



SVEUČILIŠTE U SPLITU

SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ POLITEHNIKE

Modul: KONSTRUKCIJSKO STROJARSTVO

SPECIJALISTIČKA PRAKSA / SPECIJALISTIČKI PROJEKT

ANALIZA TRIBOLOŠKIH MEHANIZAMA TROŠENJA NA KALUPIMA ZA VISOKO - TLAČNO LIJEVANJE

Mentor: dr. sc. Dražen Živković, red. prof.

Student: Petar Ljumović, br. indeksa: 35090

Split, rujan 2013.

Sadržaj

1. Uvod	3
1.1 Tribologija i osnovni mehanizmi trošenja	4
1.2 Uloga i značaj projekta	10
2. Operativni sažetak projektnog zadatka	12
3. Tehničko – tehnološka izvedba projekta	13
3.1 Snimanje postojećeg stanja alata i tehnologija popravaka u tvornici LTH	13
3.2 Svojstva čelika za izradu alata prema standardu	20
3.3 Analiza uzoraka čelika iz alata korištenog u proizvodnom procesu tvornice	26
3.4 Usporedba standardnog i uzorkovanog materijala alata	32
3.5 Definiranje triboloških mehanizama i slučajeva trošenja alata tijekom procesa tlačnog lijevanja u tvornici	33
3.6 Primjeri tehnologija popravka i poboljšanja alata	39
4. Razvojne mogućnosti projekta	45
5. Zaključak	46
Literatura	47

1. Uvod

Tvrtka **LTH Metalni lijev d.o.o.** [1] iz Benkovca kao tvornica tlačnog lijeva iz Zadarske županije, bavi se proizvodnjom automobilskih dijelova od legura aluminija i sudjeluje u izvoznoj robnoj bilanci sa preko 25 milijuna € vrijednosti proizvoda za renomirane svjetske partnere, odnosno automobilske korporacije poput BMW-a i Mercedesa.

Tehnika i problematika aluminijskog tlačnog lijevanja kao proizvodne tehnologije koju koristi ova ljevaonica, već je bila predmetom promatranja i analize kroz određeni broj diplomskih radova [2] unazad nekoliko godina. Tom prigodom dana su temeljita obrazloženja tehnike aluminijskog tlačnog lijevanja s naglaskom na tlačno lijevanje s hladnom komorom upravo iz proizvodnog programa ljevaonice LTH Metalni lijev. Dane su karakteristike osnovnih postupaka izrade aluminijskih odljevaka u jednokratnim i trajnim kalupima, navedeni su i opisani različiti materijali za izradu kalupa, navedene su prednosti i nedostaci odljevaka od legura aluminija, kao i same vrste legura koje se najčešće koriste u proizvodnji, odnosno izradi aluminijskih odljevaka unutar navedenog proizvodnog sustava.

Projekt uzima u obzir dosadašnje spoznaje, iskustva i podatke iz navedene tvornice vezane uz prethodno spomenutu problematiku kao točku polazišta. Radni djelokrug Projekta bio bi provođenje izviđačkih ispitivanja triboloških pojava na kalupima za tlačno lijevanje kao dio Projekta Zavoda za strojarску tehnologiju pri Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu, pod naslovom "Analiza trošenja i mogućnosti produljenja vijeka trajanja alata za tlačno lijevanje".



Slika 1. Tvornica LTH Metalni lijev d.o.o. Benkovac [1]

1.1 Tribologija i osnovni mehanizmi trošenja

Tribologija [3] predstavlja znanstveno - stručnu disciplinu koja se bavi problematikom površina u dodiru; njihovom relativnom gibanju te pratećim aktivnostima kao što su **trenje i trošenje**, i to u širem smislu.

Dakle, definicije mehanizama trenja i trošenja u fizikalnom (mehaničkom) smislu, nužno u sebi sadrže i energetska komponentu. Trenje (premda neophodno za hodaње i gotovo sve oblike transporta na zemlji), kao pojava uzrokuje goleme gubitke energije. Također, trošenje, iako ključno za uhodavanje kliznih parova i obradu odvajanjem čestica, uzrokuje goleme gubitke materijala.

Stoga, širi smisao i zadatak tribologije jest da, uzimanjem u obzir mehanizme trenja i trošenja, pruži mogućnost uvjerljive procjene uštede na troškovima izazvanim upravo pojavom trenja, odnosno trošenja.

Službena definicija tribologije prvi put je objavljena 1966. godine u Izvještaju Radne grupe Ministarstva prosvjete i znanosti Ujedinjenog Kraljevstva, koju je vodio P. JOST. Navedeni Izvještaj, u cilju bolje efikasnosti tehničkih sustava, predstavljao je mjesto interakcije stečenih znanja i iskustava u to vrijeme svih relevantnih znanstveno - tehničkih disciplina, sveobuhvatno ih nazvavši - tribologijom.

JOST - ov Izvještaj te godine iznosi procjenu mogućnosti uštede na troškovima izazvanim trenjem i trošenjem u Ujedinjenom Kraljevstvu u iznosu od 515 milijuna funti, što je u to vrijeme predstavljalo oko 1% bruto nacionalnog proizvoda.

Positivan zamah koji je potom uslijedio (izobrazba, izdavačka djelatnost, tečajevi, savjetovanja, osnivanje studija, udžbenici) rezultira velikim financijskim efektom; 25 godina poslije JOST - ova Izvještaja, procjene mogućnosti uštede iznose već milijardu i pol funti ili 2% nacionalnog bruto proizvoda, uz omjer ulaganja prema uštedama 1 naprema 40.

Progres se nastavio i dalje. Tribološki "pokret" postaje globalan, a od 1989. godine producira se i objavljuje po nekoliko tisuća naslova godišnje, diljem razvijenog svijeta.

Istraživanja u tribologiji trebaju doprinijeti maksimalnom smanjenju i uklanjanju gubitaka do kojih dolazi uslijed trenja i trošenja na svim razinama koje uključuju procese trljanja – poliranja – brušenja – čišćenja površina. Da bi se to moglo postići, potrebno je znati i prepoznati osnovne **tribološke elemente**. To su: hrapavost površine, mehanizmi adhezije, mehanizmi trenja i trošenja, te fizikalne i kemijske interakcije maziva i međudjelujućih površina. Tribološki elementi, njihova pojava i uloga moraju biti prepoznati i razumljivi za optimalno djelovanje i dugotrajnu pouzdanost sustava te ekonomsku opravdanost.

Sama pojava trošenja se generira na mehanički i/ili kemijski način i općenito gledano se ubrzava kod trenja. Trošenje uključuje osnovne fenomene koji svi imaju zajedničko svojstvo uklanjanja čvrstog materijala s površine. U većini slučajeva do trošenja dolazi površinskim interakcijama na neravninama. Djelatni uvjeti trenja utječu na

međupovršinsko trošenje u određenom (definiranom) tribosustavu. Svojstva čvrstog tijela se mijenjaju; na površini ili blizu površine kada je materijal na površini istisnut tijekom trošenja, ali i kada je određena količina materijala "izgubljena" zbog promjena na mikro pa čak i nanorazini.

Posljedica trošenja materijala može biti potpuno uklanjanje materijala s površine ili pak premještanje materijala na dodirnim površinama. Gubitak materijala raste kako napreduje oštećenje materijala kod trošenja.

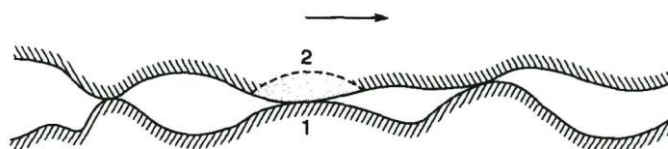
U dobro oblikovanim tribološkim sustavima uklanjanje materijala trošenjem je vrlo spor, kontinuirani i kontrolirani proces.

Osnovni mehanizmi trošenja su sljedeći: abrazijski, adhezijski, umor površine i tribokorozija. Svi mehanizmi, osim umora površine, dovode do polaganog odstranjenja materijala.

U određenim situacijama, pa tako i pri proizvodnom procesu lijevanja metala unutar ove tvornice, nisu djelatni samo pojedinačni mehanizmi trošenja; prije bi to bile kombinacije npr. adhezijskih, korozivskih ili abrazivskih načina trošenja. Trošenje se u pravilu inicira jednim mehanizmom, a nastavi nekim drugim mehanizmom i sl.

Analiza oštećenja materijala je složena; utvrđuju se komponente oštećenja a potom i tip mehanizma trošenja koji su odgovorni za oštećenje materijala. U svrhu istraživanja i analize površine materijala prije i nakon trošenja koristi se mikroskop te još neke napredne analitičke tehnike. Od primjerenih uređaja i opreme za tribološka istraživanja vrijedi spomenuti tribološke analitičke vage s preciznošću mjerenja (npr. gubitka mase) od 0.0001 gram, te uređaje za mjerenje hrapavosti površine.

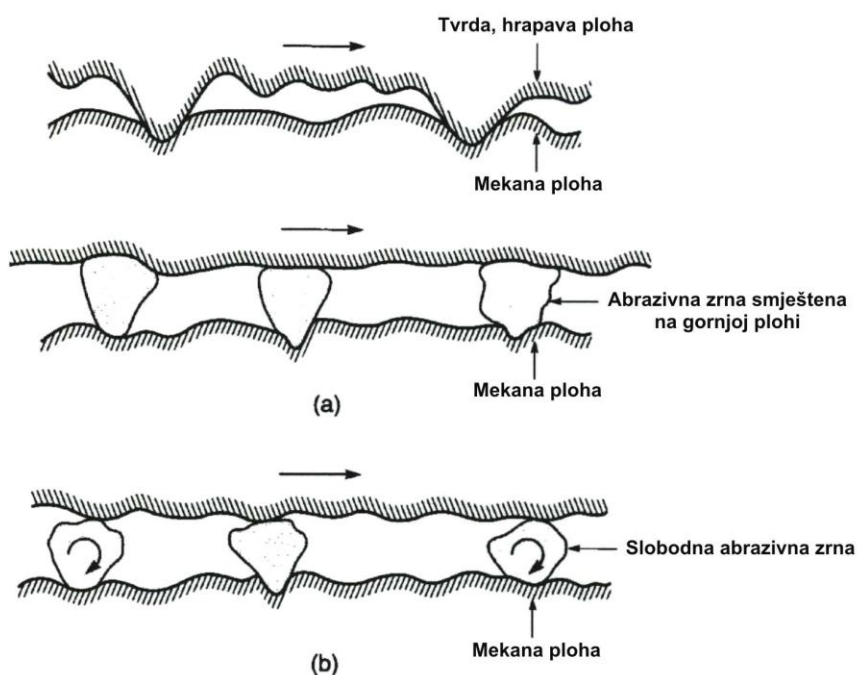
Adhezijsko trošenje [4] se generira pri slučajevima gdje je ključna adhezija (međusobno spajanje) dodirnih površina, kada su dva nominalno čvrsta tijela u kontaktu klizanjem, bez ili sa podmazivanjem. Adhezijsko trošenje nastupa kada se neravnine – izbočine koje se uslijed klizanja u kontaktu smiču, što može rezultirati odvajanjem dijelova s jedne i dodatno "naljepljivanjem" dijelova jedne površine na drugu površinu. Kako napreduje klizanje, preneseni dijelovi mogu otpasti s površine na koju su nanošeni i biti preneseni natrag na originalnu površinu, ili se mogu odvajati čestice trošenja. Neke čestice se mogu odlomiti procesom zamora, za vrijeme ponovljenih ciklusa opterećenja i rasterećenja što rezultira odvajanjem čestica i u konačnici gubitkom mase tijekom adhezijskog trošenja. Slika 2 prikazuje tijek i smjer adhezijskog popuštanja do loma (1 - 2) za vrijeme smicanja međupovršine.



Slika 2. Shematski prikaz adhezijskog popuštanja [4]

Abrazijsko trošenje [4] brušenjem (*abrasive wear*) nastaje kada neravni dijelovi hrapave tvrde površine ili tvrde čestice klize po mekšoj površini i oštećuju površinu uz pomoć plastične deformacije ili loma.

Mehanizmi adhezijskog i abrazijskog trošenja uglavnom su djelotvorni za vrijeme direktnog fizičkog kontakta između dviju površina. No, ako su površine odvojene kapljevitim filmom (isključenost abrazijskih čestica), ti mehanizmi trošenja ne djeluju.



Slika 3. Shematski prikaz abrazijskog trošenja [4]

Pri abrazijskom trošenju dolazi do otkidanja čestica; opažaju se brazde (*scratching*) na mekoj površini, koje su uočljive kao niz utora – žljebova (*groove*) paralelnih sa smjerom klizanja. Abrazijsko trošenje se još naziva i grebanje (*scratching*) ili zarezivanje (*scoring*), ovisno o stupnju djelovanja na površinu.

Slika 3 prikazuje dva modela mehanizma abrazijskog trošenja; a) model klizanja hrapave, tvrde površine ili površine s abrazijskim šiljcima za otkidanje čestica po mekšoj površini (postupci brušenja i rezanja), i b) model gibanja slobodnih abrazijskih čestica s oštrim bridovima koje su smještene između površina od kojih je barem jedna mekša od samih abrazijskih čestica (postupak poliranja).

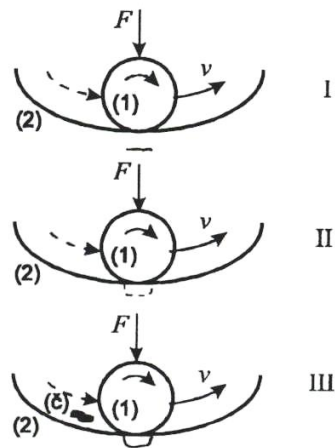
Utjecaj hrapavosti površine na volumen abrazijskog trošenja vrlo je značajan.

Umor površine [3] predstavlja odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprezanja - ponovljenog kotrljanja (*rolling*), odnosno ponovljenog klizanja (*sliding*). Jedinični događaj umora površine u tri faze prikazan je na slici 4.

Faza I – stvaranje mikropukotine, uglavnom ispod površine,

Faza II – napredovanje mikropukotine,

Faza III – ispadanje čestica trošenja, obično oblika pločice ili ivera.



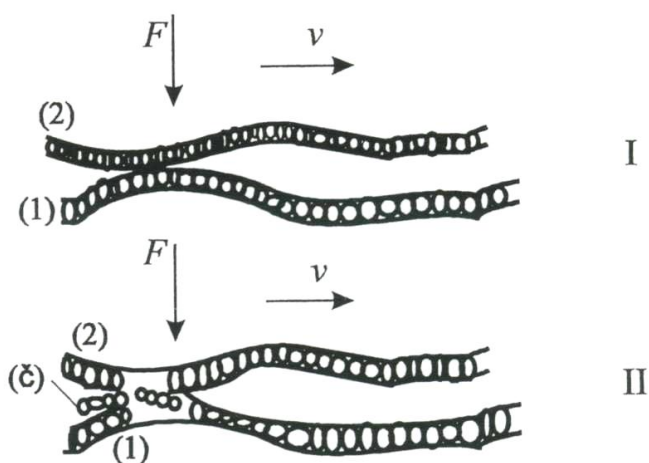
Slika 4. Shematski prikaz jediničnog događaja umora površine [3]

U prvoj fazi stvara se podpovršinska pukotina jer je najveće smično naprezanje kod koncentriranog dodira (tzv. HERTZ-ovo naprezanje) uvijek ispod same površine. Ovo je tzv. faza inkubacije jer praktički nema nikakvog odvajanja čestica. U drugoj fazi podpovršinska pukotina izbija na površinu. Od toga trenutka iz pukotine redovito izlaze sitne kuglaste čestice. Ove čestice su toliko sitne da se praktički ne mogu registrirati kao gubitak mase ili volumena, ali mogu služiti kao važan pokazatelj stanja procesa trošenja umorom površine. U trećoj fazi dolazi do ispadanja krupne čestice oblika ivera što na površini uzrokuje oštećenje u obliku rupice. Stoga se ovaj mehanizam trošenja obično naziva rupičenje (*pitting*).

Tribokorozija [3] odnosno tribokemijsko trošenje predstavlja mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolinom. Jedinični događaj tribokorozije s dvije faze prikazan je na slici 5.

Faza I – stvaranje (ili obnavljanje) sloja produkata korozije,

Faza II – mjestimično razaranje sloja produkata korozije.



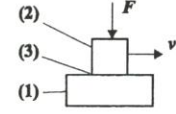
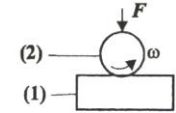
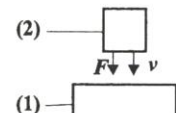
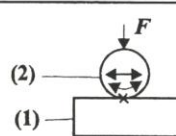
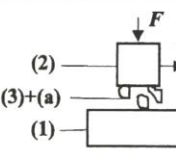
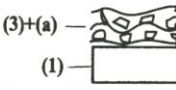
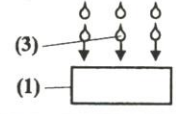
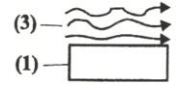
Slika 5. Shematski prikaz jediničnog događaja tribokorozije [3]

Pri manjem intenzitetu odnošenja stvorenih čestica na površini se stvaraju proizvodi korozije, a pri većem intenzitetu odnošenja, površina je naizgled polirana, a čestice trošenja su uglavnom oksidi praškastog oblika. Čestice tribokorozije se stvaraju unutar vanjskog površinskog sloja. Kako su slojevi vrlo tanki, tribokoroziju svrstavamo u mehanizme trošenja slabog intenziteta. Tribokorozija predstavlja kombinaciju između kemijskih reakcija na površini triboelementa i jednog od prethodno opisanih osnovnih mehanizama trošenja tj. abrazije, adhezije ili umora površine.

Praćenjem procesa trošenja može se pouzdano utvrditi koji su to djelujući tj. prevladavajući mehanizmi trošenja kojima su izloženi pojedini elementi promatranog tribosustava. Na osnovu toga treba poduzeti mjere u cilju smanjenja trošenja i uklanjanja (smanjenja) njegovih štetnih posljedica (trošenje, istrošenost alata, kvarovi, itd). Cilj je postići tzv. "normalno" trošenje. Najvažnija preventivna tribološka mjera jest pravilan izbor materijala odnosno zaštite od trošenja, a taj se izbor treba provesti uzimajući u obzir predviđeni stupanj opasnosti od pojedinih mehanizama trošenja u promatranom tribosustavu. Taj stupanj opasnosti može se procijeniti na osnovu usporedbe promatranog tribosustava s nekim prethodno izvedenim i analiziranim sustavom, s kojim prema nekim određenim kriterijima dijeli sličnosti.

Tablica 1 prikazuje podjelu SLUČAJEVA trošenja kod koje su kriteriji sličnosti - elementi tribosustava, vrsta dodira, način opterećenja i oblik relativnog gibanja. Gotovo svi realni tribosustavi mogu se svrstati u jednu od osam navedenih vrsta.

Među navedenima se, dakako, nalaze i slučajevi trošenja koji djeluju kod analiziranih alata i kalupa tvornice LTH Metalni lijev d.o.o..

	TIP TROŠENJA	SCHEMA TRIBOSUSTAVA ¹⁾	RELATIVNO GIBANJE	MEHANIZMI TROŠENJA ²⁾ / STUPANJ OPASNOSTI ³⁾				POKAZATELJ OTPORNOSTI NA TROŠENJE
				AB	A D	UP	TK	
1.	SKLIZNO		sklizanje	4	1	3	5	Kompatibilnost materijala
2.	KOTRLJAJUĆE		kotrljanje	4	4	1	5	Dinamička izdržljivost površine
3.	UDARNO		udarci	3	3	1	5	
4.	IZJEDANJE (fretting)		vibracije				1	Konstruktivske mjere
5.	ABRAZIJA		sklizanje	1		4	5	Udio i mikrotvrdoća tvrde faze
6.	EROZIJA ČESTICAMA		strujanje	1		2	5	Udio i mikrotvrdoća tvrde faze/dinamička izdržljivost površine
7.	EROZIJA KAPLJEVINOM		strujanje			1	4	Dinamička izdržljivost površine
8.	KAVITACIJA		strujanje			1	4	

(1) funkcionalni dio
(2) funkcionalni dio
(3) međusredstvo (mazivo)
(a) abraziv

AB - abrazija
AD - adhezija
UP - umor površine
TK - tribokorozija

5 - najniži
4 - niski
3 - srednji
2 - visoki
1 - jako visoki

Tablica 1. *Primjeri različitih slučajeva trošenja [3]*

1.2 Uloga i značaj projekta

Već dulji niz godina, tvornica LTH Metalni lijev d.o.o. iz Benkovca ispunjava s uspjehom stroge zahtjeve i standarde proizvodnje za inozemne naručitelje. Toj činjenici ide u prilog konstantan rast proizvodnih zahtjeva, pa tako i proizvodnih kapaciteta sa sve većim naglaskom na preciznost i kvalitetu završne obrade gotovih proizvoda (odljevaka).

Svi relevantni proizvodni procesi unutar tvornice prate se i kontroliraju putem računala. Od spektralne analize kemijskog sastava uzoraka naručenih legura aluminija za lijevanje u početnoj i završnoj fazi proizvodnog procesa, preko praćenja temperature zagrijavanja alata tijekom proizvodnog procesa i postavljanja graničnih vrijednosti (hlađenje rotometara) kao prevencije njihovog pregrijavanja, do uspostave popratne tiskane tehničke dokumentacije cijelog proizvodnog procesa po fazama (obrazac POPRATNICA) u cilju otkrivanja i otklanjanja eventualnih nastalih nepravilnosti u proizvodnji, ali i kreiranja arhiva aktualnog proizvodnog procesa.

Alati, držači kalupa, matrice – predstavljaju iznimno važan segment proizvodnog portfelja tvornice. Oni čine sastavni dio strojeva za proizvodnju koji su projektirani i kategorizirani prema silama zatvaranja kalupa prilikom ubrizgavanja taline u rasponu od 3400 – 12000 KN. Veličina i raspon cijena alata za ispunjavanje ovih tehnoloških zahtjeva varira od 30.000 – 100.000 € po komadu.

Uz sile zatvaranja, broj zatvaranja kalupa unutar jednog proizvodnog ciklusa, broj proizvodnih ciklusa te djelovanje temperature i brzine ulaska vrućeg rastaljenog metala na strukturu i geometriju alata, predstavlja ključne i konkretne parametre odabira materijala za njihovu izradu.

Također, u tvornici se strogo vodi računa o pravilnom održavanju alata. Vodi se odgovarajuća statistika u formi zapisa relevantnih podataka o radu alata tijekom vremena eksploatacije. Pisani dokumenti arhiviraju se u centrali gdje se vrše provjere servisnih intervala, rokova trajanja za svaki pojedini alat, garancijski rokovi i sl. Za svaki novi alat otvara se i novi "karton". Prema iskustvenim podacima tvornice, alati završavaju na reparaturi u prosjeku nakon 100.000 - 120.000 odrađenih ciklusa, iako te vrijednosti mogu prilično varirati. Te varijacije, dakako, unose i određene poteškoće u odvijanju proizvodnog procesa i planiranju rokova isporuke gotovih proizvoda.

Ekonomski aspekt proizvodnog procesa krije se iza svake od navedenih aktivnosti. Trajnost navedenih alata može se, stoga, promatrati i kao ekonomska kategorija. Fenomen trošenja alata ističe se kao parametar s troškovne strane bilance poslovanja, ali u isto vrijeme i kao područje potencijalno velikih ušteda ako se analizira na odgovarajući, stručan način.

Financijsko poslovanje tvornice značajno ovisi o pravilnoj raspodjeli financijskih sredstava, odnosno realističnom i svrsishodnom planiranju raspodjele troškova, prihoda i investicija. Ako se uzme u obzir da se godišnji proračun na nivou ove tvrtke planira u financijskim varijacijama ekvivalentnim iznosu od 1.000 €, optimiranje proizvodnog procesa predstavlja veliki izazov, ali istovremeno otvara mogućnost potencijalno najvećih ušteda.

Prema opservacijama direktora tvornice gospodina Željka Uzelca, razlika u cijeni gotovog proizvoda od samo jednog eurocenta na tržištu za tvrtku može značiti uspjeh ili propast.

Uloga i svrha ovog Projekta jest upravo iznalaženje prostora za optimiranje proizvodnje kroz smanjenje negativnog efekta trošenja alata tijekom proizvodnog procesa i povećanje proizvodne moći strojnog kapaciteta tvornice. Također, ovaj Projekt može imati određenu ulogu i u optimiranju tehnoloških metoda reparature alata koje se koriste ili se mogu koristiti unutar ove tvornice.

2. Operativni sažetak projektnog zadatka

Kronološki slijed aktivnosti unutar ovog Projekta rezultat je analitičkog pristupa navedenoj problematici u cilju sistematizacije dobivenih rezultata ispitivanja realnih i relevantnih parametara proizvodnog procesa te optimizacije buduće proizvodne djelatnosti u kontekstu triboloških mehanizama trošenja kalupa za visoko – tlačno lijevanje.

Realizacija Projekta odvija se u **6 faza**:

- Snimanje postojećeg stanja alata i tehnologija popravaka u tvornici
- Svojstva čelika za izradu alata prema standardu
- Analiza uzoraka čelika izuzetih iz alata korištenog u proizvodnom procesu tvornice
- Usporedba standardnog i uzorkovanog materijala alata
- Definiranje triboloških mehanizama i slučajeva trošenja alata tijekom procesa tlačnog lijevanja u tvornici
- Primjeri tehnologija popravka i poboljšanja alata.

3. Tehničko - tehnološka izvedba projekta

3.1 Snimanje postojećeg stanja alata i aktualnih tehnologija reparature u tvornici LTH

Kako je navedeno u uvodnim napomenama Projekta, sam proizvodni proces u tvornici u cijelosti je već opisan kroz određeni broj stručnih radova [2]. Stoga, tijekom proizvodnog procesa u ovom poglavlju biti će predstavljen sažeto; nizom karakterističnih kronološki složenih operacija s naglaskom na kritične trenutke međudjelovanja taline i alata.

PROIZVODNI PROCES

- Osnovni materijal za lijevanje su tri legure aluminijske (Al 226, Al 231, Al 239). Uzorci ingota s označenim kemijskim sastavom šalju se na SPEKTRALNU ANALIZU (Spectro analytical instrument), neovisno o atestu dobavljača. Uz osnovni materijal dodaje se i dio povratnog materijala iz procesa proizvodnje (reciklaža), uz naknadnu ponovnu analizu kemijskog sastava izlaznog proizvoda.
- Tijekom procesa lijevanja, svi relevantni parametri se računalno kontroliraju; radne vrijednosti temperature taline preko računala; postojanje graničnih vrijednosti grijanja alata (višak topline se odvodi vodom i uljem). Radne temperature alata dosežu 170 ± 10 °C. Tlačni klipovi se podmazuju specijalnim visokokvalitetnim tekućim grafitnim premazom (formatin BT 1000), dok se alati podmazuju premazom na bazi molibden - disulfida (MoS_2). Praćenje proizvodnje se odvija preko kontrolnih procesa (npr. hlađenje rotometara), od autokontrole preko kontrolnih planova do korekcija i dorada.
- Oblikovanje proizvoda (ubrizgavanje taline) vrši se radnim strojevima sa silama zatvaranja kalupa od već spomenutih 3400 – 12000 KN. Strojevi su kategorizirani kao CNC ili NAMJENSKI, s razlikama u postavi (*set up*) i veličini proizvodne serije.
- Završna strojna obrada odljevaka izvodi se tokarenjem i tehnofiniranjem. Završnoj obradi odljevaka prethodni operacija pjeskarenja.

Mjesta najintenzivnijeg trošenja alata zabilježena su na čeličnim kalupima izrađenih od Č 4751 (ISO 1.2343), pri procesu ulijevanja vrućeg tekućeg aluminijske (temperature 690 ± 20 °C). Mehanizmi trošenja alata generiraju se ulazom vruće taline u kalupe.

Slike 6, 7, 8 i 9 predstavljaju mjesta najintenzivnijeg trošenja materijala alata pri ubrizgavanju taline, s karakterističnim izgledom površina.



Slika 6. *Trošenje materijala kalupa pri procesu lijevanja - primjer 1* [1]



Slika 7. *Trošenje materijala kalupa pri procesu lijevanja - primjer 2* [1]



Slika 8. *Trošenje materijala kalupa pri procesu lijevanja - primjer 3* [1]



Slika 9. *Trošenje materijala kalupa pri procesu lijevanja - primjer 4* [1]



Slika 10. Izgled površine odljevka izlivenog u kalupu sa slike 9 (primjer 4) [1]

Prepoznati parametri relevantni u ovim slučajevima trošenja su:

- brzina ulaza taline u kalupe (kinetička energija taline),
- kut ulaza taline u kalupe,
- temperaturne varijacije i dilatacije,
- kemijski sastav materijala kalupa i kemijski sastav taline.

POPRAVAK ALATA

Alati se prije svakog popravka (ciklusa održavanja), bilo po kriteriju proaktivnog ili korektivnog održavanja čiste metodom tzv. ultrazvučnog pranja. Potom se primjenjuje neka od četiri tehnologije popravka alata provedenih u ovoj tvornici ovisno o vrsti, mjestu i veličini oštećenja.

- **TIG navarivanje** s inertnim plinom visoke čistoće - Argonom 5N (Ar 99.999 %) i dodatnim materijalom - žicama [5] UTP A73 G3 tvrdoće 45 - 50 HRC i UTP A73 G4 tvrdoće 38 - 42 HRC. Postupku navarivanja prethodi predgrijavanje alata na temperaturu 275 - 300 °C u trajanju od nekoliko sati ovisno o volumenu (koriste se podaci Slovenskog Instituta za strojarstvo).

Prema katalogu proizvođača opreme za zavarivanje UTP [6], dodatni materijal - žica UTP A73 G3 koristi se za nadogradnju (navarivanje) dijelova i komponenti od alatnih čelika za rad u toplom stanju podvrnutih udarnim opterećenjima, tlaku i trošenju (abraziji).

Druga žica, UTP A73 G4, koristi se kao dodatni materijal za popravak i održavanje alata za rad u toplom stanju; materijal žice je visokootporan na udarna opterećenja i temperaturne šokove (dilatacije).

Prema podacima UTP -a [5], žice UTP A73 G3 i UTP A73 G4 temperaturno su postojane do 550 °C.



Slika 11. *Popravak kalupa TIG navarivanjem - primjer 1* [1]



Slika 12. Popravak kalupa TIG navarivanjem - primjer 2 [1]

- **Obrada odvajanjem čestica** (Hermle CNC glodalica, Gühring rezni alati) pri čemu se koriste manje vrijednosti parametra dubine reza uz veće brzine rezanja – 9 m/min posmak, uz dubinu reza 0.3 mm na 40 HRC tvrdom čeliku. S reznim alatima od tvrdog metala koristi se standardni posmak < 3 m/min.



Slika 13. CNC glodalica marke HERMLE [1]

- Obrada elektroerozijom odnosno **elektrootapanjem**; stroj za elektrootapanje generira struju visoke jakosti (60A) te utiskivanjem bakrenih žigova popravlja složenu geometriju alata odnosno kalupa. Metoda se odlikuje velikom stabilnošću reza i visokom kvalitetom završne obrade.



Slika 14. Stroj za elektrootapanje [1]

- U tvornici se provodi i metoda **elektro - metalizacije** površine alata (nanošenje volframa uz pomoć zagrijane volframove elektrode u dubinu 5 - 6 stotinki milimetara). Površina se prevlači slojem volframa u cilju postizanja bolje toplinske postojanosti i veće izdržljivosti na trošenje.



Slika 15. Primjeri popravka alata elektro - metalizacijom [1]

- Alati se i površinski **nitiraju** u matičnoj tvornici u Sloveniji do 0.5 mm u dubinu.

3.2 Svojstva čelika za izradu alata prema standardu [7]

Alati i kalupi u tvornici LTH Metalni lijev izrađeni su od legiranog alatnog čelika standardne oznake HRN Č 4751, trgovačke oznake BÖHLER W300. Oznake prema drugim standardima su:

EN / DIN	UNS	BS	AISI
1.2343 / X38CrMoV5-1	T20811	BH11	H11

Kemijski sastav (prosječni udio u %):

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.38	1.10	0.40	5.00	1.30	0.40

GLAVNA SVOJSTVA

BÖHLER W300 je vrsta čelika iz grupe legiranih alatnih čelika za rad u toplom stanju. Posjeduje iznimno visoku čvrstoću pri udarnim opterećenjima i visoku vlačnu čvrstoću na povišenim temperaturama. Ima naglašeno svojstvo otvrdnjavanja na zraku i podnosi hlađenje u vodi. BÖHLER W300 može se naći u dvjema specijalnim podvrstama; ISODISC i ISOBLOC s poboljšanim svojstvom homogenosti i povećanom žilavosti.

NEKA VAŽNIJA FIZIKALNA SVOJSTVA

	20 °C	500 °C	600 °C
Gustoća (kg/dm ³)	7.80	7.64	7.60
Modul elastičnosti (N/mm ²)	215 x 10 ³	176 x 10 ³	165 x 10 ³

PRIMJENA

Izrada alata i kalupa za rad u toplom stanju te procesiranje lakih metala i legura. Koristi se i za izradu vodilica za savijanje cijevi, matrica za ekstruziju metalnih šipki i cijevi, alata (opreme) za ekstruziju u toplom stanju, alata i kalupa za izradu šupljih predmeta, klinova, zakovica, matica i vijaka. Također, koristi se za izradu opreme za lijevanje i različitih vrsta kalupa - za lijevanje legura od lakih metala te polimernih materijala.

KARAKTERISTIČNI POSTUPCI TOPLINSKE OBRADJE

Za oblikovanje u toplom stanju (*kovanje*) koriste se sljedeći parametri:

- Temperatura od 1100 - 900 °C,
- Hlađenje u peći ili u materijalu s odgovarajućom termalnom izolacijom.

MEKO ŽARENJE

Čelik se zagrijava na temperaturu od 700 - 800 °C. Drži se nekoliko sati (vrijeme ovisi o volumenu i poprečnom presjeku uzorka) na ovoj temperaturi te se polagano hladi u peći brzinom od 10 - 20 °C /sat, do približno 600 °C. Nadalje se hlađenje provodi na zraku. Ovaj postupak rezultira maksimalnom tvrdoćom od 205 HB.

ŽARENJE ZA POPUŠTANJE ZAOSTALIH NAPREZANJA

Čelik se zagrijava na 600 - 650 °C, zadržava na toj temperaturi (ovisno o volumenu i poprečnom presjeku uzorka) pa se polagano hladi u peći. Ovaj postupak se provodi u cilju smanjenja zaostalih napreznja nastalih tijekom duge strojne obrade. Po završetku grijanja, slijedi držanje (uzorka) u neutralnoj atmosferi od nekoliko sati.

OTVRDNJAVANJE

Postupak otvrdnjavanja čelika provodi se držanjem na temperaturi od 1000 - 1040 °C, 15 - 30 minuta nakon izjednačavanja temperature, nakon čega slijedi postupak kaljenja u različitim medijima: ulje, solna kupka, zrak i vakuum. Tvrdoće koje se mogu postići ovim postupkom iznose:

- 52 - 56 HRC u ulju ili solnoj kupki,
- 50 - 54 HRC na zraku ili u vakuumu.

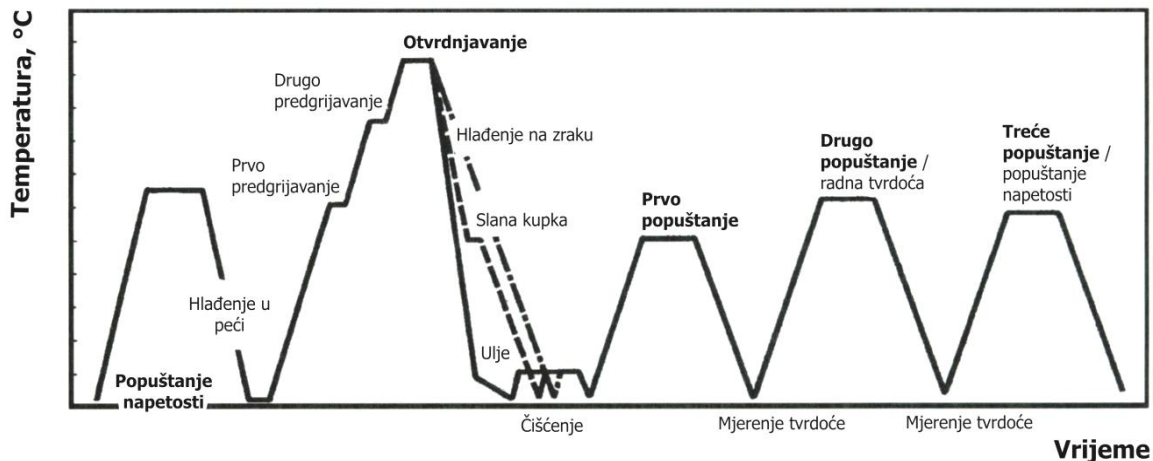
POPUŠTANJE

Toplinska obrada popuštanja izvodi se u tri slijeda:

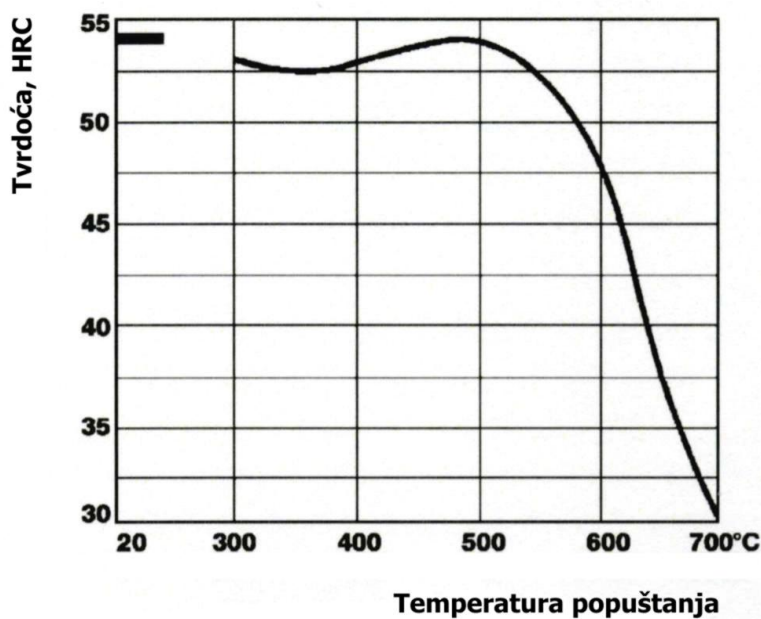
- popuštanje I: grijanje na približno 30 °C iznad vrijednosti maksimalne sekundarne tvrdoće,
- popuštanje II: popuštanje do potrebne radne tvrdoće alata,
- popuštanje III: provoditi na temperaturi 30 - 50 °C ispod najviše temperature popuštanja u cilju smanjenja napetosti.

Toplinska obrade popuštanja provodi se zagrijavanjem na temperaturu popuštanja odmah nakon postupka otvrdnjavanja. Vrijeme držanja u peći trebalo bi iznositi po 1 sat za svakih 20 mm debljine uzorka ali minimalno 2 sata. Hlađenje se provodi na zraku.

Preporuča se provedba barem dva ciklusa popuštanja. Treći ciklus popuštanja koje se provodi u cilju popuštanja zaostalih napreznja može dati dodatan pozitivan učinak na mehanička svojstva čelika.



Slika 16. Općeniti prikaz hodograma toplinske obrade popuštanja za alatne čelike marke BÖHLER [7]

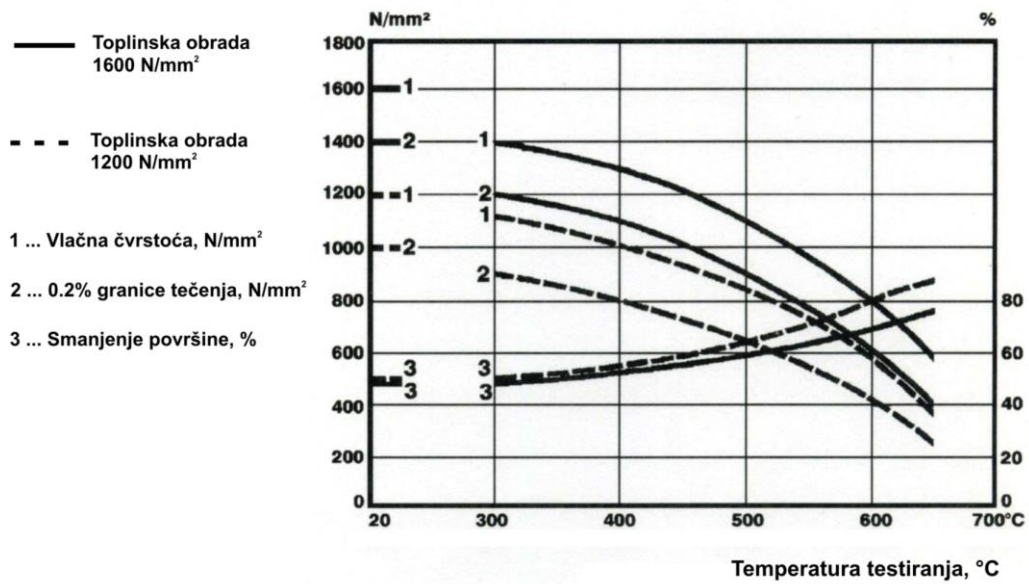


Slika 17. Dijagram Tvrdoća - Temperatura popuštanja za čelik BÖHLER W300 [7]

Dijagram sa slike 17. vrijedi za kvadratne uzorke od 50 mm, na kojima se prethodno proveo postupak otvrđivanja na temperaturi od 1020 °C.

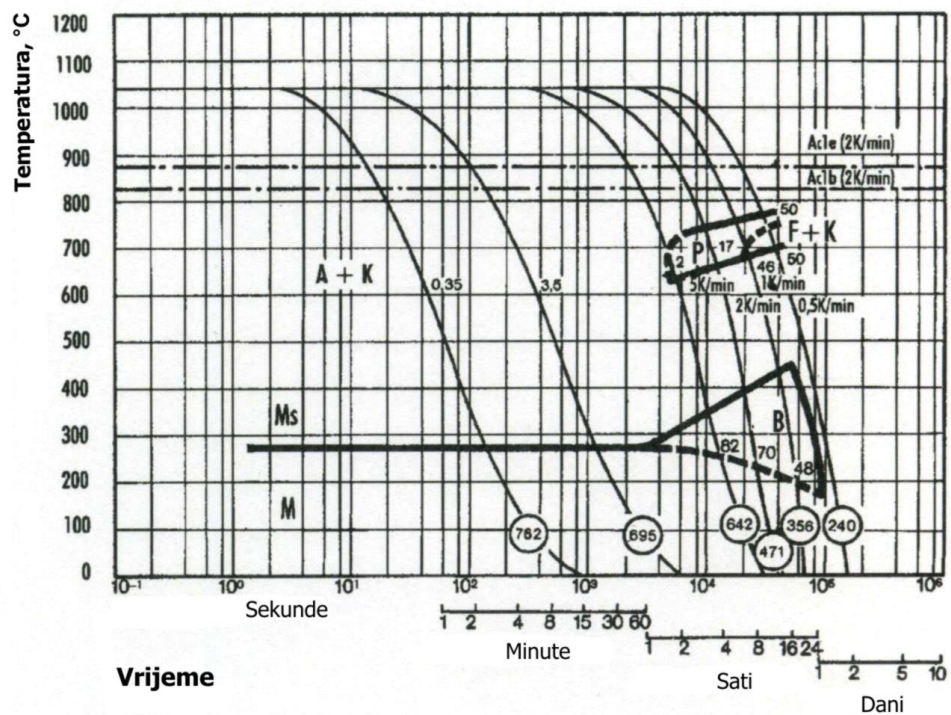
Tablica vrijednosti: Temperatura popuštanja (°C) / Tvrdoća (HRC)

400 °C	500 °C	550 °C	600 °C	650 °C	700 °C
53	54	52	48	38	30



Slika 18. Dijagram Čvrstoća - Temperatura za čelik BÖHLER W300 [7]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
0,39	0,97	0,43	0,015	0,006	5,01	1,14	0,21	0,35



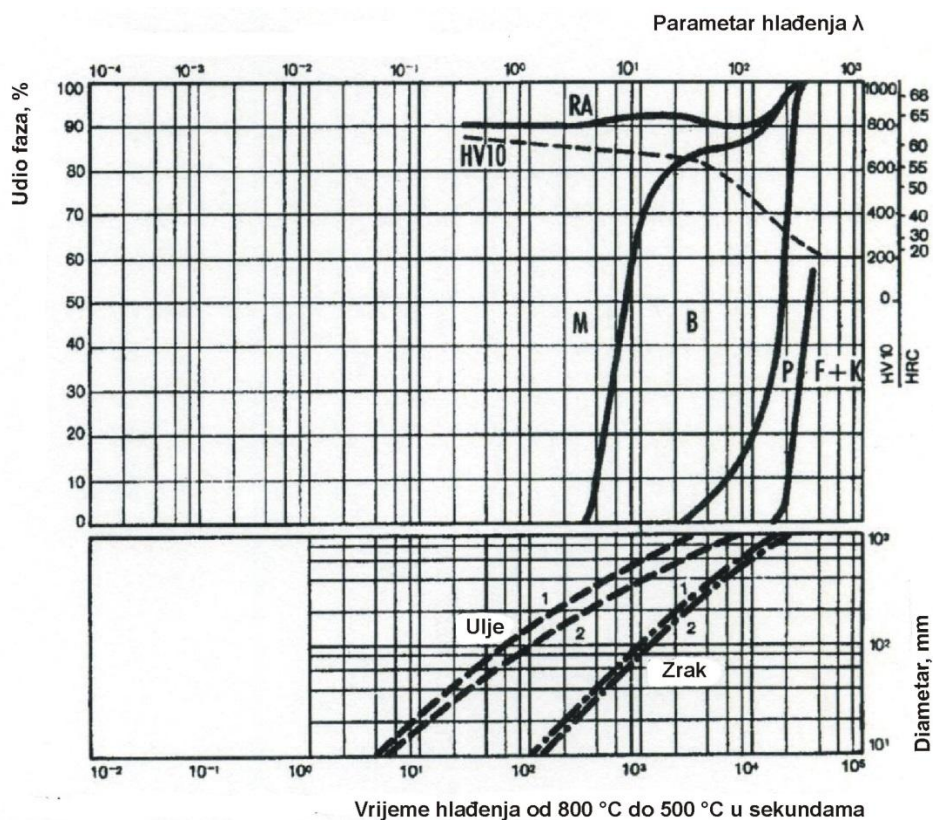
Slika 19. CCT (Continuous Cooling Transformation) dijagram za čelik BÖHLER W300 s prosječnim kemijskim sastavom (%) [7]

Prikazani CCT dijagram vrijedi za sljedeće parametre:

- **temperatura austenitizacije** : 1030 °C,
- **vrijeme držanja** : 15 minuta,
- *vrijednosti od 2 do 82*: postoci udjela faza,
- *vrijednosti u zaokruženim poljima*: tvrdoća u Vickers - ima (HV),
- *vrijednosti od 0.35 do 3.5*: rashladni parametar λ ; vrijeme na apscisi se odnosi na period hlađenja sa 800 na 500 °C u $s \times 10^{-2}$,
- *vrijednosti od 5 do 0.5 K/min*: brzina hlađenja za temperaturno područje od 800 do 500 °C.

Oznake slovima su redom:

A – Austenit, **B** – Beinit, **F** – Ferit, **K** – Karbid, **M** – Martenzit, **P** – Perlit, **RA** – ostatni austenit (**R**etained **A**ustenite).



Slika 20. Dijagram udjela faza za čelik BÖHLER W300 [7]

Brojčane oznake 1 i 2 u gornjem dijagramu označavaju POVRŠINU (1) odnosno JEZGRU (2) uzorka.

NITRIRANJE

BÖHLER W300 čelik je pogodan za nitriranje, bilo da se radi o dušičnim kupkama ili plinskim atmosferama.

POPRAVCI ZAVARIVANJEM

Postoji općenita tendencija alatnih čelika razvijanju pukotina nakon zavarivanja. Ukoliko se zavarivanje ne može izbjeći, upute za ispravan odabir i provođenje tehnologije zavarivanja su ključne. Također, izbor dodatnog materijala elektrode treba izvršiti prema uputama proizvođača.

Mehanička svojstva čelika marke BÖHLER na povišenim temperaturama ponešto se razlikuju. Na slici 22, pored usporedbe mehaničkih svojstava, dat je uvid i u različite sposobnosti obradivosti ovih čelika.

BÖHLER OZNAKA	Čvrstoća pri povišenim temperaturama	Žilavost pri povišenim temperaturama	Otpornost na trošenje pri povišenim temperaturama	Obradivost
BÖHLER W100	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W300 ISODISC®	Red	Red	Red	Red
BÖHLER W300 ISOBLOC®	Red	Red	Red	Red
BÖHLER W302 ISODISC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W302 ISOBLOC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W303 ISODISC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W303 ISOBLOC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W320 ISODISC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W321 ISODISC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W360 ISOBLOC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W400 VMR®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W403 VMR®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W500	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W705	Orange	Orange	Orange	Orange

Slika 22. Usporedni dijagrami mehaničkih svojstava čelika W300 i ostalih vrsta alatnih čelika marke BÖHLER [7]

Napomena. Ova usporedna tablica može poslužiti za lakši odabir odgovarajuće vrste čelika; pri tome ne uzima u obzir različite uvjete naprezanja koji postoje pri različitim uvjetima uporabe.

3.3 Analiza uzoraka čelika iz alata korištenog u proizvodnom procesu tvornice

Iz alata sa slike 7 izrezana su tri uzorka materijala predviđena za kemijsku analizu i metalografska ispitivanja.



Slika 23. Prikazi mjesta uzimanja uzoraka s alata i izrezanih uzoraka

Prikazani alat ima oznaku TL - 7687/5 i poziciju 863.83 u organizacijskoj shemi alata i strojeva u tvornici. Prema podacima iz tvornice, materijal alata je čelik BÖHLER W300.

Jedan od dva izrezana rubna uzorka prema slici poslat je na kemijsku analizu na Tehnički Fakultet u Rijeku (Zavod za materijale). Također, na kemijsku analizu poslat je i središnji uzorak materijala (slika 24), na kojem je izvršen postupak TIG navarivanja s jedne strane te postupak elektro - metalizacije s druge strane, prema metodologiji koja se provodi u tvornici.



Slika 24. Prikaz središnjeg uzorka materijala sa sprovedenim postupcima popravaka: 1) TIG navarivanjem, 2) elektro - metalizacijom

Drugi rubni uzorak materijala predviđen je za metalografsku analizu i ispitivanje tvrdoće.

Rijeka, 17. 07. 2013.

REZULTATI KEMIJSKE ANALIZE

U tablici 1 prikazani su rezultati kemijske analize dostavljenog uzorka 1 čelika DIN X38CrMoV51.

U tablici 2 prikazani su rezultati kemijske analize osnovnog materijala dostavljenog uzorka 2.

Osnovni materijal je čelik DIN X38CrMoV51.

U tablici 3 su prikazani rezultati kemijske analize navarenog sloja dostavljenog uzorka 2. Sloj je navaren žicom dodatnog materijala UTP A73 G3 tvrdoće 45-50 HRC i UTP A73 G4 tvrdoće 38-42 HRC.

Tablica 1. Rezultati kemijske analize dostavljenog uzorka 1

	Maseni udio/%							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
Uzorak	0.42	1.10	0.36	0.007	0.005	5.03	1.11	0.39
Propisani kemijski sastav čelika DIN X38CrMoV51	0.36- 0.42	0.90- 1.20	0.30- 0.50	≤ 0.030	≤ 0.030	4.80- 5.50	1.10- 1.40	0.25- 0.50

Tablica 2. Rezultati kemijske analize osnovnog materijala čelika EN X38CrMoV51 dostavljenog uzorka 2

	Maseni udio/%							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
Uzorak	0.42	1.08	0.36	0.006	0.005	4.91	1.12	0.39
Propisani kemijski sastav čelika DIN X38CrMoV51	0.36- 0.42	0.90- 1.20	0.30- 0.50	≤ 0.030	≤ 0.030	4.80- 5.50	1.10- 1.40	0.25- 0.50

Tablica 3. Rezultati kemijske analize navarenog dodatnog materijala dostavljenog uzorka 2

	Maseni udio/%									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
Uzorak	0.30	0.96	0.41	0.012	0.006	0.25	8.57	1.09	0.30	0.10

Slika 25. Rezultati kemijske analize uzorka iz tvornice LTH - Tehnički fakultet Rijeka

Po utvrđenom kemijskom sastavu alata iz tvornice, pristupilo se laboratorijskoj analizi uzorka pri Zavodu za strojarску tehnologiju (FESB) u Splitu.

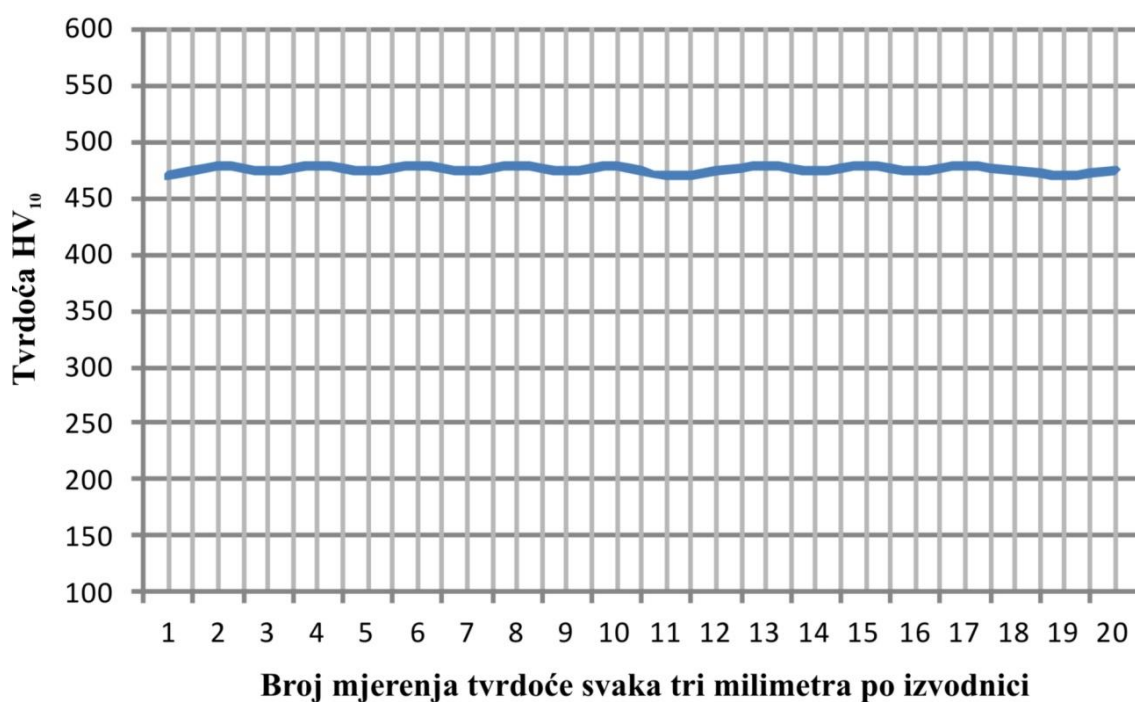
Mjerenje tvrdoće je provedeno po rubu uzorka alata na kojem se nije vršilo odrezivanje od ostatka materijala uzorka, odnosno nije bio prisutan unos topline prilikom rezanja koji bi mogao utjecati na strukturu materijala, a tim i na mehanička svojstva. Mjerenje tvrdoće provedeno je metodom VICKERS, sa silom utiskivanja od oko 10 kp (98.1 N).

Tvrdoća je mjerena i po središnjici i suprotnom rubu uzorka. Nisu primjećena ni najmanja odstupanja izmjerenih vrijednosti tvrdoće od onih navedenih u tablici i dijagramu.

Prosječna izmjerena vrijednost iznosi **473.3** HV₁₀ odnosno **46** HRC.



Slika 26. *Uzorak čelika iz tvornice LTH za metalografsku analizu i ispitivanje tvrdoće*



Broj mjerenja tvrdoće	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tvrdoća HV ₁₀	468	478	473	478	473	478	473	478	473	478

Broj mjerenja tvrdoće	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tvrdoća HV ₁₀	468	473	478	473	478	473	478	473	468	473

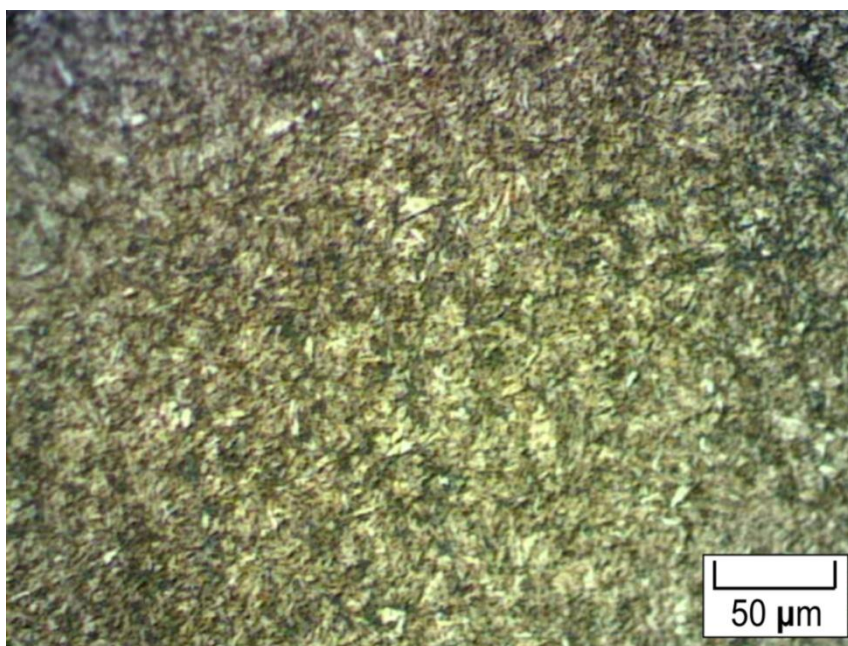
Po izmjerenoj tvrdoći, rubni uzorak alata obrušen je na kliznoj stazi uređaja za brušenje uzoraka HANDIMET. Uzorak je brušen na vodom hladenoj kliznoj stazi uređaja po brusnom papiru finoće 600. po završenom procesu brušenja, uzorak je poliran suspenzijom vode i glinice srednje finoće (aluminij – oksid Al_2O_3), na rotacionom kolu za poliranje s čohom (filcom).

Površina uzorka potom je izložena djelovanju NITALA (3% - noj otopini dušične kiseline u alkoholu) tijekom iskustveno određenog vremena, u cilju razvijanja mikrostrukture.

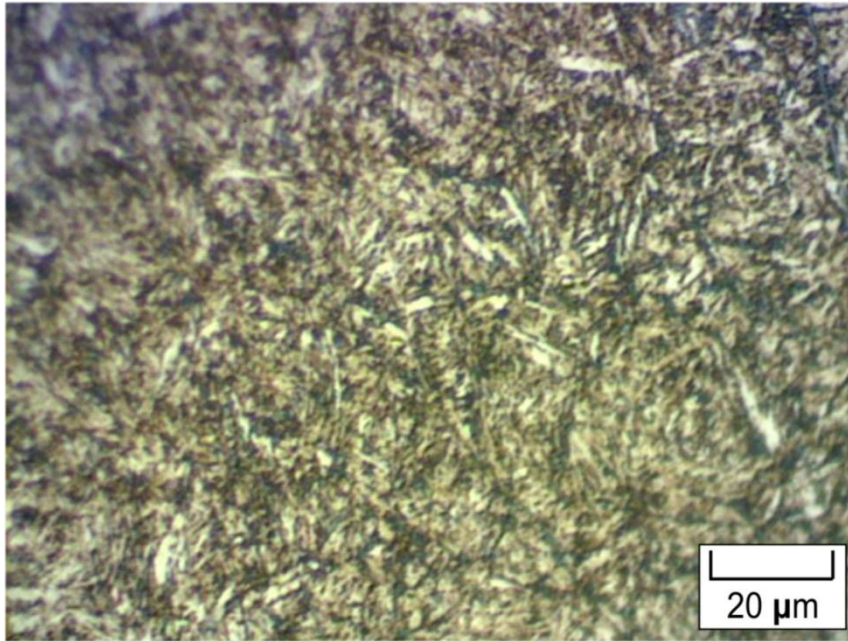


Slika 27. *Laboratorijska oprema za metalografsku analizu uzoraka - FESB Split*

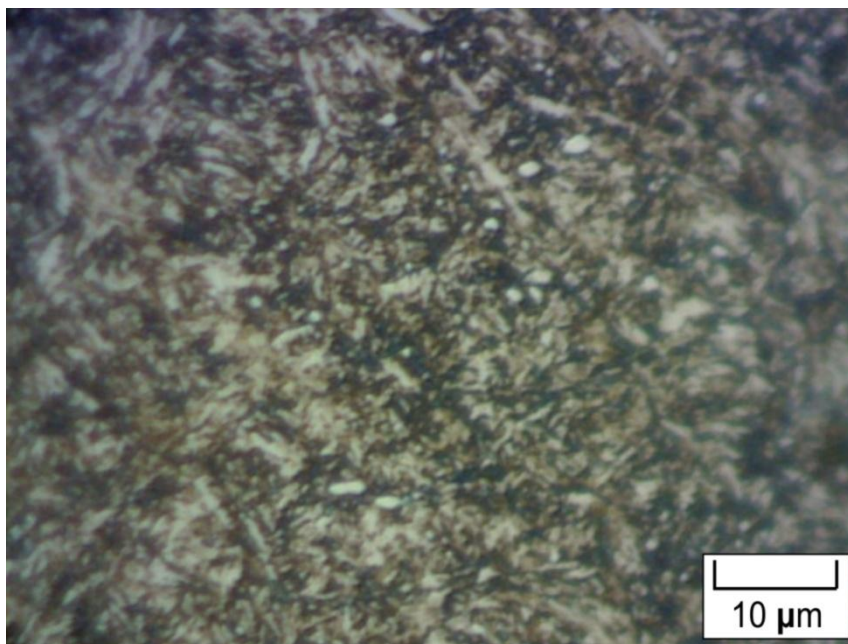
Mikrostruktura uzorka analizirana je pod svjetlosnim mikroskopom OPTON Axioskop pod različitim povećanjima. Karakteristične slike mikrostrukture odabrane su i dokumentirane uz pomoć DinoEye digitalne kamere ugrađene na mikroskop i povezane preko USB sučelja s računalom i software – om za analizu slike.



Slika 28. *Metalografska slika uzorka čelika iz tvornice LTH (povećanje 200x)*



Slika 29. Metalografska slika uzorka čelika iz tvornice LTH (povećanje 500x)



Slika 30. Metalografska slika uzorka čelika iz tvornice LTH (povećanje 1000x)

Metalografske slike prikazuju pretežito martenzitičnu strukturu s udjelom finih karbida legirnih elemenata kroma i vanadija. Sudeći po izmjerenoj tvrdoći uzorka od 46 HRC – a, čelik je nakon kaljenja najvjerojatnije prošao, prema standardu, postupak toplinske obrade trostrukog popuštanja.

Naime, čelici ovog tipa po završenom procesu kaljenja uz dobiveni martenzit zadržavaju i određenu količinu zaostalog austenita [8]. Kada započne proces popuštanja, pritisak na

preostali austenit popusti čim tetragonalni martenzit prijeđe u kubni. Daljnjim popuštanjem zaostali austenit moći će modificirati rešetku. Odvijanje ovih pojava pri popuštanju čelika može se registrirati i promjenom volumena zakaljenog čelika, koji sadrži i austenit i martenzit. Volumen u početku opada, jer jako izvitopereni tetragonalni martenzit prelazi u pravilniji kubni martenzit. Potom volumen raste, jer oslobođen pritiska, austenit prelazi u kubni martenzit (u raspored manjeg stupnja gustoće).

U konačnici, volumen nastavlja padati, jer se kubni martenzit oslobađa ugljika. Tvorničkim se višestrukim popuštanjem osiguravaju optimalna svojstva tvrdoće i čvrstoće čelika uz maksimalnu eliminaciju zaostalih naprezanja u čeliku nastalih uslijed kaljenja. Ciklusa popuštanja može biti i više, ali su se optimalna (tražena) svojstva čelika po tvorničkim standardima, postigla već nakon tri ciklusa.

Legiranje molibdenom ovih čelika sprječava pojavu *krhkosti popuštanja* [8]. Naime, kod legiranih čelika koji sadrže dušik, moguće je nastajanje ove pojave, ukoliko se čelici nakon popuštanja sporo hlade. Krhkost popuštanja nastaje ako se popuštanje vrši iznad 500 °C, gdje feritna rešetka pokazuje veću sklonost razlaganju dušika. Sporim hlađenjem on se ponovno izlučuje iz te rešetke u formi fino raspršenih tvrdih nitrida što znatno obara žilavost čeliku.

Molibden, po teoriji, vezuje dušik u obliku svojih nitrida i ne dozvoljava njegovo rastvaranje u rešetki željeza a time i naknadno još nepovoljnije izlučivanje željeznih nitrida.

3.4 Usporedba standardnog i uzorkovanog materijala alata

Po obavljenoj kemijskoj, mehaničkoj i metalografskoj analizi uzoraka iz tvornice LTH, može se izvršiti usporedba navedenih materijala.

Naime, kemijska analiza upućuje na zaključak da je analizirani alat iz tvornice LTH **nedvojbeno** izrađen iz čelika za rad u toplom stanju marke BÖHLER W300.

Izvršena mjerenja tvrdoće uzorka iz tvornice LTH dala su podatak o prosječnoj tvrdoći od **473.3** HV₁₀ odnosno **46** HRC - a, što upućuje na zaključak da je stanje isporučenog alata s navedenom radnom tvrdoćom jednako onome koje propisuje standard. Naime, prema standardu, nakon otvrdnjavanja čelika, provodi se popuštanje u tri slijeda na tri različite temperature s iskazanom svrhom popuštanja za svaki slijed posebno. To je prikazano na hodografu toplinske obrade (slika 16), upravo za čelik BÖHLER W300.

Prema hodografu toplinske obrade i prema dijagramu tvrdoće nakon popuštanja za ovaj čelik (slika 17), očekivana radna tvrdoća je **46 HRC**.

Na zaključak da su ova mjerenja relevantna i da radna tvrdoća ovog čelika doista može imati vrijednost oko 46 HRC, upućuje niz radova i studija [9] [10] [11] koje se bave problematikom izbora materijala i parametara tlačnog lijevanja. Naime, studije navode toplinsku obradu popuštanja upravo ovog čelika u tri slijeda nakon otvrdnjavanja prema standardu, s temperaturama popuštanja koje se ponešto i razlikuju, ali ne znatno. Razlike u pojedinim temperaturama popuštanja mogu se pripisati neznatnim razlikama u šarži ili kemijskom sastavu obrađivanog alata, ali konačni rezultati toplinske obrade nedvojbeno nude isti red veličine konačne, radne tvrdoće od 45.5 – 46 HRC.

Provedena metalografska analiza uzorka potvrđuje dobivene rezultate tvrdoće. Do određene mjere formirana martenzitična struktura, s određenim udjelom karbida, kako je već pojašnjeno, upućuje na poboljšanu strukturu čelika s očekivanim redom veličine tvrdoće iznad 45 HRC.

3.5 Definiranje triboloških mehanizama i slučajeva trošenja alata tijekom procesa tlačnog lijevanja u tvornici

Tijekom proizvodnog procesa u tvornici LTH, na alate za tlačno lijevanje utječe niz radnih parametara, koji smanjuju vijek trajanja alata i direktno djeluju na proizvodni proces; čineći ga složenijim, zahtjevnijim za analizu i kompleksnijim pri održavanju na optimalnom proizvodnom nivou.

Od prije prepoznati i spomenuti parametri relevantni u ovim primjerima trošenja su: kinetička energija taline pri ulazu u kalupe, kut ulaza taline u kalupe, temperaturne varijacije i dilatacije te kemijski sastav materijala kalupa i taline (legure aluminijske).

No, sami mehanizmi koji djeluju u ovom slučaju, a rezultat su sinergijskog djelovanja prethodno spomenutih parametara lijevanja su sljedeći:

- **umor površine,**
- **erozija kapljevnom.**

Evidentno je da do oštećenja alata za lijevanje aluminijskih legura pod tlakom dolazi uslijed sprega različitih opterećenja koja se pojavljuju istovremeno tijekom procesa lijevanja. Konstrukcija kalupa (alata), odabir materijala alata i toplinski umor materijala uslijed cikličkog procesa rada doprinose nastanku pukotina na njegovoj površini. Također, niske početne temperature, kao i nehomogenost temperatura alata utječe na njegovo popuštanje (nastajanje pukotina) tijekom vremena. Umor površine alata očituje se nastajanjem toplih pukotina, velikih pukotina ili krhkog loma na površini alata izloženoj talini i pripadajućim parametrima lijevanja. Popuštanje (pucanje) materijala može se uočiti ili očekivati u prvom redu na kutovima alata složene geometrije; oštrim radijusima ili rubovima alata (**slike 6 do 9**).

Na smanjenje učinka erozije kapljevnom često nije dovoljan samo primjereno odabran osnovni materijal alata. Da bi se postigla odgovarajuća otpornost na eroziju kapljevnom, provodi se još i dodatna zaštita od trošenja **postupcima modificiranja površine** (npr. termokemijskim postupcima) o kojima će biti riječi u narednom poglavlju.

Nije nepoznanica da tople pukotine predstavljaju jedan od glavnih uzroka smanjenja postojanosti alata pri tlačnom lijevanju. Brojne su studije i stručni radovi objavljeni na tu temu ^[8] u cilju istraživanja te pojave i iznalaženja rješenja bilo u smislu monitoringa procesa i istraživanja uzroka nastajanja toplih pukotina ili iznalaženja i testiranja relevantnih tehnoloških parametara pri popravcima alata oštećenih ovim mehanizmima. Na neke od parametara može se utjecati stečenim znanjem i iskustvom stručnjaka za tehnologiju lijevanja pod tlakom, barem do određene mjere. To su:

- konstrukcija i oblikovanje alata,
- izbor materijala alata i toplinska obrada,
- završna obrada površine alata,
- primjena alata u radu te način rukovanja i održavanja.

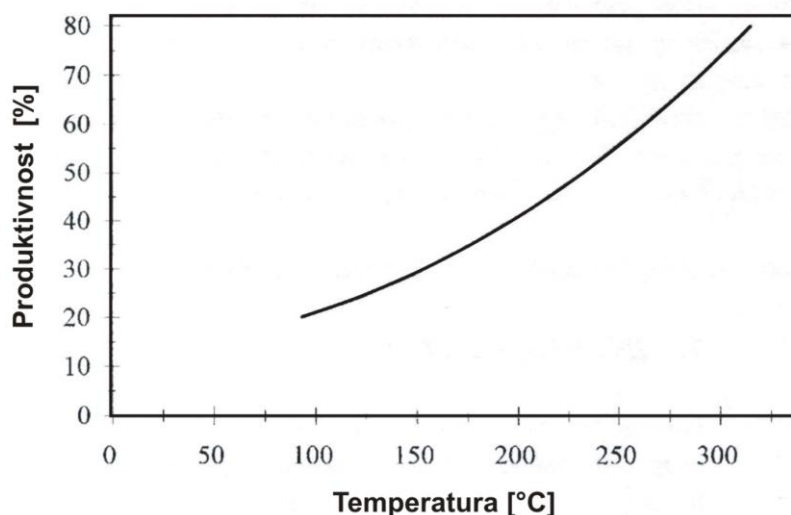
Još jedan vrlo važan parametar na koji se može utjecati, te ga treba posebno izdvojiti u ovom razmatranju, jest **proces i temperatura predgrijavanja** alata prije procesa lijevanja.

Naime, pri udaru vruće rastaljene aluminijske legure na površinu alata (u slučaju tvornice LTH, te temperature iznose 690 ± 20 °C), alat se najprije širi, a potom uslijed hlađenja skuplja. Te temperaturne dilatacije i oscilacije se periodički ponavljaju tijekom rada dinamikom zadanom samim procesom lijevanja.

Toplina se tijekom lijevanja provodi i unosi u unutarnji dio alata. Veća razlika između temperature alata i vruće aluminijske taline koja se ubrizgava u alat generira veće širenje i skupljanje površine alata, odnosno brži nastanak toplih pukotina. Cikličko ponavljanje procesa dodatno ubrzava njihov nastanak, kao i njihovu propagaciju.

Naprezanja na površini alata su, dakle, obrnuto proporcionalni temperaturi alata, što ukazuje na mogućnost i potrebu grijanja alata pri radu koliko god je to u praksi moguće ili ekonomski isplativo.

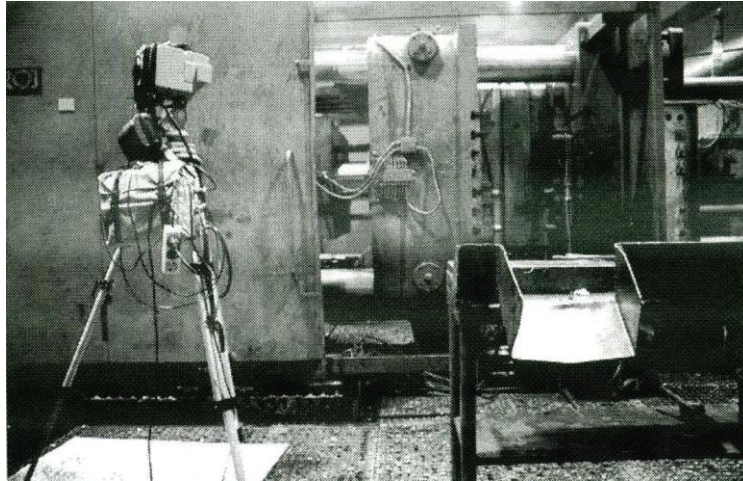
Neke studije upućuju na povećanje temperature predgrijavanja alata za gotovo 20%; s nekih 260 na 315 °C. Iskustva iz prakse pokazuju da povećanje radne temperature alata s 205 na 315 °C može povećati proizvodnu stopu alata za **dva puta** [12].



Slika 31. Dijagramski prikaz produktivnosti kao funkcije radne temperature alata [12]

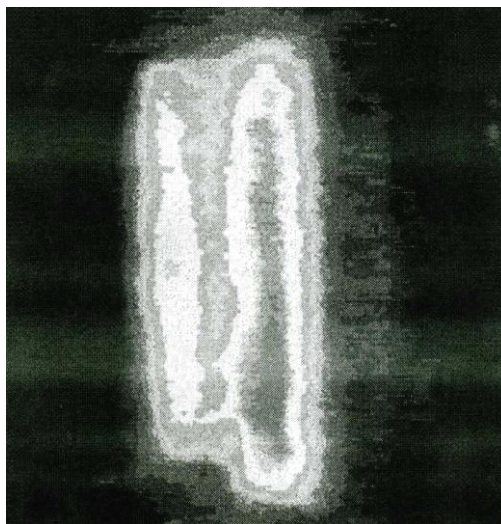
Važno je kazati da su navedena ispitivanja provedena upravo na alatnom čeliku za rad u toplom stanju iz serije **BÖHLER – W300 ISODISC**, praktički iste vrste i jednakog kemijskog sastava kao što je promatrani čelik iz primjera tvornice LTH; (0.38 %C, 1.1 %Si, 0.4 %Mn, 5.0 %Cr, 1.3 %Mo, 0.4 %V).

Na aktivnoj radnoj plohi fiksnog dijela alata provedena su **termografska mjerenja** za vrijeme procesa predgrijavanja alata. Mjerenja su vršena na dijelu relativno jednostavne geometrije izabranog alata, tako da je i analiza termografskih slika također bila jednostavna, a opet relevantna.



Slika 32. *Položaj termografske kamere za vrijeme mjerenja* [12]

Termograf na sljedećoj slici prikazuje temperaturni interval između 90 i 161 °C. Svjetlije plohe prikazuju područja viših temperatura.



Slika 32. *Termograf početnog temperaturnog polja na aktivnoj radnoj površini fiksnog dijela alata* [12]

Dobiveni termografi posvjedočili su procesu predgrijavanja alata i ukazali na važne i uporabljive podatke za razvoj novih alata prema više kriterija kao i za poboljšanja postojećih alata.

Ovakav tip mjerenja i ispitivanja uvelike doprinosi i samoj provjeri procesa lijevanja pod tlakom.

Uzimajući veliki broj parametara lijevanja u razmatranje, kao i prepoznate slučajeve trošenja alata, posjedovanje zapisa poput termografa može biti ključno pri donošenju odluka o rekonstrukciji geometrije alata ili načina predgrijavanja, ukoliko se zahtijevani parametri intenziteta i homogenosti temperaturnog polja alata ne mogu postići s postojećim alatima ili procesima.

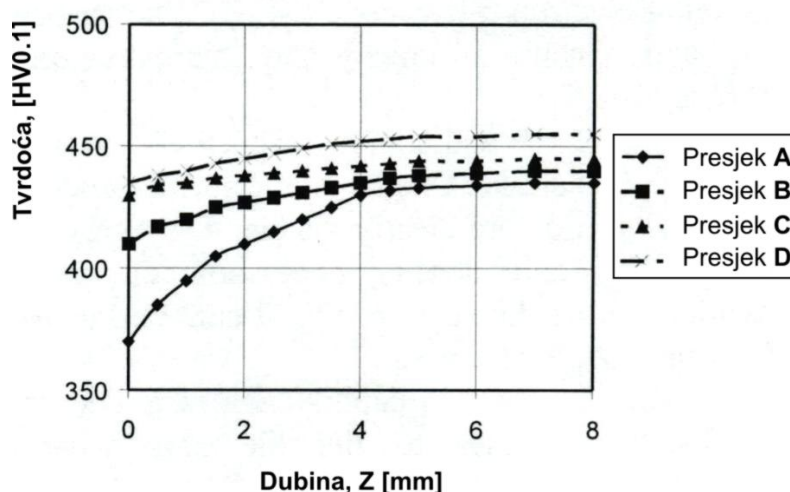
Na primjeru alata iz tvornice LTH, mjerenja tvrdoće pokazuju da nije došlo do smanjenja tvrdoće i čvrstoće alata pri njegovoj površini. Razloga za to može biti više.

Naime, na tom mjestu alat nije bio u direktnom i kontinuiranom doticaju s talinom tijekom cikličkog odvijanja procesa lijevanja, pa nije došlo do popuštanja materijala i smanjenja tvrdoće uslijed učinka temperaturnog šoka.

Nadalje, ukoliko mehanizama trošenja nije bilo na ispitivanom mjestu, materijal alata je bio dovoljno postojan da izdrži temperaturne dilatacije tijekom procesa lijevanja bez efekta na površinsku tvrdoću. U konačnici, to je vjerojatno i razlog nepromijenjenih vrijednosti tvrdoće u odnosu na površinsku tvrdoću standardno isporučenog materijala za ovu namjenu, jer prema od prije spomenutim podacima iz tvornice, ne radi se o novom alatu. To se može zaključiti i iz **slike 7**, gdje je i prikazan navedeni alat iz kojeg su uzeti uzorci za analizu i gdje se na određenom presjeku jasno vide oštećenja nastala tijekom radnih ciklusa.

Neke studije, s druge strane, vrlo jasno ukazuju na fenomen smanjenja tvrdoće površine alata tijekom rada. Studija [9] koja se bavi analizom upravo ovog materijala alata za tlačno lijevanje (**AIISI H11**) pri efektima trošenja navedenih i u mnogo čemu sukladnih kao u primjeru tvornice LTH, navodi drugačije rezultate izmjerene tvrdoće po površini materijala.

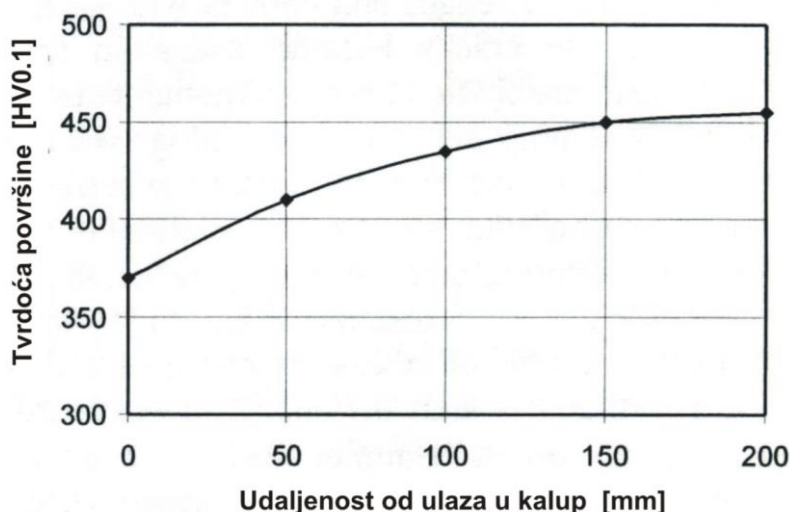
Presjek	Udaljenost od ulaza u kalup [mm]
A	~ 0 - 50
B	~ 50 - 100
C	~100 - 150
D	~150 - 200



Slika 33. Dijagram ovisnosti tvrdoće i dubine na različitim pozicijama kalupa [9]

Ovisno o mjestu dodira alata i taline tijekom procesa lijevanja (udaljenosti od mjesta ulaza taline u kalup), te učinka vruće taline na materijal kalupa s gledišta navedenih mehanizama trošenja, tvrdoća i postojanost alata pada do određenih vrijednosti.

Legura koja se koristi pri procesu tlačnog lijevanja opisanog u radu je **AlMg2**, temperature lijevanja od 740 ± 10 °C. Alati su hlađeni vodom i uljem koji cirkuliraju rashladnim kanalima kalupa. Temperature predgrijavanja alata variraju od 180 do 250 °C, ovisno o tome da li se radi o vanjskom ili unutarnjem presjeku alata. Naravno, prije svakog ciklusa lijevanja, kalupi se podmazuju s mazivima poznatog sastava, karakterističnim za primjenu pri ovoj tehnologiji lijevanja. Tlakovi lijevanja u ovom slučaju znose 1090 ± 40 bara.



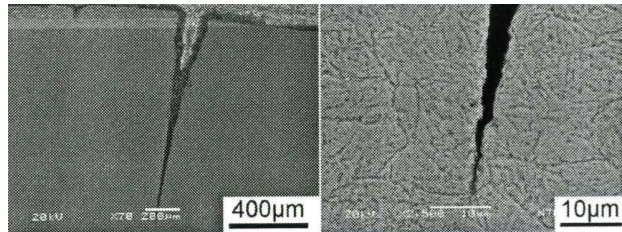
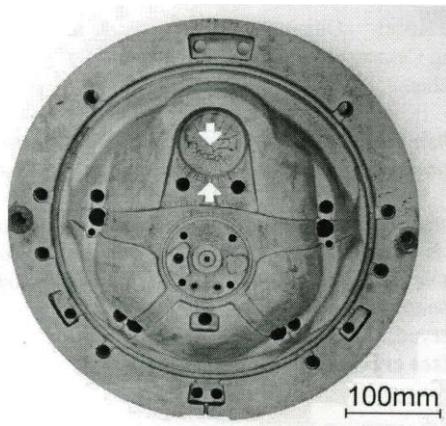
Slika 34. Dijagram ovisnosti tvrdoće površine i udaljenosti od mjesta ulaza taline u kalup [9]

Struktura materijala alata pri površini se postupno popušta budući se nalazi u kontaktu s talinom temperature oko 740 °C. Visoka temperatura taline uzrokuje popuštanje martenzitne strukture što je popraćeno padom tvrdoće. Tvrdoća je najmanja na površini na mjestima ulaza taline u kalup gdje se iz tog razloga može očekivati i najveća gustoća nastajanja toplih pukotina.

Kako se može zaključiti iz podataka dobivenih iz standarda za ovaj čelik, a što i potvrđuju dobiveni eksperimentalni podaci iz ove studije, tvrdoća čelika opada pri temperaturama iznad 500 °C, kojima su ovi alati i izloženi. Naime, tvrdi tetragonalni martenzit transformira se uslijed migracija atoma ugljika u mekši kubni martenzit. Seljenje atoma ugljika posljedica je zagrijavanja koje nadilazi energiju aktivacije, odnosno difuzije atoma ugljika. Nadalje, na temperaturama iznad 500 °C, zrnasta struktura karbida kroma, molibdena i volframa se pogrubnjuje što također znatno utječe na smanjenje tvrdoće.

Jasno, smanjenje tvrdoće (u ovom slučaju sa početnih 46 na 38 HRC), doprinosi nastanu **toplih pukotina** i njihovoj propagaciji. Naravno, s tvrdoćom opada i čvrstoća materijala pri površini, pa uslijed toplinskog zamora koji na površini postaje sve veći, toplinsko – mehanička naprezanja prelaze granicu elastičnosti materijala i generiraju nastanak plastičnih deformacija. To vodi do lokalnog popuštanja materijala i iniciranja nastanka pukotina.

Daljnji razvoj pukotina može biti ubrzan ulaskom i ispunjavanjem pukotina talinom tijekom procesa lijevanja, ili pak oksidacijom.



Slika 35. *Mjesta nastanka pukotina na pomičnom dijelu kalupa (lijevo), tipičan izgled toplih pukotina snimljenih SEM mikroskopom (desno) [9]*

3.6 Primjeri tehnologija popravka i poboljšanja alata

U tvornici LTH primjenjuje se nekoliko tehnologija popravaka alata spomenutih i opisanih u poglavlju 3.1. Svaka od navedenih tehnologija ima svojih prednosti i mana, ovisno o tome kakvi kriteriji se koriste pri njihovoj analizi.

Tehnologija popravka alata **TIG zavarivanjem** je, prema iskustvu inženjera iz tvornice, najzastupljenija tehnologija popravka alata u njihovom slučaju. Razlog leži u dobroj ekonomičnosti samog postupka te razmjerno kratkog perioda trajanja postupka, (popravljeni alat u međuvremenu nije u funkciji tzv. *down-time*), što ukazuje i na dobro uhodano i razmjerno brzo provođenje postupka.

U svijetu su danas razvijene još neke tehnologije koje se vrlo učinkovito primjenjuju i kod popravaka alata izrađenih od čelika AISI H11, odnosno čelika za alate za rad u toplom stanju koji po sastavu i stanju odgovaraju čeliku korištenom u tvornici LTH.

To su: **lasersko zavarivanje**, **TD postupak** (Termoreaktivno - Difuzijski postupak oblaganja alata vanadijevim karbidom), te oblaganje alata **PVD nanoprevlakama**.

PRIMJER 1.

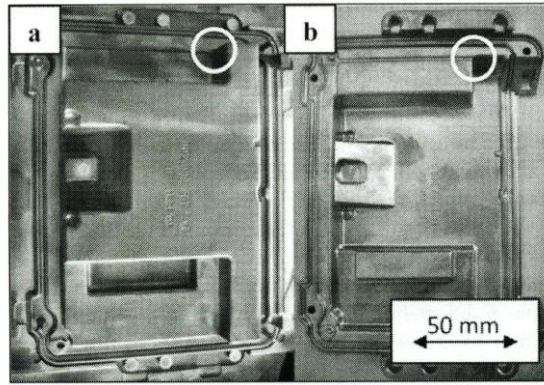
Lasersko zavarivanje. Za ovaj postupak vrijede već spomenute prednosti kod prvođenja popravaka alata primjerenim postupcima zavarivanja; uz to još treba dodati da je ekonomska učinkovitost ovog postupka popravka u odnosu na proizvodnju ili narudžbu novog alata njegova najveća prednost.

O učinkovitosti tehnologije zavarivanja laserom, kao tehnologije popravka alata, najbolje govori studija [10] koja se bavi provedbom postupka laserskog zavarivanja, monitoringom i usporedbom alata izrađenih upravo od čelika za rad u toplom stanju (DIN X38CrMoV5 -1 odnosno AISI H11), njihove otpornosti na trošenje po izvršenoj reparaturi u ovisnosti o broju radnih ciklusa.

Kalupi (alati) izrađeni od ovog čelika su podvrgnuti već poznatoj toplinskoj obradi trostrukog popuštanja (poznatih temperatura), u cilju postizanja već poznate radne tvrdoće od 46 HRc – a.

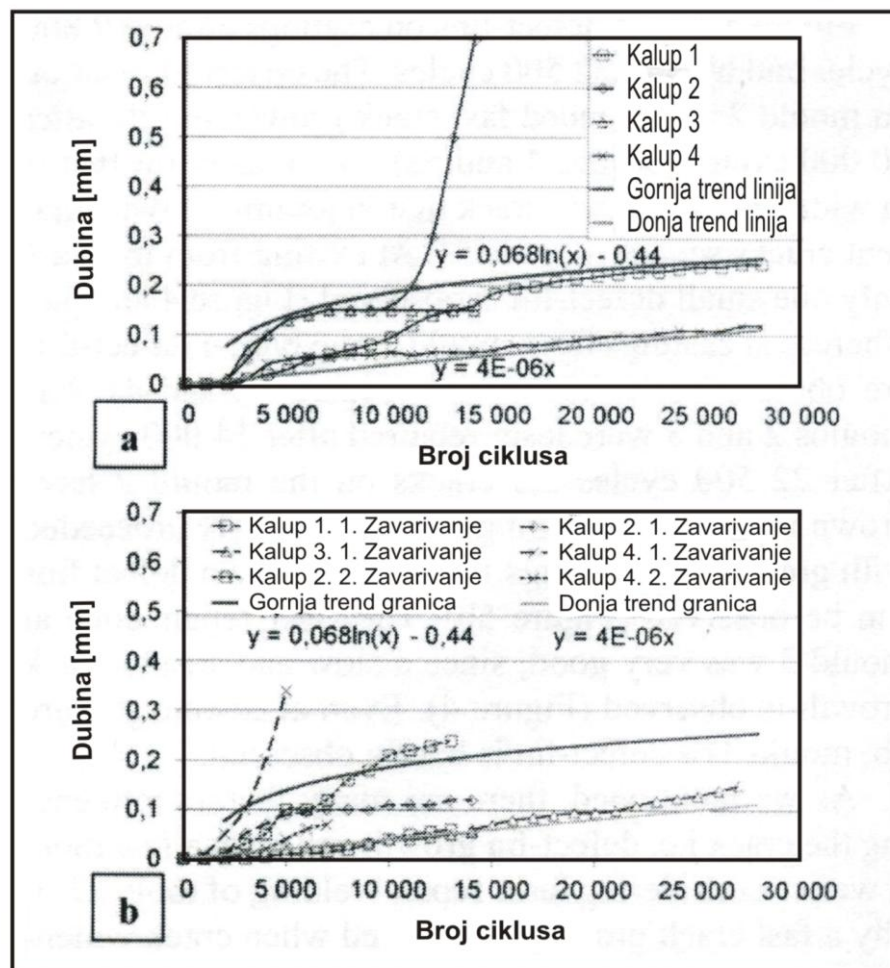
Kalupi su dio uređaja za tlačno lijevanje s hladnom komorom gdje se postižu tlakovi lijevanja od 500 bara. Legura aluminijska koja se koristi pri procesu lijevanja je AlSi9Cu3 i injektira se u kalupe pri temperaturi taline od 680 °C. Temperatura predgrijavanja kalupa iznosi 200 °C.

Po definiranju i utvrđivanju mjesta s nastalim oštećenjima na kalupu, pristupa se čišćenju i pažljivo praćenom, temeljitom mehaničkom odstranjivanju pukotina laserskim žlijebljenjem. Spajanje materijala (zavarivanje) je provedeno opremom za pulsirajuće lasersko zavarivanje snage 200W (*Lasag Easy welder SLS CL 60*), s dodatnim materijalom – žicom 0.5 mm promjera i kemijskog sastava: 0.1 %C, 0.4 %Si, 0.6 %Mn, 6.5 %Cr i 3.3 %Mo. Uz korištenje primjerenih parametara zavarivanja navedenih u radu, zavarivanje je obavljeno, a navareni slojevi su potom ručno brušeni i polirani. Po završetku obrade, alati su ponovno montirani na stroj za tlačno lijevanje.



Slika 36. Kalup (a), i odljevak s označenim mjestima promatranja oštećenja i provedbe postupka popravka zavarivanjem (b) [10]

Nekoliko različitih primjera oštećenja i prema kriteriju kao na slici 36, uzeto je u obzir pri usporedbi rasta nastalih pukotina tijekom rada kod novih kalupa i kalupa na kojima je vršen popravak laserskim zavarivanjem.



Slika 37. Dijagram ovisnosti rasta pukotina i broja ciklusa za nove (a) i popravljane kalupe laserskim zavarivanjem (b) [10]

Na dijagramu na slici 37 označene su donja i gornja granica trenda rasta pukotina u ovisnosti o broju ciklusa s pripadajućim matematičkim jednadžbama odnosno zakonitostima kretanja krivulja. Granice trenda su vidljive na dijagramu *a* i *b*. Dijagram *a* vrijedi za nove a dijagram *b* za alate popravljane laserskim zavarivanjem. Pri konstrukciji dijagrama uzeto je u obzir više varijabli: materijal kalupa, toplinska obrada, parametri tlačnog lijevanja, konstrukcija kalupa i mjesto promatranja. Područje između donje i gornje granice trenda širenja pukotina predstavlja područje unutar kojeg će se, statistički promatrano, "dogoditi" najveći broj pukotina. Ako je stopa širenja pukotina bliža donjoj granici (liniji trenda), brzina širenja pukotina je sporija i kalupi traju dulje. Ako je brzina širenja pukotina veća, bliža je gornjoj granici (liniji trenda).

Ukoliko je brzina širenja vrlo velika i nadilazi gornju granicu, može se kazati da je nastupilo "spajanje" dviju pukotina u jednu.

Iz dijagrama se može zaključiti da primjereno provedeno lasersko zavarivanje može višestruko produljiti vrijeme trajanja kalupa, uz to se može ponoviti i više puta. Naravno, postupak laserskog zavarivanja treba biti proveden pravilno, u protivnom je vrijeme trajanja kalupa u radu veoma kratko.

Tehnologija popravka oštećenja kalupa od čelika za rad u toplom stanju (DIN X38CrMoV5 -1 odnosno AISI H11) laserskim zavarivanjem, pokazala se kao primjerena za uklanjanje površinskih nepravilnosti kalupa za tlačno lijevanje i time povećala radni vijek trajanja kalupa.

PRIMJER 2.

TD postupak (Termoreaktivno - Difuzijski postupak oblaganja alata vanadijevim karbidom). Ovaj postupak oblaganja razvijen je od strane *Toyota Motors Corporations Central R & D Laboratories* iz Japana u cilju rješavanja problema trošenja. TD postupak generira glatki, tanki i neprozirni sloj iznimno tvrdog vanadij karbida na površini čelika. Za razliku od difuzijskog stvaranja karbidnog sloja, postupak prevlačenja (oblaganja) se temelji na **supstratu** (osnovnom čeličnom materijalu) kao najvažnijem parametru koji utječe na formiranje karbidnog sloja.

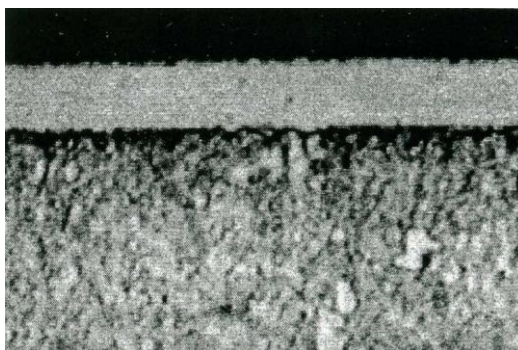
TD postupak iznesen i analiziran u radu [13] temelji se na metalurško – difuzijskoj vezi obloge za čelični supstrat. Bez obzira na tvrdoću ili glatkoću sloja obloge, učinak izostaje ukoliko obloga ne ostaje na alatu tijekom rada.

Postupak se provodi u solnoj kupki odgovarajućeg sastava i odgovarajuće visoke temperature (950 – 1050 °C), uz dodatak jednog od karbidotvornih elemenata (u ovom slučaju vanadija). Vanadij reagira na površini čelika s ugljikom koji je na visokim temperaturama procesa atomski rastvoren u austenitu, stvarajući veoma stabilan karbid V_8C_7 . Karbidni sloj raste na površini tijekom procesa difuzije ugljika iz površinskog sloja čelika prema karbidnom sloju, i kroz njega na novonastalu površinu gdje reagira s karbidotvornim elementom. Istovremeno, mala količina karbidotvornog elementa difundira kroz nastali karbidni sloj u površinski sloj čelika.

Osim visoke temperature, stopa nastajanja karbidnog sloja u velikoj mjeri ovisi i o **kemijskom sastavu čelika**.

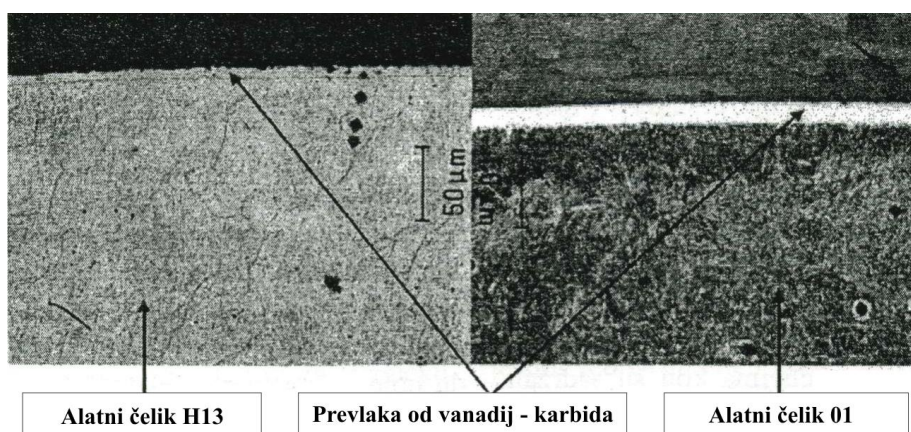
Nastali vanadij karbid ima kubnu rešetku visoke tvrdoće (3200 – 3800 HV). Ovim postupkom stvara se sloj koji se sastoji samo od karbida, bez vezivne faze, što žilavost

supstrata čini postojanom. Tako karbidom obloženi čelici pokazuju visoku tvrdoću površine, odličnu otpornost na trošenje, otpornost prema oksidaciji i koroziji ali i čvrstoću unutarnjeg sloja svojstvenu osnovnom materijalu.



Slika 38. Prikaz vanadirane površine alatnog čelika TD postupkom [13]

Nekolicina studija [13] provedena je na analizi učinka ovog postupka na alatne čelike različitih kemijskih sastava i različite primjene; za rad u hladnom stanju (hladno kovanje) ali i za rad u toplom stanju (toplo kovanje i lijevanje). Eksperimentima dokazan podatak da sloj vanadij karbida ima tvrdoću od **900 HV pri temperaturama od 800 °C** čini ovaj postupak značajnim za oblaganje alatnih čelika za rad u toplom stanju odnosno za rad alata u postupcima lijevanja. Tvrdoća od 900 HV je vrijednost viša od svih ostalih analiziranih tretiranih površina do sada pri ovim temperaturama. Pri hlađenju do sobne temperature, sloj vanadij – karbida dostiže vrijednost tvrdoće blizu prvobitne (3200 HV). Također, još jedan značajan razlog učinkovitosti ovog postupka oblaganja čeličnih alata za rad u toplom stanju (kalupa) jest da vanadij karbid **kemijski ne reagira** s aluminijem pri lijevanju aluminijskih legura. Ova obloga štiti kalupe od agresivne prirode aluminija i sprječava kemijske interakcije legura za lijevanje i kalupa.



Slika 39. Prikaz nanešenog sloja vanadij karbida na alatnim čelicima za rad u hladnom (AISI O1) i toplom stanju (AISI H13) [13]

Za adhezivne mehanizme, kao i za tribokorozivne mehanizme trošenja vanadij karbidni slojevi nanešeni reaktivnim spajanjem pokazali su se izvrsnim rješenjem. Sloj pruža dobru

zaštitu alatima korištenim i u radu s agresivnim medijima; od HCl – a do dodira s vrućom aluminijskom talinom.

Ovaj postupak bilježi sve veći porast u primjeni u industriji. Razlog za to leži u činjenici što su troškovi investiranja u potrebnu opremu relativno niski, dok su učinci s gledišta otpornosti na abraziju i tribokoroziju, kao i na produljenje radnog vijeka trajanja alata, veoma značajni.

PRIMJER 3.

PVD nanoprevlake. Napredne keramičke PVD obloge razvijane su upravo u cilju produljenja radnog vijeka čeličnih alata za rad u toplom stanju i povećanja njihove otpornosti na učinke erozije, korozije i umora uslijed toplinskih naprezanja.

Tehnologija se temelji na deponiranju (**PVD – Physical Vapor Deposition**) sloja nanostrukturirane **CrAlSiN** prevlake na osnovni materijal.

Studija koja analizira učinak ove tehnologije [11] koristi se metodologijom modificiranja kemijskog sastava povećanjem udjela određenih elemenata prevlake (kroma ili aluminij – silicij kombinacije) u cilju iznalaženja optimalnog udjela određenog elementa obloge za poboljšanje otpornosti na trošenje upravo **AISI H11** čelika za rad u toplom stanju.

Učinak se ispitivao i analizirao uranjanjem uzorka od obloženog čeličnog materijala u kupku rastaljene aluminijske legure. Kupka bi predstavljala simuliranu radnu atmosferu (visoko tlačno lijevanje) obloženih alata, uzimajući u obzir ključne parametre za određivanje stope istrošenosti. Tragovi istrošenja bi se otkrivali, promatrali i analizirali korištenjem nekoliko analitičkih metoda:

- SEM mikroskopija za morfološka istraživanja,
- Ispitivanje tvrdoće po Rockwell – u,
- Ispitivanje mikrotvrdoće uz pomoć uređaja Mitutoyo MVK – G1,
- difrakcija X – zrakama uz pomoć Siemens D5000 X difraktometra.

Uzorci čelika AISI H11 uzimaju se iz toplo valjane šipke. Potom se zagrijevaju na temperaturu austenitizacije od oko 1000 °C i kale u struju dušika pod tlakom od 5 bara. Nakon poznate toplinske obrade trostrukog popuštanja, uzorci imaju radnu tvrdoću od očekivanih **46 (45.5) HRC** - a.

Nanešeni sloj CrAlSiN obloge ne bi bio deblji od 3 µm. Višeslojna struktura prekrivala bi oko 50 % ukupne dubine sloja obloge uz dodatni monosloj definiranog kemijskog sastava. Priprema uključuje 6 različitih kemijskih modulacija vanjskog sloja ovisno o jakosti struje prilikom nanašanja i jačine struje dušika.

Analize su pokazale značajno poboljšanje radnih svojstava površine alata za tlačno lijevanje od čelika AISI H11 tretirane na ovaj način. Uz to, treba kazati da su se, po završenoj analizi, uzorci s većim udjelom kombinacije elemenata aluminij – silicij u navlaci u odnosu na udio kroma pokazali kvalitetnijim s obzirom na postojanost, tvrdoću i tribološka svojstva. Relativno veći udio kroma u navlaci pokazao se neučinkovitim u prevenciji stvaranja naslaga aluminijske taline na površini alata za tlačno lijevanje.

Prilikom provođenja analize i odabira primjerenog načina i tehnologija provođenja modifikacije površine materijala i poboljšanja njezinih svojstava, treba imati na umu više parametara. Pored navedenih utjecajnih faktora spomenutih ranije, ima ih još.

Jedan od njih je **tribološka kompatibilnost** [3] osnovnog materijala kalupa i materijala taline, čiji izostanak često zna biti uzrok prevelikog trošenja površinskih slojeva ili nastanak pukotina pri površini materijala kalupa uslijed neprikladnog rada u "paru".

Kao ocjenu otpornosti na adhezijsko trošenje materijala tribopara upravo može poslužiti njihova tribološka kompatibilnost. Ovo svojstvo je inače suprotno metalurškoj kompatibilnosti, odnosno svojstvu uzajamne topivosti metala u krutom stanju. U svrhu određivanja ovih važnih svojstava materijala pomaže RABINOWITZ – ova karta kompatibilnosti [2].

Pored tribološke kompatibilnosti, kao važnog svojstva osnovnog materijala kalupa i materijala taline, za metode modificiranja površine kalupa koje pritom koriste neke druge metalne materijale ili kemijske elemente (npr. krom, vanadij, volfram) u odnosu na osnovni materijal kalupa, treba provjeriti i **elektrokemijsku kompatibilnost i postojanost** elemenata u dodiru.

Naime, ovisno o radnoj atmosferi s kojom su kalupi s određenim elementima površinske modifikacije u dodiru, može doći do raspadanja oksida ili karbida koji po svom sastavu i strukturi spadaju u tvrde faze i učinkovito štite osnovni materijal kalupa od prevelikog trošenja. Do takvih pojava može doći bez obzira da li je osnovni materijal kalupa (sa ili bez izvršene toplinske obrade) ili modificirani površinski sloj (navlaka) izložena radnim uvjetima. Uz to, stabilnost ovih faza osjetljiva je na povišeni tlak, materijal i temperaturu taline, pa pod određenim uvjetima može doći do razlaganja i raspadanja faza. U tom smislu mogu poslužiti dijagrami iz atlasa elektrokemijske ravnoteže originalnog naziva "**Atlas of electrochemical equilibria**" autora Marcel Pourbaix – a. To su takozvani „Pourbaix – ovi dijagrami“ otpornosti, korozivnosti i pasivacije različitih kemijskih elemenata u uvjetima različitih (radnih) atmosfera.

4. Razvojne mogućnosti projekta

Ovaj projekt u svom djelokrugu, analitički promatrano, obuhvaća alate za proizvodni postupak tlačnog lijevanja koji se koriste pri strojevima s hladnom komorom. Po mnogo zajedničkih točaka, ovaj postupak se može usporediti s postupkom tlačnog lijevanja s toplom komorom.

Analiza mehanizama trošenja složen je i opsežan posao. Kako se može vidjeti na primjeru primjenjene tehnologije tlačnog lijevanja u tvornici LTH, veliki broj parametara utječe na rad alata (kalupa) za tlačno lijevanje.

Ovaj projekt se koncentrirao samo na jedan proizvodni sustav (stroj – alat), kakvih u tvornici ima više desetaka primjera. Činjenica jest da se dijelovi sustava (strojevi i alati), mogu usporediti po više zajedničkih točaka (parametri tehnologije lijevanja, tlakovi ulaza taline u kalupe, sile zatvaranja kalupa, kemijski sastav taline, temperatura predgrijavanja kalupa, itd.), što implicira mogućnost primjene nekih razmatranja i rezultata ovog projekta na više alata odnosno kalupa i strojeva.

Nije rijetkost da se u primjerima ovakvih proizvodnih sustava javlja potreba za izdvajanjem određenih strojeva ili alata iz svakodnevnih proizvodnih aktivnosti u cilju provođenja analiza i eksperimenata u realnim uvjetima. Autori studija i knjiga vezanih za tematiku ispitivanja trošenja alata i izbora materijala njihove izrade; (T. Filetin, M. Ashby i drugi), nerijetko ističu važnost ispitivanja izabranih modela i varijanti rješenja upravo – u eksploataciji.

Laboratorijska ispitivanja i analize ne mogu uvijek dati jednoznačna rješenja; praćenje djelova tribosustava u realnim radnim uvjetima u konačnici ipak daju najvrijednije informacije.

Jasno je da se odluka vlasnika proizvodnih sustava za ovakav model ispitivanja često lomi na visokim troškovima takve analize i nemogućnosti relevantnih instanci da se žrtvuje produktivnost tvornice u vrijeme provođenja ispitivanja u realnim uvjetima. Svako odstupanje od zadanog plana ispitivanja uslijed viših ciljeva unutar poslovne politike tvornice može stvoriti teškoće oko registriranja i mjerenja učinaka ispitivanja što pouzdanost dobivenih rezultata čini veoma niskom.

Ipak, konstrukcija uređaja ili naprave za simulaciju mehanizama trošenja predstavlja mogućnost sistematiziranog provođenja daljnjih ispitivanja i analize utvrđenih parametara trošenja alata. Ispravno konstruiranje i oblikovanje takve naprave omogućilo bi istraživanje ove problematike u širem smislu, pritom mijenjajući parametre lijevanja, materijale alata pa čak i materijala taline (odljevka).

Imajući na umu veliki broj relevantnih parametara utvrđenih pri istraživanju i izviđačkom ispitivanju problematike trošenja alata u tvornici LTH, veliki je spektar mogućnosti daljnjih istraživanja ali i jednoznačnih utvrđivanja i iznalaženja primjerenih rješenja za probleme trošenja alata pri lijevanju. U tom smislu, pri Zavodu za strojarsku tehnologiju na FESB- u, okupljen je stručni tim ljudi s ciljem konstruiranja i oblikovanja, te izrade i montaže navedene naprave. Znamo da je kontinuirani monitoring pukotina na površini alata u radu gotovo nemoguć. Naprava sa simuliranim radnim parametrima bi, u konačnici omogućila i dobru predikciju razloga oštećenja ili otkaza alata u radu, korištenjem metoda numeričkih simulacija i tako postojeći proizvodni sustav kontrole kvalitete koji već poznaje ovu problematiku, učinila boljim i efikasnijim.

5. Zaključak

Kao dio već spomenutog Projekta Zavoda za strojarsku tehnologiju Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu, pod naslovom "Analiza trošenja i mogućnosti produljenja vijeka trajanja alata za tlačno lijevanje", ovaj rad daje uvid u spomenutu problematiku i nastoji naglasiti najvažnije tehnološke parametre unutar procesa lijevanja s ciljem iznalaženja načina njihovog optimiranja.

Rad se temelji na promatranju i analizi realnih radnih uvjeta pri tvornici LTH Metalni lijev d.o.o. iz Benkovca, s naglaskom na analizi stanja alata (kalupa) i njihove otpornosti na trošenje, u prvom redu.

Složeni proizvodni sustav kakav jest, nudi vrlo raznolike izazove ispitivanja stanja alata, budući tvornica koristi, svakodnevno, više desetaka strojeva za tlačni lijev s različitim parametrima lijevanja i proizvodi veliki broj odljevaka prema principima "just – in – time" proizvodnje.

Optimiranje i produljenje vijeka trajanja alata kao cilj pruža velike benefite za tvornicu. Produljenje vijeka trajanja alata direktno utječe na mogućnost reprogramiranja financijskih sredstava s troškovne strane na investicijsku; smanjenjem proizvodnog "down – time" – a, otvara se prostor za veću produktivnost sustava i jači bonitet u očima naručitelja za koje se zna da poznaju, traže i priznaju samo – kvalitetu. A kvaliteta, u suštini, i jest upravo ono što odlučuje – kupac.

Ovaj projekt otvara široki prostor za buduća razmatranja i analizu navedene problematike kroz, u prethodnom poglavlju predložene, razvojne mogućnosti projekta.

Uspostavljena suradnja predstavlja zalog budućeg uspješnog rada projektnog tima i relevantnih instanci tvornice, u cilju iznalaženja optimalnih tehnoloških rješenja na obostrano zadovoljstvo.

LITERATURA

- [1] LTH Metalni lijev d.o.o., Benkovac
- [2] Kamber Dinko; "Oblikovanje kalupa za tlačno lijevanje aluminijskih legura", diplomski rad, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, 2009.
- [3] Ivušić Vinko; "Tribologija", Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.
- [4] Kovačević Vera, Vrsaljko Domagoj; "Inženjerstvo površina", nastavni materijali, poglavlje "Tribologija", Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Zagreb, 2012.
- [5] UTP Welding Products, pdf.
http://www.utpsales.com.au/products/f_surfacehard.htm
- [6] UTP Product Catalog, pdf.
http://www.bwgus.com/english/files/UTP_PRODUCT_CATALOG.pdf
- [7] BÖHLER W300DE brochure, pdf.
<http://www.bohler-edelstahl.com/english/files/W300DE.pdf>
- [8] R. Deželić; "Metali II ", skripta, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, 1987.
- [9] M. Muhić, J. Tušek, F. Kosel, D. Klobčar; "Analysis of Die Casting Tool Material", članak, časopis Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering 56 (2010) 6, 351 – 356.
- [10] D. Klobčar, M. Muhić, M. Pleterski, J. Tušek; "Thermo – mechanical cracking of a new and laser repair welded die casting die", članak, časopis Metalurgija 51 (2012) 3, 305 – 308.
- [11] M. Rosso, D. Ugues, E. Torres, M. Perucca, P. Kapranos; "Performance enhancements of die casting tools through PVD nanocoatings", članak, Int J Mater Form, DOI 10.1007/z12289 – 008 – 0131 – z (2008).
- [12] Kosec Borut, Soković Mirko; "Oštećenja radne površine alata za livenje aluminija pod pritiskom", stručni rad, časopis Mašinstvo 1 (6), 23 – 28, 2002.
- [13] Ž. Stojanović, S. Stanisavljev, S. Radosavljević; "Primena postupka vanadiranja u funkciji produženja radnog veka delova", članak, časopis Zaštita materijala 54 (2013) broj 2.