

Analiza mehaničkih svojstava praškastih materijala

Rudman, Franjo

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:031230>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-28**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA**

FRANJO RUDMAN

**ANALIZA MEHANIČKIH SVOJSTAVA PRAŠKASTIH
MATERIJALA**

Mentor:

Predavač:

Tomislav Božić, dipl.ing. strojarstva

KARLOVAC, 2015.



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij: STROJARSTVO

Usmjerenje: PROIZVODNO STROJARSTVO; Karlovac, 2015-09-16

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: **Franjo Rudman**

Matični broj: 0110610099

Naslov: **ANALIZA MEHANIČKIH SVOJSTAVA PRAŠKASTIH MATERIJALA**

Opis zadatka:

Završnim radom teorijski opisati tehnologije injekcijskog brizganja praškastih materijala.

U praktičnom dijelu završnog rada ispitivanja izvršiti na polaznim materijalima trgovačkog naziva "Catamold". U pripremi uzoraka za mehanička ispitivanja svojstava obratiti pozornost na parametre toplinske obrade i zadana svojstva probnih uzoraka, svojstva uzoraka provjeriti laboratorijskim mjerenjem.

Analizu dobivenih rezultata, sugestije optimalne pripreme i obrade za primjenu u realnoj proizvodnji dati u zaključku rada.

Zadatak zadan:

2015-09-16

Rok predaje rada:

2015-11-01

Predviđeni datum obrane:

2015-11-15

Mentor:

Tomislav Božić dipl.ing. strojarstva

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

IZJAVA:

Izjavljujem da sam ja – student Franjo Rudman, OIB: 73725724916, matični broj: 0110610099, upisan kao apsolvant akademske godine 2014./2015., radio ovaj rad samostalno, koristeći se znanjem stečenim tijekom obrazovanja, te uz stručnu pomoć i vođenje mentora Tomislava Božiča, dipl.ing.stroj. i kod eksperimentalnog dijela u laboratoriju Ane Fudurić, ing.stroj., kojima se ovim putem zahvaljujem. Sukladno tome zahvaljujem se Mariu Renduliću, ing.stroj. i Robertu Podvorcu, mag.ing.kemije na stručnoj suradnji pri izradi uzoraka.

Franjo Rudman

SAŽETAK

Tehnologija injekcijskog brizganja metala u današnje je vrijeme veoma popularna i rasprostranjena u svijetu. Trend primjene joj se sve više povećava. Razvijena je iz klasične tehnologije metalurgije prahova pa se može nazvati granom te tehnologije. Posljednjih nekoliko desetljeća tehnologija injekcijskog brizganja metala razvija se velikom brzinom i zadovoljava visoke zahtjeve današnje potražnje i proizvodnje. Udio ljudskog faktora je mali, a strojeva veliki što je uvelike olakšalo ovaj inače mukotrpan i dugotrajan posao. Zahvaljujući ovoj modernoj tehnologiji moguća je upotreba različitih vrsta materijala, moguće je dobivanje različitih geometrijskih oblika („dizajna“), omogućena je velika preciznost proizvoda i serijska proizvodnja. Pokazala se sposobnom za proizvodnju malih komponenti vrlo složenih oblika, a u većini slučajeva ovako dobivene komponente ne zahtjevaju dodatnu obradu kao što zahtjeva njihova konvencionalna izrada.

U ovom završnom radu objašnjen je proces kroz osnovne faze s naglaskom na svaku fazu, opisane su tehnologije injekcijskog brizganja praškastih materijala, izvršena su ispitivanja mehaničkih svojstava na materijalima trgovačkog naziva „Catamold“, te su provjerena laboratorijskim ispitivanjem.

SUMMARY

The technology of injection metal molding is nowadays very popular and spread worldwide, with the application trend rising more and more. It has been developed from the classic technology of powder metallurgy and can thus be considered as the branch of that technology. In the last couple of decades the technology of injection metal molding has been developing rapidly and meets the high requirements of supply and demand we find nowadays. The human factor is small, whereas the machine factor is considerable, which has greatly eased this arduous and extensive work. Thanks to this modern technology, the use of different types of materials and the possibility of creating different geometrical shapes (“designs”) is possible, with a high precision rate of the products and line production. The technology has proven capable of producing small components of highly complicated shapes, and in most cases, the components created in this way do not need to be further processed, as is the case with their conventional creation.

This thesis explains the process of the basic phase, with emphasis on each phase, describes the technologies of injection molding of powder materials. Tests of mechanical properties on materials called “Catamold” have been administered and examined in a laboratory.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PROCES INJEKCIJSKOG BRIZGANJA METALA	2
2.1 Prahovi	3
2.1.1. Dimenzije i razdioba čestica	3
2.1.2. Oblici i građa čestica	4
2.1.3. Gustoća praha	5
2.2. Priprema i miješanje sirovina	6
2.3. Struktura stroja za injekcijsko brizganje	7
2.3.1. Struktura brizgalne jedinice stroja	8
2.3.2. Klasični ciklus injekcijskog brizganja	9
2.4. Odvajanje veziva	10
2.5. Sinteriranje	12
2.5.1. Postupci poslije sinteriranja	14
3. VRUĆE IZOSTATIČKO PREŠANJE	15
4. EKSPERIMENTALNI DIO	17
4.1. Materijali	17
4.2. Testne epruvete	18
4.3. Toplinska obrada testnih epruveta	20
4.3.1. Kaljenje	21
4.3.2. Popuštanje	22
4.4. Mjerenje tvrdoće prije toplinske obrade	23
4.4.1. Ispitivanje tvrdoće po Brinellu	24
4.5. Mjerenje tvrdoće nakon toplinske obrade	26
4.5.1. Ispitivanje tvrdoće po Rockwellu	28
4.6. Ispitivanje udarne radnje loma	29
4.6.1. Mjerenje udarne radnje loma testnih epruveta	30
4.7. Ispitivanje čvrstoće na vlak	31

4.7.1 Ispitivanje vlačne čvrstoće testnih epruveta	33
5. ZAKLJUČAK	38
LITERATURA	39
POPIS SLIKA	40
POPIS OZNAKA.....	42

1. UVOD

Posljednjih nekoliko desetljeća tehnologija injekcijskog brizganja metala postala je izbor za proizvode malih dimenzija velike preciznosti, a koje bi bilo skuplje proizvesti drugim postupcima.

U procesu, sirovina koja se koristi za injekcijsko brizganje sastoji se od metalnih prahova kojima se dodaje mala količina veziva. Injekcijskim brizganjem dobijemo željeni oblik, nakon čega slijedi odvajanje veziva, te u daljnjem procesu, slijedi sinteriranje oblikovane sirovine, pri čemu dobivamo željene dimenzije i gustoće vrlo blizu teoretskima.

Tehnologijom injekcijskog brizganja, koja se danas brzo razvija i ima sve veću primjenu, uglavnom se proizvode dijelovi malih masa i malih debljina stjenki sa kompliciranom geometrijom. Većina tih dijelova je i gotov proizvod, tj. nema dodatne strojne obrade ili je ima u vrlo malim količinama.

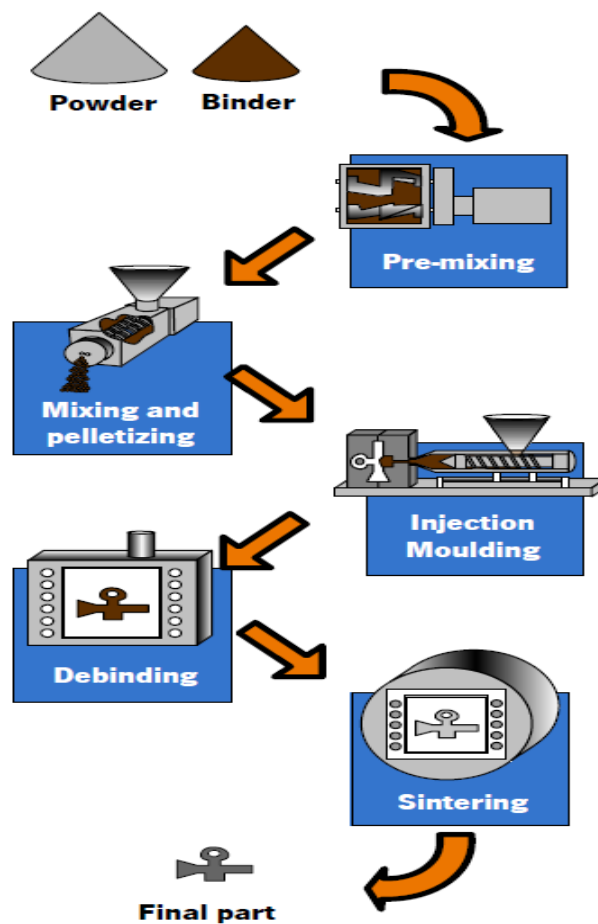
Dodatni postupak koji će biti objašnjen u radu je vruće izostatičko prešanje što je dodatna operacija nakon tehnologije injekcijskog brizganja. Ovim radom biti će objašnjeno ima li vruće izostatičko prešanje utjecaj na poboljšanje mehaničkih svojstava praškastih materijala, te danim rezultatima uvidjeti da li je ovaj postupak poželjan ili nije u tehnologiji injekcijskog brizganja metala.

2. PROCES INJEKCIJSKOG BRIZGANJA METALA

Obzirom da ovaj proces možemo provesti kroz mnogo različitih varijanti, ovisno o izboru praha, vrste veziva, načine brizganja, uklanjanje veziva i sinteriranja, uvijek imamo ova četiri koraka:

1. Miješanje praha i veziva da bi dobili sirovinu
2. Injekcijsko brizganje u kalupe
3. Uklanjanje veziva
4. Sinteriranje [1]

Slika 1.: Shematski prikaz injekcijskog brizganja metala od praha i veziva do finalnog proizvoda



Izvor: <https://repositorium.sdum.uminho.pt> (30.11.2015.)

2.1 Prahovi

Prah predstavlja fino usitnjene krute čestice. Metalurški prahovi obuhvaćaju metale i keramike.

Tri najvažnija svojstva praha su:

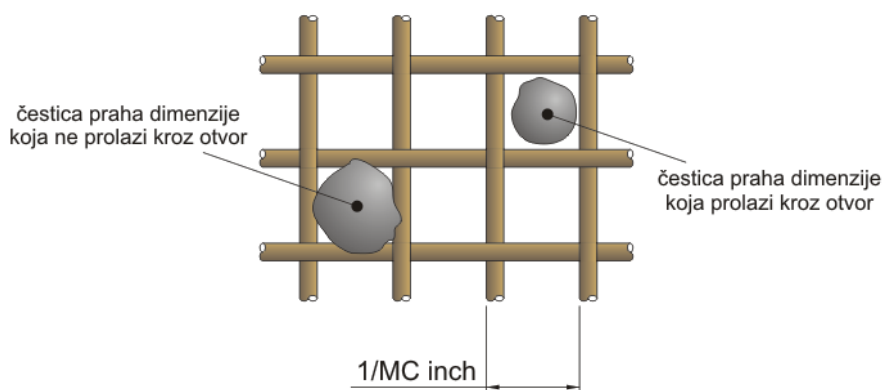
- dimenzije i razdioba čestica
- oblik i unutarnja građa čestica
- površina čestica [2]

2.1.1. Dimenzije i razdioba čestica

Da bi odredili dimenzije i odvojili čestice prah prolazi kroz seriju sita kvadratnih otvora različitih dimenzija (*Slika 2*). Mesh count (MC) izraz je za broj otvora sita po inču (1 inch = 25,4 mm). Npr. MC = 100 znači da postoji 100 otvora po inču, tj. ako po kvadratnom inču imamo oznaku 100 x 100 ona označava 10 000 otvora.

MC i otvori sita ponašaju se obrnuto proporcionalno. Stoga, što je veći MC to su sitniji otvori sita i kroz njih će propadati sitnije čestice [2].

Slika 2.: Čestice praha i sito za sortiranje

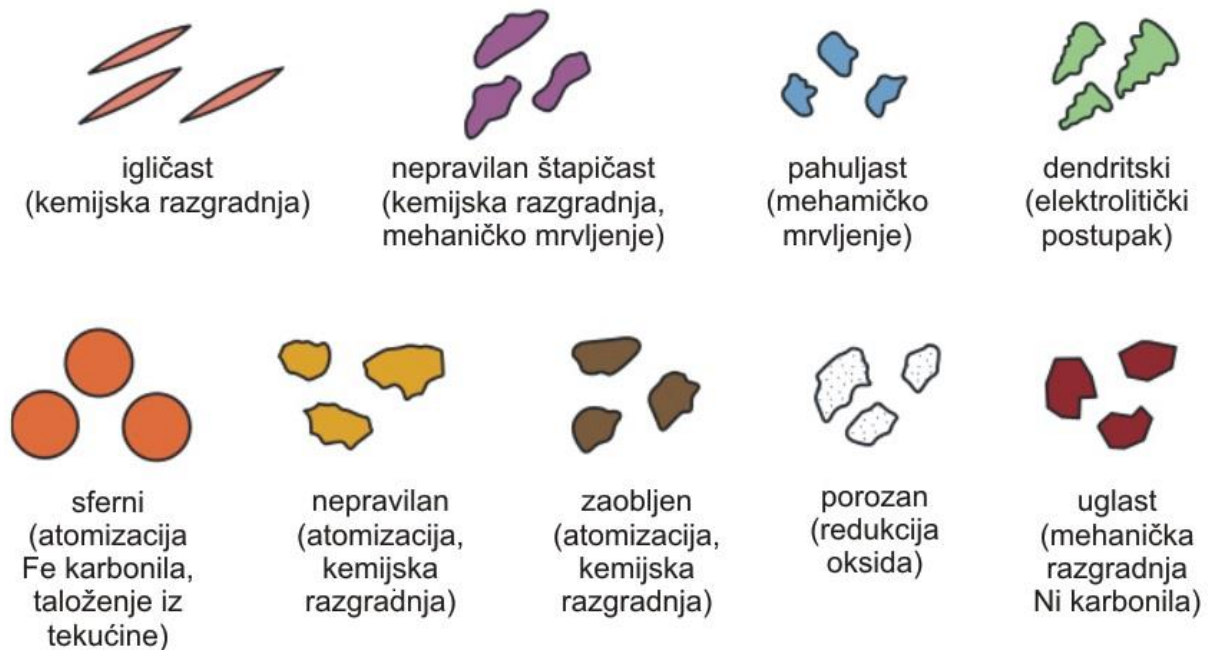


Izvor: http://www3.nd.edu/~manufact/MPPEM_pdf_files/Ch11.pdf (30.11.2015.)

2.1.2. Oblici i građa čestica

O tehnologiji proizvodnje ovisi kakav će biti oblik i građa čestica.

Slika 3.: Oblici čestica praha



Izvor: http://www3.nd.edu/~manufact/MPEM_pdf_files/Ch11.pdf (30.11.2015.)

Tehnološka svojstva praha su:

- **spособnost tečenja** – utječe na učinkovitost popunjavanja kalupa. Ona ovisi o oblicima i veličinama čestica kao i o dodanim vezivima.
- **spособnost sabijanja** – također ovisi o veličinama i oblicima čestica. Ono direktno utječe na čvrstoću i gustoću dobivenih proizvoda
- **spособnost sinteriranja** – pokazatelj je povećavanja čvrstoće veza među česticama praha, povećanja gustoće proizvoda pri sinteriranju i smanjenja poroznosti [2]

2.1.3. Gustoća praha

Kod praha treba razlikovati:

- **Stvarnu gustoću** koja predstavlja neto masu volumena čestica praha. Neto volumen bi se mogao dobiti taljenjem / skrućivanjem praha u krutinu bez pora.
- **Volumnu gustoću** koja predstavlja bruto masu volumena nasutih čestica praha. Bruto volumen je veći od neto volumena zbog praznih prostora prisutnih između čestica, pa je volumna gustoća manja od stvarne gustoće.

Faktor pakiranja izračunava se diobom volumne gustoće sa stvarnom gustoćom, a izražava se ovom formulom:

$$\text{faktor pakiranja} = \text{volumna gustoća} / \text{stvarna gustoća} < 1$$

Prema tome, faktor pakiranja je uvijek manji od 1.

- Faktor pakiranja prahova prije kompaktiranja obično se kreće između 0,5 ÷ 0,7
- čestice različitih veličina u prahu ponašaju se tako da sitnije čestice popunjavaju međuprostore koje formiraju veće čestice povećavajući time faktor pakiranja
- vibriranjem praha povećavamo faktor pakiranja, što dovodi do većeg slijeganja čestica
- Što je veći tlak kompaktiranja praha to imamo veći faktor pakiranja uslijed preraspoređivanja i deformiranja čestica

Poroznost se izražava omjerom volumena pora (*praznih prostora*) prema bruto volumenu.

$$\text{poroznosti} + \text{faktora pakiranja} = 1$$

Pore u samim česticama stvaraju problem kod određivanja poroznosti. Kada su čestice bez pora gornja jednačba je ispravna.

Komadni materijali jeftiniji su od prahova jer se za dobivanje prahova ulaže dodatna energija. Sukladno tome, metalurgija praha konkurentna je samo u određenim granicama primjena. Koriste se prahovi različiti kemijskih sastava.

1. **Elementarni** – koriste se kada je potrebno postići visoku čistoću proizvoda i sastoje se od samo jednog kemijskog elementa. Primjeri takvih prahova su
 - željezo,
 - aluminij
 - bakar.
2. **Smjese** – za dobivanje specijalnih legura miješaju se čestice više elementarnih prahova. Za napomenuti je da se specijalne legure ne mogu dobiti na konvencionalan način. Alatni čelici primjer su za to.
3. **Predlegirani prahovi** – sastav čestica praha odgovara po sastavu leguri koju je teško dobiti miješanjem čestica više elementarnih prahova. Uobičajeni su predlegirani prahovi od:
 - nehrđajućeg čelika,
 - određene legure bakra i
 - brzorezni alatni čelici [2]

2.2. Priprema i miješanje sirovina

Sve počinje miješanjem izabranog praha i veziva (slika 4.). Veziva obično imaju termoplastičnu bazu kao što su vosak ili polietilen, ali i celuloza, gelovi, silani, voda i različite anorganske supstance. Obično se vezivo sastoji od dvije ili tri komponente od kojih je jedna nereaktivna na metodu odvajanja veziva (eng. debinding method) da bi uzorak zadržao prvobitan oblik poslije odvajanja. Primjer veziva koje se rastali na 150°C sastoji se od 65% parafinskog voska, 30% polipropilena i 5% stearinske kiseline.

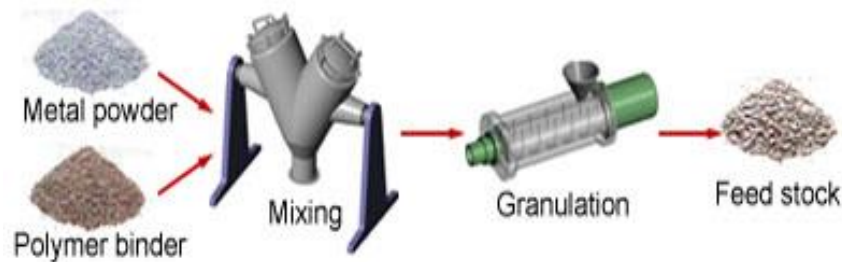
Čestice su male kako bi se omogućilo sinteriranje, a obično su veličine između 0,1 i 20 μm i približno sferična oblika.

Sirovina je izraz za mješavinu praha i veziva. Dobivanje ispravne sirovine ovisi o nekoliko parametara. Minimum veziva je potrebno da se ispune praznine između čestica i kako bi se omogućilo klizanje čestica u procesu ubrizgavanja u kalup. Konzistencija kod ubrizgavanja mora biti slična konzistenciji paste za zube.

Omjer praha i veziva utječe na viskozitet sirovine. Kod previsokog omjera praha i veziva dolazi do velike viskoznosti sirovine i smanjenja veziva koje bi ispunito prazan

prostor između čestica. Posljedično tome, teško je ubrizgati takvu sirovinu. Suprotno tome, ukoliko postoji previše veziva, što je nepoželjno, oblik komada se gubi uslijed odvajanja veziva. Nehomogenost u sirovini dovodi do grešaka u brizganju. Zadnji korak u pripremi sirovine je napraviti granule koje će se s lakoćom prenijeti u stroj za brizganje [1].

Slika 4.: Proces izrade sirovine



Izvor: <http://www.custompartnet.com/wu/metal-injection-molding> (01.12.2015.)

Slika 5.: Sirovina u obliku granula transportirana u ljevak na brizgalici



Izvor: <http://www.gkn.com/sintermetals/capabilities/MIM/process/Pages/injection-molding-process.aspx> (30.11.2015.)

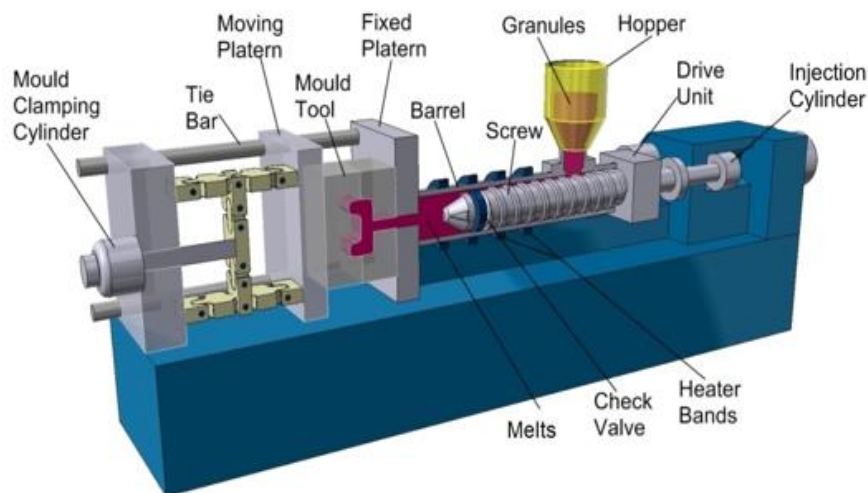
2.3. Struktura stroja za injekcijsko brizganje

Stroj za brizganje sastoji se od tri glavne jedinice: stezna jedinica, kontrolna jedinica i brizgalna jedinica. Kalup se sastoji od dvije polovice. Jedna strana kalupa je pomična, dok je druga fiksna. Kalup je montiran u steznoj jedinici stroja. Kada je kalup zatvoren pod pritiskom brizgalne jedinice moguće je ubrizgavanje sirovine. Nakon što stezna jedinica otvori kalup izbrizgani dio se vadi iz alata [3].

2.3.1. Struktura brizgalne jedinice stroja

Brizgalna jedinica sastoji se od pužnog vijka koji dozira sirovinu, sabija ju i uklanja mjehuriće zraka, grijače zone oko cilindra, u kojem se nalazi puž, koja zagrijava sirovinu na određenu temperaturu (180°C) i od mlaznice. Kroz mlaznicu brizgalna jedinica ubrizgava sirovinu u kalup koja je prethodno dozirana, zagrijana i sabijena u pužnom vijku. Sve to odvija se pod pritiskom. Cijeli proces brizganja prati se i upravlja na kontrolnoj jedinici stroja. Svi određeni parametri jednog ciklusa ubrizgavanja mogu se spremi te istovremeno usporediti sa parametrima prijašnjih ciklusa ubrizgavanja. Tijekom procesa brizganja kontrolna jedinica stroja prepoznaje dobar i loš ciklus te ih automatski razdvaja [3].

Slika 6.: Stroj za injekcijsko brizganje



Izvor: http://www.rutlandplastics.co.uk/advice/moulding_machine.html (01.12.2015.)

2.3.2. Klasični ciklus injekcijskog brizganja

Proizvodnja brizganog komada iz sirovine može se usporediti sa injekcijskim brizganjem plastike.

Faze proizvodnje brizganja možemo podijeliti na: doziranje sirovine, ubrizgavanje, otvaranje kalupa i vađenje gotovog brizganog komada.

Doziranje sirovine odvija se tako da pužni vijak dozira sirovinu koja je potrebna za jedan ciklus brizganja. Cilindar u kojem se nalazi pužni vijak obavijen je grijačima koji su podijeljeni u zone i svaka ta zona grije na određenu temperaturu i na taj način iz krute sirovine, tj. granula dobije se tečna masa. Istovremeno, pužni vijak sabija sirovinu.

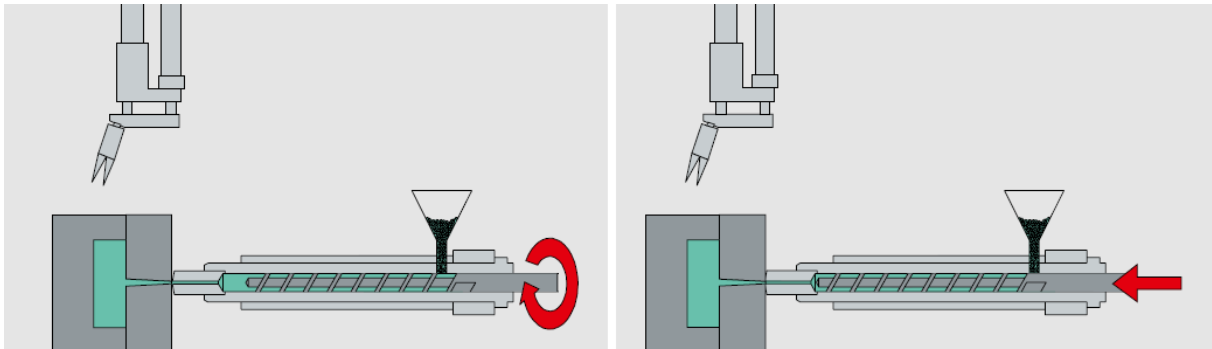
Ubrizgavanje se vrši na način da se pod velikim pritiskom sirovina ubrizgava u kalup koji ostaje zatvoren sve dok sirovina u njemu ne očvrsne. Istovremeno, brizgalna jedinica ponovno vrši doziranje sirovine za sljedeći ciklus.

Otvaranje kalupa slijedi nakon što brizgalna jedinica stroja odmakne mlaznicu koja je prislonjena na alat, tj. kada se zeleni komad u kalupu ohladi. Vađenje zelenog komada iz kalupa vrši se automatski.

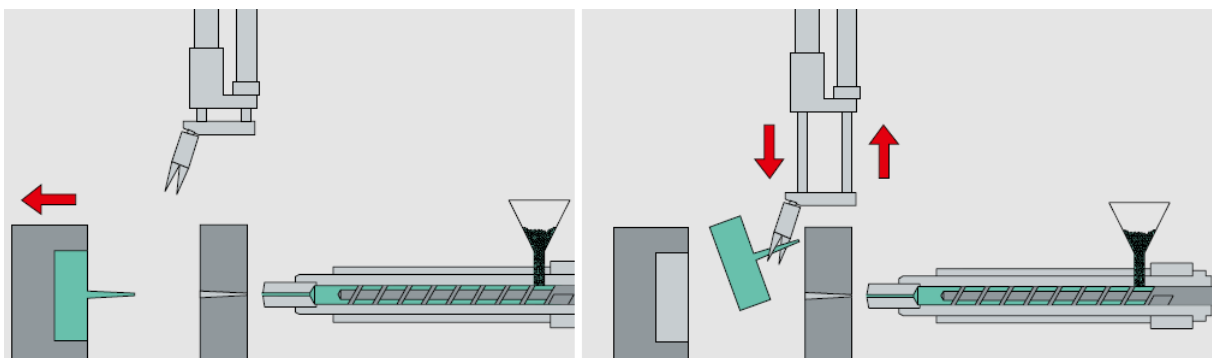
Vađenje gotovog brizganog komada (zeleni komad) vrši se robotskim sustavom. On se koristi da ne dođe do mehaničkih oštećenja uslijed vađenja brizganog komada zbog njegove krhkosti. Koristi se i iz razloga da proces proizvodnje bude automatiziran, tj. da vađenje brizganog komada ne uključuje operatera.

Činjenica da se materijal i kalup mogu zamijeniti ručno u manje od 20 minuta, čini ovaj proces pravovremenim (eng. just-in-time production). Obujam proizvodnje brizganih komada od metalnog praha moguć je, također, sa malom intervencijom operatera zbog različitih opcija automatizacije [3].

Slika 7.: Doziranje i ubrizgavanje sirovine



Slika 8.: Otvaranje kalupa i vađenje brizganog komada



Izvor slike 7. i slike 8.: <https://www.arburg.com> (01.12.2015.)

2.4. Odvajanje veziva

Tijekom procesa odvajanja dolazi do uklanjanja veziva iz zelenog komada katalizom, otapanjem ili termalnom dekompozicijom.

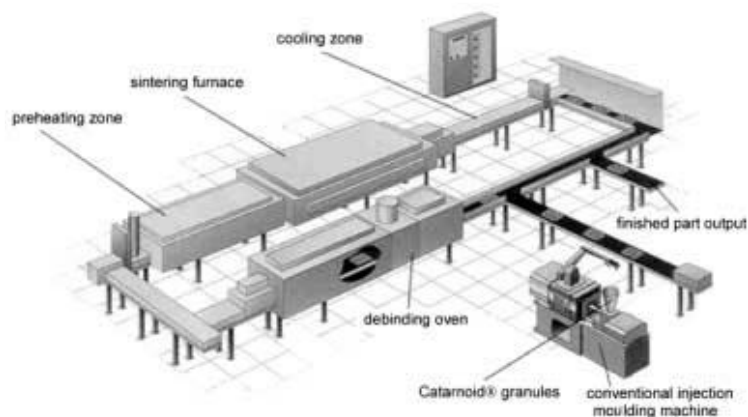
Odvajanje se odvija u peći pod određenim tlakom i temperaturom koji dovode do niza kemijskih reakcija. Prilikom uklanjanja veziva zeleni komad postaje porozan i krhak i kao takav nosi naziv „smeđi komad“. U ovakvom stanju povezan je ostatkom veziva, koje mu održava oblik, i slabim Van der Waalsovima silama. Peć za odvajanje mora ispuniti zahtjeve ovisno o vezivnom sustavu koji se koristi [3].

Ovaj korak je ključan i zahtjeva najveću pažnju.

Odvija se u nekoliko osnovnih procesa:

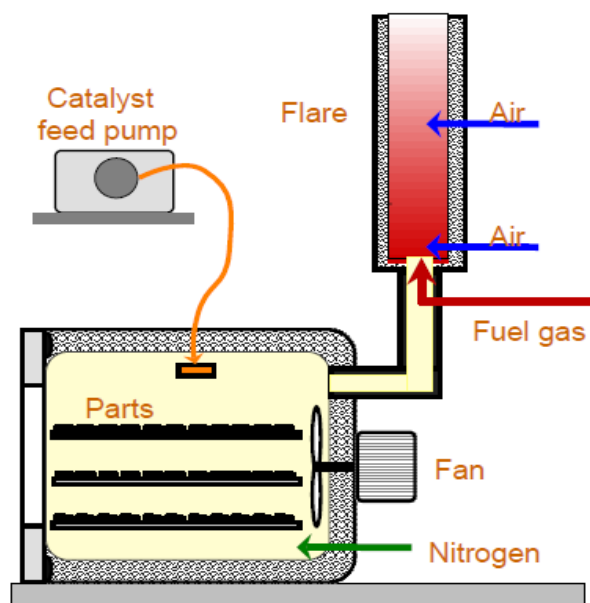
- 1) Zagrijavanje zelenog komada kako bi se polimerno vezivo otopilo i isparilo radi se vrlo oprezno da bi se izbjegle pogreške polugotovog proizvoda. Zato je povoljno koristiti nekoliko različitih veziva koji isparavaju na različitim temperaturama. Proces traje nekoliko sati. Vrijeme potrebno za odvajanje veziva ovisi o debljini stjenki komada.
- 2) Za katalitičko odvajanje sirovine polioksimetilena koristi se dušična kiselina, kao katalizator, u plinovitom stanju ili oksalna kiselina koje su uvelike smanjile vrijeme potrebno za odvajanje veziva i rizik od proizvodnje neupotrebljivog proizvoda. Katalitičko odvajanje veziva i sinteriranje može se odvijati tračno ili tako da su peći zasebno svaka za sebe. (slika 9.)
- 3) Drugi način uklanjanja veziva uključuje uranjanje zelenih komada u određena otapala kao što su aceton, etanol ili heksan. Neki sastojci veziva su čak topljivi i u vodi. Zadnji korak u procesu je zagrijavanje koje dovodi do isparavanja veziva.
- 4) Tijekom odvajanja veziva čvrstoća sada smeđeg komada uvelike se smanjuje i potreban je veliki oprez u rukovanju istih [4].

Slika 9.: Tračno odvajanje veziva i sinteriranje



Izvor: http://www.epma.com/doc_details/249-metal-injection-moulding-a-manufacturing-process-for-precision-engineering-components-3rd-edition# (02.12.2015.)

Slika 10.: Peć za katalitičko odvajanje veziva



Izvor: <http://www.mimtech-alfa.com/> (02.12.2015.)

2.5. Sinteriranje

Sinteriranje je proces zagrijavanja u kojem se naizgled odvojene čestice sada stapaju kako bi se dobila potrebna čvrstoća i gustoća finalnog komada. Proces se odvija kontrolirano u pećima za sinteriranje, nekad u vakumu, ispod točke tališta metala. Može se odvijati u plinovitoj atmosferi ili u vakumu.

Da bi se izbjegla oksidacija metala, tlakovi se moraju smanjiti. Osim zaštite metala niži tlakovi imaju prednost jer smanjuju okside na površini čestica praha. Sa smanjenjem veličine čestica povećava se udio oksida. Najveći značaj tehnologije injekcijskog brizganja je taj da koristi fine metalne prahove. Sastav korištene atmosfere ovisi o metalu koji se sinterira.

Za većinu metala potrebna je samo atmosfera čistog vodika, ali u slučajevima kada čelici imaju ugljik kao bitan legirni element atmosfera unutar komore peći mora biti inertna ili mora sadržavati ugljičnu komponentu tako da je u ravnoteži sa čelikom. Činjenica da je metalni prah kod injekcijskog brizganja finiji, sinteriranje je lakše zbog veće površinske energije čestica. Kako je smeđi komad vrlo porozan pojavljuje se veliko skupljanje i odvajanje ostatka veziva tijekom sinteriranja. Temperatura koja doseže 1250°C mora se pomno kontrolirati da bi se zadržao oblik.

Sinterirani komad ima gustoću veću od 95%, a mehanička svojstva slična onima kao i kod kovanog metala istog sastava [4].

Slika 11.: a) Zeleni komad, b) smeđi komad i c) gotov komad



Izvor: http://www.epma.com/doc_details/249-metal-injection-moulding-a-manufacturing-process-for-precision-engineering-components-3rd-edition# (02.12.2015.)

Slika 12.: Proces sinteriranja

SINTERING:

- **Remove all remanent binders.**
- **Adjust and stabilizing the carbon content (%C).**
- **Chemical composition homogeneizing.**
- **Porosity level reduction.**



Controlled homotetic shrinkage



Density increase (\cong 96% - 99,5%)



Mechanical properties improved.

(\uparrow E, H, R, A)

Izvor: <http://www.mimtech-alfa.com/> (03.12.2015.)

2.5.1. Postupci poslije sinteriranja

Svojstva komponenti injekcijskog brizganja metala mogu se poboljšati mnogim standardnim postupcima koji se primjenjuju kod kovanog metala kao što su toplinska obrada, različite antikorozivne prevlake i termo-kemijske obrade [4,5].

Često je površinski dio sinteriranog komada potpuno zgusnut tako da zaostala unutrašnja poroznost ne utječe negativno na postupke poslije sinteriranja [4]. Također, poslije sinteriranja moguća je i strojna obrada ukoliko je potrebno bušenje i pročišćavanje rupa ili neka druga operacija.

3. VRUĆE IZOSTATIČKO PREŠANJE

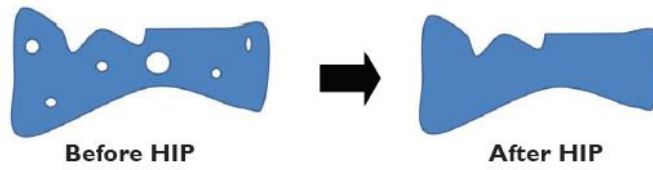
Vruće izostatičko prešanje (*eng. Hot Isostatic Pressing*) je proces koji se odvija sa velikim temperaturama i pod velikim pritiskom što poboljšava svojstva materijala. Kao inertni plin pod pritiskom najčešće je korišten argon. Vruće izostatičko prešanje se kod tehnologije injekcijskog brizganja metala koristi kao dodatni postupak da bi se eliminirao ostatak poroznosti (<5%) te kako bi se poboljšala mehanička svojstva[6]. Kod ovog postupka sinterirani komadi se pod visokim tlakom dodatno sabijaju i zagrijavaju. Tlak je u rasponu od niskog vakuma do 2000 bara, a temperatura se kreće od sobne do 2200°C. Peć namijenjena za ovaj postupak je radijalno i aksijalno ojačana snopovima prednapetih žica kako bi mogla izdržati visoke tlakove. Postupak se može primijeniti za uklanjanje poroznosti, pomlađivanje dijelova kod kojih je tijekom rada došlo do puzanja (lopatica, turbina) i difuzijsko spajanje različitih metala, te keramike i metala [2].

Slika 13.: Postrojenje i peć za vruće izostatičko prešanje



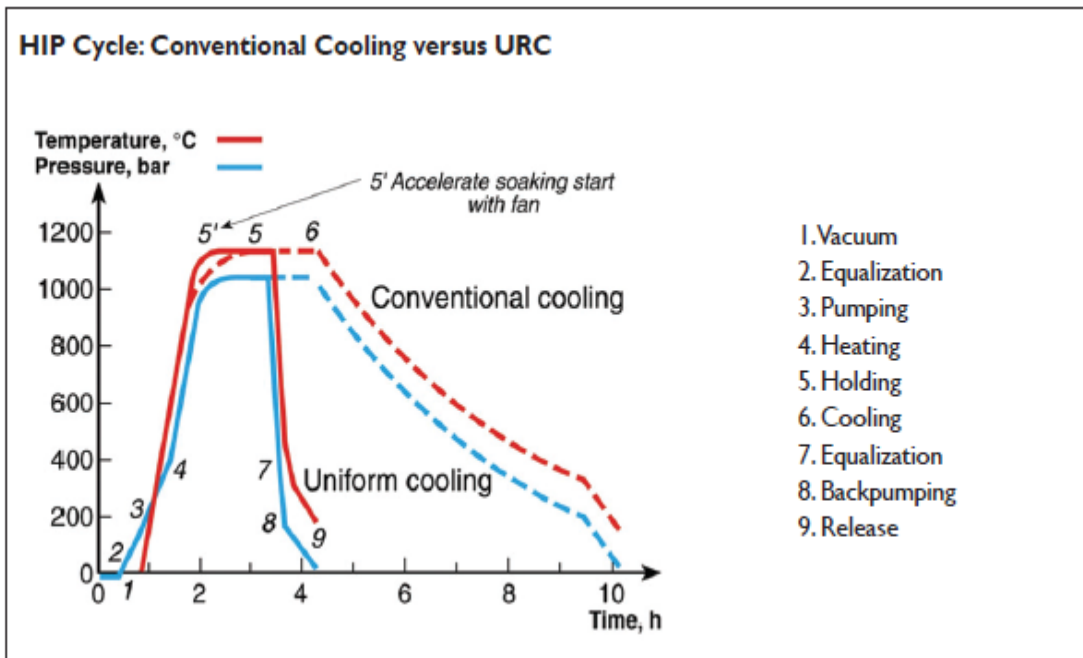
Izvor: <http://www.ipmd.net/news/003116.html> (04.12.2015.)

Slika 14.: Prije i poslije vrućeg izostatičkog prešanja



Izvor: http://www.epma.com/doc_download/246-introduction-to-pm-hip-technology-hip-hot-isostatic-pressing (05.12.2015.)

Slika 15.: Tipični ciklus vrućeg izostatičkog prešanja



Izvor: <http://www.pm-dk.dk/component/attachments/download/100> (04.12.2015.)

4. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio ovog rada zasniva se na ispitivanju mehaničkih svojstava praškastih materijala tvrtke BASF. Praškasti materijali korišteni su da bi se dobili testni uzorci. Tehnološki procesi kojima su uzorci dobiveni su injekcijsko brizganje metala, vruće izostatičko prešanje i toplinska obrada. Cilj ispitivanja bio je utvrditi ima li vruće izostatičko prešanje utjecaj na bolja mehanička svojstva praškastih materijala predodređenih za postupak injekcijskog brizganja metala.

4.1. Materijali

Materijal 4140 oznaka je po AISI/SAE normi, (Catamold 42CrMo4) –nisko legirani čelik predviđen za toplinsku obradu je sirovina u obliku granula koja je spremna za postupak injekcijskog brizganja metala. Kemijski sastav materijala poslije sinteriranja uključuje ugljik (0,35-0,45%), krom (0,9-1,2%), molibden (0,15-0,30%) i željezo.

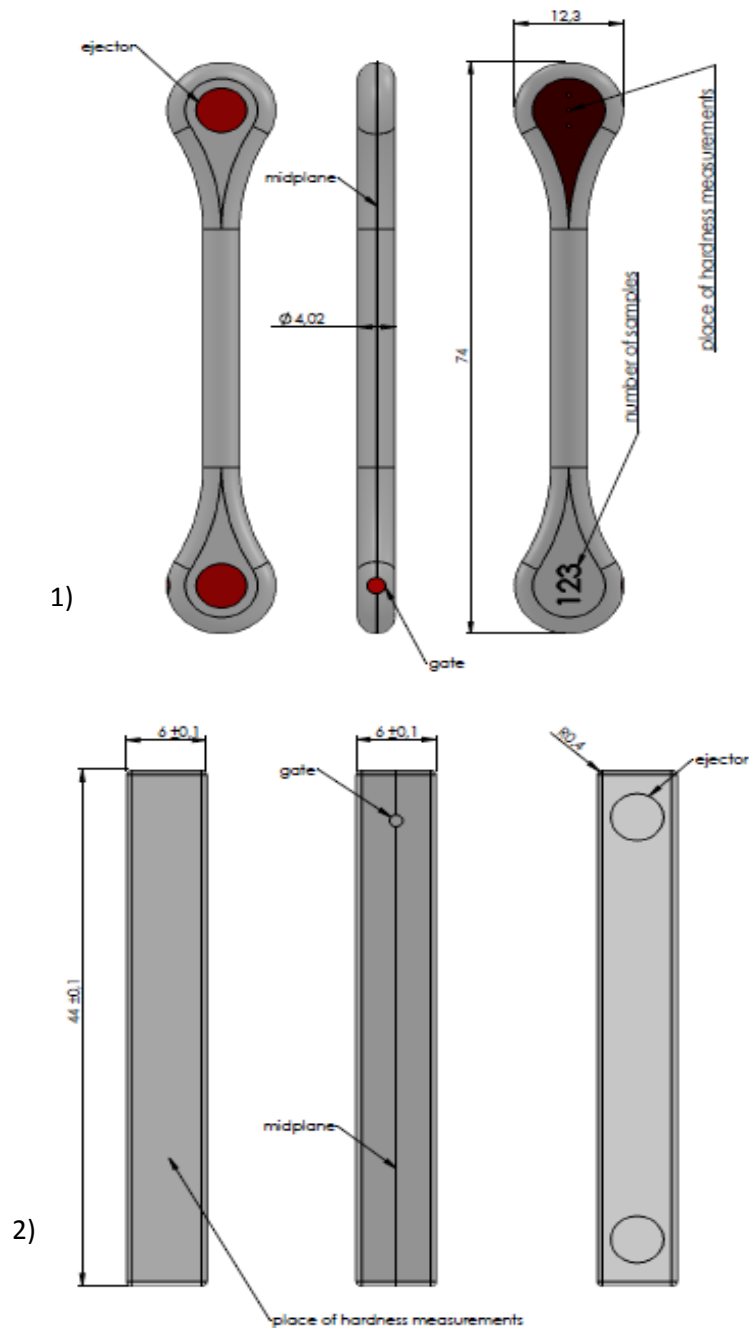
Materijal 8740 oznaka je po AISI/SAE normi (Catamold 8740) - nisko legirani čelik predviđen za toplinsku obradu je sirovina u obliku granula koja je spremna za postupak injekcijskog brizganja metala. Kemijski sastav materijala poslije sinteriranja uključuje ugljik (0,45-0,55%), krom (0,40-0,60%), molibden(0,25-0,40%), nikal (0,50-0,80%), mangan ($\leq 0,1\%$), silicij (0,30-0,55%), željezo čini ostatak.

Materijal 4340 oznaka je po AISI/SAE normi (Catamold 4340) - nisko legirani čelik predviđen za toplinsku obradu je sirovina u obliku granula koja je spremna za postupak injekcijskog brizganja metala. Kemijski sastav materijala poslije sinteriranja uključuje ugljik (0,35-0,45%), nikal (1,65-2,0%), krom (0,60-0,90%), molibden (0,20-0,30%), željezo čini ostatak [7].

4.2. Testne epruvete

Imali smo dva oblika testnih epruveta. Testna epruveta za statički vlačni pokus je oblika „dog bone“ i ona je izrađena po standardu ISO 2740. Druga testna epruveta predviđena je za ispitivanje udarne radnje loma kod koje se koristi Charpyeva metoda.

Slika 16.: Testne epruvete: 1) „dog bone“, 2) pravokutna



Izvor: Izradio autor (25.11.2015.)

Korišteni broj testnih epruveta prikazuju tablice 1. i 2. Usporedba testnih epruveta vršit će se između uzoraka dobivenih postupkom injekcijskog brizganja metala, te uzoraka koji su dobiveni i injekcijskim brizganjem metala i vrućim izostatičkim prešanjem. Svi uzorci dodatno su tretirani toplinskom obradom (kaljenjem i popuštanjem) kako bi se postigla jednaka tvrdoća (40 ± 2 HRC). Podjednaka tvrdoća dobivena toplinskom obradom uvjet je za daljnje ispitivanje.

Tablica 1.: Broj uzoraka za testiranje nakon MIM-a

Mim			
materijal	oznaka	broj uzoraka	vrsta epruvete
4140	1	3	dog bone
8740	2	3	dog bone
4340	3	3	dog bone
4140	1	3	6x6x44
8740	2	3	6x6x44
4340	3	3	6x6x44

Izvor: Izradio autor (25.11.2015.)

Tablica 2.: Broj uzoraka za testiranje nakon HIP-a

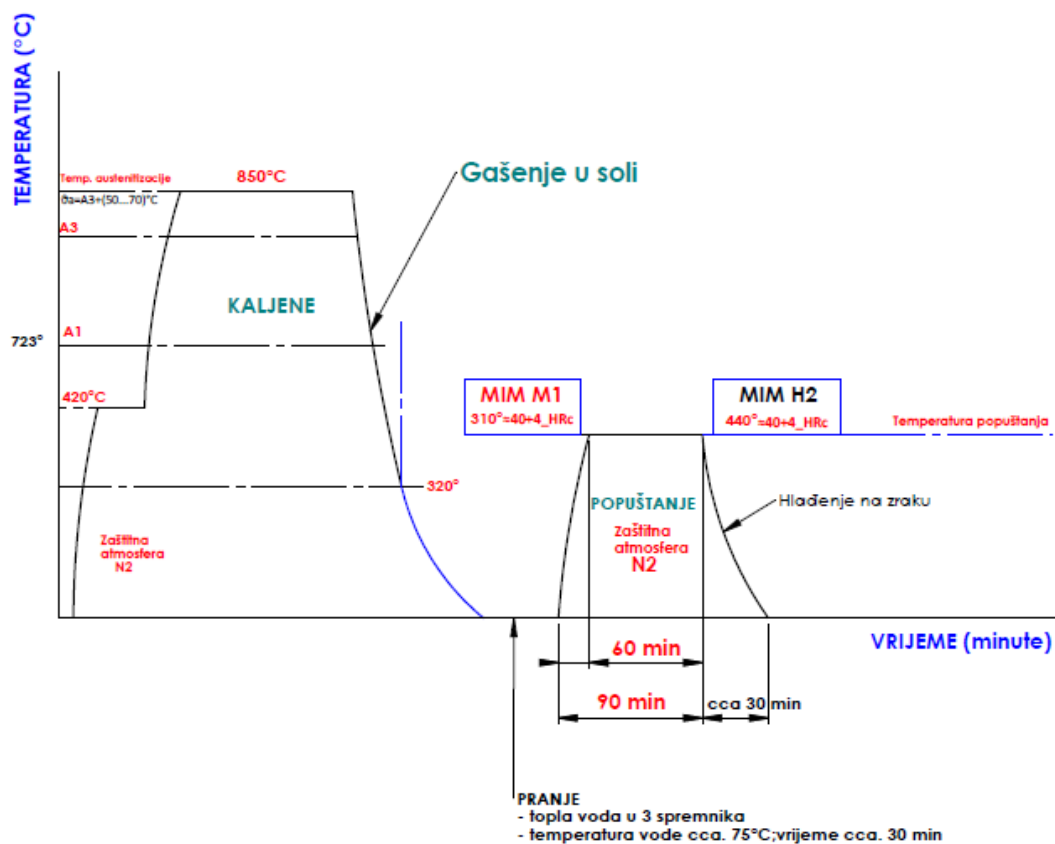
Hip			
materijal	oznaka	broj uzoraka	vrsta epruvete
4140	11	3	dog bone
8740	12	3	dog bone
4340	13	3	dog bone
4140	11	3	6x6x44
8740	12	3	6x6x44
4340	13	3	6x6x44

Izvor: Izradio autor (25.11.2015.)

4.3. Toplinska obrada testnih epruveta

Toplinska obrada testnih epruveta rađena je da bi svi uzorci bili podjednake tvrdoće (40 ± 2 HRC) što je preduvjet da ovo testiranje bude mjerodavno. Procesi toplinske obrade bili su kaljenje i popuštanje. Kao zaštitna atmosfera koristio se inertni plin dušik, temperatura austenitizacije iznosila je 850°C (ϑ_a). Sol se koristila kao element gašenja. Pranje između kaljenja i popuštanja odvija se u spremnicima tople vode (75°C) i otprilike 30 min. Proces popuštanja traje otprilike 120 minuta, potrebno vrijeme zagrijavanja na temperaturu popuštanja (ϑ_p) je 30 minuta, zadržavanje na temperaturi popuštanja (ϑ_p) je 60 minuta, dok vrijeme hlađenja traje otprilike 30 minuta. Temperatura popuštanja za uzorke injekcijskog brizganja metala iznosi 310°C (ϑ_{p1}), a temperatura za uzorke nakon postupka vrućeg izostatičkog prešanja iznosi 440°C (ϑ_{p2}). Hlađenje nakon popuštanja odvija se putem zraka. Zbog tvrdoće koju želimo postići (40 ± 2 HRC) imamo različite temperature popuštanja navedenih uzoraka.

Slika 17.: Dijagram kaljenja i popuštanja testnih epruveta



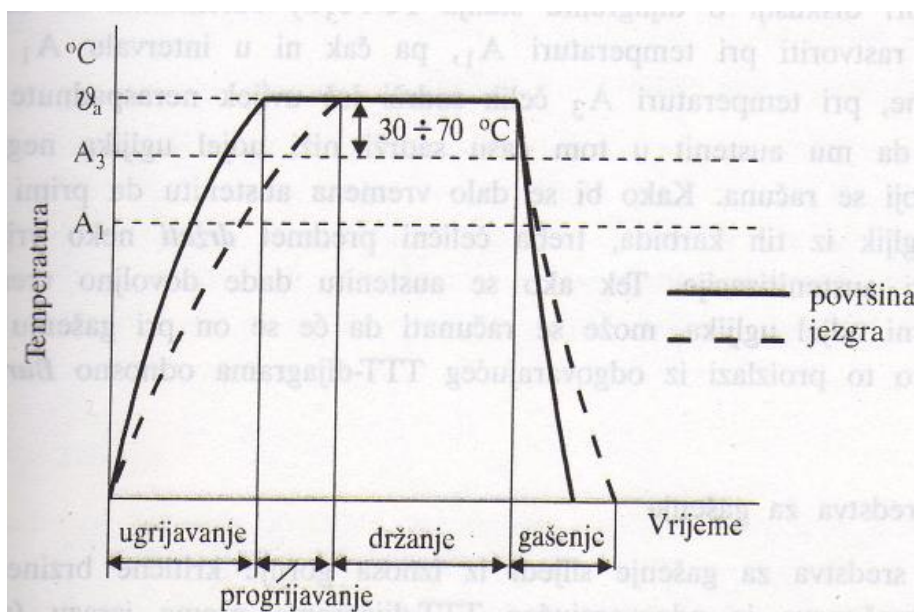
Izvor: Izradio autor (22.11.2015.)

4.3.1. Kaljenje

Svrha kaljenja, ovisno o udjelu ugljika u čeliku, je postizanje maksimalne moguće tvrdoće i što jednoličnije tvrdoće po poprečnom presjeku.

Kaljenje se kao postupak sastoj od zagrijavanja na temperaturu austenitizacije i progrijavanje, zadržavanje na temperaturi austenitizacije i gašenja da bi dobili martenzitnu strukturu.

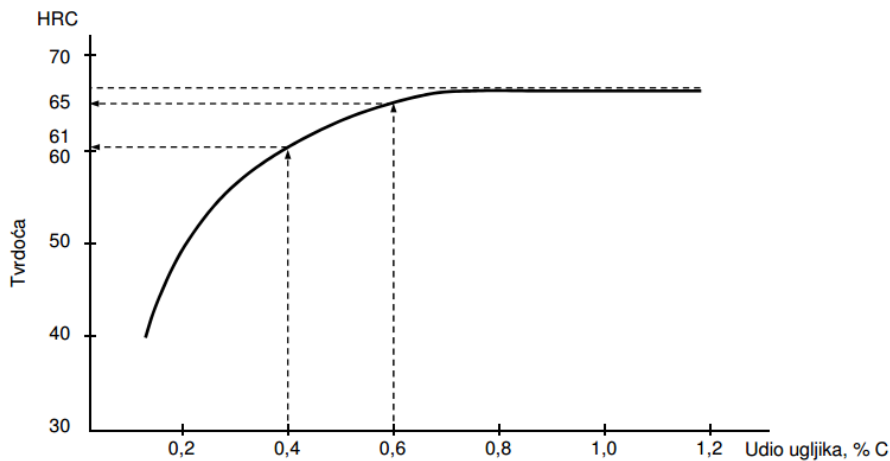
Slika 18.: Primjer dijagrama kaljenja



Izvor: Stupnišek M., Cajner F.: Osnove toplinske obrade metala (06.12.2015.)

Kontrola kaljenog predmeta izvodi se mjerenjem tvrdoće nakon gašenja i usporedbom Burnsovog dijagrama s dobivenom tvrdoćom. Ukoliko imamo serijsku proizvodnju kaljenje se također kontrolira rendgenskim, mikrografskim, ultrazvučnim i drugim ispitivanjima. [8]

Slika 19.: Burnsov dijagram

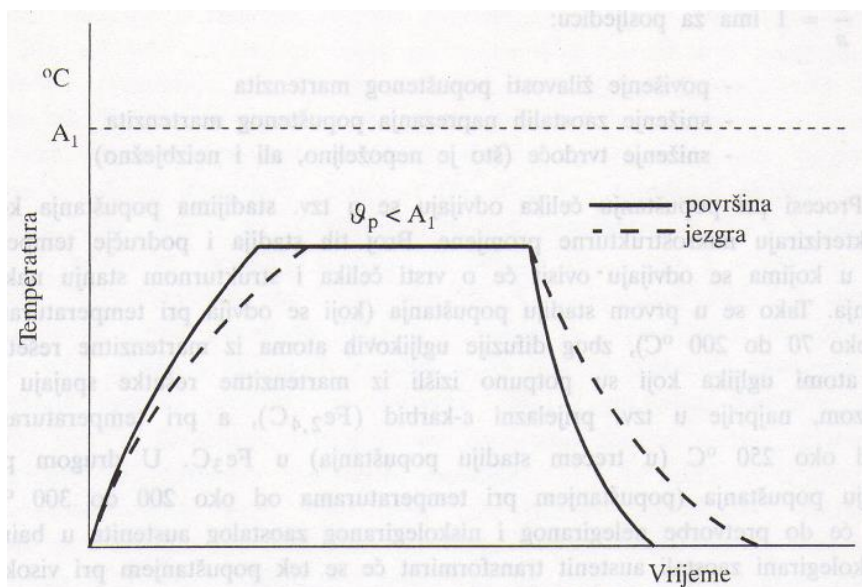


Izvor: https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1329396769-0-prezentacija_mat_ii_to_pdf_bez_teksta.pdf (06.12.2015.)

4.3.2. Popuštanje

Popuštanje je postupak ugrijavanja kaljenog čelika na temperaturu ispod temperature eutektoidne pretvorbe (A_1) s ciljem veće žilavosti martenzita postignutog kaljenjem i smanjenja zaostalih naprezanja. Posljedica popuštanja je manja tvrdoća nego nakon kaljenja.

Slika 20.: Dijagram popuštanja



Izvor: Stupnišek M., Cajner F.: Osnove toplinske obrade metala (06.12.2015.)

4.4. Mjerenje tvrdoće prije toplinske obrade

Prije toplinske obrade ispitana je tvrdoća po Brinellu na svim testnim uzorcima, svaki uzorak ispitivan je tri puta, te je uzeta srednja vrijednost, tako da imamo što preciznije podatke. Vrijednosti ispitivanja date su u tablicama 3. i 4.

Tablica 3.: Tvrdoća po Brinellu za MIM uzorke prije toplinske obrade

MIM									
Materijal	Redni broj	Dog bone				6x6x44			
		HB30-1	HB30-2	HB30-3	HB30-srednja	HB30-1	HB30-2	HB30-3	HB30-srednja
4140	1.	190,0	187,7	188,1	188,6	176,5	171,3	174,6	174,1
	2.	183,9	186,1	186,5	185,5	193,4	180,5	175,8	183,2
	3.	195,2	191,5	204,6	197,1	169,3	164,7	175,2	169,7
	srednja	189,7	188,4	193,1	190,4	179,7	172,2	175,2	175,7
	max	195,2	191,5	204,6	197,1	193,4	180,5	175,8	183,2
	min	183,9	186,1	186,5	185,5	169,3	164,7	174,6	169,7
	raspon	11,3	5,4	18,1	11,6	24,1	15,8	1,2	13,5
8740	1.	204,4	210,0	203,5	206,0	189,9	191,4	197,7	193,0
	2.	202,3	203,1	203,8	203,1	188,4	188,8	196,4	191,2
	3.	199,2	200,3	201,3	200,3	188,2	194,0	188,0	190,1
	srednja	202,0	204,5	202,9	203,1	188,8	191,4	194,0	191,4
	max	204,4	210,0	203,8	206,0	189,9	194,0	197,7	193,0
	min	199,2	200,3	201,3	200,3	188,2	188,8	188,0	190,1
	raspon	5,2	9,7	2,5	5,7	1,7	5,2	9,7	2,9
4340	1.	210,5	208,9	210,4	209,9	204,3	206,9	206,1	205,8
	2.	217,0	217,1	220,5	218,2	206,8	208,3	206,5	207,2
	3.	215,0	200,2	217,8	211,0	206,5	208,9	213,0	209,5
	srednja	214,2	208,7	216,2	213,0	205,9	208,0	208,5	207,5
	max	217,0	217,1	220,5	218,2	206,8	208,9	213,0	209,5
	min	210,5	200,2	210,4	209,9	204,3	206,9	206,1	205,8
	raspon	6,5	16,9	10,1	8,3	2,5	2,0	6,9	3,7

Izvor: Izradio autor (28.11.2015.)

Tablica 4.: Tvrdća po Brinellu za HIP uzorke prije toplinske obrade

HIP									
Materijal	Redni broj	Dog bone				6x6x44			
		HB30-1	HB30-2	HB30-3	HB30-srednja	HB30-1	HB30-2	HB30-3	HB30-srednja
4140	1.	261,3	262,4	261,6	261,8	253,8	257,6	260,0	257,1
	2.	258,8	257,6	263,8	260,1	255,1	255,7	261,4	257,4
	3.	262,9	263,6	262,0	262,8	260,8	265,2	258,1	261,4
	srednja	261,0	261,2	262,5	261,6	256,6	259,5	259,8	258,6
	max	262,9	263,6	263,8	262,8	260,8	265,2	261,4	261,4
	min	258,8	257,6	261,6	260,1	253,8	255,7	258,1	257,1
	raspon	4,1	6,0	2,2	2,8	7,0	9,5	3,3	4,2
8740	1.	263,3	265,1	265,2	264,5	263,6	255,7	268,3	262,5
	2.	262,4	266,5	262,2	263,7	259,1	260,6	265,2	261,6
	3.	267,6	259,0	270,1	265,6	262,2	255,5	268,3	262,0
	srednja	264,4	263,5	265,8	264,6	261,6	257,3	267,3	262,1
	max	267,6	266,5	270,1	265,6	263,6	260,6	268,3	262,5
	min	262,4	259,0	262,2	263,7	259,1	255,5	265,2	261,6
	raspon	5,2	7,5	7,9	1,9	4,5	5,1	3,1	0,9
4340	1.	250,9	249,1	252,4	250,8	256,6	253,0	258,0	255,9
	2.	251,5	257,5	253,8	254,3	252,1	265,4	253,5	257,0
	3.	255,1	254,4	251,3	253,6	251,8	253,4	250,9	252,0
	srednja	252,5	253,7	252,5	252,9	253,5	257,3	254,1	255,0
	max	255,1	257,5	253,8	254,3	256,6	265,4	258,0	257,0
	min	250,9	249,1	251,3	250,8	251,8	253,0	250,9	252,0
	raspon	4,2	8,4	2,5	3,5	4,8	12,4	7,1	5,0

Izvor: Izradio autor (28.11.2015.)

4.4.1. Ispitivanje tvrdoće po Brinellu

Ispitivanje se provodi tako da u glatku i ravnu površinu materijala utiskujemo čeličnu kaljenu kuglicu promjera D (mm) koja je opterećena određenom silom F(N) u nekom određenom vremenu t(s). Sama tvrdoća je omjer primijenjene sile i površine otiska:

$$HB = \frac{F}{S},$$

F – sila kojom je opterećena kuglica (N),

S – ploština otiska, mm² .

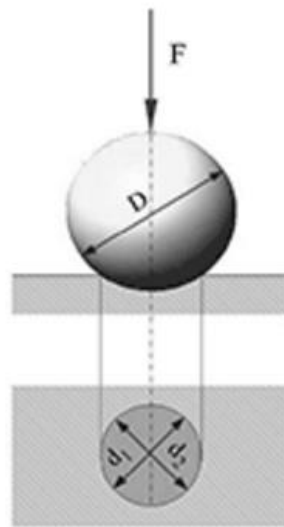
$$HB = 0,102 \frac{2xF}{\pi D (D - \sqrt{(D^2 - d^2)})}$$

F – sila kojom je opterećena kuglica (N),

D – promjer zakaljene čelične kuglice (mm),

d – srednja vrijednost od dvije izmjerene dijagonale (mm).

Slika 21.: Princip ispitivanja po Brinellovoj metodi



$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Izvor: http://www.vorax.hr/dokumenti/hr/mjer_tvr_hr.html (06.12.2015.)

Izvide se 3 ili 6 otisaka te se računa srednja vrijednost. Kuglica može biti od tvrdog metala (HBW) koja mjeri tvrdoću do 800 HBW. Druga vrsta kuglice je od kaljenog čelika (HBS) i ona može mjeriti vrijednosti do 450 HBS. Drugim metodama se ispituju veće tvrdoće od navedenih vrijednosti.

Postupak je precizan, ali ima i nedostataka. Ukoliko ispituje tvrdoću materijala kojima je vrijednost veća od 450 HBS i 800 HBW dolazi do deformacije kuglice [9].

4.5. Mjerenje tvrdoće nakon toplinske obrade

Poslije toplinske obrade ispitana je tvrdoća po Rockwellu na svim testnim uzorcima, svaki uzorak ispitivan je tri puta te je uzeta srednja vrijednost, tako da imamo što preciznije podatke. Tražena tvrdoća bila je 40 ± 2 HRC. Vrijednosti ispitivanja date su u tablicama 5. i 6.

Tablica 5.: Tvrdoća po Rockwellu za MIM uzorke nakon toplinske obrade

MIM									
Materijal	Redni broj	Dog bone				6x6x44			
		HRC-1	HRC-2	HRC-3	HRC-srednja	HRC-1	HRC-2	HRC-3	HRC-srednja
4140	1.	41,0	41,5	42,0	41,5	42,0	41,0	41,5	41,5
	2.	41,0	41,5	41,0	41,2	42,0	42,0	42,5	42,2
	3.	42,0	42,0	42,0	42,0	43,0	42,0	41,0	42,0
	srednja	41,3	41,7	41,7	41,6	42,3	41,7	41,7	41,9
	max	42,0	42,0	42,0	42,0	43,0	42,0	42,5	42,2
	min	41,0	41,5	41,0	41,2	42,0	41,0	41,0	41,5
	raspon	1,0	0,5	1,0	0,8	1,0	1,0	1,5	0,7
8740	1.	42,5	42,0	42,0	42,2	43,0	42,5	42,0	42,5
	2.	43,0	41,0	41,0	41,7	42,0	43,0	42,0	42,3
	3.	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	41,5	42,0	42,2
	srednja	42,8	42,0	42,0	42,3	42,7	42,3	42,0	42,3
	max	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	42,0	42,5
	min	42,5	41,0	41,0	41,7	42,0	41,5	42,0	42,2
	raspon	0,5	2,0	2,0	1,3	1,0	1,5	0,0	0,3
4340	1.	40,5	40,5	41,0	40,7	40,5	40,0	40,0	40,2
	2.	41,0	41,0	41,5	41,2	42,0	41,0	41,5	41,5
	3.	40,5	40,5	41,0	40,7	40,0	40,5	40,5	40,3
	srednja	40,7	40,7	41,2	40,8	40,8	40,5	40,7	40,7
	max	41,0	41,0	41,5	41,2	42,0	41,0	41,5	41,5
	min	40,5	40,5	41,0	40,7	40,0	40,0	40,0	40,2
	raspon	0,5	0,5	0,5	0,5	2,0	1,0	1,5	1,3

Izvor: Izradio autor (28.11.2015.)

Tablica 6.: Tvrdoća po Rockwellu za HIP uzorke nakon toplinske obrade

HIP

Materijal	Redni broj	Dog bone				6x6x44			
		HRC-1	HRC-2	HRC-3	HRC-srednja	HRC-1	HRC-2	HRC-3	HRC-srednja
4140	1.	40,0	41,0	42,0	41,0	42,0	42,0	41,0	41,7
	2.	42,0	40,5	42,0	41,5	43,0	42,0	44,0	43,0
	3.	42,0	42,0	42,0	42,0	40,5	41,5	41,0	41,0
	srednja	41,3	41,2	42,0	41,5	41,8	41,8	42,0	41,9
	max	42,0	42,0	42,0	42,0	43,0	42,0	44,0	43,0
	min	40,0	40,5	42,0	41,0	40,5	41,5	41,0	41,0
	raspon	2,0	1,5	0,0	1,0	2,5	0,5	3,0	2,0
8740	1.	41,0	40,5	42,0	41,2	41,0	43,0	43,0	42,3
	2.	41,5	42,0	41,0	41,5	42,0	41,5	42,5	42,0
	3.	42,0	42,5	43,0	42,5	41,0	41,0	41,0	41,0
	srednja	41,5	41,7	42,0	41,7	41,3	41,8	42,2	41,8
	max	42,0	42,5	43,0	42,5	42,0	43,0	43,0	42,3
	min	41,0	40,5	41,0	41,2	41,0	41,0	41,0	41,0
	raspon	1,0	2,0	2,0	1,3	1,0	2,0	2,0	1,3
4340	1.	40,5	40,0	41,0	40,5	40,5	40,5	41,0	40,7
	2.	41,0	40,5	40,5	40,7	40,5	41,0	40,0	40,5
	3.	40,0	40,5	39,5	40,0	40,5	41,0	40,5	40,7
	srednja	40,5	40,3	40,3	40,4	40,5	40,8	40,5	40,6
	max	41,0	40,5	41,0	40,7	40,5	41,0	41,0	40,7
	min	40,0	40,0	39,5	40,0	40,5	40,5	40,0	40,5
	raspon	1,0	0,5	1,5	0,7	0,0	0,5	1,0	0,2

Izvor: Izradio autor (28.11.2015.)

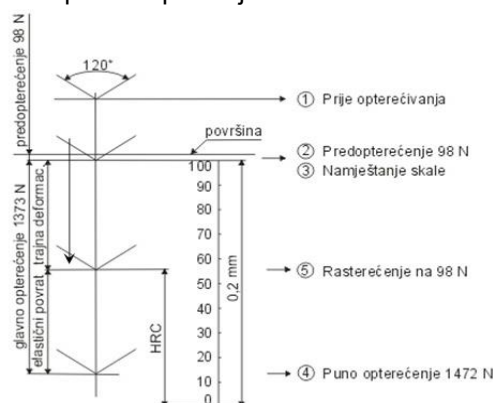
Kao što možemo zaključiti iz tablica, dobiveni rezultati nam ukazuju na to da je toplinska obrada prošla uspješno i da su svi uzorci postigli približnu vrijednost 40 ± 2 HRC. Samim time možemo pristupiti ispitivanju statičkog vlačnog pokusa i ispitivanju udarne radnje loma Charpyevom metodom.

4.5.1. Ispitivanje tvrdoće po Rockwellu

Kod Rockwellove metode se u metal utiskuje dijamanтни stožac (engl. "cone" - HRC metoda) ili kuglica od kaljenog čelika (engl. "ball" - HRB metoda). Najčešće je to penetrator oblika dijamantnog stožca s vršnim kutem od 120° . Kod Rockwellove metode se, za razliku od ostalih metoda, mjeri dubina prodiranja penetratora, a ne veličina otiska.

Mjerenje Rockwellovom metodom provodi se tako da se penetrator opterećuje silom $F=100\text{N}$ u položaju 1. Posljedica toga je prodiranje penetratora ispod površine uzorka, što je ujedno i početni položaj mjerenja dubine. Ukupna moguća dubina prodiranja iznosi $0,2\text{ mm}$ i podijeljena je na 100 dijelova. To znači da jedna podjela iznosi $0,002\text{ mm}$ i tako predstavlja jedan stupanj tvrdoće po Rockwellovoj metodi. Skala je okrenuta naopako. Početni položaj skale pokazuje vrijednost 100, a najveća dubina prodiranja na skali iznosi 0. Razlog tomu je činjenica da se manjoj dubini prodiranja (tvrđi materijali) pridružuje veći broj koji karakterizira veću tvrdoću, i obrnuto. Nakon predopterećenja ($F=98\text{ N}$) slijedi glavno opterećenje ($F=1373\text{ N}$) pa je u položaju 2 penetrator opterećen s ukupno 1471 N . Taj položaj ne predstavlja tvrdoću po Rockwellu jer je penetrator opterećen ukupnom silom (1471 N). Slijedi rasterećenje glavnog opterećenja ($F=1373\text{ N}$). Ostaje samo predopterećenje ($F=98\text{ N}$), a penetrator se uslijed elastičnosti materijala vrati u položaj 3. Ova dubina predstavlja tvrdoću, tj. u ovom položaju se očitava tvrdoća na skali tvrdomjera. Rockwellovom metodom isključivo se mjeri tvrdoća toplinski obrađenih čelika. Zbog toga se metoda najviše koristi u proizvodnji. [9]

Slika 22.: Shematski prikaz ispitivanja tvrdoće Rockwellovom metodom

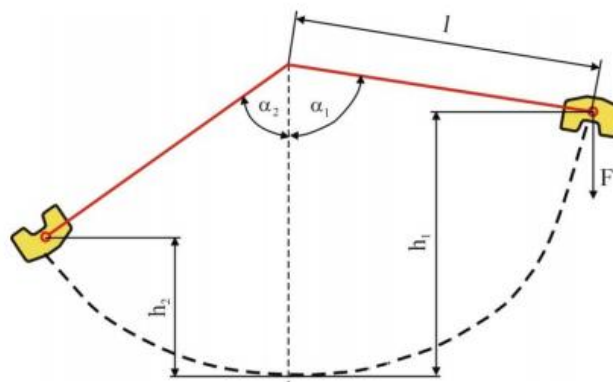


Izvor: Sonički N.: Mehanička svojstva materijala; Materijali 1 (07.12.2015.)

4.6. Ispitivanje udarne radnje loma

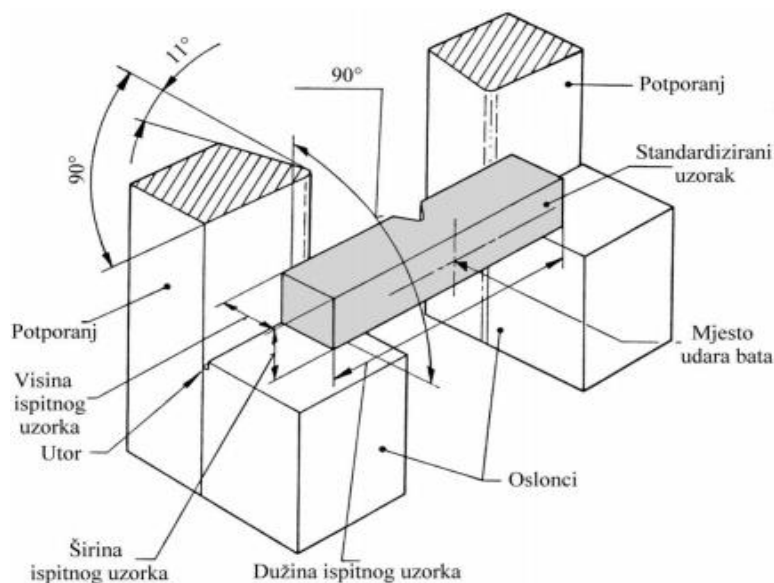
Kod ispitivanja udarne radnje loma koristi se Charpyeva metoda. Ispitivanje udarne radnje loma epruvete kvadratnog presjeka 10x10x55 mm sa U ili V utorom vrši se na način da epruvetu stavimo u ležište i puštamo bat da slomi epruvetu slobodnim padom. Bat čija je masa 20 kg i koji proizvodi rad od 300 J pušta se s visine h_1 , brzinom od prosječnih 6 m/s udara po sredini epruvete, provlači se kroz oslonce i dostiže visinu h_2 . Udarni rad loma je energija utrošena na prijelom epruvete (KU[J]) [9].

Slika 23.: Ispitivanje udarne radnje loma Charpyevom metodom



Izvor: <https://repositorij.simet.unizg.hr> (08.12.2015.)

Slika 24.: Položaj epruvete na osloncima



Izvor: <https://repositorij.simet.unizg.hr> (08.12.2015.)

4.6.1. Mjerenje udarne radnje loma testnih epruveta

Ispitivanje se odvijalo na Veleučilištu u Karlovcu, u laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava. Model Charpyevog bata je Otto Wolpert Werke. Tip bata: PW 15, 1953. godina. Mjerno područje bata iznosi od 0 – 150 J i od 0 – 300 J.

Slika 25.: Charpyev bat



Izvor: <http://cmk.vuka.hr/hr/ispitivanje-materijala/> (08.12.2015.)

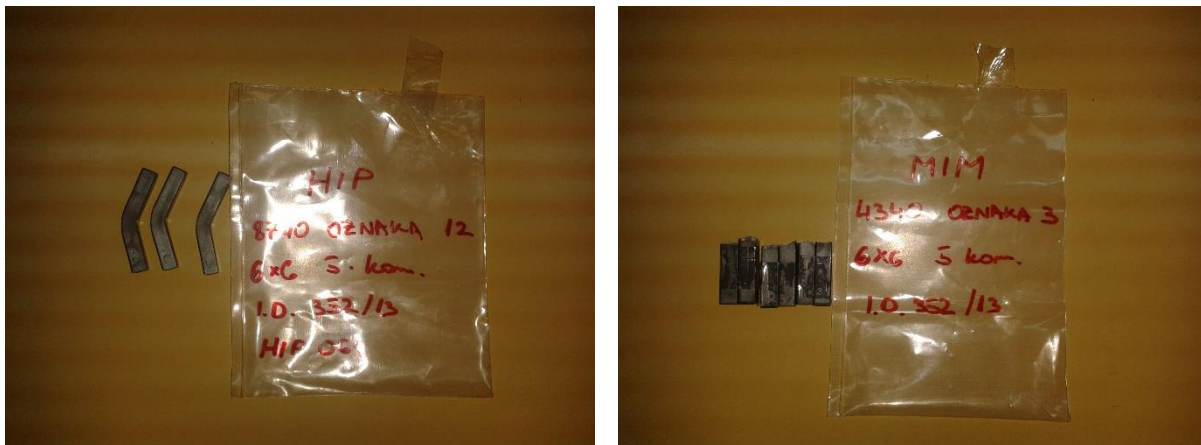
Tablica 7.: Rezultati ispitivanja udarne radnje loma

4140			8740						4340								
MIM		HIP	MIM			HIP			MIM			HIP					
6x6x44			6x6x44			6x6x44			6x6x44			6x6x44					
1-1	1-2	1-3	11-1	11-2	11-3	2-1	2-2	2-3	12-1	12-2	12-3	3-1	3-2	3-3	13-1	13-2	13-3
25J	17J	32J	76J	43J	76J	36J	28J	24J	59J	57J	63J	21J	25J	18J	77J	72J	71J

Izvor: Izradio autor (28.11.2015.)

Rezultati ispitivanja ukazuju na to da su epruvete tretirane dodatnim procesom vrućeg izostatičkog prešanja puno žilavije od epruveta dobivenih tehnologijom injekcijskog brizganja metala. Također epruvete MIM uzoraka su pucale, dok su se HIP epruvete samo savinule (Slika 26.). Dobiveni rezultati ukazuju da je kod materijala 4140 koji je prošao kroz proces vrućeg izostatičkog prešanja oznake 11-2 pokazao vrijednost 43 J što je otprilike 30 J manje nego kod ostalih uzoraka. Razlog tome je bilo krivo namještanje epruvete na oslonce kod samog ispitivanja na batu. Kada gledamo samo MIM epruvete materijal 8740 pokazao se najžilavijim, dok materijali 4140 i 4340 ne zaostaju puno po vrijednostima, dok kod HIP epruveta vidimo da je materijal 8740 manje žilaviji u odnosu na materijal 4140 i 4340.

Slika 26.: Epruvete nakon ispitivanja na Charpyevom batu



Izvor: Izradio autor (26.10.2015.)

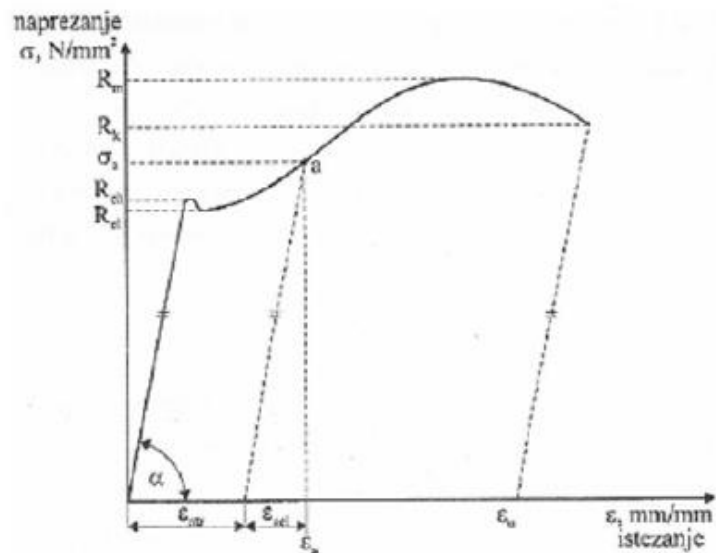
4.7. Ispitivanje čvrstoće na vlak

Kod ispitivanja vlačne čvrstoće epruvete mogu biti kružnog i pravokutnog oblika. Propisanom normom se određuju oblik i dimenzije epruvete. Bitni uvjeti kod ispitivanja su brzina i opterećenje, temperatura epruvete, dimenzije i oblik. Dimenzije koje karakteriziraju epruvetu su početni presjek epruvete (d_0 [mm]), početna mjerna duljina epruvete (L_0 [mm]) i početna površina poprečnog presjeka epruvete (S_0 [mm²])

$$S_0 = \frac{d_0^2 \times \pi}{4}$$

Ispitivanje se provodi na uređaju zvanom kidalica. Epruveta se na mjestima zadebljanja steže u stezne čeljusti na kidalici, te se ta ista epruveta optereti vlačnom silom.

Slika 27.: Dijagram razvlačenja



Izvor : Sonički N.: Mehanička svojstva materijala; Materijali 1 (08.12.2015.)

Bitni podaci koji su vezani za dijagram razvlačenja:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \frac{N}{mm^2} - \text{Vlačna čvrstoća}$$

$$R_{eh} = \frac{F_{eh}}{S_0}, \frac{N}{mm^2} - \text{Gornja granica razvlačenja}$$

$$R_{el} = \frac{F_{el}}{S_0}, \frac{N}{mm^2} - \text{Donja granica razvlačenja}$$

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \frac{N}{mm^2} - \text{Granica loma}$$

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}, \frac{mm}{mm} - \text{Istezanje, to je bezdimenzionalna veličina, podaci se}$$

dobiju mjerenjem produljenja

$A = \varepsilon \times 100, \%$ – Istezanje u postocima

$Z = [(S_0 - S_1) / S_0] \times 100, \%$ - Kontrakcija (suženje presjeka), dobijemo ga tako da oduzmemo suženi poprečni presjek (S_1) nakon kidanja od početnog (S_0), podijelimo sa početnim (S_0). Kontrakcija se označava u postocima, znači množimo sa 100 [9].

4.7.1 Ispitivanje vlačne čvrstoće testnih epruveta

Ispitivanje se odvijalo na Veleučilištu u Karlovcu, u laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava.

Kidalica na kojoj će se odvijati ispitivanje:

Kidalica Shimadzu AG – X

- Mjerno područje : do 100 kN
- Ispitivanje na vlak, tlak, i savijanje
- Mogućnost ispitivanja plosnih epruveta 0 – 21 mm (100/50 kN)
- Mogućnost ispitivanja okruglih epruveta D4 – D24 (100/50 kN)

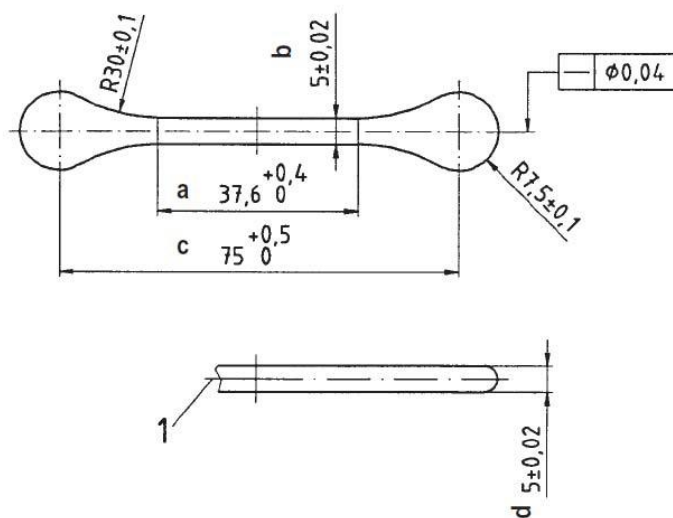
Slika 28.: Kidalica Shimadzu AG – X



Izvor: <http://cmk.vuka.hr/hr/ispitivanje-materijala/> (08.12.2015.)

Oblik i dimenzija određena je standardom ISO 2740 (Slika 29.). Brzina ispitivanja na kidalici iznosila je 60 N/s. Tijekom ispitivanja bilo je problema sa stezanjem epruveta u stezne čeljusti. Na grafovima problem je vidljiv u obliku klizanja.

Slika 29.: Testna epruveta „dog bone“



Mould Dimensions	a	b	c	d	R1	R2	R3
Measure [mm]	37.6	5.0	75.0	5.0	30.0	7.5	2.5
Tolerance [mm]	+ 0.4	± 0.02	+ 0.5	± 0.02	± 0.1	± 0.1	± 0.01

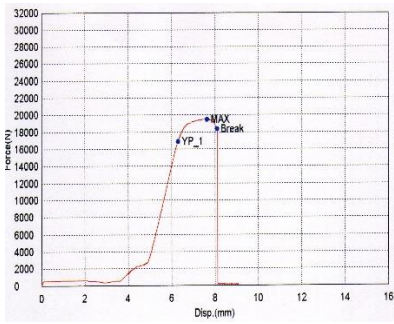
Izvor: <http://www.epma.com> (08.12.2015.)

Tablica 8.: Rezultati ispitivanja čvrstoće na vlak

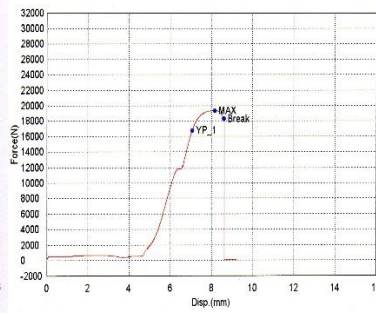
Rezultati ispitivanja čvrstoće na vlak							
			Oznaka	Granica razvlačenja Re [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća Rm [N/mm ²]	Izduženje A [%]	Kontrakcija Z [%]
4140	MIM	Dog bone	1-1	1341,48	1549,28	15,07	6,44
			1-2	1337,04	1539,71	16,11	6,19
			1-3	1318,39	1540,18	19,38	5,94
	HIP	Dog bone	11-1	1206,43	1332,42	18,79	22,61
			11-2	1243,50	1368,12	25,86	25,88
			11-3	1163,46	1324,67	21,56	25,88
8740	MIM	Dog bone	2-1	1314,60	1585,49	18,14	3,70
			2-2	1391,18	1612,29	16,70	3,95
			2-3	1369,63	1603,06	18,92	3,70
	HIP	Dog bone	12-1	1173,24	1308,75	19,94	19,80
			12-2	1211,98	1341,58	30,76	17,04
			12-3	1217,78	1362,25	36,61	16,29
4340	MIM	Dog bone	3-1	1236,36	1444,55	10,00	6,19
			3-2	153,03	1385,14	9,97	0,99
			3-3	1269,72	1440,14	21,84	6,19
	HIP	Dog bone	13-1	1117,51	1248,50	21,94	27,50
			13-2	1146,75	1247,57	20,67	26,25
			13-3	1139,28	1238,65	19,73	21,75

Izvor: Izradio autor (29.11.2015.)

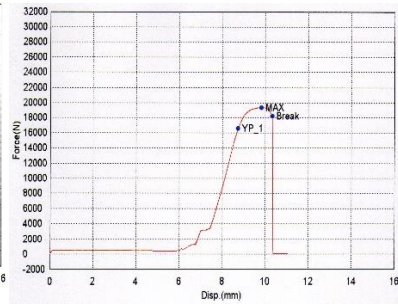
Slika 30.: Dijagrami testnih epruveta materijala 4140



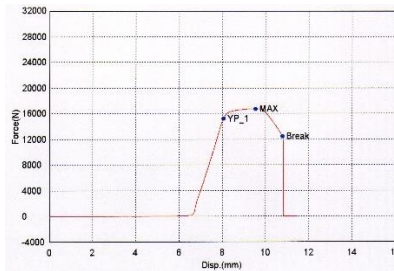
4140 1-1



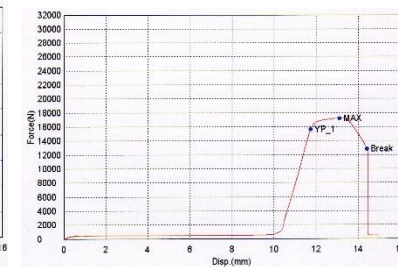
4140 1-2



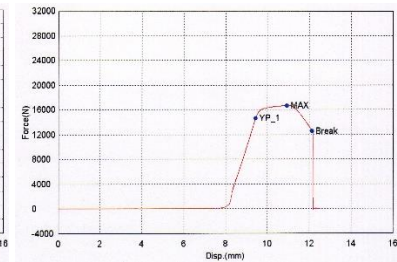
4140 1-3



4140 11-1

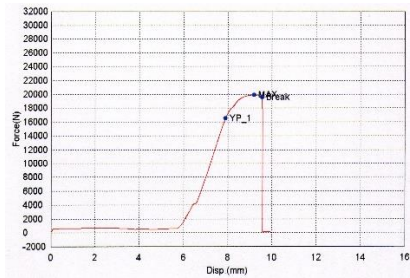


4140 11-2

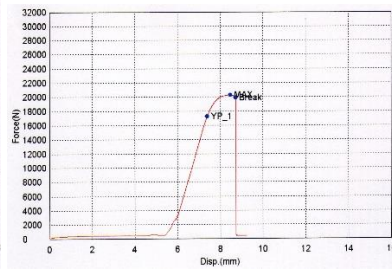


4140 11-3

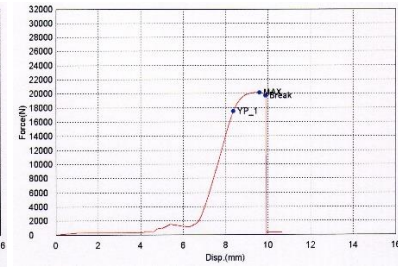
Slika 31.: Dijagrami testnih epruveta materijala 8740



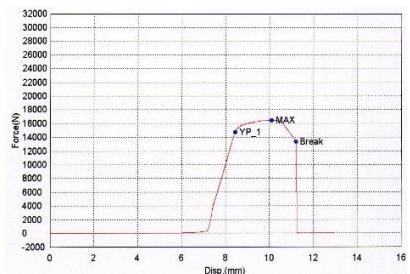
8740 2-1



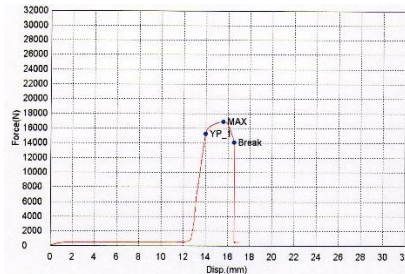
8740 2-2



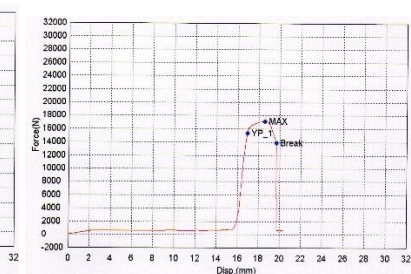
8740 2-3



8740 12-1

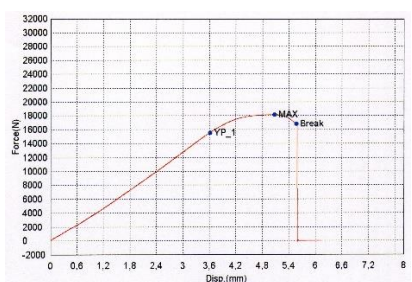


8740 12-2

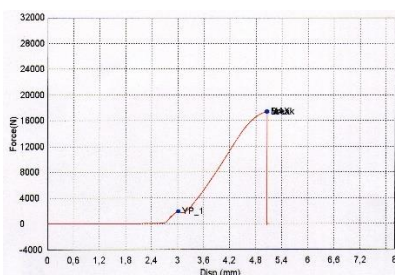


8740 12-3

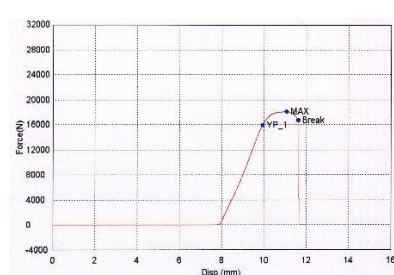
Slika 32.: Dijagrami testnih epruveta materijala 4340



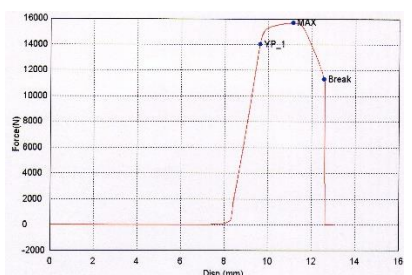
4340 3-1



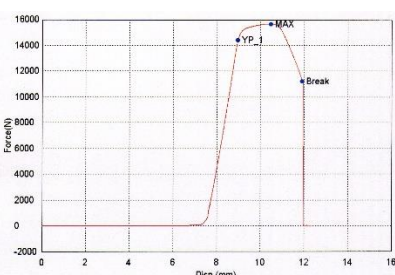
4340 3-2



4340 3-3



4340 13-1



4340 13-2



4340 13-3

Izvor slike 30., 31., 32.: Kidalica Shimadzu AG – X (26.10.2015.)

Slika 33.: MIM i HIP epruvete nakon ispitivanja



Izvor: Izradio autor (26.10.2015.)

5. ZAKLJUČAK

Dobivenim rezultatima možemo zaključiti da su testirani uzorci dobiveni MIM postupkom krhkiji od HIP uzoraka, tj. područje plastičnosti je dosta izraženije kod HIP uzoraka što nam dokazuje i istežanje (A) koje je veće kod HIP uzoraka. To nam pokazuju i dijagrami razvlačenja na kojima je vidljivo da su MIM epruvete pucale odmah nakon što su bile opterećene maksimalnom silom, dok su HIP epruvete nakon maksimalnog opterećenja imale daljnje plastično produljenje (klonost) do loma epruvete. Također Charpyevom metodom dokazali smo da su uzorci, tretirani dodatno HIP postupkom, žilaviji od MIM uzoraka. Gledamo li zasebno MIM uzorke možemo zaključiti da su razlike u vrijednostima dobivenih rezultata vrlo male te da imaju podjednaka svojstva. Isto tako HIP uzorci imaju podjednake svojstva. Veliki utjecaj na dobivene rezultate ima poroznost u uzorcima, znamo da nam je kod tehnologije injekcijskog brizganja poroznost nešto manja od 5%, dok dodatnim procesom vrućeg izostatičkog prešanja poroznost svodimo gotovo na 0%.

Uz sve prednosti MIM tehnologije, poput razvoja proizvoda komplicirane geometrije, gubitaka materijala koji je manji od 3% i automatizirane serijske proizvodnje, trebalo bi uzeti u razmatranje da HIP postupak bude sastavni dio cijelog procesa. Time bi dodatno poboljšali kvalitetu konačnog proizvoda. Jedini nedostatak cjelokupnog procesa MIM tehnologije i HIP postupka jest visoka cijena potrebne opreme i alata, te skupi metalni prahovi.

LITERATURA

- [1]. <http://epubl.ltu.se/1402-1617/2003/266/LTU-EX-03266-SE.pdf>, 27.11.2015.
- [2]. http://www3.nd.edu/~manufact/MPEM_pdf_files/Ch11.pdf, 28.11.2015.
- [3]. Production of complex moulding parts of metal and ceramics, Arburg, 28.11.2015.
- [4]. http://www.epma.com/doc_details/249-metal-injection-moulding-a-manufacturing-process-for-precision-engineering-components-3rd-edition#, 30.11.2015.
- [5]. <http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/THO%20RPC.pdf>, 30.12.2015.
- [6]. <http://www.bodycote.com/en/services/hot-isostatic-pressing.aspx>, 01.12.2015.
- [7]. <http://www.catamold.de>, 02.12.2015.
- [8]. Stupnišek, M., Cajner, F.: Osnove toplinske obrade metala. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 1996.
- [9]. Sonički, N.: Mehanička svojstva materijala; Materijali 1. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu, 2011.

POPIS SLIKA

Slika 1.: Shematski prikaz injekcijskog brizganja metala od praha i veziva do finalnog proizvoda	2
Slika 2.: Čestice praha i sito za sortiranje.....	3
Slika 3.: Oblici čestica praha	4
Slika 4.: Proces izrade sirovine	7
Slika 5.: Sirovina u obliku granula transportirana u ljevak na brizgalici.....	7
Slika 6.: Stroj za injekcijsko brizganje	8
Slika 7.: Doziranje i ubrizgavanje sirovine	10
Slika 8.: Otvaranje kalupa i vađenje brizganog komada	10
Slika 9.: Tračno odvajanje veziva i sinteriranje.....	11
Slika 10.: Peć za katalitičko odvajanje veziva	12
Slika 11.: a) Zeleni komad, b) smeđi komad i c) gotov komad	13
Slika 12.: Proces sinteriranja.....	13
Slika 13.: Postrojenje i peć za vruće izostatičko prešanje	15
Slika 14.: Prije i poslije vrućeg izostatičkog prešanja	16
Slika 15.: Tipični ciklus vrućeg izostatičkog prešanja	16
Slika 16.: Testne epruvete: 1) „dog bone“, 2) pravokutna	18
Slika 17.: Dijagram kaljenja i popuštanja testnih epruveta	20
Slika 18.: Primjer dijagrama kaljenja	21
Slika 19.: Burnsov dijagram	22
Slika 20.: Dijagram popuštanja.....	22
Slika 21.: Princip ispitivanja po Brinellovoj metodi.....	25
Slika 22.: Shematski prikaz ispitivanja tvrdoće Rockwellovom metodom	28
Slika 23.: Ispitivanje udarne radnje loma Charpyevom metodom.....	29
Slika 24.: Položaj epruvete na osloncima.....	29
Slika 25.: Charpyev bat	30
Slika 26.: Epruvete nakon ispitivanja na Charpyevom batu.....	31
Slika 27.: Dijagram razvlačenja	32
Slika 28.: Kidalica Shimadzu AG – X	33
Slika 29.: Testna epruveta „dog bone“	34
Slika 30.: Dijagrami testnih epruveta materijala 4140.....	36
Slika 31.: Dijagrami testnih epruveta materijala 8740.....	36
Slika 32.: Dijagrami testnih epruveta materijala 4340.....	37
Slika 33.: MIM i HIP epruvete nakon ispitivanja	37

POPIS TABLICA

Tablica 1.: Broj uzoraka za testiranje nakon MIM-a.....	19
Tablica 2.: Broj uzoraka za testiranje nakon HIP-a.....	19
Tablica 3.: Tvrdća po Brinellu za MIM uzorke prije toplinske obrade.....	23
Tablica 4.: Tvrdća po Brinellu za HIP uzorke prije toplinske obrade.....	24
Tablica 5.: Tvrdća po Rockwellu za MIM uzorke nakon toplinske obrade	26
Tablica 6.: Tvrdća po Rockwellu za HIP uzorke nakon toplinske obrade	26
Tablica 7.: Rezultati ispitivanja udarne radnje loma	30
Tablica 8.: Rezultati ispitivanja čvrstoće na vlak.....	35

POPIS OZNAKA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
A	%	Istezanje u postocima
A ₁	°C	temperatura eutektoidne pretvorbe
F _m	N	maksimalna sila
L ₀	mm	početna duljina epruvete
L ₁	mm	ispitna duljina epruvete
R _m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
R _{eh}	N/mm ²	gornja granica razvlačenja
R _{el}	N/mm ²	donja granica razvlačenja
R _k	N/mm ²	granica loma
S ₀	mm ²	poprečni presjek
S ₁	mm ²	poprečni presjek nakon testiranja
t	sec	vrijeme
Z	%	suženje (kontrakcija)
ΔL	mm	produljenje
ϑ	°C	temperatura
ϑ _a	°C	temperatura austenitizacije
ϑ _p	°C	temperatura popuštanja
ε	mm/mm	istezanje
ρ	kg/mm ³	gustoća
σ	N/mm ²	naprezanje

POPIS VAŽNIJIH KRATICA

OZNAKA	ZNAČENJE
MIM	injekcijsko brizganje metala
HIP	vruće izostatičko prešanje
HB	tvrdoća po Brinellu
HRC	tvrdoća po Rockwellu