

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE  
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ POLITEHNIKE**

**PETAR LJUMOVIĆ**

**DIPLOMSKI RAD**

**IZBOR MATERIJALA  
ZA IZRADU KALUPA ZA TLAČNO LIJEVANJE**

**Split, rujan 2013.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE  
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ POLITEHNIKE**

**PREDMET: IZBOR MATERIJALA**

**DIPLOMSKI RAD**

**KANDIDAT: Petar Ljumović**

**TEMA DIPLOMSKOG RADA: Izbor materijala za izradu  
kalupa za tlačno lijevanje**

**MENTOR: Igor Gabrić, pred.**

**Split, rujan 2013.**

**REPUBLIKA HRVATSKA**  
**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
Sveučilišni odjel za stručne studije

Studij: Specijalistički diplomski stručni studij politehnike

Predmet: Izbor materijala

Nastavnik: Igor Gabrić, pred.

## **DIPLOMSKI ZADATAK**

Kandidat: PETAR LJUMOVIĆ

**Zadatak: Izbor materijala za izradu kalupa za tlačno lijevanje**

U radu je potrebno:

- razmotriti metodologije izbora materijala;
- odrediti kriterije izbora materijala kalupa za tlačno lijevanje;
- izvršiti izbor materijala primjenom općeg metodološkog procesa;
- opisati postupke modificiranja površine s ciljem povećanja učinkovitosti izabranih materijala;
- usporediti različite metode izbora materijala;
- iznijeti zaključke;
- navesti literaturu i izvore podataka.

Zadatak je predan kandidatu: 2. rujna 2013.

Rok za predaju diplomskog rada: 2. prosinca 2013.

Nastavnik

Igor Gabrić, pred.

*Zahvaljujem se mentoru i predavaču,  
gospodinu Igoru Gabriću  
na iskazanoj podršci i posvećenom vremenu  
pri izradi Diplomskog rada.*

*"We are all strangers to our hidden potential  
until we confront problems  
that reveal our capabilities..."*

*Apoorve Dubey*

# SADRŽAJ

<b>Sažetak (Summary)</b> .....	6
<b>1. Uvod</b> .....	7
1.1 Kratka povijest razvoja tehničkih materijala s primjerima .....	7
1.2 Važni parametri pri izboru materijala .....	12
1.3 Metodološki pregled izbora materijala .....	18
<b>2. Kriteriji izbora materijala za izradu kalupa za tlačno lijevanje</b> .....	21
2.1 Procesi proizvodnje tlačnim lijevom .....	22
2.2 Svojstva materijala kalupa za tlačno lijevanje .....	31
<b>3. Izbor materijala prema općem metodološkom procesu</b> .....	34
<b>4. Postupci modificiranja površine kalupa kao važan dio procesa izbora materijala</b> .....	61
<b>5. Usporedba različitih metoda izbora materijala</b> .....	66
<b>6. Zaključak</b> .....	73
Literatura .....	74
Prilog 1 .....	76
Prilog 2 .....	77

## **Sažetak**

Diplomski rad pod nazivom "Izbor materijala za izradu kalupa za tlačno lijevanje" analizira metodologiju i glavne kriterije izbora materijala izrade kalupa za tlačni lijev, s naglaskom na metalne kalupe. U radu su opisani postupci tlačnog lijevanja i namjena spomenute tehnologije kao aktualne i danas široko primijenjene proizvodne tehnologije. Metodologija izbora materijala je provedena kroz konkretan primjer materijala kalupa za tlačni lijev koji se koristi u tvornici "LTH Metalni lijev d.o.o." iz Benkovca. Preko parametara kemijske, mehaničke i metalografske analize uzoraka materijala iz tvornice, izvršena je usporedba prethodno usvojenih kriterija izbora materijala izrade kalupa. Dobiveni rezultati poslužili su kao podloga za zaključni osvrt na problematiku izbora materijala kao složenog koncepta koji integrira znanje, vještine i iskustvo, ali i poznavanje odgovarajućih tehnologija obrade površine, popravka i održavanja funkcionalnog stanja alata. Cilj diplomskog rada je dati doprinos optimiranju postupka izbora materijala kalupa za tlačni lijev kroz opis relevantnih parametara izbora i integraciju postojećih saznanja i iskustava na tom polju.

## **Summary**

Through graduation work titled "Material selection for die - cast production", the analysis of material selection methodology and selection's main criteria for die - cast manufacturing process has been done, with the accent on metallic die- cast materials. In this work, the die - cast technology with its purpose and processes, as the wide span production technology of today, has been described. The material selection methodology has been applied throughout the specific die - cast material example from "LTH Metalni lijev d.o.o." manufacturing facilities located in Benkovac. Through the parameters obtained from chemical, mechanical and metallographic analysis that were carried out on die - cast material test samples from the factory, comparison study has been given regarding previously accepted material selection criteria. Given results were used as a platform for material selection issues final analysis having in mind the complexity of the concept itself. The concept integrates knowledge, skills and experience as well as cognition of relevant material surface processing technologies, tool repairing technologies and its operational maintenance procedures. The main goal of this work is to impose a die - cast material selection procedure optimization, by describing the material selection relevant parameters and integrating experience and knowledge already existing on this matter.

## 1. Uvod

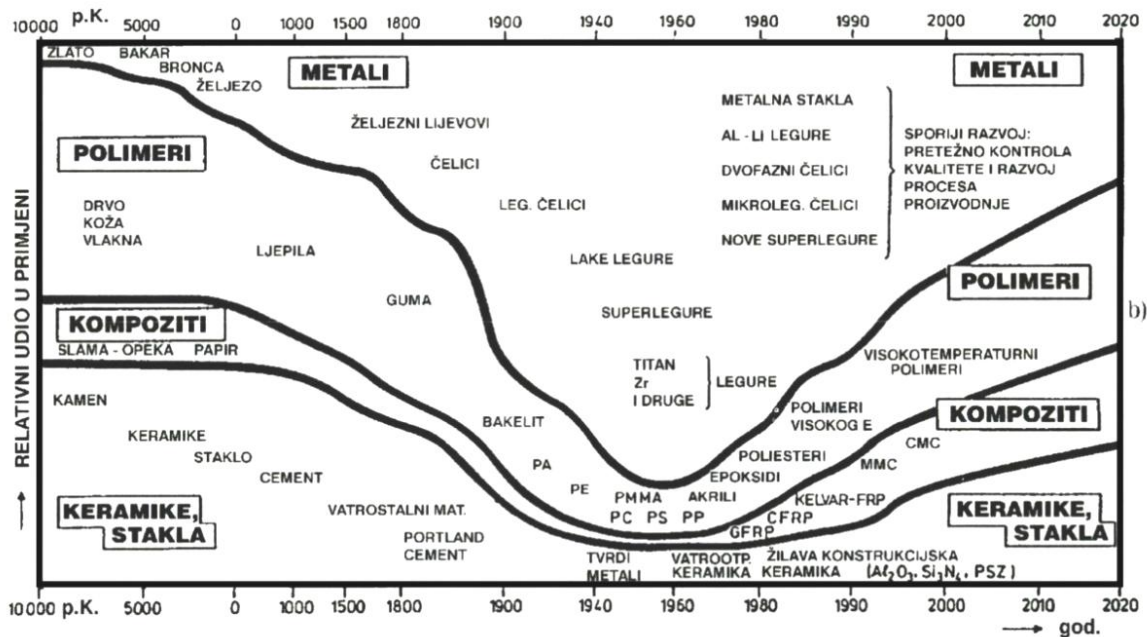
Svi predmeti u našem okruženju napravljeni su od određenih materijala. Upravo materijal, kao temeljna kategorija u proizvodnom procesu, ponajviše određuje tržišne i uporabne karakteristike predmeta odnosno proizvoda. Uz materijal, za izradu određenog proizvoda potrebne su vještine, znanja i iskustva ljudi te metode konstruiranja i manje ili više složeni procesi, odnosno postupci proizvodnje.

Kroz povijest, cijela razdoblja su bila poistovjećena s nekom novootkrivenom vrstom materijala ili s materijalima koji su se najviše koristili u to vrijeme; za izradu oružja, alata, posuda, nakita i sličnih svakodnevnih predmeta. Razvojem materijala, potakla se i izrada te proizvodnja različitih vrsta uređaja, strojeva i naprava. Razvile su se nove tehnike i proizvodni procesi. Vremenom su se razvijale i usavršavale različite metode i vještine koje su doprinosile razvoju novih materijala. Od empirijskih metoda, preko matematičkog modeliranja i suvremenih računalnih tehnika, do modeliranja mikrostrukture, atomskog modeliranja i fizikalne kemije. Upravo ta sinteza primjene novih materijala i pripadajućih usavršenih proizvodnih postupaka donose vrlo bitne prednosti na tržištu kakvo je danas. Tijekom vremena, za proizvode i materijale postavljaju se sve stroži zahtjevi u smislu sigurnosti, nosivosti, pouzdanosti, trajnosti, ekološkičnosti, cijene itd. Stoga, izbor materijala danas predstavlja mnogo kompleksniji zadatak nego što je to bio u prošlosti.

### 1.1 Kratka povijest razvoja tehničkih materijala s primjerima

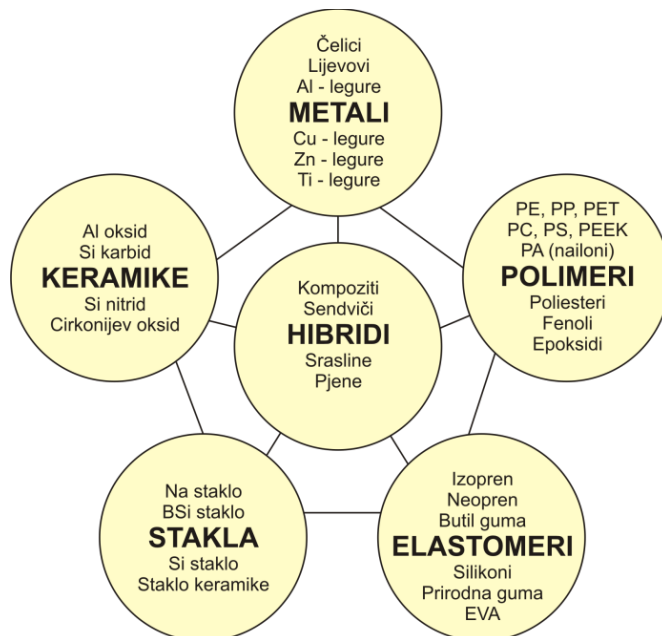
Kada se govori o materijalima u ovom kontekstu, misli se na pojam **tehničkih materijala** s određenim fizikalno - kemijskim svojstvima bitnih za izradu industrijskih proizvoda. Danas, procjena raspoloživih tehničkih materijala iznosi oko 70 000 [1]. Materijali na bazi željeza dostižu zasićenje u proizvodnji i potrošnji, a istovremeno sve više raste udio proizvodnje i primjene aluminijskih, titanovih i magnezijjskih legura. Polimerni, keramički, a posebno kompozitni materijali imaju sve veću ulogu u oblikovanju i konstruiranju različitih proizvoda u novije vrijeme.

Svojstva materijala gotovo je nemoguće odvojiti od svojstava izratka ili proizvoda jer se materijal izravno oblikuje u konačni oblik. Raznovrsnost materijala u današnje vrijeme ostvaruje se kombiniranjem materijala poznatih svojstava čime se ostvaruju namjenske funkcije gotovog proizvoda.



Slika 1. Prikaz evolucijskog razvoja materijala kroz povijest [1]

Sve više je na djelu nova filozofija koja se temelji na konceptu projektiranja sustava i strukture materijala usmjerenog na dobivanje željenih svojstava u konačnici. Ovaj pristup najviše vrijedi za suvremene kompozitne materijale.



Slika 2. Osnovne grupe materijala: metali, keramike, stakla, polimeri, elastomeri i njihove kombinacije različitih svojstava koje čine hibride [2]



Jedan od najzornijih primjera kako se mijenjao način primjene i izbora materijala tijekom vremena nalazimo u industriji zrakoplova. Naime, rani modeli zrakoplova bili su izrađeni od drva niske gustoće (smreka, balza), čelične žice i svile. Drvo je ostalo kao glavni konstrukcijski materijal okvira zrakoplova sve do duboko u dvadeseto stoljeće. No, kako su zrakoplovi postajali sve veći, drvo je postajalo sve manje praktično za tu namjenu. Aluminijski okvir, npr. kao kod modela Douglas DC3 iz 1936., bio je rješenje. Ovim rješenjem je povećana krutost na savijanje i čvrstoća pri manjim težinama neophodnim za veće domete letova. Aluminij je ostao dominantan konstrukcijski materijal civilnih zrakoplova sve do završetka dvadesetog stoljeća. Potkraj stoljeća, potreba za većom uštedom goriva i manjom emisijom štetnih plinova dovodi do uvođenja kompozitnih materijala. Njihov izbor postaje sve atraktivniji bez obzira na cijenu i veće tehničke izazove.

Budućnost izbora materijala okvira zrakoplova prezentirana je primjerom Boeing-ovog 787 Dreamliner - a iz 2010. godine (80% udjela su polimerni materijali pojačani karbonskim vlaknima). Ova konstrukcija okvira predstavljena je kao 30% lakša (po putničkom mjestu) od konkurentnih zrakoplova.



**Slika 3.** *Različiti modeli zrakoplova kroz povijest: Wright iz 1903. (lijevo), Douglas DC3 iz 1936. (sredina) i Boeing 787 Dreamliner iz 2010. (desno) [3]*

Zanimljiv je i primjer izbora materijala i tehnologije izrade bloka motora [4]. U relativno kratkom vremenu razvili su se novi materijali i proizvodni procesi ovog temeljnog dijela svakog motora s unutarnjim izgaranjem. Blokovi se, danas, u pravilu izrađuju od aluminijskih legura (A319 i A356 najčešće), ali još uvijek i od sivog lijeva ili legura željeza i drugih metala poput kroma i nikla. Aluminijske legure imaju prednost pri izboru zbog manje mase i lakšeg provođenja topline (boljeg hlađenja). Ali, budući se kod diesel-skih motora javljaju veća unutarnja opterećenja, blokovi od sivog lijeva se i danas koriste barem za izradu blokova kod motora manjeg obujma. Uz to, blokovi od aluminijskih legura imaju razmjerno malu tvrdoću. Bez uporabe košuljica unutar cilindara, konstrukcija ne bi bila uporabljiva jer bi se relativno mekani blok brzo istrošio.

No, rješenje postoji za ovaj slučaj i to kroz izbor materijala. Naime, u aluminijsku leguru za izradu bloka se dodaje **silicij**. Nakon lijevanja, cilindri se podvrgavaju jetkanju (nagrizanju

kiselinom) te se tako skida izuzetno mali sloj aluminijski s unutarnjeg dijela cilindra i ostavljaju tvrda zrnca silicija izloženima. Klip tada klizi preko tih zrnaca uz minimalno **trošenje i otpor**. Na slici 4. vidimo tri različite izvedbe bloka motora. Različita konstrukcijska rješenja u ovim slučajevima utječu na izbor materijala i tehnologiju izrade.



**Slika 4.** *Primjeri različitih izvedbi bloka motora: aluminijski V8 motor LT -1 iz Corvette Stingray, General Motors (lijevo), aluminijski 6 - cilindrični redni motor BMW AG (sredina), VR6 motor koji nije ni redni ni V motor (štednja prostora) Volkswagen AG (desno) [4]*

Blok motora se, gotovo u pravilu, izrađuje lijevanjem u nekoj od različitih vrsta kalupa. Tradicionalni proizvodni proces je **pješčani lijev**, pri kojem se primjenjuje postupak lijevanja metala u pješčane kalupe. Potreba za većom preciznošću, većom točnošću dimenzija i izostanku rubova na mjestu spoja višedijelnih kalupa (srha), pridonijela je razvoju tehnike lijevanja **isparivim modelima**. Ulijevanjem metala u takav pješčani kalup, isparivi materijal tzv. “pozitiv odljevka“ nestaje, a njegovo mjesto zauzima rastopljeni metal.

U konačnici, blok motora se danas izrađuje i uz pomoć CNC glodalica. Premda možda zvuči egzotično, sam proces izrade je osobito brz; završne ili dodatne obrade gotovo da i nema. Po završenom nacrtu, blok legure aluminijski se postavlja u CNC stroj i odabire odgovarajući program obrade.



**Slika 5.** *Primjeri različitih proizvodnih postupaka izrade bloka motora: pješčani lijev BMW AG (lijevo), isparivi model - lijevo je gotovi aluminijski blok, a desno polistirenski uložak kalupa - “pozitiv“ odljevka, General Motors (sredina), CNC glodalica za izradu bloka motora, Centroid Corporation (desno) [4]*

Premda problem izrade konstrukcijskih detalja složenije geometrije postoji, kao i problem više cijene postupka (reznih alata) od tehnike lijevanja, najveći problem koji nastaje kao nuspojava ovog proizvodnog postupka je postupno riješen. Naime, velika količina otpada koja nastaje ovim postupkom (i do 85%, ovisno o obujmu bloka), uz razvijene tehnike **recikliranja**, postaje nova sirovina.

Izbor materijala vrlo često predstavlja složen problem usklađivanja određenog broja različitih zahtjeva s jedne strane, te svojstava i karakteristika raspoloživih materijala s druge strane. Složenost izbora proizlazi iz velikog broja utjecajnih faktora, pri čemu se mnogi ne mogu pojedinačno kvantificirati niti se mogu definirati njihove međuovisnosti.

Tablica na slici 6. pokazuje trendove proizvodnje različitih materijala u milijunima tona unazad 8 godina. Dominacija čelika, drva i betona u odnosu na ostale materijale je velika. No, korištenje i razvoj polimernih, keramičkih i kompozitnih (hibridnih) materijala sve je veće. Razloga za to ima više; od sve složenijih zahtjeva koji se stavljaju pred konstruktore i tehnologe, preko načina dobave i proizvodnje, cijene, odnosa tržišne ponude i potražnje, pa sve do estetičnosti, ekolozičnosti ili taktilnosti kao sve značajnijim kriterijima za (ne)odabir određene grupe ili vrste materijala. Konkretni uvjeti eksploatacije sve više potiču na kompromisna ispunjavanja zahtjeva materijala, istražuju se najpovoljnija rješenja u zadanim uvjetima, teži se određenim, realno – ostvarivim izvedenim karakteristikama materijala.

U današnje vrijeme, izbor materijala, kao kategorija, sve više postaje problem **optimalizacije**.

**Istraživanje, razvoj i primjena** novih materijala i tehnologija danas stoje uz bok genetici, biotecnici, informatici i komunikaciji kao “generičke“ discipline znanosti i tehnike.

Vrsta materijala	Količina, 10 <sup>6</sup> t
materijali na bazi željeza	940
aluminij	20
nikal	0,7
bakar	10
polimeri	200
polimerni kompoziti	2
cink	7
magnezij	0,3
olovo	6
beton	950
drvo (bez ogrjevnog)	1300

**Slika 6.** Tablica količine proizvedenih materijala za 2005. godinu [1]

## 1.2 Važni parametri pri izboru materijala

Pravilan izbor materijala sve se više nameće kao nužan uvjet za postizanje, kako je rečeno, kvalitetnijeg proizvoda, uz kontinuirano unapređenje proizvodnih postupaka izrade i konstrukcijskih rješenja. S tim u svezi, optimalno vrijeme izbora materijala tijekom stvaranja proizvoda predstavlja iznimno važan parametar i trebalo bi nastupiti u što ranijoj fazi projektiranja proizvoda. Proces razvoja proizvoda, od idejnog koncepta do konačnog detaljnog konstrukcijskog rješenja određuju četiri osnovne skupine faktora [1]. To su:

1. **TEHNIČKI** - funkcijski i eksploatacijski zahtjevi, odgovarajuća svojstva proizvoda - proizvodna i energetska.
2. **EKONOMSKI** - troškovi razvoja i proizvodnje, cijena proizvoda, investicijski troškovi, produktivnost i rentabilnost, mogućnosti kooperacije, diverzificiranost proizvoda itd.
3. **DRUŠTVENI, HUMANI** - potrebe čovjeka i društva u cjelini, uporabljivost proizvoda, recikliranje i utjecaj na okoliš, kulturološka i informacijska svojstva itd.
4. **PRAVNI** - norme, zakoni, propisi, zaštita izuma, patenta i modela, postupci proizvodnje (*know - how*), itd.

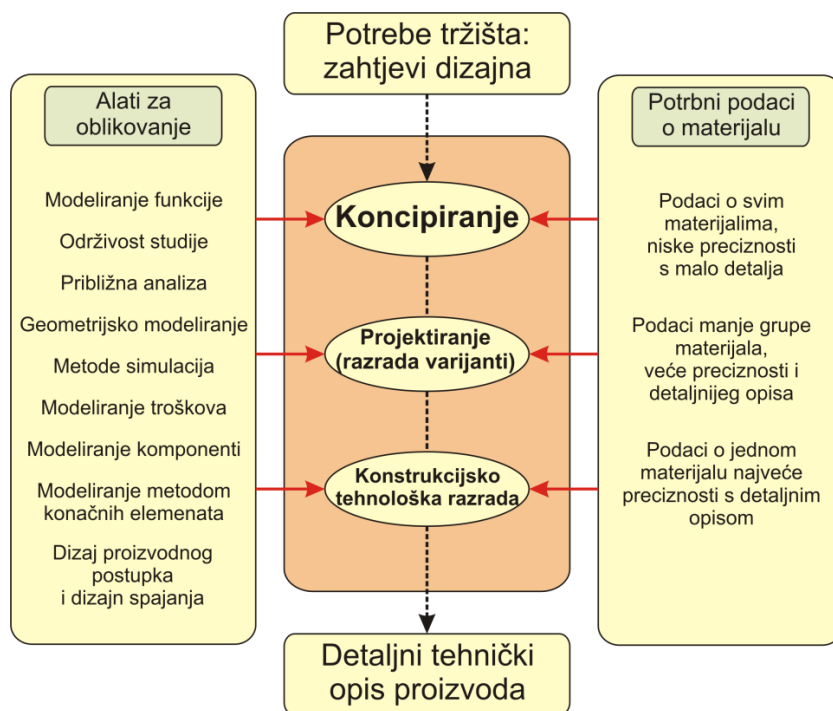
Kada izbor materijala treba izvršiti tijekom postupka konstruiranja, treba imati na umu da se sam postupak konstruiranja provodi kroz tri karakteristične faze , čiji redoslijed je iterativan:

1. Koncipiranje;
2. Projektiranje - razrada varijanti mogućeg rješenja;
3. Konstruiranje dijelova i tehnološka razrada.

Izbor materijala se može vršiti u svakoj od faza, ali unutar različite veličine skupa materijala i s različitim stupnjem preciznosti rezultata.

1. **KONCIPIRANJE** - razvoj svakog novog proizvoda počinje od poznatih zahtjeva. U pogledu izbora materijala, sve varijante bi trebale biti podjednako prikladne u ovoj fazi. Generiraju se osnovna funkcionalna svojstva materijala (vodljivost električne struje, prozirnost, težina). Nadalje se definiraju polazni zahtjevi vezani uz: radnu temperaturu,

agresivnost radnog medija, vrsta vanjskog opterećenja, oblik, dimenzije, izgled, itd. U početnoj fazi razvoja prevladavaju poznate, predvidljive skupine materijala pa je vrlo važno postaviti kriterije usporedbe po širokoj lepezi mogućnosti. Tu nastaju poteškoće po jednakim kriterijima usporediti npr. legure na bazi željeza, lake legure i polimerne materijale.

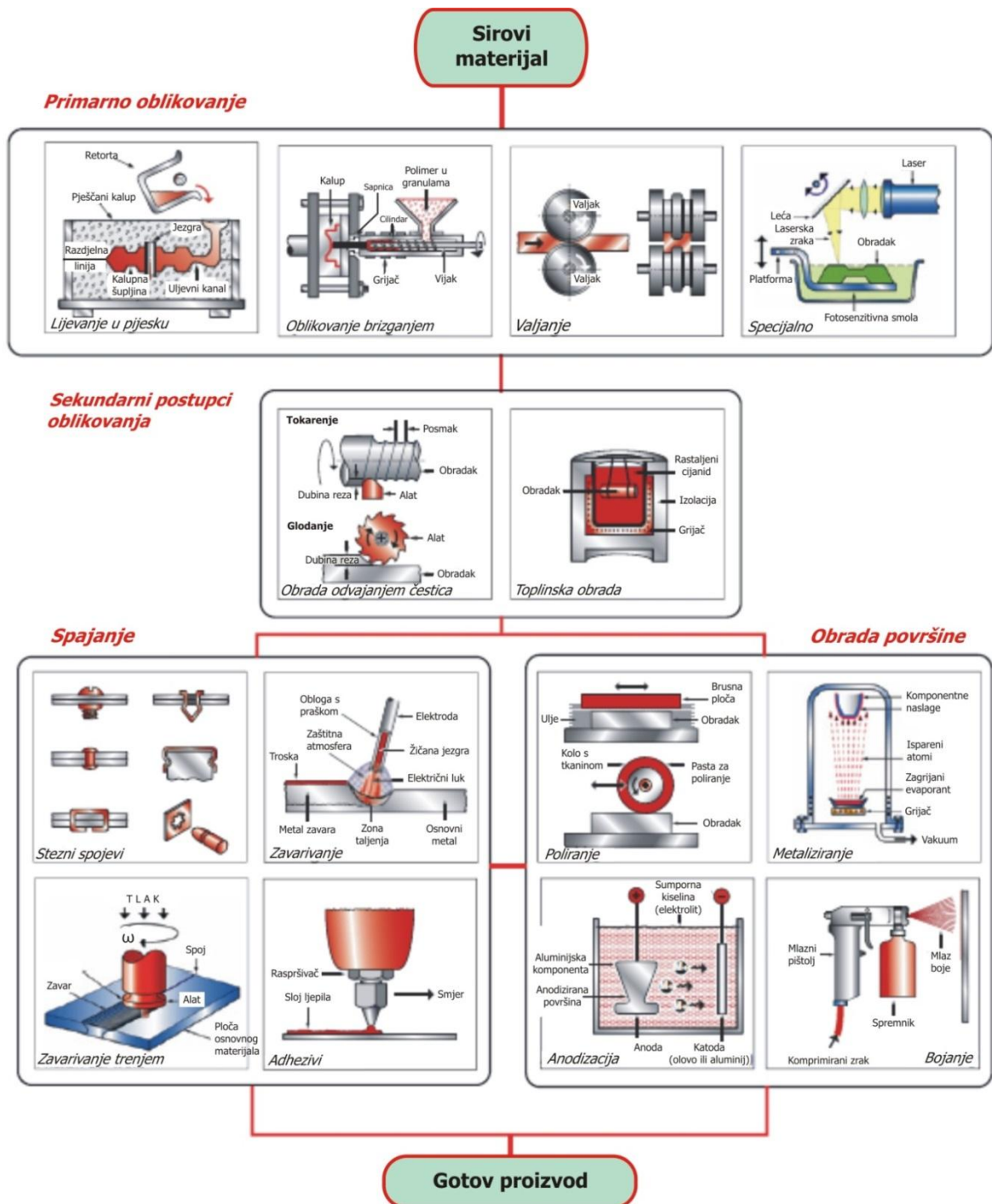


**Slika 7.** Prikaz izbora materijala po fazama razvoja proizvoda [3]

2. PROJEKTIRANJE - u ovoj fazi potrebno je poznavati što više informacija o materijalima koje poznajemo iz standarda, kataloga i baza podataka. Slijedi detaljno razmatranje određenih skupina materijala te izdvajanje prikladnih skupina i vrsta materijala u obliku varijanti. Ova faza trebala bi rezultirati praktičnim specifikacijama dijelova i sklopova te utvrđivanjem skupa materijala i okvirni (načelni) tijekom proizvodnog procesa. Ovdje se mogu racionalizirati količine ugrađenog materijala, broj dijelova za ugradnju, mogu se razviti bolji proizvodi s gledišta energetske učinkovitosti, mogućnosti reciklaže te s gledišta pouzdanosti.

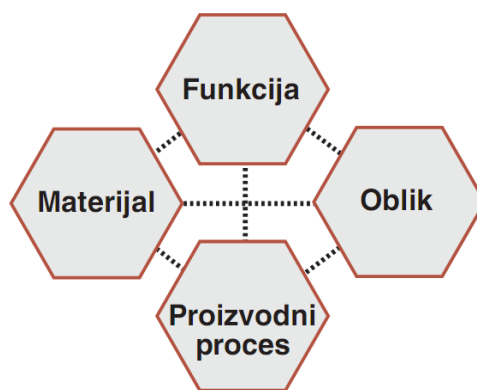
Alati za projektiranje [3] omogućavaju modeliranje i optimizaciju, olakšavajući sve faze projektiranja. Modeliranje funkcija sugerira njezinu održivu strukturu. Optimiziranje konfiguracije sugerira ili poboljšava oblik. Geometrijski i 3D paketi za modeliranje omogućuju vizualizaciju i stvaranje datoteka koje se koriste za izradu prototipova na numerički upravljanim proizvodnim sustavima. Programski paketi tipa: DFM – “Design for Manufacture“ (projektiranje proizvodnog postupka), DFA – “Design for Assembly“

(projektiranje tehnologije spajanja) te programi za procjenu troškova omogućuju optimizaciju s gledišta proizvodnje. A da bi dobili traženi oblik, materijal treba podvrgnuti proizvodnim postupcima. Proizvodni postupci uključuju primarne procese (kao što je lijevanje i kovanje), postupke odvajanjem čestica (tokarenje, glodanje, bušenje), završne obrade (poliranje) te postupke spajanja (zavarivanje, lijepljenje, itd.).



Slika 8. Primjeri familija i klasa proizvodnih postupaka [2]

Izbor oblika i materijala proizvoda diktirani su njegovom funkcijom [3]. Proizvodni proces je uvjetovan materijalom (plastičnost, obradivost odvajanjem čestica, zavarljivost, mogućnost toplinske obrade, itd.). Proizvodni proces je očito uvjetovan i oblikom. Proces određuje oblik, veličinu, preciznost i trošak. Određeni oblik proizvoda ograničava izbor materijala i procesa, ali istovremeno određeni proces ograničava odabir materijala i oblika koji se može izvesti. Složeniji oblik konačnog proizvoda uvjetuje zahtjevnije specifikacije što rezultira većom interakcijom oblika i proizvodnog procesa. Interakcije između funkcije, materijala, oblika i procesa temeljne su odrednice za postupak izbora materijala.

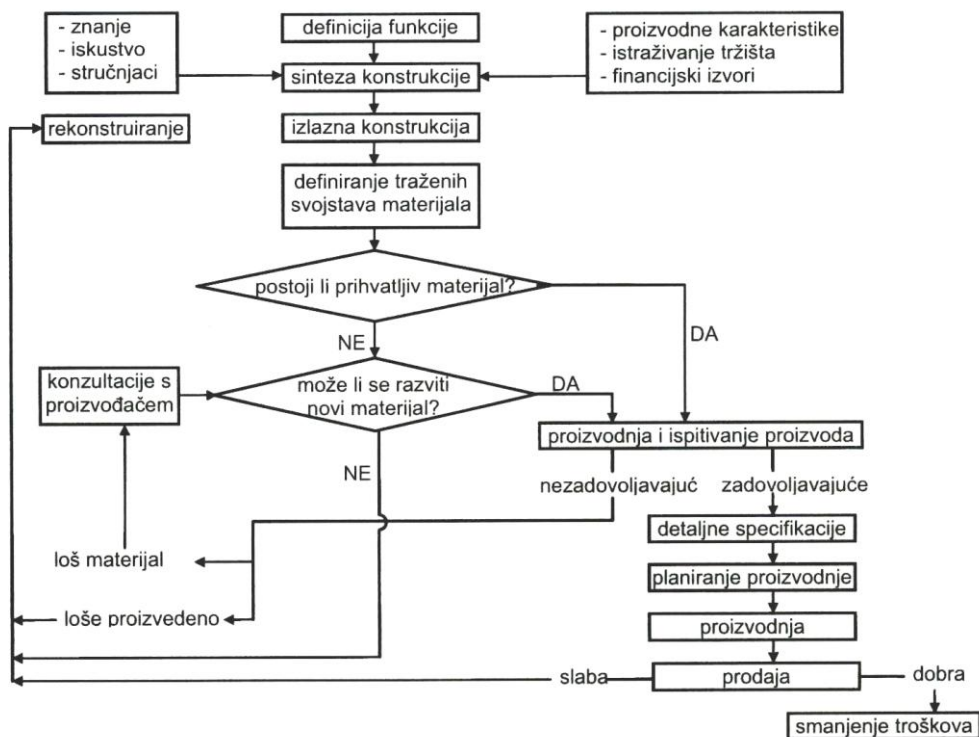


**Slika 9.** Interakcija između funkcije, materijala, oblika i proizvodnog procesa [3]

3. KONSTRUIRANJE DIJELOVA I TEHNOLOŠKA RAZRADA - za većinu proizvoda ovo je faza kada se odabire proizvođač (dobavljač) materijala izrade, uz poznate parametre oblika, dimenzija, količine, ukupnog troška materijala i proizvodnje te mogućnost isporuke. Završni konstrukcijski proračuni, razrada tehnološkog procesa, kao i završna troškovna bilanca moraju se temeljiti na što jasnijim i preciznijim vrijednostima svojstava materijala budući se te vrijednosti razlikuju od dobavljača do dobavljača. Budući su faze tijekom postupka konstruiranja iterativne, slijedi da su međusobno povezani i uzajamno utječu parametri funkcije i izgleda proizvoda, proizvodnje i troškova izrade proizvoda na položaj izbora materijala u procesu razvoja i realizacije proizvoda. Konačni cilj procesa razvoja i realizacije proizvoda je stvaranje proizvoda koji će usuglasiti interese i zahtjeve kupca (korisnika, naručitelja), trgovaca, proizvođača i autora konstrukcijsko - tehnološkog rješenja. Izbor materijala vrši se u prvom redu tijekom faze projektiranja i konstruiranja proizvoda. Moguće je izbor vršiti i tijekom izrade ili nabave, ali to je više rezultat kasnijih promjena u konstrukcijsko - tehnološkoj dokumentaciji koje je teško predvidjeti u početku procesa stvaranja proizvoda ili zbog pogrešnih odluka donesenih tijekom konstruiranja. Upravo

konstrukcijski odjel utječe na više od 2/3 troškova proizvoda što jasno ukazuje na odgovornost pri aktivnostima kreiranja ideja i izrade tehničke dokumentacije proizvoda.

Dijagram na slici 10. prikazuje slijed aktivnosti tijekom razvoja proizvoda, ukazuje na iterativni karakter određenih aktivnosti tijekom procesa razvoja, te položaj i važnost funkcije izbora materijala u ovisnosti prema ostalim funkcijama i aktivnostima.



Slika 10. Dijagram tijeka postupka razvoja proizvoda [1]

Izbor materijala uvelike ovisi o vrsti i tipu proizvoda za koji se materijal bira. S obzirom na mogućnosti i učinak izborom materijala, prikladna je podjela na dva tipa proizvoda:

- Proizvodi s gotovom dokumentacijom (licenca, kooperacija)
- Vlastito razvijeni proizvodi i konstrukcije poput prilagodnih, varijantnih ili novih konstrukcija.

Kod proizvoda s **razrađenom konstrukcijom** ili čak tehnološkom dokumentacijom, materijal može biti više – manje definiran ili je dopuštena sloboda odabira. Pritom treba voditi računa da je materijal dostupan i obradiv raspoloživim tehnologijama i proizvodnim postupcima.

Kod **prilagodnih i varijantnih konstrukcija**, proizvodi spadaju u viši stupanj razvoja. Određeni parametri (oblik, dimenzija, tolerancija) mogu se mijenjati, ali osnovni funkcionalni



principi rješenja ostaju nepromijenjeni. Ovi tipovi konstrukcija su najčešći u praksi i upravo za njih se razvijaju sustavi tipizacije i standardizacije dijelova i materijala kao i postupci projektiranja i dokumentiranja. Ove aktivnosti su često računalno podržane, s pristupom i korištenjem baza podataka standardiziranih dijelova i sklopova.

**Novi proizvod** predstavlja svojevrsni kreativni izazov; kako i na koji način izborom nekog novog materijala postići i razviti neko djelotvorno rješenje. Primjere takvog pristupa nalazimo u konstrukcijama svemirskih letjelica i uređaja, fuzijskih reaktora, elektronici, medicinskim implantatima, sportskim rekvizitima, igračkama, kućanskim aparatima i sl. No, novi proizvodi generiraju i nove, složenije zahtjeve, kakve postojeći materijali nisu u mogućnosti ispuniti. Tada se pristupa tzv. "projektiranju" sastava (strukture) materijala sa željenim – poboljšanim svojstvima. Dakle, ispitivanje granica mogućnosti postojećih materijala i proizvodnih postupaka kroz razvoj i korištenje najsloženijih strojeva, upravo stvara potrebu za usavršavanjem postojećih i razvijanje (stvaranje) novih materijala.

Koncept izbora materijala u praksi pored navedenih kriterija odabira uzima u obzir i određeno iskustvo i subjektivnost instanci (konstruktora) koji donose odluke. Ovu tezu potvrđuje primjer provedenog istraživanja o kriterijima odabira materijala u našoj industriji [5]. U tom primjeru izbor materijala predstavlja postupak pretvorbe informacija o proizvodu i materijalu, metodama i postupcima odlučivanja te informacijskoj podršci. Istražen je tijek stvaranja kriterija vrednovanja materijala. Kriteriji uključuju porijeklo, složenost, usporedivost, način zapisa i informacijske vrijednosti u izboru materijala. Teorijskim razmatranjem i modeliranjem utvrđeni su kriteriji odlučivanja; formalizacija i objektivizacija primjenom računala i slojevitost definiranja materijala. Računalno se provodi simulacija izbora, fleksibilnom integracijom različitih metoda i korištenjem baza podataka materijala. Konstrukcijska dokumentacija tvornice navodi i ističe reprezentativne dijelove (alatnih strojeva i pumpi) s različitim funkcijama i s različito postavljenim radnim zahtjevima. Mjerodavni konstruktori grupiraju ključne parametre za odabir materijala u četiri skupine:

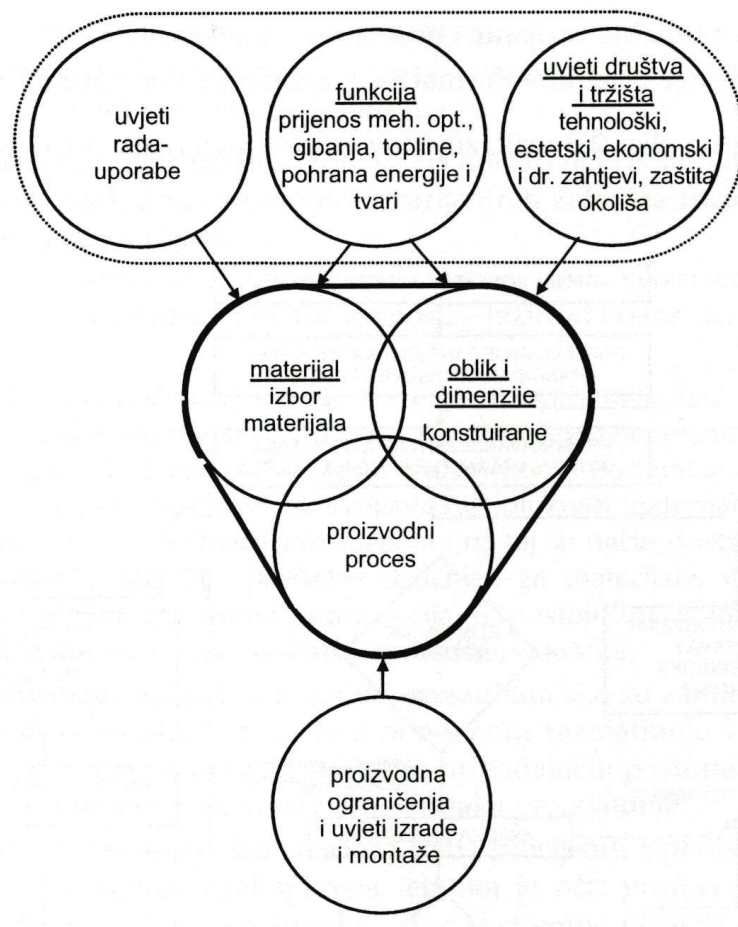
1. *Informacije iz postojećih konstrukcija* - popis materijala već primijenjenih za isti ili sličan dio prema vlastitim ili stranim konstrukcijskim dokumentima.
2. *Kvalitativni (subjektivni) parametri* - procjene stupnja oštećenja, kontrola potrebne otpornosti na trošenje, parametri dimenzija, procjena troškova itd.
3. *Kvantitativni (objektivni) parametri* - mjerljivi zahtjevi i svojstva; mehanička svojstva, cijena, troškovi materijala i proizvodnje.

4. *Ograničenja* - propisi, zakonski akti i norme koji određuju prioritetne materijale za određeni proizvodni proces. Ograničenja se također mogu očitovati u nabavi materijala, kao i u tehnologiji proizvodnje (kooperanti, vlastiti pogon).

Zbrajanjem učestalosti pojavljivanja pojedinog od navedenih kriterija stvara se statistički obrazac prosječnih učestalosti pojedinih kriterija. Statistika je pokazala kako se konstruktori u ovom slučaju najviše odlučuju za iskustvo i provjerena rješenja pri izboru, odnosno kvalitativne ili subjektivne parametre izbora.

### 1.3 Metodološki pregled izbora materijala

Odluka o izboru optimalnog materijala metodološki je posložena još 70 - tih godina prošlog stoljeća. Tri aktivnosti, ravnopravne po važnosti, trebale bi biti provedene u procesu razvoja proizvoda; konstrukcijsko oblikovanje, izbor materijala i izbor postupka proizvodnje.



**Slika 11.** Prikaz veze konstrukcijskog oblikovanja, izbora materijala i izbora postupka proizvodnje [1]

Ono što materijal nikako ne smije biti pri analizi izbora jest - unaprijed definiran. Materijal je integralna varijabla istovremenog razmatranja različitih mogućnosti ispunjenja zadanih zahtjeva, i sve se više upravo od njega očekuju odlučujući utjecaji na svojstva i mogućnosti završnog proizvoda. U praksi se, stoga, konstruktori sve više okreću metodičkom postupku izbora materijala, a manje iskustvenom. U najširem smislu, **opći metodološki proces** [1] izbora materijala trebao bi sadržavati osam faza prema sljedećem redosljedu:

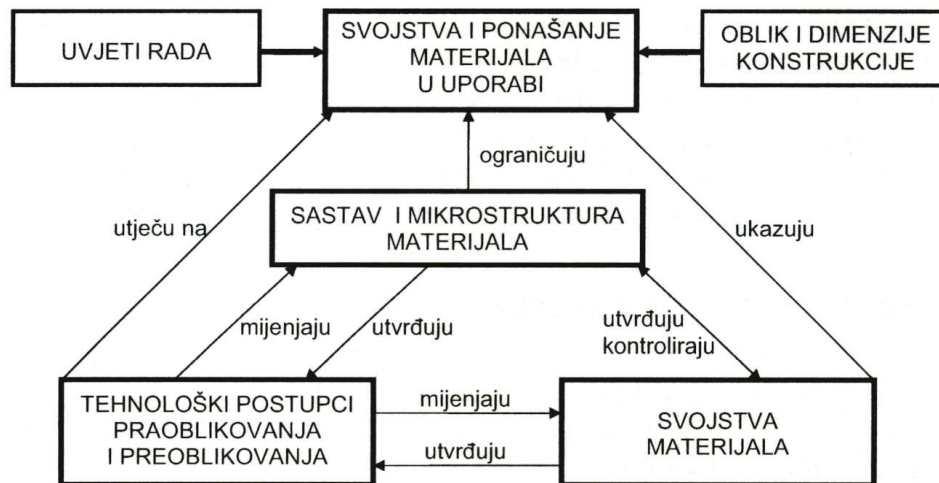
1. Analiza konstrukcijskog zadatka.
2. Odvajanje zahtjeva i kriterija vrednovanja materijala iz skupa zahtjeva i vrednovanja proizvoda.
3. Izbor i rangiranje kriterija s preslikom na svojstva potrebna za usporedbu materijala ili za vrednovanje proizvoda s gledišta materijala.
4. Eliminacija neprikladnih materijala (po tipu ili vrsti).
5. Razrada varijanti rješenja s gledišta odnosa materijal - konstrukcijsko tehnološki parametri.
6. Analiza i ocjena pojedinih varijanti.
7. Izbor optimalne varijante i materijala.
8. Oblikovanje izlaznih informacija o odabranim materijalima.

Kako se može uočiti iz navedenih faza metodološkog procesa izbora materijala, **definicija kriterija** [1] za izbor prilikom razvoja proizvoda vrlo je važan korak. Osnovne skupine kriterija u sebi sadrže cijele kategorije (skupove) svojstava materijala rangiranih ili poredanih u skupine prema određenom zajedničkom nazivniku. Osnovne skupine kriterija su sljedeće:

- Funkcionalnost,
- Eksploatabilnost,
- Tehnologičnost,
- Ekologičnost - recikličnost i uništivost,

- Ekonomičnost - raspoloživost, nabavljivost i cijena,
- Normiranost - standardnost,
- Estetičnost, taktilnost.

Izvjescno je da se u točno određenoj situaciji vršenja odabira materijala ne mogu nužno ispuniti svi zahtjevi, pa se traže kompromisna ispunjenja najvažnijih od njih. Da bi se izbor materijala mogao na neki način optimizirati, treba kvalitetno pridružiti relevantna svojstva pojedinih skupina materijala navedenim kriterijima odabira. Pri tome se mogu definirati određena svojstva kao osnove određenih kriterija (npr. nosivost - funkcionalnost, otpornost na trošenje - trajnost, itd). Za konkretne zahtjeve proizvoda (materijala), svojstva bi bilo poželjno moći **kvantificirati**. Najkvalitetniji oblik kvantifikacije svojstava čine dogovorena, normirana laboratorijska ispitivanja uzoraka pri relevantnim institucijama i atestiranim laboratorijima koja se još mogu i nadopuniti podacima proizišlim iz monitoring-a procesa proizvodnje i uporabe (svojevrsni informacijski *feedback*), odnosno procjene mogućeg ponašanja materijala u stvarnim uvjetima korištenja.



**Slika 12.** Utjecajni parametri na svojstva i ponašanje materijala i njihova međuovisnost [1]

Pregledna tablica skupina svojstava i karakteristika materijala dana je u PRILOGU 1. U tablici pod rednim brojem 5., navedena su **tribološka svojstva** materijala koja će biti i pobliže razmatrana u ovom diplomskom radu.

## 2. Kriteriji izbora materijala za izradu kalupa za tlačno lijevanje

Proces tlačnog lijevanja spada u proizvodne postupke **preciznog lijevanja u trajne kalupe** (eng. **dies**). Tehnologija [6] se sastoji od lijevanja u metalne kalupe (kokile) pod utjecajem niskog ili visokog tlaka. Kalupi variraju po složenosti konstrukcije za proizvodnju ne-željeznih komponenti (koje ne moraju biti toliko čvrste, tvrde ili otporne na visoke temperature kao čelik). Odljevci mogu varirati po veličini i dimenzijama; od ventila do blokova motora (uključujući sklopove, strojne dijelove, automobile – igračke i sl.).

U praksi, proces je prilagođen izradi bilo kojeg metalnog dijela koji mora zadovoljiti sljedeće zahtjeve:

- Visoka preciznost (dimenzije smiju varirati u intervalu  $\pm 50\mu\text{m}$ );
- Glatka površina (nanošenje zaštitne prevlake mora biti izvedivo bez prethodnog poliranja);
- Vrlo tanke presjeke po potrebi (od 1.2 mm);
- Proizvodnja mora biti ekonomičnija nego što bi bila proizvodnja obradom odvajanja čestica (kalupi za tlačno lijevanje s više "žigova" pri velikim brzinama su mnogo produktivniji od alata za obradu odvajanjem čestica ili preša za sabijanje);
- Vrlo fleksibilni pri oblikovanju (kalup može imati sva obilježja složenog sklopa).

Ukoliko postoje zahtjevi za oblikovanjem nekog strojnog dijela tehnologijom obrade odvajanjem čestica ili sklapanjem više dijelova u sklop, tehnologija izrade tlačnim lijevanjem je daleko ekonomičnija. Naravno, uz dovoljno veliku seriju. Stupanj raznolikosti i mogućnosti smjestio je tlačni lijev među tehnologije najmasovnije proizvodnje unutar industrije metalnih dijelova.

Najčešće korišteni metali kod tehnologije tlačnog lijeva su **aluminij i cink** (ponekad i legure bakra). To, ipak, nisu kemijski, pa ni tehnički čisti metali. Prije se koriste legure ovih metala, koje nude bolja fizikalna svojstva.

U novije vrijeme, polimerni odljevci izrađeni brizganjem zamijenili su neke odljevke izrađene tlačnim lijevom jer su u pravilu jeftiniji, a i lakši što je od posebne važnosti ako se uzmu u obzir standardi niže potrošnje goriva. Polimerni dijelovi su praktični, (posebno kada je i tehnologija prevlačenja površine polimernih materijala uznapredovala) ukoliko tvrdoća nije uvjet i ukoliko dijelovi mogu biti preoblikovani u cilju postizanja zahtijevane čvrstoće.

Postoje četiri glavna koraka pri procesu proizvodnje tlačnim lijevom:

1. Na kalup se nanosi sloj maziva i potom se zatvara. Mazivo ima dvostruku funkciju: pomaže pri kontroli temperature kalupa i pomaže pri odvajanju odljevka od kalupa.
2. Talina se potom injektira u kalup pod tlakom. Tlak osigurava niske vrijednosti hrapavosti površine odljevka upravo prema kalupu.
3. Tlak se zadržava narinut po završetku punjenja kalupa sve dok se odljevak ne skrutne (vrijeme se nastoji skratiti vodenim hlađenjem).
4. Kalup se otvara i odljevak se izvlači vani.

## 2.1 Procesi proizvodnje tlačnim lijevom

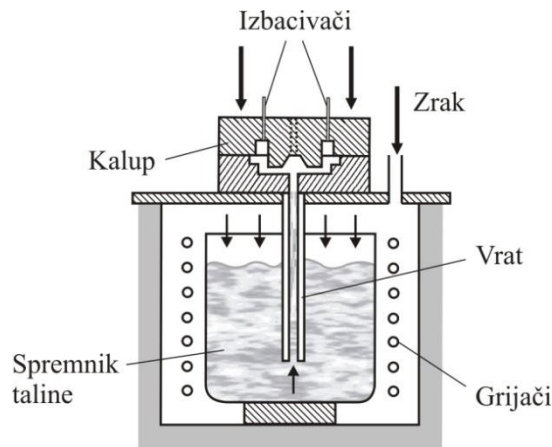
S obzirom na parametre brzine i tlaka taline, postoje dvije osnovne skupine [7]:

- Postupci niskotlačnog lijevanja (Low Pressure Die Casting; LPDC),
- Postupci visokotlačnog lijevanja (High Pressure Die Casting; HPDC).

### POSTUPAK NISKOTLAČNOG LIJEVANJA

Ovim postupkom lijevaju se uglavnom legure aluminija, a mogu se lijevati i legure magnezija. Ovim postupkom proizvode se odljevci visoke kvalitete čija masa može varirati od uobičajenih 10 - tak pa do 150 kg.

Spremnik taline može biti sastavni dio peći za taljenje ili pak posebno, odvojeno postrojenje. Preko vrata (vertikalnog kanala) spremnik je povezan s kokilom. Lijevanje se ostvaruje na način da se u zatvoreni spremnik taline tlači zrak niskog tlaka (**0.15 - 1.50 bara**). Tlak podiže talinu kroz vrat prema kokili. Grijači sa strane spremnika sprečavaju skrućivanje taline u vratu. Po početku stvaranja krutine u kalupu, tlak zraka u spremniku se smanjuje te se na taj način smanjuje i razina taline u vratu; omogućeno je izmicanje kalupa s odljevkom i postavljanje novog kalupa na ušće vrata. Po potpunom skrućivanju odljevka, kalup se otvara i oslobađa odljevak. Usmjereno skrućivanje postiže se ispravnom konstrukcijom kalupa.



**Slika 13.** Shematski prikaz procesa niskotlačnog lijevanja [7]

Postupkom niskotlačnog lijevanja izrađuju se dijelovi automobila (glave cilindara, blokovi motora, kućišta), konstrukcijski zahtjevni i složeni dijelovi zrakoplova, kućišta elektromotora, kuhinjski lonci pod tlakom, itd. Veća masa potencijalnog odljevka izrađenog ovim postupkom znatno podiže i cijenu kalupa. Kalup bi morao biti i izrađen od posebne **pješčane mješavine**, umjesto od **metala**.

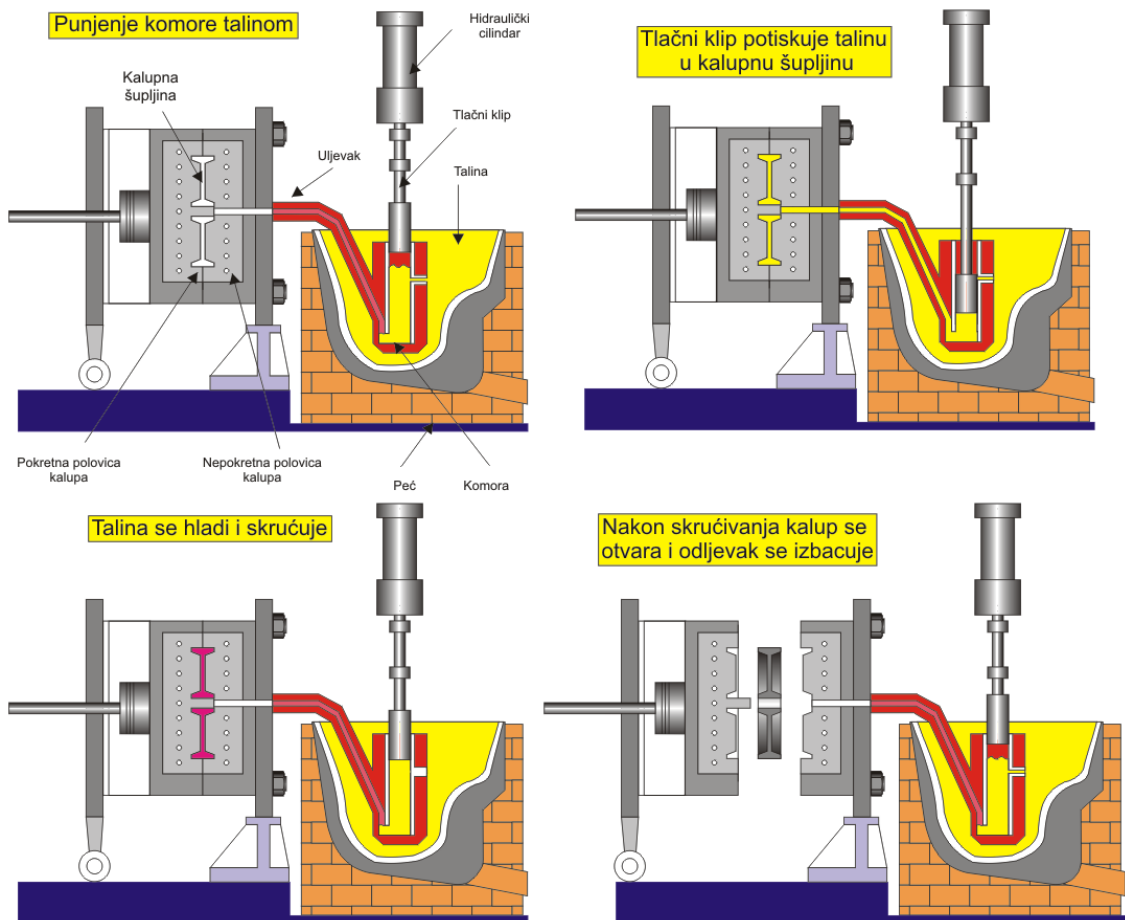
#### POSTUPCI VISOKOTLAČNOG LIJEVANJA

Razvoj postupaka visokotlačnog lijevanja potaknut je potrebom za izrađivanjem odljevaka slova i riječi tiskarskih strojeva još sredinom 19. stoljeća. Daljnja primjena kroz povijest vodi ka izrađivanju različiti dijelova automobila (zupčanika), što svakako utječe i na daljnji razvoj strojeva za visokotlačno lijevanje. Današnji, moderni strojevi za visokotlačno lijevanje, s obzirom na način dobave taline u tlačni cilindar, mogu se podijeliti u dvije skupine:

- Strojevi s toplom komorom,
- Strojevi s hladnom komorom.

#### POSTUPAK VISOKOTLAČNOG LIJEVANJA S TOPLOM KOMOROM

Glavni dijelovi stroja za ovaj postupak lijevanja čine: spremnik taline, tlačni cilindar i mlaznica.



**Slika 14.** *Tijek procesa visokotlačnog lijevanja s toplom komorom* [8]

Tlačni cilindar nalazi se unutar spremnika taline pa je njegov otvor za ulazak taline kontinuirano uronjen u talinu. Talina usisana u tlačni cilindar uz pomoć klipa se tlači u kanal posebne konstrukcije i dovodi do mlaznice. Kada se kalup popuni, on se uklanja i na njegovo mjesto se postavlja sljedeći kalup. Ulaz taline u tlačni cilindar se omogućava podizanjem klipa prema gore. Ulaz talini se zatvara kada se cilindar napuni, a klip iznova tlači talinu prema kalupnoj šupljini. Tlakovi kojima se talina tlači u ovom postupku iznose oko **400 bara**.

Opisana konstrukcija stroja nije primjenjiva za lijevanje svih lakih legura. Budući kontakt taline s tlačnim dijelovima stroja traje razmjerno dugo, primjena ovog procesa lijevanja ograničen je na legure na bazi cinka i magnezija.

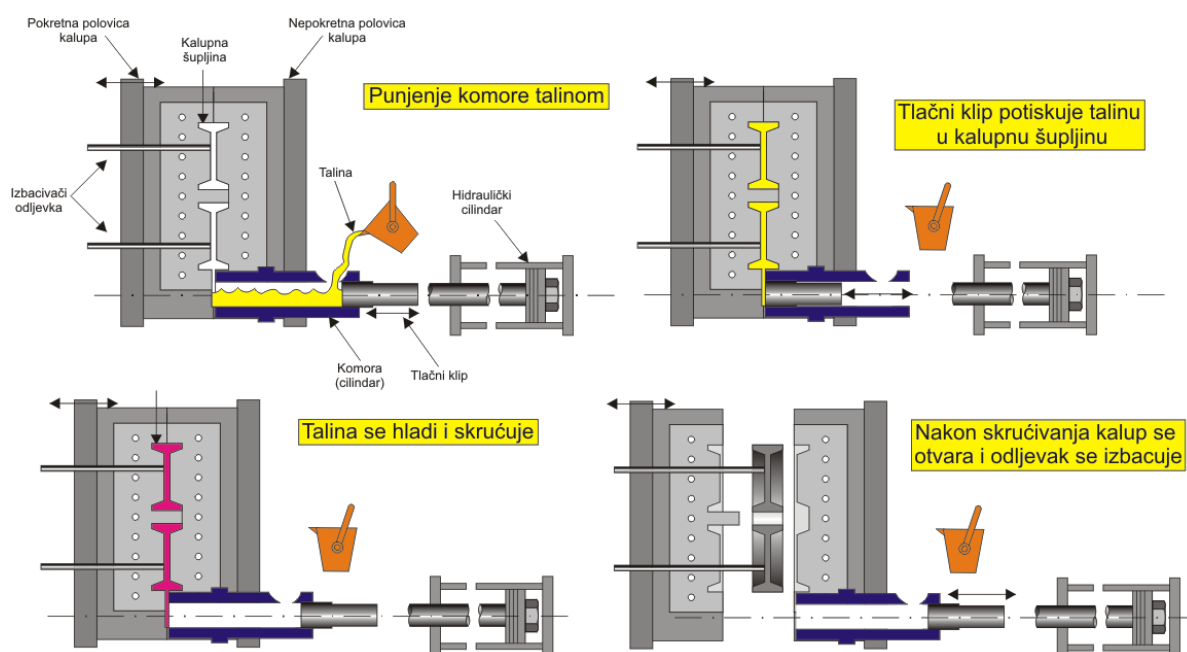
#### POSTUPAK VISOKOTLAČNOG LIJEVANJA S HLADNOM KOMOROM

Ovaj proces se u početnom periodu razvijao za lijevanje legura cinka. Danas, pak, za izradu odljevaka ovim procesom prevladavaju legure na bazi aluminija, a mogu se lijevati i legure na bazi bakra i magnezija.



Postupak lijevanja započinje punjenjem cilindra. Klip potom tlači talinu koja kroz mlaznicu popunjava šupljinu kalupa. Tlak taline u tom trenutku iznosi oko **1500 bara**. Nakon formiranja (skrućivanja) odljevka, od kalupa ga odvajaju ugrađeni izbacivači. I pored ovog konstrukcijskog rješenja, stjenke kalupa se prije lijevanja premazuju grafitnom ili MoS<sub>2</sub> (molibden – disulfid) otopinom. Ovi premazi pogoduju i procesu hlađenja.

Ovako visoki tlak taline može generirati turbulentno strujanje pri ulazu u kalupnu šupljinu i miješanje taline sa zrakom. Zaostali zrak u talini može pogodovati nastajanju mikroporoziteta odnosno formiranju mikropukotina u budućem odljevku. Velike brzine strujanja taline mogu **erodirati** stjenke kalupa i povećati turbulencije. Pri nedovoljno velikim brzinama postoji opasnost od nedovoljnog ispunjenja kalupa talinom.



**Slika 15.** *Tijek procesa visokotlačnog lijevanja s hladnom komorom* [8]

Kod navedenih postupaka visokotlačnog lijevanja masa stlačene taline u kalupnoj šupljini može varirati od nekoliko grama pa do desetak kilograma.

Broj ciklusa lijevanja ovim postupcima može doseći i broj od 1000 komada na sat za manje odljevke. Pri projektiranju tehnologije lijevanja ovim postupcima treba imati na umu da postupak visokotlačnog lijevanja za izradu kompleksnih odljevaka tankih stijenki nije pogodan za izradu odljevaka debljih stijenki (> 6 mm), ili lijevanje masivnih odljevaka. Postoje određena konstrukcijsko – tehnološka ograničenja u tim slučajevima koje nije moguće zaobići.

Kao uspješan primjer provođenja procesa proizvodnje tlačnim lijevanjem s hladnom komorom može poslužiti tvornica LTH Metalni lijev d.o.o. [9] iz Benkovca, koja se bavi proizvodnjom automobilskih dijelova od legura aluminija i sudjeluje u izveznoj robnoj bilanci RH sa preko 25 milijuna € vrijednosti proizvoda za renomirane svjetske partnere, odnosno automobilske korporacije kao što su BMW i Mercedes.

Osnovni materijal za lijevanje su tri legure aluminija (Al 226, Al 231 i 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). Oblikovanje proizvoda (ubrizgavanje taline) vrši se radnim strojevima sa silama zatvaranja kalupa od 3400 – 12000 KN. Strojevi su i kategorizirani prema silama zatvaranja, ali i prema načinu primjene. Tako razlikujemo CNC i NAMJENSKE strojeve, s razlikama u postavi (*set up*) i veličini proizvodne serije. Praćenje cjelokupne proizvodnje odvija se preko kontrolnih procesa (npr. hlađenje rotometara), od automatske kontrole preko kontrolnih planova do korekcija i dorada.

Završna strojna obrada odljevaka izvodi se tokarenjem i tehnofinišem. Završnoj obradi odljevaka prethodni operacija pjeskarenja.

Proces je, kao takav, općenito visoko automatiziran i robotiziran. I u tvornici LTH Metalni lijev, postoji veliki broj robotiziranih uređaja za prihvata i hlađenje odljevaka u rashladnoj tekućini.



**Slika 16.** *Primjer čeličnog kalupa za tlačni lijev tvrtke Tontye Technologies Co., Ltd.*



**Slika 17.** *Robotizirani uređaj za prihvata i hlađenje odljevaka [9]*

Roboti koji se u pravilu koriste za manipulaciju odljevcima kod tlačnog lijevanja izrađeni su sa IP67 certificiranom zaštitom za rukovanje vrućim metalnim odljevcima te za rad u okruženju visokih temperatura, kapanja vrućih tekućina i ulja za podmazivanje. Prvenstvena funkcija im je ekstrakcija gotovih vrućih odljevaka iz alata (kalupa) te premještanje u proces za hlađenje, skidanje ostatka materijala i slaganje na palete i trake. Korištenjem robota za tlačni lijev smanjuje se izlaganje ljudi opasnom okruženju i istovremeno se povećava produktivnost procesa i preciznost tijekom radnih operacija.



**Slika 18.** Roboti za prihvrat i hlađenje odljevaka, modeli KUKA [10]

Aluminijskim legurama spomenutim i korištenim u navedenom primjeru tlačnog lijevanja mogu se pridodati i legure iz reda UNS A03XXX [11] legiranih određenom količinom silicija i bakra.

Aluminij se lijeva obično pri temperaturama od 650 °C. Legiran sa 9% silicija i sa oko 3.5% bakra, čini leguru UNS A03800 (AA 380). Silicij povisuje svojstvo livljivosti, ali smanjuje strojnu obradivost. Bakar povećava tvrdoću, a snižava svojstvo duktilnosti. Ako se udio bakra u leguri smanji značajno (na udio manji od 0.6%), kemijska otpornost se povećava; stoga se legura UNS A03600 (AA 360) pokazala dobrom za korištenje u morskom okolišu. Legure s više silicija koriste se za automobilske motore i lijevanje cilindara, npr. UNS A03900 (AA 390) sa 17% silicija i 4.5% bakra uslijed visoke otpornosti na trošenje. Tu su još i legure UNS A03840 (AA 384) sa 11% silicija i 4% bakra (dobra ispunjivost kalupa) te UNS A03860 (AA 386) sa 9.5% silicija i 0.6% bakra s dobrom otpornošću na koroziju.

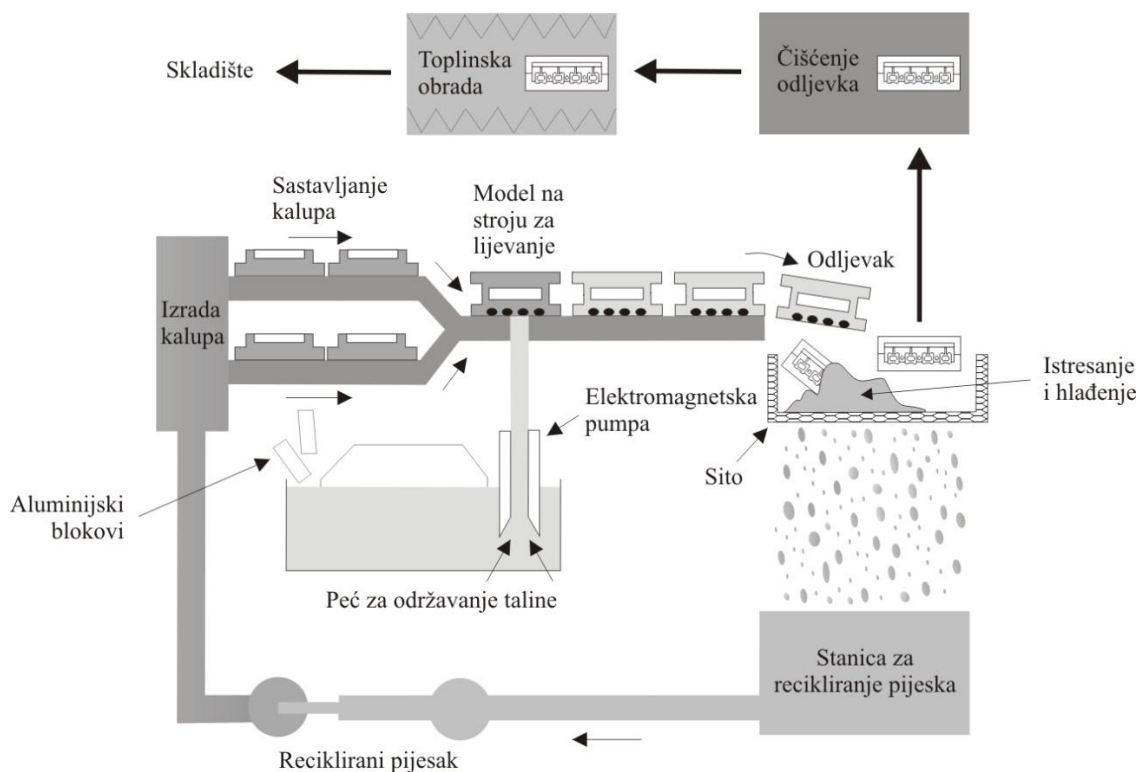
Odljevci od legura cinka odlikuju se uskim tolerancijama i tanjim stjenkama nego aluminijski odljevci, uslijed visoke fluidnosti taline. Cink se legira s aluminijem (4%), što doprinosi čvrstoći i tvrdoći odljevaka. Cink se lijeva pri temperaturama od 425 °C, pa se odljevak ne mora dugo hladiti prije izvlačenja iz kalupa (lijevanje s toplom komorom).

Legure cinka se uglavnom koriste za lijevanje elemenata lančanika, zupčanika i kućišta spojki.

## COSWORTH POSTUPAK

U postupke visokotlačnog lijevanja, pored postupaka s hladnom i toplom komorom, spada i Cosworth postupak. Razvoj ovog postupka potaknut je iz automobilske industrije (1970 – tih), ponajviše kao proces za lijevanje aluminijskih legura – za vozila Formule 1. Zahtjevi su bili jasni: lagani dijelovi, visokih mehaničkih svojstava i uskih tolerancija. Postupak razvija engleska firma Cosworth Engineering Ltd., a velikoserijsku proizvodnju ovim postupkom prvi put ostvaruje tvrtka Ford Motor Company pri proizvodnji blokova motora s unutarnjim izgaranjem od aluminija.

Ciklus lijevanja Cosworth postupkom započinje dovođenjem taline u kalupnu šupljinu uz pomoć elektromagnetske pumpe i to s donje strane kalupa. Kalupna šupljina se tako popunjava bez turbulencija. Kalup, kao važan segment ovog procesa, ne izrađuje se od metala, već od mješavine reciklirajućeg cirkonijskog pijeska. Postupak lijevanja kreće pri dovođenju kalupa u ljevački stroj, gdje se talina uz pomoć elektromagnetske pumpe ubrizgava u šupljinu kalupa. Za potrebe velikih serija, kalupi se mogu postaviti na okretni stol koji odlaže kalup, nakon ubrizgavanja taline, i postavlja na isto mjesto drugi kalup. Okretni stol ujedno i rotira kalup prilikom odlaganja oko svoje osi za 180°, pa kanali za brizganje taline postaju pojila za napajanje odljevaka tijekom procesa skrućivanja.



**Slika 19.** Shematski prikaz procesa lijevanja Cosworth [7]

Odljevci izrađeni ovim postupkom ističu se visokom razinom dimenzijske preciznosti, visokom kvalitetom površine bez većih dodatnih zahtjeva obrade, te izvrsnim mehaničkim svojstvima.

Od ostalih postupaka visokotlačnog lijevanja treba spomenuti lijevanje polukrutom talinom odnosno talinom u obliku “kaše“, sastavljene od krute i tekuće faze. Kruta faza je zastupljena u “kaši“ s udjelima od 5 do 65%. Postupci lijevanja polukrutom talinom spadaju u najmodernije postupke lijevanja, najčešće aluminijevih i magnezijevih legura. Razvijena su dva postupka lijevanja (polukrutom) talinom [7]; **rheocasting i thixocasting**. Osnovna razlika ovih postupaka jest u načinu pripreme polukrute taline.

Uz njih, valja spomenuti i postupak lijevanja s naknadnim tlačenjem (skrućivanje pod tlakom).

## POSTUPAK RHEOCASTING

Nakon grijanja metala do čiste taline, talina se hladi do područja mješavine taline i krutine (između *liquidus* i *solidus* linije). Talina se tijekom hlađenja miješa pa se povećava brzina nastajanja novih klica u odnosu na brzinu rasta klica krutine koja već postoji. Važno je dobiti talinu u kojoj gotova da i nema dendritnih zrna. Po postignutom potrebnom odnosu krute i tekuće faze, metalna kaša se ubrizgava u kokile. Za vrijeme lijevanja, talina se miješanjem i dogrijavanjem zadržava u kašastoj fazi.

Formirani odljevak sastoji se od primarne ( $\alpha$ ) faze izlučene u temperaturnom intervalu *liquidus* - *solidus*, te finog eutektikuma (*eu*). Ovim postupkom smanjeno je **trošenje** kalupa radi nižih temperatura lijevanja, a struktura odljevaka je iznimno rafinirana, uslijed minimalnog učinka toplinskog stezanja. Ipak, ovim postupkom se mogu ljevati samo metali nižeg tališta i užeg temperaturnog područja skrućivanja.

## POSTUPAK THIXOCASTING

Za proizvodnju osnovnih trupaca za postupak *thixocasting* koristi se proces kontinuiranog lijevanja po modelu *rheocasting*. Pripremljeni metalni trupci zagrijavaju se u područje između *liquidus* i *solidus* temperatura. Zagrijavanje se vrši do temperature kada odnos faza *talina* - *krutina* postane pola - pola. Tako pripremljena “kaša“ kroz tlačni cilindar se tlači i provodi do kalupne šupljine.

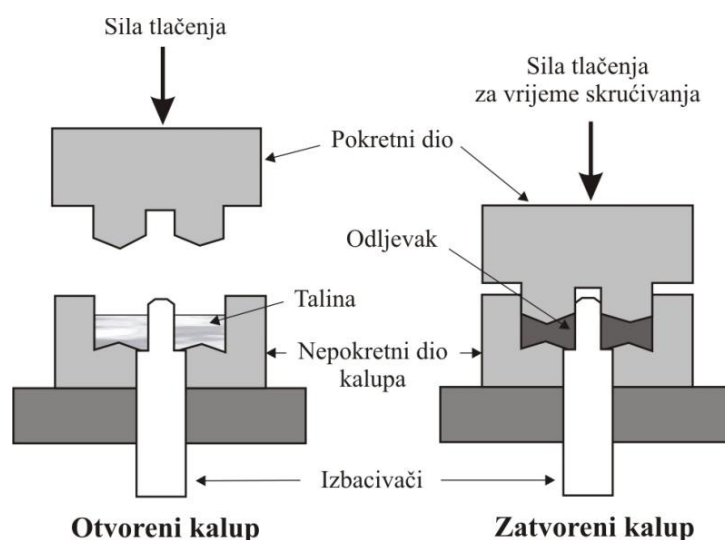
Iz dvije peći za pripremu polukrute taline nastavljaju se dvostruki pužni transporter koji su spojeni na spremnik gotove taline na kojeg se dalje nastavlja kokila za lijevanje trupaca

kontinuiranim načinom. Dimenzije rezanih trupaca prije daljnjeg zagrijavanja ovisi o zahtijevanom volumenu budućeg odljevka.

I kod ovog postupka bilježe se dobra svojstva odljevaka kao i kod *rheocasting* procesa, uz niske troškove energije potrebne za pripremu taline. U direktnoj usporedbi ova dva procesa, *rheocasting* proces ima određene prednosti: jednostavniju opremu za lijevanje, mogućnost izrade odljevaka većih dimenzija, a mogućnost nabave sirovina za izradu legure znatno je veća nego pri nabava trupaca. Također, udio krutine prilagodljiv je potrebama lijevanja, dok su mogućnosti prilagodbe količinskih udjela krutina - talina kod trupaca ograničene.

## POSTUPAK LIJEVANJA S NAKNADNIM TLAČENJEM - SKRUĆIVANJE POD TLAKOM

Ovaj proces čine dva povezana tehnološka postupka prerade metala.



**Slika 20.** Shematski prikaz procesa lijevanja s naknadnim tlačenjem (*Squeeze casting*) [7]

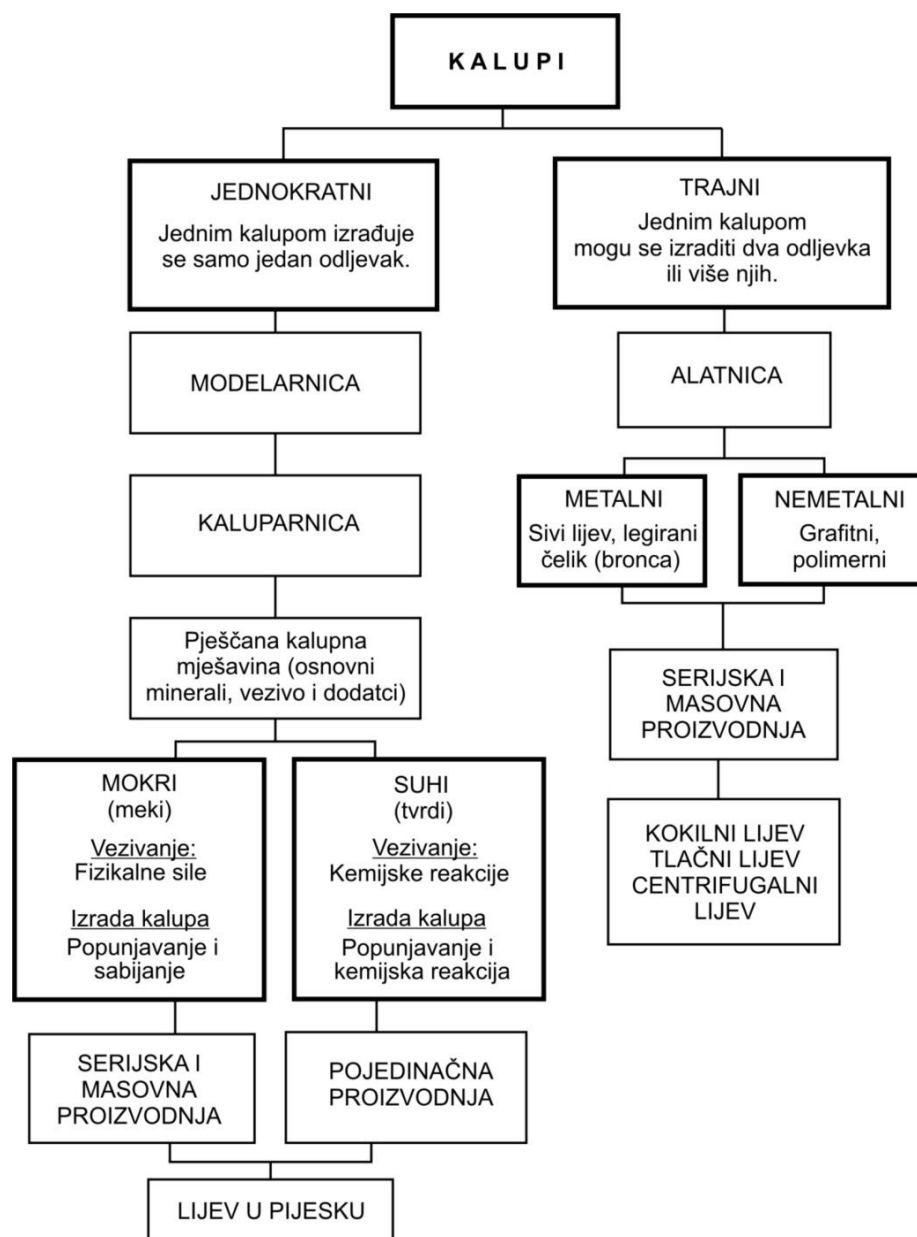
Prvi postupak predstavlja ulijevanje taline donji dio kalupa. Po završetku prvog postupka, slijedi zatvaranje kalupa gornjakom i tlačenje taline tijekom cijelog vremena trajanja procesa skrućivanja.

Postupkom stalnog tlačenja taline tijekom procesa skrućivanja uspješno se otklanjaju problemi mikroporoznosti nastalih u odljencima i problemi toplinskog skupljanja metala pri formiranju masivnijih odljevaka. To su problemi svojstveni za klasične postupke tlačnog lijevanja, budući su intenzitet skrućivanja i složenost prolaza taline oko nastalih dendrita ograničavajući parametri strujanja i napajanja određenih dijelova kalupne šupljine.

## 2.2 Svojstva materijala kalupa za tlačno lijevanje

Kalupi moraju biti projektirani i konstruirani [6] (oblikovani) tako da mogu ispuniti četiri osnovne funkcije. (Projektiranje i konstruiranje u ovom smislu znače i primjeren odabir materijala izrade).

U prvom redu, kalup mora biti u stanju održati talinu u obliku budućeg odljevka. Kalup, također, mora biti konstruiran tako da omogući put talini do kalupne šupljine. Nadalje, kalup treba biti u stanju odvoditi toplinu tijekom lijevanja. Naposljetku, kao važno svojstvo treba spomenuti i sposobnost da se formirani odljevak odvoji iz kalupa po završetku procesa.



**Slika 21.** Općenita podjela kalupa za lijevanje [7]

Kada se govori o metalnim kalupima, standardni kalup za tlačno lijevanje može izdržati i 500 000 “udaraca“ tijekom radnog vijeka, za koje vrijeme na njega veliki utjecaj čine različiti parametri. Udarac se broji svaki put kada talina ulazi u kalup. Udarci se razlikuju od slučaja do slučaja budući kalupi mogu varirati od jednostavnih do složenijih u smislu geometrije, broja i oblika šupljina unutar kalupa koje talina treba ispuniti.

Lijevanje aluminijskih i njegovih legura uglavnom skraćuje radni vijek kalupa uslijed visokih temperatura taline, ali i drugih važnih utjecajnih parametara, što rezultira **istrošenjem** kalupa. S druge strane, kalupi za tlačno lijevanje cinka traju gotovo beskonačno uslijed niskih temperatura lijevanja cinka i njegovih legura. U slučajevima tlačnog lijevanja legura bakra, kalupi najkraće traju, bez obzira što se kao materijal za izradu kalupa već uvriježeno koriste najprimjereniji **alatni čelici za rad u toplom stanju** (eng. *hot work alloy steels*).

Kada se izbor materijala za izradu kalupa promatra s gledišta geometrije kalupa i njezine postojanosti tijekom procesa lijevanja, jasno je da su **čvrstoća** kalupa kao i njegova **krutost** od iznimne važnosti. Materijal kalupa mora jamčiti nepromjenjivost dimenzija kalupa odnosno odljevka i prilikom povišenih temperatura lijevanja. Također, budući se radi o kalupima za lijevanje pod tlakom, s radnim tlakovima od više stotina bara i silama zatvaranja kalupa od više tisuća KN, materijal kalupa mora imati i određenu **žilavost**. Sve to izbor materijala čini složenijim uvođenjem dodatnih kriterija, što u konačnici rezultira smanjenim brojem ukupnih (konačnih) varijanti izbora.

S izuzetkom *Cosworth* postupka lijevanja, za sve ostale postupke tlačnog lijevanja u pravilu se koriste metalni kalupi. Kod *Cosworth* postupka, uslijed specifične tehnologije lijevanja, najbolje odgovaraju kalupi izrađeni od cirkonijskog pijeska. Za razliku od drugih pješčanih mješavina, cirkonijski pijesak jamči visoku temperaturnu otpornost te nepromjenjivost dimenzija kalupa s obzirom na djelovanje topline. Najveći postotak ove mješavine čini cirkon – silikat (99 %). Mješavina se odlikuje izuzetnom vatrostalnošću (temperatura taljenja je iznad 2200°C), malim koeficijentom toplinskog širenja te niskom sposobnošću upijanja taline (kvašenja). Po završenom ciklusu lijevanja, pijesak se reciklira i iznova koristi za izradu kalupa.

Konstrukcija metalnih kalupa za postupke tlačnog lijevanja predstavlja značajan konstrukcijski izazov i zahtjeva spoj znanja i stečenih iskustava pri oblikovanju i izradi istih. Veliki broj kriterija prilikom postupka konstruiranja i oblikovanja metalnih kalupa trebaju biti zadovoljeni. Pri tome, iznimno važno je držati se već prokušane metodologije izbora prikazane **općim metodološkim procesom** kroz osam naglašenih točaka koje uzimaju u



obzir najvažnije (sve) relevantne parametre izbora, poredanih kronološkim slijedom prema važnosti.

U ovom radu, kao jedan od najvažnijih kriterija izbora materijala izrade kalupa biti će **otpornost na trošenje**, odnosno otpornost na mehanizme trošenja prepoznatih na karakterističnom primjeru postupka tlačnog lijevanja, kao što je niskotlačno lijevanje s hladnom komorom. To je tehnologija s kojom se susrećemo u tvornici LTH Metalni lijev Benkovac, kojom se izrađuju velike serije odljevaka od aluminijskih legura za potrebe svjetskih automobilskih konzorcija kao što su Mercedes i BMW.

### 3. Izbor materijala prema općem metodološkom procesu

#### 1. ANALIZA KONSTRUKCIJSKOG ZADATKA

Prva od osam točaka općeg metodološkog procesa izbora materijala ima prvenstveno za cilj definirati o kakvom tipu proizvoda se radi. Da li je riječ o već poznatom proizvodnom konceptu ili se treba razraditi vlastita razvojna studija proizvoda. Razlika je značajna, budući je za proizvode s već razrađenom konstrukcijskim modelom materijal izrade već iskustveno poznat ili u načelu definiran.

Tip konstrukcije o kojoj je ovdje riječ (kalup za tlačno lijevanje), može biti, i najčešće jest, razvijan kao sastavni dio koncepta sustava tipizacije ili standardizacije dijelova. Dakle, radi se o tipu proizvoda s postojećom, **razrađenom konstrukcijom**, promatrano u širem smislu. To znači da su projektna dokumentacija, tehnička i software-ska infrastruktura s računalnim modelima, te odgovarajući proizvodni postupci izrade već razvijani za proizvode (alate) ovog profila. Eventualne modifikacije i prilagodbe postojećih rješenja za naš traženi proizvod ovisiti će ponajviše o postavljenim temeljnim kriterijima koje alat treba zadovoljiti u radu.

#### 2. ODVAJANJE ZAHTJEVA I KRITERIJA VREDNOVANJA MATERIJALA IZ SKUPA ZAHTJEVA I VREDNOVANJA PROIZVODA

Pri ovoj točki vrlo je važno definirati tražena svojstva materijala izrade u cilju postizanja zahtijevane kvalitete konačnog, odnosno traženog proizvoda.

Naime, analizirajući ovaj konkretan proizvod (kalup za tlačno lijevanje), treba istaknuti svojevrsni fenomenološki otklon od standardnog, jednoznačnog, koncepta izbora materijala izrade. Materijal *jezgre*, ili bolje rečeno, tijela alata (kalupa) treba biti u mogućnosti ispuniti ključne zahtjeve **čvrstoće (krutosti) i žilavosti** tijekom uvjeta eksploatacije, odnosno višekratnog ponavljanja ciklusa lijevanja pod tlakom. No, to ne znači da gotov *proizvod*, kalup, ne treba ispuniti još neke zahtjeve pored navedenih, a koje osnovni materijal jezgre često neće biti u mogućnosti ispuniti.

Gotov proizvod, u ovom slučaju, čine osnovni materijal; s definiranim i ispunjenim kriterijima očekivanja, ali i modificirana površina osnovnog materijala određenim tehnološkim postupcima (toplinska obrada, termo - reaktivni postupci otvrdnjavanja, termo - kemijsko - difuzijski postupci obrade površine), u cilju zadovoljavanja ostalih traženih zahtjeva i kriterija kao što su **visoko - temperaturna otpornost, otpornost na trošenje,**

**geometrijska i dimenzijska postojanost na povišenim temperaturama** itd. Iz navedenog je vidljivo da se tražena svojstva konačnog proizvoda mogu razlikovati od svojstava osnovnog materijala izrade, o čemu se u ovom konkretnom slučaju, upravo i radi. Osnovno stanje materijala jezgre (tijela) kalupa u uvjetima eksploatacije, često nije moguće optimirati samo po sebi, u cilju ispunjenja traženih zahtjeva proizvoda.

Upravo ovakav pristup odabiru traženih zahtjeva materijala i gotovog proizvoda pruža dodatnu mogućnost analize pristupačnih materijala za izradu, pri tome uključujući i dodatne mogućnosti i tehnologije formiranja, dorade ili, kao u ovom slučaju, poboljšanja svojstava osnovnog materijala u odnosu na konačni proizvod. Razlozi za to moraju biti jasno definirani: ekonomičnija i tehnološki prihvatljivija metodologija oblikovanja konačnog proizvoda i dakako, njegova proizvodnja.

### 3. IZBOR I RANGIRANJE KRITERIJA S PRESLIKOM NA SVOJSTVA POTREBNA ZA USPOREDBU MATERIJALA ILI ZA VREDNOVANJE PROIZVODA S GLEDIŠTA MATERIJALA

Rangiranje kriterija izbora materijala nije jednostavan zadatak. No, ako se pomno prouče osnovne skupine kriterija iz prethodnog poglavlja (funkcionalnost, tehnoložnost, eksploataбилnost, itd.), i imajući u vidu već prethodno spomenute glavne karakteristike kalupa za tlačno lijevanje, kriteriji izbora se mogu lakše poredati po prioritetima.

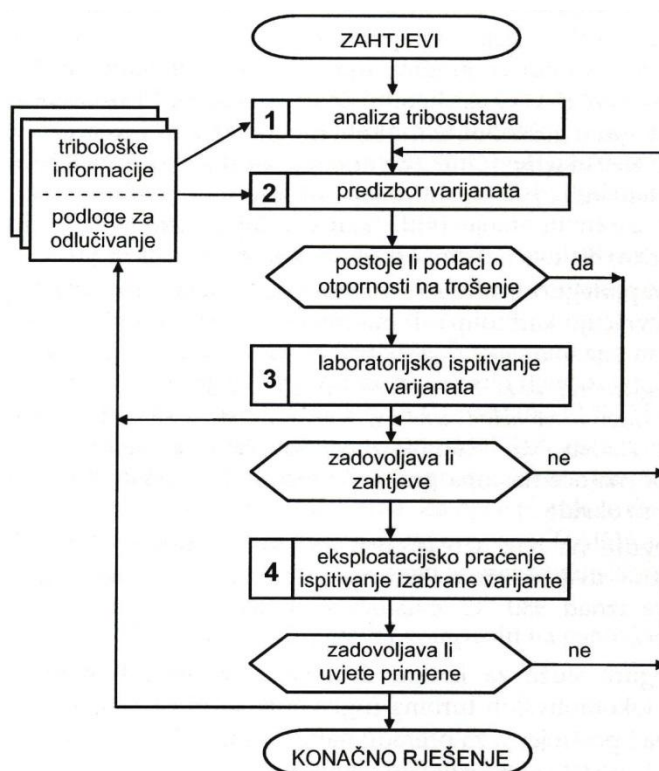
Mogućnosti kalupa da budu funkcionalni pri radnim uvjetima lijevanja pod tlakom čine funkcionalnost kao najvažniji i jedan od najsveobuhvatnijih kriterija izbora materijala.

**Funkcionalnost** – materijal kalupa za tlačno lijevanje mora biti čvrst (krut), žilav i postojan na povišenim temperaturama. To su nužni uvjeti funkcioniranja kalupa u radnom okruženju. No, postoje i dodatni uvjeti koji su vezani za otpornost površine kalupa na različite mehanizme trošenja a vezani su također za funkcionalnost kao postavljeni kriterij.

Cijela povijest tribologije kao stručne discipline koja se bavi problematikom trenja i trošenja materijala, ukazuje na važnost ovih pojava na cjelokupni proizvodni sustav. Dakle, definicije mehanizama trenja i trošenja u fizikalnom ili mehaničkom smislu, nužno u sebi sadrže i energetska komponentu. Trenje, iako neophodno za hodanje i gotovo sve oblike transporta na zemlji, uzrokuje značajne gubitke energije. Nadalje, 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, preko pojedinačnih sustava alat – stroj, do cjelokupne proizvodne linije i pogona za proizvodnju.

Uzimajući u obzir različite mehanizme i slučajeve trošenja, promatrajući kalup i stroj za lijevanje pod tlakom kao jedan specifičan tribosustav, nalazimo nekoliko modela trošenja kalupa svojstvenih za tlačno lijevanje. Uz to, radeći analizu trošenja alata (kalupa) u slučaju tribosustava proizvodnog pogona tvornice LTH Metalni lijev, odnosno kalupa za tlačni lijev u hladnoj komori, dobit će se jasna slika modela trošenja kalupa izrađenih za tu svrhu.



**Slika 22.** Dijagram toka izbora materijala za dijelove tribosustava [1]

Prepoznati mehanizmi trošenja kalupa u tvornici LTH Metalni lijev [12] su **umor površine** i **erozija kapljevnom** i to kao prevladavajući mehanizmi trošenja. Uz navedeno, treba spomenuti i toplinske dilatacije koje nastaju tijekom izmjena ciklusa lijevanja (**toplinski šok**). Tablica učestalosti vrsta oštećenja tijekom eksploatacije u industrijskim postrojenjima ili na dijelovima kompleksnih uređaja ili strojeva daje uvid u ozbiljnost ovih pojava. Nadalje, spomenuti mehanizmi trošenja uzrokuju nastanak toplih pukotina na površini kalupa koje ponajprije uzrokuju nesavršenosti i odstupanja od dimenzija proizvedenih odljevaka, a potom i lom samih kalupa ukoliko uvedeni sustavi kontrole kvalitete i održavanja te primjerena tehnologija popravka na vrijeme ne otkriju i saniraju pukotine.

Vrsta oštećenja	% Oštećenja	
	Industrijska postrojenja	Dijelovi zrakoplova
korozija	29	3
lom od umora	25	61
krhki lom	16	-
preopterećenje	11	18
visokotemperaturna korozija	7	2
napetosa korozija	6	8
puzanje	3	-
trošenje abrazijom i erozijom	3	7

**Slika 23.** Tablica učestalosti vrsta oštećenja tijekom eksploatacije [1]

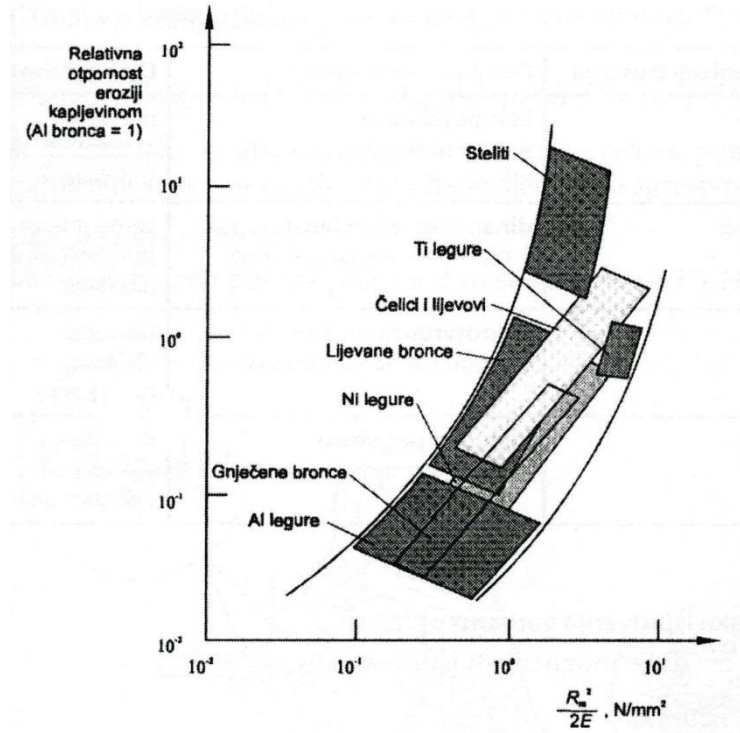


**Slika 24.** Trošenje materijala kalupa pri procesu lijevanja (tope pukotine) [12]

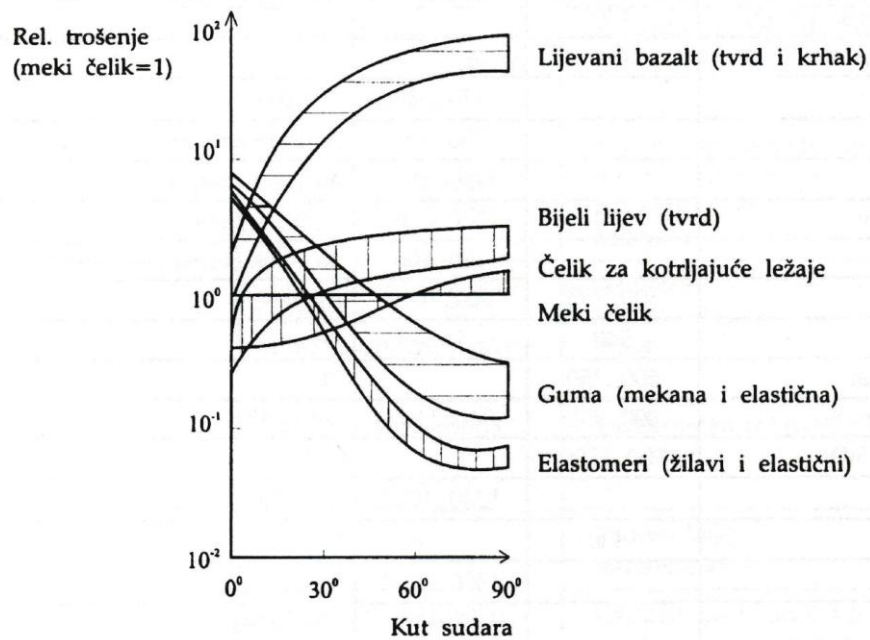


**Slika 25.** Učinak istrošenosti kalupa na odljevak (označeno crvenim linijama) [12]

Za tehnologije tlačnog lijevanja koje koriste tzv. "kašu", odnosno polukrutu talinu kao sirovinu za lijevanje odljevaka, (npr. postupci rheocasting i thixocasting), kalupi moraju biti učinkoviti i protiv još jednog mehanizma trošenja, a to je **erozija česticama**.



**Slika 26** . Dijagram relativne otpornosti nekih materijala na eroziju kapljevinom [1]



**Slika 27** . Dijagram relativne otpornosti nekih materijala na eroziju česticama [1]

Erozija česticama znači gubitak materijala s površine, u ovom slučaju kalupa, uslijed relativnog gibanja fluida (taline) koja sadrži i krute čestice. I kod ovog tipa erozije, razlikujemo **abrazivnu eroziju** (strujanje pod malim kutom u odnosu na površinu) i **udarnu eroziju**, pri kojoj čestice udaraju u površinu (kalupa) pod gotovo pravim kutom.

Nadalje, čvrstoća (krutost) i žilavost kalupa za tlačno lijevanje na povišenim temperaturama predstavljaju temeljne kriterije funkcionalnosti.

Pri tome treba naglasiti da pri sagledavanju ovih kriterija treba poznavati radnu temperaturu procesa lijevanja, odnosno temperaturu taline i kemijski sastav taline koja se koristi u nekom od postupaka tlačnog lijevanja. Zahtjevi za **temperaturnom postojanošću** materijala za izradu kalupa se bitno razlikuju ovisno o tome da li se lijevaju legure **cinka, magnezija ili aluminijska**. Zahtijevana temperaturna postojanost materijala kalupa u radu stoga može varirati od 400 – 750 °C što u praksi znači uporabu značajno različitih materijala, s gledišta kemijskog sastava, načina proizvodnje, mogućnosti nabave i cijene. Zahtijevana temperaturna postojanost pri ovoj analizi je postojanost materijala na **povišenim i visokim radnim temperaturama** koje se računaju prema izrazima:

- za povišene temperature:  $T_r = (0.25 \dots 0.4) \cdot T_t$  (1)

- za visoke temperature:  $T_r > 0.4 \cdot T_t$  (1)

Pri čemu je:  $T_r$  - radna temperatura,  $T_t$  - temperatura tališta materijala.

Iskustva pokazuju da se zadovoljavajuća mehanička svojstva materijala postižu do temperatura od  $2/3 \cdot T_t$ . Povišenom temperaturom u nastavku analize smatrat ćemo povišenu i visoku radnu temperaturu.

**Tehnologičnost** – vrlo važan kriterij, koji umnogome postupak izbora materijala pojednostavljuje. Naime, činjenica da se pojedini materijali mogu toplinski obrađivati, površinski poboljšavati ili dorađivati i popravljati s nekom od primjerenih tehnologija i postupaka obrade odvajanjem čestica, značajno utječe na konačni odabir materijala izrade kalupa.

Tehnologičnost u prvom redu, može učiniti odabir jednodimenzionalnim, budući jezgra (tijelo) kalupa i površina kalupa ne moraju biti od različitog materijala. U tom smislu mogućnost toplinske obrade osnovnog materijala najviše doprinosi. Nadalje, dvojnost tijela i površine materijala koja, kako je rečeno, ima za zadatak ispuniti važne mehaničke i fizikalne kriterije kalupa pri radu, u određenim slučajevima mora biti ispunjena. Kemijski sastav

materijala tijela kalupa treba biti dovoljno kompatibilan s kemijskim sastavom površinskog sloja (prevlake) da bi se već spomenutim metodama modifikacije površine formirala homogena struktura, postojanija i čvršća od mnogih drugih struktura sastavljenih od raznorodnih materijala (koji ispunjavaju zadane kriterije), spajanih različitim tehnologijama lijepljenja, srašćivanja, ili nekim drugim adhezivnim tehnologijama. Ukoliko je to moguće, odnosno ukoliko to radni zahtjevi dopuštaju, poželjno bi bilo odabrati materijale lijevanih ili kovanih formiranih površina umjesto onih obrađenih skupim postupcima odvajanjem čestica. Također, izbor standardiziranih dijelova konstrukcija kalupa bio bi od iznimne važnosti.

Prilikom određivanja svojstva tehnoložnosti materijala pri ovom izboru treba imati na umu više parametara. Na primjer, **tribološku kompatibilnost** [13] 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 [13].

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 površinskim modifikacijama 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) izložen radnim uvjetima. 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.



**Eksploatabilnost** – kao kriterij, može se promatrati kao integrativni; kroz njega se može sagledati nekoliko važnih svojstava materijala promatrajući ih kao jednu cjelinu; **ekonomičnost** (nabavljivost i cijena), **ekološkičnost**, **normiranost ili standardnost**, itd.

Sposobnost ili mogućnost korištenja nekog materijala za izradu kalupa za lijevanje pod tlakom svakako ima i svoju ekonomsku, ekološku pa i estetičnu komponentu. U slučaju kalupa za lijevanje pod tlakom, ekonomska isplativost usko je vezana za količinu odljevaka koja se može proizvesti s jednim setom kalupa, uvjetno rečeno. Proizvodnja tlačnim lijevom već u svojoj osnovi je vezana za proizvodnju velikih serija odljevaka i kao takva zahtijeva trajne kalupe, s garancijama lijevanja više tisuća odljevaka (ovisno o postupku lijevanja pod tlakom) bez potrebe zamjene (ili popravka) kalupa.

Promatrano s gledišta ekološkičnosti, važno je da alati, kalupi, uređaji i oprema potrebna za procese lijevanja tijekom i po završetku radnog vijeka ili ciklusa eksploatacije (masti i ulja za podmazivanje), nisu štetni za okoliš. U tom smislu postoje standardi i norme po kojima se vrši zbrinjavanje navedenih alata i maziva i koji su propisani sustavima kontrole kvalitete kakvi se danas nužno moraju provoditi u svim relevantnim proizvodnim sustavima. Ukoliko su i sami materijali standardizirani ili normirani, utoliko će biti lakše provoditi ove procese, a istovremeno će te materijale biti lakše i nabaviti, odnosno imati uvid u njihovu raspoloživost i cijenu na tržištu.

S gledišta estetičnosti, nije nevažno da izabrani materijali budu dimenzijski skladni, uglađene teksture ili boje. Ovaj kriterij jest pomalo teško kvantitativno izraziti, ali može značiti prevagu za konačni odabir u svijetu masovne proizvodnje i jasno, konkurencije na tržištu strojeva i alata, unutar kojih i ovi proizvodi spadaju.

#### 4. ELIMINACIJA NEPRIKLADNIH MATERIJALA (PO TIPU ILI VRSTI)

Ova točka općeg metodološkog procesa izbora materijala je, u svojoj biti, približavanje varijantama rješenja – metodom eliminacije. Testiranje prethodno uspostavljenih kriterija po najvažnijim grupama materijala, dati će odgovor koje grupe ili vrste materijala mogu odgovoriti na radne zahtjeve kalupa za lijevanje pod tlakom, a koje ne. Najvažniji prethodno uspostavljeni zahtjevi izbora materijala, odnosno temeljni kriteriji njegove funkcionalnosti su sljedeći:

- postojanost pri povišenim temperaturama,
- čvrstoća (krutost) pri povišenim temperaturama,

- žilavost pri povišenim temperaturama,
- otpornost na trošenje (abrazija, erozija, umor),
- otpornost na temperaturni šok.

S obzirom na to da izbor materijala kalupa za tlačni lijev nije sam po sebi do kraja preciziran, postoji mogućnost da više različitih tipova (ili više vrsta materijala) može ispuniti zadane zahtjeve izbora, budući postoji više postupaka lijevanja pod tlakom. Temperature lijevanja variraju od 400 – 750 °C, sile zatvaranja kalupa, tlakovi lijevanja, kemijski sastavi taline (legure cinka, aluminijska, magnezij) pa i veličine zadanih serija odljevaka. Stoga, izbor se može obaviti načelno. Ali na konkretnom primjeru tlačnog lijeva s hladnom komorom tvornice LTH Metalni lijev, uz poznate parametre lijevanja, izbor može biti izvršen i konkretnije, te na tom primjeru i temeljitije analiziran.

**METALI** - materijali koji, općenito govoreći, zadržavaju dobra mehanička svojstva pri povišenim temperaturama, imaju mali pad čvrstoće pri povišenim temperaturama, visoku dinamičku izdržljivost, visok modul elastičnosti pri povišenim temperaturama eksploatacije uz nisku toplinsku rastezljivost i stoga male promjene dimenzija. Upravo modul elastičnosti predstavlja **konstantu metalnih materijala**. Vrijednost modula ostaje jednaka bilo promjenom sastava ili strukture. Kada se govori o metalima, u radnim uvjetima kakvi su zadani u ovom slučaju, (kao vrsta ili podgrupa) dobro odgovaraju legure željeza i ugljika odnosno **čelici**. Ovo je načelna konstatacija, jer čelika ima više vrsta i nisu nužno oni s prevladavajućim udjelom željeza u kemijskom sastavu i primjeren izbor, ali su zasigurno jeftinija varijanta. Čelici su materijali širokog spektra [1]; ima ih od mekih, nelegiranih i niskolegiranih jeftinijih vrsta, do visokolegiranih, visokočvrstih, žilavih, tvrdih i na trošenje izrazito otpornih vrsta. Ono što je pri ovom izboru od iznimne važnosti jest da svoja dobra i u ovom slučaju, upotrebljiva svojstva, mnoge vrste čelika mogu zadržati i na povišenim temperaturama.

Mikrostrukturna stabilnost predstavlja najvažniju ulogu pri zadržavanju svojstava na povišenim radnim temperaturama. Na višim temperaturama raste pokretljivost atoma i dislokacija, kao i ravnotežna koncentracija praznina. Samo je mali broj legura **stabilan** pri povišenim temperaturama i to dulje vrijeme. U tome pomaže legiranje karbidotvornim i nitridotvornim elementima (Cr, W, V, Ti, Nb, Mo), očvršćivanje kristalima mješancima, izbor legura s FCC rešetkom (austenitni čelici i superlegure na bazi nikla) čija je pokretljivost atoma manja nego kod BCC rešetke.

Legure s navedenim svojstvima u, za ovaj izbor odgovarajućem, širokom temperaturnom rasponu od 370 – 1000 °C, bile bi sljedeće:

- Mo, Cr – Mo, Cr – Mo – V čelici s niskim udjelom legirnih elemenata,
- austenitni Cr – Ni nehrđajući čelici s dodatnim legirajućim elementima,
- austenitne Ni – legure, Co – legure, Ni – Co legure,
- Fe – Ni – Cr – Mo legure,
- Co – Cr – Ni legure,
- Mo – legure, Ti – legure itd.

Otpornost na trošenje kao svojstvo materijala nije moguće jednostavno utvrditi. Tako je i slučaj s metalnim, odnosno čeličnim materijalima. Svaki proces trošenja događa se u mikrosvijetu, pa odlučujući utjecaj na proces trošenja imaju određena svojstva mikrostrukture promatranog materijala. Teško je utvrditi otpornost materijala na nastanak pukotina kao posljedice trošenja, a otpornost širenju pukotina još je neizvjesnije. Kompromis se nalazi u traženju osnovnog materijala (čelika) koji ispunjava ostale važne zahtjeve, a da bi se postigla i odgovarajuća otpornost na trošenje, i to na povišenim temperaturama, provodi se površinska zaštita od trošenja različitim postupcima modificiranja površine. **Čelik je izuzetno zahvalan materijal** za takav tip zahvata; i postoji čitav niz primjenjivih tehnologija za tu svrhu (termokemijski postupci cementiranja, boriranja, nitriranja, vanadiranja, zatim navarivanja, površinskog kaljenja, laserskih obrada površine, kemijskih i fizikalnih nanošenja slojeva iz parne faze – CVD i PVD postupci, itd). Laboratorijskim izborom varijanti, kako će se vidjeti i na konkretnim primjerima, može se tražiti optimalan spoj osnovnog čeličnog materijala i primjerene površinske obrade u cilju postizanja najbližih mogućih svojstava onim zahtijevanim, odnosno radnim.

**POLIMERI** – pogodni su za izradu strojnih dijelova ili alata koji **nisu visoko** mehanički ni temperaturno opterećeni. Lako se oblikuju, dobre su kemijske postojanosti i imaju dobru sposobnost recikliranja. Polimeri ojačani vlaknima ispunjavali bi zahtjeve krutosti, specifične čvrstoće i kemijske postojanosti, ali samo do 200 °C. Tehnološka svojstva polimera u odnosu na metale **niža su** u većini kategorija: oblikovanje, obrada odvajanjem čestica, spajanje (zavarivanje), nanašanje zaštitnih navlaka, odnosno modifikacija površine u cilju bolje otpornosti na trošenje.

Mehanička svojstva polimera [1] bitno se razlikuju od metalnih (čeličnih) materijala. Neojačani plastomeri, na primjer, imaju vrijednost čvrstoće od svega **10 – 150 N/mm<sup>2</sup>**, što je razina niske čvrstoće (< 250 N/mm<sup>2</sup>). U prosjeku, čvrstoća većine polimernih materijala i varira u tom intervalu. O krutosti polimera više govori modul savitljivosti od modula elastičnosti. Krutost iznimno ovisi o temperaturi i trajanju opterećenja. Povišenje temperature od 20 do 100 °C uz trajanje opterećenja od 1 do 1000 sati izaziva **izrazito puzanje**. Moduli elastičnosti se posebno trebaju računati za vlačno, tlačno i savojno opterećenje.

Svojstvo visoke elastičnosti polimera čini ih puno složenijim od metala u uvjetima eksploatacije. Uslijed visokog stupnja prigušenja i male toplinske vodljivosti, pri svakom ciklusu opterećenja dolazi do grijanja i pri tome snižavanja modula elastičnosti. Materijal često prijevremeno popušta, prvenstveno uslijed napredovanja deformacije. Pukotine uslijed umora se najsporije šire kod polimera kristalične strukture, a najbrže kod epoksidnih smola. Upravo epoksidne smole imaju veliku čvrstoću i modul elastičnosti, ali nisku duktilnost i žilavost te slabu otpornost na umor. Ipak, općenito govoreći, polimeri se odlikuju dobrom kemijskom postojanošću. Povišenje temperature do svega 100 °C kod metalnih materijala ne mijenja bitno mehanička svojstva, dok kod većine polimera (plastomera) počinje znatno puzanje. Duromeri su nešto postojaniji pri povišenim temperaturama od plastomera. Ali govori se o prosječnim temperaturama postojanosti oblika od **30 – 260 °C**. Samo rijetki polimeri (duroplastični polimidi u kompozitima s ugljikovim vlaknima) mogu se koristiti i do 340 °C.

**KERAMIKE** – konstrukcijska keramika [1] ponajprije se koristi upravo za rad pri povišenim temperaturama i u uvjetima intenzivnog trošenja. Zahvaljujući tim svojstvima, keramika se nameće kao dobar izbor alata za oblikovanje, za rezne pločice (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), vatrootporne dijelove, dijelove ventila i komora za izgaranje (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), kao zaštitni sloj koji se naštrecavanjem nanosi na metalne dijelove motora, itd. Ima veliku čvrstoću i tvrdoću i pri povišenim temperaturama te dobru otpornost na koroziju.

Nedostatak keramike kao materijala je njezina velika **krhkost**. Također, svojstvo keramike iznimno važno pri ovom izboru je **mala otpornost na toplinski šok**. Uslijed brzih izmjena ciklusa lijevanja, te hlađenja i ponovnog grijanja kalupa, toplinske dilatacije vrlo su značajan parametar u procesu tlačnog lijevanja, što se reflektira i na kvalitetu i postojanost materijala kalupa. Svojstvo tehnološkičnosti keramikama nije povoljno; nisu “podatne“ za naknadnu obradu, pa ni za konstruiranje i proizvodnju u prvom redu, kao ni za postupke spajanja.

**KOMPOZITI** - materijali u načelu nastali kombiniranjem različitih materijala matrice (metali, superlegure, polimeri) i dodatka (ugljična vlakna, sintetirana vlakna, viskeri, itd.). Danas vrlo aktualni **metalni kompoziti** [1] (MMC) na bazi Al, Ti, Cu, Mg, u odnosu na homogene legure odlikuju se većom otpornošću na trošenje i mehaničkom otpornošću na povišenim temperaturama. Male su gustoće, a velike toplinske vodljivosti. Ovakvi kompozitni materijali dobivaju se postupcima metalurgije praha. Vlaknima pojačani metalni materijali odlikuju se visokom čvrstoćom i modulom elastičnosti, ali sniženom duktilnošću. No, prvenstveno se na ovaj način povisuje mehanička otpornost pri povišenim temperaturama. To se postiže legiranjem, formiranjem oksida i karbida u strukturi, te sinteriranjem. Čvrstoća ovih materijala u prosjeku je znatno viša od čvrstoće npr. polimera na sobnoj i povišenoj temperaturi.

**Polimerni kompoziti** [1] su kombinacija polimerne matrice (epoksidna smola) i ojačala (punila u obliku čestica ili vlakana). Vlakna su najčešće aramidna, borna, staklena i ugljična. Polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima (PMC) dostižu vrijednosti čvrstoće i do 1500 N/mm<sup>2</sup>. Ojačanja ugljičnim vlaknima daju najveće vrijednosti krutosti i čvrstoće. Upravo PMC kompoziti imaju najvišu specifičnu čvrstoću i specifičnu krutost od svih ostalih materijala. I vrlo su postojani pri djelovanju agresivnih medija i radnih sredina. Ovi kompozitni materijali imaju 5 do 10 puta veću prosječnu čvrstoću od polimernih materijala. Krutost polimernih kompozitnih materijala u načelu je nekoliko puta **manja** od čelika, ali veća ili jednaka krutosti Al – legura ili Mg – legura. Nadalje, parametar krutosti kod kompozita je relativan, budući se modul elastičnosti može mijenjati u vrlo širokom spektru vrijednosti, ovisno o materijalu matrice i orijentaciji ojačala (vlakana).

Sama vlakna za ojačavanje kompozitnih matrica (staklena, aramidna), na primjer, mogu imati specifičnu krutost i znatno višu od čelika. Temperaturna postojanost ovih materijala teško prelazi već spomenutih 340 °C (polimidi s ugljičnim vlaknima).

Treba kazati da postoji mogućnost projektiranja kompozitne strukture željenih sastava i tražiti optimalan odnos mogućnosti i traženih svojstava kompozita u radnim uvjetima. No, anizotropnost strukture kompozitnih materijala uvelike otežava realnu procjenu njihove visokotemperaturne otpornosti i postojanosti traženih svojstava u radnim uvjetima. Žilavost ovih materijala se, na primjer, može izraziti samo relativnim podacima. Svojstvo tehnološkosti ovih materijala je upitno iz razloga problematičnog izvođenja postupaka spajanja, odnosno konstrukcijskog oblikovanja samih materijala.

Temeljna svojstva funkcionalnosti potencijalnog materijala izrade kalupa za tlačni lijev određene grupe materijala zasigurno neće zadovoljiti. Radi lakšeg postupka eliminacije, u tabličnom prikazu bit će navedene sve relevantne grupe materijala i njihova tražena svojstva.

Tražena mehanička svojstva navedena u tablici odnose se na **povišenu** (radnu) temperaturu.

	POSTOJANOST	ČVRSTOĆA	KRUTOST	ŽILAVOST	OTPORNOST NA TROŠENJE (EROZIJA, ABRAZIJA, UMOR)	TEMPERATURNI ŠOK
METALI	+	+	+	+	+	+/-
POLIMERI	+/-	-	-	-	-	-
KERAMIKE	+	+	+	-	+	-
KOMPOZITI	+	+/-	+/-	+/-	-	-

**Slika 28 . Usporedna tablica grupa materijala i temeljnih svojstava funkcionalnosti**

Izbor materijala prema temeljnim kriterijima funkcionalnosti traženog materijala i navedenih grupa materijala, uvelike je smanjio broj primjerenih grupa pa tako i vrsta materijala unutar kojih možemo tražiti konačne varijante izbora. Naime, samo **metali** kao grupa materijala zadovoljavaju temeljne kriterije funkcionalnosti. Ta skupina materijala jedina nudi mogućnost (dobre) otpornosti na temperaturni šok s obzirom na zadane radne uvjete kalupa za tlačni lijev u odnosu na ostale usporedne grupe materijala pri ovoj analizi. Jasno, uz potrebne zahvate legiranja (oplemenjivanja kemijskog sastava površine) ili toplinske obrade.

Nadalje, važno svojstvo tehnološkičnosti navedenih grupa materijala paralelno se testiralo kroz prethodno provedenu usporedbu i analizu različitih grupa materijala, pored kriterija funkcionalnosti. Svojstvo dobre tehnološkičnosti prema kriterijima radnih uvjeta kalupa za tlačno lijevanje i prethodno provedenoj analizi, u **potpunosti zadovoljavaju** samo materijali iz grupe **metali** i to preciznije rečeno – **čelici**.

Ukoliko uzmemo i kriterij tehnološkičnosti u obzir, u cilju dodatnog olakšavanja izbora konačnih varijanti (kao sljedeći eliminacijski kriterij), izbor navedene grupe materijala se može potvrditi.

## 5. RAZRADA VARIJANTI RJEŠENJA S GLEDIŠTA ODNOSA MATERIJAL – KONSTRUKCIJSKO TEHNOLOŠKI PARAMETRI

U poglavlju 2. ovog rada, date su potrebne konstrukcijske karakteristike kalupa za tlačno lijevanje. Najvažnije od njih bi bile: visoka preciznost, glatka površina i konstrukcija izvedena na način da postoji mogućnost formiranja odljevaka složene geometrije. U ovoj fazi izbora materijala izrade kalupa, ove konstrukcijsko – tehnološke karakteristike imaju veliki utjecaj i važnost pri odabiru konačnih varijanti rješenja.

Nadalje, primjer tehnologije tlačnog lijevanja u hladnoj komori iz tvornice LTH Metalni lijev poslužit će kao izvor konkretnih tehničkih parametara lijevanja za određivanje još užih (strožih) kriterija odnosno svojstava materijala u cilju određivanja konačnih varijanti njegova izbora.

Najvažniji tehnološki parametri tlačnog lijevanja u tvornici LTH [12] su sljedeći:

- lijevaju se aluminijske legure Al 226, Al 231 i Al 239;
- sile zatvaranja kalupa iznose 3400 – 12000 KN;
- kalupi dosežu radnu temperaturu od  $170 \pm 10$  °C;
- Tlačni klipovi se podmazuju specijalnim visokokvalitetnim tekućim grafitnim premazom (formatin BT 1000), dok se alati podmazuju premazom na bazi molibden - disulfida ( $\text{MoS}_2$ );
- temperatura taline iznosi  $690 \pm 20$  °C.

Parametri izbora materijala još se mogu dodatno proširiti konkretnijim podacima zahtijevane temperature postojanosti odabranog materijala na **700 °C**, te odgovarajućom kemijskom postojanosti na povišenim temperaturama uslijed uporabe specijalnih premaza. No, treba kazati i da je rad na temperaturi od oko 700 °C relativno kratkog vremena trajanja, što može značiti i ponešto manje stroge kriterije izbora materijala po ovom parametru, ali uz temeljitu analizu i procjenu relevantnih parametara u tom slučaju (materijal, cijena, količina, trajnost, mogućnosti i cijene tehnologija popravaka kalupa, itd.).

Otprije prepoznati i spomenuti parametri trošenja kalupa relevantnih u postupcima tlačnog lijevanja su: kinetička energija taline pri ulazu u kalupe, kut ulaza taline (ili taline i čestica, tzv. “kaša“) u kalupe, temperaturne varijacije i dilatacije, te kemijski sastav materijala kalupa i taline od legura aluminija. No, prevladavajući mehanizmi trošenja definirani i analizirani u

ovom slučaju [12] (tlačno lijevanje s hladnom komorom), kao rezultat sinergijskog djelovanja prethodno spomenutih parametara lijevanja su sljedeći:

- umor površine,
- erozija kapljevnom,
- toplinski šok.

Imajući na umu sve navedeno, određene skupine materijala od preostalih u razmatranju, možemo eliminirati. Legure na bazi aluminija, magnezija i bakra nisu u mogućnosti zadovoljiti radne uvjete na visokim temperaturama. Na primjer, najotporniji materijal od navedenih legura, aluminijska bronca, imala bi zadovoljavajuće radne parametre, ali samo do 400 °C. Od čelika, možemo isključiti i nelegirane i niskougljične manganske čelike koji bi zadovoljavali radne parametre do nekih 425 °C. Titanove legure, općenito vrlo široko primjenjive i kemijski postojane, ovdje također nisu primjerene. Naime, radni parametri bili bi zadovoljeni do 450 °C. Niskolegirani Mo, Cr – Mo, Cr – Mo – V čelici za dugotrajni rad do 500 °C ili kratkotrajni rad do nekih 550 °C, ipak nisu dovoljno dobro rješenje.

U izboru ostaju:

- Cr – Mo, ili Cr – Mo – V čelici, ali s višim % Cr od prethodne skupine za temperature > 500 °C;
- martenzitni super 12 %Cr – čelici legirani s Mo (V, Nb, W) za temperature > 600 °C, a kratkotrajno i temperature > 650 °C;
- visokolegirani feritni Cr i Mo čelici (5 – 12 %Cr) za temperaturna područja do 675 °C;
- austenitni Cr – Ni čelici uz dodatak W, V, Mo, Ti, Nb, i N, za viša naprezanja i do 650 °C.

Materijali koji bi zadovoljili postavljene radne zahtjeve i na temperaturama iznad 700 °C spadaju u red monofaznih austenitnih čelika, **superlegura** na bazi Fe – Ni, Ni i Co. To su legure sa velikim udjelom konstitutivnih elemenata (i preko 35 %). Postojanost superlegura na bazi kobalta ide i do 980 °C.

Mehanička svojstva čelika pri povišenim temperaturama prikazana su tablično u PRILOGU 2.



## 6. ANALIZA I OCJENA POJEDINIH VARIJANTI

Izabrane skupine čeličnih materijala u stanju su zadovoljiti sve radne zahtjeve prema temeljnim kriterijima izbora materijala, te s gledišta konstrukcijsko – tehnoloških svojstava proizvoda, odnosno izrađenog kalupa za tlačno lijevanje.

U tvornici LTH Metalni lijev, veličina i raspon cijena kalupa za ispunjavanje navedenih tehnoloških zahtjeva lijevanja, varira od **30.000 – 100.000 €** po komadu. Treba kazati da tvornica istovremeno koristi više stotina kalupa različitih veličina, dimenzija i masa. A masa kalupa čini direktnu vezu (uz kemijski sastav) materijala s cijenama kalupa. Uz količinu, ovi pokazatelji čine vrlo važan kriterij pri ocjeni i usvajanju konačne varijante izbora.

Tu se dolazi do kritične točke izbora varijanti. Ispoštovani temeljni kriteriji izbora dovode izbor materijala u konačnu fazu; prihvaćanje konačnog izbora varijanti prema nekom važnom, ali ne više temeljnom, tehnološko – konstrukcijskom kriteriju.

**Cijena materijala** vrlo često, ako ne i najčešće, biva taj završni kriterij. Naravno, preko tog kriterija integrirani su i neki drugi (kvaliteta, nabava, transport, servisna jamstva, stručna ili tehnološka podrška, garancije, itd.).

Cijene čelika na tržištu variraju, a nije jednostavno odrediti ni dostupnost i mogućnost nabave čeličnih materijala u potpunosti. Čelici su materijali na koje se reflektiraju promjene trendova, zahtjeva tržišta, zakona ponude i potražnje, i to vrlo dinamično. Radi se o jednoj od najzastupljenijih i najširih grupa materijala na svjetskom tržištu.

Skupine čeličnih materijala do kojih se došlo kroz provedenu metodologiju izbora materijala su **alatni čelici**. Ta skupina čeličnih materijala obuhvaća *materijale za visoke zahtjeve* [1] i njihova cijena se kreće od **1.5 – 10 € /kg**.

Superlegure koje zadovoljavaju ili čak premašuju tražene radne zahtjeve spadaju u skupinu *materijala za najviše zahtjeve* [1] i njihova cijena se kreće od **5 – 50 € /kg**.

Prema ovoj analizi, austenitni Cr – Ni čelici uz dodatak W, V, Mo, Ti, Nb, i N, za viša naprezanja i do 650 ° C, mogli bi biti **najbolji izbor** materijala za izradu kalupa za tlačni lijev. Međutim, alatni čelici Cr – Mo, ili Cr – Mo – V, s višim % Cr od niskolegirane skupine alatnih čelika za temperature > 500 °C, **mogli bi biti najpovoljnija** konačna varijanta izbora materijala.

## 7. IZBOR OPTIMALNE VARIJANTE I MATERIJALA

Već je naglašeno otprije da ovakav konačni izbor materijala nužno mora biti popraćen temeljitom analizom i procjenom relevantnih radnih parametara. Naime, ovakav konačan izbor oslanja se na teoriju “najpovoljnijeg - dovoljno dobrog“ materijala izrade kalupa. Navedena skupina čelika, od nabrojanih skupina materijala za visoke zahtjeve, cjenovno može biti najpovoljnija. Ali, s tehnološko – konstrukcijskog gledišta izbora, potrebno je imati u vidu nekoliko ključnih parametara. Maksimalnu temperaturnu postojanost ovih čelika, procese i tehnologije tlačnog lijevanja, treba imati iskustvo u procjeni trajanja radnog vijeka kalupa pod određenim radnim opterećenjima. Vremena izloženosti kalupa na povišenim radnim temperaturama i naprezanjima, trajanje ciklusa lijevanja i kvalitetna **fenomenološka evaluacija** procesa lijevanja, najvažniji su parametri koje treba imati na umu.

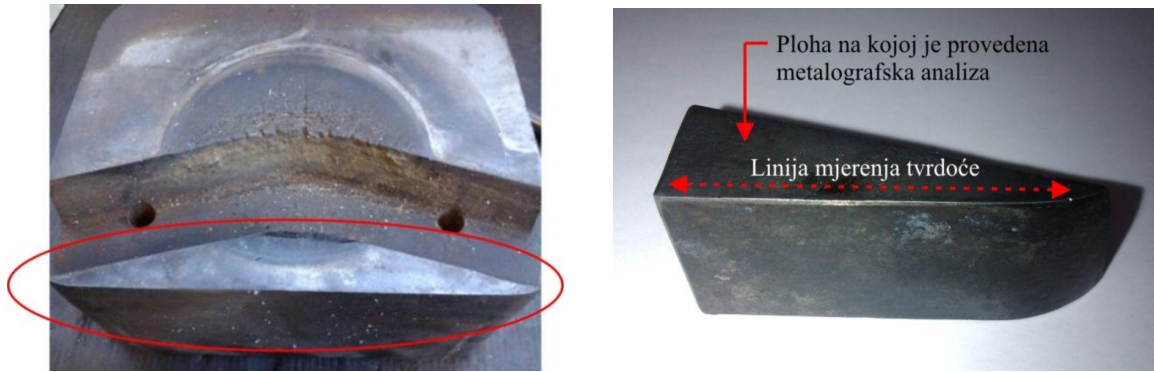
U tom smislu, upravo analizirani primjer uzorka kalupa za tlačno lijevanje iz tvornice LTH Metalni lijev, može dati odgovore na pitanja oko konačne varijante izbora materijala. Naime, materijal od kojeg su izrađeni kalupi za tlačno lijevanje u tvornici LTH Metalni lijev je **standardni alatni čelik za rad u toplom stanju** oznake DIN X38CrMoV5 – 1, trgovačke oznake BÖHLER W300.

Uzorci materijala kalupa izvučenog iz realnih uvjeta proizvodnje, pripremljeni su i laboratorijski analizirani u cilju definiranja njegovog kemijskog sastava, mehaničkih svojstava i stanja faza (površine). Rezultati ispitivanja poredani su kronološki.

	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

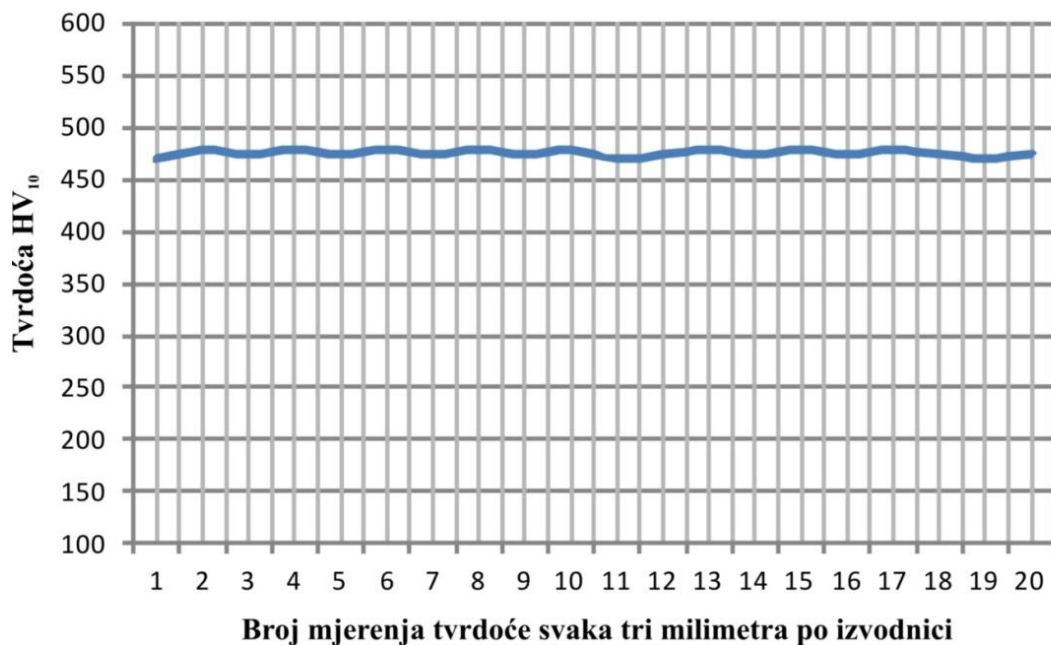
**Slika 29.** Rezultati kemijske analize uzorka materijala kalupa iz tvornice LTH - Tehnički fakultet Rijeka [12]

Nakon što je utvrđen kemijski sastav uzorka alata iz tvornice, pristupilo se daljnjem laboratorijskom ispitivanju materijala pri Zavodu za strojarsku tehnologiju (FESB) u Splitu.



**Slika 30** . Kalup iz tvornice LTH Metalni lijev (lijevo), uzorak materijala kalupa namijenjen metalografskoj analizi i mjerenju tvrdoće (desno) [12]

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 (mehanička svojstva) materijala. Mjerenje tvrdoće provedeno je metodom VICKERS sa silom utiskivanja od oko 10 kp (98.1 N). Mjerenje se provodilo po središnjici i suprotnom rubu uzorka. Nisu primjećena ni najmanja odstupanja izmjerenih vrijednosti tvrdoće od onih dobivenih u dijagramu. Prosječna izmjerena vrijednost iznosi **473.3 HV<sub>10</sub>** odnosno **46 HRC**.



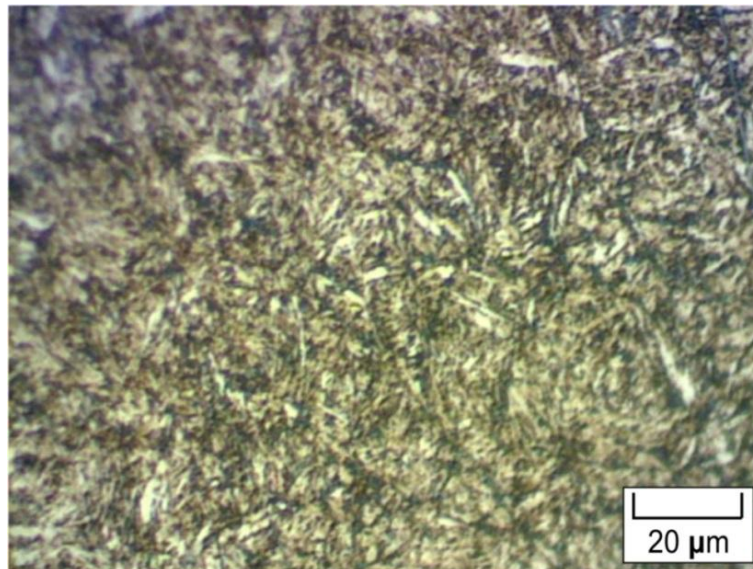
Po izmjerenoj tvrdoći, rubni uzorak kalupa obrušen je na kliznoj stazi uređaja za brušenje uzoraka HANDIMET. Uzorak je brušen na vodom hlađenoj kliznoj stazi uređaja po brusnom papiru finoće 600. Po završenom procesu brušenja, uzorak je poliran suspenzijom vode i

glinice srednje finoće (aluminij – oksid  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), na rotacionom kolu za poliranje s čohom (filcom). Površina uzorka potom je izložena djelovanju NITALA (3% - tnoj otopini dušične kiseline u alkoholu) tijekom iskustvom određenog vremena, u cilju razvijanja mikrostrukture.



**Slika 31.** *Laboratorijska oprema za metalografsku analizu uzoraka - FESB Split* [12]

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 32.** *Metalografska slika uzorka čelika iz tvornice LTH (povećanje 500x)* [12]

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 [14]. Kada započne proces popuštanja, pritisak na preostali austenit popusti čim tetragonalni martenzit prijeđe u kubni. Daljnjim popuštanjem zaostali austenit modificira rešetku u kubni martenzit.

Tvorničkim se višestrukim popuštanjem osiguravaju optimalna svojstva tvrdoće i čvrstoće čelika, uz značajnu eliminaciju zaostalih naprezanja u čeliku nastalih uslijed kaljenja.

## ZAKLJUČAK ISPITIVANJA

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** HV<sub>10</sub> odnosno **46** HRc, što upućuje na zaključak da je stanje isporučenog alata s navedeno 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 se može vidjeti i na hodogramu toplinske obrade prema standardu, upravo za čelik BÖHLER W300.

Prema hodogramu toplinske obrade i prema dijagramu tvrdoće nakon popuštanja za ovaj čelik prema standardu, 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 [15] [16] koje se bave problematikom izbora materijala i parametara tlačnog lijevanja.

Provedena metalografska analiza uzorka potvrđuje dobivene rezultate tvrdoće. Do određene mjere formirana martenzitična struktura, s određenim udjelom karbida, upućuje na poboljšanu strukturu čelika s očekivanim redom veličine tvrdoće iznad 45 HRc. Legiranje molibdenom ovih čelika sprječava pojavu *krhkosti popuštanja* [14]. 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.

Tragovi ili slojevi modificirane površine kalupa tijekom njihove proizvodnje, nisu nađeni.

Dovoljno dobro poznavanje fenomenoloških pojava koje se odvijaju tijekom procesa lijevanja te poznavanje i razumijevanje najvažnijih svojstava izabranog materijala izrade kalupa, daje jamstva i sugerira kvalitetnu odluku o konačnom izboru varijanti.

Poznavanje ove problematike može biti presudan argument pri izboru materijala, jer se u ovoj, završnoj fazi izbora sukobljavaju potrebe proizvodnog pogona, resursi, zahtjevi kupca, tržišne mogućnosti i potrebno poznavanje prethodno spomenute problematike. Odluke ovog tipa su iznimno važne i moraju biti dobro argumentirane.

Sudeći prema primjeru kalupa iz tvornice LTH Metalni lijev, odabir najpovoljnije konačne varijante izbora materijala njegove izrade (prema navedenim kriterijima), pokazao se i u praksi. Trgovačkih inačica ovog materijala ima više, a izbor najprimjerenije ovisi, pak, o još nekim kriterijima.

## 8. OBLIKOVANJE IZLAZNIH INFORMACIJA O ODABRANIM MATERIJALIMA

Način dobave, mogućnosti naručivanja odabranog materijala, cijena, prijevoz, količina narudžbe, vrijeme dostave - mogu biti presudni parametri pri odluci naručitelja od kojih dobavljača tražiti materijal. To su parametri koji često znaju predstavljati i završne elemente izbora; kada je materijal već poznat – ali ne i dobavljač (proizvođač).

Ukoliko proizvodni sustav koji naručuje odabrani materijal ima dobru poslovnu suradnju s nekim od instituta ili ovlaštenih laboratorija koji surađuju ili su usko povezani s nekim od proizvodnih subjekata (željezare, ljevaonice, itd.), koje, pak, proizvode kalupe i alate od izabranog materijala, uputno je razmišljati o poslovno - stručnoj suradnji temeljenoj na tim relacijama. Pored marke traženog materijala BÖHLER, kalupe od materijala gotovo identičnih svojstava, ali drugačijeg trgovačkog naziva (RAVNEX) proizvode i “Železarne Ravne“. Sličnih primjera, dakako, ima mnogo. Nije rijetkost da upravo stručne ustanove i instituti (npr. Slovenski Institut za strojarstvo) mogu dati preporuku i stručnu podršku proizvodnim subjektima po pitanju izbora materijala alata, tehnologija sanacija oštećenja ili tehnologija poboljšanja radnih karakteristika (održavanja). Upravo takvu suradnju imaju Slovenski Institut za strojarstvo i tvornica LTH Metalni lijev iz Benkovca.

Osiguranje trajnog i kvalitetnog dobavljača, može pružiti dodatnu sigurnost i garanciju naručitelju (LTH Metalni lijev) za pravovremenu, kvalitetnu i potpunu isporuku traženih odljevaka kupcima (BMW i Mercedes). Uska povezanost proizvođača traženih odljevaka i dobavljača sirovine može predstavljati zalog dobre poslovne perspektive u budućnosti.

Svojstva čelika BÖHLER W300 prema STANDARDU [17] navedena su u nastavku rada.

Čelik BÖHLER W300 ima sljedeće oznake prema različitim svjetskim standardima [17]:

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

### 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 dobro 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.

## 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 p.p. uzorka) pa se polagano hladi u peći. Ovaj postupak se provodi u cilju smanjenja zaostalih naprezanja 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.



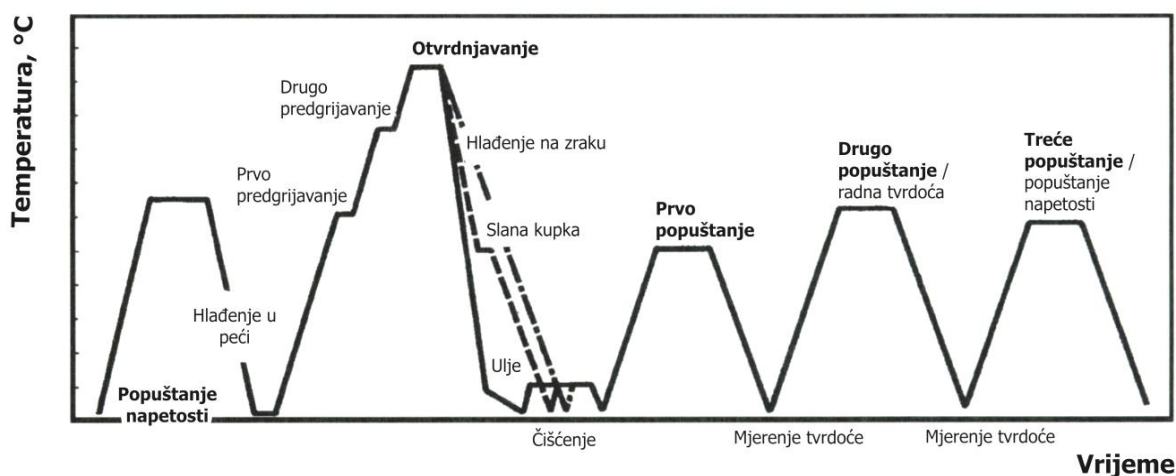
## POPUŠTANJE

Toplinska obrada popuštanja izvodi se u tri slijeda:

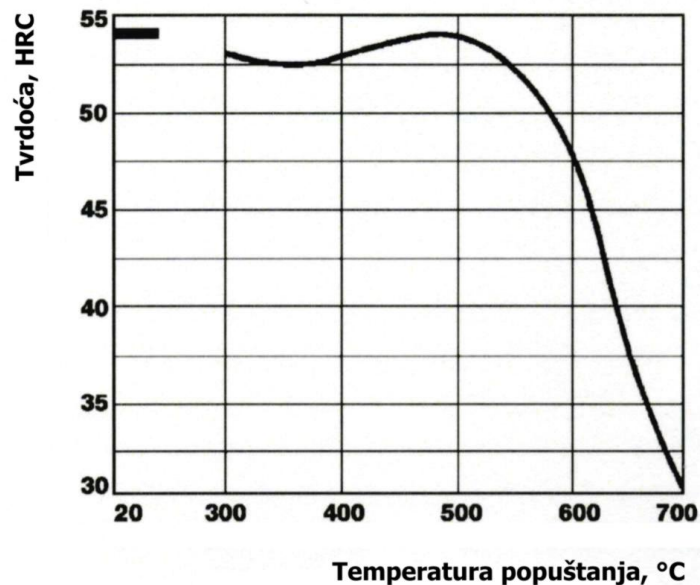
- popuštanje I: grijanje na približno 30 °C iznad vrijednosti maksimalne sekundarne tvrdoće,
- popuštanje II: popuštanje do potrebne radne tvrdoće alata,
- popuštanje III: provoditi na temperaturi 30 - 50 °C ispod najviše temperature popuštanja u cilju smanjenja napetosti.

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 naprezanja može dati dodatan pozitivan učinak na mehanička svojstva čelika.



**Slika 33.** Općeniti hodogram toplinske obrade popuštanja za alatne čelike BÖHLER [17]

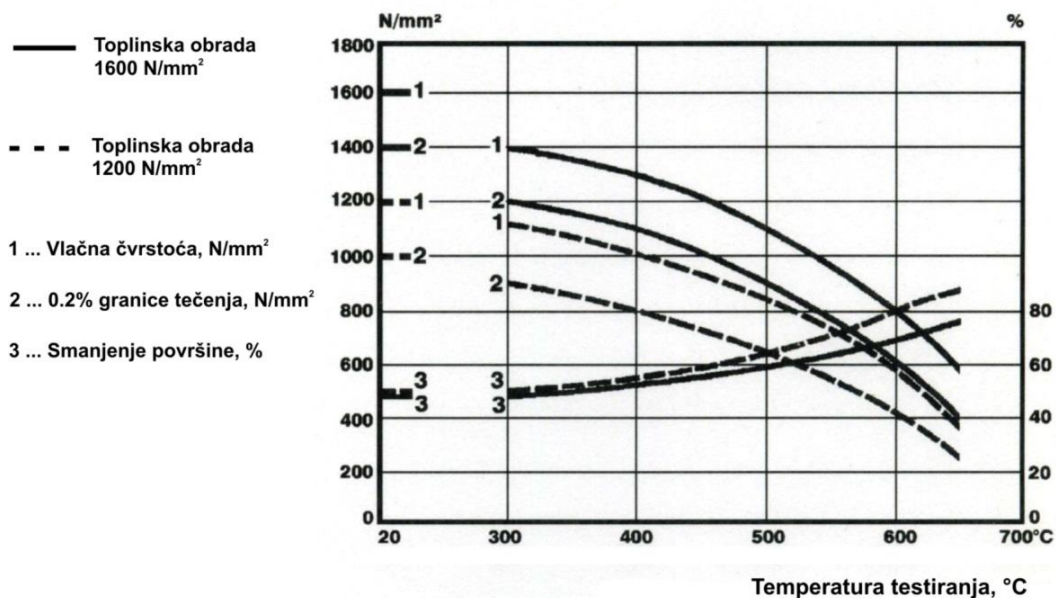


**Slika 34.** Dijagram Tvrdća - Temperatura popuštanja za čelik BÖHLER W300 [17]

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

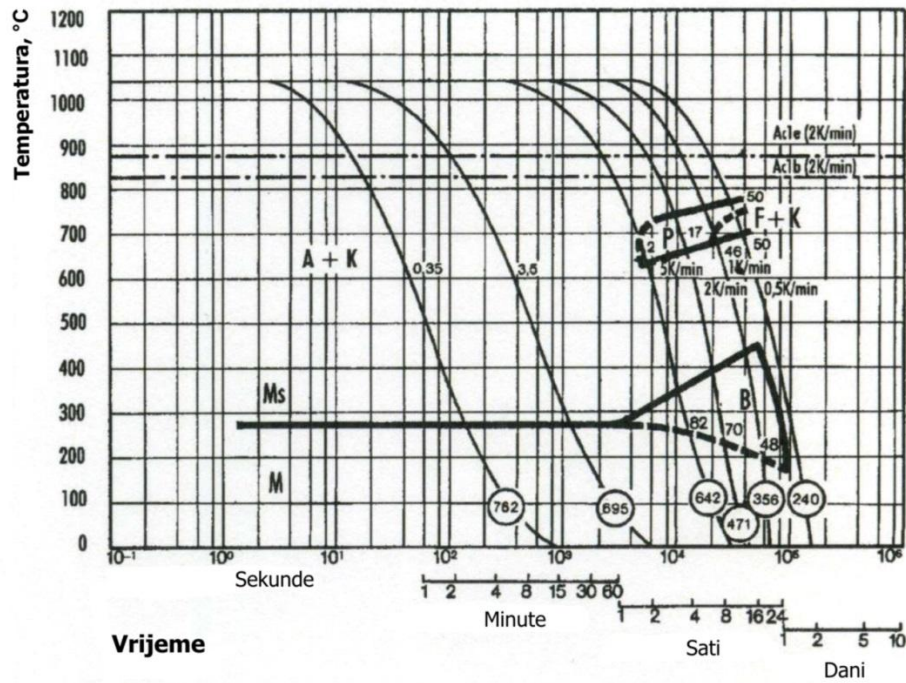
Tablica vrijednosti: Temperatura popuštanja (°C) / Tvrdća (HRC)

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



**Slika 35.** Dijagram Čvrstoća - Temperatura za čelik BÖHLER W300 [17]

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 36.** CCT (Continuous Cooling Transformation) dijagram za čelik BÖHLER W300 s prosječnim kemijskim sastavom (%) [17]

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  $\lambda$ ; 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 (Retained Austenite).

## NITRIRANJE

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

Mehanička svojstva alatnih čelika marke BÖHLER na povišenim temperaturama ponešto se razlikuju. Na slici 37, 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 ISO DISC®	Red	Red	Red	Red
BÖHLER W300 ISO BLOC®	Red	Red	Red	Red
BÖHLER W302 ISO DISC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W302 ISO BLOC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W303 ISO DISC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W303 ISO BLOC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W320 ISO DISC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W321 ISO DISC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W360 ISO BLOC®	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 37 . Usporedni dijagrami mehaničkih svojstava čelika W300 i ostalih vrsta alatnih čelika marke BÖHLER [17]

**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.

#### 4. Postupci modificiranja površine kalupa kao važan dio procesa izbora materijala

Pojava da izabrani materijal alata (kalupa) u stanju kakvom je nabavljen i s toplinskom obradom koju je prošao, ne može u potpunosti zadovoljiti zahtjeve u radu, nije rijetkost. Stoga, postupcima modificiranja njegove površine, kao mjesta kontakta sustava alat – stroj i mjesta najvećih naprezanja, poboljšavamo njegova svojstva i produljujemo radni vijek. Na ovu činjenicu ne treba gledati kao na nedostatak pri procesu izbora samog materijala izrade kalupa. Dapače, postupci modificiranja površine materijala mogu biti i sastavni dio procesa izbora materijala kao optimalno rješenje za poboljšanje performansi površine kalupa (alata) unutar nekih zadanih tehnoloških i financijskih radnih okvira. Svojstvo materijala da se može tretirati i poboljšavati ovim tehnološki zahtjevnim postupcima, stoga predstavlja vrlo važno svojstvo pri procesu izbora materijala.

U slojeve površine čeličnih kalupa do određene dubine, najčešće kemijsko – difuzijskim postupcima, može se omogućiti ulaz atomima određenih elemenata i tako mijenjati kemijski sastav. Novonastale faze utječu na porast tvrdoće ili na povećanje otpornosti trošenju bez značajnog porasta tvrdoće. Poboljšanja se odnose i na kemijsku postojanost čelika. Nakon završenog kemijsko – difuzijskog procesa, obično nema dodatne toplinske obrade.

**Nitriranjem** [14] obogaćuje se površina materijala dušikom. Tehnoloških izvedbi postupaka nitriranja ima više. Klasično se provodi u struji amonijaka ispod eutektoidne temperature na oko 550 °C. Amonijak se raspada na  $\text{NH}_3 \rightarrow \text{N} + 3\text{H}$ . Dušik postupno difundira u površinu stvarajući uključinski mješanac. Upravo čelici sa 0.3 – 0.5 %C pogodni su za nitriranje; legirani još sa kromom, aluminijem, vanadijem i molibdenom. Prva tri legirna elementa stvaraju fine i tvrde, pod mikroskopom nevidljive vlastite *nitride* koji daju veliku tvrdoću i čvrstoću nitriranom sloju, blokiranjem skoro svih kliznih ravnina. Molibden, kao element, sprječava odvajanje nitriranog sloja nedozvoljavajući nastajanje već spomenute pojave *krhkosti popuštanja* jezgre, koja se zbog razloga i načina nastajanja, ne može eliminirati samom toplinskom obradom. Pogodnosti nitriranja su sljedeće:

- velika otpornost trošenju površine,
- postojanost tvrdoće i na 500 °C,
- povećana kemijska postojanost i otpornost koroziji,
- povećanje dinamičke izdržljivosti površine,
- nema izvitoperenja, napetosti i pucanja kao kod kaljenja uslijed modifikacije rešetke.

**Boriranje** [14] se provodi u medijima koji ispuštaju atome bora, a mogu biti plinovita, tekuća i kruta. Boriranje predmeta u okruženju prašina borovog karbida uspješno se koristi i danas. Na temperaturama od 900 – 1000 °C nastaju dva sloja karbida; vanjski sloj FeB i unutarnji Fe<sub>2</sub>B. Nastoji se uglavnom postići siromašniji sloj Fe<sub>2</sub>B, jer je manje krhak i zupčasto se stvara prema podlozi s kojom stvara dobru povezanost. Boriraju se uglavnom predmeti već završno obrađeni i obrušeni. Naknadno brušenje boriranih slojeva je teško i skupo, budući se postižu tvrdoće i od 2000 HV. Postupak boriranja amorfnim borom u vakuumu ne poboljšava samo tvrdoću površine, već i električku i toplinsku vodljivost materijala, što izravno utječe na povećanje otpornosti trošenju. Tablica u nastavku nudi još neka djelotvorna rješenja zaštite površine materijala s obzirom na različite mehanizme trošenja.

Osnovni mehanizmi trošenja	Dominantno svojstvo	Djelotvorne zaštite
ADHEZIJA	<b>kompatibilnost</b> + otpornost širenju pukotine	nitriranje oksidiranje sulfidiranje
UMOR POVRŠINE	<b>dinamička izdržljivost</b> površine + otpornost širenju pukotine	cementiranje površinsko kaljenje nitriranje
ABRAZIJA	<b>mikrotvrdoća</b> strukturnih faza + otpornost na širenje pukotine	boriranje vanadiranje navarivanje
TRIBOKEMIJSKI	<b>kemijska pasivnost</b> + otpornost na širenje pukotine	fosfatiranje sulfidiranje galvaniziranje

**Slika 38.** Dominantna svojstva i vrsta zaštite za različite mehanizme trošenja [1]

Pored navedenih, gotovo klasičnih postupaka modifikacije i poboljšavanja svojstava površine, treba kazati da su do danas s uspjehom razvijeni i novi, tehnološki još suptilniji, kemijski složeniji i učinkovitiji postupci poboljšanja svojstava površine materijala. Navedeni postupci istraživani su i razvijani upravo na alatnim čelicima i njihovim podvrstama koje smo i odabrali kroz postupak izbora materijala, kao primjerene za izradu kalupa za tlačni lijev.

To je **TD postupak** (Termoreaktivno - Difuzijski postupak oblaganja alata vanadijevim karbidom), te postupak oblaganja alata **PVD nanoprevlakama**.

**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.

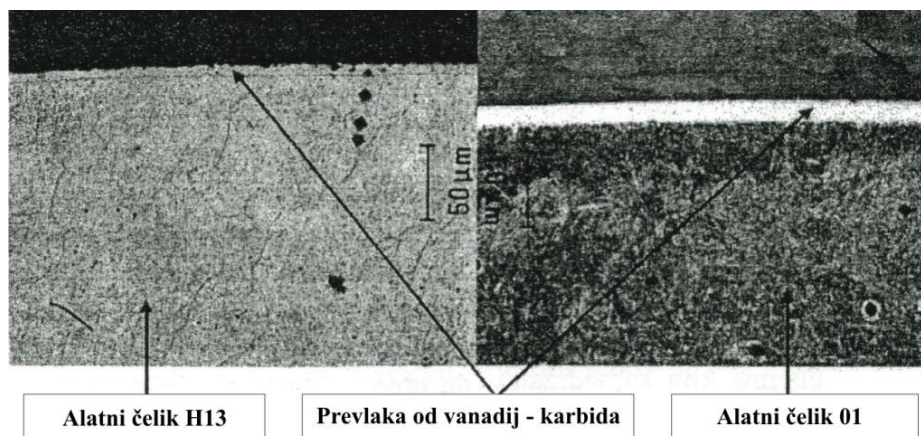
TD postupak iznesen i analiziran u radu [15] temelji se na metalurško – difuzijskoj vezi obloge za čelični supstrat. Bez obzira na tvrdoću ili glatkoću sloja obloge, učinak izostaje ukoliko obloga ne ostaje na alatu tijekom rada.

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. Iako su različite granične linije jasno vidljive između površinskog sloja i osnovnog materijala, visoka temperatura postupka ubrzava međusobnu difuziju atoma između površine i osnovnog materijala, osiguravajući na taj način veliku snagu vezivanja i sprječavajući raslojavanje u zahtjevnim radnim uvjetima. 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. Nastali vanadij karbid ima kubnu rešetku visoke tvrdoće (3200 – 3800 HV).

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

Nekolicina studija [15] 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. 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 01) i toplom stanju (AISI H13) [15]

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 (HCl, vruća aluminijska talina, itd.). 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.

**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 [16] 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 je ispitivan i analiziran uranjanjem uzorka od obloženog čeličnog materijala u kupku rastaljene aluminijske legure. Kupka je predstavljala simuliranu radnu atmosferu (visoko tlačno lijevanje) obloženih alata. Uzimali su se u obzir ključni parametri za određivanje stope istrošenosti. Tragovi istrošenja su otkrivani, promatrani i analizirani korištenjem nekoliko analitičkih metoda (morfološka mikroskopija, tvrdoća, mikrotvrdoća, X – zrake). Uzorci čelika AISI H11 uzeti su iz toplo valjane šipke. Potom su grijani na temperaturu



austenitizacije od oko 1000 °C i kaljeni u struji dušika pod tlakom od 5 bara. Nakon toplinske obrade trostrukog popuštanja, uzorci postižu radnu tvrdoću od očekivanih **46 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.

Pri odabiru postupka modificiranja površine, važno bi bilo uzeti u obzir i već spomenute kriterije tribološke i elektrokemijske kompatibilnosti i postojanosti elemenata u dodiru; materijala navlake i osnovnog materijala kalupa.

## 5. Usporedba različitih metoda izbora materijala

Svaki proizvedeni dio zahtijeva izbor materijala i izbor postupka obrade. Dizajniranje i oblikovanje direktno je povezano s funkcijom odabranog materijala. Pojava novih materijala diktira razvoj novih proizvoda ili ponovno oblikovanje postojećih. Upravo se razvoj novih materijala od konca prošlog stoljeća kreće **eksponencijalnom progresijom**.

Pred današnje inženjere i konstruktore stavlja se težak zadatak; na koji način, od ogromnog broja raspoloživih materijala, izabrati upravo onaj najbolji za svoj proizvod. Do sada je izbor počivao na iskustvu inženjera i njegovom poznavanju različitih materijala. U svakoj tvrtci postojali su ljudi koji su bili specijalizirani za materijale. I uistinu, vrijednost iskustva inženjera specijalista za materijale je nedvojbeno.

No, u svijetu su nastupile velike promjene koje ne idu u prilog ovom pristupu. S jedne strane broj različitih materijala se značajno povećao, a s druge strane pokretljivost radne snage je postala uobičajena pojava. Specijalisti za materijale, jednostavno, mogu prijeći u neku drugu tvrtku.

Dakle, oslanjanje samo na strategiju učenja kroz iskustvo nije u skladu s današnjim tempom života. Sve više se javlja potreba za sustavnim metodologijama izbora materijala koje se mogu brzo realizirati i koje omogućavaju implementaciju računala. Kompatibilnost s postojećim alatima inženjerskog oblikovanja i proizvodnim postupcima je nužna, a to znači konstantno držati korak s tehničkim inovacijama i novim tehnološkim rješenjima.

Upravo ova značajka aktualnosti i interaktivnosti važno je obilježje metode izbora materijala **Michael Ashby** - a [2]. Ona se zasniva na tezi da dobar projektant **mora** razmotriti sve mogućnosti, bez diskriminacije bilo kojeg materijala ili postupka obrade. A to nije moguće bez držanja koraka s razvojem novih materijala.

Ashby - eva metoda daje putokaz kroz „šumu“ kompleksnog izbora s kojim se projektanti i inženjeri susreću. Uvodi se ideja atributa – **indeksa materijala** i **procesa**. Indeksi se prikazuju pomoću **grafova** koji pojednostavljaju početni izbor materijala i procesa.

Nadalje, u realnim situacijama čest je slučaj suprotstavljenih zahtjeva. Npr. ukoliko želimo projektirati laku i jeftinu konstrukciju dolazimo do suprotstavljenih ciljeva. Laki materijali su najčešće skuplji od težih. Rješenje zahtjeva upotrebu strategije kompromisa “*trade off strategies*“ koja uključuje suprotstavljene attribute.

Pored tehničkih i ekonomskih utjecajnih elemenata na odluku o izboru materijala, oblik, boja, osjećaj pri dodiru, ekološkičnost – sve više imaju utjecaj na konačni izbor. Ova metoda obuhvaća sve ove aspekte unutar discipline koja se naziva **industrijsko oblikovanje (dizajn)**.

Takav pristup predstavlja vrlo važan iskorak. Ako se industrijski dizajn zanemari prodaja opada i gubi se tržište.

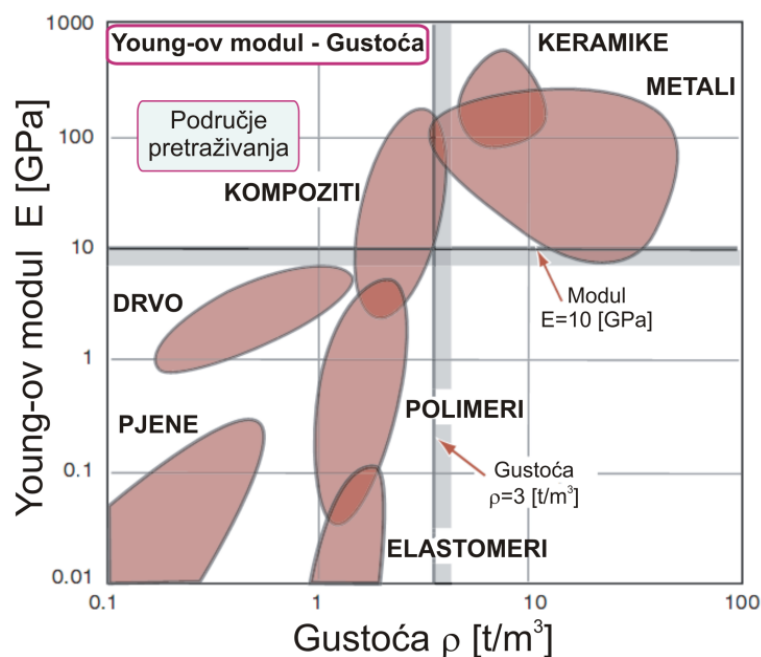
Metoda se temelji na uspostavi nekoliko najvažnijih kriterija izbora materijala; a proces započinje definiranjem osnovne potrebe koju materijal treba zadovoljiti.

- a) **Funkcija:** što je uloga proizvoda?
- b) **Ograničenje:** značajni zahtjevi koji moraju biti ispunjeni: npr. krutost, čvrstoća, otpornost na koroziju, sposobnost oblikovanja
- c) **Cilj:** što treba maksimalizirati ili minimalizirati?
- d) **Slobodne varijable:** varijable problema koje nisu obuhvaćene ograničenjima.

Varijable se grupiraju u tri skupine: funkcionalni zahtjevi (F), geometrijskih veličine (G) i svojstava materijala (M).

Formira se matrica performansi; *matrica performansi*  $P \leq f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M)$  ili *matrica performansi*  $P \geq f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M)$ . Potom se određuje **indeks materijala**, izražen kao veličina M kojom optimiziramo matricu performansi P.

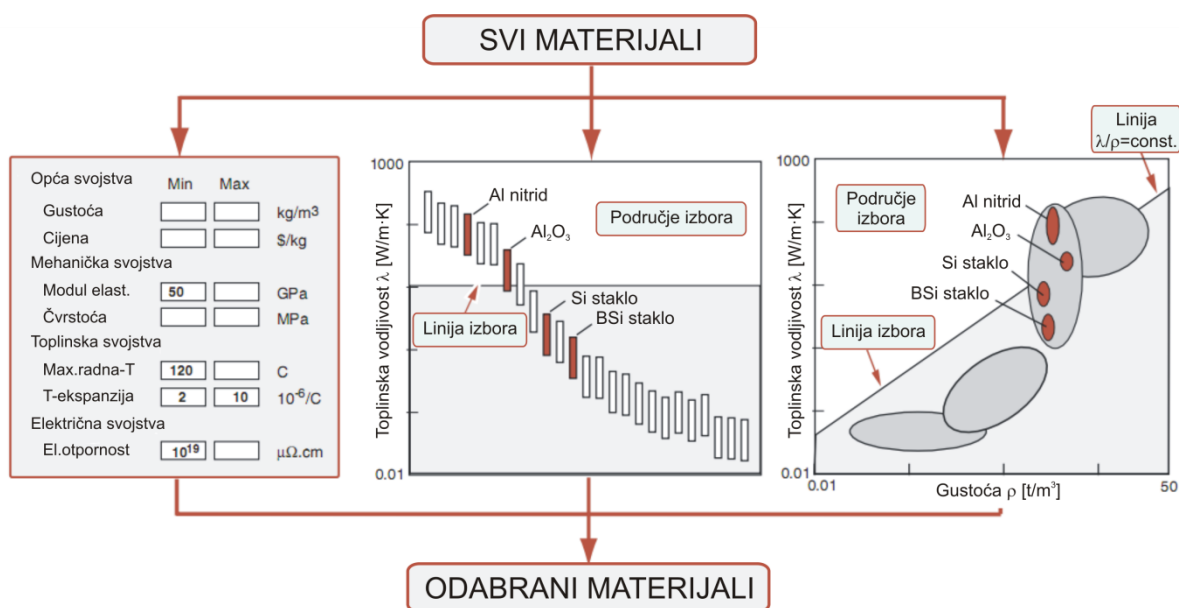
Indeks materijala M predstavlja **kriterij izvrsnosti**, parametar ključan za izbor konačnih varijanti.



**Slika 40. Primjer grafa kod Ashby - eve metode; shematski prikaz dijagrama  $E$ - $\rho$  kojom su prikazane gornja granica za modul  $E$  i donja za gustoću  $\rho$  [2]**

Dijagrami svojstava materijala (slika 40) daju dobar pregled i vrlo su praktični kada postoji vrlo mali broj ograničenja. No, bez obzira na brojnost različitih svojstava materijala koji se mogu usporediti na ovaj način, broj materijala koji se mogu prikazati očito je vrlo ograničen, pa tako i upotreba ovih dijagrama. Kada je broj ograničenja velik (što je najčešće slučaj), provjera da li materijali zadovoljavaju sva postavljena ograničenja je vrlo nepregledna.

Oba problema su prevladana implementacijom računala u metodu izbora. Razvijeno je više programskih paketa za izbor materijala i izbor procesa obrade. **CES EduPack** je primjer takvog programa. Ovaj program sadrži veliku bazu podataka o materijalima, organiziranu hijerarhijski. Svaki zapis sadrži strukturirane podatke svojstava materijala, a svako svojstvo je pohranjeno kao raspon vrijednosti tog svojstva. Zapisi, također, sadrže i ograničen broj nestrukturiranih podataka u obliku teksta, slika i referenci na izvore informacija o materijalu. Podaci se pretražuju pomoću tražilica koje nude pretraživanje sučelja.



**Slika 41.** Izbor materijala pomoću računala primjenom CES EduPack programa. Shematski su prikazane tri vrste prozora za odabir. Mogu se koristiti bilo kojim redoslijedom i kombinacijom. Ovim postupkom programski se izolira mala grupa materijala koja prolazi sve faze izbora. [2]

Kod konkretnog primjera izbora materijala za izradu kalupa za tlačno lijevanje uz pomoć *Ashby* – eve metode, treba najprije definirati najvažnije kriterije izbora. Oni su navedeni u tabličnom prikazu.

<i>Funkcija</i>	Kalup za tlačno lijevanje
<i>Ograničenja</i>	Tvrdoća $\geq 470$ HV Radna temperatura $> 500$ °C Minimalna zahtijevana čvrstoća $\geq 1200$ MPa Žilavost $K_{1C} \geq 20$ MPam <sup>1/2</sup>
<i>Cilj</i>	Minimalna cijena
<i>Slobodne varijable</i>	Površina poprečnog presjeka

Žilavost  $K_{1C}$  predstavlja otpornost materijala na nastajanje i širenje pukotina pri opterećenju. Iznos naveden u tablici ( $20 \text{ MPam}^{1/2}$ ) predstavlja iskustvenu vrijednost koja se uzima po dobroj inženjerskoj praksi [3], s obzirom na visoka udarna i toplinska opterećenja.

Vodeći se poznatim parametrima materijala korištenih u praksi (LTH Metalni lijev te primjeri iz prethodno navedenih stručnih i znanstvenih radova), mogu se odrediti minimalne potrebne vrijednosti svojstava zahtijevanih od materijala pri njihovom izboru. Određuje se *indeks materijala M* ;

$$M = \frac{R_p^{2/3}}{\delta \cdot C_m} \quad (3)$$

Pri čemu je:  $R_p$  – granica popuštanja [MPa]

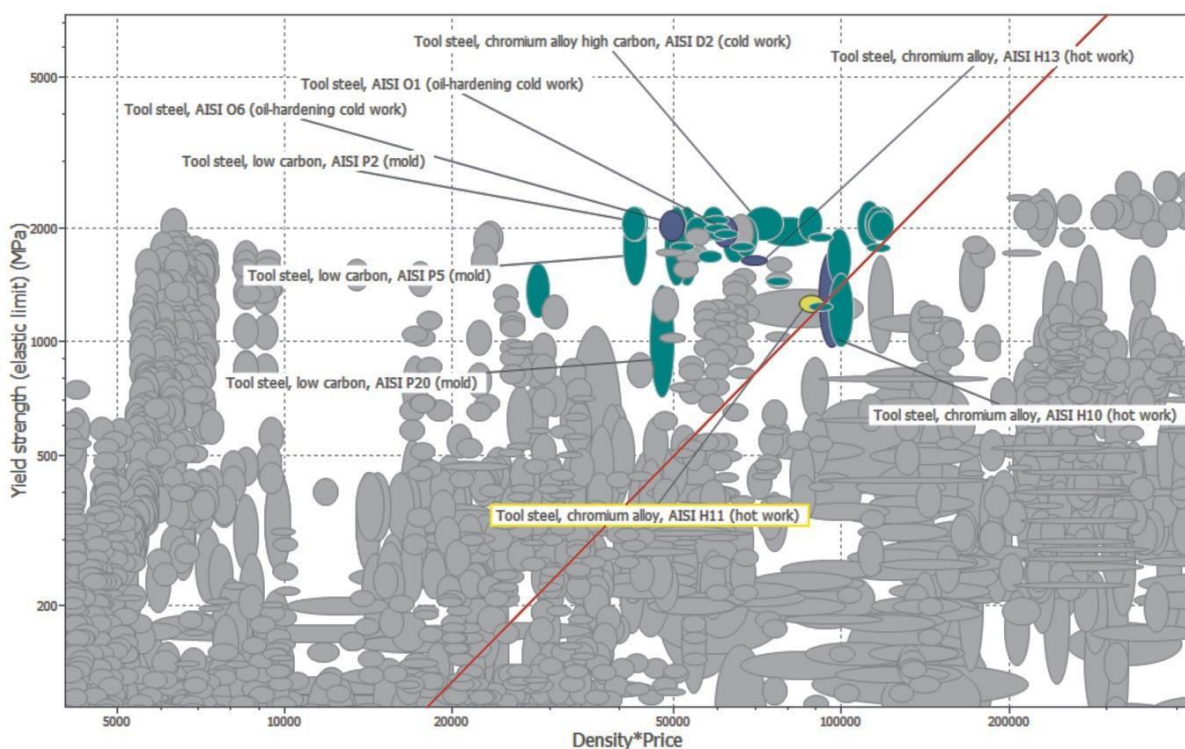
$\rho$  – gustoća [ $\text{kg/m}^3$ ]

$C_m$  – cijena materijala po jedinici mase [kn/kg]

Navedeni izraz predstavlja indeks materijala za gredu specificirane duljine i oblika, dok je površina poprečnog presjeka slobodna varijabla [3].

Dobiveni dijagram (graf) na slici 42 uključuje **sva navedena ograničenja** i eliminira iz razmatranja sve materijale koji ih ne zadovoljavaju. Ti materijali na dijagramu su označeni

sivom bojom. Obojani “kružići“ na dijagramu predstavljaju najučinkovitije materijale s gledišta odabranog indeksa materijala M koji zadovoljavaju sva postavljena ograničenja. Crvena linija koja presijeca dijagram dijeli skupine materijala visoke učinkovitosti od onih s niskom učinkovitosti prema korištenim kriterijima. Smjer, nagib i položaj linije upravo su i definirani zadanim kriterijima i ograničenjima, odnosno odabranim indeksom materijala. Dijagram daje dobar uvid za izbor najprihvatljivijih materijala s gledišta **čvrstoće** i **cijene**. Iz dobivene ponude materijala mogu se prepoznati upravo oni materijali dobiveni kao **najpovoljnije konačne varijante** izbora prema tradicionalnoj metodi.



**Slika 42.** Dijagramski prikaz najprihvatljivijih materijala za izradu kalupa za tlačni ljev s gledišta čvrstoće i cijene prema Ashby metodi [3]

To je skupina alatnih čelika Cr – Mo, ili Cr – Mo – V, s višim % Cr od niskolegirane skupine alatnih čelika za rad na temperaturama  $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Oznakama istaknuti materijali predstavljaju upravo one materijale prepoznate u procesu tlačnog lijevanja u tvornici LTH Metalni ljev kao i neke materijale iz prethodno navedenih stručnih i znanstvenih radova.

Razmatranje potencijalnih proizvodnih postupaka i načina izrade kalupa u ovom slučaju stavljeno je u drugi plan, budući se radi o proizvodu s **razrađenom konstrukcijom**. Takav koncept podjele proizvoda može se koristiti i pri korištenju ove metode.

Za potrebe generiranja dijagrama na slici 42, korištena je verzija programskog paketa CES EduPack iz 2009. godine.

U načelu, može se kazati da postoje **dvije temeljne metode** izbora materijala. To su **tradicionalna** metoda (*science – led*) i metoda **dizajna** (*design – led*).

Tradicionalni pristup započinje *temeljnim odrednicama* materijala: elektroni, atomi, atomske veze, struktura, kristalografija i defekti. Na ovim temeljima se gradi teorija legura, kinetičke energije transformacije faza i razvoj mikrostrukturne analitike do granica uočljivosti elektronskim ili optičkim mikroskopima. Na taj se način omogućava razumijevanje i kontrola svojstava na razini milimetara ili centimetara. Ipak, metoda ne naglašava posebno ponašanje konstrukcije i njezin dizajn unutar metode izbora materijala.

Drugi pristup (metoda dizajna; Ashby – eva metoda), počinje od definicije *potrebe*; odnosno zahtjeva kojima materijali moraju udovoljiti u cilju primjerenog funkcioniranja unutar zadane konstrukcije. Spoj materijala i konstrukcije (dizajna) iziskuje definiciju određene lepeze njihovih svojstava i informacija ključnim za omogućavanje njihovog pravilnog odabira i međusobnog skladnog funkcioniranja. Utvrđivanje važnosti i prepoznavanje temeljnih relevantnih svojstava uključuje potom i stručnu stranu procesa izbora. Oba pristupa imaju smisla, naravno. Važno je definirati način kako koristiti informacije. Ukoliko je namjera stručno – istraživačkog karaktera, prvi pristup je logičniji. Inženjerski dizajn, s druge strane, čini drugi pristup primjerenijim.

Široki spektar i baza podataka materijala su zasigurno velika kvaliteta metode dizajna, kao i tehnološki aspekti provedbe samog izbora (kronologija, grafički prikazi, interaktivnost). Primjenjivost takvog koncepta u našem slučaju, gdje se govori o tipu proizvoda s postojećom, razrađenom konstrukcijom i prethodno definiranom potrebom i funkcijom, (gledano u širem smislu), može dostići svoj vrhunac. Metoda dizajna, s gledišta usporedbe najvažnijih svojstava i zahtjeva funkcionalnosti analiziranih materijala izrade kalupa, nudi primjerena rješenja. Kako se može vidjeti i iz konkretnog primjera, s gledišta konstrukcije i njezinih svojstava (čvrstoća, krutost, žilavost) te cijene materijala po jedinici mase, pravilnim korištenjem usporednih dijagrama svojstava i indeksa materijala došlo se do najprihvatljivijih konačnih varijanti rješenja.

Za ove pristupe procesu izbora materijala možemo kazati da su kompatibilni. U razradi temeljnih zahtjeva funkcionalnosti materijala, kao temeljnih kriterija izbora, možda ne bi kod obje metode postojala jednaka mogućnost detaljnog, analitičkog razmatranja svojstva **otpornosti materijala** na različite mehanizme i slučajeve **trošenja**. Ali, s tribološkog gledišta

izbora materijala, postavljena ograničenja se mogu zadovoljiti već prethodno spomenutim postupcima modifikacije površine.

Navedeni, već razrađeni proizvodni koncept, **fenomenološki** vrlo temeljito sagledava tradicionalni pristup. Problematika i utjecaj složenih fenomena trošenja, iziskuje analizu prethodno spomenutih, temeljnih odrednica materijala. Tradicionalni pristup, već s gledišta funkcionalnosti po ovom zahtjevu, strogo i precizno određuje mogućnosti, ali i ograničenja za uspoređivane grupe materijala.

Provedenim metodama izbora materijala, s navedenim razlikama u konceptu i pristupu, došlo se do konačnih varijanti izbora rješenja bez izostavljanja fenomenoloških pojava unutar sustava alata - stroj, maksimalno poštujući zahtjeve konkretnog analiziranog tribosustava i ne izuzimajući pritom nijedan zahtjev od onih temeljnih konstrukcijskih.



## 6. Zaključak

Oblikovanje proizvoda je proces kojim se nove ideje ili potrebe tržišta iskazuju kao detaljan skup informacija temeljem kojih se može izraditi proizvod. Slobodno se, dakle, može kazati da su konstruiranje, izbor materijala i izbor postupaka proizvodnje međusobno povezane aktivnosti.

Problematika izbora materijala odgovoran je i iznimno složen posao. Zahtjeva jednoznačan odabir primjerene metodologije, poznavanje temeljnih kriterija izbora i, što je iznimno važno, imati na raspolaganju dovoljan broj varijanti, kako vrsta materijala tako i tehnologija njihove obrade, poboljšanja ili montaže gotovog proizvoda.

Današnje, suvremene metode osmišljavanja i razvoja proizvoda istovremeno analiziraju različite konstrukcijsko – proizvodne varijante, često kombinirajući različite konstrukcijske oblike, materijale i proizvodne postupke. Pažnja današnjih konstruktora i tehnologa najviše se posvećuje primjerenom i učinkovitom načinu povezivanja konstruiranja i proizvodnje u jedan sustavno – integrirani pristup pod imenom “istovremeno inženjerstvo“ (eng. “*concurrent engineering*“). Glavna osobina ovog pristupa očituje se u razmatranju svih važnih elemenata iz radnog vijeka proizvoda u početnoj, temeljnoj fazi konstruiranja proizvoda. Članovi jedinstvenog tima za problematiku konstruiranja proizvoda imaju složen zadatak voditi računa, jednostavno rečeno – o svemu. Od idejnog koncepta do mogućnosti razlaganja i uništenja proizvoda, imajući u vidu različite zahtjeve korisnika, kvalitetu kojoj se teži, sve uz – izradu što preciznije projekcije troškova i cijene.

Izbor, ili bolje rečeno projektiranje materijala izrade kalupa, istovremeno imajući na umu mogućnosti samog materijala i tehnološke sposobnosti poboljšanja njegovih radnih performansi, čini se logičnim pristupom i u budućnosti.

U ovom diplomskom radu provedene su i s realnim izborom materijala uspoređene dvije metode izbora. Prikazane metode u primjeni daju vrlo slične rezultate. Proces izbora materijala, čini se, sve više će određivati njegova sveobuhvatnost i integrativnost traženih svojstava materijala, ali i gotovog proizvoda.

Sveobuhvatnost početnih varijabli procesa izbora materijala jest i bit će *conditio sine qua non* (nezaobilazan uvjet) svakog novog proizvodnog koncepta. Dostupnost baze podataka o aktualnim materijalima, tehnologijama i informacijama koji ih opisuju, te znanja kako ih iskoristiti u tehnološkom konceptu osmišljavanja proizvoda, predstavljat će temeljne odrednice dobre stručne i tehnološke perspektive.

## LITERATURA

- [1] Filetin T.; *“Izbor materijala pri razvoju proizvoda“*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2006.
- [2] Ashby M., Shercliff H., Cebon D.; *“Materials Engineering, Science, Processing and Design“*, University of Cambridge, UK, 2007.
- [3] Ashby M.; *“Material Selection in Mechanical Design“*, 4<sup>th</sup> edition, Oxford, UK, 2011.
- [4] Autonet.hr; *“Blok motora“*, članak, [www.autonet.hr/blok-motora](http://www.autonet.hr/blok-motora), travanj 2013.
- [5] Filetin T.; *“Sustavno odlučivanje pri izboru materijala“*, članak, znanstveni, časopis *“Strojarstvo“* br. 30; str. 83 - 90; 1988.
- [6] [www.newworldencyclopedia.org/entry/Casting](http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Casting)
- [7] Živković D.; *“Lijevanje metala“*, interna skripta, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, 2007.
- [8] Kolumbić Z., Tomac N.: *“Materijali – podloge za diskusiju“*; Sveučilište u Rijeci; Filozofski fakultet, Odsjek za politehniku, Rijeka 2005; [www.ffri.hr/~zvonomir/Strojarska Tehnologija I/](http://www.ffri.hr/~zvonomir/Strojarska_Tehnologija_I/), 2LijevanjeV0.doc
- [9] LTH Metalni lijev d.o.o., Benkovac
- [10] [www.hunor.hr/?option=com\\_virtuemart&page=shop.browse&category\\_id=164&Itemid=176&lang=hr](http://www.hunor.hr/?option=com_virtuemart&page=shop.browse&category_id=164&Itemid=176&lang=hr)
- [11] [www.efunda.com/processes/metal\\_processing/die\\_casting.cfm](http://www.efunda.com/processes/metal_processing/die_casting.cfm)
- [12] Ljumović, P.; *“Analiza triboloških mehanizama trošenja na kalupima za visoko – tlačno lijevanje“*, specijalistički projekt, Sveučilište u Splitu; Sveučilišni odjel za stručne studije, Split 2013.
- [13] Ivušić V.; *“Tribologija“*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.
- [14] Deželić, R.; *“Metali II“*, skripta, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, 1987.
- [15] Stojanović, Ž., Stanisavljev, S., Radosavljević, S.; *“Primena postupka vanadiranja u funkciji produženja radnog veka delova“*, članak, časopis *Zaštita materijala* 54 (2013) broj 2.

- [16] Rosso, M., Ugues, D., Torres, E., Perucca, M., Kapranos, P.; “*Performance enhancements of die casting tools through PVD nanocoatings*“, članak, Int J Mater Form, DOI 10.1007/z12289 – 008 – 0131 – z (2008).
- [17] BÖHLER W300DE brochure, pdf.  
<http://www.bohler-edelstahl.com/english/files/W300DE.pdf>

## PRILOG 1

<p><b>1. SASTAV I MIKROSTRUKTURA MATERIJALA</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– kemijski sastav</li><li>– kemijska struktura</li><li>– mikrostrukturne karakteristike</li><li>– makrostrukturne karakteristike</li></ul>
<p><b>2. FIZIKALNA SVOJSTVA</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– opća: gustoća, talište, viskoznost...</li><li>– električna: električna vodljivost, električni otpor, dielektrična konstanta...</li><li>– magnetska</li><li>– toplinska, termodinamička: topl. vodljivost, topl. rastezljivost, spec. toplinski kapacitet, emisivnost, otpornost na gorenje...</li><li>– optička: indeks loma, prozirnost, reflektivnost...</li><li>– akustična: prigušenje zvuka</li><li>– nuklearna: vrijeme poluraspada, stabilnost...</li></ul>
<p><b>3. MEHANIČKA SVOJSTVA</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– opća: modul elastičnosti, modul smičnosti, Poissonov omjer, lomna žilavost...</li><li>– svojstva dobivena ispitivanjem uz statičko kratkotrajno opterećenje (vlak, tlak, savijanje, torzija): granica tečenja, čvrstoća, istezljivost, suženje poprečnog presjeka...</li><li>– tvrdoća</li><li>– svojstva dobivena ispitivanjem uz promjenjivo opterećenje (vlak-tlak, savijanje, torzija): vremenska dinamička izdržljivost, dinamička izdržljivost</li><li>– svojstva dobivena ispitivanjem uz udarno opterećenje: udarni rad loma (Charpy, Izod), prijelazna temperatura žilavosti...</li><li>– svojstva puzanja i relaksacije: granica puzanja, statička izdržljivost</li></ul>
<p><b>4. OTPORNOST NA KEMIJSKE, FIZIKALNE I BIOLOŠKE UTJECAJE</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– otpornost na medije i tvari u dodiru: otpornost na opću koroziju, interkristalnu koroziju, napetosnu koroziju, vodikovu krhkost, intenzivnu oksidaciju...</li><li>– otpornost na žive organizmima – biološka otpornost</li><li>– otpornost na UV svjetlo, zračenje</li><li>– uništivost kemijskim, fizikalnim ili biološkim djelovanjima</li></ul>
<p><b>5. OTPORNOST NA TROŠENJE – TRIBOLOŠKA SVOJSTVA</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– otpornost na adheziju</li><li>– otpornost na abraziju (eroziju, kavitaciju)</li><li>– otpornost na umor površine</li><li>– otpornost na tribokemijsko trošenje</li></ul>
<p><b>6. PROIZVODNA SVOJSTVA</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– livljivost</li><li>– oblikovljivost deformiranjem – kovkost - gnječivost - deformabilnost</li><li>– obradljivost odvajanjem čestica – rezljivost</li><li>– zavarljivost</li><li>– prikladnost za lijepljenje</li><li>– mogućnost zaštite površine</li><li>– toplinska obradljivost</li></ul>
<p><b>7. TRŽIŠNE KARAKTERISTIKE MATERIJALA I POLUPROIZVODA</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– komercijalne i standardne oznake i nazivi materijala</li><li>– stanja, oblici, dimenzije, tolerancije</li><li>– uvjeti i troškovi nabave</li><li>– cijena materijala</li></ul>

Tablica preuzeta i korištena iz:

Tomislav Filetin; "Izbor materijala pri razvoju proizvoda"; Poglavlje 2.5.2; "Svojstva materijala mjerodavna za odlučivanje", Tablica 2.2.; "Skupine svojstava i karakteristike materijala"; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2006.

## PRILOG 2

Niskolegirani čelici za rad do 550 °C (stara DIN oznaka)	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup> , pri °C			$R_{p1/10^4}$ , N/mm <sup>2</sup> , pri °C			
	200	400	500	450	500	530	580
C 35E	216	147	-	59	25	-	-
15 Mo 3	255	177	147	216	147	85	-
13 CrMo 4 4	275	206	177	-	186	78	-
22 CrMo 4 4	-	343	-	255	172	74	-
10 CrMoV 8 10	245	206	186	-	157	83	47
24 CrMoV 5 5	412	304	235	324	206	98	-

Super 12 %Cr visokopostojani čelici	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup> , pri °C				$R_{p1/10^4}$ , N/mm <sup>2</sup> , pri °C		
	200	400	500	600	500	550	600
X 19 CrMo 12 1	432	353	264	108	245	140	60
X 11 CrMoV 12 1	700	600	500	300	200	85	35
X 20 CrMoV 12 1	432	353	264	108	245	145	77
X 22 CrMoV 12 1	530 603	423 485	344 392	206 250	295	168	80
X 19 CrMoVNb 11 1	700	580	470	315	360	200	12
X 20 CrMoWV 12 1	530 650	423 530	377 430	206 270	260	160	60

Grupa čelika	Austenitni čelici za rad pri 600...800 °C	Sastav "ostalo"	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup> , pri °C			$R_{p1/10^4}$ , N/mm <sup>2</sup> , pri °C				
			400	600	700	550	650	700	750	800
I	X 6 CrNi 18 11	-	98	78	69	180	80	49	(34)	-
	X 8 CrNiMoNb 16 16	1,3 Mo; 1Nb	147	132	-	324	226	137	83	54
	G-X 8 CrNiMoVNb 16 13	1,3 Mo; 0,7 V; 1 Nb; 0,1N	167	147	-	353	157	88	-	-
II	X 40 CrNiCoNb 13 13	10 Co; 2 Mo; 2,6 W; 3 Nb	245	196	-	-	186	127	78	49
	X 40 CoCrNi 20 20 20	4 Mo; 4 W; 4 Nb	314	245	206	294	216	147	98	64
III	X 12 CrNiWTi 16 13	2,8 W; 4 Nb	420	400	300	335	216	157	103	64
	X 8 CrNiMoBNb 16 16	1,8 Mo; 0,08 B; 1 Nb	353	255	-	445	245	145	-	-
IV	X 50 CoCrNi 20 20 20	4 Mo; 4 W; 4 Nb	539	500	412	290	175	118	93	74
	X 5 NiCrTi 26 15	1,3 Mo; 0,3V; 2,1Ti	520	451	314	451	304	206	118	54
	X 6 NiCrMoTi 28 15	1,75 Mo; 2,1Ti	520	450	310	450	300	205	120	50

Tablica preuzeta i korištena iz:

Tomislav Filetin; "Izbor materijala pri razvoju proizvoda"; Poglavlje 3.5; "Otpornost pri povišenim i visokim radnim temperaturama", Tablica 3.23; "Mehanička svojstva čelika pri povišenim i visokim temperaturama"; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2006.