odgovarali uvjetima u praksi. Odnos između uljevnog vremena i veličine odlupine u ovom slučaju bio je linearan, kako je to prikazano na slici 4.38.



Slika 4.38 Odnos između vremena ulijevanja i učestalosti pojave odlupina na Kilshaw test odljevku [29]

Sljedeća prednost ovog testa je da se pojava odlupina ne postiže ekstremnim produljivanjem uljevnog vremena kako je to ranije bilo postavljeno Aachenskim testom. Kilshaw zaključuje da pojava odlupljivanja ovisi o konstrukciji odljevka i brzini zagrijavanja kalupa. Kako ovi uvjeti variraju od kalupa do kalupa razumljivo je da se i test odljevak mora prilagoditi što je moguće većem broju kombinacija.

Što se tiče utjecaja vrste gline, ispitivanja su potvrdila da ispravno aktivirani Na bentoniti (Wyoming) pokazuju veću otpornost pojavi odlupina od AC bentonita te su se rezultati podudarali sa ispitivanjima Patterson i Boenisch [20].

Različiti dodaci smanjivali su tendenciju kalupnih mješavina prema pojavi nastanka odlupina. Piljevina i treset povećavaju ugibljivost kalupa te na taj način uspiju kompenzirati deformaciju nastalu dilatacijom kremenih zrna bez pojave odlupljivanja. Piljevina i treset su sagorivi materijali i oni svojim sagorijevanjem ostavljaju sitne šupljine u kalupu koje kompenziraju temperaturno istezanje pijeska. S druge strane piljevina je stlačivi materijal koja promjenom svoje geometrije može kompenzirati pojavu temperaturnog istezanja kremenih zrna. Iskustvo pokazuje da dodaci moraju imati veličinu zrna što je moguće bližu osnovnom materijalu, tj. pijesku. Dodatak drvene piljevine je odličan u pogledu kompenzacije temperaturnog istezanja kremenih zrna te se uvelike koristi u praksi. Prednost piljevine kao dodatka je u tome što su njezina svojstva neovisna o brzini zagrijavanja kalupa. Nažalost, u kalupnu mješavinu smijemo dodati do 2% piljevine jer preko te vrijednosti kalupna mješavina postaje spužvasta i teško se sabija. Kod velikih brzina zagrijavanja kalupa, što se naročito može očekivati kod lijevanja malih odljevaka, doći će prije do pojave temperaturnog istezanja kremenih zrna nego do izgaranja dodatka. U tom će slučaju dodaci imati mali učinak. Nasuprot tome kod lijevanja velikih odljevaka brzina zagrijavanja je mala, dodaci će do temperaturnog istezanja pijeska stići izgorjeti te će osloboditi šupljine u koje će pijesak dilatirati. U ovom je pak slučaju utjecaj dodatka na povećanje otpornosti prema odlupljivanju velik. Ovi dodaci nisu uspješni u spriječavanju nastanka orepina ili odlupljivanja na uglovima kalupa, tj. kod djelovanja ne ograničenog temperaturnog istezanja.

Dodaci poput katranske smole i ugljene prašine stvaraju u kalupu plastičnu ili tekuću fazu. Ovi dodaci povećavaju deformabilnost tj. plastičnost kalupa. Ovi dodaci djeluju samo na rubovima kalupa te su u ljevaonici uspješni samo pri lijevanju malih i srednjih odljevaka. Vrlo su nepraktični pri lijevanju velikih odljevaka zbog malih brzina ugrijavanja kalupa. Patterson i Boenisch potvrdili su da ovi dodaci povećavaju čvrstoću na licu kalupa te su postavili hipotezu o stvaranju filma između litine i lica kalupa koji nastaje prilikom izgaranja ugljene prašine čineći toplinsku barijeru. Vlaknasti dodaci poput azbesta, treseta i nasjeckane slame ne djeluju

dobro na pojavu kompenzacije temperaturnog istezanja pijeska nego na povećanje čvrstoće kalupne mješavine. Njihov veliki nedostatak je što uz primjenu klasičnih metoda miješanja nije ih moguće dobro homogenizirati u kalupnu mješavinu. Pored toga svojom vlaknastom strukturom ostavljaju grubu površinu na odljevku te svojim izgaranjem stvaraju pukotine u kalupu. Stoga su posve neupotrebljivi u lijevanju velikih odljevaka i kod odljevaka gdje prilikom lijevanja dolazi do turbulencija.

Pri modernoj proizvodnji kalupa moguće je proizvesti kalupe velike gustoće uz upotrebu visokotlačnih kalupilica. Korištenjem ovih metoda pretpostavilo se da će se riješiti problemi temperaturnog istezanja kremenih zrna i eliminirati pojava odlupljivanja, premda Petterson tvrdi da otpornost odlupljivanju opada sa porastom tvrdoće kalupa. Kilshaw [28] je utvrdio da kalupljenje na visokotlačnim kalupilicama ne pridonosi smanjenju pojave odlupljivanja nego povećava sklonost odlupljivanju. Učinkovitost dodataka pri visokotlačnom kalupljenju znatno opada. Kao najpovoljniji dodaci opet su se pokazali piljevina i treset, dok katranska smola i ugljena prašina pokazuju svoj učinak tek na rubovima. U daljnjem radu usporedio je rezultate dobivene prilikom ispitivanja s rezultatima u praksi te je dobio vrlo dobro slaganje. Zaključak je da pri upotrebi visokotlačnih kalupilica treba voditi strogu kontrolu udjela vlage i bentonita. Povišenje udjela bentonita te držanje udjela vlage na minimumu pokazalo se kao dobro rješenje za spriječavanje pojave odlupina i orepina. Ponovo se pokazalo da su Na –bentoniti puno bolji od Ca-bentonita u povećanju otpornosti nastanku odlupina.

Godine 1971. znanstvenici N. Malešević i Z. Bonačić [30] djelatnici Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu dali su poseban doprinos u razjašnjavanju pojave odlupljivanja. Proveli su istraživanje pod naslovom "Rekondenzacijska čvrstoća, tlačna naprezanja u pješčanim kalupima" gdje su varirali različite vrste bentonita te njihove udjele s količinom vode u kalupnim mješavinama. Eksperimenti su izvedeni s:

- 4 različite vrste aktiviranih bentonita (A, B, C, D) ,
- različitim sadržajem vode u % (2, 5, 4, 6),
- udjelima bentonita u % (4, 7, 10, 12).

Tablica 4.1 Oznake ispitnih mješavina osnovne serije [30]

Vrsta bentonita	**Udio vode u %**	**Udio bentonita u %**			
		4	7	10	12
A	2,5	A.2,5.4	A.2,5.7	A.2,5.10	A.2,5.12
	4,0	A. 4.4	A. 4.7	A. 4.10	A. 4.12
	6,0	A. 6.4	A. 6.7	A. 6.10	A. 6.12
B	2,5	B.2,5.4	B.2,5.7	B.2,5.10	B.2,5.12
	4,0	B. 4.4	B. 4.7	B. 4.10	B. 4.12
	6,0	B. 6.4	B. 6.7	B. 6.10	B. 6.12
C	2,5	C.2,5.4	C.2,5.7	C.2,5.10	C.2,5.12
	4,0	C. 4.4	C. 4.7	C. 4.10	C. 4.12
	6,0	C. 6.4	C. 6.7	C. 6.10	C. 6.12
D	2,5	D.2,5.4	D.2,5.7	D.2,5.10	D.2,5.12
	4,0	D. 4.4	D. 4.7	D. 4.10	D. 4.12
	6,0	D. 6.4	D. 6.7	D. 6.10	D. 6.12

Sve mješavine izrađene su sa istom vrstom pijeska sljedećih karakteristika:

- srednja veličina zrna 0,245,
- stupanj ravnomjernosti 71.

Mješanje je provedeno u Simson laboratorijskoj mješalici 5 minuta suho i 5 minuta mokro. Da bi se dobili statistički reprezentativni rezultati svaki pokus izveden je s 5 ponavljanja. Tako je u osnovnoj seriji izvedeno 226 uzoraka (za A – bentonit 57, za B – bentonit 56, za C – bentonit 56 i za D – bentonit 60). Rezultati su prikazani tablicama od 2 do 5. Udjeli od 10 % i 12 % bentonita te nakvašenost $n \geq 1$ su ekstremni i ne upotrebljavaju se u ljevaonicama. U istraživanju su namjerno obuhvaćene ekstremne granice kako bi se ispitalo što je moguće šire područje.

Tablica 4.2 Rezultati ispitivanja kalupne mješavine s A – bentonitom [30]

Udio bentonita, %	Udio vode, %	Propusnost	Tlačna čvrstoća, $(N/m^2)\ 10^{-6}$	Tlačna napetost N_t, $(N/m^2)\ 10^{-3}$	Rekondenzacijska čvrstoća S_r, $(N/m^2)\ 10^{-6}$	Nakvašenost n	N_t/S_r
4	2,5	89	570	5,1	17,4	0,625	293
	4,0	100	589	6,7	20,2	1,00	332
	5,8	110	595	9,1	19,4	1,45	469
7	2,4	87	967	4,9	26,7	0,339	184
	4,0	109	857	5,6	28,1	0,572	199
	6,0	109	922	7,6	33,2	0,857	229
10	2,5	58	1219	3,6	29,5	0,25	122
	4,2	78	1231	4,5	33,7	0,42	133
	6,0	105	1212	7,3	45,6	0,60	160
12	2,4	35	1181	3,0	31,4	0,20	95,5
	4,3	40	1185	4,5	40,0	0,358	113
	5,9	109	1390	6,7	47,8	0,492	140

Tablica 4.3 Rezultati ispitivanja kalupne mješavine s B – bentonitom [30]

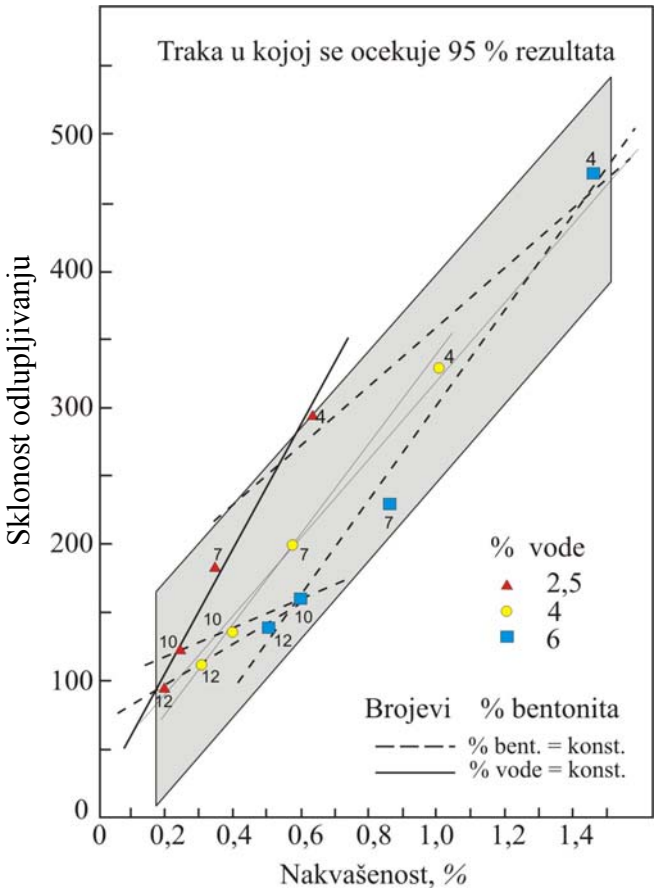
Udio bentonita, %	Udio vode, %	Propusnost	Tlačna čvrstoća, $(N/m^2)10^{-6}$	Tlačna napetost N_t, $(N/m^2)\ 10^{-3}$	Rekondenzacijska čvrstoća S_r, $(N/m^2)\ 10^{-6}$	Nakvašenost n	N_t/S_r
4	2,7	138	523	4,5	16,0	0,675	281
	4,3	107	490	6,0	15,0	1,075	400
	6,0	110	491	6,9	12,8	1,50	539
7	2,5	113	997	4,7	22,2	0,357	212
	4,2	91	803	5,5	21,9	0,6	251
	6,0	119	803	6,8	23,6	0,857	288
10	2,2	39	1208	3,6	28,3	0,22	127
	4,3	86	1192	5,7	32,6	0,43	175
	5,9	108	1118	6,7	34,7	0,59	193
12	2,6	28	1171	2,7	29,0	0,217	93
	4,3	68	1208	3,9	33,1	0,538	118
	5,9	112	1362	6,4	39,6	0,462	162

Tablica 4.4 Rezultati ispitivanja kalupne mješavine s C – bentonitom [30]

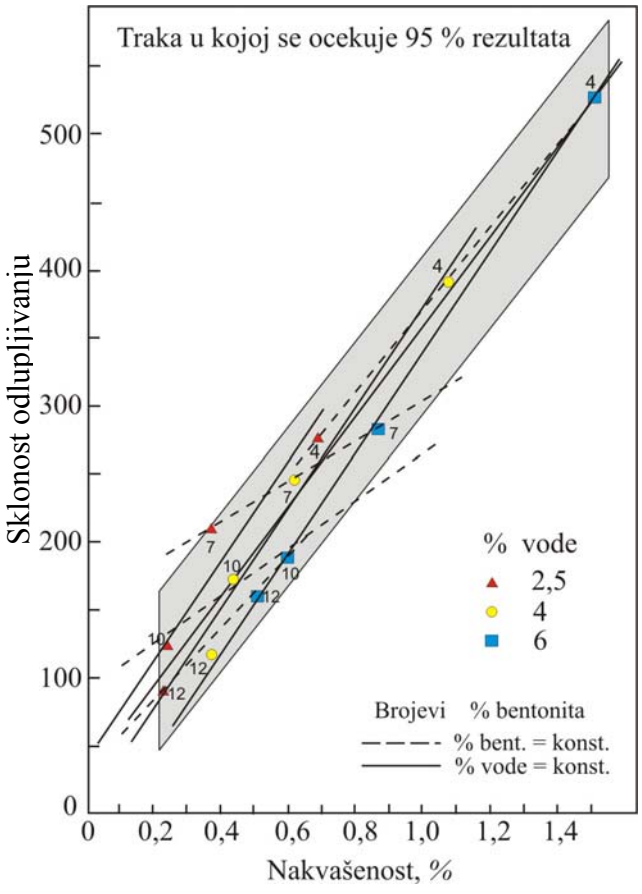
Udio bentonita, %	Udio vode, %	Propusnost	Tlačna čvrstoća, $(N/m^2)\ 10^{-6}$	Tlačno naprezanje N_t, $(N/m^2)\ 10^{-3}$	Rekondenzacijska čvrstoća S_r, $(N/m^2)\ 10^{-6}$	Nakvašenost n	N_t/S_r
4	2,5	61	725	5,5	20,7	0,625	266
	3,9	122	530	6,0	19,5	0,975	308
	5,6	108	584	8,1	17,2	1,4	471
7	2,5	74	1186	4,5	27,3	0,375	165
	4,2	121	1080	6,3	37,3	0,6	169
	5,6	104	988	8,4	32,5	0,8	258
10	2,6	46	1382	3,4	32,7	0,26	104
	4,4	105	1383	5,3	43,5	0,44	122
	5,5	109	1220	7,9	42,4	0,55	186
12	2,5	35	1601	3,2	37,5	0,208	85
	4,4	89	1527	4,7	45,0	0,367	105
	5,5	110	1479	6,7	46,1	0,457	145

Tablica 4.5 Rezultati ispitivanja kalupne mješavine s D – bentonitom [30]

Udio bentonita, %	Udio vode, %	Propusnost	Tlačna čvrstoća, $(N/m^2)\ 10^{-6}$	Tlačna napetost N_t, $(N/m^2)\ 10^{-3}$	Rekondenzacijska čvrstoća S_r, $(N/m^2)\ 10^{-6}$	Nakvašenost n	N_t/S_r
4	2,6	95	493	5,0	17,7	0,65	283
	4,1	121	378	6,6	19,7	1,025	335
	6,1	129	332	8,3	18,0	1,525	461
7	2,5	91	907	4,3	26,4	0,357	163
	4,1	126	823	6,9	32,3	0,585	214
	6,2	132	614	8,7	31,8	0,885	274
10	2,6	79	1318	4,0	34,7	0,26	115
	4,1	114	1264	6,3	41,3	0,41	152
	6,1	125	932	8,4	43,4	0,61	194
12	2,4	68	1291	3,4	33,0	0,2	103
	4,2	122	1472	6,2	44,3	0,35	140
	6,2	127	1075	7,8	47,2	0,516	165



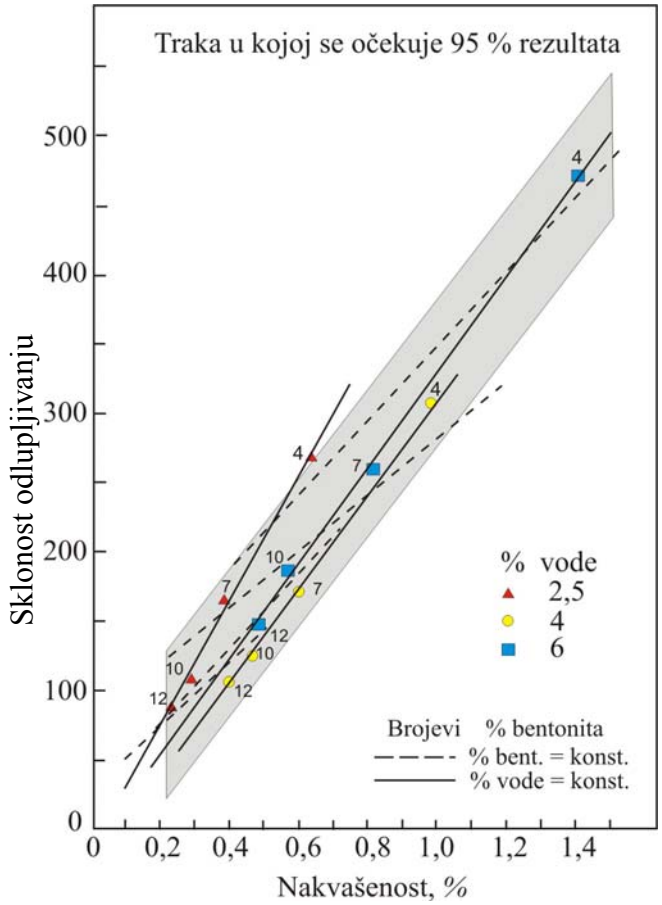
Slika 4.39 Kalupna mješavina s A vrstom bentonita [30]



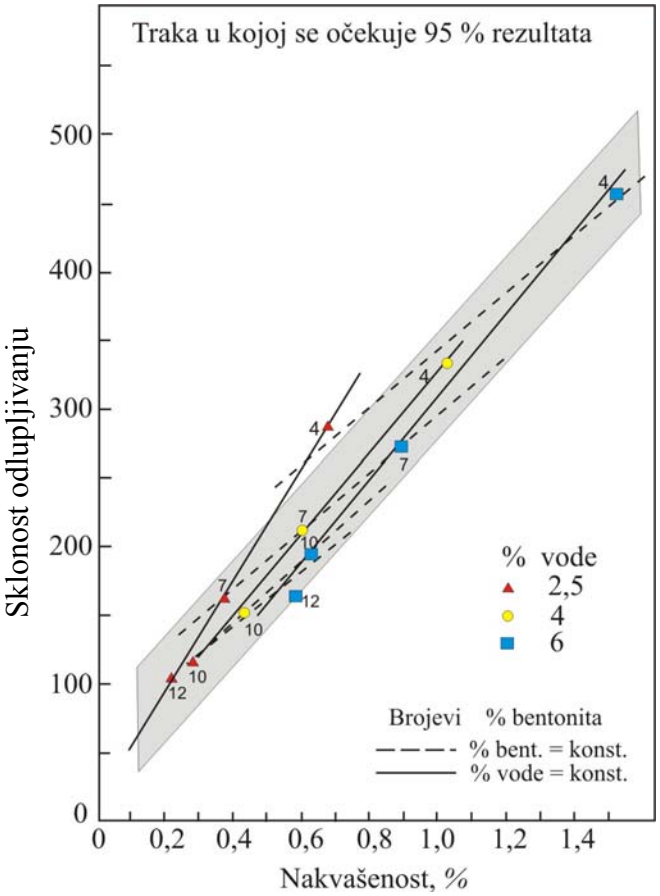
Slika 4.40 Kalupna mješavina s B vrstom bentonita [30]

Doprinos ovog rada u istraživanju pojave odlupljivanja je formiranje trakastih dijagrama koji opisuju sklonost odlupljivanju. Dietertov i Boenischev opis iste pojave prikazuje se krivuljama višeg reda. Ovim radom područje mješavina sklonih pojavi odlupina je linearizirano. Takav pristup znatno pojednostavljuje problem te je vrlo prikladan za razmatranje sastava kalupnih mješavina koje se koriste u ljevaonicama.

Dijagrami dobiveni istraživanjem prikazani su na slikama 4.39, 4.40, 4.41 i 4.42 pokazuju n – trake za vrste bentonita.



Slika 4.41 Kalupna mješavina s C vrstom bentonita [30]



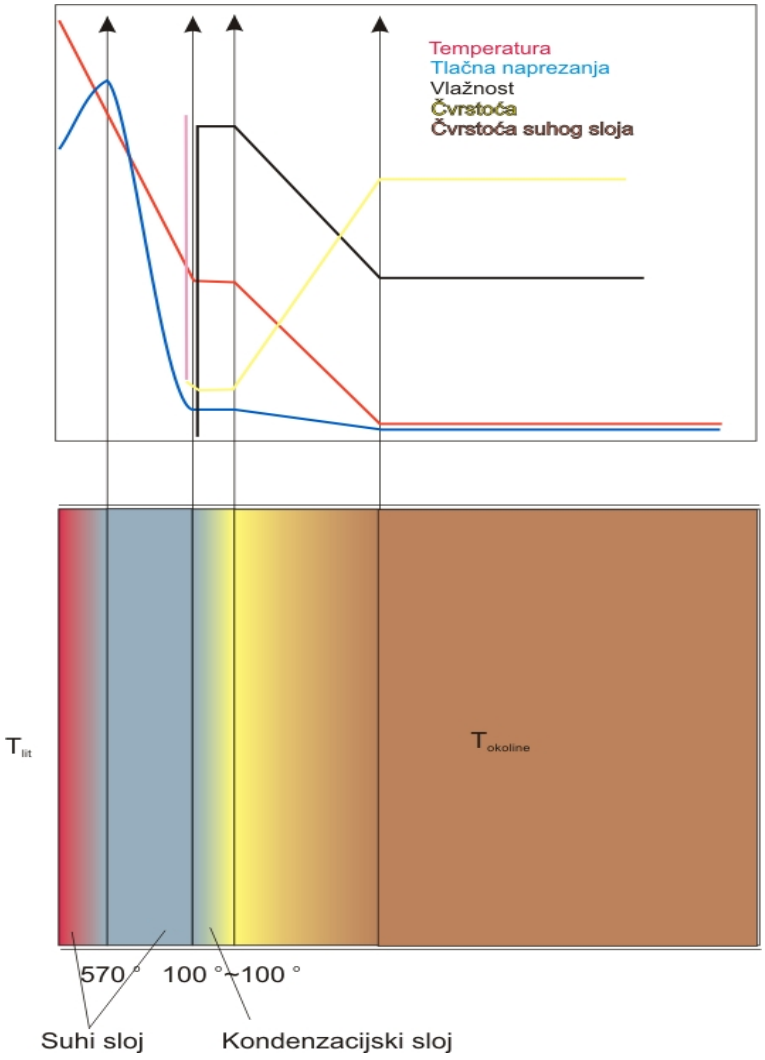
Slika 4.42 Kalupna mješavina s D vrstom bentonita [30]

4.2 Toplinska svojstva kalupnih mješavina

Za detaljno razumijevanje ponašanja kalupnih mješavina prilikom lijevanja odljevaka potrebno je dobro poznavati toplinska svojstava kalupnih materijala.

4.2.1 Mehanizam zagrijavanja kalupa

Prilikom ulijevanja litine u kalup dolazi do zagrijavanja kalupne šupljine. Nakon što litina popuni kalupnu šupljinu, ostatak se kalupa također zagrije na neku temperaturu. Shematski prikaz zagrijanog kalupa prikazan je na slici 4.43.



Slika 4.43 Shematski prikaz zagrijanog kalupa

4.2.1.1. Mehanizam zagrijavanja suhog kalupa

Pretpostavljajući da je kalup u stalnom kontaktu s litinom i promjenu toplinskih svojstava s temperaturom, temperatura kalupa može se prema [31] izraziti kao:

$$\vartheta = \vartheta_0 + \left(\overline{\vartheta}_i - \vartheta_0\right) erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\overline{\alpha} t}}\right) \qquad (1)$$

gdje je:

ϑ - temperatura kalupa, °C,

ϑ_0 - početna temperatura kalupa, °C,

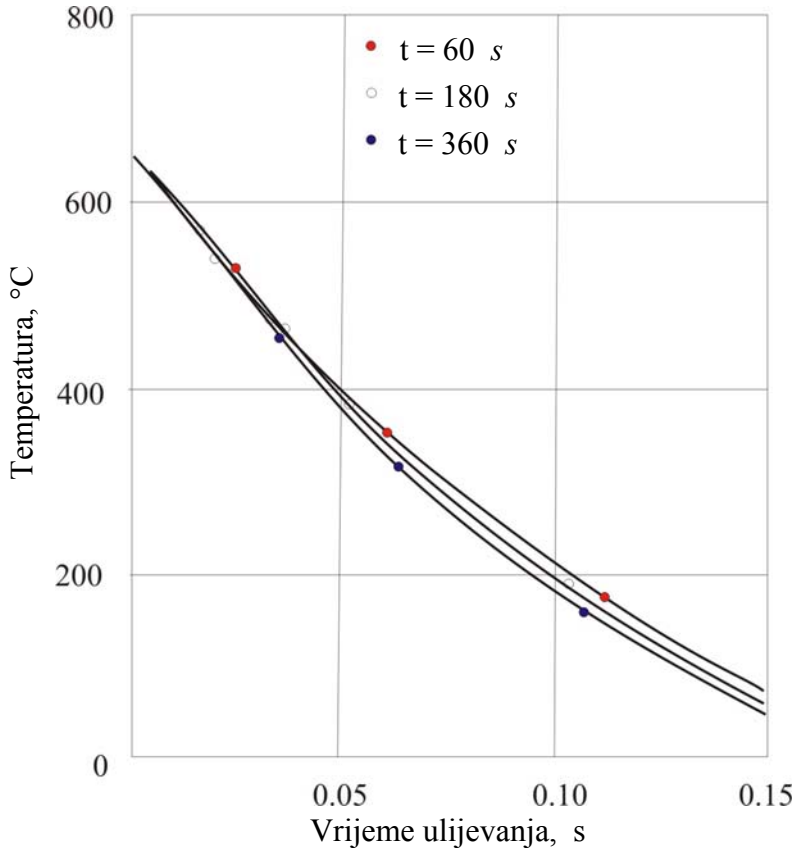
$\overline{\vartheta}_i$ - srednja temperatura kontaktne površine kalup-litina, °C,

x - udaljenost, m,

$\overline{\alpha}$ - prosječni koeficijent difuzije, m^2/s,

t - vrijeme, s,

erfc - komplementarna funkcija pogreške.



Slika 4.44 Distribucija temperature suhog kalupa izrađenog od kremenog pijeska za vrijeme ulijevanja aluminija [31]

Iz slike 4.44 prikazana je temperatura kalupa u ovisnosti o $\frac{x}{\sqrt{t}}$ iz dobivenih krivulja zagrijavanja. Krivulje u dijagramu dobivene su na temelju mjerenih vrijednosti T_0 i $\overline{T_i}$ koje su supstituirane u jednadžbu 1, s pretpostavljenim vrijednostima $\overline{\alpha}$ od 0.37, 0.39 i 0.41 mm^2s^{-1}. Najbolji rezlultat koji je pokazao najmanja odstupanja između mjerenih i računskih vrijednosti bio je 0.39 mm^2s^{-1} te je on prihvaćen kao realni $\overline{\alpha}$.

Količinu topline koja se apsorbira u kalup možemo izraziti kao:

$$Q = 1{,}128\sqrt{\overline{\alpha}}\,c\rho\left(\overline{\vartheta_i} - \vartheta_0\right)\sqrt{t} \qquad (2)$$

gdje je:

Q - apsorbirana toplina po jedinici površine, J/m^2,

c - specifični toplinski kapacitet, J/kg K,

ρ - gustoća kalupne mješavine, kg/m^3,

t - vrijeme, s.

ϑ_0 - početna temperatura kalupa, °C,

$\overline{\vartheta_i}$ - srednja temperatura kontaktne površine kalup-litina, °C,

$\overline{\alpha}$ - prosječni koeficijent difuzije, m^2/s.

iz toga slijedi specifični toplinski kapacitet:

$$c = \frac{Q}{\left[1{,}128\sqrt{\overline{\alpha}}\,\rho\left(\overline{\vartheta_i} - \vartheta_0\right)\sqrt{t}\right]} \qquad (3)$$

S druge strane, Q može biti izražena kao:

$$Q = \rho\int_0^{\infty} dx \int_{T_0}^{T} c\,dt \qquad (4)$$

U jednadžbi 4 temperatura je definirana jednadžbom 1. Integracijom lijeve strane jednadžbe 1 i njezinom supstitucijom u 3 određena je specifična toplina. Toplinska vodljivost i toplinska difuznost može se odrediti uvrštavanjem $\overline{\alpha}$, c i ρ u sljedeće jednadžbe:

$$\overline{\lambda} = \overline{\alpha}c\rho \qquad (5)$$

gdje je:

$\overline{\lambda}$ - toplinska vodljivost, W/m K,

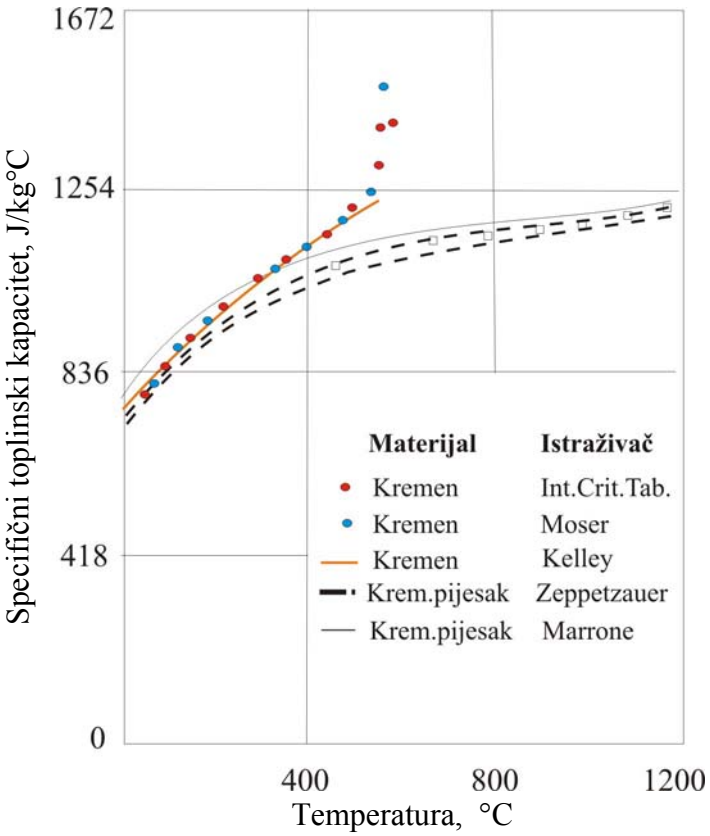
c - specifični toplinski kapacitet, J/kg K,

ρ - gustoća kalupa, kg/m^3,

$\overline{\alpha}$ - prosječni koeficijent difuzije, m^2/s.

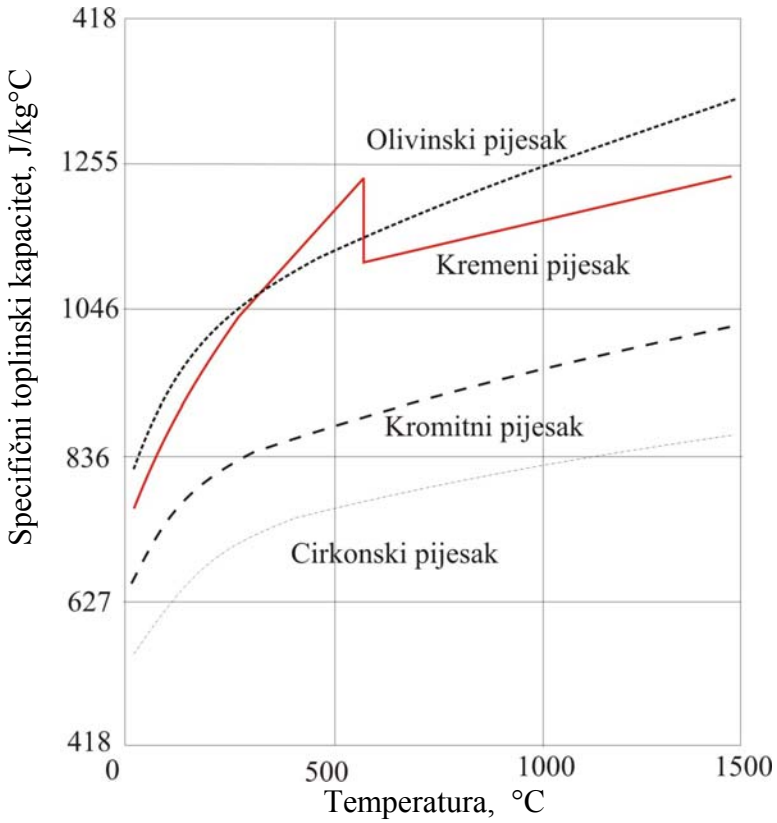
$$\overline{b} = \sqrt{\overline{\lambda} c \rho} \qquad (6)$$

Specifični toplinski kapacitet i sabijenost kalupa neizostavne su vrijednosti za određivanje toplinskih svojstava kalupa. Na slici 4.46 mogu se vidjeti usporedbe različitih mjerenja specifične topline.



Slika 4.45 Specifični toplinski kapacitet kristala kremena i kremenog pijeska [31]

Specifični toplinski kapacitet i njezina temperaturna ovisnost za različite vrste pjeskova prikazani su na slici 4.46.

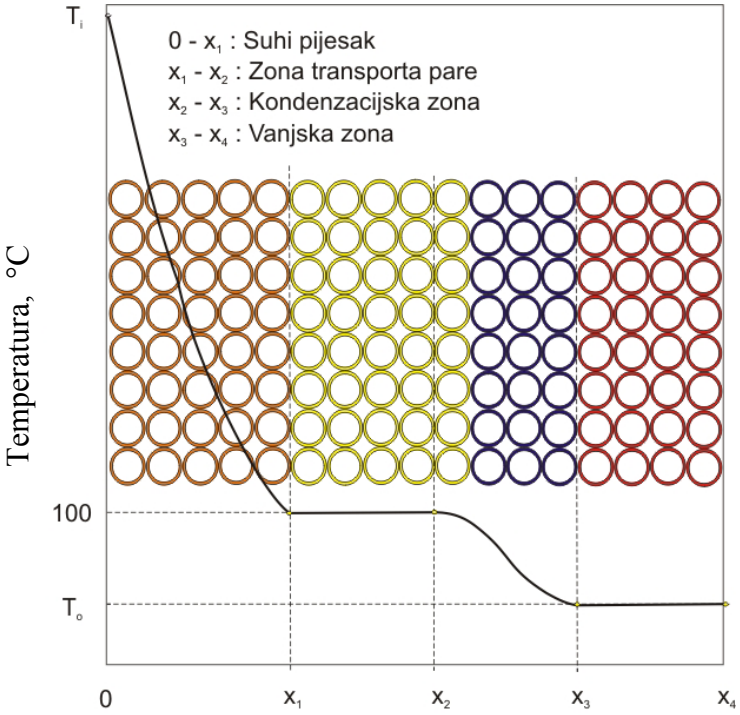


Slika 4.46 Specifični toplinski kapacitet različitih vrsta pjeskova [31]

Iz prethodne slike vidljivo je da kremeni pijesak na temperaturi α - β transformacije ima pad od 1049 J/kg °C, što je mala vrijednost da bi bitno utjecala na toplinska svojstava kalupa izrađenih od kremenog pijeska. Utjecaj veziva na vrijednost specifični toplinski kapacitet je zanemaren iz razloga vrlo velike sličnosti s specifičnim toplinskim kapacitetom pijeska. Sabijenost kalupa također je pretpostavljena da ne ovisi o promjeni temperature.

4.2.1.2 Mehanizam zagrijavanja vlažnog kalupa

Zagrijavanje vlažnog kalupa odvija se preko nekoliko zona [31]. Raspored zona prilikom zagrijavanja može se vidjeti iz slike 4.47.



Slika 4.47 Shematski prikaz temperaturne distribucije unutar jednokratnog pješčanog kalupa [31]

Prilikom ulijevanja litine u kalup dolazi do brzog zagrijavanja unutarnje površine kalupa. Lice kalupa zagrijava se na temperaturu litine, na kojoj se sva vlaga ispari i preseli u sljedeći sloj. Na temperaturama višim od 100 ºC dobiva se tako sloj potpuno osušene kalupne mješavine. Sljedeći sloj kalupa ima temperaturu oko 100 ºC te se na toj temperaturi osniva parna zona u kojoj se vlaga očituje u obliku pare. Kako temperatura kalupa prema unutrašnjosti pada ispod 100 ºC u sljedećim zonama kalupa dolazi do kondenzacije prethodno nastale pare koja povećava koncentraciju vlage na tom mjestu. Povećanjem vlage čvrstoća kalupa značajno opada.

Toplinska vodljivost u realnim kalupima, kalupima koji sadrže određenu količinu vlage, može se izraziti kao [31]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \overline{\alpha}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \qquad \text{za} \quad 0 \le x \le x_1 \qquad (7)$$

$$\vartheta = \vartheta_i \qquad \text{za } x=0 \qquad (8)$$

$$\vartheta_0 = 100\ ^{\circ}\text{C} \qquad \text{za } x=x_1 \qquad (9)$$

$$\lambda\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right)_{x=x_1} = -L_w \rho W \frac{\partial x_1}{\partial t} \qquad (10)$$

gdje je:

ρ - gustoća kalupne mješavine, kg/m^3,

ϑ - temperatura kalupa, °C,

ϑ_0 - početna temperatura kalupa, °C,

$\overline{\vartheta_i}$ - srednja temperatura kontaktne površine kalup-litina, °C,

L_w - latentna toplina, J/kg,

W - sadržaj vlage, kg/kg,

t - vrijeme, s,

x - udaljenost, m,

Udio vlage u zoni transporta pare izražava se kao:

$$W = W_0 + \left[W_0 c_w + \left(100 - W_0\right) \cdot c_m\right] \cdot \left(\frac{100 - \vartheta_0}{L_w}\right) \qquad (11)$$

gdje je:

W - količina vlage, kg,

W_0 - količina vlage kalupa prije ulijevanja, kg,

c_w - specifični toplinski kapacitet vode na temperaturi okoline, J/kg K,

c_m - specifični toplinski kapacitet kalupne mješavine na temperaturi okoline, J/kg K.

Iz jednadžbi 7 i 10 dobiveno je:

$$\vartheta = \overline{\vartheta_i} - \frac{\overline{\vartheta_i} - 100}{erf\left(\frac{q}{2\sqrt{\overline{\alpha}}}\right)} erf\left(\frac{x}{2\sqrt{\overline{\alpha} t}}\right) \qquad (12)$$

gdje je:

erf - funkcija pogreške.

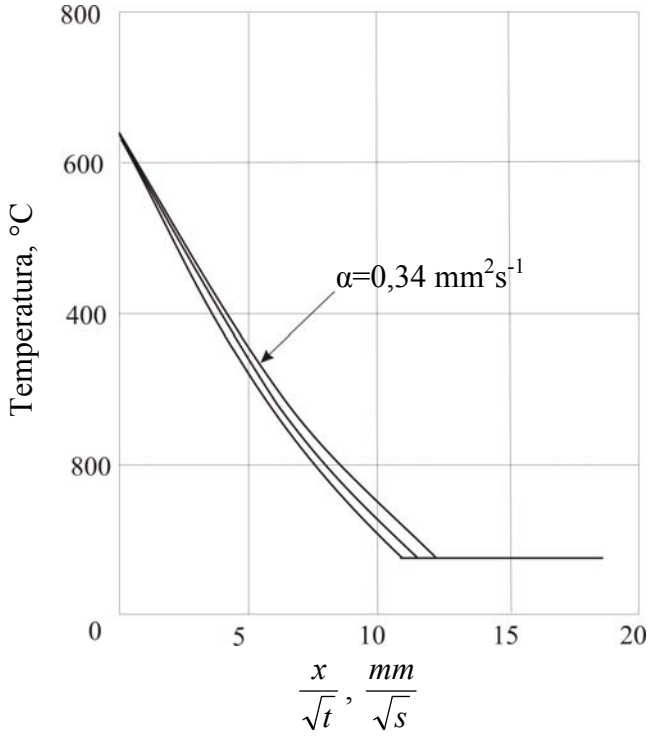
q je konstantna migracija suhe zone izražena kao:

$$q = \frac{x_1}{\sqrt{t}} \qquad (13)$$

te se q može izračunati iz:

$$\frac{\overline{b}\exp\left(\frac{-q^2}{4\overline{\alpha}}\right)}{erf\left(\frac{q}{2\sqrt{\overline{\alpha}}}\right)}\left(\overline{\vartheta}_i - 100\right) = 0{,}886 Lw\rho Wq \qquad (14)$$

Izoterme nastale pri lijevanju aluminija u jednokratni pješčani kalup izrađen od kremenog pijeska prikazane su na slici 4.48.



Slika 4.48 Izoterme pri zagrijavanju kalupa od kremenog pijeska pri lijevanju aluminija [31]

Računske vrijednosti dobivene upotrebom jednadžbe 12 poklapaju se s mjerenim rezultatima s ±5% rasipanja. U ovom slučaju $\overline{\alpha}$ definirana je s 0,34 mm^2s^{-1}. Toplinska vodljivost i difuznost mogu se izračunati preko jednadžbe 5 i 6. Emitiranje topline iz realnog kalupa može se odrediti preko:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\lambda\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right)_{x=0} = \frac{0{,}0564 \cdot \overline{b}\left(\overline{\vartheta}_i - 100\right)}{erf\left(\frac{q}{2\sqrt{\overline{\alpha}}}\right)\cdot\sqrt{t}} \qquad (15)$$

Učinkovitost hlađenja kod suhog kalupa modificirana je iz toplinske difuznosti kao:

$$\overline{b}^* = \frac{\overline{b}\left(\overline{\vartheta}_i - 100\right)}{erf\left(\frac{q}{2\sqrt{\overline{\alpha}}}\right)\cdot\left(\overline{\vartheta}_i - \vartheta_0\right)} \qquad (16)$$

4.2.1 Toplinska vodljivost kalupne mješavine

Toplinska svojstva ovisna su o temperaturi kalupne mješavine, pa tako parcijalna jednodimenzionalna diferencijalna jednadžba toplinske vodljivosti u kalupu može se prema [31] napisati kao:

$$C\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial\lambda}{\partial T}\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 \qquad (1)$$

Toplinska vodljivost može se i izraziti u obliku polinoma kao kombinacija temperatura s nepoznatim parametrom $\vec{P}$ (p_0, p_1, p_2, p_3).

$$\lambda = p_0 + p_1 T + p_2 T^2 + p_3 T^3 \qquad (2)$$

Slijedeću jednadžbu dobivamo uvrštavanjem jednadžbe (2) u (1).

$$p_0 + p_1\left\{T+\frac{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2}{\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)}\right\}+p_2\left\{T^2+\frac{2T\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2}{\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)}\right\}+p_3\left\{T^3+\frac{3T^2\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2}{\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)}\right\}=C\rho\frac{\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)}{\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)} \qquad (3)$$

Vrijednosti članova $\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x_i,t_j}$, $\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_{x_i,t_j}$ opisuju temperaturnu distribuciju u kalupu i $\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x_i,t_j}$ koji opisuje krivulje zagrijavanja kalupa.

$$Q_1=\sum_{i=3}^{7}\sum_{j=2}^{n-1}\left[p_0 + p_1\left\{T+\frac{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2}{\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)}\right\}+p_2\left\{T^2+\frac{2T\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2}{\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)}\right\}+p_3\left\{T^3+\frac{3T^2\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2}{\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)}\right\}-C\rho\frac{\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)}{\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)}\right]^2 \qquad (4)$$

Q_1 predstavlja sumu kvadrata razlika lijeve i desne strane jednadžbe [3]. $\vec{P}$ minimizira Q_1 slijedećom izrazom :

$$\frac{\partial Q_1}{\partial p_k}=0 \qquad (k = 0, 1, 2, 3) \qquad (5)$$

Ovim postupkom uz primjenu linearne optimizacije može se odrediti toplinska vodljivost iz jednadžbe 5 kao linearna ovisnost između Q_1 i $\vec{P}$ u jednadžbi (4). U sljedećem koraku Powellovom metodom najmanjih kvadrata dobiva se minimizirana funkcija Q_2:

$$Q_2 = \sum_{i=3}^{8}\sum_{j=1}^{4}\left\{T_{x_i,t_j} - T^{\bullet}{}_{x_i,t_j,p_0,p_1,p_2,p_3}\right\}^2 \qquad (6)$$

4.3 Formulacija granulometrijskog sastava

Kako bi se granulometrijski sastav kalupnog pijeska mogao prikazati kroz udio svih frakcija, a ne samo kroz pokazatelj srednje veličine zrna, potrebno je definirati izraz koji to može kvalitetno opisati. Iz tog razloga proučeni su radovi koji se bave matematičkim opisivanjem uzoraka tla.

Za opisivanje granulometrijskih parametara tla u geologiji koristile su se mnoge krivulje. Tako je Gardner [37] za opisivanju granulometrijskog sastava uzorka tla koristio dvoparametarsku, log-normal, krivulju kako bi donekle mogao opisati krivulje granulometrijskog sastava.

$$w_w = w_{rg} + (w_s - w_{rg})\cdot\left[\frac{1}{\left[1 + a_g \Psi^{ng}\right]}\right] \qquad (7)$$

gdje je:

w_s - zasićeni udio vode,

w_w - udio vode,

w_{rg} - ostatak udjela vode,

a_g - parametar prilagodbe,

n_g - parametar prilagodbe,

Ψ - uzorak tla.

Kao važniji doprinos matematičkoj formulaciji uzoraka tla smatra se model koji su 1994 godine postavili Fredlund & Xing [38]. Izraz je dobiven kako bi se u geologiji mogle matematički opisati različite vrste tla. Iz modela se na osnovi četiri parametra dobiva tkz. tlo-voda krivulja koja opisuje udio pojedinih frakcija tla.

$$w_w = w_s\left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_r}\right)}\right]\cdot\left[\frac{1}{\left\{\ln\left[\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a_f}\right)^{n_f}\right]\right\}^{m_f}}\right] \qquad (8)$$

gdje je:

w_s - zasićeni udio vode,

w_w - udio vode,

a_f - parametar prilagodbe vezan za udio zraka u uzorku tla,

n_f - parametar prilagodbe vezan za maksimum krivulja,

m_f - parametar prilagodbe vezan za zakrivljenost krivulje,

h_r - parametar prilagodbe vezan za oblik krivulje u donjem dijelu,

Ψ - uzorak tla.

5. HIPOTEZA

Granulacija kremenog pijeska je u direktnoj vezi s nastankom odlupina. Stoga na sklonost odlupljivanju utječu tlačna naprezanja koja se javljaju na temperaturama alotropske modifikacije kristala kvarca pri 570°C. Prilikom zagrijavanja kalupne mješavine potrebno je poznavati koeficijent provođenja topline te ga povezati s granulometrijskim sastavom kalupnog pijeska u cilju klasifikacije kremenih pjeskova prema sklonosti nastanka odlupina.

Prilikom pretvorbe faza, kristal kvarca mijenja svoj položaj u strukturi kremena što ima za posljedicu povećanje volumena zrna pijeska, a time i volumena samog kalupa. Iz razloga što je kalupna mješavina sastavljena od mnogo zrna pijeska povezanih vezivom, zrna se prilikom svog širenja međusobno izmiču. Izmicanje zrna može se objasniti svojstvom ugibivosti.

Matematičkom formulacijom granulometrijskog sastava kalupnog pijeska moguće je računski odrediti iznos tlačnih naprezanja, a time i klasificirati pjeskove koji su više ili manje skloni odlupljivanju s obzirom na njihov granulometrijski sastav.

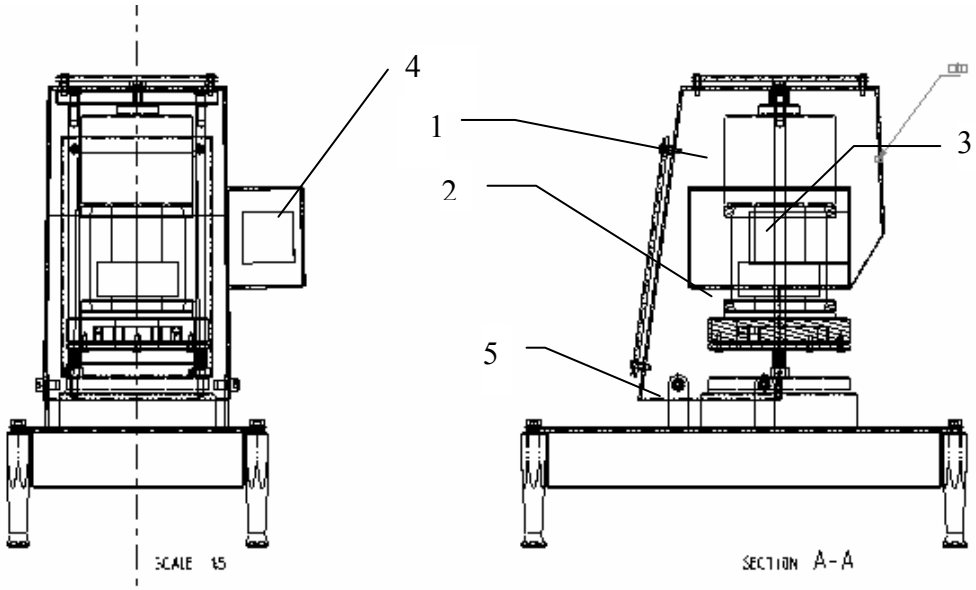
6. ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA TOPLINSKE VODLJIVOSTI KALUPNIH MJEŠAVINA

Za detaljno razumijevanje ponašanja kalupnih mješavina prilikom lijevanja odljevaka potrebno je dobro poznavati toplinska svojstva kalupnih materijala. Jedan od značajnijih parametara je toplinska vodljivost. Da bi se odredila toplinska vodljivost realnih kalupnih mješavina, konstruiran je mjerni uređaj za njeno određivanje.

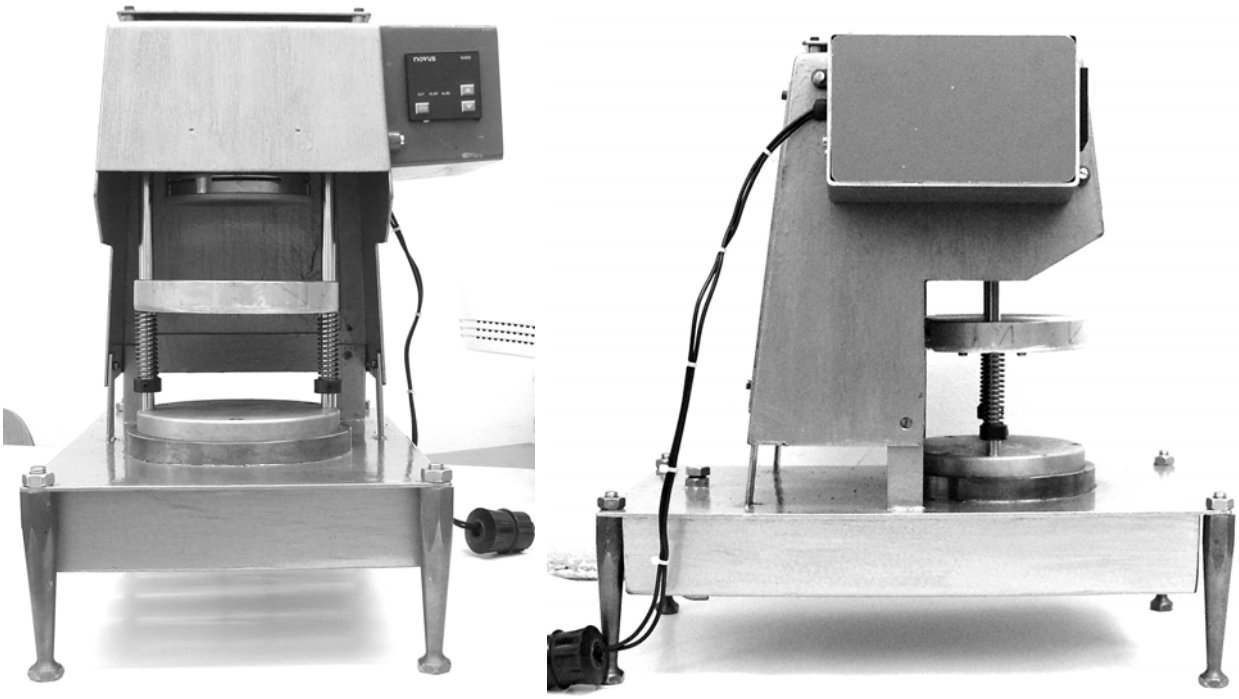
6.1 Eksperimentalno određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti

Iz razloga što se kalupna mješavina sastoji od osnovnog materijala (pijeska), veziva (bentonit, voda) i dodataka, najpouzdanije određivanje toplinskih svojstava moguće je jedino uz primjenu eksperimenta. U eksperimentalno određivanje toplinskih svojstava kalupnih mješavina pripada i mjerenje koeficijenta toplinske vodljivosti.

Određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti provedeno je na posebno konstruiranom uređaju. Osnovni dijelovi i izgled uređaja prikazani su na slikama 6.1 i 6.2. Uređaj se sastoji od ogrjevnog spremnika (1), rashladnog spremnika (2), uređaja za držanje uzorka (3), mikrokontrolerskog regulatora temperature (4) i kućišta (5). Temperatura se mjeri pomoću K-tipa termoparova te se izmjerene vrijednosti zapisuju u računalo. Učestalost uzorkovanja prilikom mjerenja temperature uzorka kalupne mješavine je jedna sekunda.



Slika 6.1 Skica mjernog uređaja za određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti



Slika 6.2 Fotografije mjernog uređaja za određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti.

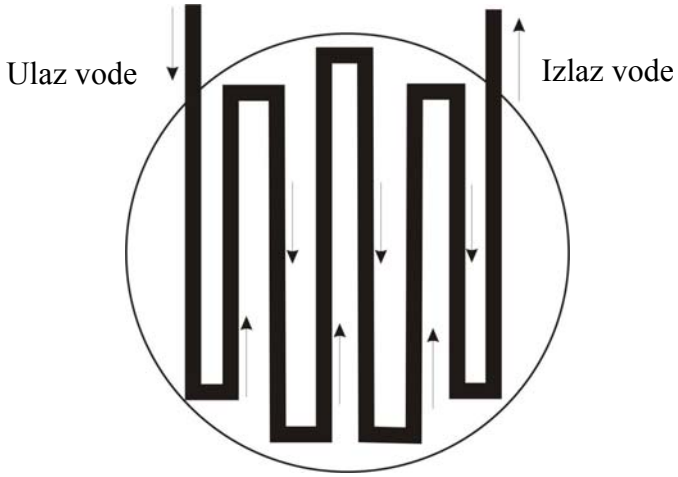
Na temelju mjerenja određuje se koeficijent toplinske vodljivosti koji je različit za pojedine pjeskove, a ovisi o udjelu pojedinih frakcija.

6.1.1 Ogrjevni spremnik

Kao izvor topline korišten je električni grijač snage 2 kW promjera ploče 90 mm. Kontaktna površina koja odaje toplinu ispitnom uzorku je debljine 6 mm i izrađena je od čelika. Na čeličnu ploču pričvršćeno je mjerno osjetilo temperature Pt100 s mogućnošću prepoznavanja temperatura od -200 do 530 ºC. Mjerno osjetilo direktno je spojeno na mikrokontrolerski regulator temperature (4) koji koristi izmjerenu vrijednost za održavanje konstantne temperature ploče ogrjevnog spremnika.

6.1.2 Rashladni spremnik

Odvođenje topline iz uzorka riješeno je upotrebom rashladnog spremnika koji je načinjen od aluminija. S donje strane načinjeni su kanali kojima protječe voda. Protjecanje vode konstantne ulazne temperature osigurava konstantnu temperaturu rashladnog spremnika preuzimajući tako toplinski tok koji se prenosi iz ogrjevnog spremnika kroz uzorak. Shematski prikaz kanala kojima protječe voda prikazan je na slici 6.3.



Slika 6.3 Shematski prikaz protjecanja vode kroz rashladni spremnik

Iz protoka vode i razlike u temperaturi na ulazu i izlazu iz rashladnog spremnika može se izračunati količina topline koja je predana vodi kroz uzorak u jedinici vremena.

6.1.3 Mehanizam za držanje uzorka

Za korektno mjerenje potrebno je ostvariti potpuni kontakt između uzorka, rashladnog i ogrjevnog spremnika. Ogrjevni spremnik kruto je pričvršćen za kućište mjernog uređaja. Rashladni spremnik može se pomicati gore-dolje i naginjati oko osi uzorka u svim smjerovima. Pomicanje gore-dolje omogućava se lako postavljanje i vađenje ispitnog uzorka te otvara mogućnost mjerenja na ostalim nestandardnim uzorcima različitih visina. Mogućnost naginjanja rashladnog spremnika omogućava bolje prijanjanje uzorka uz ogrjevne plohe. Time se osigurava potpuni i ravnomjerni kontakt uzorka s toplinskim spremnicima. Mehanizam za držanje uzorka zajedno s uzorkom prikazan je na slici 6.4.



Slika 6.4 Mehanizam za držanje uzorka

6.1.4 Mikrokontrolorski regulator temperature

Regulacija temperature ogrjevnog spremnika izvodi se uz pomoć mikrokontrolerskog regulatora prikazanog na slici 6.5. Osnovna funkcija regulatora je postizanje i držanje željene temperature ogrjevnog spremnika.



Slika 6.5 Regulator temperature N480

Karakteristike regulatora:

- Dimenzije: 48 x 48 x 106 mm (1/16 DIN)
- Težina: 160 g (tri releja)
- Napajanje: 85 do 264 Vdc/ac, 50/60Hz, 3 VA max.
- Radni uvjeti: 0º do 55 ºC, vlažnost 20 % do 85%

Senzor temperature:

- Pt100, mjerna struja 170 µA
- Termopar ulazni odabir: 10 MΩ.
- A/D rezolucija 15000.
- Uzorkovanje: 10 mjerenja u sekundi.

- Točnost: 0,2 % za Pt100.
- Vremenska konstanta 200 do 300 ms.

6.1.5 Spremnik za vodu

Bazu mjernog uređaja sačinjava spremnik za vodu. Načinjen je kao spremnik dimenzija 300 x 500 x 100 mm. Ukoliko se mjere uzorci kojima bi ovaj volumen spremnika bio premalen on se može proširiti s dodavanjem jednog ili više vanjskih. Voda konstantne temperature iz spremnika koristi se za održavanje konstantne temperature u rashladnom spremniku.

6.1.6 Spojne cijevi

Voda se iz spremnika malom pumpom odvodi kroz plastične cijevi do prvog mjernog mjesta gdje se 100 mm prije ulaska u rashladni spremnik termoparom mjeri temperatura vode. Nakon prolaska vode kroz rashladni spremnik voda prima određenu količinu topline i zagrijava se. Na izlazu iz rashladnog spremnika dolazi do drugog mjernog mjesta gdje se mjeri izlazna temperatura vode. Voda se nakon prolaska kroz drugo mjerno mjesto sakuplja u menzuru. Na temelju vremena mjerenja, ulazne i izlazne teperature vode, te količine vode koju smo odredili uz pomoć menzure može se izračunati toplinski tok kroz uzorak potreban za izračunavanje koeficijenta toplinske vodljivosti.

6.1.7 Kućište

Kućište uređaja izrađeno je od čeličnog lima debljine 2 mm koje ima ulogu prihvata ogrjevnog i rashladnog spremnika, mehanizma za držanje uzorka, mikrokontrolera te svih ostalih dijelova koji služe za provedbu mjerenja. Otvori ujedno omogućavaju lakšu montažu i servis uređaja.

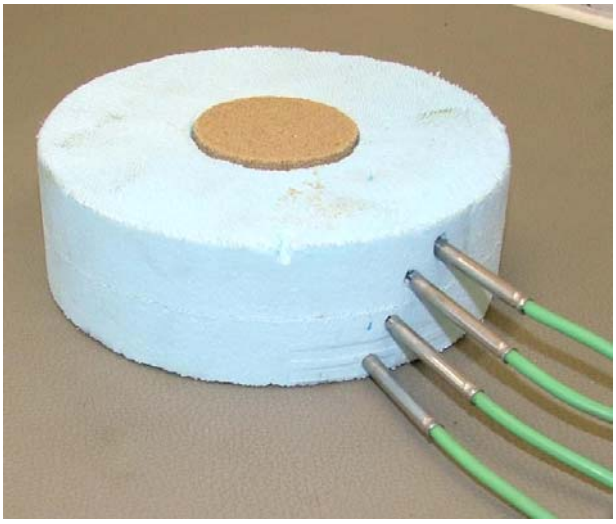
Opisana mjerna oprema prikazana je slikom 6.6.



Slika 6.6 Mjerna oprema za eksperimentalno određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti

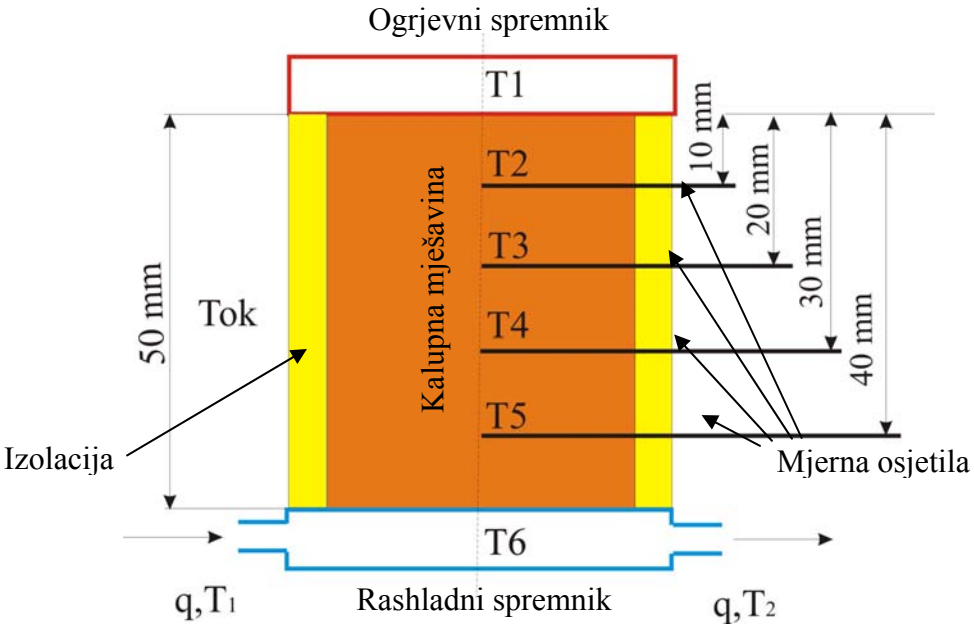
6.2 Rezultati mjerenja koeficijenta toplinske vodljivosti

Za mjerenje koeficijenta toplinske vodljivosti korišteni su standardni ispitni uzorci promjera 50 mm i visine 50 mm izrađeni od kalupne mješavine, prikazani na slici 6.7. Kalupna je mješavina sastavljena od kremenog pijeska, 6% bentonita i 4% vode. Udjeli bentonita i vode konstantni su za sva tri uzorka. Uzorci su označeni s M1, M2 i M3 različiti su po granulaciji pijeska.



Slika 6.7 Izolirani uzorak kalupne mješavine za mjerenje toplinske vodljivosti

Shematki prikaz uzorka kalupne mješavine na uređaju prikazan je na slici 6.8



Slika 6.8 Shematski prikaz uzoraka na mjernom uređaju

Nakon provedenih mjerenja na tri osnovna uzorka dobiveni su sljedeći rezultati prikazani u tablici 6.1:

Tablica 6.1 Podaci o sastavu kalupnih mješavina i izmjerena temperatura

Kalupna mješavina	**M1**	**M2**	**M3**
Granulacija	**0,1**	**1**	**0,4**
Masa , kg	0,5	0,5	0,5
Bentonit, g	30	30	30
Voda, g	21,5	21,5	21,5
Maseni protok, kg/h	0,45	0,7	0,38
Temperatura u osi uzorka			
ϑ_1 ,°C	300	300	300
ϑ_2 , °C	225	226	211
ϑ_3 , °C	155	171	149
ϑ_4 , °C	98	91	92
ϑ_5 , °C	62	61	62
ϑ_6 rs , °C	34	32	36
$\Delta\ \vartheta v$, °C	6	6	7

Na osnovi rezultata prikazanih tablicom 6.1 te uz izraz:

$$\phi_{uk} = q_V \cdot c_v \cdot \Delta\vartheta_v$$

gdje je:

Φ_{uk} - ukupan toplinski tok kroz uzorak, W

q_v - maseni protok vode, kg/s,

c_v - specifični toplinski kapacitet vode, J/kgK,

$\Delta\ \vartheta_v$ - razlika temperatura vode na ulazu i izlazu iz rashladnog spremnika, °C.

Koeficijent toplinske vodljivosti kalupne mješavine može se odrediti iz izraza:

$$\lambda_i = \frac{\phi_{uk} \cdot (x_{i+1} - x_i)}{(\vartheta_i - \vartheta_{i+1}) \cdot A_u}$$

gdje je:

λ - koeficijent toplinske vodljivosti, W/mK,

Φ_{uk} - ukupan toplinski tok kroz uzorak, W,

x - udaljenost dva mjerna mjesta, m,

ϑ - temperatura mjernih mjesta, ^{o}C,

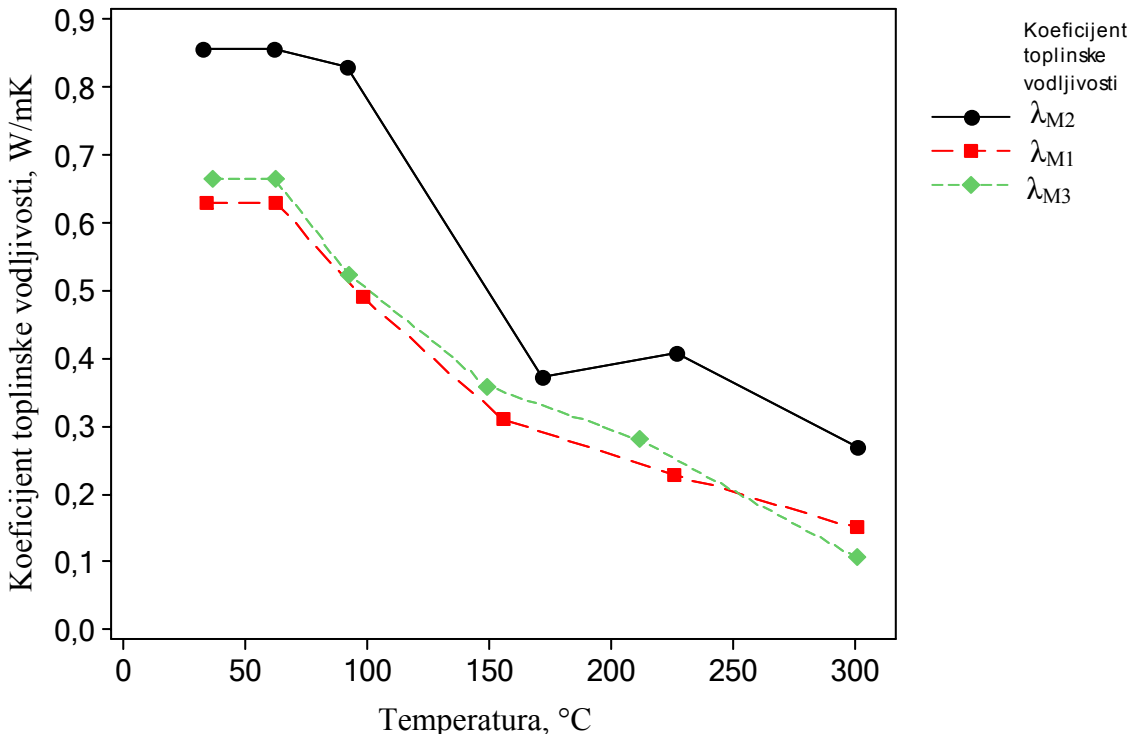
A_u - površina poprečnog presjeka uzorka, m,

i - broj mjernog mjesta.

Izračunati koeficijenti toplinske vodljivosti svakog uzorka kalupne mješavine mogu se prikazati tablicom 6.2. Koeficijenti toplinske vodljivosti u prvom redu označeni s indeksom 1 vrijede za mjerni interval od mjernog mjesta ϑ_1 do ϑ_2 za svaku od ispitivanih kalupnih mješavina. U drugom redu koeficijenti toplinske vodljivosti označeni su s indeksom 2 i opisuju mjerni interval od ϑ_2 do ϑ_3, itd.

Tablica 6.2 Vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti za tri kalupne mješavine različite granulacije

Indeks	**M1-Lam** λ, W/mK	**M2-Lam** λ, W/mK	**M3-Lam** λ, W/mK
1	0,629	0,857	0,664
2	0,489	0,830	0,523
3	0,309	0,372	0,358
4	0,228	0,407	0,279
5	0,149	0,269	0,105



Slika 6.9 Grafički prikaz rezultata mjerenja koeficijenta toplinske vodljivosti mješavina različitih granulometrijskih sastava.

Izmjerene toplinske vodljivosti različlitih uzoraka kalupne mješavine prikazane su grafički na slici 6.8.

Kako bi se pokazao utjecaj pojedinih veličina na mehanizme izmjene topline načinjena je numerička simulacija zagrijavanja standardnog uzorka kalupne mješavine na mjernom uređaju uz pomoć programskog paketa FLUENT 6.2. opisanih u poglavlju 10.

6.3 Mjerna nesigurnost

Prilikom svakog mjerenja dolazi do odstupanja od stvarnih vrijednosti mjerene veličine. Mjerna nesigurnost je brojčani iskaz kvalitete mjernog rezultata. Iskazuje se standardnom devijacijom (standardna mjerna nesigurnost, *u*), ili višekratnikom standardne devijacije (proširena mjerna nesigurnost, *U*). Mjerna nesigurnost određuje raspon vrijednosti unutar kojega očekujemo da se nalazi (prava) vrijednost veličine.

Uzroci odstupanja najbolje procjene mjerne veličine od (prave) vrijednosti mnogobrojni su. Mogu se podijeliti na slučajna i sistematska odstupanja. Prema metodi procjenjivanja komponente nesigurnosti mogu se podijeliti u dvije grupe:

A) Komponente koje se određuju s pomoću statističkih metoda na temelju eksperimentom dobivene razdiobe učestalosti (frekvencije) ponovljenim mjerenjima dobivenih mjernih rezultata.

B) Komponente koje se procjenjuju na druge načine, a najčešće su to procjene ekvivalentne standardne devijacije na temelju pretpostavljene razdiobe učestalosti.

Ukupnu nesigurnost možemo iskazati kao drugi korijen iz zbroja kvadrata pojedinih komponenata.

$$u = \sqrt{u_A{}^2 + u_B{}^2 + u_C{}^2 + \ldots + u_i{}^2}$$

6.3.1 Procjena B-tipa mjerne nesigurnosti

Procjena nesigurnosti B-tipa temelji se na:

- specifikacijama mjerne opreme,
- podacima o umjeravanju (baždarenju) mjerila,
- podacima o nesigurnosti upotrijebljenih konstanti,
- podacima o ponovljivosti i obnovljivosti mjernog procesa,
- podacima o ranije provedenim sličnim mjerenjima,
- iskustvu i znanju o svojstvima relevantnih mjerila i mjernih objekata,
- procijeni nesigurnosti ispravaka.

Prilikom mjerenja, kvaliteta mjernih rezultata iskazivala na više načina:

- graničnim pogreškama (granicama pogrešaka) izravno mjerene veličine,
- (starom) mjernom nesigurnošću ispravljenog rezultata dobivenog više puta
- ponovljenim izravnim mjerenjima koja su se iskazivala intervalom pouzdanosti
- (starom) mjernom nesigurnošću mjernog procesa, za mjerne rezultate dobivene jednim
- mjerenjem poznatim - ranije korištenim ili normiziranim mjernim postupkom,
- sigurnim graničnim pogreškama posredno mjerene veličine,
- statističkim graničnim pogreškama posredno mjerene veličine.

Nabrojeni iskazi nisu međusobno usklađeni i otežavaju ili onemogućuju izravnu usporedbu kvalitete na razne načine iskazanih mjernih rezultata. Zato se danas kvaliteta

mjernog rezultata iskazuje mjernom nesigurnošću, a kvaliteta mjerila (mjernih instrumenata, mjernih uređaja i mjerki) graničnim pogreškama.

Budući da su izvori podataka različiti, podaci mogu biti različito iskazani, pa ih treba preračunati u nesigurnost iskazanu standardnom devijacijom (unificirati).

6.3.2 Procjena nesigurnosti iz graničnih pogrešaka

U specifikacijama mjerila obično su navedene točnosti, odnosno granične pogreške. Iskazivanje graničnih pogrešaka različito je za analogna i digitalna mjerila.

Podatak o graničnim pogreškama ($\pm G$) ne sadrži informaciju o stvarnoj vrijednosti pogreške mjerila s kojim mjerimo. Zato, u slučaju kada nemamo informaciju o razdiobi pogrešaka svih (ispravnih) mjerila iz određene proizvodnje, pretpostavljamo da su sve izmjerene vrijednosti (izmjerene bilo kojim mjerilom iz te proizvodnje, M) unutar raspona koji omeđuju granice pogrešaka (M -G i M +G) jednako vjerojatne, a izvan tih granica nemoguće. Takva se razdioba naziva pravokutna razdioba. Standardna devijacija pojedinih očitanja koja su jednako vjerojatna u intervalu iznosi:

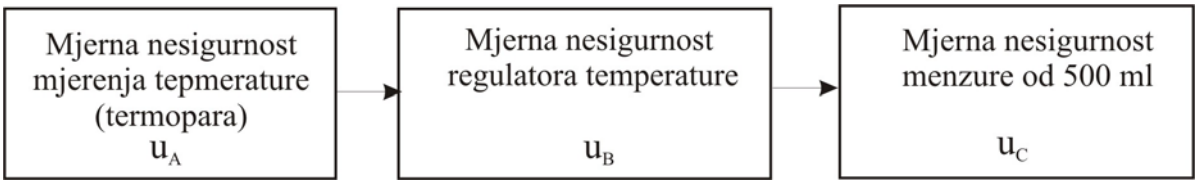
$$s = \frac{G}{\sqrt{3}}$$

Kako se mjerna nesigurnost iskazuje standardnom devijacijom, vrijedi:

$$u_B = \frac{G}{\sqrt{3}}$$

Na ovaj se način procjenjuju nesigurnosti B-tipa, kada raspolažemo graničnim pogreškama mjerila, statističkim granicnim pogreškama, podacima o histerezi mjerila, razlučivosti, kvantizaciji i zaokruživanju. Kada raspolažemo sigurnim granicama pogrešaka, mjernu nesigurnost procjenjujemo tako da sigurnu graničnu pogrešku podijelimo s 3.

Za iskazivanje mjerne nesigurnosti koeficijenta toplinske vodljivosti korištena je metoda procjene B-tipa mjerne nesigurnosti. Na temelju mjernih uređaja koji su provodili mjerenje mjernu liniju možemo shematski prikazati (slika 6.10).



Slika 6.10. Shematski prikaz mjerne linije

Prema izrazu uvrštavajući mjerne nesigurnosti $u_A = 0{,}02$, $u_B = 0{,}02$ i $u_C = 0{,}1$ u izraz

$$u = \sqrt{u_A^{\,2} + u_B^{\,2} + u_C^{\,2}}$$

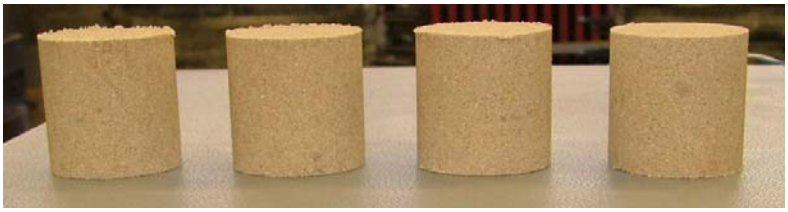
dobiva se mjerna nesigurnost mjerenja koeficijenta toplinske vodljivosti $u = 0{,}1$.

7. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE TEMPERATURNIH POLJA

Kako bi promatranje zagrijavanja uzorka kalupne mješavine bilo u skladu s realnim uvjetima u kojima se nalazi kalupna mješavina potrebno je za zagrijavanje uzorka koristiti rastaljeni metal. Za provedbu zagrijavanja uzorka u ovom radu korištene su litine sivog lijeva i aluminija.

7.1 Kalup s uzorcima

Mjerenja su izvedena na standardnim uzorcima kalupne mješavine. Standardni uzorak ima oblik valjka promjera 50 mm i visine 50 mm. Uzorak je smješten u posebno izrađen kalup kako bi se na bočnim stjenkama uzorka osigurao što manji intenzitet izmjene topline.



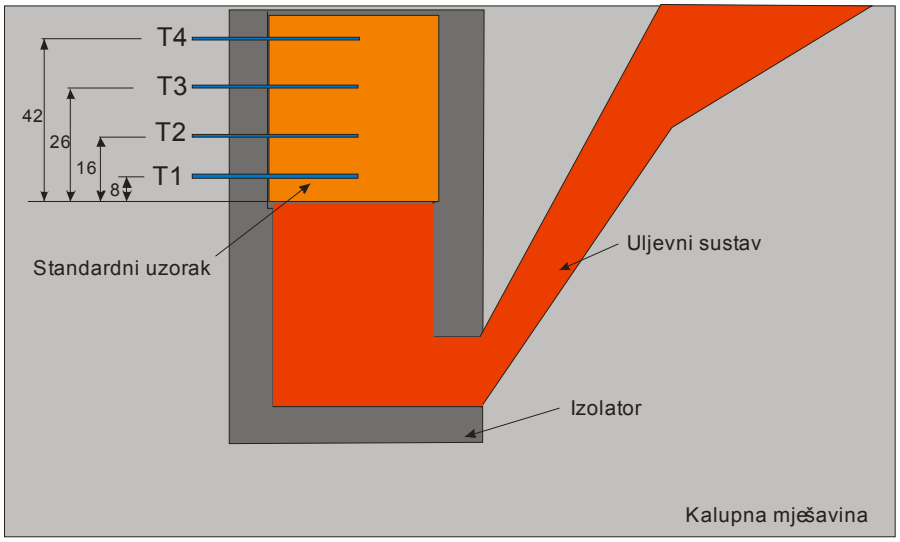
Slika 7.1 Uzorci kalupne mješavine (50 mm x 50 mm) spremni za mjerenje

Standardni uzorak izrađuje se od 150 grama kalupne mješavine, sabija s tri udarca na sabijalici. Tako pripremljeni uzorci umeću se u kalup, slika 7.2.



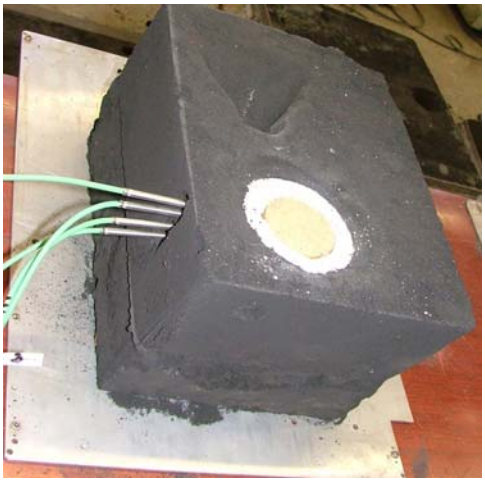
Slika 7.2 Umetanje uzorka u kalup

Kalup mora osigurati kontrolirane uvijete izmjene topline na način da svu toplinu usmjeri kroz uzorak kalupne mješavine. Presjek kalupa prikazan je slikom 7.3.



Slika 7.3 Shematski prikaz kalupa - presjek

U uzorku su prilikom kalupljenja napravljena četiri otvora promjera 1 mm točno do njegove osi. U te otvore se prije samog mjerenja, a nakon umetanja uzorka u kalup postavljaju mjerna osjetila. Kao mjerna osjetila koriste se temoparovi tip.K (Ni-NiCr). Razmak između prva dva termopara je 8 mm. Između drugog i trećeg 10 mm, između trećeg i četvrtog 16 mm.Prvi i četvrti termopar udaljen je od površine uzorka 8 mm što je minimalna udaljenost pri kojoj ne dolazi do destrukcije površine standardnog uzorka.



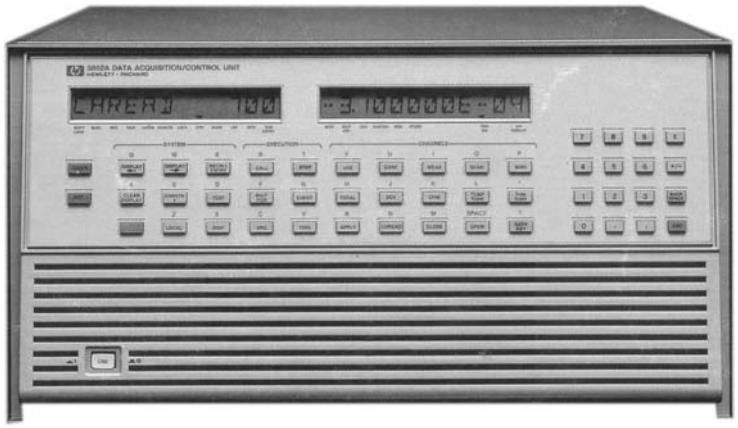
Slika 7.4 Kalup s mjernim osjetilima i uzorkom



Slika 7.5 Unutrašnjost kalupa s mjernim osjetilima bez uzorka

7.2 Oprema za mjerenje

Za prikupljanje mjernih podataka korišteno je računalo povezano s HP mjernom centralom. Mjerna centrala proizvođača Hewlett Pakard model HP3852A namijenjena je za prikupljanje naponskih i strujnih signala. Osim prikupljanja podataka HP3852A ima mogućnost obrade rezultata te regulacije procesa. Uređaj je prikazan je slikom 7.6.



Slika 7.6 Mjerna centrala HP 3852A

Za potrebe ovog rada mjerna centrala korištena je isključivo u svrhu prikupljanja naponskog signala s osjetila temperature. Tako dobiveni signal spreman je u toku mjerenja u memoriju uređaja da bi na kraju bio poslan računalu. Računalo je prihvaćene podatke spremalo u posebnu datoteku.

Cijela mjerna oprema zajedno s uzorcima složena je prema slici 7.7.



Slika 7.7 Postav mjerne opreme i kalupa

Nakon ulijevanja litine slijede mjerenja. Izgled kalupa u procesu mjerenja prikazan je na slikama 7.8 i 7.9.



Slika 7.8 Aluminij prilikom mjerenja



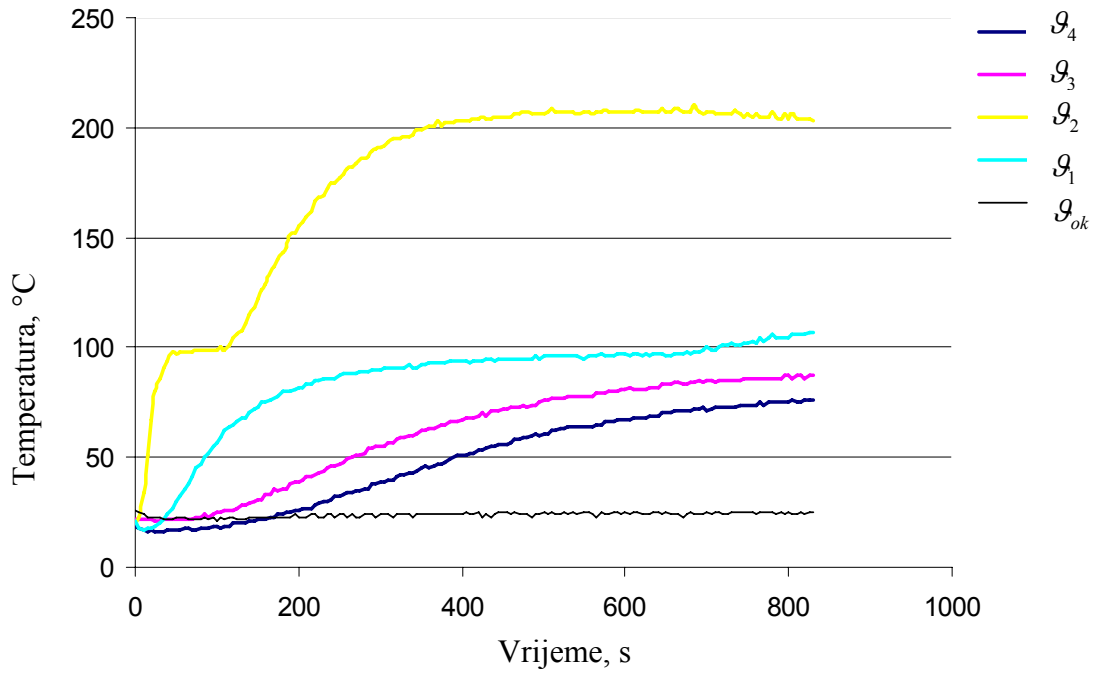
Slika 7.9. Sivi lijev prilikom mjerenja

Iz slika 7.8 i 7.9 jasno je vidljivo kako kalup u kojeg je uliven sivi lijev ispucao. Zbog veće količine energije koja je unesena u kalup zagrijalo se i više kalupne mješavine na temperaturu alotropske modifikacije kremenog pijeska i tako povećao svoj volumen. Povećanje volumena kalupne mješavine rezultiralo je pucanjem kalupa.

7.3 Zagrijavanje uzorka litinom aluminija

Za prvo mjerenje kao medij s kojim zagrijavamo uzorak kalupne mješavine korišten je aluminij. Uljevna temperatura aluminija iznosila je 750°C. Rezultati mjerenja prikazani su tablicom 13.1 danom u prilogu.

Grafička interpretacija rezulata zagrijavanja uzorka kalupne mješavine dana je slikom 7.10.

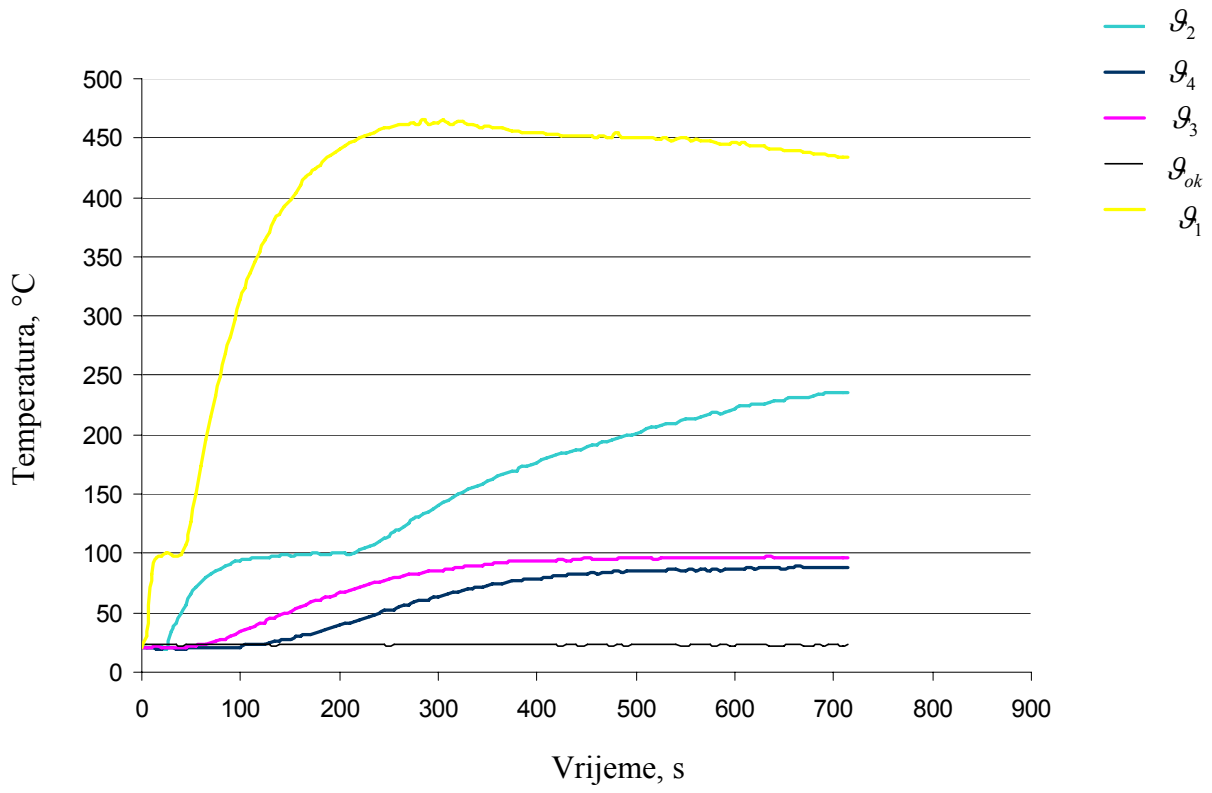


Slika 7.10 Zagrijavanje kalupa litinom aluminija, uljevne temperature 750°C.

Za vrijeme mjerenja ukupno je promatrano pet mjernih mjesta u uzorku. Prvo mjerno mjesto nalazilo se u uzorku kalupne mješavine koji se zagrijavao litinom aluminija na svega 8 mm od kontaktne površine. Tijek porasta temperature uzorka u toj točki može se vidjeti na slici 7.10. Interval koji pokazuje stagnaciju temperature ϑ_1 i ϑ_2 opisuje pojavu isparavanja što se vidi sa slike 7.10. Dinamiku zagrijavanja uzorka može se simulirati i postavljanjem numeričkog modela. Podrobnije o rezultatima numeričke simulacije zagrijavnja uzorka može se vidjeti u desetom poglavlju.

7.4 Zagrijavanje uzorka litinom sivog lijeva

Za drugo mjerenje kao medij s kojim zagrijavamo uzorak kalupne mješavine korišten je sivi lijev. Uljevna temperatura sivog lijeva iznosila je 1350 °C. Rezultati mjerenja prikazani su tablicom 13.3 danom u prilogu.



Slika 7.11 Zagrijavanje kalupa litinom sivog lijeva, uljevne temperature 1350 °C.

Za vrijeme mjerenja ukupno je promatrano pet mjernih mjesta u uzorku. Prvo mjerno mjesto nalazilo se u uzorku kalupne mješavine koji se zagrijavao litinom sivog lijeva na svega 8 mm od kontaktne površine. Tijek porasta temperature uzorka u toj točki može se vidjeti na slici 7.11. Interval koji pokazuje stagnaciju temperature mjernih mjesta ϑ_1, ϑ_2, ϑ_3 i ϑ_4 opisuje pojavu isparavanja što se vidi sa slike 7.11. Dinamiku zagrijavanja uzorka može se simulirati i postavljanjem numeričkog modela. Podrobnije o rezultatima numeričke simulacije zagrijavnja uzorka može se vidjeti u desetom poglavlju.

8. TEMPERATURNO ISTEZANJE KALUPNIH MJEŠAVINA

Različiti granulometrijski sastav kalupnog pijeska uzrokuje i drugačija pakiranja zrna pijeska u kalupnoj mješavini. Stoga je važno ispitati koji granulometrijski sastavi općenito uzrokuju veće, a koji manje temperaturnog istezanja kalupne mješavine pri temperaturama alotropske modifikacije. Uz općenito određivanje granulometrijskog sastava u ovom poglavlju opisat će se i pojam ugibivosti kalupnih mješavina.

8.1 Određivanje temperaturnog istezanja kalupnih mješavina

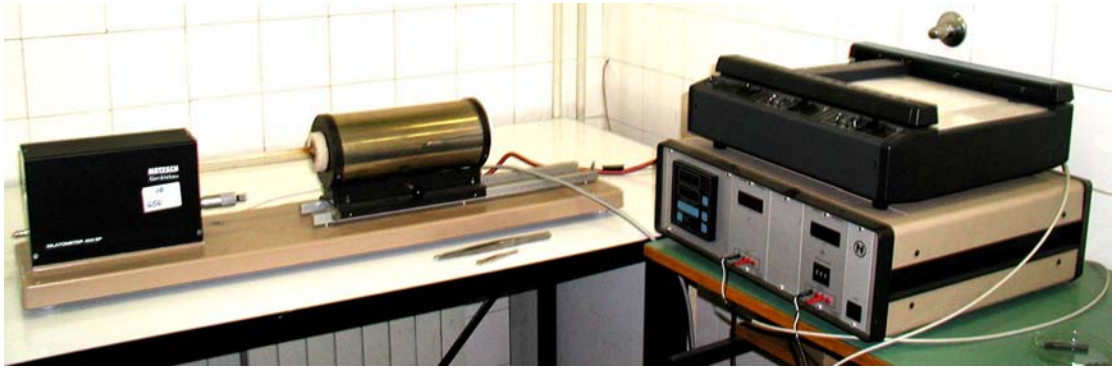
Za određivanje temperaturnog istezanja kalupnih mješavina napravljena su četiri uzorka G1, G2, G3, G4. Uzorak G1 sastavljen je od jednolike granulacije promjera 0,1 mm. Uzorak G2 sastavljen je od jednolike granulacije promjera 0,6 mm. Mješavine G3 i G4 načinjene su kombinacijom prethodne dvije frakcije na način da je mješavina G3 sastavljena od 50% G1 i 50% G2. Mješavina G4 načinjena je od 33% G2 i 67 % frakcije G1. Uzorci su izrađeni kao cilindri promjera 12 mm ukupne dužine 50mm.

Na svim uzorcima provedena su mjerenja temperaturnog istezanja. Mjerenja su izvršena na elektroničkom dilatometru Netzsch 402 EP.



Slika 8.1 Uzorci kalupne mješavine na kojima je mjereno temperaturno istezanje

Prednost dilatometričkih ispitivanja je u činjenici da se neke strukturne pojave utvrđuju “in situ”, tj. upravo u času kada do njih dolazi (vremenski i temperaturno), što se npr. mikrografskim ispitivanjima ne može ostvariti jer ona daju samo mogućnost saznanja “post festum”, tj. nakon što se neka pretvorba ostvarila.



Slika 8.2 Izgled elektroničkog dilatometra Netzsch 402 EP

Elektronički dilatometar Netzsch 402 EP (slika 8.2) omogućuje kontinuirano mjerenje i praćenje promjene duljine ovisno o temperaturi epruvete. Duljiine epruveta su od 25 do 50 mm i promjera od 3 do 12 mm.

Osnovne karakteristike dilatometra su :

- temperatura ispitivanja je moguća u intervalu od 20 do max. 1100 ℃,
- brzina zagrijavanja je podesiva u koracima od 1 K/min,
- brzina hlađenja je podesiva u koracima od 1 K/min.

Pomoću dobivenih dilatograma može se izračunati koeficijent temperaturnog istezanja ispitivanog materijala. Često se koriste različite definicije za koeficijent temperaturnog istezanja. U praksi je najčešće interesantan prosječni koeficijent temperaturnog istezanja za određeno temperaturno područje.

$$\text{prosječni koeficijent temperaturnog istezanja} = \frac{\text{relativna promjena duljine}}{\text{temperaturni interval}}$$

$$\bar{\alpha}(T_1, T_2) = \frac{D_P(T_2) - D_P(T_1)}{D_P(T_2)} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1}$$

gdje je:

$\bar{\alpha}(T_1, T_2)$ - prosječni (relativni) koeficijent temperaturnog istezanja za temperaturno područje između T_1 i T_2 ($T_1 < T_2$), K^{-1}

$D_P(T_1)$ - duljina epruvete pri temperaturi T_1, mm

$D_P(T_2)$ - duljina epruvete pri temperaturi T_2, mm

T_1 , T_2 - temperature epruvete, K

Kao referentna duljina uzima se početna duljina epruvete pri početnoj temperaturi sobna temperatura. Treba voditi računa da je koeficijent temperaturnog istezanja svojstvo materijala koje ovisi o temperaturi i nije konstanta.

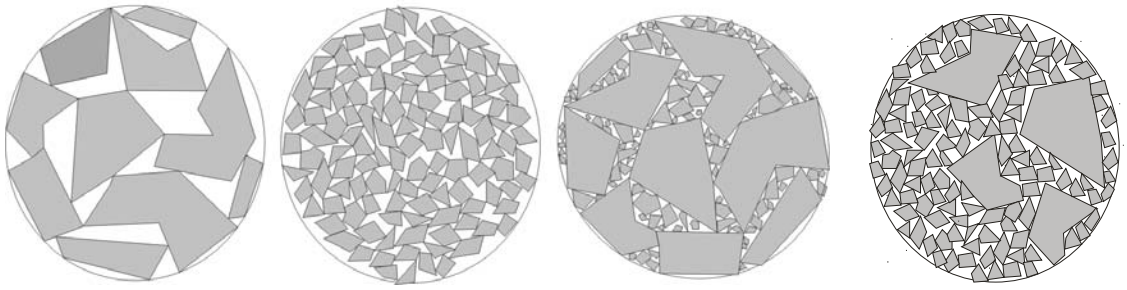
8.2 Rezultati dilatomerijskih ispitivanja kalupne mješavine

Kalupna mješavina, točnije osnovni materijal (pijesak), prilikom kalupljenja slaže se u određenu strukturu. Slaganje pijeska ovisno je o nekoliko parametara kao što su veličina i oblik zrna. Pod pojmom veličine zrna podrazumijeva se granulometrijski udio pojedinih frakcija u pijesku. Raspored zrna prikazan je na slikama iz kojih se jasno vidi kako granulometrijski sastav i oblik zrna osnovnog materijala gradi strukturu kalupne mješavine.

Nakon provedenih ispitivanja dobiveni su rezultati koji su prikazani na slici 8.4. Iz rezultata proizlazi da mješavina G2 sastavljena od krupnije frakcije unosi veća naprezanja prilikom zagrijavanja na temperaturu transformacije nego što to čini sitni pijesak. Maksimalna temperaturno istezanje pri temperaturi transformacije za uzorak G2 je oko 940 μm, dok za uzorak G1 iznosi 550 μm. Uzorak G3 koji sadrži jednake udjele krupnog i sitnog pijeska dilatira zagrijavanjem na 1210 μm, dok uzorak G4 koji ima 1/3 krupnog pijeska i 2/3 sitnog pijeska dilatira za 720 μm.

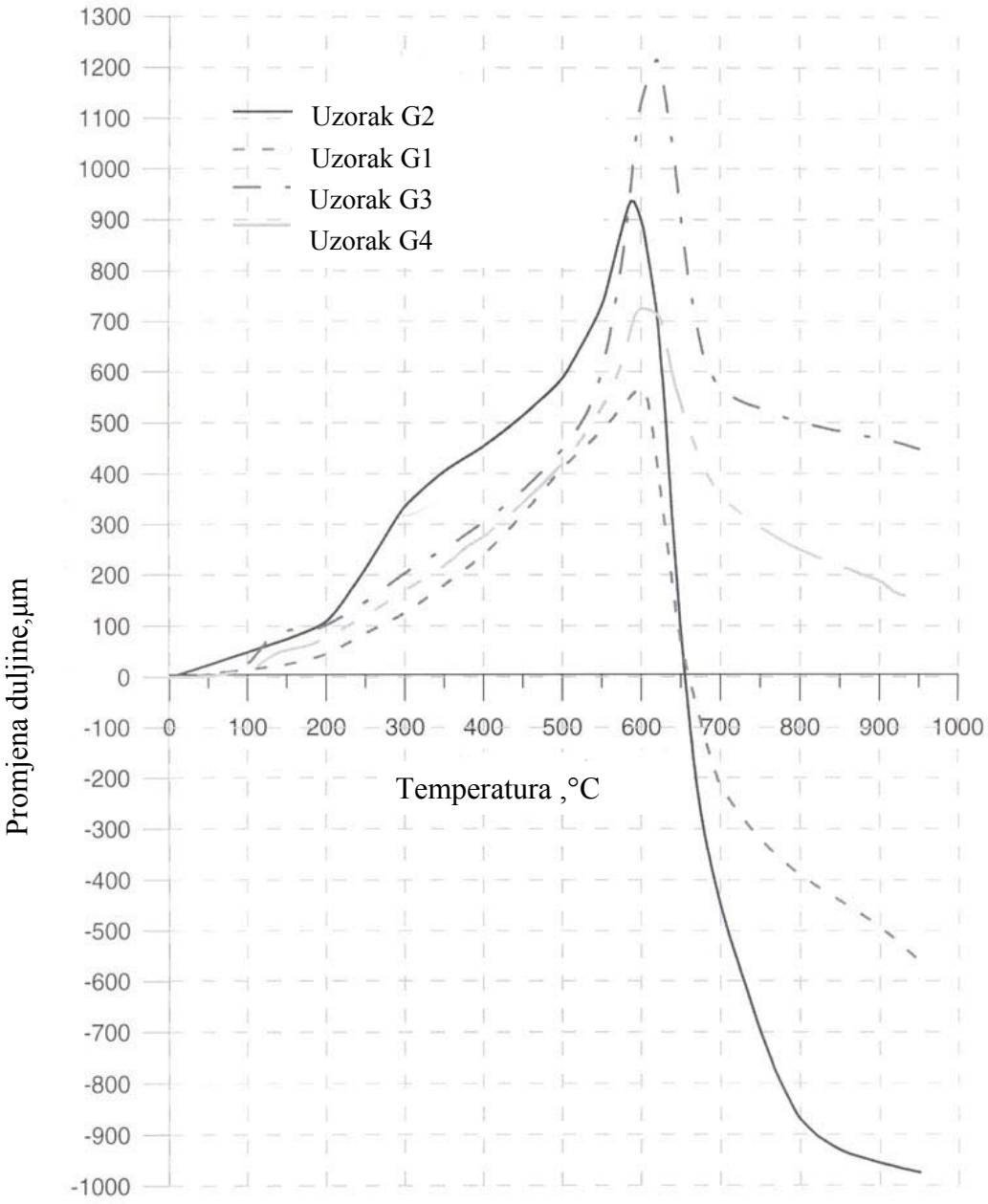
Razlog različitih temperaturnih istezanja pri kombinaciji udjela frakcija nalazi se u kontaktnim površinama između zrna pijeska kalupne mješavine. Kombinacijom slaganja zrna prilikom miješanja kalupne mješavine dolazi do formiranja strukture zrna koje preko svojih kontaktnih površina prenose dilataciju na rubove uzorka. Temperaturno istezanje se ne prenosi uvijek u svojoj maksimalnoj vrijednosti.

Uzrok smanjenju maksimalne vrijednosti temperaturnog istezanja su međusobni pomaci pojedinih frakcija pijeska. Svojom rotacijom frakcije se međusobno izmiču jedna drugoj i namještaju u novu strukturu. *Efekt namještanja frakcija pri procesu nastanka unutarnjih naprezanja možemo nazvati i efektom ugibanja.*



Slika 8.3-a Uzorak G2 Slika 8.3-b Uzorak G1 Slika 8.3-c Uzorak G3 Slika 8.3-d Uzorak G4

Slika 8.3 Različita struktura pakiranja kalupne mješavine – ispitnih uzoraka



Slika 8.4 Rezultati dilatometrijskih ispitivanja kalupne mješavine

Kao rezultat promatranja temperaturnog istezanja kalupnih mješavina može se zaključiti da će svaka kalupna mješavina s obzirom na svoj granulometrijski sastav imati veću ili manju sposobnost unutarnjeg namještanja zrna tj. veću ili manju ugibivost.

9. ODREĐIVANJE SKLONOSTI ODLUPLJIVANJA KALUPNIH MJEŠAVINA

9.1 Uzorci pijeska korišteni u istraživanju

Za istraživanje mehanizma odlupljivanja korištena su tri uzorka pijeska različitih granulometrijskih sastava. Granulometrijski sastav sva tri uzorka pijeska pomno je odabran kako bi se sva tri uzorka pijeska mogla koristiti u ljevaoničkoj proizvodnji pri izradi kalupa, a ujedno da su međusobno dovoljno različita.

Pod postupkom pripreme uzorak podrazumijeva se prosijavanje u svrhu odvajanja nečistoća (korjenja, stijena, i dr.). Za ispitivanje su uzeta tri različita uzorka pijeska označena s G1, G2 i G3. Svaki uzorak potrebno je prije ispitivanja dobro osušiti na temperaturi od 105 do 110 ºC. Iz tako osušenog uzorka uzima se odvaga koja po standardu iznosi 20 g i stavlja se na najgornje (najveća okna) sito rešetalice. Za granulometrijsku analizu korištenu u ovom radu uzet je uzorak od 60 g kako bi se dobila veća točnost mjerenja. Nakon prosijavanja otvaraju se sita te se mjeri količina pijeska na svakom situ i unosi u tablicu.
Rezultati granulometrijske analize prikazani su tablicom 9.1.

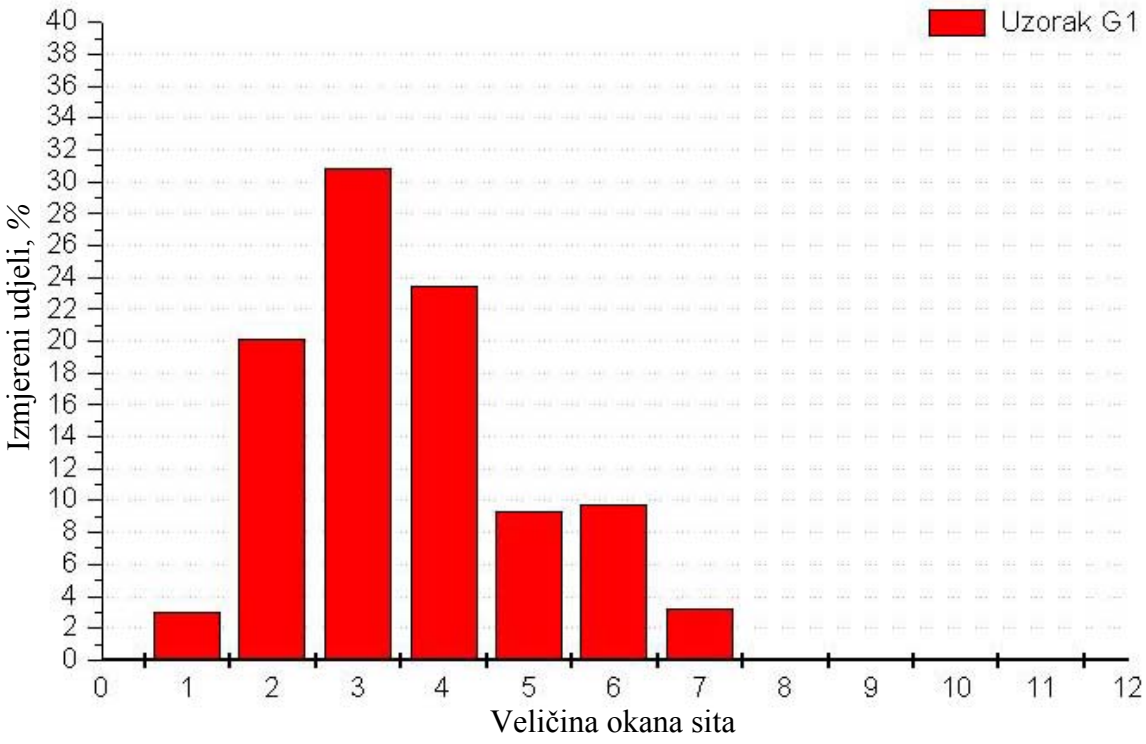
Tablica 9.1 Rezultati granulometrijske analize

Veličina okana sita, mm	**Uzorak pijeska G1, g**	**Uzorak pijeska G2, g**	**Uzorak pijeska G3, g**
1.5	1.8	0	0
1	12.1	0	0
0.63	18.5	0	0.4
0.4	14.08	0.85	0.9
0.3	5.62	5.9	1.1
0.2	5.85	19.6	5.05
0.15	1.95	23.07	8.8
0.1	0.1	6.45	10.63
0.075	0	2.9	11.28
0.063	0	0.85	11.54
dno	0	0.38	10.3
Ukupno:	**60**	**60**	**60**

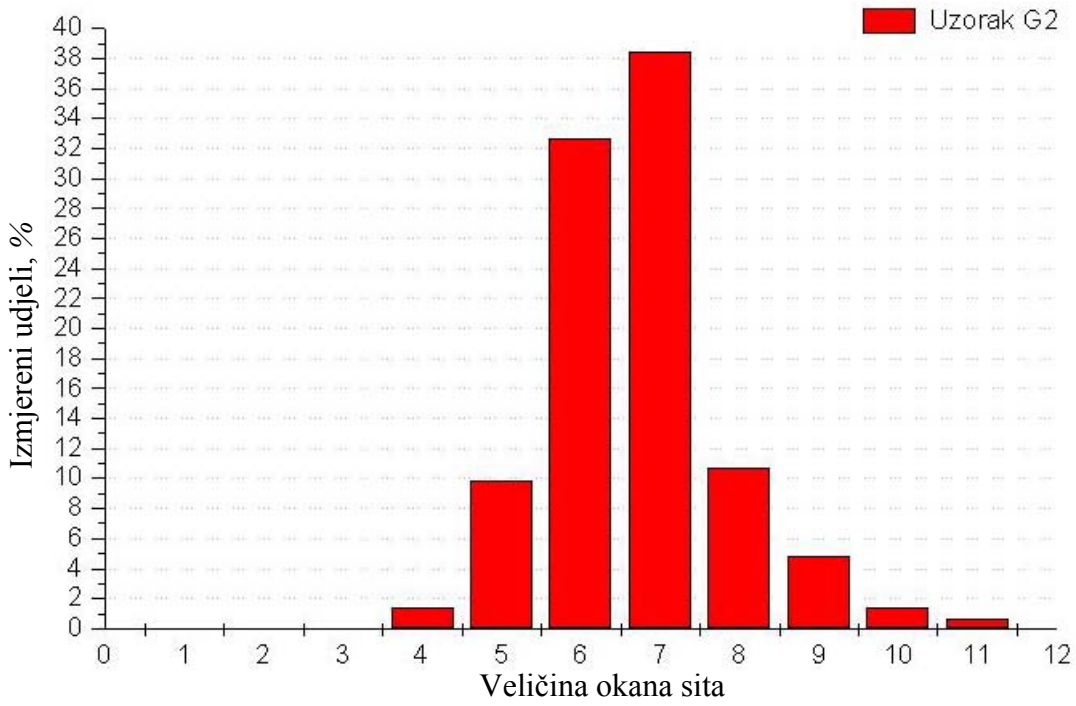
Rezultate iz tablice možemo prikazati na dva načina. Najjednostavniji prikaz izmjerenih rezultata prikazuje se histogramom. Histogramski prikaz dobivamo nanoseći na apscisu veličinu otvora sita, počevši od najvećeg, a na ordinatu postotke izvaganih ostataka na

pojedinom situ. Takav prikaz ne daje točne brojčane pokazatelje, ali je s druge strane dosta zoran. Ukoliko je zastupljenost veća u lijevom dijelu dijagrama, pijesak je grubozrnat, a ako su zastupljenije frakcije u desnom dijelu dijagrama, pijesak je sitnozrnat.

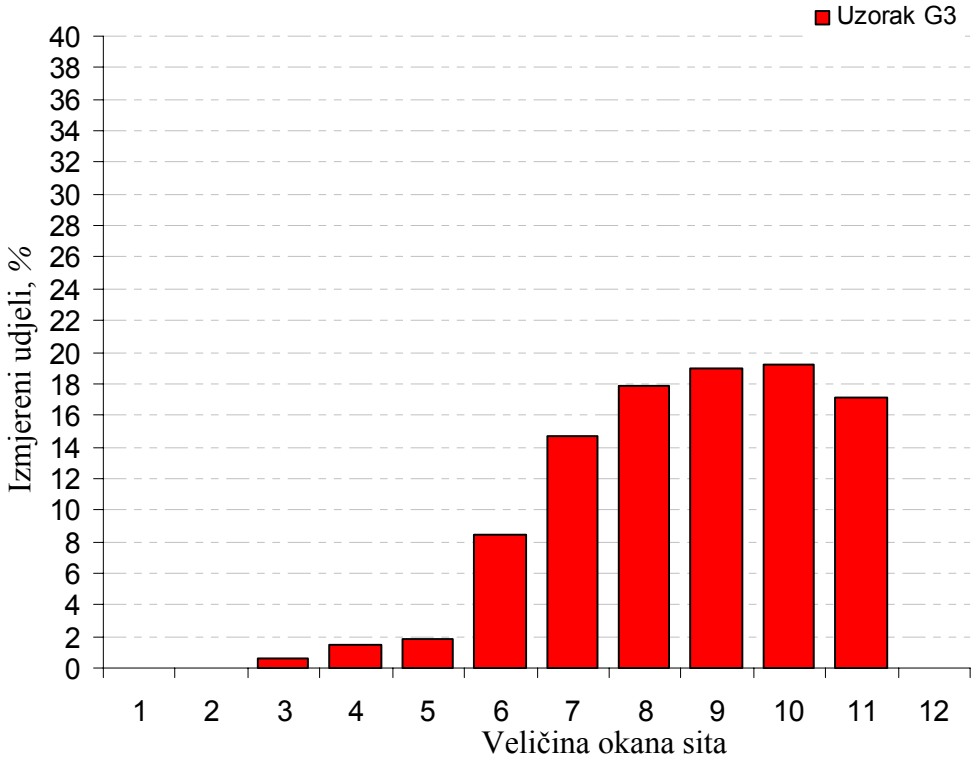
Ukoliko je zbroj dviju susjednih frakcija preko 60%, pijesak se smatra jednoličnim, a ako nema jako zastupljenih frakcija pijesak smatramo nejednoličnim. Histogramski prikaz uzoraka pijeska na kojima se temelji ovaj rad prikazan je na slikama 9.1, 9.2 i 9.3 .



Slika 9.1 Histogramski prikaz zrnatosti uzorka G1



Slika 9.2 Histogramski prikaz zrnatosti uzorka G2



Slika 9.3 Histogramski prikaz zrnatosti uzorka G3

Mnogo važnije podatke možemo interpretirati krivuljom kumulativnog propada. Ta se krivulje dobiva nanoseći na apscisu u logaritamskom mjerilu veličine okana sita u milimetrima,

počevši od najmanje. Na ordinatu se nanose postoci ukupnog propada kroz pojedino sito. Uz pomoć krivulje kumulativnog propada mogu se odrediti četiri karakteristike koje u potpunosti definiraju zrnatost pijeska.

Prva karakteristika je srednja veličina zrna (SV). Srednju veličinu zrna dobivamo projekcijom sjecišta kumulativne linije propada s ordinatnom vrijednošću 50% na apscisu.

Druga karakteristika je stupanj ravnomjernosti (StR). Stupanj ravnomjernosti izračunava se kao razlika postotnog propada pri 4/3 SV i pri 2/3 SV.

Treća karakteristika naziva se koeficijent rasporeda (KR). Koeficijent rasporeda dobiva se kao koeficijent veličine okana pri 75% i 25% propada. Što je koeficijent rasporeda manji to je krivulja kumulativnog propada strmija. Ta karakteristika često se kod zaobljenijih krivulja kumulativnog propada upotrebljava i za lakše određivanje stupnja ravnomjernosti.

Četvrta karakteristika je broj finoće (BF). Europski standardi su karakteristiku broja finoće (BF) preuzeli iz američkih standarda. Pokazatelj BF je najmanje važan od prethodno nabrojenih karakteristika. On u nekim slučajevima ima sličan smisao kao i srednja vrijednost (SV). Naime, srednja vrijednost (SV) raste s većim udjelom krupnijih zrna, dok broj finoće (BF) raste s većim udjelom sitnijeg zrna. Proračunavanje broja finoće (BF) je znatno složenije te se ne može zorno prikazati u dijagramu kumulativnog propada.

Prethodno navedene karakteristike za svaku mješavinu mogu se vidjeti iz tablice 9.2.

Tablica 9.2 Karakteristike pojedinih uzoraka pijeska

Naziv karakteristike	**Uzorak G1**	**Uzorak G2**	**UzorakG3**
SV	0,63	0,19	0,067
StR	40	11	32,5
KR	2,39	1,656	3,548

9.2 Matematička formulacija vrste pijeska

Dijagrami kumulativnog propada mogu se matematički opisati u obliku jednadžbi. Modificirani oblik krivulje može se koristiti pri granulometrijskim analizama kremenog pijeska koji se koristi za izradu kalupne mješavine pri izradi jednokratnih kalupa u ljevarstvu (1).

$$P(d) = \frac{1}{\ln\left[\exp(1) + \left(\frac{g_a}{d}\right)^{g_n}\right]^{g_m}} \left[1 - \left[\frac{\ln\left(1 + \frac{d_r}{d}\right)}{\ln\left(1 + \frac{d_r}{d_m}\right)}\right]^7\right] \qquad (1)$$

gdje je :

$P(d)$ - postotak propada frakcije , %,

g_a - parametar prilagodbe odgovoran za početak krivulje,

g_n - parametar prilagodbe odgovoran za maksimum krivulje,

g_m - parametar prilagodbe odgovoran za zakrivljenost krivulje,

d - promjer frakcije , m,

d_r - očekivani promjer frakcije, m,

d_m - minimalni promjer frakcije, m.

Modificiranjem jednadžbe, tj. postavljanjem koeficijenta d_r na konstantnu vrijednost ne mjenja se mogućnost prilagodbe izraza kojim opisujemo granulometrijski sastav kalupne mješavine iz razloga što se pretpostavlja da je veličina granula pijeska koje tvore kalupnu mješavinu upravo veća od 10^{-2} m. Ovo pojednostavljenje može se uvesti jedino kada je riječ o pijesku kojeg koristimo za izradu kalupa. Nakon pojednostavljenja jednadžba izgleda (2). Vrijednost d_m postavljena je na 10^{-3} m jer se prilikom razmatranja ljevarskog pijeska ne susreću manje frakcije. Nakon uvrštavanja ovih vrijednosti u izraz 1 dobiva se:

$$P(d) = \frac{1}{\ln\left[\exp(1) + \left(\frac{g_a}{d}\right)^{g_n}\right]^{g_m}} \left[1 - \left[\frac{\ln\left(1 + \frac{0{,}01}{d}\right)}{2{,}39789}\right]^7\right] \qquad (2)$$

Definiranjem koeficijenata g_a, g_n i g_m, koristeći rezultate granulometrijske analize, s kojima se u potpunosti opisuje granulometrijski sastav kalupne mješavine, slijede iz iterativnog rješenja izraza 2.

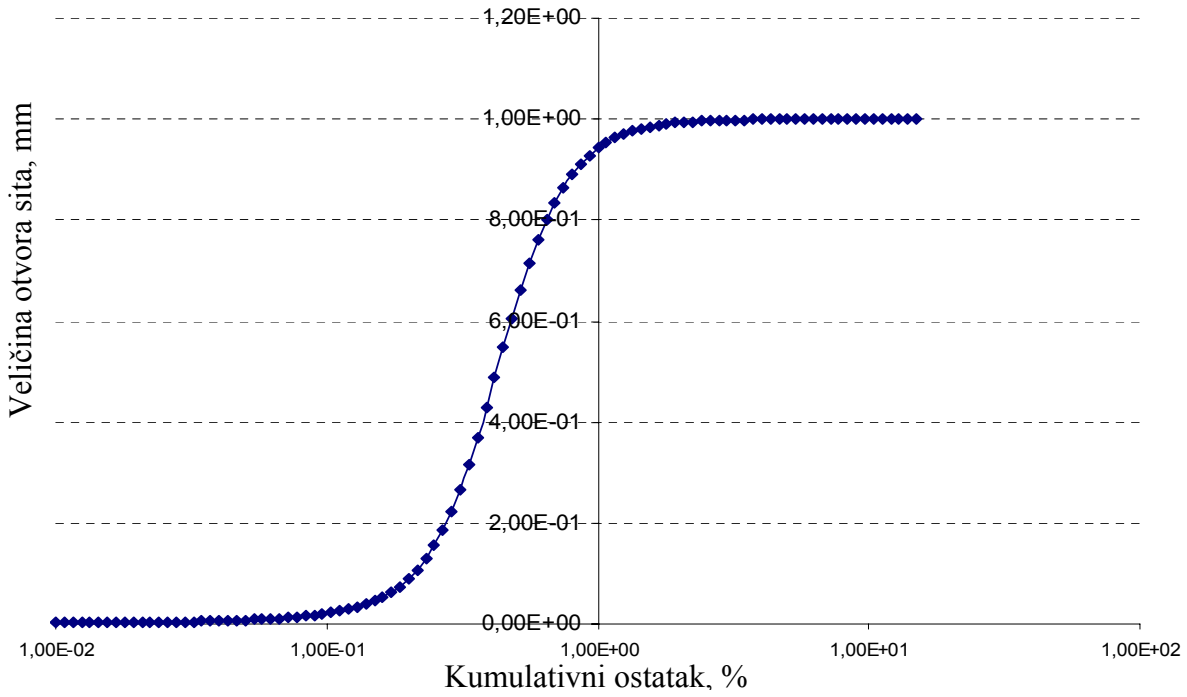
Tablica 9.3 Koeficijenti i izračun točaka dijagrama kumulativnog propada prema određenom matematičkom modelu

Pijesak G1			**Pijesak G2**			**Pijesak G3**		
g_a	g_n	g_m	g_a	g_n	g_m	g_a	g_n	g_m
0.4238550	3.175990	2.531705	0.1533168	5.881521	1.859707	0.0777626	3.031518	2.209846
d_{rgr}	d_m		d_{rgr}	d_m		d_{rgr}	d_m	
0.01	0.001		0.01	0.001		0.01	0.001	
9.9999998E-03	1.8922295E-03		9.9999990E-05	8.8223159E-02		9.9999990E-05	0.1265909	
1.0758725E-02	1.9891567E-03		1.1117846E-04	7.7033877E-02		1.1168462E-04	0.1108536	
1.1575023E-02	2.0931151E-03		1.2360651E-04	6.7024589E-02		1.2473455E-04	9.6715264E-02	
1.2453250E-02	2.2047826E-03		1.3742369E-04	5.8095701E-02		1.3930933E-04	8.4048800E-02	
1.3398110E-02	2.3249169E-03		1.5278556E-04	5.0153356E-02		1.5558710E-04	7.2733819E-02	
1.4414666E-02	2.4543670E-03		1.6986465E-04	4.3109775E-02		1.7376688E-04	6.2656522E-02	
1.5508344E-02	2.5940831E-03		1.8885292E-04	3.6882751E-02		1.9407090E-04	5.3709634E-02	
1.6685002E-02	2.7451375E-03		2.0996359E-04	3.1395487E-02		2.1674737E-04	4.5792062E-02	
1.7950945E-02	2.9087416E-03		2.3343430E-04	2.6576301E-02		2.4207350E-04	3.8808886E-02	
1.9312929E-02	3.0862638E-03		2.5952869E-04	2.2358641E-02		2.7035890E-04	3.2671072E-02	
2.0778257E-02	3.2792625E-03		2.8854003E-04	1.8680738E-02		3.0194933E-04	2.7295331E-02	
2.2354761E-02	3.4895099E-03		3.2079438E-04	1.5485423E-02		3.3723100E-04	2.2603963E-02	
2.4050875E-02	3.7190332E-03		3.5665414E-04	1.2719961E-02		3.7663520E-04	1.8524669E-02	
2.5875684E-02	3.9701578E-03		3.9652243E-04	1.0335799E-02		4.2064363E-04	1.4990322E-02	
2.7838945E-02	4.2455574E-03		4.4084757E-04	8.2884226E-03		4.6979429E-04	1.1938821E-02	
2.9951157E-02	4.5483168E-03		4.9012736E-04	6.5371590E-03		5.2468805E-04	9.3128830E-03	
3.2223638E-02	4.8820162E-03		5.4491608E-04	5.0449288E-03		5.8599591E-04	7.0598423E-03	
3.4668535E-02	5.2508148E-03		6.0582906E-04	3.7781103E-03		6.5446703E-04	5.1314519E-03	
3.7298929E-02	5.6595709E-03		6.7355152E-04	2.7062967E-03		7.3093909E-04	3.4836351E-03	
4.0128902E-02	6.1139842E-03		7.4884389E-04	1.8021390E-03		8.1634661E-04	2.0763280E-03	
4.3173596E-02	6.6207633E-03		8.3255320E-04	1.0411130E-03		9.1173372E-04	8.7320589E-04	
4.6449289E-02	7.1878452E-03		9.2561950E-04	4.0136575E-04		1.0182664E-03	1.5853958E-04	
4.9973529E-02	7.8246677E-03		1.0290896E-03	1.3650721E-04		1.1372471E-03	1.0484389E-03	
5.3765163E-02	8.5424921E-03		1.1441261E-03	5.8963458E-04		1.2701303E-03	1.8230048E-03	
5.7844464E-02	9.3548391E-03		1.2720212E-03	9.7306096E-04		1.4185403E-03	2.5059916E-03	
6.2233288E-02	1.0278021E-02		1.4142138E-03	1.2999391E-03		1.5842915E-03	3.1186708E-03	
6.6955104E-02	1.1331815E-02		1.5723004E-03	1.5816991E-03		1.7694101E-03	3.6801111E-03	
7.2035179E-02	1.2540328E-02		1.7480596E-03	1.8282390E-03		1.9761592E-03	4.2074793E-03	
7.7500671E-02	1.3933104E-02		1.9434651E-03	2.0480861E-03		2.2070659E-03	4.7163474E-03	
8.3380871E-02	1.5546563E-02		2.1607147E-03	2.2485750E-03		2.4649536E-03	5.2210186E-03	
8.9707211E-02	1.7425796E-02		2.4022483E-03	2.4360004E-03		2.7529742E-03	5.7348693E-03	
9.6513532E-02	1.9626938E-02		2.6707831E-03	2.6157796E-03		3.0746490E-03	6.2707239E-03	
0.1038363	2.2220213E-02		2.9693358E-03	2.7925938E-03		3.4339104E-03	6.8412479E-03	
0.1117146	2.5293769E-02		3.3012605E-03	2.9705316E-03		3.8351503E-03	7.4593895E-03	
0.1201907	2.8958671E-02		3.6702910E-03	3.1532256E-03		4.2832736E-03	8.1388839E-03	
0.1293099	3.3355139E-02		4.0805712E-03	3.3439717E-03		4.7837580E-03	8.8948244E-03	
0.1391210	3.8660195E-02		4.5367167E-03	3.5458591E-03		5.3427224E-03	9.7443517E-03	
0.1496765	4.5097001E-02		5.0438498E-03	3.7618789E-03		5.9670000E-03	1.0707493E-02	
0.1610329	5.2945480E-02		5.6076753E-03	3.9950470E-03		6.6642221E-03	1.1808204E-02	
0.1732509	6.2553607E-02		6.2345248E-03	4.2485087E-03		7.4429116E-03	1.3075724E-02	
0.1863959	7.4347802E-02		6.9314493E-03	4.5256722E-03		8.3125886E-03	1.4546320E-02	
0.2005383	8.8839345E-02		7.7062757E-03	4.8303218E-03		9.2838835E-03	1.6265631E-02	
0.2157537	0.1066220		8.5677197E-03	5.1667765E-03		1.0368671E-02	1.8291818E-02	
0.2321235	0.1283537		9.5254593E-03	5.5400440E-03		1.1580212E-02	2.0699883E-02	
0.2497354	0.1547146		1.0590255E-02	5.9560286E-03		1.2933318E-02	2.3587599E-02	
0.2686835	0.1863338		1.1774084E-02	6.4217797E-03		1.4444528E-02	2.7083788E-02	
0.2890693	0.2236842		1.3090240E-02	6.9458005E-03		1.6132317E-02	3.1359825E-02	
0.3110017	0.2669544		1.4553528E-02	7.5384639E-03		1.8017320E-02	3.6645740E-02	

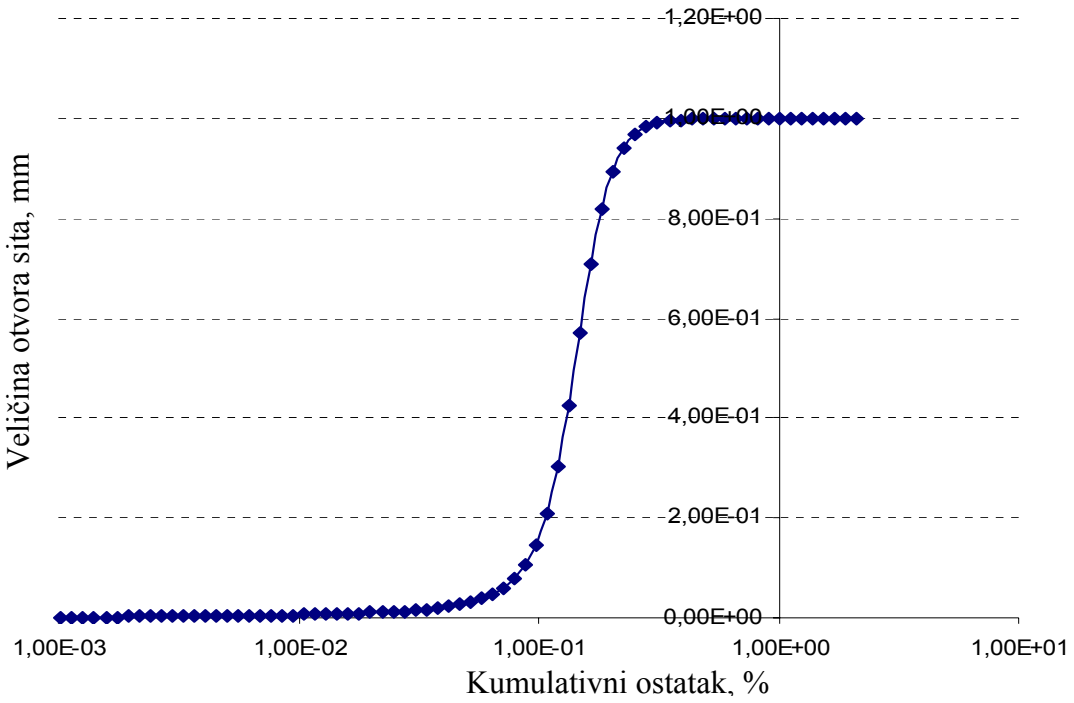
0.3345983	0.3159247	1.6180383E-02	8.2125338E-03	2.0122573E-02	4.3252364E-02
0.3599852	0.3698828	1.7989103E-02	8.9839036E-03	2473820E-02	5.1601615E-02
0.3872983	0.4276190	2.0000003E-02	9.8725446E-03	2.5099803E-02	6.2265862E-02
0.4166836	0.4875202	2.2235693E-02	1.0903881E-02	2.8032623E-02	7.6016143E-02
0.4482986	0.5477527	2.4721297E-02	1.2110665E-02	3.1308129E-02	9.3872920E-02
0.4823123	0.6064887	2.7484754E-02	1.3535694E-02	3.4966372E-02	0.1171419
0.5189066	0.6621202	3.0557122E-02	1.5235757E-02	3.9052062E-02	0.1473969
0.5582775	0.7134120	3.3972934E-02	1.7287510E-02	4.3615151E-02	0.1863489
0.6006355	0.7595693	3.7770577E-02	1.9796414E-02	4.8711408E-02	0.2355261
0.6462075	0.8002271	4.1992739E-02	2.2910699E-02	5.4403156E-02	0.2957403
0.6952370	0.8353838	4.6686877E-02	2.6843652E-02	6.0759965E-02	0.3664459
0.7479865	0.8653083	5.1905755E-02	3.1910278E-02	6.7859545E-02	0.4452927
0.8047383	0.8904439	5.7708010E-02	3.8588986E-02	7.5788684E-02	0.5282364
0.8657960	0.9113255	6.4158864E-02	4.7628071E-02	8.4644310E-02	0.6103331
0.9314860	0.9285166	7.1330830E-02	6.0231473E-02	9.4534680E-02	0.6869133
1.002161	0.9425647	7.9304509E-02	7.8380346E-02	0.1055807	0.7545762
1.078197	0.9539754	8.8169515E-02	0.1053575	0.1179174	0.8116131
1.160003	0.9631989	9.8025501E-02	0.1464482	0.1316956	0.8578525
1.248016	0.9706251	0.1089832	0.2092912	0.1470838	0.8941856
1.342706	0.9765855	0.1211658	0.3020500	0.1642700	0.9220496
1.444581	0.9813573	0.1347103	0.4267501	0.1834643	0.9430270
1.554186	0.9851699	0.1497688	0.5705615	0.2049014	0.9586026
1.672106	0.9882112	0.1665107	0.7079673	0.2288434	0.9700497
1.798973	0.9906342	0.1851240	0.8173302	0.2555829	0.9783998
1.935466	0.9925625	0.2058180	0.8925093	0.2854469	0.9844576
2.082315	0.9940958	0.2288252	0.9391999	0.3188003	0.9888349
2.240307	0.9953145	0.2544043	0.9664128	0.3560509	0.9919890
2.410285	0.9962824	0.2828428	0.9816940	0.3976541	0.9942570
2.593160	0.9970509	0.3144602	0.9900970	0.4441185	0.9958854
2.789910	0.9976609	0.3496119	0.9946645	0.4960121	0.9970535
3.001588	0.9981450	0.3886932	0.9971317	0.5539693	0.9978907
3.229327	0.9985290	0.4321430	0.9984599	0.6186985	0.9984902
3.474345	0.9988335	0.4804499	0.9991736	0.6909912	0.9989196
3.737953	0.9990751	0.5341567	0.9995567	0.7717310	0.9992269
4.021562	0.9992667	0.5938672	0.9997624	0.8619049	0.9994469
4.326689	0.9994186	0.6602523	0.9998726	0.962615	0.9996043
4.654967	0.9995391	0.7340582	0.9999317	1.075093	0.9997169
5.008152	0.9996346	0.8161145	0.9999634	1.200714	0.9997975
5.388134	0.9997103	0.9073434	0.9999804	1.341013	0.9998552
5.796947	0.9997703	1.008770	0.9999895	1.497705	0.9998964
6.236777	0.9998180	1.121535	0.9999944	1.672707	0.9999260
6.709978	0.9998556	1.246905	0.9999970	1.868156	0.9999471
7.219083	0.9998857	1.386290	0.9999985	2.086443	0.9999621
7.766816	0.9999094	1.541256	0.9999992	2.330236	0.9999729
8.356104	0.9999281	1.713544	0.9999996	2.602516	0.9999807
8.990106	0.9999430	1.905092	0.9999998	2.906610	0.9999862
9.672210	0.9999548	2.118052	0.9999999	3.246237	0.9999901
10.40607	0.9999642	2.354817	1.000000	3.625548	0.9999930
11.19560	0.9999716	2.618049	1.000000	4.049180	0.9999950
12.04505	0.9999776	2.910706	1.000000	4.522311	0.9999964
12.95893	0.9999822	3.236078	1.000000	5.050726	0.9999975
13.94217	0.9999859	3.597821	1.000000	5.640885	0.9999982
15.00000	0.9999889	4.000001	1.000000	6.300002	0.9999987

Grafička reprezentacija rezultata modela granulacije prikazana je slikama 9.4, 9.5 i 9.6.

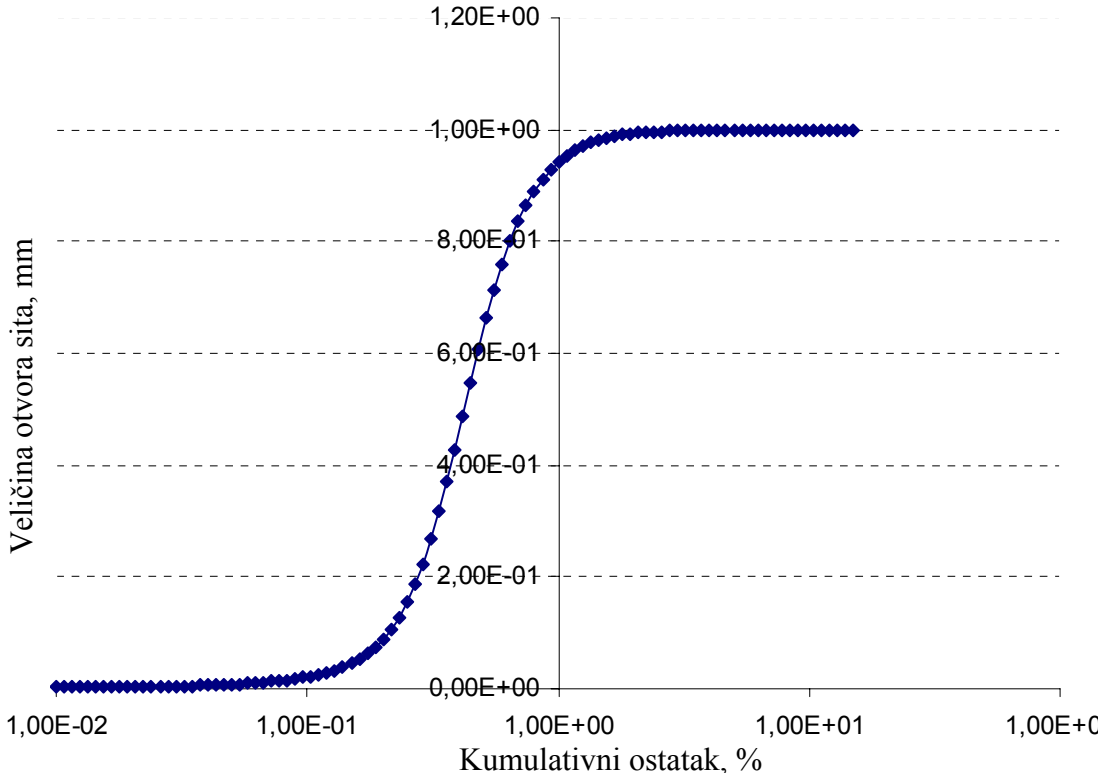
Ukoliko se uzorci pijeska korišteni u ekperimentu opišu jednadžbama te zatim grafički prikažu dobivaju se dijagrami kumulativnog propada za svaki uzorak posebno. Vrlo je važno da se dijagrami kumulativnog propada dobivaju isključivo iz prethodno postavljenog teorijskog modela (2).



Slika 9.4 Dijagram kumulativnog propada uzorka G1



Slika 9.5 Dijagram kumulativnog propada uzorka G2



Slika 9.6 Dijagram kumulativnog propada uzorka G3

9.3 Regresijski model određivanja tlačnih naprezanja

U proteklim eksperimentalnim istraživanjima uz statističku obradu rezultata mjerenja dobiveni je matematički model koji opisuje veličinu tlačnih naprezanja kalupne mješavine prilikom zagrijavanja kalupa. U eksperimentu za ispitivanje tlačnih naprezanja korištena je mjerna oprema koja je detaljnije opisana u radu [33].

Između nekoliko regresijskih modela odabran je model koji se fizikalno može kvalitetno interpretirati. U modelu su korištene dvije nezavisne varijable *SV* koja opisuje srednju veličinu zrna, i *V*, nezavisna varijabla koja opisuje udio vode u kalupnoj mješavini. Kao zavisna varijabla promatran je iznos tlačnih naprezanja N_t.

Korelacija između zavisne varijable N_t i nezavisnih varijabli *SV, V*

	N_t	*SV*	*V*
N_t	1.000		
SV	0.626	1.000	
V	0.633	0.000	1.000

Regresijska analiza N_t u ovisnosti o *SV, V*

Oznaka	Koeficijent	Standardna pogreška	t- test	Pouzdanost
Konstanta	-0.02223	0.03829	-0.58	0.567
SV	0.32284	0.04789	6.74	0.000 **
V	5.5003	0.8073	6.81	0.000 **

Standardna devijacija = 0.06015 R^2 = 79.3% R^2 (prilagođen) = 77.6%

Analiza varijance

	Stupanj slobode	Suma kvadrata	Srednja vrijednost sume kvadrata	F - test	Pouzdanost
Regresija	2	0.33228	0.16614	45.93	0.000 **
Greška ostatka	24	0.08682	0.00362		
Ukupno	26	0.41910			

	Stupanj slobode	Sekv. suma kvadrata
SV	1	0.16437
V	1	0.16791

Dobiveni regresijski model izgleda:

$$N_t = -0{,}022 + 0{,}323\ SV + 5.5\ V \qquad (4)$$

gdje je:

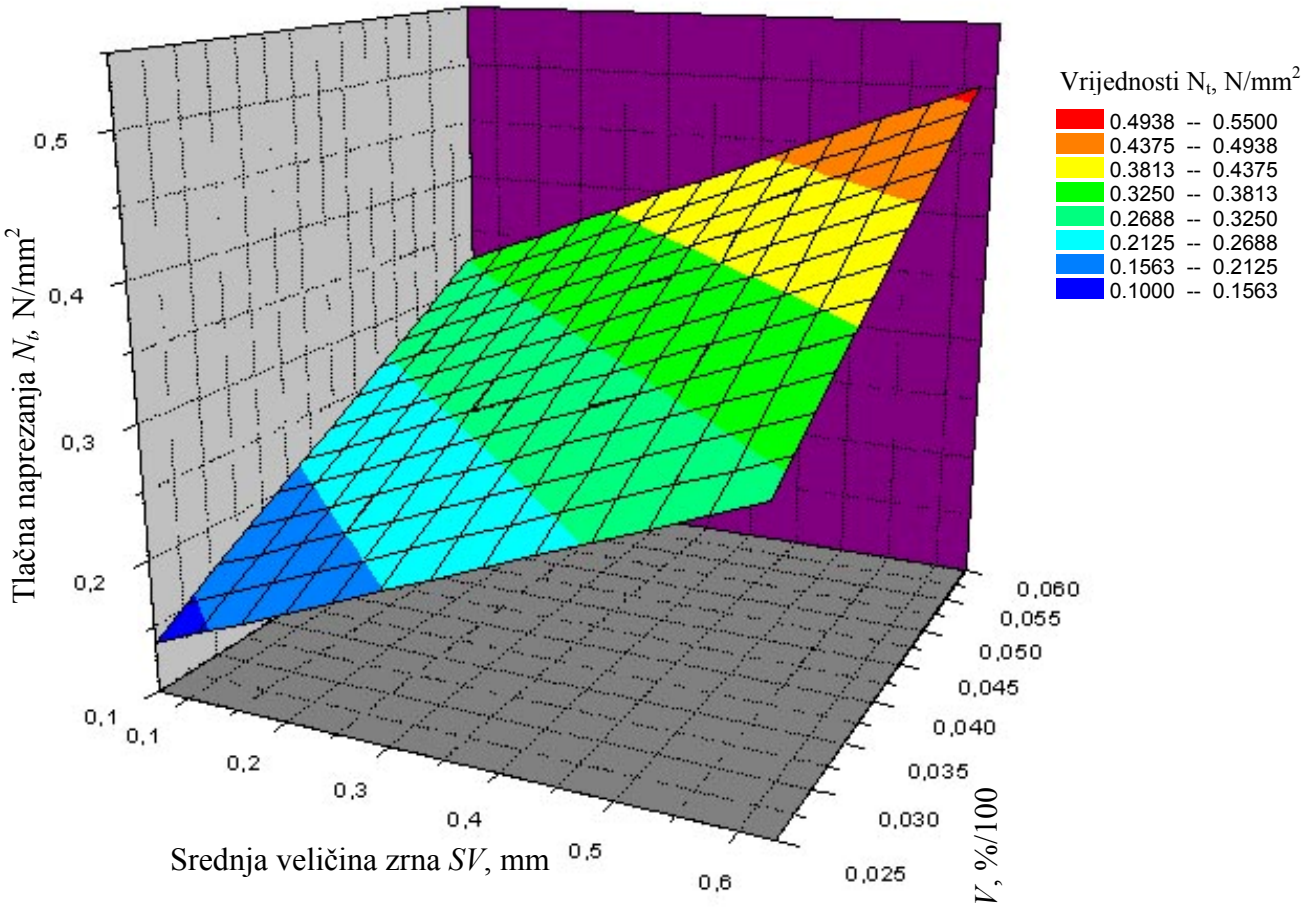
N_t - tlačna naprezanja, N/m^2

SV - srednja veličina zrna, m

V - udio vode , %.

U tom modelu sudjeluje slobodan član s dvije nezavisne varijable, srednje veličine zrna SV i udjela vode V.

V, %/100



Slika 9.7 Grafička interpretacija regresijskog modela

Negativna konstanta – 0,022 opisuje vrijednost prednaprezanja s kojim je opterećen uzorak prije početka mjerenja. Prednaprezanje kao takvo možemo zanemariti jer njegova vrijednost nema utjecaja na pojavu tlačnih naprezanja koje opisuju druge dvije varijable.

Uklanjanje negativne konstante koja opisuje vrijednost prednaprezanja može se zanemariti provlačenjem regresijske površine kroz nulu.

Regresijski model možemo pojednostavljeno napisati u obliku izraza:

$$Nt_i = a \cdot SV_i + b \cdot V_i \qquad (5)$$

gdje su:

a i b	-	traženi koeficijenti,
SV	-	srednja veličina zrna, m
V	-	udio vode, %/100,
i	-	broj uzoraka.

$$\sum_i \left(Nt_i - a \cdot SV_i - b \cdot V_i\right)^2 = \min \quad ; \quad \frac{\partial}{\partial a} = 0 \quad ; \frac{\partial}{\partial b} = 0 \qquad (6)$$

Parcijalnim derivacijama po a i b dobiva se:

$$2\left(Nt_i - a \cdot SV_i - b \cdot V_i\right) \cdot SV_i = 0 \qquad (7)$$

$$2\left(Nt_i - a \cdot SV_i - b \cdot V_i\right) \cdot V_i = 0 \qquad (8)$$

Sređivanjem izraza (7) i (8) dobiva se:

$$a \cdot \sum_i SV^2 + b \cdot \sum_i V_i \cdot SV_i = Nt_i \cdot SV_i \qquad (9)$$

$$a \cdot \sum_i SV \cdot V_i + b \cdot \sum_i V_i \cdot V_i = Nt_i \cdot V_i \qquad (10)$$

Postavljanjem (11) i rješavanjem izraza (12a i 12b) matrice dobivaju se traženi koeficijenti.

$$\begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{12} & A_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} a \\ b \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} B_1 \\ B_2 \end{vmatrix} \qquad (11)$$

Koeficijenti a i b mogu se izraziti kao:

$$a = \frac{B_1 \cdot A_{22} - B_2 . A_{12}}{A_{12} \cdot A_{22} - \left(A_{12}\right)^2} \quad (12a) \quad ; \qquad b = \frac{A_{11} \cdot B_2 - A_{12} \cdot B_1}{A_{11} \cdot A_{22} - \left(A_{12}\right)^2} \qquad (12b)$$

Ukoliko se tablično prikažu koeficijenti koji tvore prethodno napisan izraz slijedi:

Tablica 9.4. Tablični prikaz određivanja koeficijenata regresijskog modela

N_t	SV	B	V	SV*V	SV^2	SV*V	V^2	N_t*SV	N_t*V
0,283	0,352455	0,04	0,025	0,01575	0,124225	0,008811375	0,000625	0,099745	0,007075
0,395	0,352455	0,04	0,04	0,0252	0,124225	0,0140982	0,0016	0,13922	0,0158
0,495	0,352455	0,04	0,06	0,0378	0,124225	0,0211473	0,0036	0,174465	0,0297
0,191	0,352455	0,07	0,025	0,01575	0,124225	0,008811375	0,000625	0,067319	0,004775
0,38	0,352455	0,07	0,04	0,0252	0,124225	0,0140982	0,0016	0,133933	0,0152
0,472	0,352455	0,07	0,06	0,0378	0,124225	0,0211473	0,0036	0,166359	0,02832
0,351	0,352455	0,1	0,025	0,01575	0,124225	0,008811375	0,000625	0,123712	0,008775
0,475	0,352455	0,1	0,04	0,0252	0,124225	0,0140982	0,0016	0,167416	0,019
0,542	0,352455	0,1	0,06	0,0378	0,124225	0,0211473	0,0036	0,191031	0,03252
0,186	0,104066	0,04	0,025	0,00475	0,01083	0,00260165	0,000625	0,019356	0,00465
0,282	0,104066	0,04	0,04	0,0076	0,01083	0,00416264	0,0016	0,029347	0,01128
0,373	0,104066	0,04	0,06	0,0114	0,01083	0,00624396	0,0036	0,038817	0,02238
0,241	0,104066	0,07	0,025	0,00475	0,01083	0,00260165	0,000625	0,02508	0,006025
0,34	0,104066	0,07	0,04	0,0076	0,01083	0,00416264	0,0016	0,035382	0,0136
0,491	0,104066	0,07	0,06	0,0114	0,01083	0,00624396	0,0036	0,051096	0,02946
0,272	0,104066	0,1	0,025	0,00475	0,01083	0,00260165	0,000625	0,028306	0,0068
0,315	0,104066	0,1	0,04	0,0076	0,01083	0,00416264	0,0016	0,032781	0,0126
0,414	0,104066	0,1	0,06	0,0114	0,01083	0,00624396	0,0036	0,043083	0,02484
0,101	0,033677	0,04	0,025	0,001675	0,001134	0,000841925	0,000625	0,003401	0,002525
0,169	0,033677	0,04	0,04	0,00268	0,001134	0,00134708	0,0016	0,005691	0,00676
0,272	0,033677	0,04	0,06	0,00402	0,001134	0,00202062	0,0036	0,00916	0,01632
0,125	0,033677	0,07	0,025	0,001675	0,001134	0,000841925	0,000625	0,00421	0,003125
0,177	0,033677	0,07	0,04	0,00268	0,001134	0,00134708	0,0016	0,005961	0,00708
0,28	0,033677	0,07	0,06	0,00402	0,001134	0,00202062	0,0036	0,00943	0,0168
0,105	0,033677	0,1	0,025	0,001675	0,001134	0,000841925	0,000625	0,003536	0,002625
0,179	0,033677	0,1	0,04	0,00268	0,001134	0,00134708	0,0016	0,006028	0,00716
0,259	0,033677	0,1	0,06	0,00402	0,001134	0,00202062	0,0036	0,008722	0,01554
				Σ	1,225696	0,18382425	0,052425	1,622587	0,370735
					A11	**A12=A21**	**A22**	**B1**	**B2**

Koeficijenti *a* i *b* dobivaju se uvrštavanjem rezultata (tablica 9.4) u jednadžbe 12a i 12b su:

$$a = 0{,}555182$$

$$b = 5{,}125019$$

Nakon uvrštavanja izračunatih koeficijenata *a* i *b* u izraz (13) regresijski model koji opisuje distribuciju tlačnih naprezanja u ovisnosti o srednjoj veličini zrna - *SV* i udjelu vode - *V* možemo izraziti kao:

$$N_t = 0{,}555182 \cdot SV + 5{,}125019 \cdot V \qquad (13)$$

9.4 Matematički model za određivanje sklonosti odlupljivanju

U modelu za izračun tlačnih napetosti korištena srednja veličina zrna - SV koja se može zamjeniti s promjerom frakcije - d, te na taj način dobiti vrijednosti tlačnih naprezanja za svaku od frakcija zasebno.

Iz razloga što pijesak sadrži više frakcija, svaka od njih uzrokuje tlačne napetosti u većoj ili manjoj mjeri ovisno u njenom udjelu u mješavini. Udio pojedine frakcije u mješavini prikazan je izrazom (3).

Koeficijenti g_a, g_n i g_m određeni su za svaki granulometrijski sastav pijeska posebno, a slijede iz rješavanja izraza (3). Tlačna naprezanja mogu se izraziti kao:

$$N_t = 0{,}555182\ \mathrm{d} + 5.125019\ \mathrm{V} \qquad (14)$$

$$N_t = 5.125019 \cdot V + 0{,}555182 \cdot \sum_{i=1}^{n} d_i \cdot P(d_i) \qquad (15)$$

Kada uvrstimo (15) u (3) dobiva konačni izraz koji definira ukupnu vrijednost tlačnih naprezanja u kalupu.

$$N_t = 5{,}125019 \cdot V + 0{,}555182 \cdot \sum_{i=1}^{n} d_i \cdot \left\{ \frac{1}{\ln\left[\exp(1) + \left(\frac{g_a}{d}\right)^{g_n}\right]^{g_m}} \left[1 - \left[\frac{\ln\left(1 + \frac{0{,}01}{d}\right)}{2{,}39789}\right]^7\right]\right\} \qquad (16)$$

gdje je:

N_t - tlačna naprezanja , N/mm^2

i - pojedina frakcija,

n - broj frakcija,

Na osnovu izraza (16) može se izračunati veličina tlačnih naprezanja u kalupima izrađenih od kalupne mješavine koja je sačinjena od pijeska s određenim udjelima pojedinih frakcija.

Promatranjem slojeva kalupa koji su zagrijani na temperaturu jednaku ili veću od 570 $°C$, sklonost prema odlupljivanju u zoni suhog kalupa definira se kao:

$$SO = f(N_t)$$

gdje je:

SO - sklonost odlupljivanju,

N_t - tlačna naprezanja, N/mm^2.

Razlog promatranja zone suhog klaupa je sloj kalupa u kojem je za nastanak tlačnih naprezanja isključivo odgovorna dilatacija tog sloja uzrokovana promjenom volumena zrna na temperaturama oko 570 °C.

Uvrštavanjem stoga slijedi:

$$SO = 5{,}125019 \cdot V + 0{,}555182 \cdot \sum_{i=1}^{n} d_i \cdot \left\{ \frac{1}{\ln\left[\exp(1) + \left(\frac{g_a}{d_i}\right)^{g_n}\right]^{g_m}} \left[1 - \left[\frac{\ln\left(1 + \frac{0{,}01}{d_i}\right)}{2{,}39789} \right]^7 \right] \right\} \qquad (17)$$

gdje je:

SO - sklonost odlupljivanju,

N_t - tlačna naprezanja, N/mm^2,

i - pojedina frakcija,

n - broj frakcija,

d - veličina frakcije, mm,

g_a, g_n *i* g_m - koeficijenti granulometrijske jednadžbe

Korištenjem izraza za određivanje tlačnih naprezanja može se numerički odrediti iznos tlačnih naprezanja koji je u direktnoj vezi sa određivanjem sklonosti pojedinih pjeskova prema odlupljivanju. Na taj način može se odabrati pijesak najpovoljnijeg granulometrijskog sastava koji pokazuje najmanju sklonost odlupljivanju.

9.5 Klasifikacija ljevačkih pjeskova

Kao referentni uzorci korištene su tri različite kalupne mješavine koje su različlite po granulometrijskim sastavima opisanih u prethodnom poglavlju. Vrsta pijeska, udio vode i veziva je isti u sve tri mješavine. Za svaku od kalupnih mješavina izračunata je sklonost odljupljivanju SO.

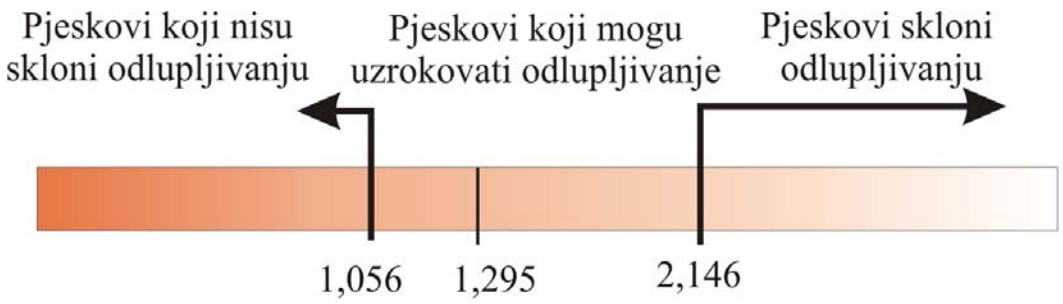
Izračunati granični koeficijenti sklonosti prema odlupljivanju - SO prema izrazu (17) označeni indeksima kalupnih mješavina G1, G2 i G3 prikazani su slikom 9.8.

Iz dobivenih koeficijenata slijedi da kalupna mješavina načinjena od uzorka pijeska G2 pokazuje najmanju sklonost odlupljivanju, stoga pjeskove čiji koeficijenti sklonosti odlupljivanju budu manji od 1,056 neće rezultirati pojavom odlupina. Razlog tomu je konfiguracija slaganja zrna pijeska. Zbog velikog udjela dvije susjedne frakcije te malih udjela sitnih frakcija pijeska, ostvaruje se struktura mješavine koja ima mnogo šupljina između kontaktnih površina najzastupljennijih frakcija. Prostor između kontaktnih površina upotpunjavaju sitnije frakcije. Usprkos tome, prostori između kontaktnih površina su još dovoljno veliki kako bi omogućili zakretanje zrna prilikom pojave temperaturnog istezanja.

Kalupna mješavina načinjena od uzorka pijeska G3 pokazuje sklonost pojavi odlupina. Razlog zašto granulometrijski sastav mješavine G3 uzrokuje nastanak odlupina valja povezati s konfiguracijom slaganja zrna. Zbog jednolike zastupljenosti većine frakcija dolazi do popunjavanja velikog broja šupljina te do nemogućnosti pomicanja zrna prilikom pojave temperaturnog istezanja.

Kalupna mješavina načinjena od granulacije pijeska G1 zbog prethodno objašnjenih načina slaganja zrna može uzrokovati pojavu odlupina. Iz tog zaključujemo da pjeskovi čiji se koeficijenti nalaze u području između 1,056 i 1,295 mogu uzrokovati nastanak odlupina.

Kalupne mješavine s koeficijentima sklonosti odlupljivanju većih od 2,146 uvijek prouzrokuju nastanak odlupina. Stoga pjeskovi te sklonosti odlupljivanju nisu poželjni za kalupljenje iz razloga što proizvode velika unutarnja naprezanja, a ujedno i deformacije kalupa.



Slika 9.8 Shematski prikaz klasifikacija ljevačkih pjeskova s obzirom na sklonost odlupljivanju

9.6 Eksperimentalna potvrda klasifikacije ljevačkih pjeskova

Kako bi potvrdili rezultate dobivene matematičkim modelom (17), konstruiran je poseban kalup. U kalupima pripremljenih od tri različite granulacije pijeska, lijevat će se ploče od sivog lijeva dimenzija 300 x 250 x 30 mm. Izgled kalupa prikazan je na slici 9.8.



Slika 9.8 Kalup za lijevanje ploća za klasifikaciju lijevačkih pjeskova

U tri različito pripremljena kalupa lijevan je sivi lijev uljevne temperature 1340 °C. Nakon skrućivanja, odljevci su izvađeni iz kalupa i očišćeni. Kao rezultat lijevanja dobili smo tri ploče koje jasno pokazuju koji od uzoraka pijeska je otporan pojavi odlupina, a koji su više ili manje skloni odlupljivanju. Površine ploča, tj. odljevaka vide se na slikama 9.9, 9.10 i 9.11.



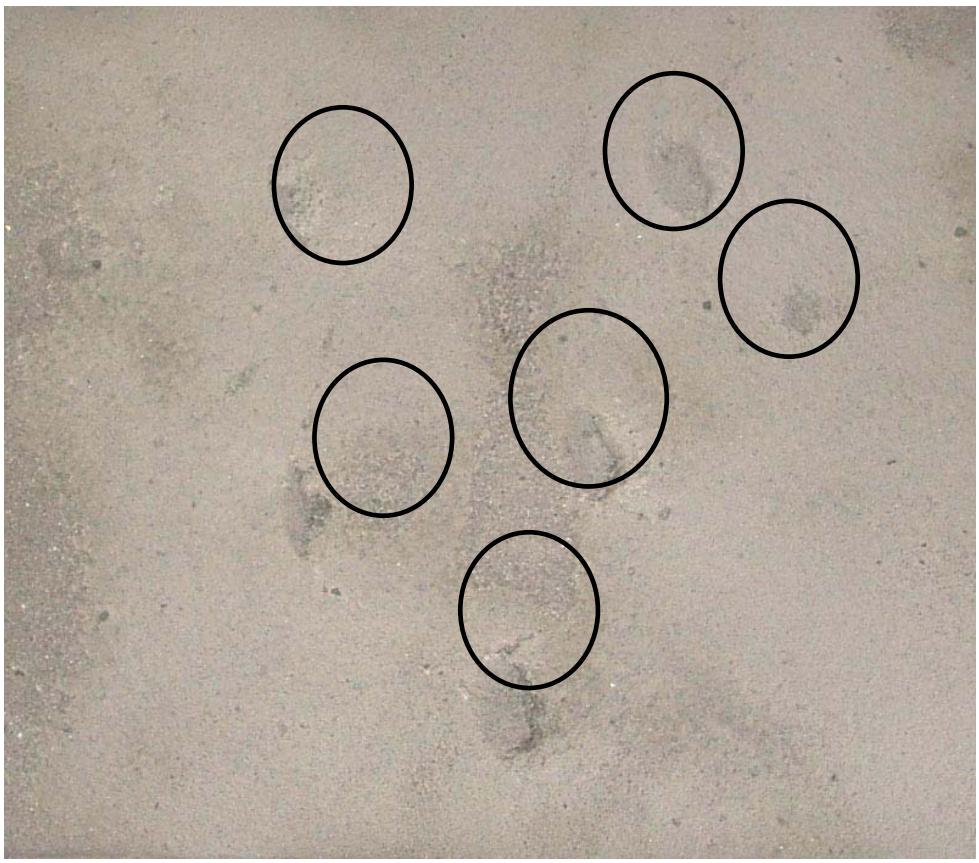
Slika 9.9. Ploča iz kalupa izrađenog iz pijeska granulacije G2.

SO_{G2}= 1,055992



Slika 9.10. Ploča iz kalupa izrađenog iz pijeska granulacije G1.

SO_{G1}= 2,146357



Slika 9.11 Ploča iz kalupa izrađenog iz pijeska granulacije G3.

SO_{G3}= 1,295365

Kao rezultat lijevanja ploča u tri kalupa različite granulacije, G1, G2 i G3, može se zaključiti sljedeće:

Odljevak ploče koja je lijevana u kalup izrađen od granulacije pijeska G2 s izračunatom sklonosti odlupljivanja, SO_{G2}= 1,055992, rezultirao je kao ispravan tj. na odljevku se nisu pojavije odlupine. Stoga se može zaključiti da kalupne mješavine izrađene od pijeska granulometrijskog sastava koje imaju sklonost manju od 1,055992 nisu sklone pojavi odlupina.

Odljevak ploče koja je lijevana u kalup izrađen od granulacije pijeska G1 s izračunatom sklonosti odlupljivanja, SO_{G1}= 2,146357, rezultirao je kao neispravan tj. na odljevku se pojavilo više manjih odlupina. Stoga se može zaključiti da kalupne mješavine izrađene od pijeska granulometrijskog sastava koje imaju sklonost odlupljivanju veću od 1,055992 i manju od 2,146357 mogu biti sklone pojavi odlupina.

Odljevak ploče koja je lijevana u kalup izrađen od granulacije pijeska G3 s izračunatom sklonosti odlupljivanja, SO_{G3}= 1,295365, rezultirao je kao neispravan tj. na odljevku se pojavljuju velike odlupine. Stoga se može zaključiti, da kalupne mješavine izrađene od pijeska

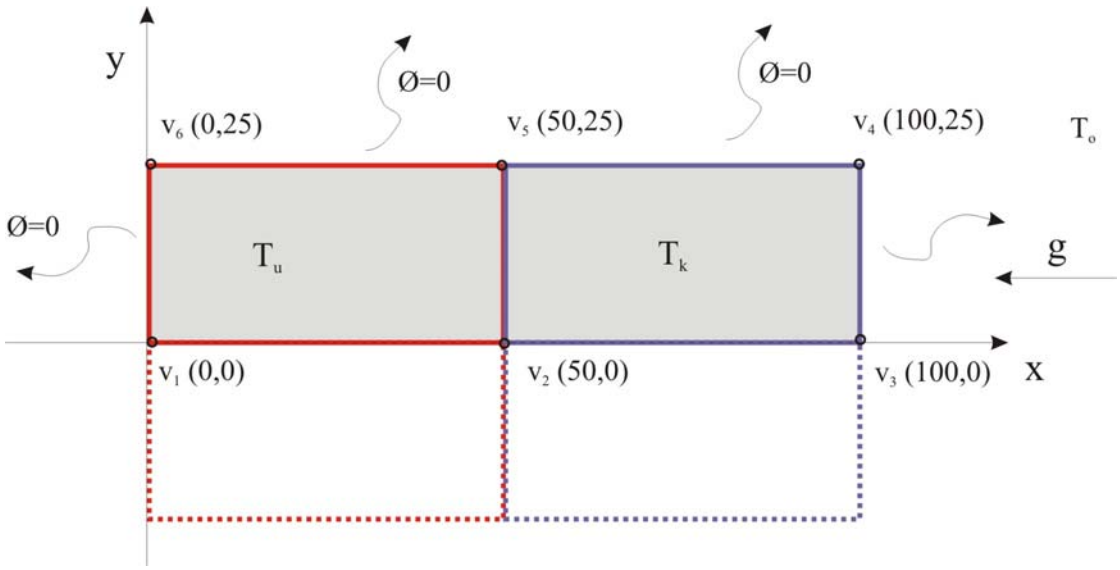
granulometrijskog sastava koji ima sklonost odlupljivanju veću od 1,295365 sklone pojavi odlupina.

10. NUMERIČKI MODEL ZAGRIJAVANJA UZORKA

Istraživanje ponašanja kalupnih mješavina u različitim uvjetima može se pratiti ne samo postavljanjem određenih fizikalnih modela kako je to prikazano u prethodnim poglavljima, već i definiranjem odgovarajućeg numeričkog modela. Prilikom definiranja numeričkog modela potrebno je povezati sve relevantne fizikalne veličine te ih opisati preko matematičkog modela rubnih i početnih uvjeta. Za opisivanje numeričkog modela zagrijavanja uzorka kalupne mješavine korišten je FLUENT 6.2.

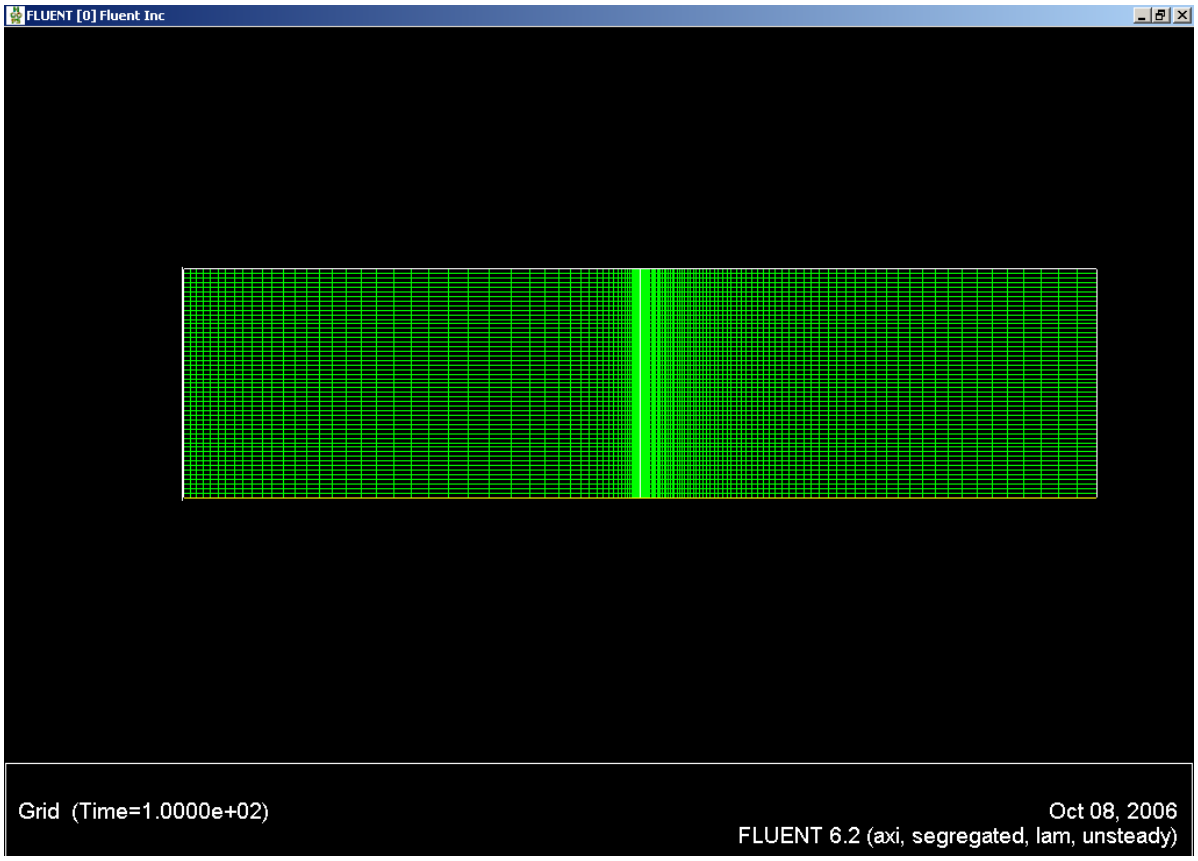
10.1 Definiranje numeričkog modela za zagrijavanja uzorka kalupne mješavine različite granulacije

Za opisivanje standardnog uzorka kalupne mješavine odabran je osnosimetričan geometrijski model na temelju kojeg je generirana računska mreža. Promatra se nestacionaro, laminarno strujanje litine u procesu solidifikacije. Nestacionaran model je izabran iz razloga što se želi pratiti pojava zagrijavanja uzorka kroz vrijeme. Razlog odabira laminarnog profila strujanja su male promjene gustoće litine za vrijeme izmjene topline s kalupom prilikom čega dolazi do pojave strujanja. Takve brzine su vrlo male te se sa sigurnošću može pretpostaviti laminarni oblik strujanja.



Slika 10.1 Uzorak kalupne mješavine – domena

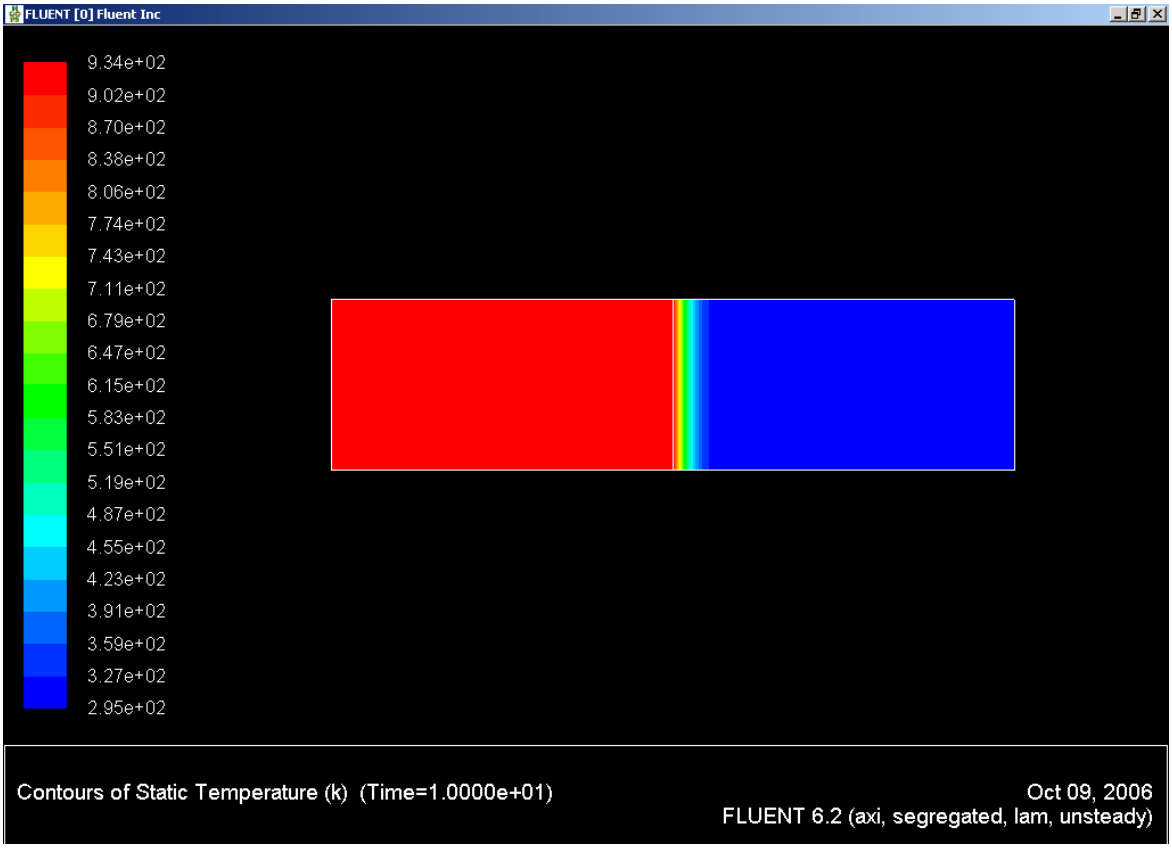
Nakon definiranja točaka koje opisuju domenu potrebno je predvidjeti u kojim dijelovima domene će se pojaviti veliki gradijenti fizikalnih veličina. Zona u kojoj je potrebno detaljnije praćenje pojave je zona kontaktne površine litine s kalupom, odnosno uzorkom kalupne mješavine. U toj zoni mora se povećati rezolucija mreže zbog velikog gradijenta temperature. Razmak između čvorova mreže po osi x u području kontaktne površine iznosi 0,1 mm, a razmak mreže po osi y ostao je konstantan iz razloga što je toplinski tok istog smjera kao i os. Izgled mreže prikazan je na slici 10.2.



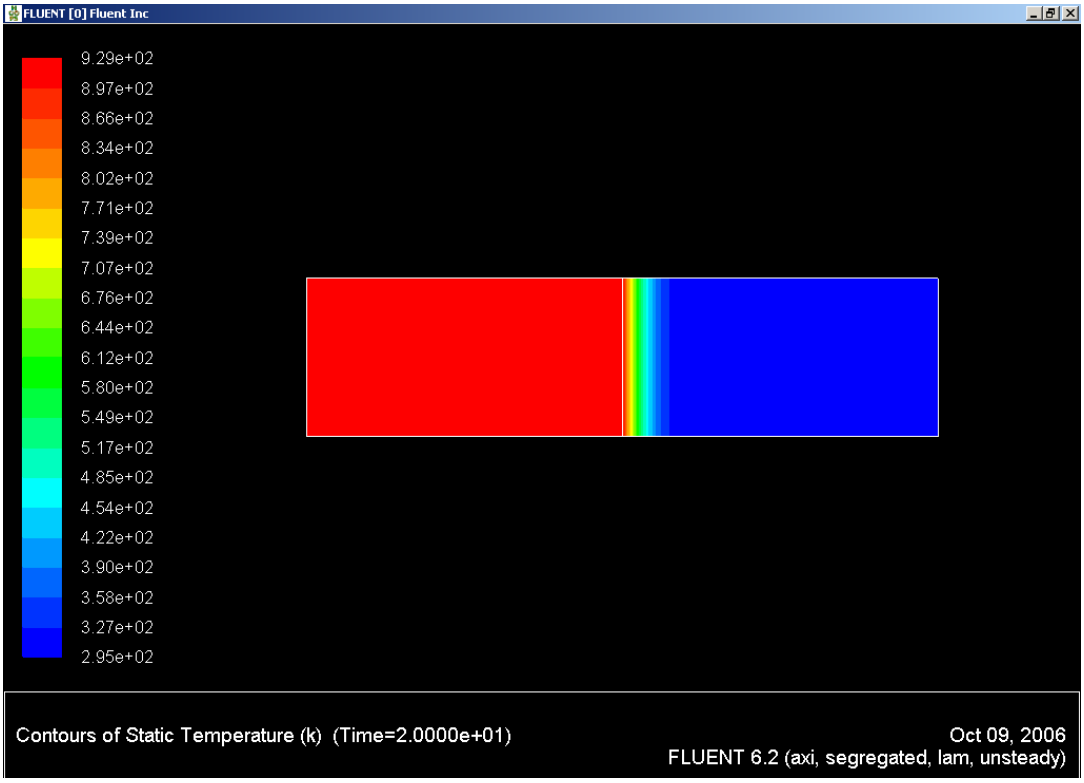
Slika 10.2 Mreža uzorka kalupne mješavine s litinom

10.2 Zagrijavanje uzorka litinom aluminija

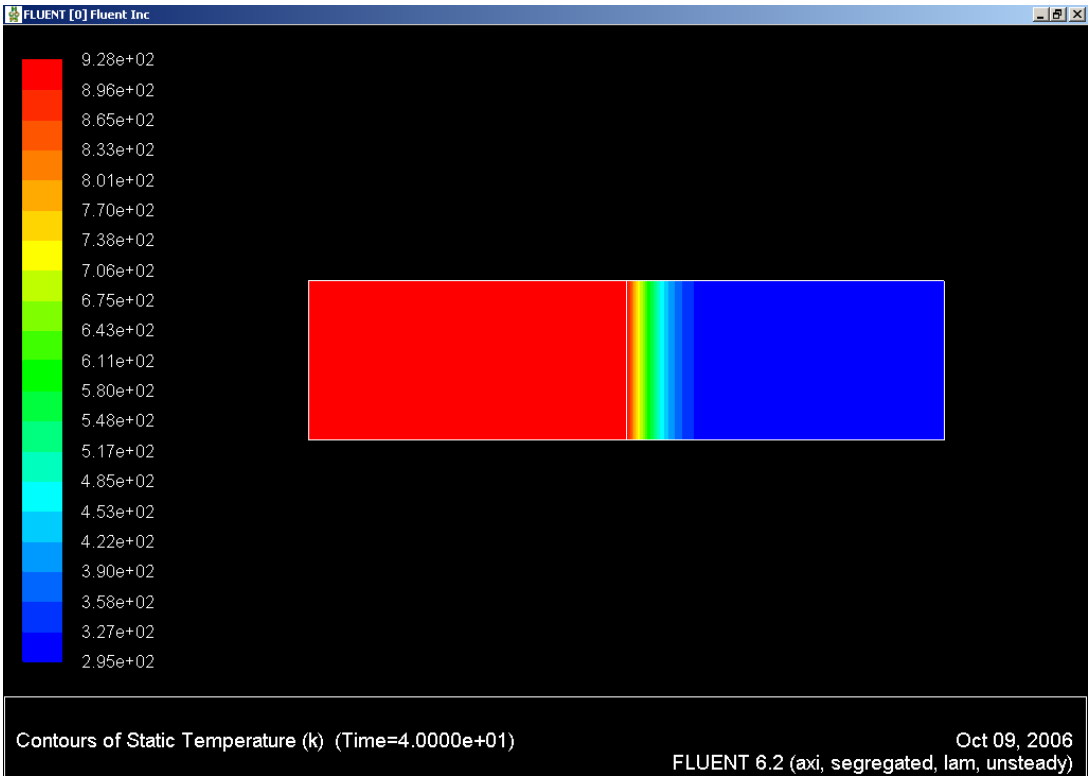
Nakon uljevanja litine aluminija praćena je izmjena topline između litine aluminija i uzorka kalupne mješavine. Kako se događa proces izmjene topline, može se vidjeti na slikama 10.3, 10.4 i 10.5.



Slika 10.3 Temperatura uzorka 10 sekundi nakon ulijevanja aluminija

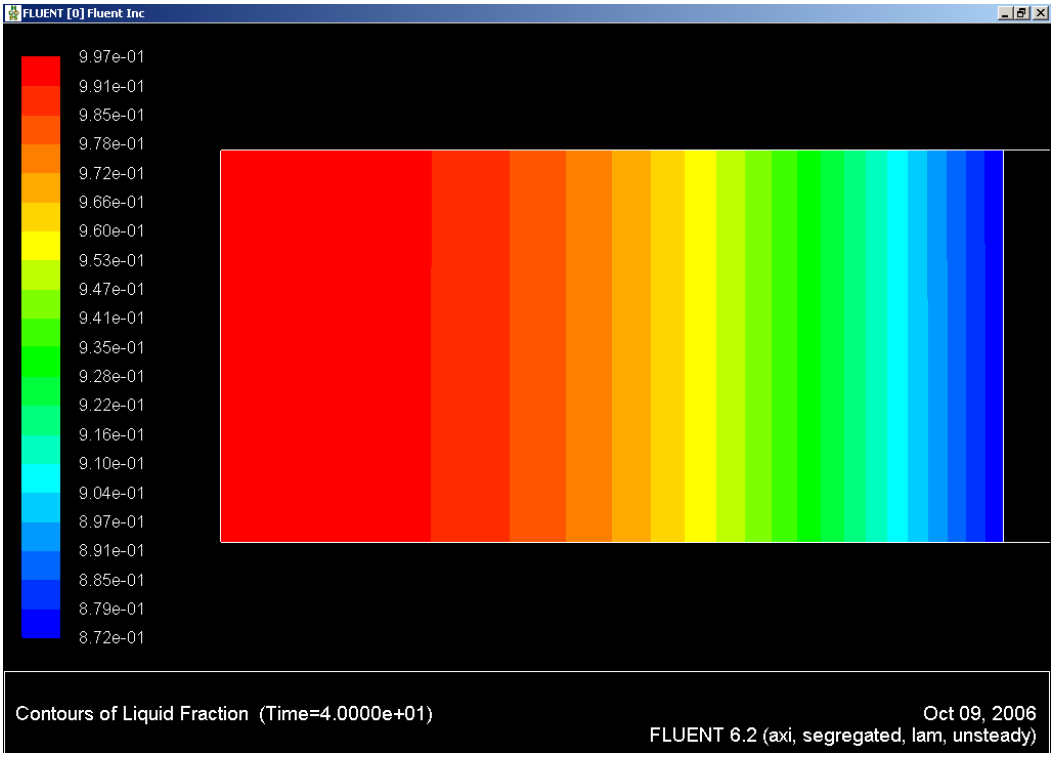


Slika 10.4 Temperatura uzorka 20 sekundi nakon ulijevanja aluminija



Slika 10.5 Temperatura uzorka 40 sekundi nakon ulijevanja aluminija

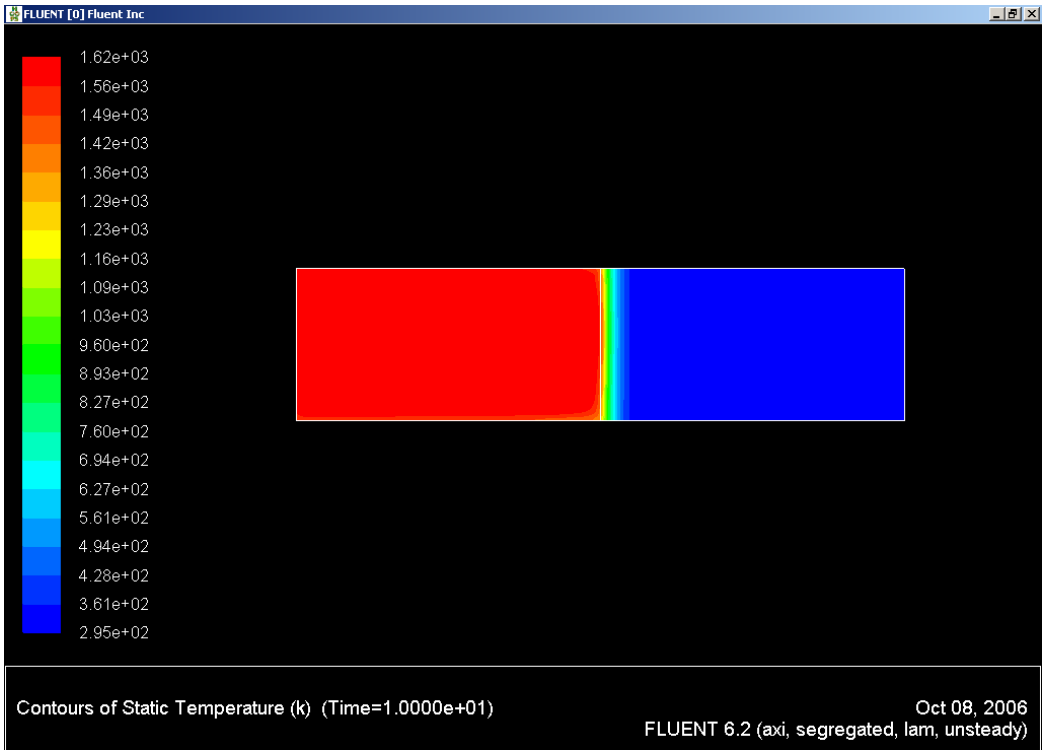
Osim zagrijavanja kalupa praćeno je i skrućivanje litine. Koliki sloj litine se skrutnuo nakon 40 s hlađenja, prikazano je na slici 10.6.



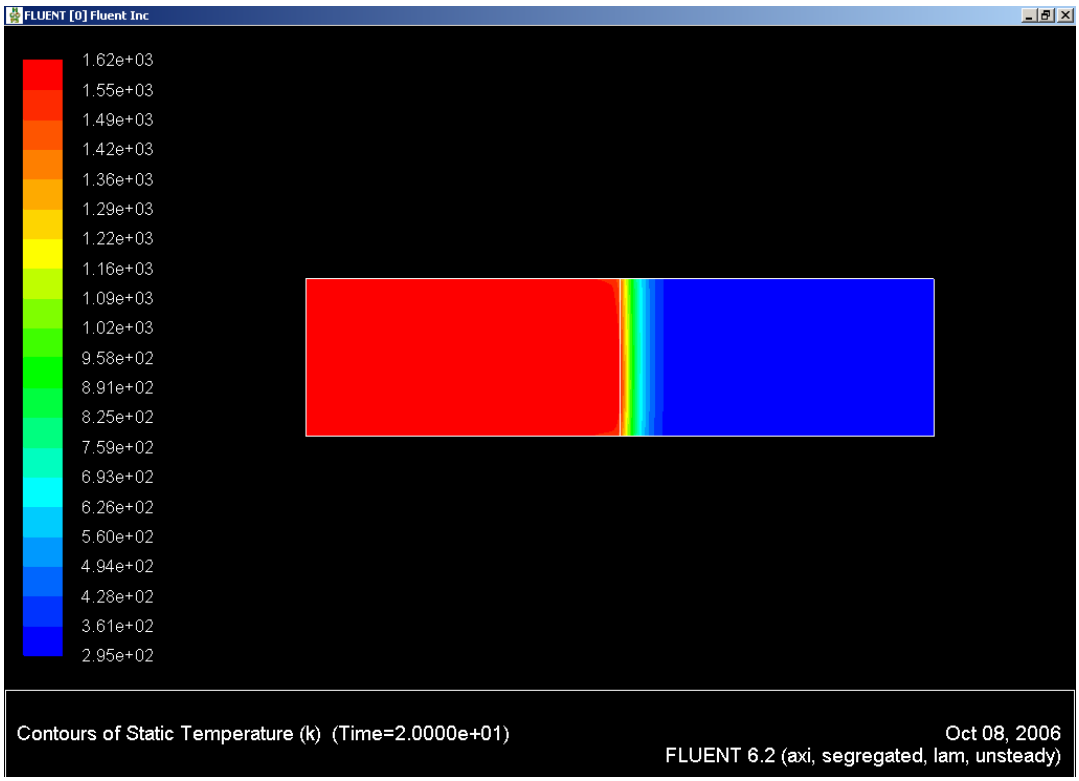
Slika 10.6 Udio skrutnute frakcije aluminija nakon 40 s hlađenja

10.3 Zagrijavanje uzorka litinom sivog lijeva

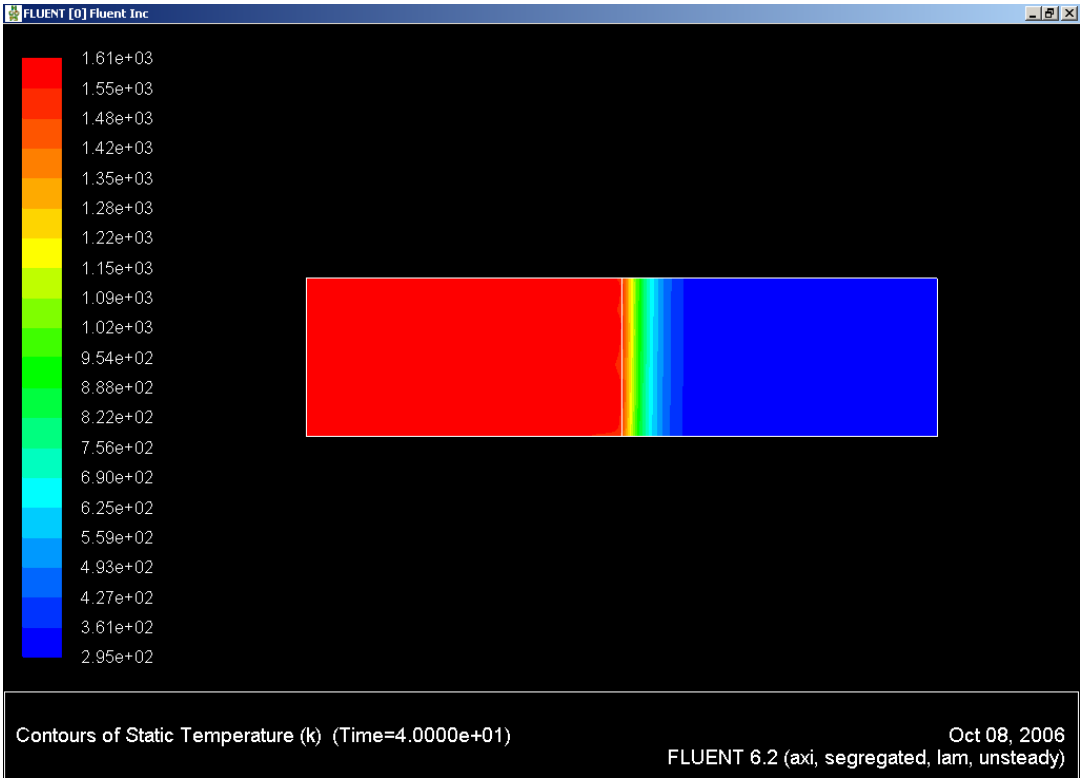
Nakon uljevanja litine sivog lijeva praćena je izmjena topline između litine sivog lijeva i uzorka kalupne mješavine. Kako se događa proces izmjene topline, može se vidjeti na slikama 10.7, 10.8 i 10.9.



Slika 10.7 Temperatura uzorka 10 sekundi nakon ulijevanja sivog lijeva

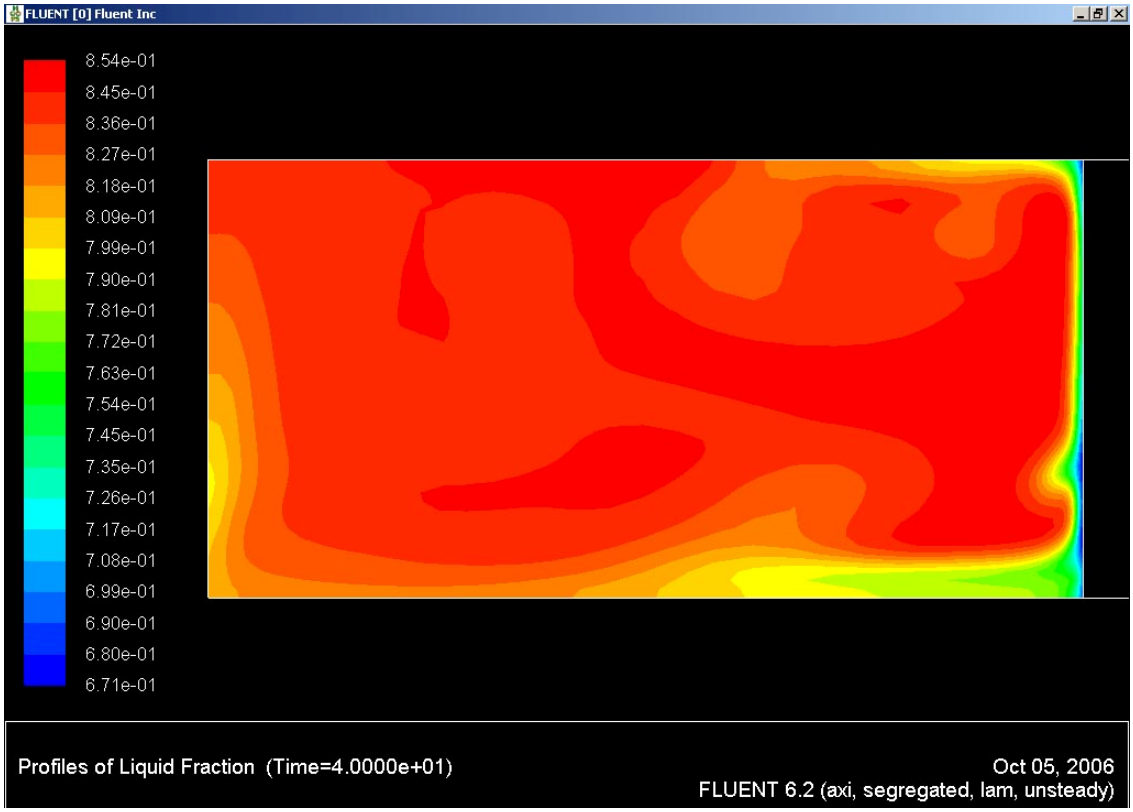


Slika 10.8 Temperatura uzorka 20 sekundi nakon ulijevanja sivog lijeva



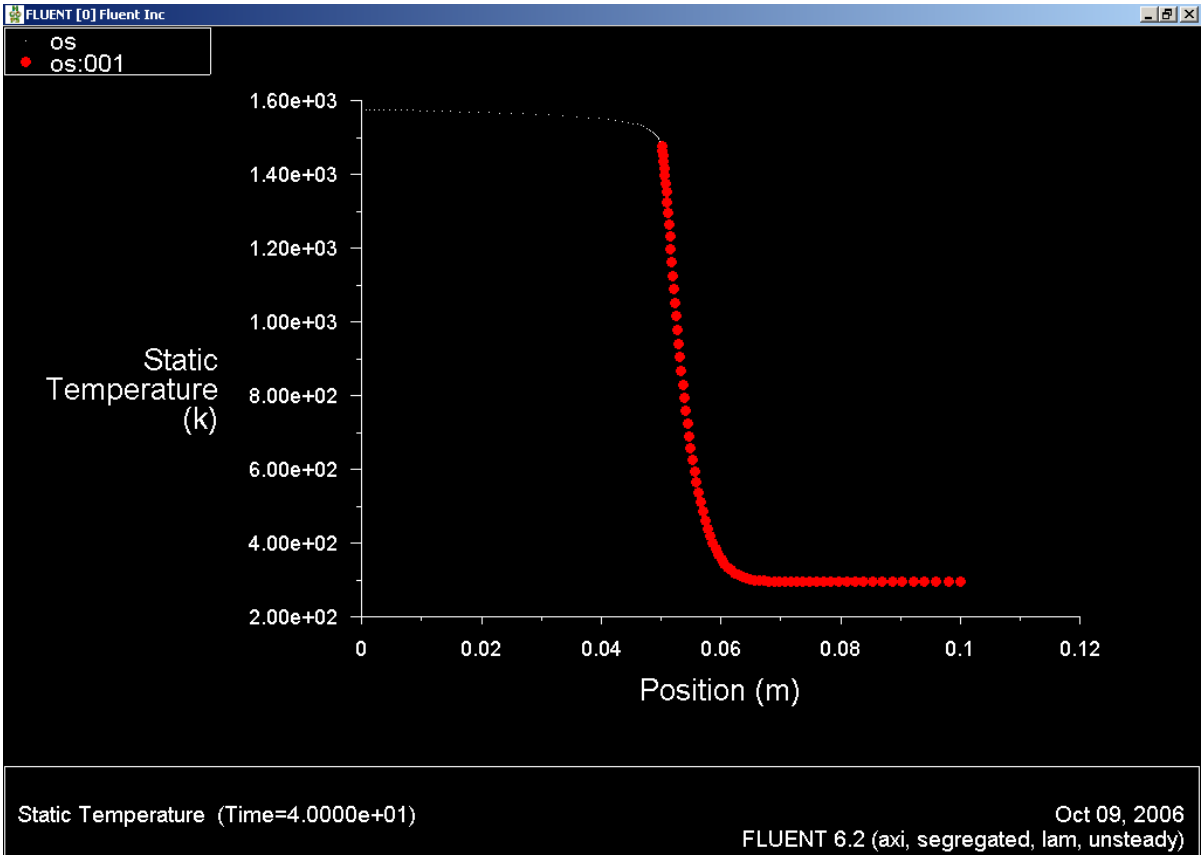
Slika 10.9 Temperatura uzorka 40 sekundi nakon ulijevanja sivog lijeva

Ukoliko se prikaže udio skrutnute frakcije nakon 40 s skrućivanja jasno se vidi da je površina odljevka formirala koru koja štiti odljevak od pojave odlupina. Tu konstataciju možemo dokazati slikom 10.10 koja pokazuje udio skrutnute frakcije nakon 40 s.



Slika 10.10 Udio skrutnute frakcije nakon 40 s hlađenja

Na slici 10.11 prikazana je distribucija temperature po osi simetrije X i visini uzorka za vrijeme 40 s.



Slika 10.11 Distribucija temperatura u usi uzorka i odljevka

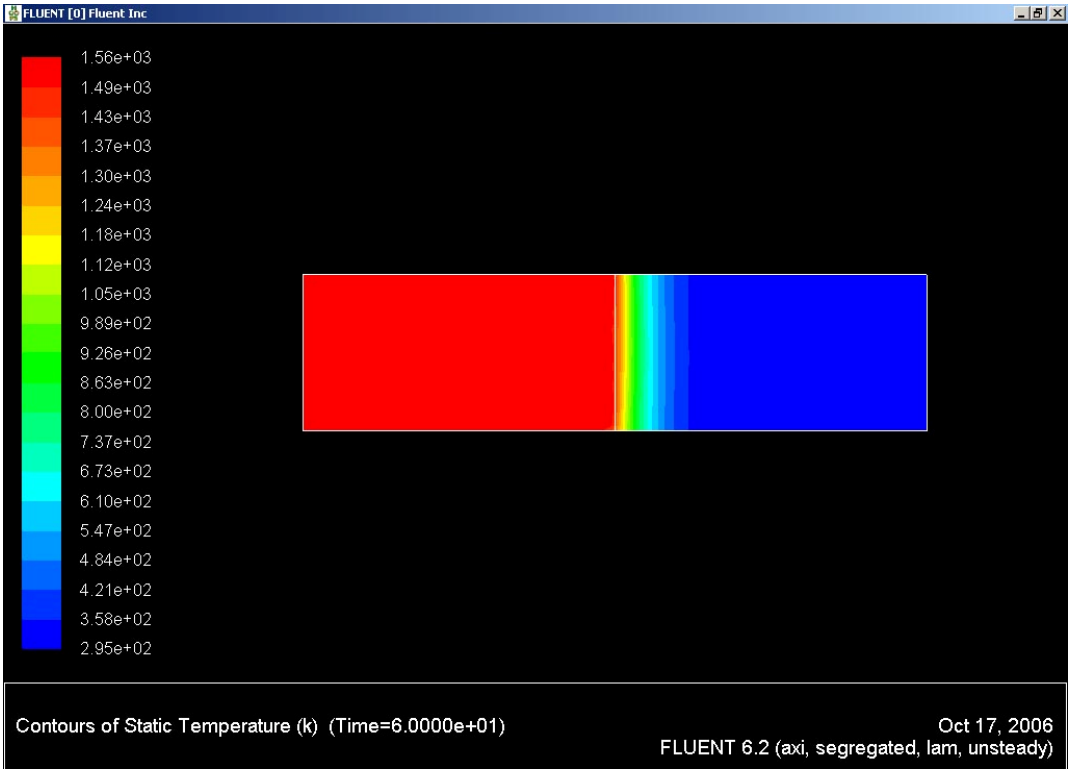
U tablici 13.4, danoj u prilogu, prikazane su temperature u osi uzorka dobivene uz korištenje numeričkog modela zagrijavanja. Dio tablice označen crnom bojom prikazuje vrijednosti temperatura u litini. Drugi dio tablice označen crvenom bojom prikazuje vrijednosti temperatura u kalupu. Crvenim retkom prikazan je granični sloj između litine i kalupa.

10.4 Utjecaj koeficijenta toplinske vodljivosti na skrućivanje litine

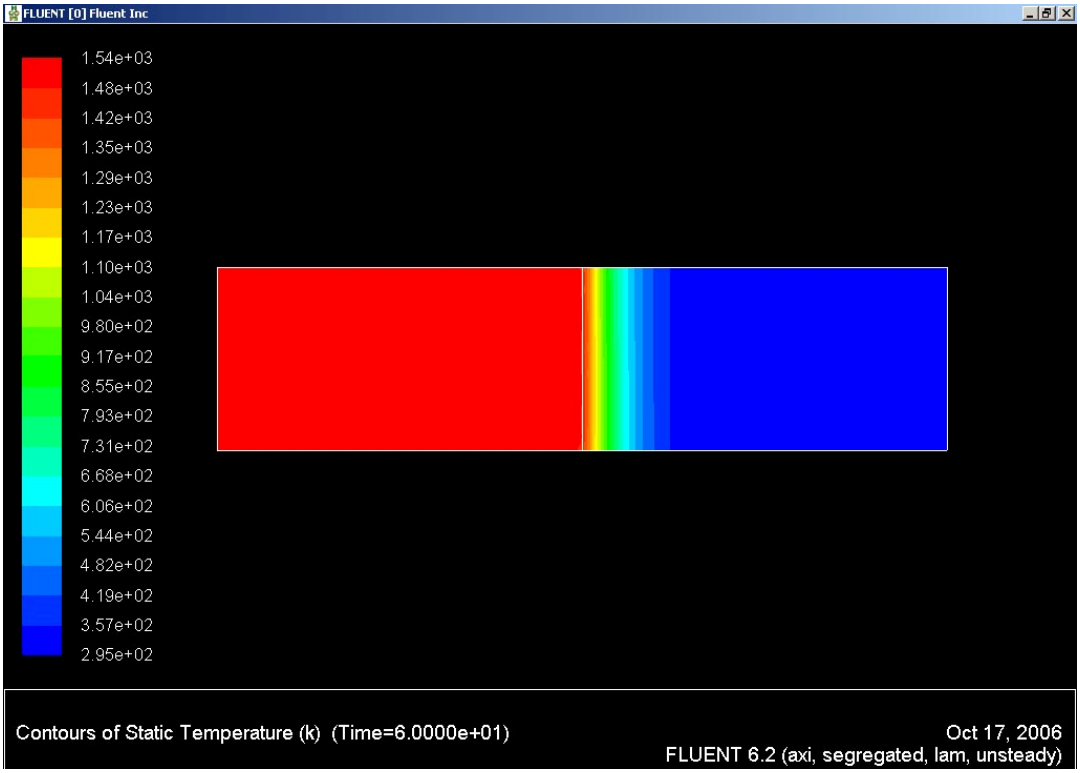
Kako bi se pokazao utjecaj različih koeficijenata toplinske vodljivosti kalupnih mješavina na odvođenje topline prilikom skrućivanja načinjene su dvije simulacije u kojima su uzorci različitih granulacija, a s time i različitih koeficijenata toplinske vodljivosti, bili zagrijavani litinom sivog lijeva.

Na slici 10.12 prikazana je temperaturna distribucija unutar uzorka zagrijavanog litinom sivog lijeva. Uljevna temperatura sivog lijeva bila je 1311 °C, dok je koeficijent toplinske vodljivosti $\lambda = 0{,}489$ što odgovara uzorku granulacije G1.

Na slici 10.13 prikazana je temperaturna distribucija unutar uzorka zagrijavanog litinom sivog lijeva. Uljevna temperatura sivog lijeva bila je 1311 °C, dok je koeficijent toplinske vodljivosti $\lambda = 0{,}83$ što odgovara uzorku granulacije G2.

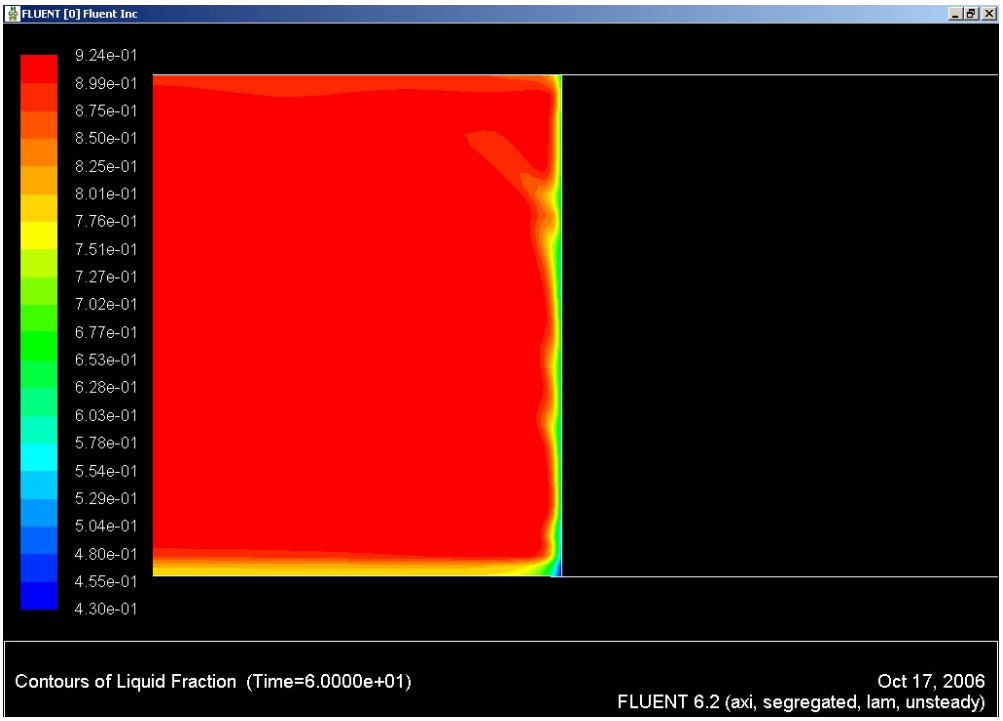


Slika 10.12 Temperaturna polja za $\lambda = 0{,}489$ W/m K

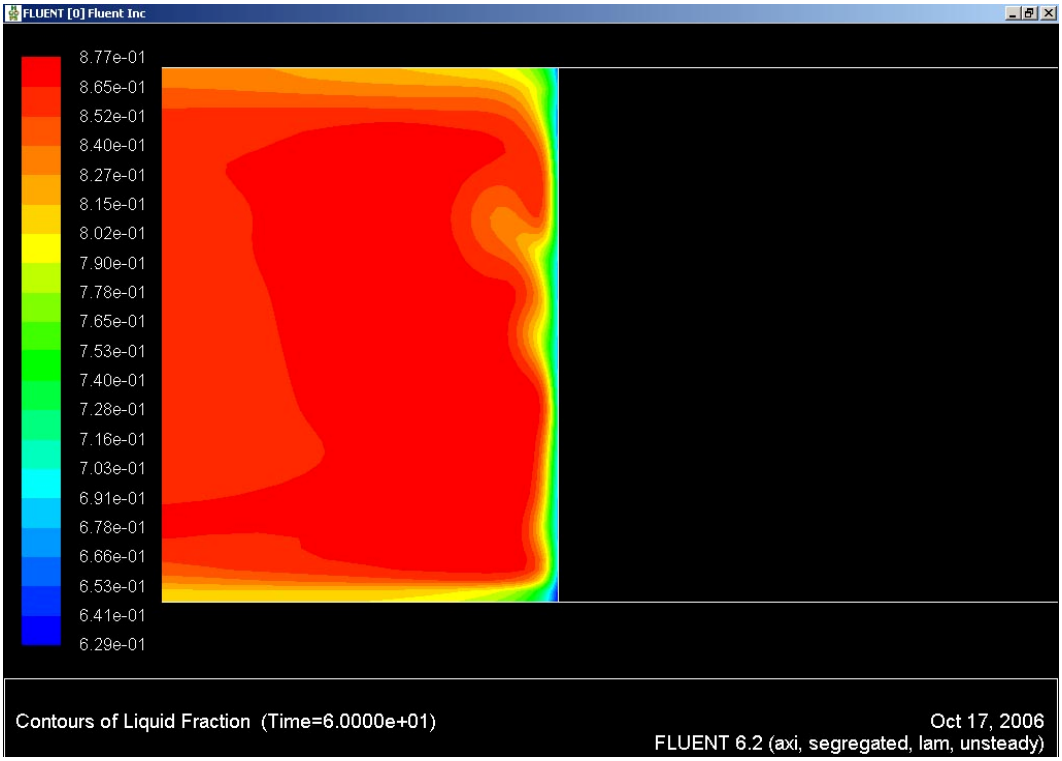


Slika 10.13 Temperaturna polja za λ = 0,83 W/m K

Detaljnija analiza kontaktne površina između metala i uzorka s obzirom na različite koeficijente toplinske vodljivosti prikazana je na slikama 10.14 i 10.15.



Slika 10.14 Skrućivanje nakon 60 s uz λ = 0,489 W/m K



Slika 10.15 Skrućivanje nakon 60 s uz λ = 0,83 W/m K

Iz slika 10.14 i 10.15 jasno se vidi kako je naoko mala razlika u koeficijentima toplinske vodljivosti dovela do skrućivanja znatno većeg sloja metala. U oba slučaja vrijeme hlađenja uzorka je 60 s.

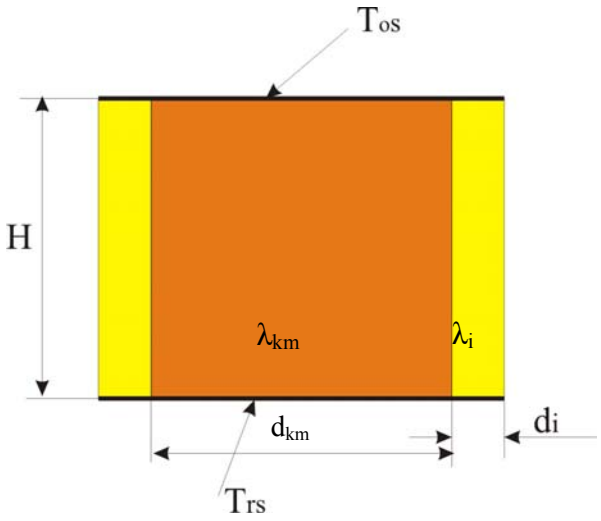
Tablični prikaz temperaturne distribucije nakon 60 s hlađenja dan je u prilogu. Iz tablice se jasno vidi da uzorci različite granulacije posjeduju različitu debljinu deformacijskog sloja. Pod deformacijskim slojem podrazumjeva se sloj kalupne mješavine zagrijan na višu temperaturu od temperature alotropske modifikacije kremenog pijeska.

Plavom bojom u tablici označeni su rezultati na kontaktnoj površina metal - uzorak. Crvenom bojom označeni su redovi koji su na temperaturama višim od temperature alotropske modifikacije, 570 °C ili 843 K. Iz prikazane tablice 13.5 slijedi da uzorak s manjim koeficijentom toplinske vodljivosti posjeduje dilatacijski sloj od 0,053272 mm dok uzorak krupnije granulacije koji ima veći koeficijent toplinske vodljivosti ima dilatacijski sloj debljine 0,0540158 mm.

Različite vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti s obzirom na granulaciju kalupnog pijeska pokazuju se i na višim temperaturama od istraživanih u ovom radu.

10.5 Numerički model uzorka na mjernom uređaju za mjerenje koeficijenta toplinske vodljivosti

Postavljanje numeričkog modela o ovom slučaju potvrdit će pouzdanost mjerenja koeficijenta toplinske vodljivosti na konstruiranom mjernom uređaju opisanom u poglavlju 6. Rezultati dobiveni rješavanjem numeričkog modela usporedit će se s eksperimentalnim kako bi se potvrdila ispravnost mjerenja. Za izradu simulacije najprije je potrebno definirati numerički model s odgovarajućim rubnim uvjetima. Na slici 10.16 shematski je prikazan model uzoraka s pripadajućim rubnim uvjetima.



Slika 10.16 Shematski prikaz uzorka s rubnim uvjetima

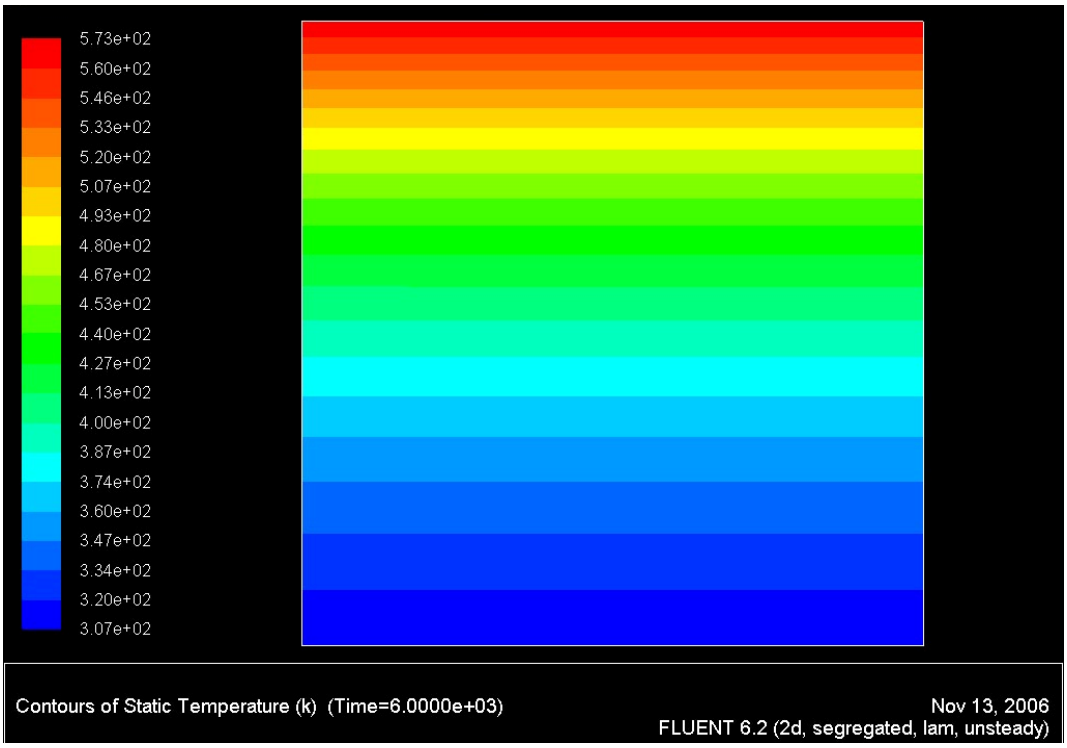
Rubni uvjeti preuzeti su iz eksperimentalnog dijela istraživanja i prikazani su u tablici 10.1.

Tablica 10.1 Vrijednosti geometrije uzorka i rubnih uvjeta

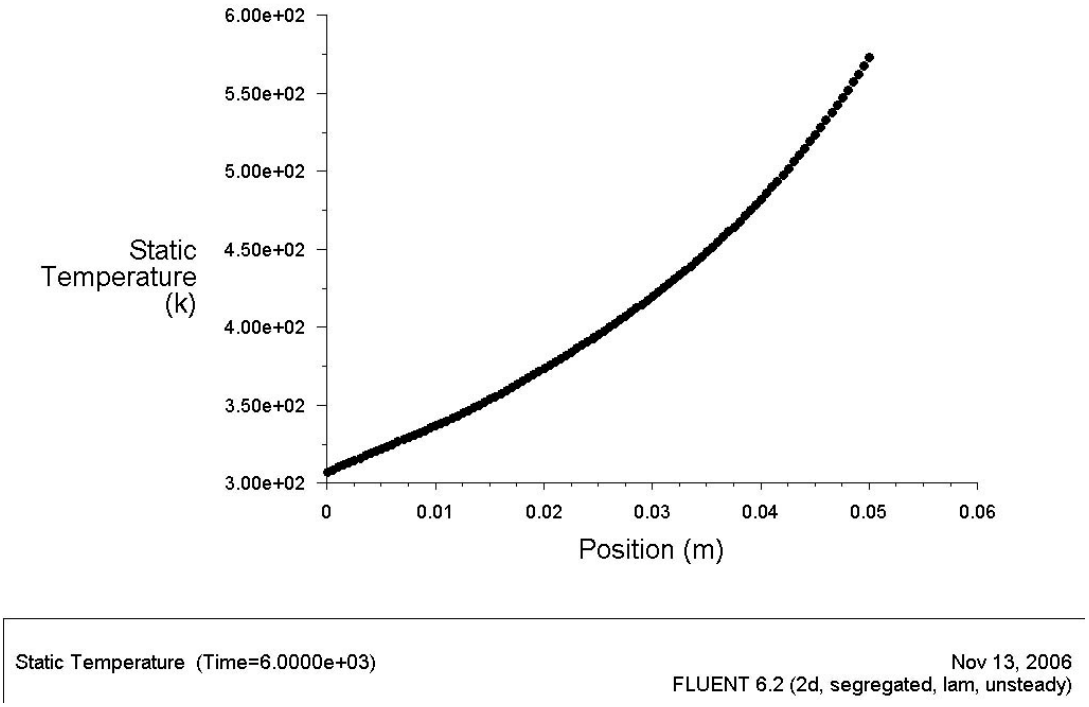
Oznaka	**Opis**	**Vrijednost**
T_{os}	Temperatura ogrjevnog spremnika, K	573
T_{rs}	Temperatura rashladnog spremnika, K	307
T_o	Tempereatura okoline, K	297
λ_i	Koeficijent toplinske vodljivosti izolacije, W/m K	0,031
λ_{km}	Koeficijent toplinske vodljivosti kalupne mješavine, W/m K	polinom (Tablica 6.2)
H	Visina uzorka, mm	50
d_i	Debljina izolacije, mm	40
d_{km}	Promjer uzorka, mm	50

Vrijeme zagrijavanja uzorka na mjernom uređaju određeno je na temelju brija istovrsnih mjerenja temperature, tj uspostave stacionarnog stanja. Distribucija temperature za uzorak M1 kroz sredinu uzorka prikazana je na slici 10.17 i 10.18 Iz slike 10.17 je vidljivo da vrijeme držanja uzorka u procesu mjerenja koeficijenta toplinske vodljivosti iznosi 6000 s. Za to vrijeme uspostavi se konstantni toplinski tok duž cijele visine uzorka s kojime se izračunava vrijednost koeficijenta toplinske vodljivosti za određenu mješavinu.

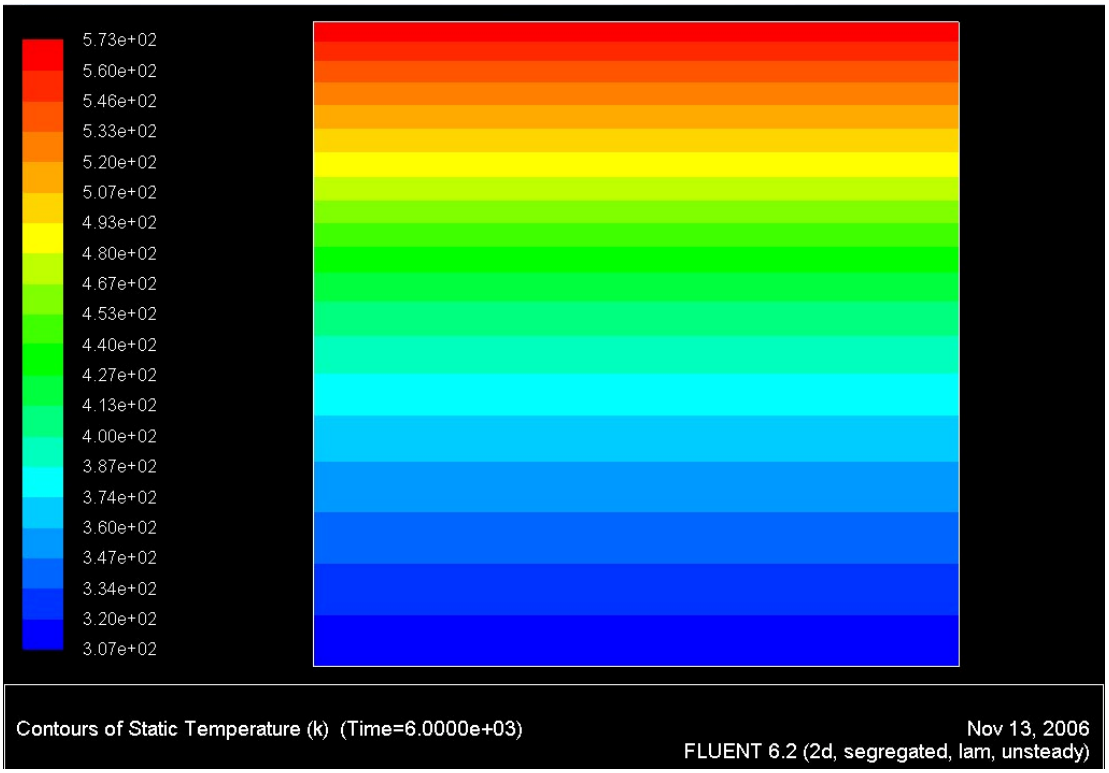
Rezultati simulacije za uzorke M2 i M3 prikazani su na slikama 10.19, 10.20, 10.21 i 10.22.



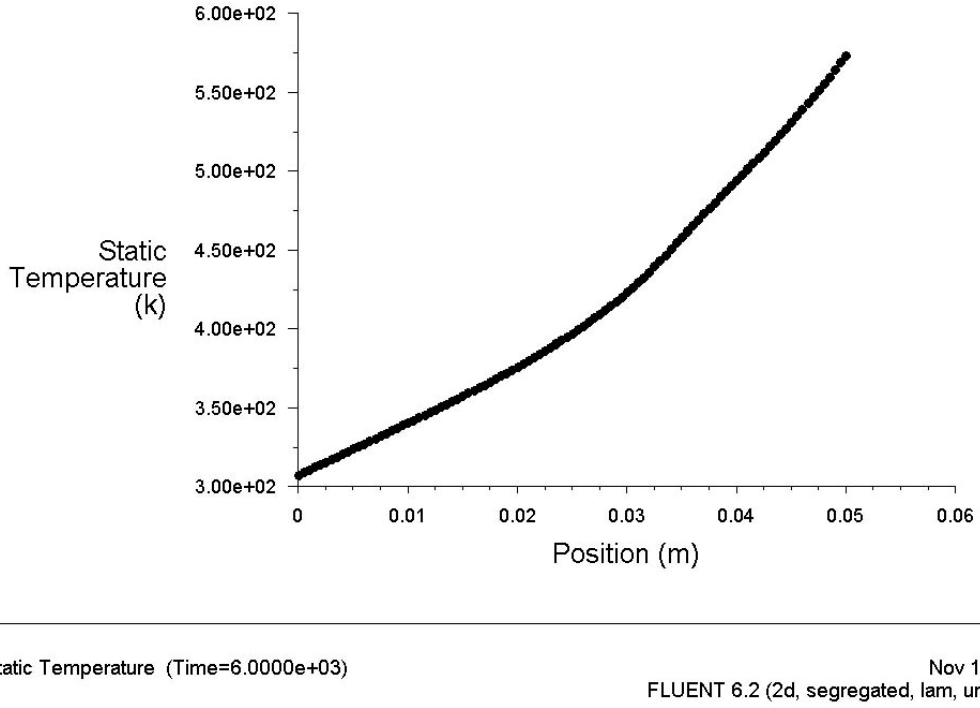
Slika 10.19 Distribucija temperature u uzorku M1 nakon 6000 s u procesu mjerenja



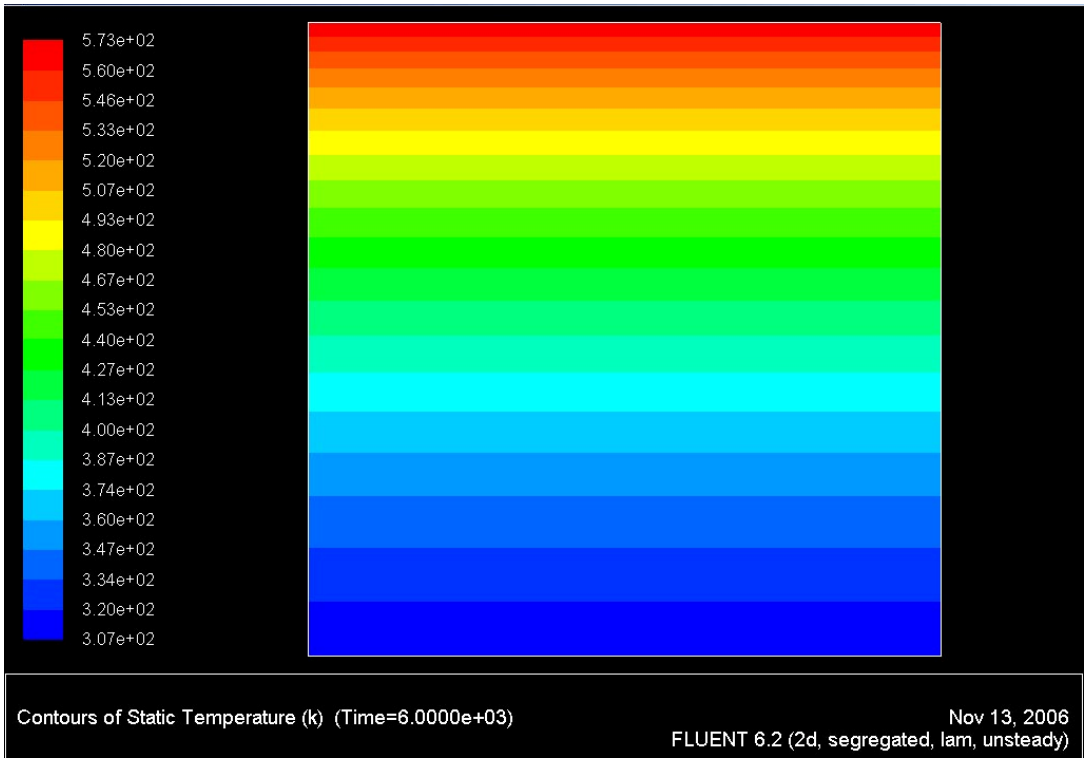
Slika 10.20 Distribucija temperatura kroz uzorak M1



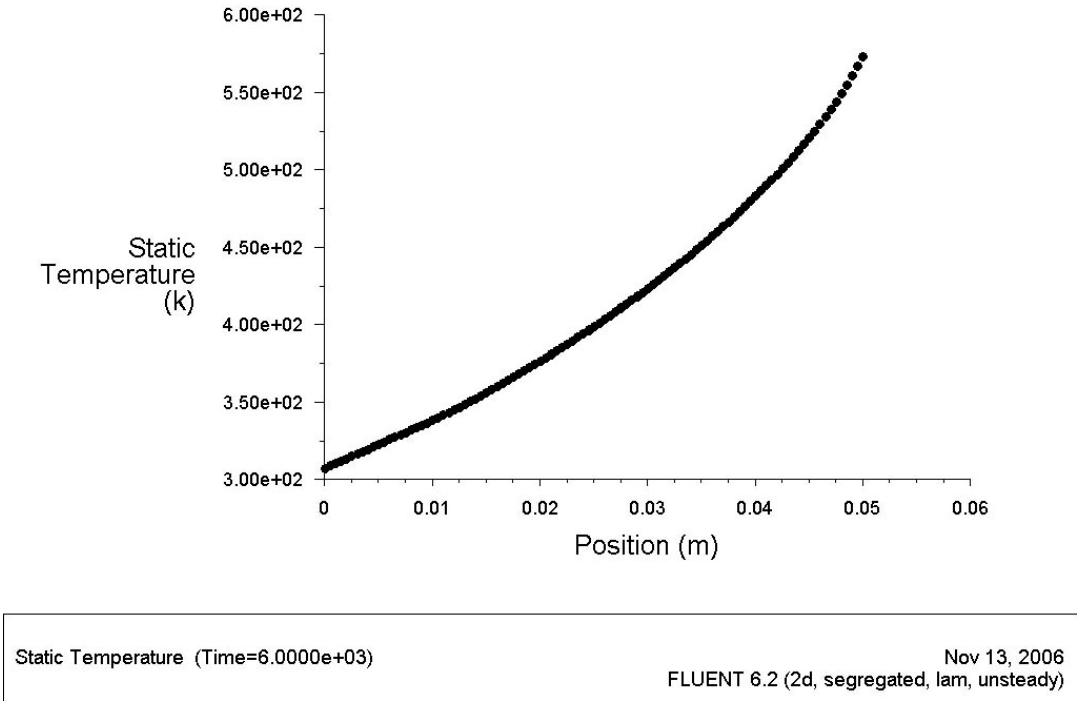
Slika 10.21 Distribucija temperature u uzorku M2 nakon 6000 s u procesu mjerenja



Slika 10.22 Distribucija temperatura kroz uzorak M2

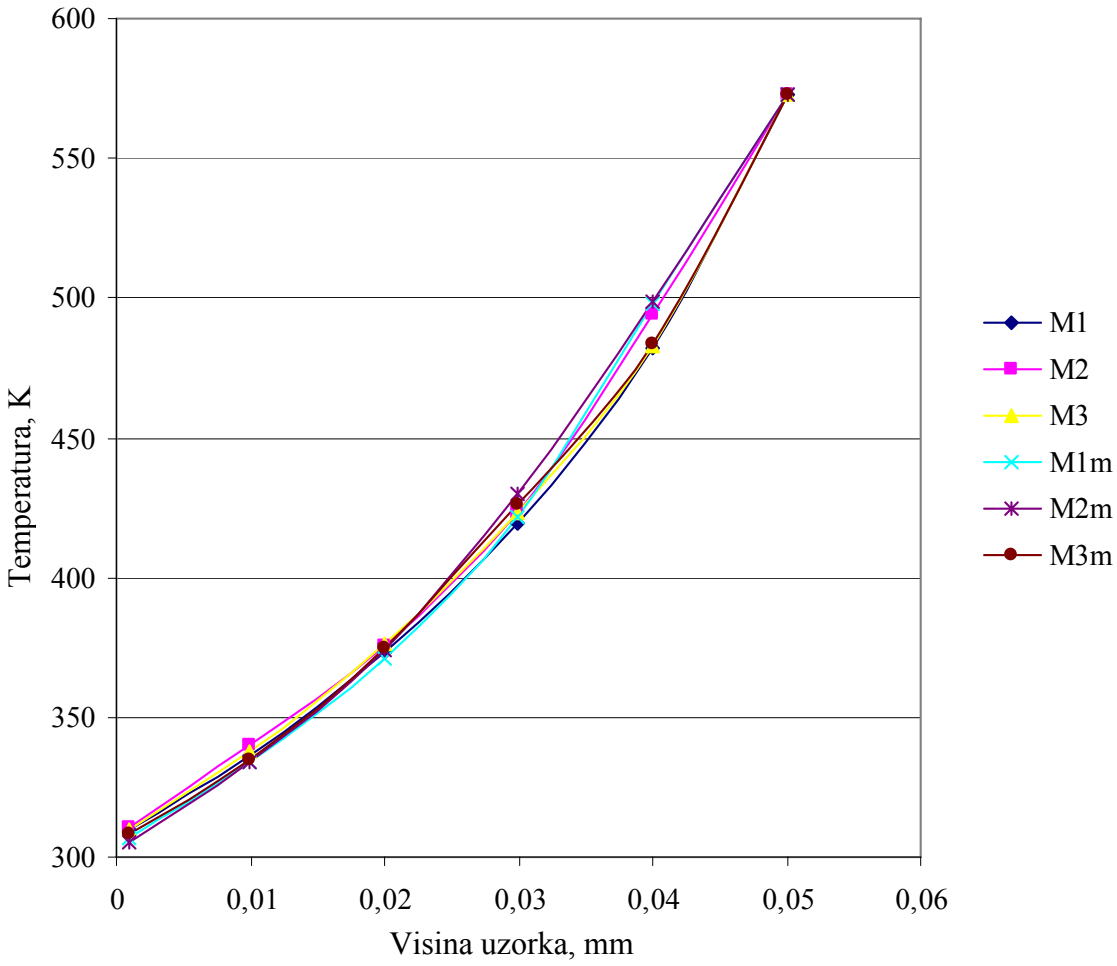


Slika 10.23 Distribucija temperature u uzorku M3 nakon 6000 s u procesu mjerenja



Slika 10.24 Distribucija temperatura kroz uzorak M3

Ukoliko se u istom dijagramu prikažu eksperimentalno dobiveni rezultati i rezultati simulacije kao na slici 10.25 može se zaključiti da je postignuta vrlo dobra podudarnost simuliranog modela s eksperimentalnim rezultatima. Stoga toplinski tok kroz materijal koji izolira mjerni uzorak od okoline možemo zanemariti jer je u simulaciji pretpostavljen da je jednak nuli.



Slika 10.25 Usporedba rezultata mjerenja koeficijenta toplinske vodljivosti s rezultatima dobivenim simulacijom

11. ZAKLJUČAK

Odlupljivanje, kao glavni problem, vezano je za kalupne mješavine s fizikalno očvrstivim vezivima. Iz prethodnih istraživanja slijedi da je sloj koji je odgovoran za nastanak odlupina isključivo dio kalupa koji se zagrijao na temperaturu višu od temperature alotropske modifikacije kremenog pijeska odnosno 570 °C. Ti su slojevi vrlo nestabilni i primarni su uzročnici unutarnjih naprezanja. Uz gibanje strukture i uz pojavu velikih unutarnjih naprezanja kalupna mješavina se deformira prilikom čega dolazi do lomljenja sitnih dijelova kalupne mješavine koja pada u litinu te uzrokuje pojavu odlupina.

Stoga se mehanizam nastanka odlupljivanja može detaljnije objasniti sljedećim konstatacijama:

I. Odlupine nastaju isključivo zbog pojave tlačnih naprezanja u kalupu.

Primjenom kremenog pijeska za izradu jednokratnih pješčanih kalupa suočavamo se s njegovim svojstvom alotropske modifikacije za vrijeme hlađenja odljevka u kalupu. Koristeći pijeskove koji ne posjeduju promjenu svoje strukture s temperaturom može se izbjeći pojava odlupina.

II. Tlačna naprezanja ovise o granulometrijskom sastavu kalupnog pijeska.

Dilatometrijskim ispitivanjima različitih granulometrijskih sastava pokazano je kako granulometrijski sastav utječe na veličinu dilatacije kalupa izazvanog zagrijavanjem prilikom ulijevanja što je objašnjeno u poglavlju 8. Veća zrna nakon zagrijavanja na 570 °C imaju znatno veću promjenu volumena. Veća promjena volumena uzrokovana je većim sadržajem kristala kremena čije je zakretanje osnovni uzročnik širenja zrna. Ako se radi o mješavinama koje imaju različite udjele pojedinih frakcija može doći do pojave još većih dilatacijskih sila nego što je to slučaj kod jednolike granulacije. Uzrok tomu je popunjavanje prostora između velikih zrna sitnijim frakcijama koje onemogućavaju ugibanje velikim zrnima prenoseći tako dilataciju u unutrašnjost kalupa uzrokujući pritom nastanak tlačnih naprezanja.

III. Vrsta pijeska i njegov granulometrijski sastav mijenja toplinska svojstva kalupa

Konstrukcijom i izvedbom mjerne opreme za mjerenje koeficijenta toplinske vodljivosti kalupnih mješavina na standardnom uzorku kalupne mješavine u području temperatura do 300 °C dobiveni su različiti koeficijenti toplinske vodljivosti koji utječu na hlađenje odljevka prilikom njegova skrućivanja. Različita toplinska vodljivost također ima utjecaj na brzinu zagrijavanja kalupa pa i na debljinu sloja koji je uzročnik nastanka odlupina.

IV. Uz poznavanje granulometrijskog sastava kalupnog pijeska mogu se numerički odrediti tlačna naprezanja u kalupu bez laboratorijskih mjerenja.

Postavljanjem matematičkog modela kojim se povezuje cjelokupni granulometrijski sastav pijeska s tlačnim naprezanjima pojedine frakcije može se odrediti ukupan iznos tlačnih naprezanja u kalupu.

V. Kalupni pijesak može se na temelju granulometrijskog sastava klasificirati s obzirom na sklonost odlupljivanju.

Određivanje iznosa tlačnih naprezanja numeričkim putem, uz poznavanje granulometrijskog sastava kalupnog pijeska, mogu se uspoređivati pojedini pjeskovi s obzirom na svojstvo sklonosti odlupljivanju. Stoga primjena određivanja tlačnih naprezanja ovom metodom omogućava klasifikaciju ljevačkih pjeskova s obzirom na sklonost odlupljivanju što je bio zadatak ovog rada.

Daljnja istraživanja valjalo bi usmjeriti na istraživanje kalupa u području rekondenzacijske zone. Proširivanjem spoznaja mehanizma nastanka rekondenzacijske zone mogla bi se numerički objasniti rekondenzacijska čvrstoća kalupa i time zaokružiti poznavanje mehanizma nastanka odlupljivanja.

12. ZAKLJUČAK DOKTORSKOGA RADA

Znanstveni doprinos doktorskog rada pod naslovom ″Istraživanje mehanizma nastanka odlupljivanja u kalupu″ proširio je znanstvene spoznaje o ponašanju kalupnih mješavina prilikom zagrijavanja. Opisivanjem ugibivosti kalupne mješavine uz provedena mjerenja koeficijenta toplinske vodljivosti te na temelju definiranja ugibivosti načinjena je klasifikacija ljevačkih pjeskova s obzirom na pojavu odlupljivanja što u potpunosti potvrđuje zadanu hipotezu.

Objašnjenje nastanka odlupina otvara mogućnost dimenzioniranja i optimiranja svojstava pogonskih mješavina prilikom procesa kalupljenja te znatno smanjuje udio odmetka u ljevačkoj proizvodnji.

13. PRILOZI

Tablica 13.1 Rezultati zagrijavanja uzorka kalupne mješavine litinom aluminija

t (s)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	Tok (°C)
0	20	21	22	19	26
5	23	18	22	18	25
10	34	17	22	17	24
15	51	18	22	16	23
20	67	18	22	17	23
25	80	19	21	16	23
30	86	20	21	16	23
35	98	22	22	16	22
40	99	24	22	17	22
45	99	27	22	17	22
50	99	30	22	17	23
55	98	32	22	17	23
60	98	36	22	18	23
65	98	38	22	18	22
70	98	41	22	17	22
75	99	45	23	17	22
80	99	47	23	18	22
85	99	50	24	18	23
90	99	52	23	18	22
95	99	55	24	19	23
100	99	57	25	19	21
105	100	59	25	18	23
110	99	62	26	19	22
115	101	64	26	19	23
120	104	65	26	20	23
125	106	66	27	20	22
130	108	68	28	20	22
135	111	68	28	20	22
140	115	70	29	21	23
145	118	72	30	21	23
150	122	73	31	22	23
155	126	75	31	22	23
160	129	75	33	22	23
165	134	76	33	23	23
170	137	77	36	23	23
175	140	78	35	24	23
180	143	80	36	24	23
185	146	80	36	25	23
190	151	80	38	25	23
195	152	81	39	26	24
200	155	82	39	26	23
205	157	82	40	27	23
210	159	83	41	27	23
215	162	83	41	27	24
220	167	85	42	28	24
225	168	85	43	29	23
230	169	86	44	30	23

235	172	86	45	30	24
240	175	86	46	31	24
245	175	86	46	32	23
250	177	87	47	32	24
255	179	88	48	33	24
260	181	88	49	34	23
265	182	88	50	34	24
270	184	88	51	35	23
275	185	89	51	35	23
280	186	89	52	36	24
285	187	89	54	36	24
290	189	90	54	38	24
295	190	90	55	38	23
300	191	90	55	39	24
305	192	91	55	39	24
310	193	91	57	40	24
315	195	91	57	40	23
320	195	91	58	41	24
325	195	91	59	42	24
330	196	91	59	42	24
335	196	92	60	43	24
340	197	91	60	43	23
345	199	91	61	44	24
350	199	92	62	45	24
355	200	92	62	46	24
360	201	93	63	45	24
365	201	93	63	46	24
370	203	93	64	47	24
375	201	93	65	47	24
380	202	93	65	48	24
385	202	94	66	49	24
390	202	94	66	50	24
395	203	94	66	51	24
400	203	94	67	51	24
405	203	94	68	51	25
410	203	93	68	52	24
415	204	94	68	52	24
420	204	94	69	53	25
425	205	94	70	53	23
430	204	95	69	54	24
435	204	95	71	55	23
440	205	94	71	55	24
445	205	95	71	56	25
450	205	95	72	56	25
455	205	95	72	56	25
460	205	95	73	57	24
465	206	95	73	58	25
470	206	95	73	58	24
475	207	95	74	59	24
480	207	95	73	59	24
485	206	95	74	60	23
490	206	96	74	61	24
495	206	95	75	60	24
500	206	96	76	61	25

505	207	96	76	61	24
510	209	96	77	62	25
515	207	96	77	62	24
520	207	96	77	63	24
525	207	96	77	63	25
530	207	96	78	64	24
535	207	96	78	64	25
540	206	96	78	64	24
550	207	95	78	64	25
555	207	96	78	64	25
560	206	96	78	64	24
565	207	96	79	65	23
570	207	97	79	65	25
575	208	96	79	66	24
580	207	96	80	66	24
585	207	96	80	66	25
590	207	97	80	67	25
595	207	97	81	67	24
600	207	97	81	67	25
605	207	96	82	67	24
610	207	97	81	68	25
615	208	97	81	68	25
620	207	96	81	68	24
625	207	97	81	68	24
630	207	96	82	69	24
635	207	97	82	69	25
640	207	97	82	69	25
645	209	97	83	70	24
650	207	96	83	70	25
655	207	96	83	70	24
660	209	97	84	71	24
665	209	97	84	71	24
670	207	97	83	71	23
675	207	98	83	71	24
680	207	97	84	71	25
685	210	98	84	72	24
690	207	98	85	72	24
695	206	99	84	73	24
700	207	100	85	71	25
705	207	99	85	72	24
710	206	99	84	73	25
715	206	100	85	73	25
720	206	101	85	73	24
725	206	101	85	73	24
730	206	102	85	73	25
735	208	101	85	73	25
740	206	101	85	74	25
745	205	102	86	74	25
750	206	102	86	74	25
755	205	103	86	74	25
760	206	102	86	74	24
765	205	104	86	75	25
770	205	103	86	74	25
775	205	104	86	75	25

780	207	106	86	75	25
785	205	104	86	75	24
790	204	104	86	75	25
795	206	104	87	75	24
800	204	104	87	75	25
805	206	106	86	76	24
810	204	106	87	75	24
815	204	106	87	75	25
820	204	106	86	76	24
825	204	107	87	76	25
830	203	107	87	76	25

U tablici 13.2 prikazane su izračunate temperature u osi uzorka. Prvi dio tablice tj. temperature označene crnom bojom prikazuju vrijednosti temperatura u litini. Drugi dio tablice tj. temperature koje su označene crvenom bojom prikazuju vrijednosti temperatura u kalupu. Crvenim retkom prikazan je granični sloj između litine i kalupa.

Tablica 13.2 Distribucija temperature u osi kalupa pri lijevanu aluminija

Vrijeme skrućivanja 10s		Vrijeme skrućivanja 20s		Vrijeme skrućivanja 40s	
Visina (m)	**Temperatura (K)**	**Visina (m)**	**Temperatura (K)**	**Visina (m)**	**Temperatura (K)**
0.000670195	934.32	0.000670195	929.185	0.000670195	927.883
0.00137615	934.313	0.00137615	929.183	0.00137615	927.881
0.00211978	934.301	0.00211978	929.178	0.00211978	927.878
0.00290309	934.282	0.00290309	929.17	0.00290309	927.873
0.0037282	934.256	0.0037282	929.16	0.0037282	927.866
0.00459734	934.22	0.00459734	929.147	0.00459734	927.857
0.00551286	934.176	0.00551286	929.13	0.00551286	927.845
0.00647723	934.12	0.00647723	929.109	0.00647723	927.83
0.00749306	934.052	0.00749306	929.083	0.00749306	927.811
0.0085631	933.97	0.0085631	929.052	0.0085631	927.788
0.00969024	933.872	0.00969024	929.016	0.00969024	927.76
0.0108775	933.756	0.0108775	928.974	0.0108775	927.726
0.0121282	933.621	0.0121282	928.925	0.0121282	927.685
0.0134455	933.463	0.0134455	928.868	0.0134455	927.636
0.0148332	933.282	0.0148332	928.804	0.0148332	927.577
0.0162949	933.073	0.0162949	928.731	0.0162949	927.507
0.0178347	932.833	0.0178347	928.648	0.0178347	927.423
0.0194566	932.561	0.0194566	928.555	0.0194566	927.324
0.021165	932.253	0.021165	928.451	0.021165	927.206
0.0229646	931.906	0.0229646	928.336	0.0229646	927.065
0.0248602	931.516	0.0248602	928.208	0.0248602	926.899
0.026857	931.082	0.026857	928.068	0.026857	926.703
0.0289604	930.598	0.0289604	927.911	0.0289604	926.473
0.0311759	930.063	0.0311759	927.704	0.0311759	926.203
0.0335097	929.474	0.0335097	927.409	0.0335097	925.888
0.0358436	928.862	0.0358436	927.042	0.0358436	925.543
0.0378551	928.319	0.0378551	926.667	0.0378551	925.223
0.0395889	927.841	0.0395889	926.303	0.0395889	924.929
0.0410833	927.392	0.0410833	925.958	0.0410833	924.664
0.0423714	926.957	0.0423714	925.641	0.0423714	924.428
0.0434816	926.555	0.0434816	925.354	0.0434816	924.218
0.0444385	926.189	0.0444385	925.096	0.0444385	924.033
0.0452633	925.862	0.0452633	924.867	0.0452633	923.87
0.0459742	925.572	0.0459742	924.665	0.0459742	923.728
0.0465869	925.316	0.0465869	924.487	0.0465869	923.604
0.047115	925.093	0.047115	924.332	0.047115	923.497
0.0475702	924.898	0.0475702	924.197	0.0475702	923.403
0.0479626	924.728	0.0479626	924.079	0.0479626	923.322
0.0483008	924.581	0.0483008	923.977	0.0483008	923.251
0.0485922	924.454	0.0485922	923.888	0.0485922	923.19
0.0488435	924.344	0.0488435	923.811	0.0488435	923.137
0.04906	924.249	0.04906	923.745	0.04906	923.091
0.0492467	924.166	0.0492467	923.688	0.0492467	923.051
0.0494075	924.095	0.0494075	923.638	0.0494075	923.017
0.0495462	924.034	0.0495462	923.595	0.0495462	922.987
0.0496657	923.981	0.0496657	923.558	0.0496657	922.961
0.0497687	923.935	0.0497687	923.525	0.0497687	922.938
0.0498575	923.895	0.0498575	923.497	0.0498575	922.919
0.049934	923.861	0.049934	923.474	0.049934	922.902
0.05	923.832	0.05	923.453	0.05	922.887

0.05	923.832	0.05	923.453	0.05	922.887
0.0501	902.233	0.0501	908.154	0.0501	912.067
0.0502042	879.927	0.0502042	892.305	0.0502042	900.837
0.0503128	856.995	0.0503128	875.936	0.0503128	889.202
0.050426	833.473	0.050426	859.05	0.050426	877.158
0.0505439	809.41	0.0505439	841.655	0.0505439	864.699
0.0506668	784.863	0.0506668	823.763	0.0506668	851.823
0.0507949	759.9	0.0507949	805.394	0.0507949	838.526
0.0509284	734.597	0.0509284	786.568	0.0509284	824.81
0.0510675	709.04	0.0510675	767.313	0.0510675	810.677
0.0512124	683.325	0.0512124	747.663	0.0512124	796.134
0.0513635	657.554	0.0513635	727.655	0.0513635	781.185
0.0515209	631.841	0.0515209	707.334	0.0515209	765.844
0.0516849	606.306	0.0516849	686.75	0.0516849	750.123
0.0518559	581.074	0.0518559	665.959	0.0518559	734.039
0.052034	556.276	0.052034	645.023	0.052034	717.612
0.0522197	532.049	0.0522197	624.011	0.0522197	700.867
0.0524131	508.53	0.0524131	602.998	0.0524131	683.832
0.0526148	485.856	0.0526148	582.062	0.0526148	666.54
0.0528249	464.16	0.0528249	561.29	0.0528249	649.027
0.0530438	443.569	0.0530438	540.769	0.0530438	631.335
0.053272	424.203	0.053272	520.593	0.053272	613.51
0.0535098	406.164	0.0535098	500.858	0.0535098	595.602
0.0537576	389.542	0.0537576	481.659	0.0537576	577.666
0.0540158	374.403	0.0540158	463.093	0.0540158	559.763
0.0542849	360.788	0.0542849	445.256	0.0542849	541.954
0.0545653	348.715	0.0545653	428.238	0.0545653	524.309
0.0548576	338.168	0.0548576	412.126	0.0548576	506.896
0.0551621	329.106	0.0551621	396.997	0.0551621	489.79
0.0554795	321.457	0.0554795	382.919	0.0554795	473.065
0.0558102	315.125	0.0558102	369.948	0.0558102	456.798
0.0561549	309.989	0.0561549	358.126	0.0561549	441.063
0.0565141	305.917	0.0565141	347.478	0.0565141	425.937
0.0568884	302.763	0.0568884	338.01	0.0568884	411.49
0.0572785	300.383	0.0572785	329.709	0.0572785	397.791
0.057685	298.634	0.057685	322.545	0.057685	384.901
0.0581086	297.384	0.0581086	316.465	0.0581086	372.875
0.05855	296.519	0.05855	311.4	0.05855	361.758
0.05901	295.938	0.05901	307.266	0.05901	351.584
0.0594895	295.561	0.0594895	303.964	0.0594895	342.374
0.0599891	295.324	0.0599891	301.39	0.0599891	334.138
0.0605097	295.18	0.0605097	299.435	0.0605097	326.869
0.0610522	295.097	0.0610522	297.991	0.0610522	320.543
0.0616177	295.05	0.0616177	296.956	0.0616177	315.126
0.0622069	295.025	0.0622069	296.237	0.0622069	310.565
0.0628209	295.012	0.0628209	295.756	0.0628209	306.797
0.0634608	295.005	0.0634608	295.445	0.0634608	303.748
0.0641276	295.002	0.0641276	295.252	0.0641276	301.334
0.0648225	295.001	0.0648225	295.137	0.0648225	299.47
0.0655467	295.000	0.0655467	295.071	0.0655467	298.068
0.0663014	295.000	0.0663014	295.035	0.0663014	297.043
0.0670878	295.000	0.0670878	295.017	0.0670878	296.317
0.0679074	295.000	0.0679074	295.007	0.0679074	295.82
0.0687614	295.000	0.0687614	295.003	0.0687614	295.492

0.0696515	295.000	0.0696515	295.001	0.0696515	295.284
0.070579	295.000	0.070579	295.000	0.070579	295.157
0.0715456	295.000	0.0715456	295.000	0.0715456	295.083
0.0725528	295.000	0.0725528	295.000	0.0725528	295.042
0.0736025	295.000	0.0736025	295.000	0.0736025	295.02
0.0746964	295.000	0.0746964	295.000	0.0746964	295.009
0.0758364	295.000	0.0758364	295.000	0.0758364	295.004
0.0770243	295.000	0.0770243	295.000	0.0770243	295.001
0.0782623	295.000	0.0782623	295.000	0.0782623	295.000
0.0795524	295.000	0.0795524	295.000	0.0795524	295.000
0.0808969	295.000	0.0808969	295.000	0.0808969	295.000
0.0822979	295.000	0.0822979	295.000	0.0822979	295.000
0.083758	295.000	0.083758	295.000	0.083758	295.001
0.0852795	295.000	0.0852795	295.000	0.0852795	295.002
0.0868652	295.000	0.0868652	295.000	0.0868652	295.005
0.0885175	295.000	0.0885175	295.001	0.0885175	295.01
0.0902395	295.000	0.0902395	295.003	0.0902395	295.021
0.092034	295.001	0.092034	295.009	0.092034	295.041
0.093904	295.006	0.093904	295.026	0.093904	295.08
0.0958528	295.025	0.0958528	295.065	0.0958528	295.146
0.0978836	295.082	0.0978836	295.149	0.0978836	295.253
0.1	295.225	0.1	295.303	0.1	295.414

Tablica 13.3 Rezultati zagrijavanja uzorka kalupne mješavine litinom sivog lijeva.

t (s)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	Tok (°C)
0	21	22	21	21	23
5	30	20	21	20	24
10	83	20	21	20	23
15	97	20	22	19	23
20	98	22	21	19	23
25	101	19	21	21	23
30	99	34	21	20	24
35	98	41	21	19	23
40	113	50	21	19	22
45	139	57	21	19	24
50	148	66	22	20	23
55	150	72	22	20	23
60	173	76	23	20	23
65	196	80	24	20	24
70	215	83	25	20	23
75	233	86	26	21	23
80	250	87	27	21	23
85	268	89	28	21	24
90	283	91	30	21	23
95	297	93	32	21	23
100	314	94	34	21	23
105	324	95	36	23	23
110	336	95	37	23	23
115	346	96	39	23	23
120	354	97	41	23	23
125	363	96	42	24	23
130	371	97	45	25	23
135	381	98	46	26	22
140	386	98	48	26	23
145	393	99	50	27	23
150	398	98	51	28	23
155	404	99	54	30	23
160	410	99	55	30	23
165	417	99	56	31	23
170	420	99	59	32	24
175	424	100	60	33	24
180	427	99	61	34	23
185	432	99	63	36	24
190	435	99	64	37	24
195	438	100	65	38	23
200	441	100	67	40	23
205	443	100	68	41	23
210	446	99	69	42	24
215	448	101	70	43	23
220	450	103	72	44	23
225	452	104	73	46	23
230	453	106	74	47	23
235	455	108	76	48	23
240	457	110	76	50	23
245	458	113	77	52	23
250	459	115	79	52	22
255	460	118	80	53	24

260	461	120	80	55	23
265	461	123	81	56	24
270	462	125	82	57	23
275	463	129	83	59	23
280	462	131	83	60	24
285	465	133	84	60	24
290	462	135	85	61	23
295	463	138	85	63	23
300	463	141	86	64	24
305	465	143	86	65	23
310	463	145	87	66	23
315	462	147	87	67	23
320	464	150	88	68	24
325	464	151	88	69	24
330	461	154	89	70	23
335	461	156	90	70	23
340	460	157	90	71	23
345	459	159	90	72	23
350	460	161	91	73	24
355	458	163	91	74	23
360	458	165	92	75	23
365	458	167	92	75	23
370	457	168	92	76	23
375	456	170	93	77	23
380	456	170	93	77	24
385	455	173	93	77	23
390	455	174	94	79	23
395	454	175	93	78	24
400	454	176	94	79	23
405	454	179	94	79	23
410	453	180	94	80	23
415	453	182	94	80	24
420	453	183	94	81	23
425	452	184	95	81	22
430	452	185	94	81	23
435	452	186	94	82	23
440	452	187	95	82	23
445	452	188	95	83	22
450	452	190	96	83	23
455	452	192	95	84	24
460	451	192	95	83	23
465	452	194	95	84	23
470	451	194	95	84	23
475	451	196	95	84	22
480	454	197	95	85	23
485	451	198	96	84	23
490	451	200	96	85	22
495	451	200	96	85	23
500	450	201	96	85	23
505	450	202	96	86	23
510	450	205	96	86	23
515	450	206	96	85	23
520	449	207	95	86	23
525	449	208	96	86	23

530	450	209	96	86	23
535	448	210	96	87	23
540	449	210	96	87	23
550	451	213	96	86	22
555	448	214	96	87	23
560	449	214	96	86	23
565	447	215	96	87	23
570	447	216	97	87	23
575	447	217	97	86	23
580	446	219	97	87	22
585	445	218	96	86	23
590	445	219	96	87	23
595	445	221	97	87	22
600	446	222	97	87	22
605	445	224	97	87	23
610	446	224	97	87	23
615	443	224	96	88	24
620	443	226	96	87	23
625	443	226	97	88	23
630	443	226	96	88	23
635	441	227	98	88	22
640	441	228	97	88	22
645	441	229	96	88	22
650	440	229	96	87	22
655	439	231	97	88	23
660	439	231	97	88	23
665	439	231	97	89	23
670	438	232	97	88	22
675	438	232	96	88	22
680	437	233	97	88	22
685	436	234	97	88	23
690	436	234	97	88	22
695	435	235	97	88	23
700	435	236	97	88	23
705	434	236	96	88	23
710	434	236	96	88	22
715	434	236	96	88	23

Tablica 13.4 Distribucija temperature u osi kalupa pri lijevanju sivog lijeva

Vrijeme skrućivanja 10s		Vrijeme skrućivanja 20s		Vrijeme skrućivanja 40s	
Visina (m)	Temperatura (K)	Visina (m)	Temperatura (K)	Visina (m)	Temperatura (K)
0.000670195	1496.31	0.000670195	1601.09	0.000670195	1575.11
0.00137615	1488.36	0.00137615	1602.01	0.00137615	1576.11
0.00211978	1486.67	0.00211978	1602.33	0.00211978	1576.35
0.00290309	1515.99	0.00290309	1602.54	0.00290309	1576.35
0.0037282	1514.28	0.0037282	1602.73	0.0037282	1576.23
0.00459734	1476.00	0.00459734	1602.91	0.00459734	1576.04
0.00551286	1474.00	0.00551286	1603.07	0.00551286	1575.78
0.00647723	1513.03	0.00647723	1603.19	0.00647723	1575.47
0.00749306	1514.99	0.00749306	1603.26	0.00749306	1575.1
0.0085631	1476.55	0.0085631	1603.26	0.0085631	1574.69
0.00969024	1468.64	0.00969024	1603.18	0.00969024	1574.22

0.0108775	1502.07	0.0108775	1603.03	0.0108775	1573.72
0.0121282	1520.96	0.0121282	1602.78	0.0121282	1573.17
0.0134455	1492.37	0.0134455	1602.41	0.0134455	1572.58
0.0148332	1464.9	0.0148332	1601.91	0.0148332	1571.95
0.0162949	1485.12	0.0162949	1601.23	0.0162949	1571.27
0.0178347	1519.65	0.0178347	1600.36	0.0178347	1570.53
0.0194566	1499.62	0.0194566	1599.28	0.0194566	1569.73
0.021165	1458.19	0.021165	1598.05	0.021165	1568.84
0.0229646	1470.17	0.0229646	1596.73	0.0229646	1567.86
0.0248602	1510.29	0.0248602	1595.47	0.0248602	1566.77
0.026857	1493.17	0.026857	1594.33	0.026857	1565.52
0.0289604	1449.64	0.0289604	1593.09	0.0289604	1564.08
0.0311759	1471.02	0.0311759	1591.53	0.0311759	1562.38
0.0335097	1498.14	0.0335097	1589.59	0.0335097	1560.33
0.0358436	1457.98	0.0358436	1587.39	0.0358436	1557.87
0.0378551	1446.4	0.0378551	1585.38	0.0378551	1555.33
0.0395889	1485.24	0.0395889	1583.61	0.0395889	1552.77
0.0410833	1467.58	0.0410833	1582.00	0.0410833	1550.18
0.0423714	1420.03	0.0423714	1580.44	0.0423714	1547.55
0.0434816	1445.49	0.0434816	1578.84	0.0434816	1544.88
0.0444385	1480.64	0.0444385	1577.03	0.0444385	1542.16
0.0452633	1438.21	0.0452633	1574.92	0.0452633	1539.38
0.0459742	1396.81	0.0459742	1572.45	0.0459742	1536.51
0.0465869	1430.53	0.0465869	1569.6	0.0465869	1533.5
0.047115	1464.11	0.047115	1566.36	0.047115	1530.31
0.0475702	1432.05	0.0475702	1562.69	0.0475702	1526.88
0.0479626	1386.12	0.0479626	1558.57	0.0479626	1523.17
0.0483008	1380.17	0.0483008	1553.96	0.0483008	1519.31
0.0485922	1392.31	0.0485922	1548.84	0.0485922	1516.16
0.0488435	1393.33	0.0488435	1543.22	0.0488435	1513.53
0.04906	1385.52	0.04906	1537.06	0.04906	1510.69
0.0492467	1376.32	0.0492467	1530.33	0.0492467	1507.51
0.0494075	1367.74	0.0494075	1522.87	0.0494075	1503.91
0.0495462	1359.29	0.0495462	1516.03	0.0495462	1499.85
0.0496657	1350.6	0.0496657	1510.11	0.0496657	1495.48
0.0497687	1341.67	0.0497687	1503.74	0.0497687	1490.94
0.0498575	1332.65	0.0498575	1496.31	0.0498575	1486.26
0.049934	1323.79	0.049934	1488.25	0.049934	1481.58
0.05	1315.28	0.05	1480.4	0.05	1477.13
0.05	1315.28	0.05	1480.4	0.05	1477.13
0.0501	1282.4	0.0501	1457.0	0.0501	1463.98
0.0502042	1246.4	0.0502042	1430.86	0.0502042	1449.44
0.0503128	1208.15	0.0503128	1401.51	0.0503128	1433.37
0.050426	1168.51	0.050426	1368.55	0.050426	1415.68
0.0505439	1127.67	0.0505439	1331.44	0.0505439	1396.24
0.0506668	1085.8	0.0506668	1289.58	0.0506668	1374.85
0.0507949	1043.14	0.0507949	1243.91	0.0507949	1351.29
0.0509284	999.882	0.0509284	1197.06	0.0509284	1325.21
0.0510675	956.277	0.0510675	1150.5	0.0510675	1296.17
0.0512124	912.558	0.0512124	1104.39	0.0512124	1264.23
0.0513635	868.957	0.0513635	1058.85	0.0513635	1230.44
0.0515209	825.707	0.0515209	1013.99	0.0515209	1195.76
0.0516849	783.037	0.0516849	969.896	0.0516849	1160.45
0.0518559	741.184	0.0518559	926.659	0.0518559	1124.59

0.052034	700.383	0.052034	884.347	0.052034	1088.26
0.0522197	660.862	0.0522197	843.023	0.0522197	1051.56
0.0524131	622.837	0.0524131	802.745	0.0524131	1014.6
0.0526148	586.51	0.0526148	763.58	0.0526148	977.492
0.0528249	552.068	0.0528249	725.603	0.0528249	940.353
0.0530438	519.676	0.0530438	688.887	0.0530438	903.303
0.053272	489.478	0.053272	653.511	0.053272	866.466
0.0535098	461.59	0.0535098	619.552	0.0535098	829.956
0.0537576	436.098	0.0537576	587.09	0.0537576	793.896
0.0540158	413.055	0.0540158	556.202	0.0540158	758.41
0.0542849	392.477	0.0542849	526.964	0.0542849	723.625
0.0545653	374.343	0.0545653	499.448	0.0545653	689.668
0.0548576	358.592	0.0548576	473.717	0.0548576	656.655
0.0551621	345.125	0.0551621	449.83	0.0551621	624.704
0.0554795	333.806	0.0554795	427.829	0.0554795	593.926
0.0558102	324.469	0.0558102	407.745	0.0558102	564.426
0.0561549	316.92	0.0561549	389.59	0.0561549	536.301
0.0565141	310.948	0.0565141	373.357	0.0565141	509.639
0.0568884	306.332	0.0568884	359.017	0.0568884	484.522
0.0572785	302.853	0.0572785	346.517	0.0572785	461.016
0.057685	300.299	0.057685	335.782	0.057685	439.178
0.0581086	298.477	0.0581086	326.711	0.0581086	419.048
0.05855	297.215	0.05855	319.183	0.05855	400.653
0.05901	296.367	0.05901	313.056	0.05901	384.002
0.0594895	295.817	0.0594895	308.177	0.0594895	369.083
0.0599891	295.472	0.0599891	304.382	0.0599891	355.868
0.0605097	295.263	0.0605097	301.504	0.0605097	344.307
0.0610522	295.141	0.0610522	299.382	0.0610522	334.33
0.0616177	295.073	0.0616177	297.863	0.0616177	325.85
0.0622069	295.036	0.0622069	296.81	0.0622069	318.76
0.0628209	295.017	0.0628209	296.105	0.0628209	312.939
0.0634608	295.008	0.0634608	295.65	0.0634608	308.254
0.0641276	295.003	0.0641276	295.368	0.0641276	304.566
0.0648225	295.001	0.0648225	295.2	0.0648225	301.73
0.0655467	295.000	0.0655467	295.104	0.0655467	299.606
0.0663014	295.000	0.0663014	295.051	0.0663014	298.06
0.0670878	295.000	0.0670878	295.024	0.0670878	296.968
0.0679074	295.000	0.0679074	295.011	0.0679074	296.223
0.0687614	295.000	0.0687614	295.005	0.0687614	295.732
0.0696515	295.000	0.0696515	295.002	0.0696515	295.421
0.070579	295.000	0.070579	295.001	0.070579	295.232
0.0715456	295.000	0.0715456	295.000	0.0715456	295.122
0.0725528	295.000	0.0725528	295.000	0.0725528	295.061
0.0736025	295.000	0.0736025	295.000	0.0736025	295.029
0.0746964	295.000	0.0746964	295.000	0.0746964	295.013
0.0758364	295.000	0.0758364	295.000	0.0758364	295.006
0.0770243	295.000	0.0770243	295.000	0.0770243	295.002
0.0782623	295.000	0.0782623	295.000	0.0782623	295.001
0.0795524	295.000	0.0795524	295.000	0.0795524	295.000
0.0808969	295.000	0.0808969	295.000	0.0808969	295.000
0.0822979	295.000	0.0822979	295.000	0.0822979	295.000
0.083758	295.000	0.083758	295.000	0.083758	295.001
0.0852795	295.000	0.0852795	295.000	0.0852795	295.002
0.0868652	295.000	0.0868652	295.000	0.0868652	295.005

0.0885175	295.000	0.0885175	295.001	0.0885175	295.01
0.0902395	295.000	0.0902395	295.003	0.0902395	295.021
0.092034	295.001	0.092034	295.009	0.092034	295.041
0.093904	295.006	0.093904	295.026	0.093904	295.079
0.0958528	295.025	0.0958528	295.065	0.0958528	295.145
0.0978836	295.082	0.0978836	295.149	0.0978836	295.253
0.1	295.225	0.1	295.303	0.1	295.414

Tablica 13.5 Temperature u uzorcima različitih granulacija

Udaljenost, *mm*	**Temperatura, *K***	**Udaljenost, *mm***	**Temperatura, *K***
0	1504,11	0	1526,63
0,000670195	1505,24	0,000670195	1526,27
0,00137615	1506,93	0,00137615	1525,62
0,00211978	1507,58	0,00211978	1525,11
0,00290309	1507,74	0,00290309	1524,59
0,0037282	1507,75	0,0037282	1524,04
0,00459734	1507,71	0,00459734	1523,46
0,00551286	1507,65	0,00551286	1522,84
0,00647723	1507,57	0,00647723	1522,2
0,00749306	1507,5	0,00749306	1521,53
0,0085631	1507,43	0,0085631	1520,84
0,00969024	1507,36	0,00969024	1520,13
0,0108775	1507,3	0,0108775	1519,42
0,0121282	1507,25	0,0121282	1518,69
0,0134455	1507,2	0,0134455	1517,97
0,0148332	1507,15	0,0148332	1517,25
0,0162949	1507,09	0,0162949	1516,56
0,0178347	1507,01	0,0178347	1515,91
0,0194566	1506,9	0,0194566	1515,32
0,021165	1506,77	0,021165	1514,81
0,0229646	1506,62	0,0229646	1514,41
0,0248602	1506,44	0,0248602	1514,14
0,026857	1506,23	0,026857	1514
0,0289604	1506	0,0289604	1513,99
0,0311759	1505,79	0,0311759	1514,04
0,0335097	1505,64	0,0335097	1514,09
0,0358436	1505,57	0,0358436	1514
0,0378551	1505,53	0,0378551	1513,72
0,0395889	1505,45	0,0395889	1513,21
0,0410833	1505,29	0,0410833	1512,5
0,0423714	1505,02	0,0423714	1511,61
0,0434816	1504,59	0,0434816	1510,56
0,0444385	1503,99	0,0444385	1509,38
0,0452633	1503,16	0,0452633	1508,06
0,0459742	1502,05	0,0459742	1506,57
0,0465869	1500,59	0,0465869	1504,9
0,047115	1498,65	0,047115	1502,98
0,0475702	1496,06	0,0475702	1500,78
0,0479626	1492,57	0,0479626	1498,24
0,0483008	1487,86	0,0483008	1495,33
0,0485922	1481,65	0,0485922	1492,03
0,0488435	1473,84	0,0488435	1488,34
0,04906	1464,57	0,04906	1484,31
0,0492467	1454,02	0,0492467	1480,03
0,0494075	1442,38	0,0494075	1475,53
0,0495462	1430,1	0,0495462	1470,89
0,0496657	1417,6	0,0496657	1466,18
0,0497687	1405,34	0,0497687	1461,44
0,0498575	1393,74	0,0498575	1456,69
0,049934	1383,05	0,049934	1452,06
0,05	1373,85	0,05	1447,73
0,05	1373,85	0,05	1447,73

0,0501	1360,65	0,0501	1435,93
0,0502042	1345,8	0,0502042	1422,9
0,0503128	1329,23	0,0503128	1408,55
0,050426	1310,91	0,050426	1392,81
0,0505439	1290,77	0,0505439	1375,61
0,0506668	1268,92	0,0506668	1356,84
0,0507949	1245,92	0,0507949	1336,34
0,0509284	1222,27	0,0509284	1313,89
0,0510675	1198,13	0,0510675	1289,22
0,0512124	1173,52	0,0512124	1262,49
0,0513635	1148,45	0,0513635	1234,54
0,0515209	1122,94	0,0515209	1205,99
0,0516849	1096,99	0,0516849	1176,92
0,0518559	1070,62	0,0518559	1147,38
0,052034	1043,83	0,052034	1117,4
0,0522197	1016,65	0,0522197	1087,02
0,0524131	989,095	0,0524131	1056,29
0,0526148	961,201	0,0526148	1025,26
0,0528249	933,01	0,0528249	993,981
0,0530438	904,567	0,0530438	962,511
0,053272	875,93	0,053272	930,914
0,0535098	827,158	0,0535098	899,259
0,0537576	818,317	0,0537576	867,614
0,0540158	789,483	0,0540158	844,047
0,0542849	760,743	0,0542849	804,635
0,0545653	732,185	0,0545653	773,461
0,0548576	703,901	0,0548576	742,612
0,0551621	675,986	0,0551621	712,179
0,0554795	648,537	0,0554795	682,255
0,0558102	621,649	0,0558102	652,936
0,0561549	595,418	0,0561549	624,317
0,0565141	569,936	0,0565141	596,494
0,0568884	545,294	0,0568884	569,563
0,0572785	521,578	0,0572785	543,616
0,057685	498,871	0,057685	518,745
0,0581086	477,246	0,0581086	495,036
0,05855	456,775	0,05855	472,567
0,05901	437,518	0,05901	451,413
0,0594895	419,527	0,0594895	431,636
0,0599891	402,845	0,0599891	413,289
0,0605097	387,503	0,0605097	396,409
0,0610522	373,518	0,0610522	381,023
0,0616177	360,895	0,0616177	367,137
0,0622069	349,623	0,0622069	354,743
0,0628209	339,675	0,0628209	343,813
0,0634608	331,01	0,0634608	334,3
0,0641276	323,569	0,0641276	326,14
0,0648225	317,278	0,0648225	319,25
0,0655467	312,05	0,0655467	313,533
0,0663014	307,787	0,0663014	308,878
0,0670878	304,38	0,0670878	305,165
0,0679074	301,719	0,0679074	302,27
0,0687614	299,691	0,0687614	300,067
0,0696515	298,185	0,0696515	298,435

0,070579	297,099	0,070579	297,26
0,0715456	296,339	0,0715456	296,44
0,0725528	295,825	0,0725528	295,886
0,0736025	295,49	0,0736025	295,526
0,0746964	295,28	0,0746964	295,3
0,0758364	295,153	0,0758364	295,164
0,0770243	295,08	0,0770243	295,086
0,0782623	295,04	0,0782623	295,043
0,0795524	295,02	0,0795524	295,021
0,0808969	295,01	0,0808969	295,01
0,0822979	295,006	0,0822979	295,006
0,083758	295,006	0,083758	295,006
0,0852795	295,009	0,0852795	295,009
0,0868652	295,016	0,0868652	295,016
0,0885175	295,028	0,0885175	295,028
0,0902395	295,048	0,0902395	295,048
0,092034	295,082	0,092034	295,082
0,093904	295,135	0,093904	295,135
0,0958528	295,216	0,0958528	295,216
0,0978836	295,334	0,0978836	295,334
0,1	295,497	0,1	295,497

14. POPIS LITERATURE

[1] Z. Bonačić Mandinić, I. Budić, Osnove *tehnologije kalupljenja, jednokratni kalupi I dio,* Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 2001.

[2] I. Budić, Z. Bonačić Mandinić, *Osnove tehnologije kalupljenja, jednokratni kalupi II dio,* Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 2004.

[3] Z. Bonačić Mandinić, I. Budić, *Ljevarstvo zemalja u tranziciji – hrvatske perspektive*, Strojarstvo, 37 (1995), 3-4, 143-147, 1995.

[4] C. Bates, O. Diran, *Metalcasting Industry Technology Roadmap*, American Foundry Society (AFS), 10 (2003), pp.12 - 13, 2003.

[5] M. Galić, *Kalupljenje I dio*, Savez ljevača SR Hrvatske, Zagreb, 1979.

[6] Z. Bonačić Mandinić, *Rekondenzacijska čvrstoća, tlačne napetosti i sklonost odlupljivanju kalupnih mješavina*, Zbornik radova, III, 99-111, Zagreb, 1976.

[7] S. O. V. Nilson, *Temperature Affects Molding Sand*, Foundry, 61 (1933), pp.10 - 14,1933.

[8] F. Hudson, *Some Properties of Mould and Core Materials*, Foundry Trade Journal, 49 (1933), pp.369 – 378, 1933.

[9] H. Dietert, *Properties of Mould Materials*, Foundry Trade Journal, 59 (1938), pp.70, 1938.

[10] American Foundryman's Society Sand Division, *The Scabbing defects* , Transactions of the American Foundryman's Society, 63 (1955), pp.123 – 142, 1955.

[11] Transcript American Foundryman's Society, *Correlation between Casting Surface and Hot Properties of Moulding Sands*, American Foundryman's, 65 (1957), pp.128 – 132, 1957.

[12] W. B. Parkes i R. G. Godding, *Behaviour of Moulding Sands at Hight temperature*, Foundry Trade Journal, 99 (1955), pp.139 – 151, 1955.

[13] R. B. Sosman, *Properties of Silica*, Chemical catalog Co., 3 (1927), pp.387 – 389.

[14] P.Nicolas, *Formsande fur das Hochdruckpressen und der Einfluss des Pressdrucks*, Giesserei, 52 (1954), 23, pp.744-745, 1954.

[15] J.H.H. Gittus, *Influence of Molding Factors on Casting Defects*, BICRA Journals of research and Development, 5 (1954), pp. 264-272,1954.

[16] H. Pettersson, *Spalling of Green Sand Moulds and its Relation to Casting Defects*, Foundry Trade Journal, 99 (1955), pp. 263 – 271, 1955.

[17] H. G. Levelink, *Das verhalten von Grünem Formsand wahrend einer plötzlichen Erhitzung im Hinblick auf das Entstehen von Gußfehlern*, Giesserei, 45 (1958), pp.1-10, 1958.

[18] W. Patterson, D. Boenisch, *Die Nassfestigkeit als neuer Begriff zur Kennzeichnung des betriebsverhaltens tongebundener Formsande und Einfluß der Aktivierung auf die Nassfestigkeit*, Giesserei, 45 (1958), pp. 565 – 570, 1958.

[19] F. Hofmann, *Modern Concepts on Clay Minerals for Foundry Sand*, British Foundryman, 52 (1959), pp.161 – 173, 1959.

[20] W. Patterson, D. Boenisch, Khanna, *Durch Ausdehnung gruener Giessereiformsande verursachte Gussfehler*, Giesserei, 48 (1960), pp. 6 – 10, 1960.

[21] W. Patterson, D. Boenisch, *Zusammenhang zwischen Fehlerneigung grüner Formsande und Nassfestigkeit*, Giesserei, 81 (1961), pp. 20 – 34, 1961.

[22] W. Patterson, D. Boenisch, K. Gabler, *Giesserei Technik*, 15 (1963), pp. 25-26, 1963.

[23] J. Vingas, A. H. Zrimsek, *Steel Foundry Green Facing Sands*, Transactions of the American Foundryman's Society, 71 (1963), pp. 50 – 74, 1963.

[24] W. Patterson, D. Boenisch, *Zusammenhang zwischen Fehlerneigung gruener Formsande und Nassfestigkeit*, Gisserei, 82 (1963), pp. 42 – 56, 1963.

[25] W. Patterson, D. Boenisch, K. Gabler, *Eine neues Verfahren zur Bestimmung von Druckspannung in erhitzen Formsanden und Beziehungen zwischen den Spannungswerten und Gußfehlern*, Giesserei Technik, 15 (1963), pp. 25 – 26, 1963.

[26] B. C. Yearley, *Influence of Clay and Water on Expansion Defects* , Foundry, 92 (1964), 11, pp73 – 78, 1964.

[27] J. A. Kilshaw, *Experiments on the Influence of the Mould and Casting on Scab Defects*, BCIRA Journal, 1(1964), pp.14 – 30, 1964.

[28] J. A. Kilshaw, K. E. L. Nicholas, *Scab and Rat Tail Defects on Castings produced in Moulds made by High Pressure Squeeze Moulding*, BCIRA Journal, 12 (1964), pp.613 – 629,1964.

[29] H. H. Colins, A. G. Fuller, *Measurement by Human Judgment*, BCIRA Journal, 10 (1962), 5, pp. 580 – 586, 1962.

[30] N. Malešević, Z. Bonačić, *Rekondenzacijska čvrstoća, tlačne napetosti i odlupljivanje u pješćanim kalupima*, Ljevarstvo, 1 (1971), pp. 3 – 22, 1971.

[31] K. Kubo, K. Mizuuchi, I. Ohnaka, T. Fukusako, *Measurement of Thermal Properties of Sand Molds by Pouring Method*, International Foundry Congress, 50 (1983), pp. 1-21, Cairo, November 1983.

[32] Ž. Pauše, *Uvod u matematičku statistiku*, Školska knjiga, Zagreb, 1993.

[33] G. Solenički, *Utjecaj zrnatosti kalupnog pijeska na pojavu napetosti u kalupu*, magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2003.

[34] V. Faccenda, G. M. Ingo, *La conoscenza dei refrattari e del processo di calcinazione: requisito fondamentale per una buona qualita*, Vicenzaoro, 4 (2001), pp. 34-42, 2001.

[35] N. Malešević, *Osnove nauke o metalima III*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1972.

[36] S. Dutch, *Quartz Structure*, University of Wisconsin, Wisconsin, 2002..

[37] W.R. Gardner, *Representation of soil aggregate size distribution by a logaritmic – normal distribution*, Soil Sience Society of America, 20 (1956), pp.151 – 153, 1956.

[37] M.D. Fredlund, *An equation to represent grain-size distribution*, Canadian Geotech Journal, 37 (2000), pp.817 - 827, 2000.

[38] M. Kostelac, B. Iharoš, *Mogućnost smanjenja napetosti u cijevima – logaritamska kalibracija*, Metalurgija, 30 (1991), 143 – 147, 1991.

[39] http://die-casting.globalspec.com

[40] http://www.me.iitb.ac.in

[41] http://ccp14.minerals.csiro.au

[42] D.Metzger, K. Jarrett New, J. Dantzig, *A sand surface element for efficient modeling of residual stress in castings*, Applied Mathematical Modeling, 25 (2001), pp. 825-842, 2001.

[43] H.W. Dietert, A.L. Graham, R.T. Dakaiewicz, T.H. Hanna, *Moldability and mold control – new approach*, AFS Tans., 70 (1962), pp. 537-547, 1962.

[44] W.H. Moore, *Flowability of molding sands*, AFS Trans., 46 (1950), pp. 650-660, 1950.

[45] S.M. Strobl, F.W. Schuster, *Gauging green sand flowability helps to predict mold quality*, Modern Casting, (1997), pp. 48-50, 1997.

[46] R.A. Green, R.W. Heine, *Clay activation and moisture in green sand system*, AFS Trans., 98 (1990), 495 – 503, 1990.

[47] D.Hentz, E. Olson, *Synergistic reactions of various clay types and their foundry molding sand performance in the presence of a flowability enhancer*, AFS Trans., 98 (1990), pp. 71 – 83, 1990.

[48] S.K. Kupczuns, J. Szreniawski, *Hardness as indirect measure of pysical properties of densified molding sand*, AFS Trans. 915 (1983), pp. 191 – 198, 1983.

[49] K.J. New, *An improved method for simulating the contact resistance of sand mold on gray iron castings*, Master`s thesis, University of Illinois at Urbana-Chapaign, 1997.

[50] R. Whitlow, *Basic Soil Mechanics*, second ed., Longman, New York, 1990.

[51] K. Terzaghi, R.Peck, *Soil Mechanics in Engineering Practice, second edition*, Wiley, New York, 1967.

[52] J.W. Wiese, J.A. Dantzig, *Modeling stress development during the solidification of gray iron castings*, Metall Transaction, 21 (1990), pp. 489 – 497, 1990.

[53] J.A. Dantzig, S.C. Lu, *Modeling of heat flow in sand castings: Part I. The boundary curvature method*, Metall Transactions, B16 (1985), 2, pp. 195 –202, 1985.

[54] J.A. Dantzig, J.W. Wiese, *Modeling of heat flow in sand castings: Part II.Applications of the boundary curvature method*, Metall Transactions, B16 (1985), 2, pp. 203 – 209, 1985.

[55] S.N. Ramrattan, S. Vellanki, O. Jidekau, C. Huang, *Thermal Distortion in Process Control of Chemical Bonded Sands*, AFS Transactions, 152 (1997), pp. 161 – 165, 1997.

[56] G.C. Fountaine, K.B. Horton*, Comparison of Core Distortion Using Various Binder Systems*, AFS Transactions, 101 (1993), pp. 721, 1993.

[57] S.N. Ramrattan, *Comparison of Handling Properties Using CO_2 Activated Binder System*, AFS Tranactions, 38 (1995), pp.81 – 85, 1995.

[58] A.D. Morgan, E.W. Fasham, *The BICRA Hot Distortion Tester for Quality Control in Production of Chemically Bonded Sand Cores and Molds*, AFS Transactions, 33 (1993), pp. 725 – 735, 1993.

[59] N.H. Abu-Hamdeh, R.C. Reeder, *Soil Thermal Conductivity, effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter*, Soil Sience Society of America Journal, 64 (2000), pp. 1285 – 1290, 2000.

[60] H.W. Dietert, *Hot Properties of Molding Sands*, Modern Castings, 1960.

[61] H.W. Dietert, V.M. Rowell, A.L. Graham, *High Temperature Sand Test, How They Promote Casting Quality*, Modern Casting, 2 (1956), pp. 36 – 46, 1956.

[62] H. Makino, Y. Maeda, H. Nomura, *Force Analysis in Air-Flow Press Moulding using the Distinct Element Method*, International Journal of Cast Metals Research, 10 (1997), pp. 171 – 175, 1997.

[63] H. Makino, Y. Maeda, H. Nomura, *Proccess Analysis of Sand Moulding using The Distinct Element Method*, CIATF Technical Forum on GIFA, 99 (1999), pp. 144 - 151, 1999.

[64] H. Sindermann, *Green Sand Compaction by Impulse and Dynamic Molding*, AFS Transactions, 102 (1994), pp. 321 – 327, 1994.

[65] N. Uzaki, *Air-Flow Press Molding Process*, AFS Transactions, 88 (1980), pp.529 – 534, 1980.

[66] J. Wu, J. Jiang, G. Yang, *Application of FEM to Predict Hardness Distribution of Air-Impact, Compacted Green Sand Molds*, AFS Transactions, 104 (1996), pp. 491 – 495, 1996.

[67] M. Naito, M. Matshushita, *The New Generation of Flaskless Molding Machine*, World Foudry Con, 63 (1998), pp. 3, 1998.

[68] J. Bataille, J. Kestin, Thermodynamics of mixtures, Thermodynamics, 2 (1977), pp. 49 – 65, 1977.

[69] J.D. Ingram, A.C. Eringen, *A continuum theory for chemically reacting media*, Enginering Science, 3 (1965), pp. 197 -212, 1965.

[70] L.E. Levenston, S.r. Eisenberg, A.J. Grodzinzinsky, *A variational formulation for coupled physiochemical flows during finite deformations of charged porous media*, Solids and Structures, 35 (1998), pp. 4999 – 5019, 1998.

[71] B. Loret, T. Hueckel, A. Gajo, *Chemo* - m*echanical coupling in saturated porous media, elastic – plastic behaviour of homoionic expansive clays*, Solid and Structures, 39 (2003), pp. 2773 – 2806, 2003.

ŽIVOTOPIS

Goran SOLENIČKI rođen je 04. veljače 1973. godine u Zaprešiću. Nakon završene osnovne škole upisao je srednju školu u Zagrebu koju je 1991 uspješno i završio. Iste godine upisao je Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Dobitnik je dvije Rektorove nagrade za najbolje studentske radove, 1993. godine za rad *Windows verzija programa ATLAS,* te 1994. godine za rad pod naslovom *Program za optimalizaciju zasipa OPTIMA-Z.*

Godine 1998. na Katedri za ljevarstvo diplomirao je na temi pod naslovom: *Unapređenje tehnologije proizvodnje odljevaka u jednoj ljevaonici centrifugalnog lijeva*. Nakon završenog studija zaposlio se na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u sklopu Katedre za ljevarstvo kao znanstveni novak. Iste godine uključen je u projekt broj 152007 "Razvoj optimalizacijskih sustava u strojarskoj proizvodnji", glavni istraživač prof.dr.sc. Ivan Budić, unutar kojeg objavljuje znanstvene radove. Od tada aktivno sudjeluje u svim znanstvenim, nastavnim i stručnim djelatnostima. Poslijediplomski studij upisao je u prosincu 1998. godine. Godine 2002. povjereno mu je vođenje Laboratorija za ljevarstvo, te kao istraživač na projektu 152017 "Matrica defektabilnosti u ljevačkoj proizvodnji" pod vodstvom glavnog istraživača prof.dr.sc. Ivana Budić izrađuje magistarski rad.

Magistarski rad pod naslovom *Utjecaj zrnatosti pijeska na pojavu napetosti u kalupu* obranio je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u travnju 2003. godine. Za vrijeme rada na mjestu asistenta objavio je nekoliko znanstvenih članaka u inozemnim stručnim časopisima. Govori engleski jezik.

BIOGRAPHY

Goran SOLENIČKI was born on 4 February 1973 in Zaprešić. Following primary school he completed successfully secondary education in Zagreb in 1991. In the same year he enrolled at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. He was awarded two Rector's awards for the best student works: in 1993 for the work *Windows Version of the ATLAS Program,* and in 1994 for the work entitled *Program for the Optimization of the furnace content OPTIMA-Z.*

In 1998 he graduated at the Foundry Section with the diploma thesis entitled: *Improving the Mould Production Technology in a Centrifugal Cast Foundry*. After having completed the study he was employed at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture at the Foundry Section as a junior researcher. In the same year he started participating in the project No. 152007 "Development of Optimization Systems in Mechanical Engineering Production", with the lead researcher being Prof. Ivan Budić, D.Sc. While participating in the project Mr. Solenički published a number of scientific papers. Since then, he has been participating in all the scientific, academic, and professional activities. He enrolled in the masters program in December 1998. In 2002 he was appointed to manage the Laboratory for Casting and as researcher in the project No. 152017 "Defect Matrix in Casting Production" under the mentorship of the lead researcher Prof. Ivan Budić, D.Sc. he wrote his Master's thesis.

He defended the Master's thesis entitled *Influence of Sand Granularity on the Mould Stress Phenomenon* at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in April 2003. While working as assistant, he published several scientific papers in foreign technical journals. He speaks fluently English.