

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Poslijediplomski studij strojarstva

KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

Mehanizmi trošenja površine kalupa za
visokotlačno lijevanje aluminijskih legura

Zvonimir Dadić

Split, svibanj 2016.

SADRŽAJ

1.	UVOD	2
2.	VISOKOTLAČNO LIJEVANJE	4
2.1.	Tlačno lijevanje sa toplom komorom	5
2.2.	Tlačno lijevanje sa hladnom komorom	5
2.3.	Ljevačka legura	6
2.3.1.	Aluminijske legure.....	6
2.3.2.	Magnezijske legure	8
2.3.3.	Cinkove legure	8
3.	KALUP ZA VISOKOTLAČNO LIJEVANJE.....	9
3.1.	Materijal kalupa.....	10
3.2.	Toplinska obrada materijala kalupa	11
3.3.	Zaštita površine kalupa	13
3.3.1.	Kemijsko-difuzijski procesi	13
3.3.2.	Površinske presvlake	15
3.4.	Podmazivanje površine kalupa.....	16
4.	MEHANIZMI TROŠENJA KALUPA.....	18
4.1.	Toplinski umor	18
4.2.	Erozija	19
4.3.	Adhezijsko trošenje i korozija	19
5.	PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	21
5.1.	Toplinski umor	21
5.3.	Erozija	29
5.3.	Adhezijsko trošenje i korozija	33
6.	ZAKLJUČAK.....	39
	LITERATURA.....	41

1. UVOD

Lijevanje je postupak izvornog oblikovanja trajnim povezivanjem čestica bezobličnog materijala. Postupak se izvodi ulijevanjem rastaljenog materijala u šupljinu tj. kalup. Hlađenjem se materijal skrućuje te poprima oblik kalupa. Najčešće se lijevaju legure metala kao i različiti polimeri. [1] Najvažniji partneri ljevačke industrije su automobilska industrija a zatim strojogradnja, građevinska industrija, medicina i brodogradnja. U jedan automobil ugrađeno je više od 100 odljevaka te je većina tehničkih sklopova nezamisliva bez odljevka [2]. Materijal kalupa za lijevanje metala je uglavnom metal ili pijesak. Pješčani kalupi se koriste za jednokratnu upotrebu a metalni za višekratnu upotrebu. Komponente za automobilsku industriju uglavnom se izrađuju u većim serijama stoga se ovdje za lijevanje koriste metalni kalupi. Postupci lijevanja koji koriste metalne kalupe su: kokilni lijev, tlačni lijev, centrifugalni lijev i kontinuirani lijev.

Kod postupka tlačnog lijevanja, talina pod visokim tlakom popunjava kalupnu šupljinu. Na ovaj način postiže se značajno veća kvaliteta površine u odnosu na ostale postupke lijevanja. Taj postupak najpogodniji je za kompleksne oblike odljevka, visokih zahtjeva dimenzijske točnosti. [2] Usporedba ljevačkih postupaka prikazana je u tablici 1.1.

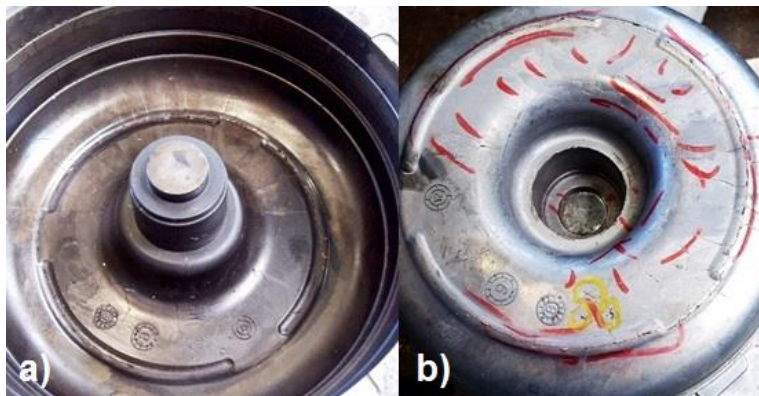
Tablica 1.1. Usporedba ljevačkih postupaka, [3]

	<i>Lijevanje u pijesku</i>	<i>Niskotlačno lijevanje</i>	<i>Visokotlačno lijevanje</i>
<i>Masa odljevka, kg</i>	0,1 ... 500	1 ... 70	0,01 ... 30
<i>Cijena kalupa</i>	Niska	Umjerena	Visoka
<i>Minimalna debljina stjenke, mm</i>	4 ... 6	3 ... 4	0,8 ... 1,5
<i>Dimenzijska preciznost</i>	Dobra	Veoma dobra	Izvrсна
<i>Hrapavost površine Ra, μm</i>	> 6,3 – 12,3	≥ 3,2	≥ 1,6(0,8)
<i>Ljevačke legure</i>	AlSi10Mg AlSi7Mg AlSi9Cu2 AlSi7Cu2	AlSi12 AlSi10Mg AlSi7Mg	AlSi9Cu3Fe AlSi12 AlSi10Mg AlSi11Cu2 (Fe)

Kalupi koji se koriste za visokotlačno lijevanje aluminijskih legura izloženi su znatnim toplinskim, mehaničkim i kemijskim opterećenjima. Kalup podnosi naprezanja uslijed brizganja taline visokim tlakom, raspršuje toplinu rastaljenog metala te omogućuje skrućivanje i

uklanjanje odljevka kako bih bio pripravan za sljedeći ciklus lijevanja [4]. Isti kalup koristi se za proizvodnju velikog broja identičnih odljevaka. Svojstva i uporabni vijek kalupa ograničeni su mehanizmima trošenja kao što su toplinski umor, erozija i adhezijsko trošenje. [5]

Jedna od Hrvatskih tvrtki koja koristi postupak visokotlačnog lijevanja je „LTH Metalni Lijev“ u Benkovcu. U njihovom pogonu izrađuju se aluminijski odljevci za renomirane proizvođače u automobilskoj industriji kao što su Mercedes i BMW. Prema podacima iz pogona, cijene samih kalupa nalaze se u granicama od 30 000 do 100 000 € a uporabni vijek kalupa nalazi se između 100 000 i 120 000 izrađenih odljevaka. Prekomjernim trošenjem kalupa, dobiveni odljevci ne ostvaruju dimenzijsku točnost te je potrebno zaustaviti proizvodnju te popraviti ili zamijeniti kalup. Prema tim podacima ekonomski je opravdano istraživanje trošenja kalupa sa ciljem povećanja uporabnog vijeka. Na slici 1.1. prikazan je prekomjerno oštećeni kalup za visokotlačno lijevanje aluminijske odljevke izrađene istim kalupom (izvor „LTH Metalni Lijev“).

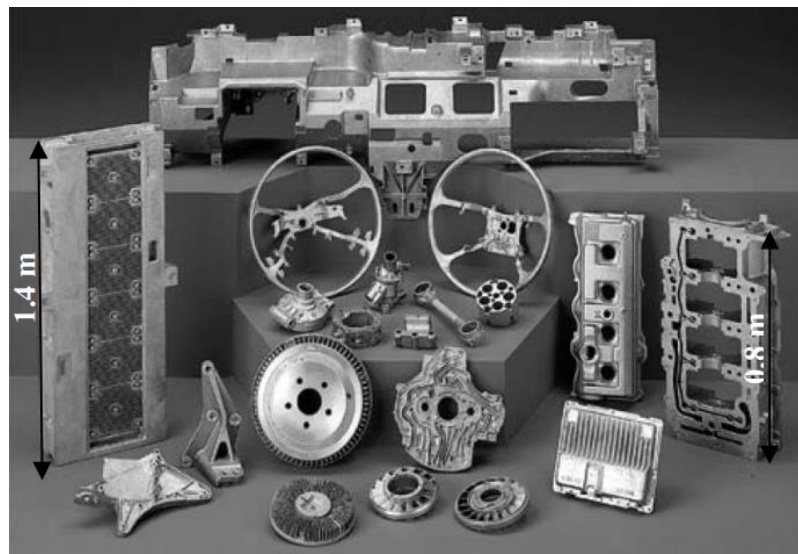


Slika 1.1. Kalup oštećen toplinskim umorom površine te odljevak izrađen istim kalupom, [5]

Oštećenja na kalupu odražavaju se na odljevku koji više ne može zadovoljiti zahtjeve dimenzijske točnosti. Kako bih se odredio razlog trošenja, potrebno je analizirati uvjete rada prilikom visokotlačnog lijevanja. U nastavku je pojašnjen postupak visokotlačnog lijevanja aluminijske legure koje se koriste za lijevanje.

2. VISOKOTLAČNO LIJEVANJE

Visokotlačno lijevanje je produktivna metoda formiranja tankostijenih i kompleksnih proizvoda sa izvrsnom dimenzijskom točnošću i niskom površinskom hrapavošću. Trajni kalup koristi se za izradu velikih količina identičnih proizvoda. Najčešće se koriste legure s niskim temperaturama tališta na bazi aluminija, cinka, magnezija te bakra. Lijevaju se razne vrste proizvoda kao što su blokovi motora, cijevne spojnice, ventili i sl. te razne komponente za grijanje, ventilaciju te sanitarne instalacije [6]. Neki od proizvoda izrađeni ovom metodom mogu se vidjeti na slici 2.1.



Slika 2.1. Razni proizvodi izrađeni metodom visokotlačnog lijevanja, [7]

Razvitak ovakvih metoda počinje krajem 19. stoljeća kada je rastaljeni metal pod tlakom brizgan u metalne kalupe kako bi se proizvela slova za tiskanje. Ova zbivanja kulminirala su stvaranjem linotip uređaja za tiskanje Ottmar-a Mergenthaler-a. Navedeni uređaj revolucionirao je umjetnost tiskanja.

H. H. Doehler je patentirao uređaj za tlačno lijevanje metalnih komponenata u velikim serijama. Na ovakvom uređaju bilo je moguće lijevati samo cinkove legure. Zahtjevi za proizvodima iz drugih metala pogodovali su razvoju novih varijanti procesa. Do 1915. legure na bazi aluminija su se lijevale u velikim količinama [7]. U zadnjem stoljeću u ovom području postignut je značajan napredak, te su proizvodi izrađeni ovim procesom dobili znatno veću primjenu.

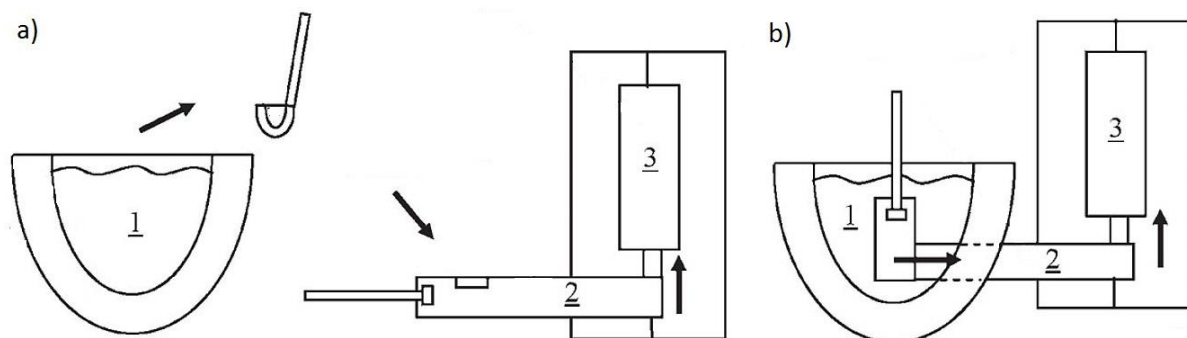
Postoji mnogo vrsti strojeva za tlačno lijevanje te se obično klasificiraju prema sili zatvaranja kalupa. Postoje dvije konvencionalne metode tlačnog lijevanja: lijevanje sa toplom komorom i lijevanje sa hladnom komorom. Prema nazivu, ove metode razlikuju se prema načinu dobave taline.

2.1 Tlačno lijevanje sa toplom komorom

Kod tlačnog lijevanja sa toplom komorom, sustav za dobavu taline uronjen je u lonac s metalnom talinom. Ovo skraćuje vrijeme ciklusa lijevanja. Kod proizvoda malih dimenzija i mase od nekoliko grama, vremena ciklusa lijevanja mogu biti ispod jedne sekunde, dok vrijeme ciklusa lijevanja proizvoda veće mase iznosi oko 30 sekundi. Talina se tlakom brizga u kalup pomoću klipa i cilindra. Klip je pogonjen hidraulikom ili komprimiranim zrakom. Spremnik sa rastaljenim metalom se održava na temperaturi znatno iznad temperature taljenja legure [8]. Shematski prikaz postupka može se vidjeti na slici 2.2.b.

2.2 Tlačno lijevanje sa hladnom komorom

Ova metoda najčešće se koristi za lijevanje bakrenih i aluminijskih legura. Za razliku od lijevanja sa toplom komorom, sustav za brizganje taline je samo u kratkom vremenu u dodiru sa talinom. Za svaki ciklus lijevanja talina se sa posebnom žlicom ulijeva u cilindar za brizganje u kalup. Klip koji potiskuje talinu zaštićuje se sredstvom za podmazivanje kako bi se umanjilo naljepljivanje tekućeg metala. Shematski prikaz postupka može se vidjeti na slici 2.2.a.



Slika 2.2. Shematski prikaz lijevanja sa hladnom (a) i toplom komorom (b), [9]

Svi procesi tlačnog lijevanja imaju sličan proizvodni ciklus. Talina (1) ulazi u sustav za brizganje, te se tada visokim tlakom (2) potiskuje u kalup (3). Visoki tlak se zadržava dok se talina ne skrutne. Nakon skrućivanja, kalup se otvara te se proizvod izbacuje iz kalupa.

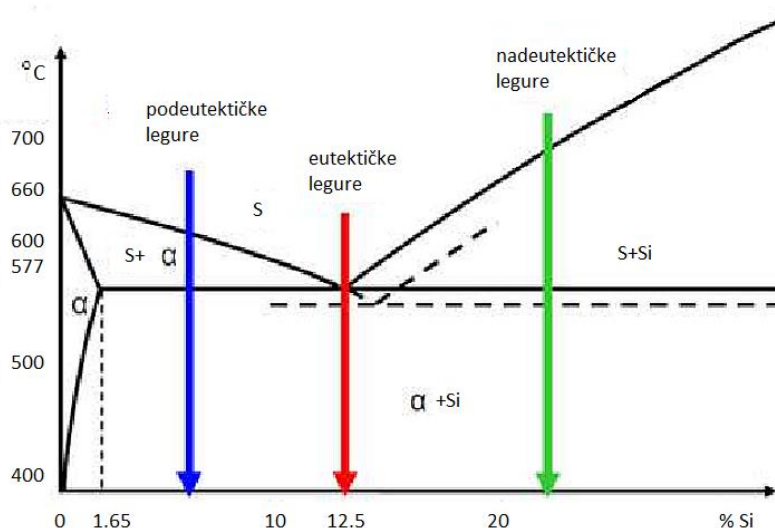
Postupak tlačnog lijevanja s toplom komorom ima prednosti kao što su: manja oštećenja kalupa pri lijevanju te manja kontaminacija oksidacijom taline. Kao rezultat moguće je dobiti odljevak visoke kvalitete, ali uz veće troškove održavanja te ograničenja kod izbora lijevačke legure. Legure sa visokim talištem te visokim afinitetom prema željezu nisu prikladne za lijevanje ovom metodom. Ovo se, između ostalog, odnosi i na aluminijske legure relativno visoke temperature tališta, što ima za posljedicu intenzivno erozijsko i adhezijsko trošenje kalupa i uljevnog sustava. [9]

2.3. Ljevačka legura

Dizajneru kalupa za visokotlačno lijevanje potrebne su informacije o toplinskim svojstvima lijevačke legure. Najbitniji parametri su temperatura tališta, temperaturni raspon skrućivanja, temperatura brizganja taline, koeficijent toplinskog istezanja, toplinski kapacitet te intenzitet prijenosa topline s lijeva na materijal kalupa. Navedeni parametri bitni su i kod izbora materijala kalupa. Kada je riječ o visokotlačnom lijevanju uglavnom se koriste legure navedene u nastavku. [10]

2.3.1. Aluminijske legure

Legure aluminija koje su pogodne za visokotlačno lijevanje uglavnom sadrže legirne elemente silicij, magnezij ili bakar. Najčešće su to Al-Si, Al-Si-Mg, Al-Si-Cu ili Al-Mg legure. Specifična toplina za ovakve legure je 963 J/KgK. Temperature lijevanja su između 615 i 705 °C. Silicij doprinosi dobroj livljivosti legure pa je uporaba ove legure najrasprostranjenija. Silicij poboljšava i otpornost prema nastajanju toplih pukotina. Ovakvim legurama se često dodaju drugi elementi (Mg, Cu, Fe) zbog poboljšanja mehaničkih svojstava te strojne obradivosti. S obzirom na postotak silicija postoje: podeutektičke, eutektičke i nadeutektičke legure. [11] Na slici 2.3. mogu se vidjeti razlike u temperaturama tališta kod ovih legura.



Slika 2.3. Dijagram slijevanja aluminija i silicija, [11]

Al-Cu su toplinski očvrstive legure s relativno visokom čvrstoćom, otporne na višim temperaturama te pogodne za obradu odvajanjem čestica. Ovakve legure uglavnom su slabe livljivosti te se ona pogoršava povećavanjem udjela bakra. Sklone su nastanku toplih pukotina pri skrućivanju. Često im se dodaje magnezij i titan radi usitnjenja zrna.

Al-Mg legure obilježava dobra korozijska postojanost, dobra zavarljivost te visoka čvrstoća. U odnosu na ostale legure aluminija imaju slabu livljivost kao i povećanu sklonost prema porozitetu. Najbolja kombinacija čvrstoće i žilavosti postiže se legiranjem sa 10% Mg, ali se zbog otežane livljivosti najčešće koriste legure s 3 ili 5 % Mg. Svojstva pojedinih aluminijskih legura prikazana su u tablici 2.1.

Tablica 2.1. Svojstva Al-Si-Mg(Cu) legura, [10]

Legura	Likvidus, ° C	Koef. linearnog istezanja, $\mu\text{m}/\text{mK}$, 20-100 ° C
Al Si10Mg(Fe)	580 - 600	21
Al Si11Cu2(Fe)	560 - 590	20
Al Si12Cu1(Fe)	575 - 590	20
Al Si8Cu3	580 - 605	21
Al Si9Cu3(Fe)	565 - 600	21
AlSi9Cu3(Fe)(Zn)	565 - 600	21
B 85 Alloy 360.0	580 - 600	21

Općenito, legure aluminija se sve više koriste u ljevačkoj industriji zbog: dobrih tehnoloških i mehaničkih svojstava, niske rastvorivosti plinova, dobre livljivosti te niske temperature taljenja. Zbog navedenih svojstava proizvodnji odljevaka od aluminijevih legura prethodi jedino proizvodnja željeznih ljevova. Kao nedostatak je bitno navesti relativno visoko volumno stezanje (između 3,5 i 8,5%). [10],[11],[12],[13]

2.3.2. Magnezijske legure

Čisti magnezij ima slaba mehanička svojstva i na visokim temperaturama eksplozivno reagira sa kisikom. Zbog ovoga se uvijek koristi u kombinaciji s legirnim elementima (Al, Zn, Mn i Zr) čime se poboljšavaju mehanička svojstva te otpornost na koroziju. Bitna karakteristika magnezija je niska gustoća, zbog čega neke magnezijske legure imaju bolju specifičnu čvrstoću od aluminijevih legura. [11]

2.3.3. Cinkove legure

Čisti cink se rijetko lijeva, osim za izradu anoda za zaštitu od korozije zbog lakoće stvaranja galvanskih spojeva. Uglavnom se koristi legiran sa Al, Mg, Cu i Zn. [11] Osnovna svojstva aluminija, magnezija i cinka prikazana su u tablici 2.2.

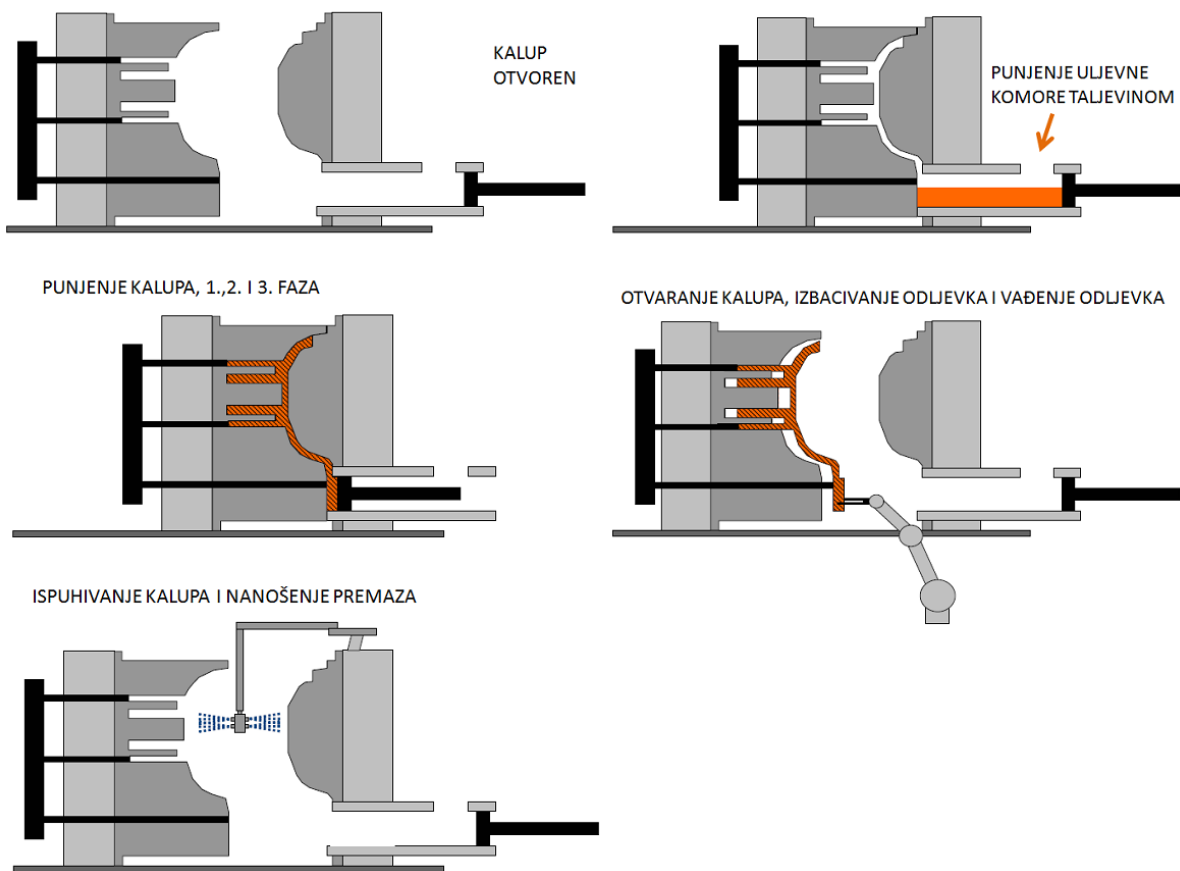
Tablica 2.2. Osnovna svojstva aluminija, magnezija i cinka, [11], [12]

<i>Metal</i>	<i>Talište, °C</i>	<i>Vrelište, °C</i>	<i>Gustoća, g/cm³</i>	<i>Toplinska vodljivost, W/mK</i>	<i>Toplinsko istezanje, μm/mK</i>	<i>Modul elastičnosti, GPa</i>	<i>Tvrdoća, HV</i>
<i>Aluminij</i>	660	2519	2,7	237	23,1	70	167
<i>Magnezij</i>	650	1091	1,74	156	24,8	45	275
<i>Cink</i>	419,5	907	7,14	116	30,2	108	412

3. KALUP ZA VISOKOTLAČNO LIJEVANJE ALUMINIJA

Kalup za visokotlačno lijevanje se obično sastoji od dva dijela, gdje je jedan dio pomičan a drugi nepomičan. Oblik kalupa može biti takav da sadrži jednu ili više šupljina, kako bi se u jednom ciklusu lijevanja proizveo jedan ili više odljevaka. Ciklus počinje pozicioniranjem pomičnog djela te zatvaranjem kalupne šupljine. Kalup se predgrijava kako bi se izbjegli toplinski šokovi u trenutku kontakta rastaljenog metala i površine kalupa. Temperatura predgrijavanja je u rasponu od 180 do 350 °C. [14], [15], [16]

Shematski prikaz ciklusa visokotlačnog lijevanja prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1. Koraci pri tlačnom lijevanju s hladnom komorom, [11]

Rastaljeni metal se ulijeva gravitacijski lijevačkom žlicom ili pomoću uređaja za doziranje u tlačnu komoru. Klip tlači rastaljeni metal u kalupnu šupljinu. Kretanje klipa se odvija u tri faze. U prvoj fazi se rastaljeni metal dovodi do ulaza u kalup relativno malom brzinom. Ovo traje oko dvije sekunde. U drugoj fazi popunjava se kalupna šupljina. Klip sada velikom brzinom

ubrizgava rastaljeni metal u kalupnu šupljinu (trajanje oko 0,1-0,2 s). Treća faza je povišenje tlaka u već popunjenom kalupu dok se odljevak ne skrutne (nekoliko milisekundi). Tlačenjem klipa razvijaju se tlakovi u rasponu od 20 do 100 MPa. Nakon skrućivanja odljevka slijedi otvaranje kalupa. Odljevak se odvaja od pokretnog dijela pomoću izbacivala te se pomoću prihvatne naprave vadi se iz kalupa i prosljeđuje na daljnju obradu. Površina kalupa se ispuhuje, nanosi se sredstvo za podmazivanje te je kalup spreman za novi ciklus lijevanja. [11]

3.1. Materijal kalupa

Prilikom procesa visokotlačnog lijevanja nastaju složena opterećenja uz razvoj visokih temperatura na površini kalupa. Oštećenja nastaju zbog istovremenog djelovanja različitih opterećenja. Kako bi se osigurao dugačak uporabni vijek kalupa, materijal kalupa mora imati dobru duktilnost, visoku granicu tečenja na povišenim temperaturama, dobru toplinsku vodljivost te nizak koeficijent toplinskog istezanja. Ova svojstva mogu se postići samo visokolegiranim alatnim čelicima. Za lijevanje aluminijskih legura, cinkovih legura te legura aluminija i cinka preporučuju se alatni čelici za rad u toplom stanju H10, H11 te H13 (oznaka po American Society for Testing and Materials - ASTM). [17] Primjeri ovakvih materijala na tržištu razvijanih u svrhu izrade kalupa za visokotlačno lijevanje su Bohler-ov „W300“ (H11), Uddeholm-ov „Orvar Supreme“ (H13), „Orvar Superior“ (H13) ili „Vidar Superior“ (H11) te Metal Ravne d.o.o. „RAVNEX“ (H11).

Bolja duktilnost kod ovih materijala postiže se manjim udjelom ugljika, manjom količinom nemetalnih uključaka te primarnih i sekundarnih karbida, dok se većim brojem karbida povećava tvrdoća. [18] Karbidotvorni elementi koji su uglavnom prisutni kod ovakvih materijala su krom, molibden i vanadij. Njihov kemijski sastav prikazan je u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Kemijski sastav alatnih čelika za rad u toplom stanju, [14], [19], [20]

Legura	C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Mo, %	Ni, %	V, %
W300 (H11)	0,39	0,97	0,43	5,01	1,14	0,21	0,45
RAVNEX (H11)	0,36	0,2	0,3	5	1,35	/	0,45
Orvar Supreme (H13)	0,39	1,0	0,4	5,2	1,4	/	0,9
Vidar Superior (H11)	0,36	0,3	0,3	5	1,3	/	0,5

Udio **ugljika** utječe na tvrdoću materijala ali i na žilavost materijala. Kod ovakvih materijala ugljik ima malen udio kako bi se dobila što veća žilavost materijala ali dovoljno velik kako bi se omogućio nastanak karbida koji povećavaju tvrdoću materijala. **Krom** poboljšava zakaljivost materijala iako snižava temperature početka i završetka nastanka martenzita (M_s i M_f) na način da otežava nukleaciju i rast perlita i bejnita. Uz to povećava otpornost prema oksidaciji te povisuje žilavost na višim temperaturama. **Wolfram** i **molibden** imaju sličan utjecaj. Snižavaju solidus temperaturu, povećavaju tvrdoću na povišenim temperaturama te otpornost prema popuštanju materijala izloženom visokim temperaturama. Udio **mangana** utječe na tvrdoću i čvrstoću ali u manjoj mjeri nego ugljik. Velik utjecaj ima na zakaljivost snižavajući kritičnu brzinu hlađenja potrebnu za kaljenje. Udio mangana je kod alatnih čelika obično nizak jer povećava opasnost od nastanka pukotina prilikom toplinske obrade. **Silicij** poboljšava prokaljivost materijala te otpornost prema popuštanju na visokim temperaturama ali smanjuje duktilnost materijala. **Vanadij** je u početku korišten pri proizvodnji čelika u svrhu uklanjanja nečistoća i dušika te za dezoksidaciju. Ubrzo je ustanovljeno da tvori karbide stabilne na visokim temperaturama te da poboljšava mikrostrukturu sprječavajući rast zrna. [21], [22] Svojstva izabrane legure dalje se poboljšavaju toplinskom obradom te modifikacijom površine ili površinskim presvlakama.

3.2. Toplinska obrada alatnih čelika za izradu kalupa

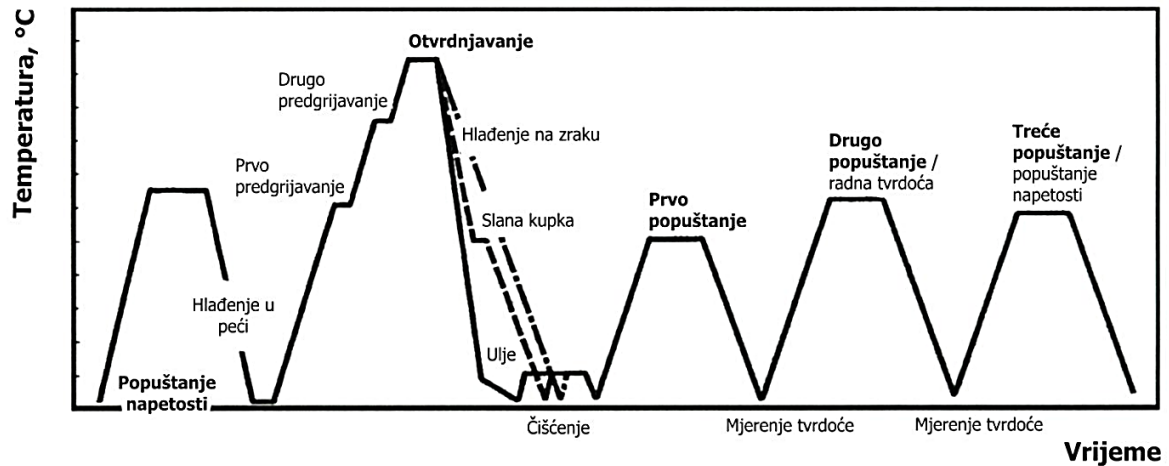
Toplinska obrada znatno utječe na svojstva materijala, tj. alatnog čelika za topli rad. Parametri obrade se određuju prema traženim eksploatacijskim svojstvima. Točni iznosi temperatura, vremena držanja i brzina hlađenja ovise o kemijskom sastavu legure. Podaci dati u nastavku odnose se na leguru Bohler „W300“. S obzirom da se kemijski sastavi legura korištenih za ovu svrhu bitno ne razlikuju (tablica 3.1.), parametri toplinske obrade drugih spomenutih legura neće se bitno razlikovati. Hodogram toplinske obrade prikazan je na slici 3.2.

Toplinska obrada materijala kalupa počinje **mekim (sferoidizacijskim) žarenjem**. Čelik se zagrijava na temperaturu od 700 do 800 °C. Potrebno je progrijati materijal, pa vrijeme držanja ovisi o poprečnom presjeku i volumenu. Zatim se vrši kontrolirano hlađenje u peći brzinom od 10 do 20 °C po satu do 600 °C. Hlađenje se dalje vrši na zraku do sobne temperature. Očekivana tvrdoća nakon mekog žarenja je oko 215 HV. Zatim slijedi **žarenje za**

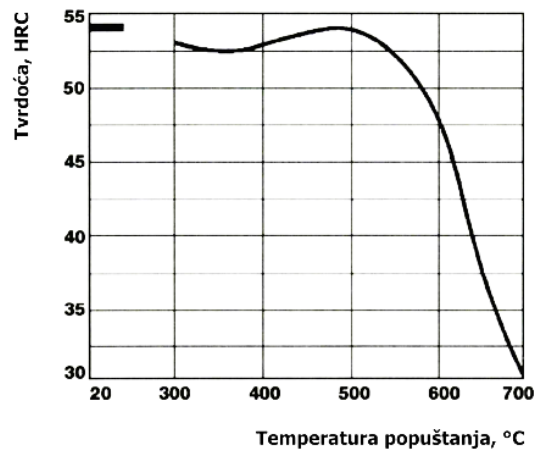
popuštanje zaostalih napreznja. Temperatura zagrijavanja je od 600 do 650 °C te se nakon progrijavanja materijal zadržava u peći 1 do 2 sata. Hlađenje se vrši polagano u peći.

Nakon popuštanja materijal je spreman za proces poboljšavanja. **Poboljšavanje** se vrši kaljenjem i visokotemperaturnim popuštanjem. **Kaljenje** se vrši zagrijavanjem do temperature austenitizacije od 1000 do 1050 °C. Izbor pravilne temperature je kompromis između odgovarajućeg otapanja karbida legiranih elemenata i sprječavanja rasta austenitnog zrna te postizanja optimalnog udjela zaostalog austenita i martenzita u zakaljenom stanju. Zagrijavanje se vrši stepeničasto zbog visokog udjela legiranih elemenata te loše toplinske vodljivosti. Na ovaj način izbjegava se nastanak napetosti i deformacija materijala. Parametri zagrijavanja ovise o kemijskom sastavu legure. Nakon progrijavanja na temperaturi austenitizacije potrebno je zadržati materijal na istoj temperaturi od 15 do 30 minuta. Brzina hlađenja je veća od kritične kako bi se omogućilo nastajanje martenzita. Sredstvo hlađenja je uglavnom zrak te u nekim slučajevima ulje ili solna kupka. Ovisno o brzini hlađenja, očekivana tvrdoća materijala nakon kaljenja je od 50 do 54 HR_C (505 do 589 HV).

Preporuča se izvršiti bar dva **popuštanja** i to odmah nakon postupka kaljenja. Vrijeme držanja na temperaturi popuštanja je 1 sat za svakih 20 milimetara debljine presjeka ali minimalno 2 sata. Ovisnost tvrdoće o temperaturi popuštanja prikazana je na slici 3.3. Temperatura prvog popuštanja je 30 °C veća od temperature potrebne za postizanje maksimalne sekundarne tvrdoće (oko 500 °C). Drugo popuštanje vrši se do tražene radne tvrdoće kalupa gdje temperatura popuštanja iznosi oko 600 °C. Treće popuštanje je u svrhu uklanjanja zaostalih napreznja i vrši se na temperaturi od 30 do 50 °C ispod najviše temperature popuštanja. Zagrijavanje do temperature popuštanja se opet vrši polagano, zbog slabe toplinske vodljivosti materijala. [5], [14], [20]



Slika 3.2. Hodogram toplinske obrade čelika X38CrMoV5-1 (H11), [5]



Slika 3.3. Ovisnost tvrdoće o temperaturi popuštanja za čelik X38CrMoV5-1 (H11), [5]

3.3. Zaštita površine kalupa

Površina kalupa se modificira ili presvlači raznim postupcima kako bih se poboljšala svojstva materijala te smanjilo trošenje površine. Ovim postupcima moguće je značajno povećati životni vijek alata. Postupak i parametri obrade odabiru se prema uvjetima eksploatacije. U nastavku su pojašnjeni postupci koji se primjenjuju u obradi kalupa za tlačno lijevanje. [15]

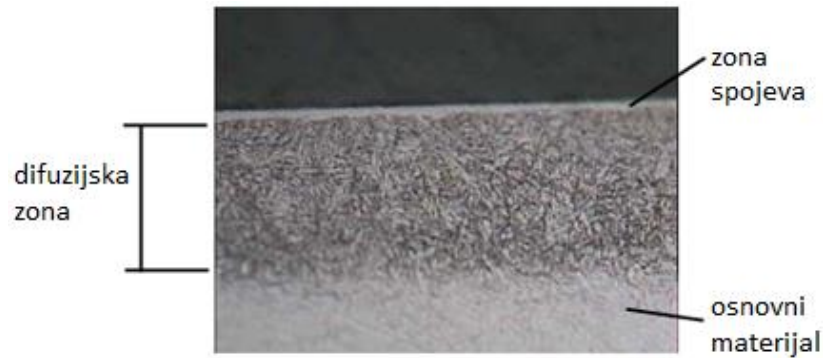
3.3.1. Kemijsko-difuzijski procesi

Difuzijom raznih atoma u površinu čelika mijenja se lokalno kemijski sastav. Takvim postupkom nastaju nove faze, što dovodi do povećanja tvrdoće ili do povećanja otpornosti

trošenju. Ovakvi procesi izvode se pri povišenim temperaturama kako bi se ubrzao proces difuzije. Jedan ovakav proces često korišten kod kalupa za visokotlačno lijevanje je **nitiranje**. Ovim kemijsko-difuzijskim procesom modificira se površina difuzijom dušika u površinski sloj obrađivanog predmeta. Alatni čelici za topli rad su pogodni za proces nitiranja zbog visokog udjela legirnih elemenata. Legirni elementi Cr, V i Al skloni su stvaranju vrlo tvrdih fino raspršenih nitrida, a Mo sprečava krhkost popuštanja jezgre nitiranog čelika. Preporuča se korištenje podeutektoidnih temperatura kako se na površini ne bih stvorio sloj prebogat nitridima koji se lako ljušti i puca. Rezultati nitiranja su: visoka tvrdoća na površini (68-72 HR_C), postojanost tvrdoće na visokim temperaturama (do oko 500 °C), povećana dinamička izdržljivost zbog tlačnih naprezanja na površini, povećana otpornost koroziji te nastanku intermetalnih spojeva. [5], [12], [18]

Proces nitiranja poboljšava otpornost na toplinski umor te eroziju prilikom kontakta površine kalupa sa talinom ljevačke legure. Ovaj proces može uzrokovati dimenzijske promjene. Obično su zanemarive te unutar dimenzijskih tolerancija elementa stoga se ovaj proces može vršiti na kalupima koji su već prošli strojnu obradu, nakon čega se može izvršiti još samo poliranje. Zbog značajnog udjela kroma u čeliku, veoma izdržljivi oksidi nastaju na površini. Teško je smanjiti intenzitet njihovog nastajanja a otežavaju nastanak nitiranog sloja. Iz ovog razloga površina koja se nitira mora biti prethodno detaljno očišćena. [18] Tri najčešće korištena procesa nitiranja su: plinsko nitiranje, nitiranje u solnoj kupci te plazma (ionsko) nitiranje. Dušik se u nitiranom sloju nalazi u: željeznim nitridima (ϵ faza – $Fe_{2-3}N$ i γ' faza - Fe_4N), nitridima legirnih elemenata (CrN, TiN, AlN itd.) i otopljen u α rešetci.

Nitiranjem na površinskom sloju nastaje tvrda i krhka zona, zona spojeva (tzv. bijeli sloj) zbog koje dolazi do povišenja tvrdoće (ϵ i γ' faze). Debljina i sastav zone ovise o temperaturi, vremenu i sredstvu nitiranja te kemijskom sastavu materijala. Ispod zone spojeva nalazi se tvrda difuzijska zona. Ta zona nastaje otapanjem dušika u željeznoj matrici i stvaranjem uključinskih kristala mješanaca. Ove zone skupa čine nitirani sloj površine. [6] Mikrostruktura nitiranog čelika za rad u toplom stanju H13 prikazana je na slici 3.4., gdje je bijela zona debljine 3 μm .



Slika 3.4. Mikrostruktura nitriranog čelika H13, [23]

3.3.2. Površinske presvlake

Zaštitne presvlake koriste se kako bi se fizička razdvojila talina od površine kalupa i povećala otpornost površine prema trošenju. Zahtjevi prilikom odabira odgovarajuće presvlake su:

- kemijska stabilnost pri kontaktu s talinom ljevačke legure na temperaturi lijevanja;
- dovoljna debljina presvlake (zaštita od difuzije atoma između taline i površine kalupa);
- visoka otpornost prema oksidiranju na temperaturi lijevanja;
- niska poroznost presvlake;
- otpornost na učestale promjene temperature (toplinski umor) i tlaka;
- dobro prianjanje na materijal kalupa. [24], [25]

Tema mnogih znanstvenih radova je učinkovitost raznih presvlaka na površini kalupa za tlačno lijevanje. Učestale metode presvlačenja su:

- PVD (physical vapor deposition - fizikalno nanošenje iz parne faze);
- CVD (chemical vapor deposition - kemijsko nanošenje iz parne faze);
- PCVD (plasma-enhanced chemical vapor deposition - kemijsko nanošenje iz parne faze potpomognuto plazmom);
- TD (thermal diffusion – toplinska difuzija). [24]

Ovakvim postupcima nanose se presvlake visoke tvrdoće kao što su TiN, TiAlN, CrN, CrC, CrV, AlCrTiN, TiAlSiN itd. Presvlake poprimaju oblik površine kalupa koji je već prethodno toplinski obrađen i nitriran. Raznim istraživanjima, koja će biti navedena u ovom radu, dokazano je da

je uporabni vijek kalupa upotrebom bilo koje od spomenutih presvlaka veći od uporabnog vijeka kalupa bez presvlake. [18], [24], [25]

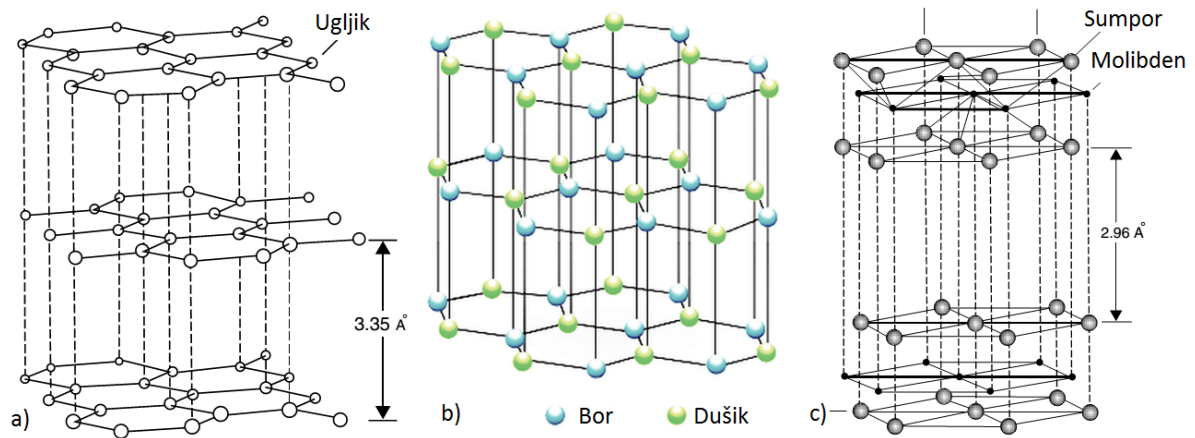
3.4. Podmazivanje površine kalupa

Sredstva za podmazivanje površine kalupa nanose se kako bi se razdvojila talina od površine kalupa, olakšao protok taline te smanjila tendencija naljepljivanja lijevanog materijala.

Korištena sredstva moraju ispunjavati sljedeće uvjete:

- odljevak se može odvojiti od kalupa s lakoćom i bez deformacija;
- sredstvo mora tvoriti fizičku barijeru između lijevanog materijala i kalupa kako ne bih došlo do naljepljivanja;
- nakon upotrebe sredstva ne smije nastati talog na površini kalupa koji može korozivno djelovati na površinu;
- sredstvo ne smije razvijati prekomjernu količinu plinova kako ne bi došlo do nastanka poroziteta u odljevku;
- sredstvo ne smije biti opasno za zdravlje te uzrokovati neugodne radne uvjete. [26]

Sredstvo se obično sastoji od grafita, molibden-disulfida ili heksagonalnog borovog nitrida. Čestice se prenose u ulju koje je otopljeno u vodi. [27], [28] Te čestice omogućuju nizak koeficijent trenja među površinama u dodiru. Ta svojstva im omogućuje slojevita kristalna struktura prikazana na slici 3.5. Atomi koji se nalaze na istom sloju gušće su raspoređeni te je sila koja ih povezuje jaka dok su udaljenosti slojeva veće te su sile koje ih povezuju slabije. [28]



Slika 3.5. Shematski prikaz slojevite kristalne strukture grafita (a), hexagonalnog borovog nitrida (b) i molibden disulfida (c), [28]

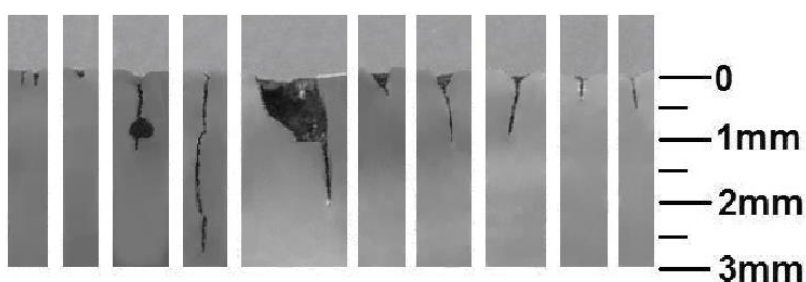
Većina takvih sredstava korištenih za podmazivanje ima nizak koeficijent toplinske vodljivosti. Hlađenje površine kalupa između ostalog ovisi i o latentnoj toplini isparavanja sredstva za podmazivanje stoga ovdje najbitniju ulogu igra sredstvo u kojem se disperziraju čestice. U ovom slučaju je to voda čija je latentna toplina isparavanja desetak puta veća od latentne topline ostalih otapala korištenih za disperziju sredstva. Sredstvo se nanosi na površinu kalupa prskanjem automatiziranim sustavom fiksnih mlaznica postavljenim na optimalnim pozicijama. [26] Sredstvo se nanosi u minimalnim količinama dostatnim za pokrivanje potrebne površine kako ne bih došlo do prekomjernog isparavanja i nepotrebnog povećanja troškova. Sredstva na bazi grafita prekomjernim nanošenjem mogu prouzročiti porozitete u odljevku te proizvesti plinove štetne za zdravlje. Sredstva na bazi borovih nitrida sve se više koriste jer ne proizvode štetne nusprodukte isparavanjem a uz to pružaju izvrsna svojstva. [29]

4. MEHANIZMI TROŠENJA KALUPA

Kalupi kod procesa visokotlačnog lijevanja aluminija izloženi su visokim mehaničkim, toplinskim i kemijskim opterećenjima koja za posljedicu imaju nastanak površinskih oštećenja. Mehanizmi trošenja su: toplinski umor, erozija, adhezija te tribokorozija. [30], [31]

4.1. Toplinski umor

Kod procesa visokotlačnog lijevanja obično je primarni uzrok trošenja površine toplinski umor materijala tj. naizmjenične nagle promjene temperature površine kalupa. Prilikom kontakta taline sa površinom kalupa, dolazi do širenja materijala. Provođenjem topline u materijal ispod površine, dolazi do hlađenja i skupljanja materijala na površini. Kalup se još dodatno hladi sredstvom za podmazivanje koje se većim dijelom sastoji od vode koja isparava na površini kalupa. [32] Što je veća razlika između temperature kalupa i taline, veća će biti ekspanzija i kontrakcija materijala na površini kalupa, te će se prije pojaviti pukotine na površini. [31] Prelaskom granice tečenja materijala u blizini površine materijala dolazi do lokalne akumulacije plastičnih deformacija što dovodi do inicijalne pukotine. Propagacija inicijalne pukotine dovodi do odvajanja čestica materijala sa površine. [32], [33], [34] Izgled pukotine u poprečnom presjeku prikazan je na slici 4.1.



Slika 4.1. Pukotina prouzrokovana toplinskim umorom, [34]

Nekoliko strategija se koristi da bi se spriječila propagacija pukotina zbog toplinskog umora, te sve utječu na ekonomske aspekte. Kugličarenjem se može umanjiti utjecaj toplinskog umora, ali ovo utječe na kvalitetu i dimenzijsku točnost površine konačnog proizvoda. Rashladni sustav kalupa ima najveći utjecaj na odvođenje topline s površine kalupa, te se optimizacijom mogu

postići značajno manje promjene temperature na površini kalupa. Dodatno se promjene temperature mogu smanjiti korištenjem suhih lubrikanata čime bi se smanjili toplinski šokovi na površini. [7]

4.2. Erozija

Erozija površine kalupne šupljine nastaje gibanjem metalne taline po površini kalupa. Brzine taline u uljevnom kanalu dostiže brzine i do 60 m/s. [7], [35] Trošenje erozijom je dodatno pogoršano prisustvom tvrdih čestica u talini. Npr. u slučaju taline aluminija pojavljuje se aluminijev oksid Al_2O_3 visoke tvrdoće (preko 2000 HV) te visoke temperature tališta (2072 °C). Trošenje erozijom je najintenzivnije na mjestima gdje talina prvo dolazi u kontakt sa površinom kalupa. [36] Uz eroziju tekućom talinom i krutim česticama pojavljuje se i kavitacijska erozija. Uslijed implozije mjehura plina u blizini površine dolazi do vlačnog naprezanja na površini. Do odvajanja čestica dolazi uslijed umora materijala na površini, a što je posljedica izmjenjivog cikličkog vlačnog i tlačnog naprezanja. [37] Nanošenjem tvrdih presvlaka na bazi metalnih karbida ili nitrida može se značajno povećati otpornost prema trošenju erozijom taline. [35] Primjer trošenja površine kalupa erozijom prikazan je na slici 4.2.

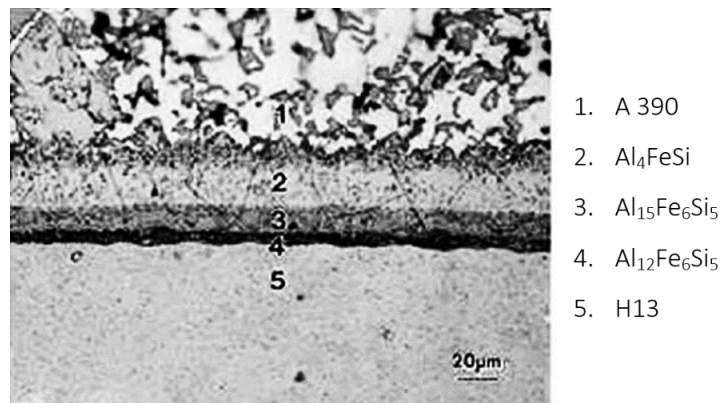


Slika 4.2. Trošenje površine kalupa erozijom, [38]

4.3. Adhezijsko trošenje i korozija

Prilikom procesa tlačnog lijevanja dolazi do prijanjanja ljevačke legure na površinu kalupa. Ovo rezultira oštećenjem kalupa te lošom kvalitetom površine odljevka. To ima za posljedicu

gubitak vremena u proizvodnji te povećanje troškova. Uzrok naljepljivanja aluminija na površinu je ispiranje sredstva za podmazivanje talinom aluminija. Tada talina dolazi u direktan kontakt sa površinom kalupa te pri povišenim temperaturama nastaju intermetalni spojevi između željeza iz materijala kalupa te aluminija. [39], [40] Nastanak intermetalnih spojeva između materijala kalupa (H13) i ljevačke legure (A390) prikazan je na slici 4.3.



Slika 4.3. Intermetalni spojevi aluminijske legure i površine kalupa, [40]

Intermetalni spojevi su znatno veće tvrdoće od tvrdoće površine kalupa. Bez obzira na tvrdoću, intermetalni spojevi na kalupu ne pružaju zaštitu kalupa. Zbog otapanja željeza i nastajanja intermetalnih spojeva često se povećavaju i stope erozije. [41] Nanošenjem raznih vrsta presvlaka na površini kalupa moguće je značajno smanjiti ili potpuno ukloniti tendenciju nastajanja intermetalnih spojeva na površini kalupa. [35]

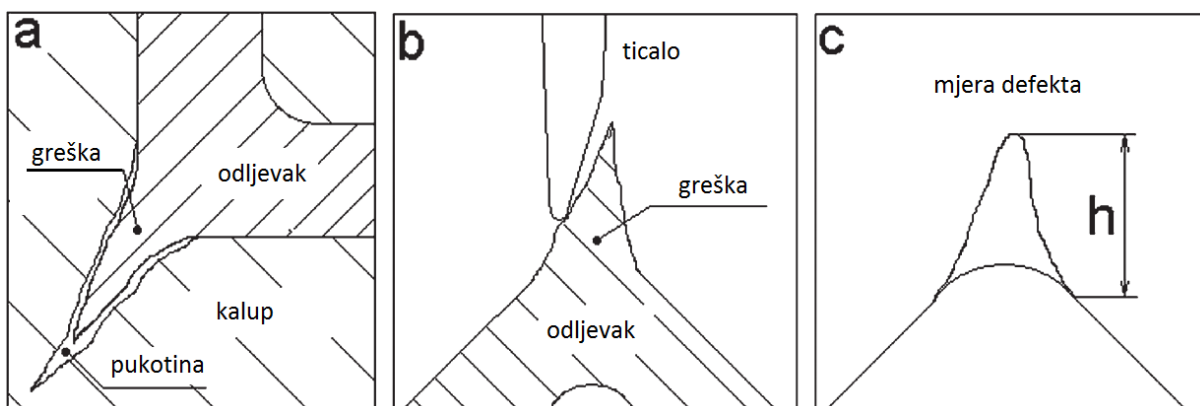
Aluminij otapanjem željeznih faza u materijalu kalupa te stvaranjem intermetalnih spojeva korozivno djeluje na površinu kalupa. U kombinaciji sa erozijom može prouzročiti značajan gubitak materijala na površini. Uz to, dolazi do intenzivnijeg naljepljivanja ljevačke legure na površinu kalupa što pospješuje trošenje mehanizmom adhezije. [36] Kao i kod Ranije navedenih mehanizama trošenja, moguće je smanjiti intenzitet korozivnog djelovanja nanošenjem presvlaka na površini materijala. [35], [6]

5. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

U narednim poglavljima dan je pregled istraživanja u području trošenja površine kalupa za visokotlačno lijevanje.

5.1. Toplinski umor

Klobčar, Muhič, Pleterški i Tušek [42] pratili su trošenje nastalo toplinskim umorom u industrijskoj upotrebi. Mjerenje je izvršeno svakih 1000 ciklusa rada kalupa tako što su se mjerile greške na odljercima, koji odražavaju stanje kalupa, kao što je prikazano na slici 5.1.



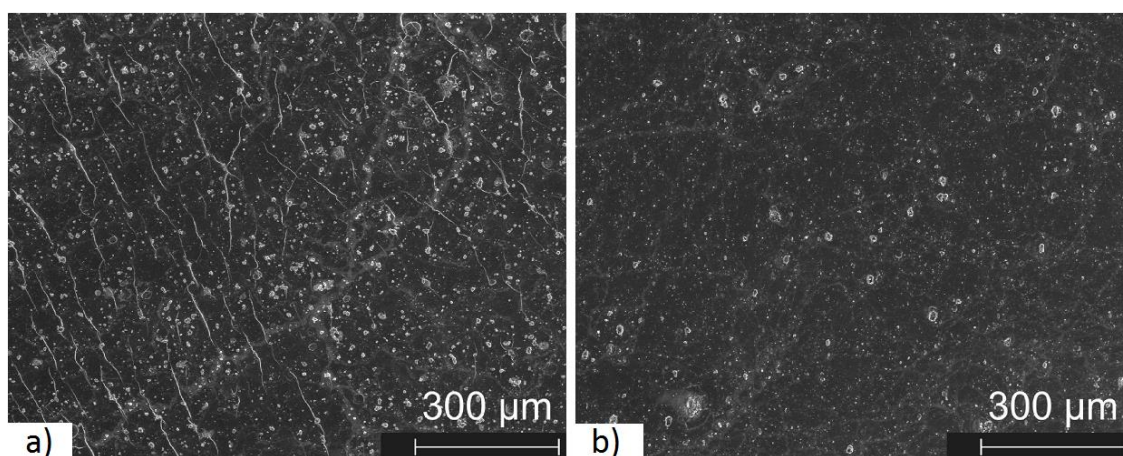
Slika 5.1. Shematski prikaz kalupa i odljevka (a), ticala za mjerenje veličine greške na površini odljevka (b) i mjera greške (c), [42]

Mane ovakvog načina mjerenja veličine greške su jako uske pukotine na kalupu koje talina ne može popuniti te se ne odražavaju na odljevku. Još jedan problem je nastanak širokih pukotina. Dio aluminija može ostati trajno u pukotini, što ne daje značajne oblike grešaka na odljevku.

Kalup se popravljao više puta laserskim navarivanjem. Navarivanje je izvršeno dodatnim materijalom sličnog kemijskog sastava osnovnom materijalu (X38CrMoV5-1) s nešto manjim udjelom ugljika te većim udjelom silicija i mangana. Lasersko navarivanje se pokazalo kao prikladan postupak popravka kojim se, koristeći ispravne parametre navarivanja, može znatno produžiti vijek kalupa.

Lugscheider, Bobzin, Hornig i Maes [33] zaključili su da glavni utjecaj na vijek kalupa imaju toplinske pukotine te da, nakon nastanka, širenje pukotine najviše uzrokuju vlačna naprezanja nastala kao posljedica intenzivnih promjena temperature u blizini površine. Ovakva naprezanja mogu se ukloniti ili ublažiti postizanjem tlačnih naprezanja na površini.

Nanošenjem sloja CrAlN postupkom PVD dolazi do nastanka tlačnih naprezanja na površini zbog načina nanošenja presvlake. Na uzorke od alatnog čelika (H11) nanesen je spomenuti sloj koristeći različita vremena nanošenja što je rezultiralo slojevima različitih debljina. Eksperiment je izvršen zagrijavanjem površine uzorka promjera 8 mm do temperature od 700 °C, zatim hlađenjem vodom do temperature od 180 °C i sušenjem komprimiranim zrakom. Ciklus je ponovljen 100 puta na svakom uzorku. Izgled površine uzoraka nakon ispitivanja prikazan je nas slici 5.2.



Slika 5.2. Izgled površine nakon eksperimenta na uzorcima sa presvlakama debljine 2,5 µm (a) te 12,4 µm (b), [33]

Ispitivanja su odrađena na uzorcima različitih debljina presvlaka (2,5 µm, 3,7 µm, 8,9 µm, 12,4 µm i 17,4 µm). Ispitivanje je pokazalo da se trošenje toplinskim umorom na površini može značajno smanjiti korištenjem navedenih slojeva tj. unošenjem tlačnih naprezanja. Problem kod ovakvog ispitivanja je korištenje idealne ravne površine. Korištenje ovakvih presvlaka na kalupima pokazalo se nepovoljno na rubovima zakrivljenih površina s malim radijusima. Na ovim mjestima često dolazi do ljuštenja nanese presvlake.

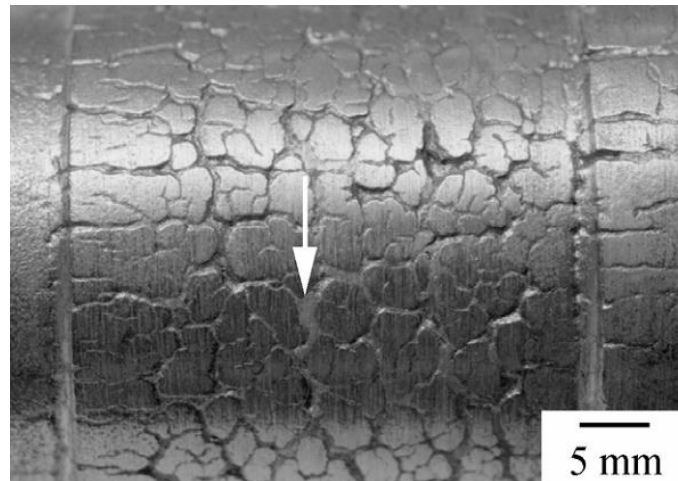
B. Kosec, L. Kosec i J. Kopač [43] ispitivali su trošenje na kalupima iz industrije koristeći metodu penetrirajućih tekućina. Kalup je izrađen od alatnog čelika često korištenog za ovu primjenu, „BOHLER W300“ (H11). Ispitivana je nepomična strana kalupa nakon 1000 ciklusa lijevanja aluminijske legure AlSi9Cu3, te se rezultati ispitivanja mogu vidjeti na slici 5.3.



Slika 5.3. Stanje površine nepomične strane kalupa nakon nanošenja razvijača, [43]

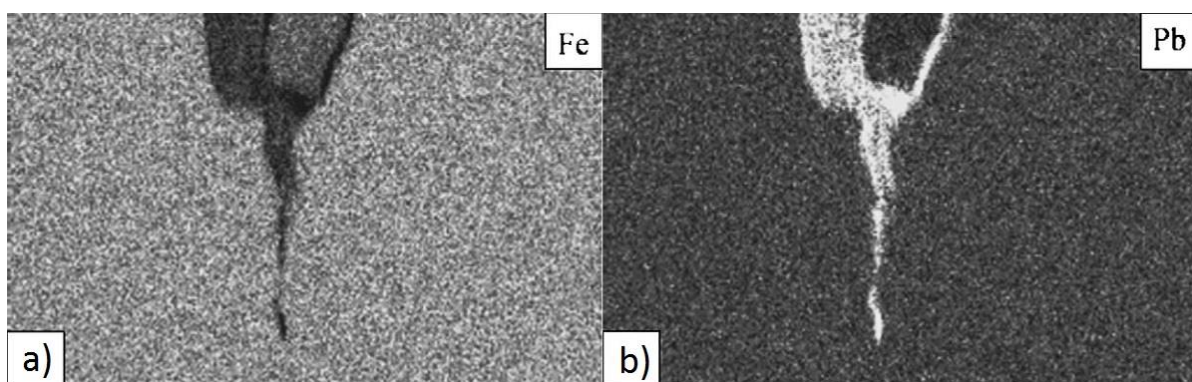
Uočeno je da su greške inicirane na oštrim rubovima te područjima manjih radijusa zakrivljenosti površine. Pukotine su duljine od 20 do 200 μm . Prema načinu propagacije pukotina, zaključeno je da je uzrok širenja pukotina ponajviše toplinski umor materijala na površini potpomognut ostalim mehanizmima trošenja (erozija, adhezija).

Persson, Hogmark i Bergstorm [36] promatrali su površinu kalupa za lijevanje bakrene legure CuZn33Pb2Si-C. S obzirom da je materijal kalupa isti te da sam proces odgovara onome kod visokotlačnog lijevanja aluminijske legure, toplinski umor se pokazao kao najutjecajniji mehanizam trošenja. Karakterističan izgled površinskih pukotina nastalih toplinskim umorom može se vidjeti na slici 5.4.



Slika 5.4. Površinske pukotine nastale toplinskim umorom, [36]

Najupečatljivije zapažanje u ovom radu je mehanizam propagacije pukotine zbog lokalnog obogaćenja olovom koji se nalazi u bakrenim ljevačkim legurama, ali i u aluminijskim ljevačkim legurama. S obzirom na visoko talište bakrene ljevačke legure ($887\text{ }^{\circ}\text{C}$), temperature izmjerene na površini kalupa obično su iznad temperature tališta olova ($327\text{ }^{\circ}\text{C}$). To dovodi do taljenja olova iz legure odljevka koji tada popunjava prethodno nastale pukotine (toplinskim umorom). Ponavljajućim taljenjem i skrućivanjem olova, ono napreduje prema samom kraju pukotine. Tamo obogaćuje materijal kalupa olovom čime površina postaje krhka. To olakšava propagaciju pukotine. Rendgenskom spektroskopijom analizirano je mjesto pukotine te se koncentracija pojedinog elementa može zorno prikazati svjetlijim nijansama kao na slici 5.5.

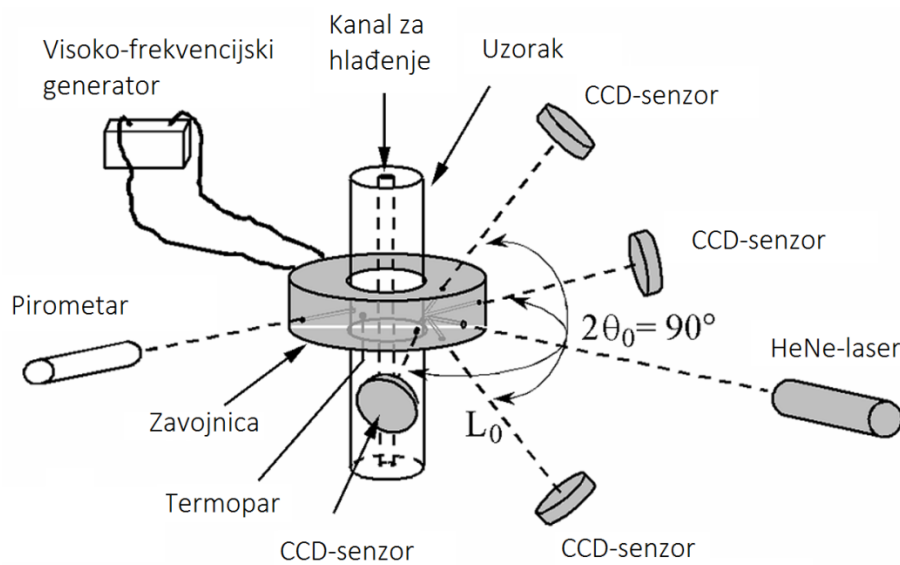


Slika 5.5. Koncentracija željeza (a) i olova (b) na mjestu nastanka pukotine, [36]

Također je ispitan utjecaj odabira modifikacija (boriranje, nitriranje, Toyota difuzija) i presvlaka površine (PVD – CrC, CrN, TiAlN). Pokazalo se da u usporedbi sa netretiranom

površinom, modifikacija i presvlačenje površine uglavnom smanjuje otpornost prema trošenju toplinskim umorom.

Isti autori izvršili su simulacijom ispitivanje trošenja alatnih čelika koji se koriste za visokotlačno lijevanje aluminijskih i bakrenih legura. [44] Ispitivanje je vršeno indukcijskim grijanjem cijevi do 600-850 °C. Cijev je duljine 80 mm, vanjskog promjera 10 mm te unutarnjeg promjera 3 mm. Nakon grijanja slijedi hlađenje protjecanjem tekućeg sredstva na temperaturi od 60 °C kroz unutarnji dio cijevi. Također se vrši hlađenje plinom s vanjske strane (argon ili zrak) do 170 °C. Prilikom promjene temperature naprezanje se procjenjuje bez kontakta, laserom. Laserom (HeNe) se postiže točkasta raspodjela na ispitivanom uzorku. Četiri CCD senzora koriste se za detekciju pomaka točki frekvencijom 500 Hz. Tijekom grijanja i hlađenja, temperatura se prati pirometrom ali i termoparom (K-sonda). Shematski i stvarni prikaz opreme i načina ispitivanja prikazan je na slikama 5.6. i 5.7.

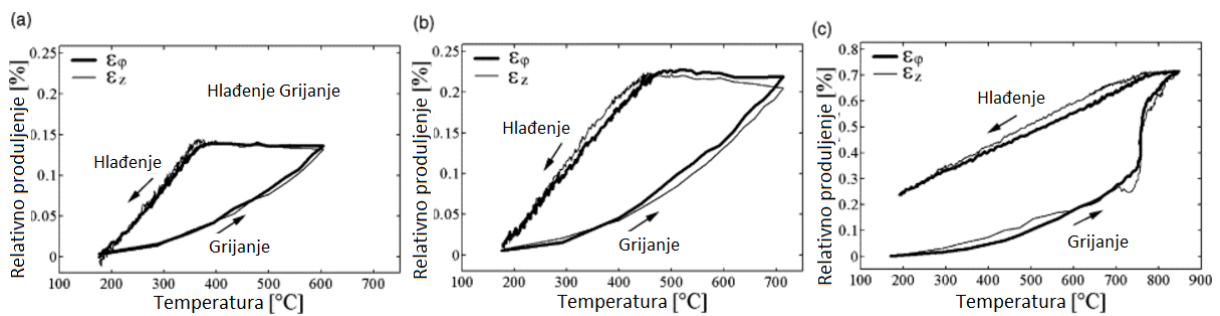


Slika 5.6. Shematski prikaz ispitivanja toplinskog umora, [44]



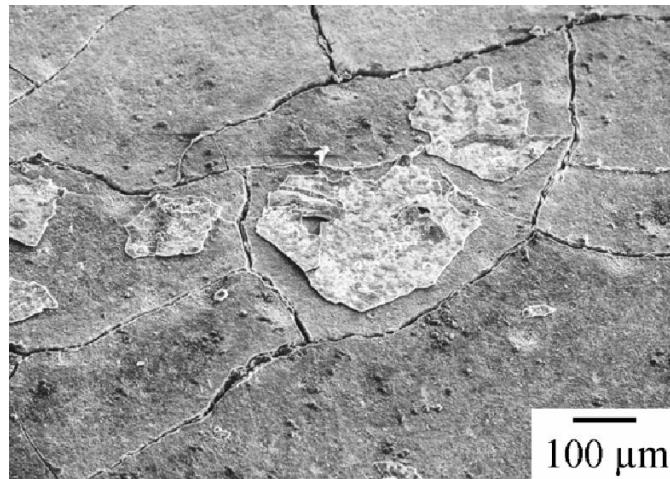
Slika 5.7. Stvarni prikaz ispitivanja toplinskog umora, [44]

Kao rezultat dobiveni su dijagrami ovisnosti produljenja o temperaturi. Na slici 5.8. prikazano je relativno produljenje na površini za uzorke zagrijavane do 650, 700 i 850 °C.



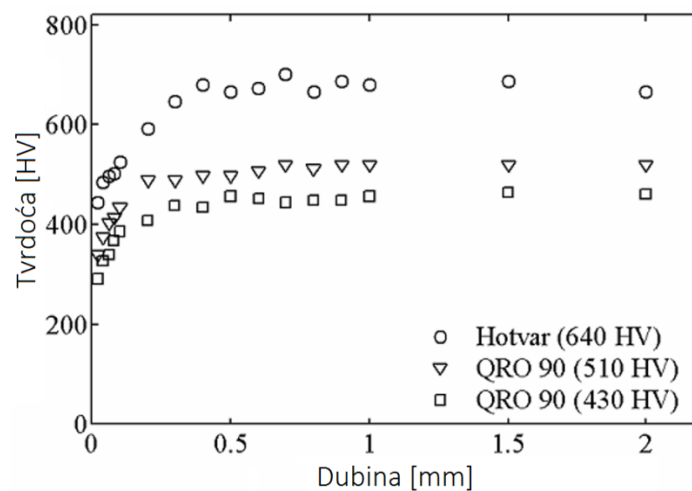
Slika 5.8. Ovisnost relativnog produljenja o temperaturi zagrijavanja: 600 (a), 700 (b) i 850 °C (c), [44]

Izmjereno produljenje koristi se u svrhu određivanja naprezanja na površini, te određivanja vijeka alata. Na površini se nakon 10 000 ciklusa grijanja i hlađenja mogu vidjeti pukotine nastale toplinskim umorom karakterističnog umreženog oblika, kao što je prikazano na slici 5.9.



Slika 5.9. Pukotine na površini nakon 10 000 ciklusa ispitivanja toplinskog umora, [44]

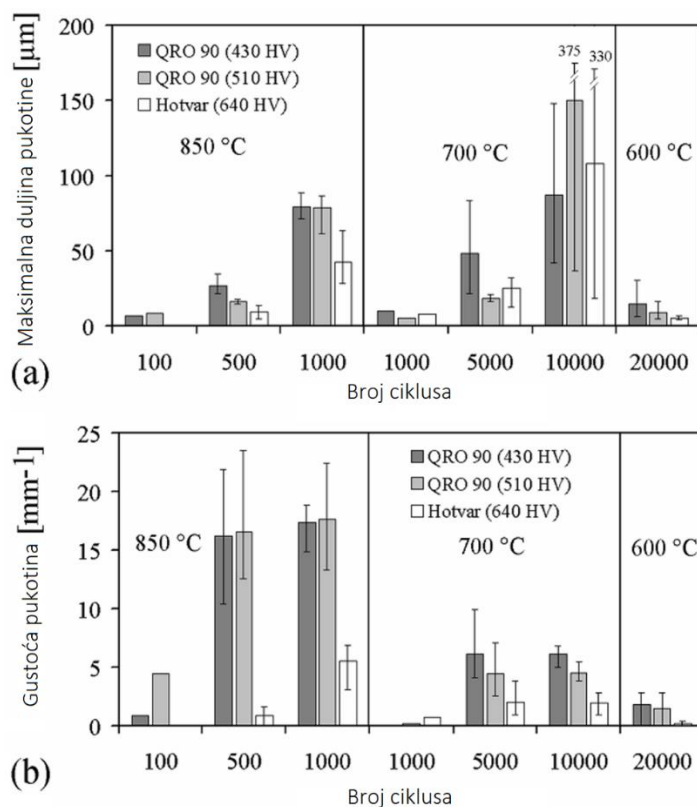
Kao nastavak istraživanja te koristeći opremu iz prethodna dvaju rada objavljeno je još nekoliko radova na temu toplinskog umora materijala kalupa za visokotlačno lijevanje aluminija. [45], [46] Pokazalo se da visoke temperature zagrijavanja i nagle temperaturne promjene nepovoljno utječu na tvrdoću materijala kalupa ali samo prvih pola milimetra od površine materijala. Rezultat istraživanja prikazan je na slici 5.10.



Slika 5.10. Ovisnost tvrdoće o dubini materijala, [45]

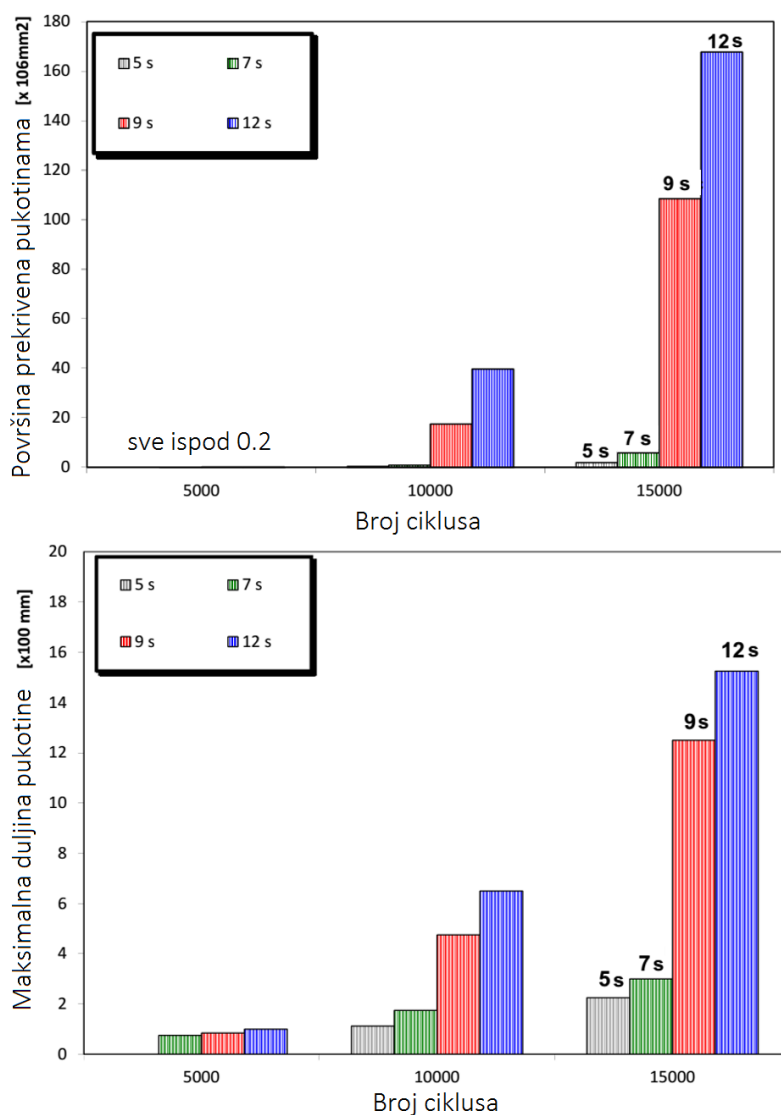
Također je zaključeno da viša tvrdoća smanjuje akumulaciju plastičnih naprezanja na površinskom sloju. Prema tome, sa aspekta toplinskog umora, jako je bitna što viša inicijalna površinska tvrdoća materijala. U ispitivanju su varirane maksimalne temperature zagrijavanja te se pokazalo da se povećanjem temperature zagrijavanja naglo povećava intenzitet

nastanka i rasta pukotina nastalih toplinskim umorom. Utjecaj temperature zagrijavanja na duljinu pukotine i gustoću pukotina na površini, kod različitih alatnih čelike za rad u toplom stanju, prikazan je na slici 5.11.



Slika 5.11. Utjecaj temperature zagrijavanja na nastanak (a) i razvoj pukotina (b), [46]

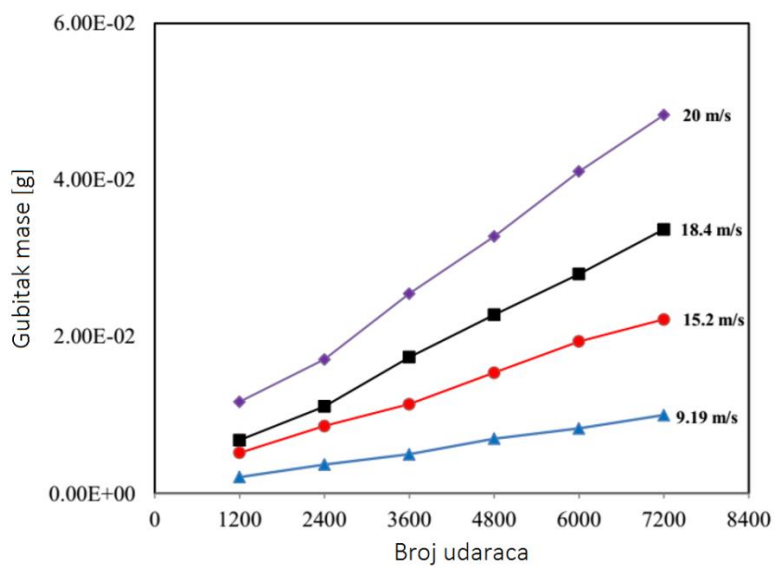
Projekt „Improved Die Casting Process to Preserve the Life of the Inserts“ pokrenut je 2004. godine. [47] Glavni ciljevi projekta su smanjenje maksimalnih temperatura kalupa optimiziranim dizajnom kalupa te produljenje vijeka trajanja kalupa optimiziranjem podmazivanja. Ispitivanje toplinskog umora izvršeno je uranjanjem cilindričnih uzoraka (H13) u tekući aluminij te vađenjem na zrak. Kroz uzroke protjecala je voda kako bi se simulirao utjecaj sredstva za hlađenje. Mijenjala su se vremena zadržavanja u talini aluminija i na zraku te protok vode kroz cijev. Rezultatima ispitivanja dobivena je ovisnost gustoće prekrivenosti pukotinama o broju ciklusa ispitivanja te ovisnost duljine pukotine o broju ciklusa ispitivanja. Ovisnosti su prikazane na slici 5.12.



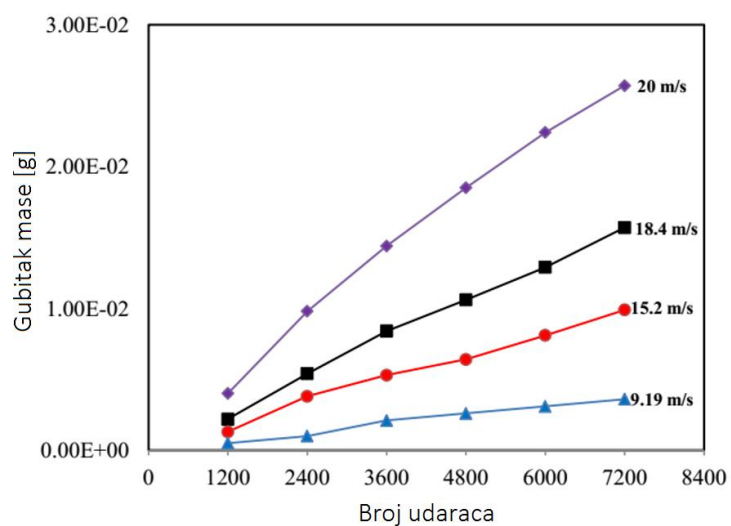
Slika 5.12. Prekrivenost pukotinama (a) te duljina pukotina (b) u ovisnosti o broju ciklusa ispitivanja i vremenu uranjanja, [46]

5.2. Erozija

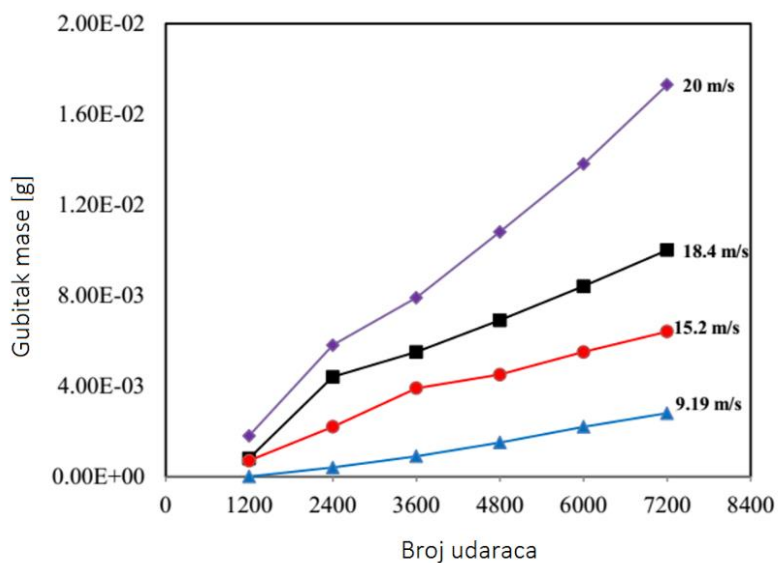
A. H. Mohammed [37] izradio je niz ispitivanja utjecaja erozije na trošenje materijala kalupa (H13) za visokotlačno lijevanje aluminija. Ispitivanje utjecaja erozije je vršeno kugličarenjem. Kao medij za kugličarenje korištene su aluminijske kuglice. Plosnati i cilindrični uzorci čelika korišteni su kako bi se simulirao utjecaj na sve oblike površina kalupne šupljine. Kuglice su izrađene iz aluminijske legure 6061 (AlMg1SiCu). Promjer kuglice je 3 mm a masa 0.04 g. Prilikom ispitivanja mijenjane su brzine udara čestica, kutovi udara te temperatura čelika. Rezultati ispitivanja prikazani su na slikama 5.13., 5.14. i 5.15.



Slika 5.13. Ovisnost gubitka mase o broju udaraca i brzinama udarca za kut od 30° , [37]

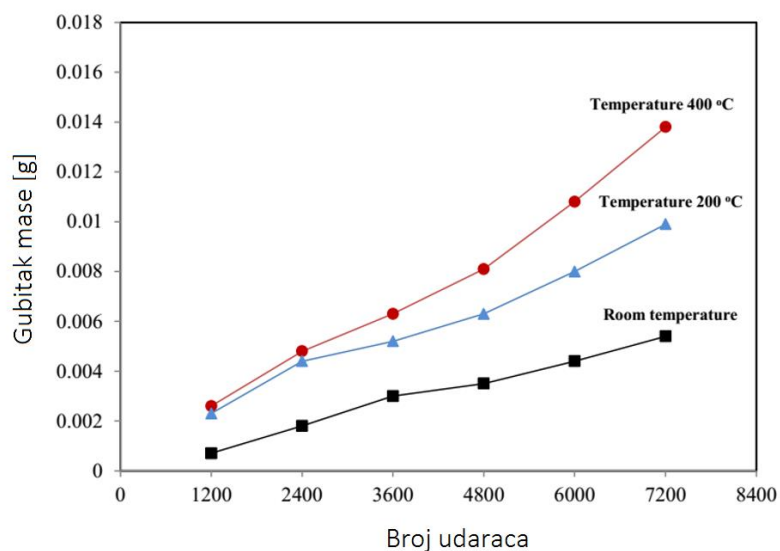


Slika 5.14. Ovisnost gubitka mase o broju udaraca i brzinama udarca za kut od 60° , [37]



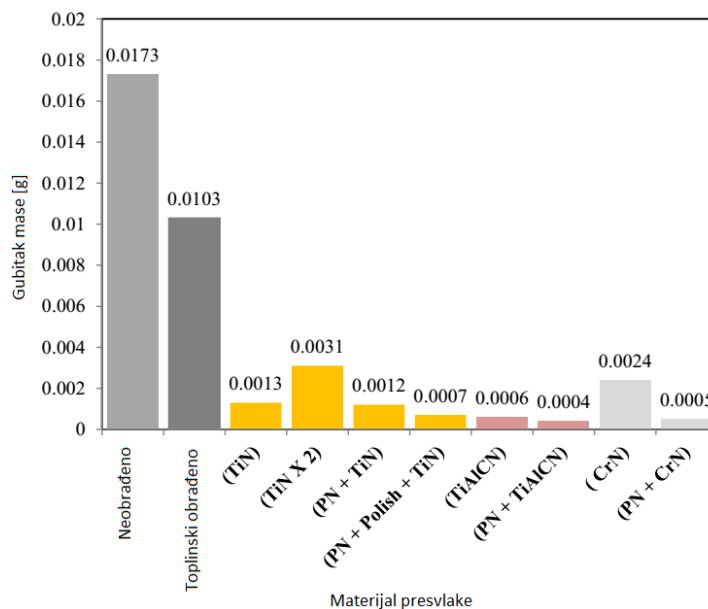
Slika 5.15. Ovisnost gubitka mase o broju udaraca i brzinama udarca za kut od 90° , [37]

Iz rezultata se može zaključiti da je trošenje najznačajnije pri manjim kutovima. Prema tome, kod erozije alatnog čelika korištenog za tlačno lijevanje krutim česticama najznačajniji mehanizam trošenja je abrazija. Također je ispitan utjecaj temperature čelika na gubitak mase te je s time simuliran utjecaj temperature površine kalupa na trošenje erozijom. Rezultati su prikazani na slici 5.16.



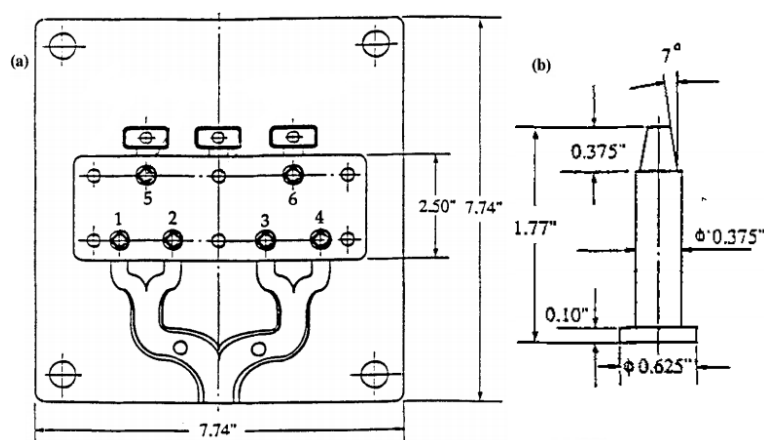
Slika 5.16. Ovisnost gubitka mase o broju udaraca i temperaturi čelika, [37]

Ispitan je utjecaj presvlake i modifikacije površine na trošenje tj. gubitak mase uzoraka. Rezultati su pokazali da presvlake i toplinska obrada imaju značajan utjecaj na trošenje. Rezultati ispitivanja s obzirom na stanje površine prikazani su na slici 5.17.



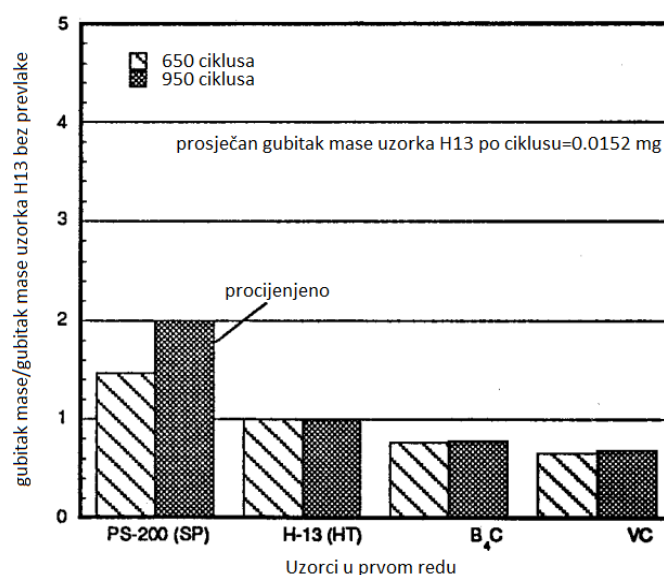
Slika 5.17. Ovisnost gubitka mase o stanju površine, [37]

R. Shivpuri, M. Yu, K. Venkatesan i Y. L. Chu [48] ispitivali su trošenje erozijom tako što su izradili testni kalup te u njemu fiksirali uzorke za ispitivanje. Kako bi trošenje bilo vidljivo sa što manjim brojem ciklusa ispitivanja korišteni su uzorci sa oštrim vrhovima jer do erozije dolazi prije na oštrim rubovima nego na oblim ili ravnim površinama. Testni kalup i uzorak prikazani su na slici 5.18. gdje je položaj uzoraka naznačen brojevima od 1 do 6.



Slika 5.18. Testni kalup (a) i uzorak (b), [48]

Korištena je legura A390 sa visokim udjelom silicija zbog visoke tvrdoće silicijskih čestica u djelomično skrućenoj talini. Tvrde čestice silicija uzrokuju agresivnije trošenje erozijom. Također u svrhu ubrzanja trošenja, brzina taline u uljevnom kanalu povećana je preko 50 m/s te je temperatura taline povišena za 50 °C. Trošenje je izmjereno vaganjem sa preciznošću od 0.0001 g. Primarni cilj istraživanja bio je utjecaj površinskih presvlaka na trošenje erozijom. Erozijska je imala najznačajniji utjecaj na uzorcima 1, 2, 3 i 4 tj. na uzorcima najbližima uljevnom kanalu. Pri ovim uvjetima najveću otpornost prema trošenju erozijom pružila je VC prevlaka (vanadijevi karbidi) kao što se vidi na slici 5.19.



Slika 5.19. Utjecaj vrste presvlake na trošenje površine čelika H13 erozijom, [48]

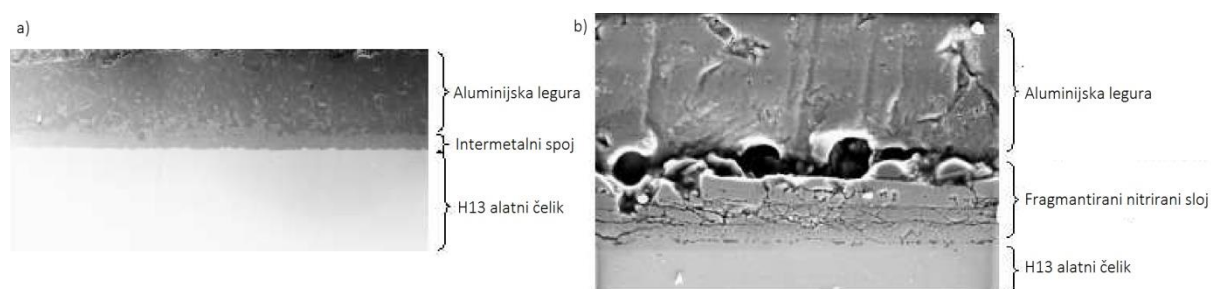
Između ostalog, zaključeno je da povišenjem temperature taline nastaje intenzivnije adhezijsko trošenje dok trošenje erozijom opada. U suprotnome, pri manjoj temperaturi taline, materijal je otporniji na adhezijsko trošenje a erozija intenzivnija jer dolazi do skrućivanja taline ranije.

5.3. Adhezijsko trošenje i korozija

S. Gulizia i M.Z. Jahedi [49] proučavali su utjecaj modifikacije (nitriranje) i presvlačenja površine (PVD – TiN, CrN, TiCN) na adhezijsko trošenje. Rezultati su uspoređivani sa adhezijskim trošenjem površine netretiranog čelika (H13). Ispitivanje je rađeno na Toshiba stroju za visokotlačno lijevanje fiksiranjem uzoraka promjera 6 mm i duljine 30 mm unutar

kalupa za visokotlačno lijevanje. Svi uzorci su izrađeni od alatnog čelika H13 te kaljeni i popušteni do tvrdoće 44-46 HR_c . Uzorci su nakon 50 ciklusa analizirani skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM) te kontaktnim profilmetrom. Kod netretiranog uzorka došlo je do nastanka intermetalnih spojeva željeza (iz čeličnog kalupa) i aluminija (iz ljevačke legure) što je glavni uzrok nastanka adhezijskog trošenja. Kod uzoraka sa PVD presvlakama nisu nađeni dokazi o nastanku intermetalnih spojeva te su presvlake ostale neoštećene iako je došlo do prijanjanja ljevačke legure na površini uzorka.

Pokazalo se da PVD slojevi predstavljaju barijeru koja onemogućuje nastanak intermetalnih spojeva. Razlogom naljepljivanja ljevačke legure smatra se fragmentacija površinskih slojeva i presvlaka te mehaničko sidrenje. Prema ispitivanju, najmanje naljepljivanje nastaje u slučaju najmanjeg ljevačkog kuta. Izgled poprečnog presjeka nakon 50 ciklusa rada kod netretiranog i nitriranog uzorka prikazan je na slici 5.20.



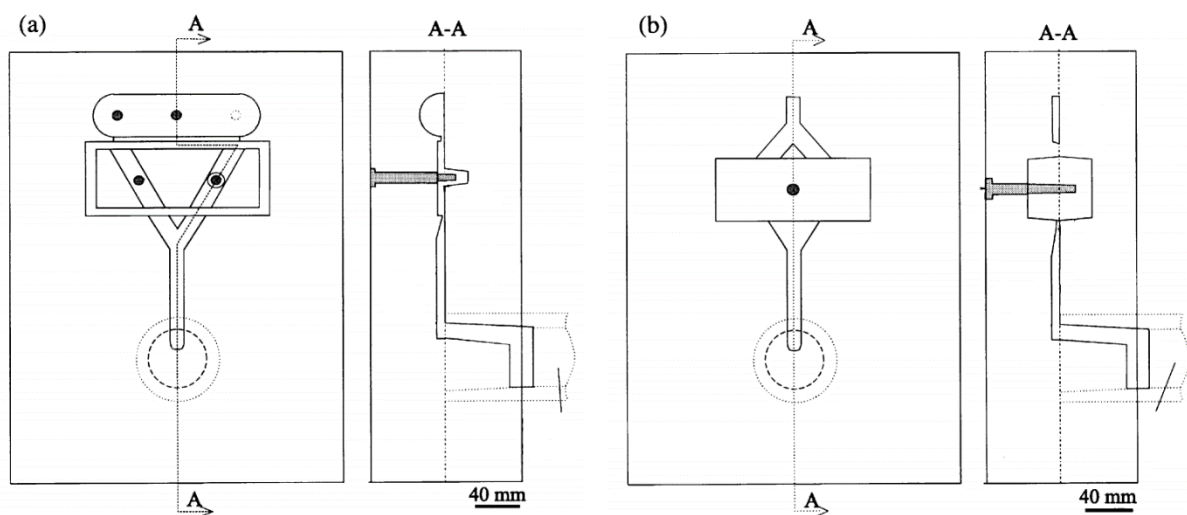
Slika 5.20. Poprečni presjek sloja intermetalnog spoja (a) te razdvojene nitrirane površine (b),
[49]

R. Shivpuri, M. Yu, K. Venkatesan i Y. L. Chu [48] su osim erozije (rad u poglavlju 5.2.) razmatrali adhezijsko trošenje. Zaključili su da adhezijsko trošenje ima veću tendenciju nastajanja na mjestima gdje je inicijalna pukotina nastala erozijom. Završetkom ispitivanja uočen je intermetalni sloj između nalijepljenog aluminija i materijala kalupa H13. Sloj je analiziran energetsom disperzivnom spektroskopijom (EDS). Sastav spoja je 55.73 % Al, 15.64% Si i 24.35% Fe. Ovi maseni udjeli odgovaraju sastavu faze kemijskog spoja Al_4SiFe . Ovo je termodinamički stabilna faza između 500 i 600 °C na dijagramu slijevanja Fe-Si-Al. Daljnjom EDS analizom nađeno je željezo u ljevačkoj leguri. Zaključeno je da je uzrok adhezijskog

trošenja difuzija elemenata Fe, Al i Si. Adhezijsko trošenje bilo je intenzivnije prilikom manjih temperatura taline.

G.M. Ludtka i V.K. Sika [50] ispitivali su adhezijsko trošenje netretiranog H13 čelika te H13 čelika presvučenog borovom presvlakom. Uzorci cilindričnog oblika promjera 12.7 mm i duljine 25.4 mm prvo su uronjeni u sredstvo za podmazivanje, propuhani stlačenim zrakom te uronjeni u talinu aluminija ($650\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$), zatim naglo hlađeni uranjanjem u sredstvo za podmazivanje. Netretirani uzorak je imao tragove adhezijskog trošenja već nakon 8 ciklusa ispitivanja dok kod uzorka sa borovom presvlakom nije došlo do naljepljivanja ni nakon 50 ciklusa ispitivanja. Ovo je dokazalo prvotnu hipotezu, da bor ima visoku tendenciju vezivanja sa čelikom dok s aluminijem ne stvara spojeve. Prema ovome, zaključeno je da je pogodan za upotrebu kod kalupa za visokotlačno lijevanje aluminija. Tragovi trošenja toplinskim umorom nisu pronađeni na nijednom uzorku.

Z.W. Chen i M.Z. Jahedi [51] ispitivali su eroziju i adhezijsko trošenja koristeći stroj za visokotlačno lijevanje aluminija te postavljajući uzorke u kalupne šupljine različitih oblika. Kalupne šupljine prikazane su na slici 5.21.



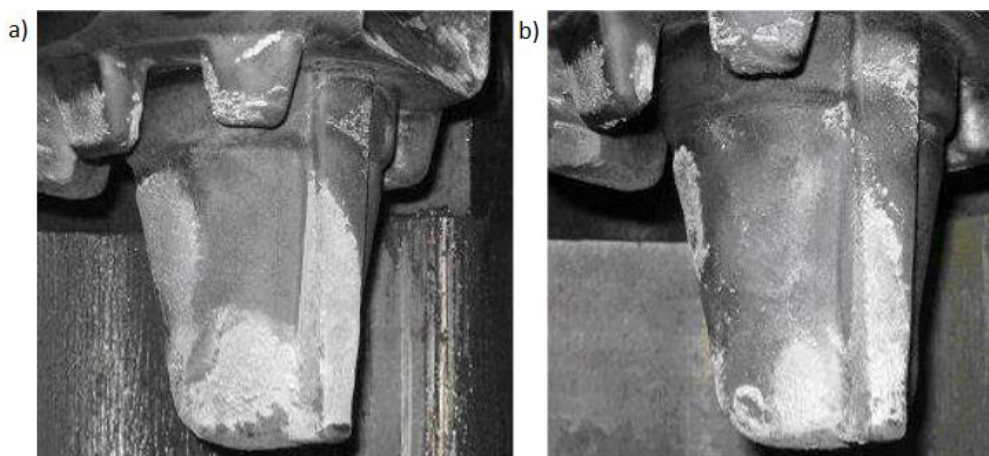
Slika 5.21. Izgleda kalupa sa manjom (a) u većom (b) kalupnom šupljinom, [51]

Pri lijevanju u kalup sa većom kalupnom šupljinom (b) vrijeme skrućivanja bilo je znatno veće. Korištena je lijevačka legura ADC12 te temperatura taline od $680\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na prvom kalupu (a) postignuta brzina u uljevnom kanalu bila je 40 m/s te je ciklus trajao 41 s. Na drugom kalupu

(b) postignuta je brzina od 50 m/s te je ciklus trajao 72 s. Nakon manje od 100 ciklusa, analizom SEM-om uočeno je da nije nastala značajnija erozija, već je na mjestima udara taline do trošenja došlo adhezijskim trošenjem. Zaključeno je da je došlo do minimalne erozije, koja je olakšala nastanak adhezijskog trošenja. Pretpostavlja se da bi značajno trošenje erozijom nastalo tek nakon većeg broja ciklusa.

A. Hogan [24] ispitivao je adhezijsko trošenje analizom stvarnih odljevaka. Uzet je svaki 40-i odljevak iz proizvodnje te je ispitivana površinska hrapavost na 19 lokacija na odljevku. Rezultati analize nisu dokazali da adhezijsko trošenje ima visok utjecaj na površinsku hrapavost pri manjem broju ciklusa lijevanja te se očekuje veći utjecaj ispitivanjem nakon većeg broja odljevaka. Daljnjim ispitivanjem utvrđeno je da je najvažniji parametar za trošenje temperatura površine kalupa.

Ispitivan je i utjecaj dodatka stroncija ljevačkoj leguri na adhezijsko trošenje. Nakon 40 ciklusa sa ljevačkim legurama bez stroncija i sa stroncijem na kalupu se vide očite razlike. Na kalupu u kojem je korištena ljevačka legura sa stroncijem došlo je do znatno manjeg naljepljivanja aluminija. Zaključeno je da se dodavanjem stroncija smanjuje adhezijsko trošenje za više od 25%. Usporedba kalupa prikazana je na slici 5.22.



Slika 5.22. Izgleda površine kalupa korištenjem legure bez stroncija (a) i sa stroncijem (b), [24]

V. Joshi, A. Srivastava i R. Shivpuri [40] ispitivali su utjecaj adhezijskog trošenja na dubinu nitriranog sloja. Ispitivanje se vršilo uranjanjem cilindričnih uzoraka (poboljšanih i nitriranih) u talinu ljevačke legure A380 na temperaturi od 680 °C. Mijenjala su se vremena uranjanja od 5

s, 30 s, 5 min, 30 min i 2 h. Zatim se mjerila visina nalijepljenog aluminija na uzorcima te vršila analiza mikrostrukture. Na slici 5.23. prikazani su uzorci od netretiranog i nitriranog čelika uranjeni u talinu 5 s i 2 h.



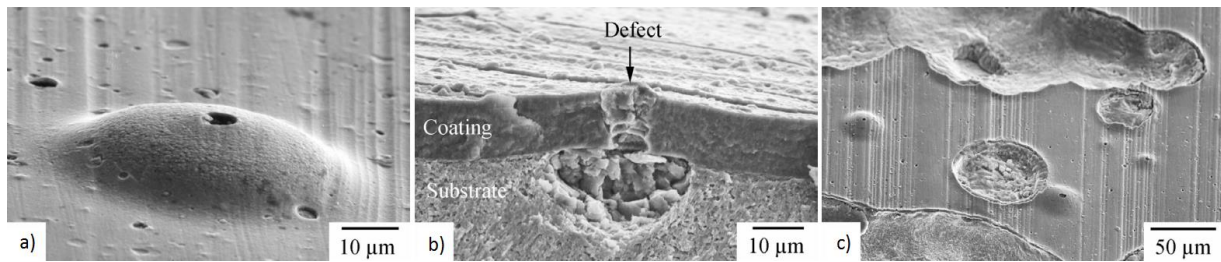
Slika 5.23. Uzorci od netretiranog čelika (a) i uzorci nitriranog čelika (b) nakon uranjanja u talinu, [40]

Analizom je uočeno da je kod netretiranih uzoraka došlo do značajnog nastajanja intermetalnih spojeva, što je primarni uzrok adhezijskog trošenja. Povećanjem vremena uranjanja, povećala se i debljina sloja nastalog od intermetalnih spojeva željeza i aluminija. Za nitrirane uzorke, pokazalo se da ne dolazi do nikakvih reakcija između nitriranog sloja i aluminija tj. nije došlo do nastanka intermetalnih spojeva te je do naljepljivanja taline došlo uglavnom mehaničkim sidrenjem.

Prilikom nastanka intermetalnih spojeva između čelika i ljevačke legure potrebne su veće sile za otvaranje kalupa. Prema tome, napravljen je test skrućivanjem taline oko uzoraka te mjerenjem sile potrebne za odvajanje uzoraka od skrućene aluminijske legure. Kod netretiranih uzoraka sila odvajanja je bila veća, što potvrđuje rezultate analize testa uranjanjem.

A. Persson, J. Bergström, C. Burman, S. Hogmark [52] istraživali su utjecaj dubine PVD sloja (CrN) na korozivno djelovanje taline ljevačke legure. Uzorci su izrađeni iz čelika „Orvar Supreme“ duljine 90 mm, promjera 13 mm i zaobljenja na vrhovima od 6.5 mm. Talina ljevačke legure zagrijana je na 710 °C. Pokazalo se da je korozija inicirana na šupljinama u površinskoj presvlaci gdje je aluminij iz ljevačke legure stvarao intermetalne spojeve sa

željezom iz materijala kalupa. Intermetalni spojevi uzrokuju povećanje volumena na čeliku ispod površinske presvlake. To ima za posljedicu izbočine na površini te nakon određene visine izbočenja, dolazi do lokalnog odvajanja presvlake. To kao rezultat otvara karakteristične šupljine na površini. Ako se nekoliko izbočenja nalazi u blizini, dolazi do nastanka većih oštećenja na površini. Pokazalo se da se povećanjem dubine površinske presvlake iznad $5\ \mu\text{m}$ intenzitet korozivnog trošenja drastično smanjuje. Izgled površine prilikom iniciranja korozije i nakon odvajanja presvlake može se vidjeti na slici 5.24.



Slika 5.24. Izgleda prilikom iniciranja korozije (a) i (b) te nakon odvajanja presvlake (c), [52]

ZAKLJUČAK

Prema pregledanoj literaturi te dosadašnjim istraživanjima, najveći utjecaj na trošenje kalupa za visokotlačno lijevanje aluminija ima mehanizam toplinskog umora uslijed naglih promjena temperatura. [30], [31], [34], [50] Iako se intenzivno radi na optimiranju hlađenja kalupa kako bi se poboljšalo skrućivanje ljevačke legure, ne postoje istraživanja čiji je cilj smanjenja promjena (fluktuacija) temperatura na površini kalupa. [7] Smanjivanjem razlike minimalne i maksimalne temperature na površini kalupa može se znatno povećati rok trajanja kalupa. [32] Bez obzira na to, ako postoji razlika temperature, doći će i do toplinskog umora te trošenja materijala na površini. Međutim, optimiranjem se može znatno smanjiti intenzitet trošenja te produžiti životni vijek kalupa. Razlika između maksimalne i minimalne temperature na površini može se smanjiti povisivanjem temperature predgrijavanja kalupa. Stoga je potrebno istražiti ovisnost trošenja kalupa o toplinskom umoru kao funkciji temperature predgrijavanja kalupa. Kako trenutno ne postoji standardizirani uređaj za laboratorijska ispitivanja toplinskog umora, potrebno je projektirati i izraditi uređaj koji simulira što više parametara kod proizvodnog procesa tehnologije visokotlačnog lijevanja.

S obzirom da su dosadašnja istraživanja pokazala da toplinski umor nije jedini mehanizam trošenja, [31], [31], [48], [49] te da na trošenje bitan utjecaj imaju i mehanizmi trošenja adhezijom, erozijom i korozijom, potrebno je uvrstiti i ove mehanizme trošenja prilikom ispitivanja. Prema nekim istraživanjima, postoji i utjecaj međudjelovanja mehanizama trošenja na ukupno trošenje površine kalupa. [31], [48], [51] Npr. pokazalo se da viša temperatura predgrijavanja smanjuje trošenje toplinskim umorom, ali povećava trošenje erozijom. Nadalje, istraživanja su pokazala da do propagacije korozije te povećanja adhezijskog trošenja dolazi znatno brže na područjima gdje je trošenje već nastalo erozijom. [31], [48]

Ispitivanja utjecaja površinskih presvlaka su pokazala da netretirani čelik uvijek slabije podnosi spomenute mehanizme trošenja stoga se u industriji kalup uvijek koristi sa modificiranom površinom ili korištenjem površinske presvlake. Prema ovome, ispitivanje bi trebalo vršiti uvijek na modificiranoj ili presvučenoj površini kako bi dobili rezultate usporedive sa stvarnim slučajem trošenja kalupa, što nije slučaj u svim izvršenim istraživanjima. Obično se koristi materijal kalupa iz alatnog čelika za rad u toplom stanju H11 i H13 koji su sličnog kemijskog

sastava. Na ovom području nije rađeno mnogo ispitivanja korištenjem različitih osnovnih materijala. Uređaj za ispitivanje trebao bi imati mogućnost ispitivanja raznih materijala te površinskih modifikacija i presvlaka.

Pri ispitivanju, za postizanje temperatura izmjerenih u industriji, poželjno bi bilo koristiti aluminijsku talinu kako bih prijenos topline bio što bliži stvarnom slučaju te kako bih uopće mogli ispitati, osim toplinskog umora, eroziju talinom te adhezijsko trošenje i koroziju. [47] Kako bih se pravilno ispitao utjecaj svih mehanizama, uređaj mora osigurati velik broj ciklusa ponavljanja. Mehanizam toplinskog umora kod dosadašnjih istraživanja ne dolazi do izražaja ako se radi o malom broju ciklusa. [50]

Pri ispitivanju erozijom treba voditi računa o mogućnosti ispitivanja različitih kutova udara taline, s obzirom da kut udara ima velik utjecaj na trošenje erozijom. Dosadašnja istraživanja pokazala su da je najveće trošenje pri malom kutu udara taline što je ukazalo na visok utjecaj abrazijskog trošenja.

Kako bi ispitali adhezijsko trošenje potrebno je primijeniti i sredstva za podmazivanje koja se u industriji koriste kako bih se kao rezultat dobili usporedivi rezultati s trošenjem u stvarnim uvjetima.

Razmatraju se višeslojne presvlake kako bih se postiglo što bolje prijanjanje presvlake na materijal kalupa a s druge strane što bolja otpornost prema mehanizmima trošenja. Ova rješenja su moguća sa trenutnim tehnologijama ali su znatno skuplja od trenutnih rješenja stoga nemaju značajniju praktičnu primjenu.

Idealno bih bilo ova istraživanja raditi na stvarnoj opremi za visokotlačno lijevanje ali rizik od oštećenja opreme te ometanja proizvodnog procesa ovaj pristup čini neisplativim. Visoke cijene kalupa za visokotlačno lijevanje ekonomski opravdavaju daljnje istraživanje trošenja kalupa. S obzirom na visok udio utjecajnih parametara, trošenje se ne može simulirati već zahtjeva izradu uređaja koji bi prilikom ispitivanja u obzir uzimao što veći broj parametara. Uređaj bih trebao imati mogućnost variranja spomenutih parametara kako bih se dobila ovisnost trošenja o svim parametrima. Mehanizmi trošenja bi trebali djelovati istovremeno, kao u stvarnom slučaju, kako bih se ispitalo međudjelovanje mehanizama trošenja.

LITERATURA

- [1] D. Fuštin: „Alati za izvorno oblikovanje“, <http://www.ss-industrijska-strojarskazg.skole.hr/upload/ss-industrijskastrojarskazg/multistatic/52/9.%20Alati%20za%20izvorno%20oblikovanje-kalupi.pdf> , veljača 2014.
- [2] "Ljevarstvo", www.fsb.unizg.hr, 2011.
- [3] Alteams Tech Center: „High pressure die casting“, <http://www.alteams.com/alteams-tech-centre/casting-methods/high-pressure-die-casting.html> , ožujak 2014.
- [4] Lj. D. Sully: „Die Casting“, Metals handbook, Vol.15, 1988.
- [5] P. Ljumović: „Analiza triboloških mehanizama trošenja na kalupima za visokotlačno lijevanje“, specijalistički projekt, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split 2013.
- [6] A. Persson: „On Tool Failure in Die Casting“, ACTA Universitatis Upsaliensis, Uppsala 2003.
- [7] E. J. Vinarcik: „High integrity die casting processes“, John Wiley Press, New Jersey, 2002.
- [8] P. R. Beeley: „Foundry technology“, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [9] M. Okayasu, S. Yoshifuji, M. Mizuno, M. Hitomi and H. Yamazaki: „Comparison of mechanical properties of die cast aluminium alloys: cold v. hot chamber die casting and high v. low speed filling die casting“, International Journal of Cast Metals Research, Vol.22 (374-381), 2009.
- [10] Tuula Hook: „Alloys for high pressure die casting“, Tampere University of Technology, http://webhotel2.tut.fi/projects/caeds/tekstit/mould/mould_HPDC_alloys.pdf , siječanj 2016.
- [11] B. Bauer, I. Mihalic: „Osnove tehnologije lijevanja“, FSB Zagreb, 2012.
- [12] I. Duplančić: „Materijali 2 – Aluminij i njegove legure“, FESB Split, 2009.
- [13] Q. Han, H. Xu: „Fluidity of alloys under high pressure die casting conditions“, Scripta Materialia 53 7-10, 2005.
- [14] Böhler: „W300“, <http://www.boehler-edelstahl.com/english/files/W300DE.pdf> , april 2014.
- [15] Uddeholm: „DIE STEELS AND IMPROVED PRODUCTIVITY IN DIE CASTING“, <http://www.empiredie.com/empire-diecasting/resourcecenter/downloads/pdf/UddeholmDiecastingoverview.pdf> , june 2014.
- [16] R. Molina, P. Amalberto: „Mechanical characterization of aluminium alloys for high temperature applications Part1: Al-SiCu alloys“, Metallurgical Science and Technology, 29(2011)1.

- [17] N.N.: "Tooling for die casting", NADCA Product Specification Standards for Die Castings, 2015.
- [18] A.W. Oráowicz, M. Mróz, M. Tupaj, J. Betlej, F. Páoszaj: "Possibilities of improving the durability of pressure moulds", Foundry Engineering, Volume 9, Issue 2 119-122, 2009.
- [19] Uddeholm: „Uddeholm tool steel for die casting“, Tooling application – Hot work, 2012.
- [20] Metal Ravne: „Steel RAVNEX“, <http://www.metalravne.com/steelselector/steels/ravnex.html> , siječanj 2016.
- [21] Christian Hojerslev: „Tool Steels“, Riso National Laboratory R-1244, Roskilde, Danka Services International, January 2001.
- [22] A. M. Bayer, B. A. Becherer, T. Vasco: „High-Speed Tool Steels“, ASM International, ASM Handbook, Volume 16 51-59 1989.
- [23] N.N.: „Consideration for best practice extrusion die Nitriding“, RGB Metallurgical, http://www.gas-nitriding.com/index.php?p=1_6_Technical-Information , siječanj 2016.
- [24] A. Hogan: „Die solder prediction and reduction“, Worcester Polytechnic Institute, Svibanj 2008.
- [25] M. Lorusso, D. Ugues, C. Oliva, R. Ghisleni: „Failure modes of PVD coatings in molten Al-alloy contact“, Acta Metallurgica Slovaca, Vol. 19, 2013, No. 1, p. 30-42.
- [26] A. Kayne, A. Street: „Die Casting Metallurgy“, Butterworths Monographs in Materials, Butterworths & Co. Ltd., 1982.
- [27] P.C. Sharma: „A textbook of production technology“, S. Chand & Co. Ltd. 2012.
- [28] A. Erdemir: „Solid Lubricants and Self-Lubricating Films“, CRC Press LLC, 2001.
- [29] P. Robbins, L.C. Chien: „High Pressure Die Casting Structural Aluminum“, Castool Tooling Systems, LINKS, lipanj 2014.
- [30] M. Muhič, J. Tušek, F. Kosel, D. Klobučar, M. Pleterski: „Thermal fatigue cracking of die-casting dies“, Metalurgija 9 (1), 9-12, 2010.
- [31] B. Kosec: „Failures of dies for die-casting aluminium alloys“, Metalurgija 47 (1), 51-55, 2008.
- [32] B. Kosec, G. Kosec, M. Soković: „Case of temperature field and failure analysis of die-casting die“, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 20 (1-2), 2007.

- [33] E. Lugscheider, K. Bobzin, T. Hornig, M. Maes: „Increasing the lifetime of aluminium and magnesium pressure die casting moulds by arc ion plating pvd coatings“, 6th international tooling conference, 980-990, 2002.
- [34] M. Muhič, J. Tušek, F. Kosel, D. Klobčar: „Analysis of Die Casting Tool Material“, Journal of Mechanical Engineering 56(6), 351-356, 2010.
- [35] C. Mitterer, F. Holler, F. Ustel, D. Heim: „Application of hard coatings in aluminium die casting — soldering, erosion and thermal fatigue behaviour“, Surface and Coatings Technology 125, 233–239, 2000.
- [36] A. Persson, S. Hogmark, J. Bergström: „Failure modes in field-tested brass die casting dies“, Journal of Materials Processing Technology 148, 108–118, 2004.
- [37] A.H. Mohammed: „Experimental Simulation of Reduction of Erosion Damage in Dies Used in Aluminium Casting“, Doktorski rad, 2013.
- [38] N. N.: „Mold erosion“, http://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/?tx_contagged%5Bsource%5D=default&tx_contagged%5Buid%5D=4594&tx_contagged%5BbackPid%5D=3&cHash=5127b12a9da411d323d4f20959e0dfab , april 2014.
- [39] Q. Han, S. Viswanathan: „Analysis of the mechanism of die soldering in aluminum die casting“, Metalurgical and material transactions 34(A), 139-142, 2003.
- [40] V. Joshi, A. Srivastava and R. Shivpuri: „Investigating tribochemical behavior of nitrided die casting die surfaces“, 6th international tooling conference, 961-977, 2002.
- [41] M. Yan, Z. Fan: „Durability of materials in molten aluminum alloys“, Journal of materials science 36, 285-295, 2001.
- [42] D. Klobčar, M. Muhič, M. Pleterški, J. Tušek: „Thermo-mechanical cracking of a new and laser repair welded die casting die“, Metalurgija 51 (3), 305-308, 2012.
- [43] B. Kosec, L. Kosec, J. Kopač: „Analysis of casting die failures“, Engineering Failure Analysis 8, 355-359, 2001.
- [44] A. Persson, S. Hogmark, J. Bergström: „Simulation and evaluation of thermal fatigue cracking of hot work tool steels“, International Journal of Fatigue, Volume 26, Issue 10, 1095–1107, 2004.
- [45] V. Velay, A. Persson, G. Bernhart, J. Bergström, L. Penazzi, “Thermal fatigue of a tool steel: Experiment and numerical simulation“, Proceedings of the 6th International Tooling Conference, Karlstad, , 667-685. 2002.

- [46] J. Bergstrom: „Strain-based approach to crack growth and thermal fatigue life of hot work tool steels“, Scandinavian Journal of Metallurgy 2003.
- [47] D. Schwam, X. Zhu: „Improved Die Casting Process to Preserve the Life of the Inserts“, Department of Materials Science and Engineering, Cleveland, 2012.
- [48] R. Shivpuri, M. Yu, K. Venkatesan, Y-L. Chu: “ A Study of Erosion in Die Casting Dies by a Multiple Pin Accelerated Erosion Test“, Journal of Materials Engineering and Performance 4, 145-153, 1995.
- [49] S. Gulizia, M.Z. Jahedi: „Evaluation of pvd coatings for industrial applications“, 6th international tooling conference, 881-892, 2002.
- [50] G.M. Ludtka, V.K. Sika: „Aluminum Soldering Performance Testing of H13 Steel as Boron Coated by the Cathodic Arc Technique“, 47th Annual Technical Conference Proceedings, 168-173, Dallas, Texas, 2004.
- [51] Z.W. Chen, M.Z. Jahedi: "Die erosion and its effect on soldering formation in high pressure die casting of aluminium alloys“, Materials and Design 20, 303-309, 1999.
- [52] A. Persson, J. Bergström, C. Burman, S. Hogmark: „Influence of deposition time and temperature during PVD coating of CrN on corrosive wear in liquid aluminium“, Surface and Coatings Technology, 146-147, 2001.