

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

Poslijediplomski studij strojarstva

**KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT**

**Istraživanje utjecaja legirnih elemenata na  
mehanička svojstva izotermički poboljšanog  
žilavog lijeva**

**Nikša Čatipović**

Split, lipanj 2017.

---

---

## SADRŽAJ

POPIS OZNAKA .....	4
Popis slika.....	6
Popis tablica .....	10
1. UVOD .....	11
2. Žilavi lijev.....	14
2.1. Kemijski sastav.....	15
2.1.1. Utjecaj ugljika i silicija .....	16
2.1.2. Utjecaj mangana.....	19
2.1.3. Utjecaj sumpora i fosfora .....	22
2.1.4. Utjecaj magnezija .....	23
2.1.5. Utjecaj bakra .....	23
2.1.6. Utjecaj nikla.....	24
2.1.7. Utjecaj molibdena .....	25
2.1.8. Utjecaj cerija i rijetkih zemalja .....	26
2.2. Mikrostruktura žilavog lijeva.....	27
2.3. Klasifikacija žilavog lijeva .....	32
3. Izotermičko poboljšavanje (engl. „austempering“) .....	34
3.1. Sredstva za izotermičko poboljšavanje .....	37
4. Izotermički poboljšani žilavi lijev.....	42
4.1. Mikrostruktura .....	44
4.2. Mehanička svojstva .....	46

4.3. Klasifikacija .....	49
5. Pregled dosadašnjih istraživanja .....	51
5.1. Utjecaj bakra .....	51
5.2. Utjecaj nikla .....	58
5.3. Utjecaj molibdena.....	63
5.4. Utjecaj mangana.....	66
6. Zaključak .....	69
LITERATURA.....	70
SAŽETAK.....	75

---

**POPIS OZNAKA**

$\alpha$	ferit
$\gamma$	austenit
$\gamma_{hc}$	ugljikom obogaćeni zaostali austenit
A	istezljivost, (elongacija), [%]
A <sub>1</sub>	temperatura početka stvaranja perlita, [°C]
A <sub>3</sub>	temperatura početka stvaranja ferita, [°C]
ADI	izotermički poboljšani žilavi lijev (engl. „Austempered Ductile Iron“)
CE	ekvivalent ugljika, [%]
HB	tvrdoća po Brinell-u
HR <sub>B</sub>	tvrdoća po Rockwell-u „B“
HR <sub>C</sub>	tvrdoća po Rockwell-u „C“
HV10	tvrdoća po Vickers-u
KV	udarna radnja loma, [J]
M <sub>s</sub>	temperatura početka stvaranja martenzita, [°C]
M <sub>f</sub>	temperatura završetka stvaranja martenzita, [°C]
R <sub>m</sub>	vlačna čvrstoća, [MPa]
R <sub>p</sub>	granica razvlačenja, [MPa]
R <sub>p0,2</sub>	tehnička granica razvlačenja, [MPa]
S <sub>z</sub>	stupanj zasićenja, [%]
t	vrijeme, [h]
t <sub>drž.</sub>	vrijeme držanja na temperaturi postupka, [h]

---

$t_{dr\check{z},A}$	vrijeme držanja na temperaturi austenitizacije, [h]
$t_{dr\check{z},IZ}$	vrijeme držanja na temperaturi izotermičke pretvorbe, [h]
$t_{hl.}$	vrijeme hlađenja, [h]
$t_{zagr.}$	vrijeme zagrijavanja, [h]
T	temperature, [°C]
$T_A$	temperatura austenitizacije, [°C]
$T_{IZ}$	temperatura izotermičke pretvorbe, [°C]
$T_{post.}$	temperatura postupka, [°C]
TTT	dijagram „Vrijeme-temperatura-transformacija“ (engl. „Time-Temperature-Transformation“)
%C	maseni udio ugljika, [%]
%Cu	maseni udio bakra, [%]
%Mn	maseni udio mangana, [%]
%Mo	maseni udio molibdena, [%]
%Ni	maseni udio nikla, [%]
%Si	maseni udio silicija, [%]

## POPIS SLIKA

*Slika 1.1. Svjetska proizvodnja žilavog lijeva*

*Slika 1.2. Usporedba svojstava različitih vrsta ljevova*

*Slika 2.1. Stabilni i metastabilni Fe-C-Si dijagram slijevanja*

*Slika 2.2. Handersonov dijagram utjecaja udjela silicija i ugljika u žilavom lijevu na strukturu i svojstva*

*Slika 2.3. Utjecaj silicija na mehanička svojstva žilavog lijeva*

*Slika 2.4. (a) Preporučeni udio mangana u žilavom lijevu ovisno o udjelu silicija i debljini stjenke; (b) karbidi po granicama zrna uslijed visokog udjela mangana*

*Slika 2.5. Utjecaj mangana, bakra i kositra na mehanička svojstva žilavog lijeva*

*Slika 2.6. Jominy krivulja za žilave ljevove, austenitizirane na 850°C, sa različitim udjelima mangana*

*Slika 2.7. Utjecaj fosfora na (a) udarnu radnju loma i (b) prijelaznu temperaturu žilavog lijeva*

*Slika 2.8. Jominy krivulja za žilave ljevove, austenitizirane na 850°C, sa različitim udjelima bakra*

*Slika 2.9. Jominy krivulja za žilave ljevove, austenitizirane na 850°C, sa različitim udjelima nikla*

*Slika 2.10. Jominy krivulja za žilave ljevove, austenitizirane na 850°C, sa različitim udjelima molibdena*

*Slika 2.11. Klasifikacija grafita u željeznim ljevovima po normi HRN EN ISO 945:2002*

*Slika 2.12. Normirane veličine grafitnih kuglica (grafit oblika VI.) u žilavom lijevu po normi HRN EN ISO 945:2002*

*Slika 2.13. (a) Utjecaj nodularnosti na mehanička svojstva žilavog lijeva, (b) utjecaj udjela silicija (cjepivo) na broj nodula/mm<sup>2</sup> za tri debljine stjenke*

Slika 2.14. Mikrostruktura feritnog (a) i perlitnog (b) žilavog lijeva, povećanje 100x, nagriženo 4% nitalom

Slika 2.15. Tehnička granica razvlačenja (a) i vlačna čvrstoća (b) žilavog lijeva pri različitim udjelima perlita i nodularnostima

Slika 2.16. Udarna radnja loma na različitim temperaturama za različite vrste žilavog lijeva

Slika 3.1. Hodogram toplinske obrade

Slika 3.2. Shematski prikaz izotermičke pretvorbe žilavog lijeva

Slika 3.3. Usporedba TTT dijagrama kod klasičnog i izotermičkog poboljšavanja

Slika 3.4. Prikaz soli AS 140 prije i za vrijeme toplinske obrade

Slika 3.5. Dijagram gašenja u mirujućoj kupci bez dodavanja vode

Slika 3.6. Dijagram utjecaja miješanja (a) i sadržaja vode na intenzitet gašenja solne kupke s niskom temperaturom tališta (tip AS 140)

Slika 4.1. Metastabilni i izotermički TTT dijagram. U dijagramu je prikazana  $M_s$  temperatura, ovisnost  $M_s$  temperature o vremenu obrade „austempering“ (crvena linija u izotermičkom TTT dijagramu) i metastabilno  $\alpha + \gamma$  područje (u metastabilnom faznom dijagramu)

Slika 4.2. Klasičan izgled ausferitne strukture austenitizirane na 900°C i izotermički poboljšanje na 383°C

Slika 4.3. Utjecaj izotermičke temperature i udjela mangana na: (a) vlačnu čvrstoću, (b) udarnu radnju loma

Slika 4.4. Utjecaj vremena izotermičke pretvorbe na istezljivost za različite legure žilavog lijeva

Slika 4.5. Usporedba omjera mase i granice razvlačenja sa drugim metalima

Slika 4.6. Vlačna čvrstoća i istezljivost ADI legura u odnose na žilave ljeveve

Slika 4.7. Primjena ADI legura po poljima djelatnosti

Slika 5.1. Utjecaj udjela bakra i vremena izotermičkog poboljšavanja na tvrdoću

Slika 5.2. Utjecaj udjela bakra i vremena izotermičkog poboljšavanja na (a) vlačnu čvrstoću i (b) granicu razvlačenja

Slika 5.3. Utjecaj udjela bakra i vremena izotermičkog poboljšavanja na istežanje

Slika 5.4. Izotermički poboljšano na (a) 300°C za 1 h, (b) 300°C za 1,5 h, (c) 360°C za 1 h i (d) 360°C za 1,5 h

Slika 5.5. Utjecaj vremena i temperature izotermičkog poboljšavanja na volumni udio zaostalog austenita

Slika 5.6. Vlačna čvrstoća prije i poslije toplinske obrade

Slika 5.7. Utjecaj izotermičke temperature na mikrostrukturu ADI-a legiranog bakrom i niklom: (a) 300°C na 3 h – igličasti ausferit, (b) 350°C na 3 h – pločasti ausferit, (c) 400°C na 3 h – grubi pločasti ausferit

Slika 5.8. Utjecaj izotermičke temperature na mikrostrukturu ADI-a legiranog s bakrom: (a) 300°C na 2 h – fine iglice igličastog ausferita, (b) 350°C na 2 h – igličasti ausferit, (c) 400°C na 2 h – pločasti ausferit

Slika 5.9. Utjecaj vremena izotermičke pretvorbe na mikrostrukturu ADI-a legiranog s bakrom i niklom: (a) 350°C na 1 h – igličasti ausferit, (b) 350°C na 6 h – pločasti ausferit, (c) 400°C na 6 h – početak raspada ugljikom obogaćenog ausferita na ferit i karbide (bainit)

Slika 5.10. Mehanička svojstva nelegiranog i legiranog ADI-a u ovisnosti o temperaturi izotermičke pretvorbe

Slika 5.11. Utjecaj vremena izotermičke pretvorbe na udarnu radnju loma i volumni udio zaostalog austenita ADI legura izotermički poboljšanih na 320°C (a) i 400°C (b)

Slika 5.12. Promjena udarne radnje loma ovisno o vremenu izotermičke pretvorbe nakon austenitizacije na 850°C, 875°C, 900°C i 930°C za 2 h

Slika 5.13. Volumni udio zaostalog austenita u ovisnosti o udjelu molibdena kod ADI legura

Slika 5.14. Utjecaj nikla, bakra, mangana i molibdena na tvrdoću ADI legura



*Slika 5.15. Utjecaj nikla bakra, mangana i molibdena na udarnu radnju loma ADI legura*

## POPIS TABLICA

*Tablica 2.1. Omjer cijene i vlačne čvrstoće za različite ljevove*

*Tablica 2.2. Približni kemijski sastav žilavog lijeva*

*Tablica 2.3. Normom propisana mehanička svojstva žilavog lijeva (HRN EN 1563:1997)*

*Tablica 2.4. Normom propisana udarna radnja loma žilavog lijeva (HRN EN 1563:1997)*

*Tablica 3.1. Sastav i karakteristike soli za izotermičko poboljšavanje*

*Tablica 3.2. Nazivi, područja primjena te radne temperature soli za solne kupke*

*Tablica 3.3. Fizikalna svojstva soli AS 140*

*Tablica 3.4. Preporučene koncentracije vode u solnoj kupki*

*Tablica 4.1. Klasifikacija ADI legura po europskoj normi EN 1564:2001/A1:2008*

*Tablica 4.2. Klasifikacija ADI legura po američkoj normi ASTM A897M-16*

*Tablica 5.1. Kemijski sastav ispitivanih obradaka žilavog lijeva*

*Tablica 5.2. Kemijski sastav ispitivanih obradaka žilavog lijeva*

*Tablica 5.3. Mehanička svojstva ADI legura sa i bez bakra*

*Tablica 5.4. Utjecaj bakra na vlačnu čvrstoću ADI-a*

*Tablica 5.5. Kemijski sastav ispitivanih obradaka žilavog lijeva*

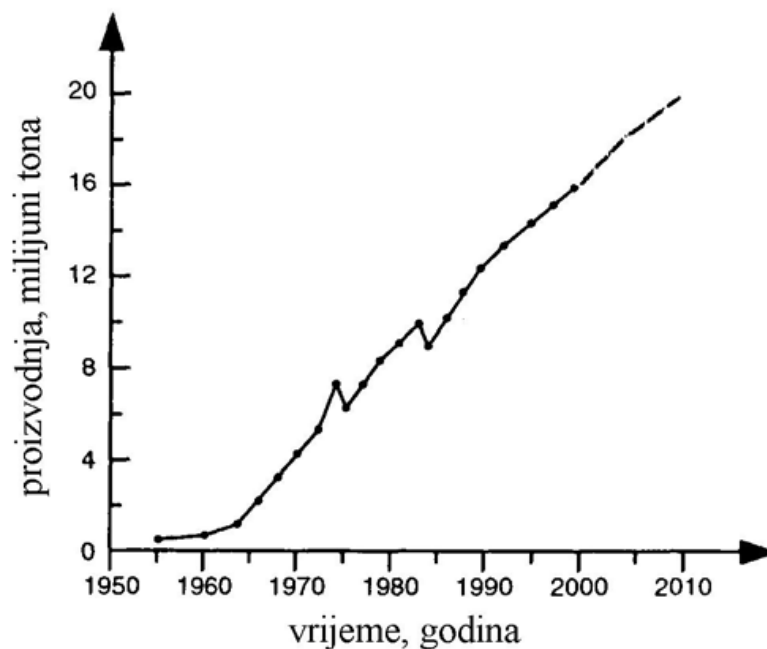
*Tablica 5.6. Kemijski sastav ispitivanih obradaka žilavog lijeva*

*Tablica 5.7. Kemijski sastav ispitivanih obradaka žilavog lijeva*

*Tablica 5.8. Kemijski sastav ispitivanih obradaka žilavog lijeva*

## 1. UVOD

Posljednjih godina na tržištu vlada velika potražnja za čvrstim, izdržljivim i ekonomski isplativim materijalima. Žilavi (nodularni) lijev je jedan takav materijal te se njegova proizvodnja iz godine u godinu povećava, slika 1.1. Žilavi lijev kao materijal otkriven je 1943. godine u SAD-u. Za ovo otkriće zaslužan je metalurg Keith Millis koji je metodu dobivanja žilavog lijeva tretmanom s magnezijem patentirao 1949.g., [1]. Mnogo istraživanja je provedeno na tom materijalu a fokus je dan na poboljšavanju njegovih mehaničkih svojstava koristeći odgovarajuću toplinsku obradu ili legiranjem odgovarajućim legirnim elementima.



Slika 1.1. Svjetska proizvodnja žilavog lijeva, [1]

Razlog brzog rasta proizvodnje žilavog lijeva su povoljna fizikalna, mehanička i tehnološka svojstva kao što su: otpornost koroziji, visok modul elastičnosti, dobra livljivost, povoljna čvrstoća, mogućnost površinskog kaljenja, relativno dobra obradivost itd. Usporedba svojstava žilavog lijeva sa kovkastim, sivim, čeličnim i bijelim ljevom prikazana je na slici 1.2.



Mehanička svojstva izotermički poboljšanog žilavog lijeva ovise o njegovoj ausferitnoj mikrostrukturi. Izotermički poboljšana matrica pruža bolji omjer vlačne čvrstoće i duktilnosti nego što je moguće kod ijedne druge vrste žilavog lijeva. Različite kombinacije mehaničkih svojstava, kao posljedica ausferitne strukture, izotermički poboljšanog žilavog lijeva mogu se postići ovisno o parametrima toplinske obrade i legirnim elementima, [6].

Toplinska obrada izotermičkog poboljšavanja sastoji se od austenitizacije žilavog lijeva, zadržavanja na temperaturi izotermičke pretvorbe uranjanjem u adekvatno rashladno sredstvo te hlađenjem do sobne temperature, [7].

## 2. ŽILAVI LIJEV

Žilavi, nodularni ili sferoidni lijev je vrsta željeznog lijeva u kojem se grafit izlučuje u obliku kuglica tj. nodula. Naziv mu proizlazi iz činjenice da u lijevanom stanju iskazuje značajnu duktilnost i žilavost za razliku od ostalih vrsta željeznih lijevova. Osim toga, Henton Morrogh je 1948. godine objavio rad u kojem je po prvi puta prikazao dodavanje cerija u željeznu talinu čime se direktno, bez toplinske obrade, u mikrostrukturi odljevka dobivao grafit izlučen u obliku kuglica (nodula), [2]. Radovi Millsa i Morrogha postavili su temelje razvoja novog lijeva na bazi željeza koji se naziva žilavi, nodularni ili sferoidni lijev, [1].

Kao što je već rečeno u uvodu, iz godine u godinu žilavi lijev ima značaj rast proizvodnje na globalnoj razini. Razlog tome su izrazito povoljna fizikalna, mehanička i tehnološka svojstva. Osim navedenih svojstava, u prilog povećanju proizvodnje ide i izuzetno povoljan omjer cijene i vlačne čvrstoće u odnosu na druge lijevove, tablica 2.1.

Tablica 2.1. Omjer cijene i vlačne čvrstoće za različite lijevove, [1]

Vrsta lijeva	Omjer cijene i vlačne čvrstoće
Sivi lijev	$\frac{1500 \text{ USD}/t}{250 \text{ MPa}} = 6 \text{ USD}/\text{MPa}$
Čelični lijev	$\frac{3000 \text{ USD}/t}{500 \text{ MPa}} = 6 \text{ USD}/\text{MPa}$
Kovkasti lijev	$\frac{2000 \text{ USD}/t}{400 \text{ MPa}} = 5 \text{ USD}/\text{MPa}$
Žilavi lijev	$\frac{1700 \text{ USD}/t}{500 \text{ MPa}} = 3.4 \text{ USD}/\text{MPa}$
Izotermički poboljšani žilavi lijev	$\frac{2500 \text{ USD}/t}{1000 \text{ MPa}} = 2.5 \text{ USD}/\text{MPa}$
Aluminijeve legure	$\frac{8000 \text{ USD}/t}{200 \text{ MPa}} = 40 \text{ USD}/\text{MPa}$

Ovisno o matrici žilavog lijeva, može ga se klasificirati u različite skupine: feritni, perlitni, martenzitni i austenitni žilavi lijev. Ovisno o brzini hlađenja, matrica može varirati od mekane duktilne feritne strukture, preko tvrde i čvrste perlitne strukture, pa sve do specifične austenitne strukture. Jedno od najfascinantnijih mehaničkih svojstava žilavog lijeva jest istezljivost, koja može dosegnuti čak i 30%, što nije usporedivo niti sa jednom vrstom željeznog lijeva, [3].

## 2.1. Kemijski sastav

Žilavi lijev je visokouglični lijev na bazi željeza, kod kojega se ugljik izlučuje u obliku grafitnih kuglica. Približni kemijski sastav žilavog lijeva dat je u tablici 2.2.

Tablica 2.2. Približni kemijski sastav žilavog lijeva, [1]

Legirni element	Udio [%]
C	3.2 ... 3.8
Si	2.4 ... 2.8
Mn	< 0.5
P	< 0.045
S	< 0.01

Dodavanjem malih količina cerija, magnezija, lantana ili itrija u talinu neposredno prije ulijevanja taline u kalup postiže se izlučivanje ugljika u obliku kuglica grafita. Ako pak rastaljeni metal sadrži prevelike količine sumpora ili male količine inhibitora nodulacije (kao što su titan, bizmut ili olovo) ugljik se neće izlučiti u obliku kuglica, već u obliku listića, te će tako nastati sivi lijev, [2].

Mikrostruktura i svojstva žilavog lijeva posljedica su mnogih čimbenika koji se mogu podijeliti u 3 skupine, [2]:

- a) metalurški procesi,
- b) kemijski sastav,
- c) brzina hlađenja pri skrućivanju i hlađenju u krutom stanju.

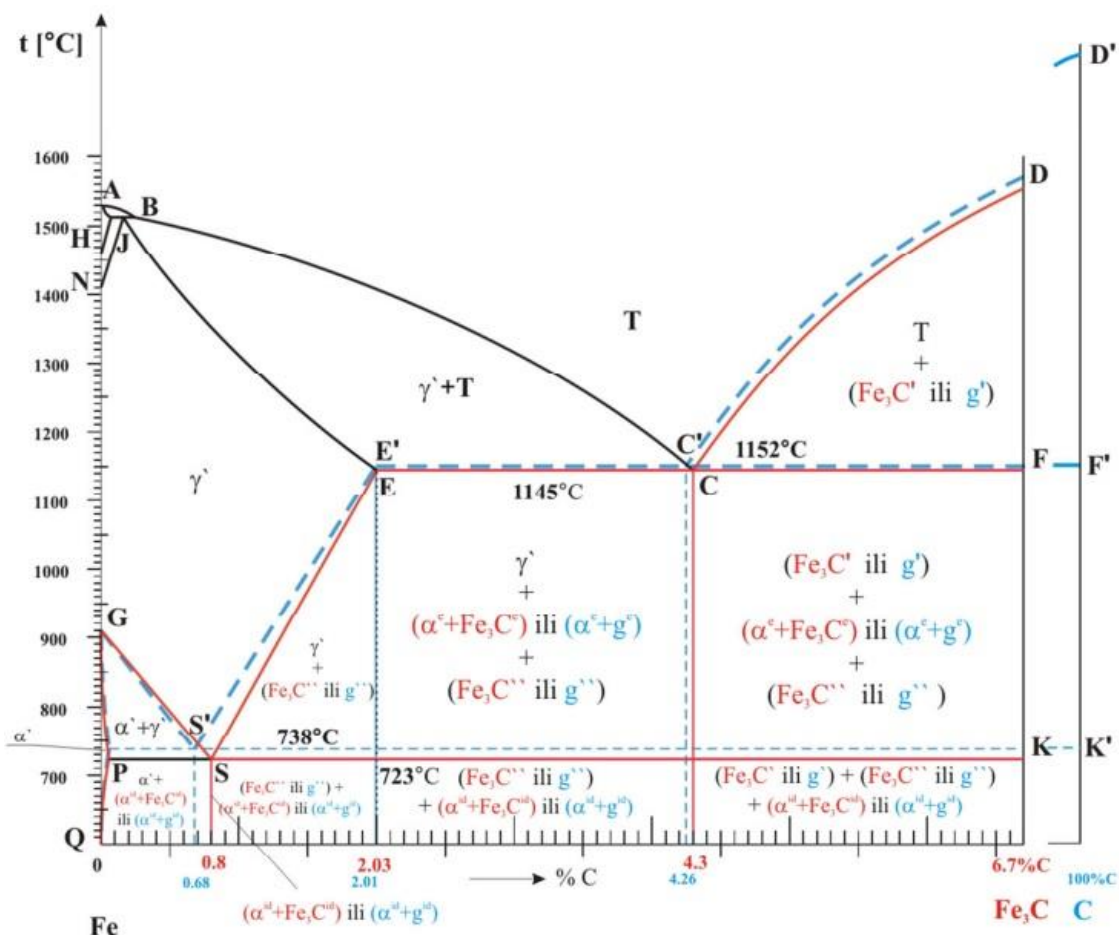
Kemijski sastav ponajviše utječe na oblik grafita i strukturu metalne matrice. Prema utjecaju na mikrostrukturu, kemijski elementi koji se pojavljuju u žilavom lijevu mogu se podijeliti u sljedeće skupine, [2]:

- primarni elementi: C, Si, Mn, S, P,
- nodulatori: Mg, rijetke zemlje (Ce, La i sl.),
- elementi koji utječu na matricu: Cu, Sn,
- legirajući elementi: Ni, Mo,
- karbidotvorci: Cr, V, B, Mo, Te,
- antiglobulatori: Ti, Al, Pb, Bi, As.

U nastavku je dat pregled utjecaja pojedinih legirnih elemenata u žilavom lijevu.

### 2.1.1. Utjecaj ugljika i silicija

Proučavanje žilavog lijeva zahtjeva primjenu mješovitog „Fe-C“ dijagrama slijevanja, prikazanog na slici 2.1.



Slika 2.1. Stabilni i metastabilni Fe-C dijagram slijevanja, [8]

Na slici 2.1. punim linijama prikazan je stabilni dijagram slijevanja gdje je grafitna faza u ravnoteži sa austenitom i feritom dok je isprekidanim linijama prikazan metastabilni dijagram u kojem je postignuta ravnoteža cementita, austenita i ferita. Iz slike 2.1. također je vidljivo da kod ravnotežnog skrućivanja u području nadeutektičke koncentracije iz taline prvo nastaje primarni grafit ( $g'$ ) čija količina u talini raste sve do solidus linije kad se talina skrućuje.

U praksi može doći do tri različita slučaja skrućivanja, [1]:

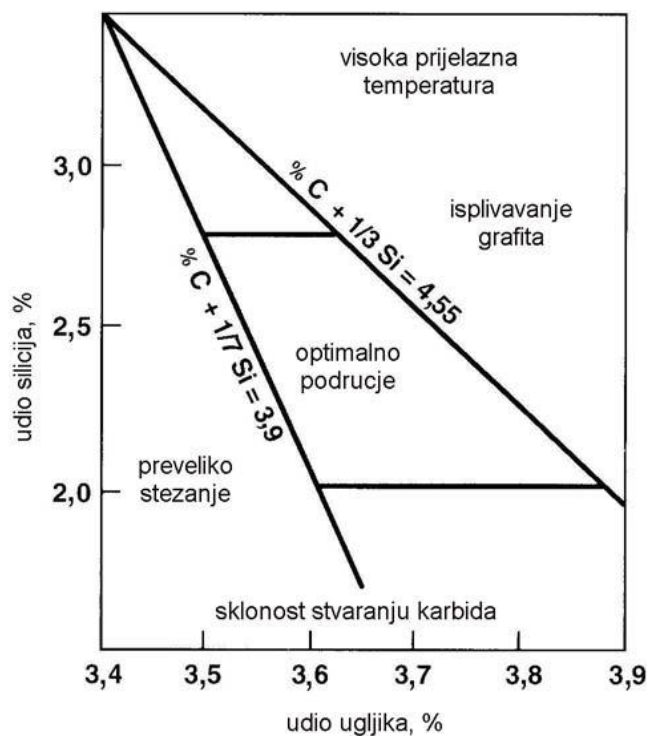
- austenit + grafit,
- austenit + cementit,
- kombinacija prethodna dva.



Valja napomenuti da su druge dvije varijante nepoželjne jer dovode do nastanka nepovoljnog cementita.

Ugljik i silicij najsnažnije utječu na nastajanje eutektikuma u žilavom lijevu. Silicij je taj koji pomiče eutektičku koncentraciju prema vrijednostima nižim od 4,3%, koliko iznosi eutektički maseni udio ugljika za ravnotežni fazni dijagram Fe-C.

Sadržaj ugljika neznatno utječe na mehanička svojstva žilavog lijeva. Međutim, teži se što većem udjelu ugljika jer se time poboljšava livljivost taline. Slika 2.2 prikazuje Handersonov dijagram, na kojem su vidljiva različita područja utjecaja udjela silicija i ugljika u žilavom lijevu te utjecaj njihovog različitog udjela na svojstva i sastav. Dovoljan udio silicija važan je za postizanje strukture bez karbida, [2].

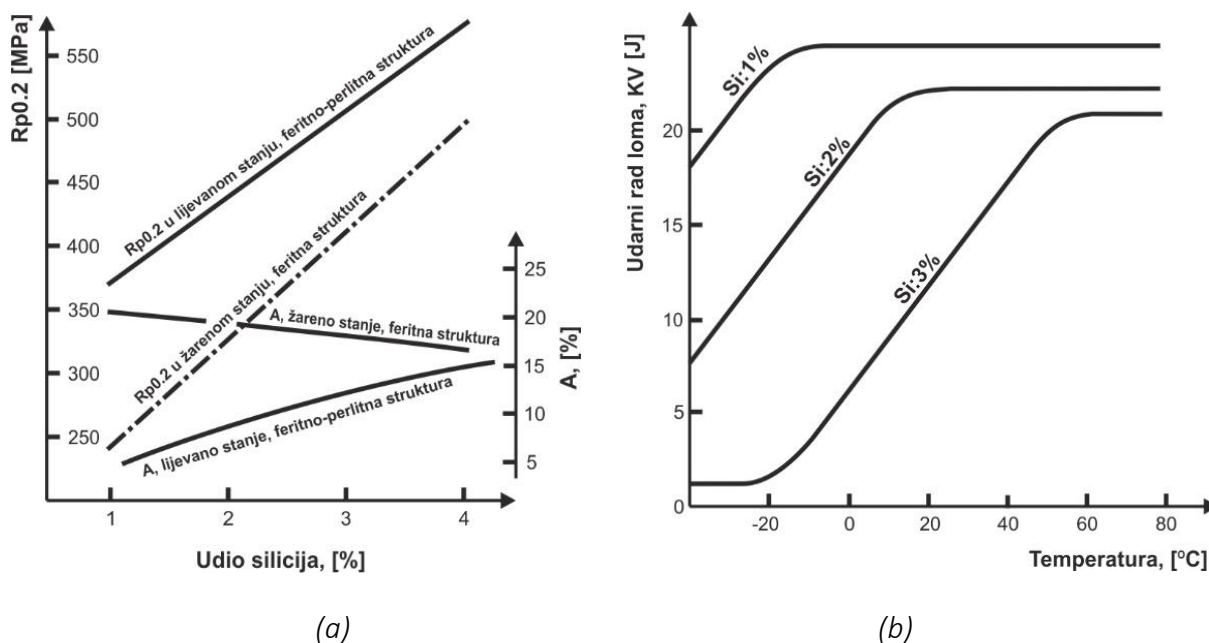


Slika 2.2. Utjecaj silicija i ugljika na strukturu i svojstva žilavog lijevu, [1]

Ovisno o debljini stjenke udio ugljika u žilavom lijevu varira između 3,4% i 3,9%. Veće vrijednosti se javljaju kod tanjih stijenki (< 5 mm), a niže kod debljih stijenki (>5 mm). Zbog visokih vrijednosti ekvivalenta ugljika i sporog hlađenja odljevaka debelih stijenki može doći

do degeneracije kuglica grafita što nije slučaj kod odljevaka tankih stijenki. Međutim, kod odljevaka tankih stijenki javlja se povećana mogućnost stvaranja karbida pa se zato koriste ljevovi s više ugljika, [2].

Silicij, osim što sprječava nastajanje karbida tj. potiče stvaranje grafita, značajno povisuje granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću i istezljivost feritnih vrsta žilavog lijeva. Utjecaj silicija na tehničku granicu razvlačenja  $R_{p0,2}$  i istezljivost  $A$ , za žilavi lijev s feritno-perlitnom matricom i za žilavi lijev u žarenom stanju s feritnom matricom, prikazan je na slici 2.3. (a). Na slici 2.3. (b) prikazan je utjecaj silicija na udarnu radnju loma KV žilavog lijeva pri različitim temperaturama.



Slika 2.3. Utjecaj silicija na mehanička svojstva žilavog lijeva, [1]

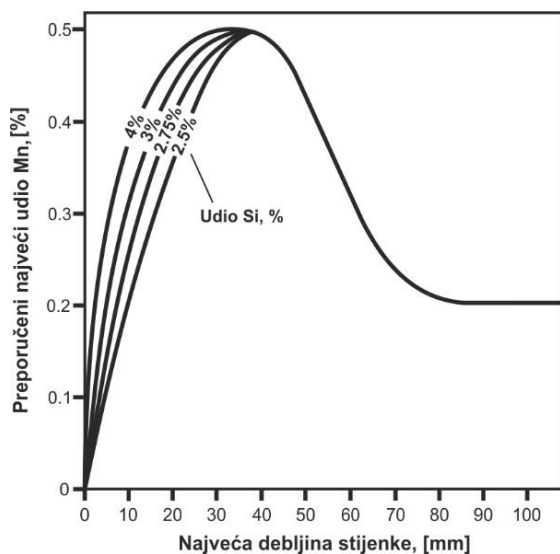
Silicij snižava vrijednosti udarne radnje loma i linearno povećava prijelaznu temperaturu krhkog loma. Zbog toga se udio silicija obično postavlja u granicama od 1,5% do 3%. Taj utjecaj na udarnu radnju loma žilavog lijeva naročito je važan kod feritnih vrsta žilavog lijeva, dok je kod feritno-perlitnih ljevova manje izražen obzirom da je kod tih ljevova udarna radnja loma ionako smanjena uslijed pojave perlita u mikrostrukturi matrice, [2].

U slučaju da je udio fosfora ispod 0,02% tada udio silicija mora biti zadržan ispod 2,75% da bi se postigao maksimalni otpor lomu u rasponu od sobne temperature do  $-40^{\circ}\text{C}$ . Udio silicija bi trebao biti ograničen na 2,55% ako je udio fosfora 0,05%. Visoko temperaturna primjena, kao npr. kućište turbopunjača, zahtjeva da udio silicija bude između 3,75% i 4,25% te molibdena do 0,70% jer ta kombinacija pruža visoko temperaturni otpor na oksidaciju te dimenzijsku stabilnost. Za otpor trošenju, čak se koriste i veći udjeli silicija, [10].

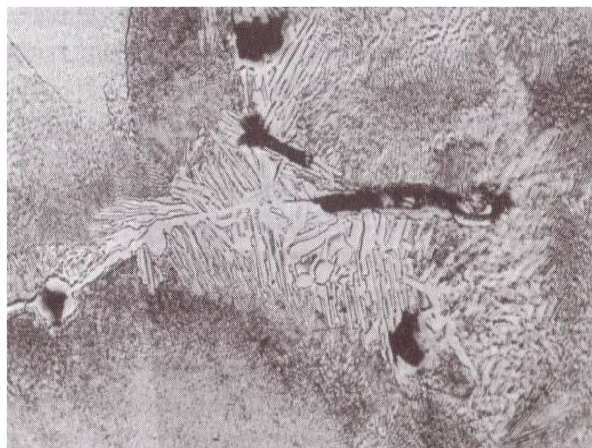
### **2.1.2. Utjecaj mangana**

Mangan je jedan od najčešće korištenih legirnih elemenata u žilavom lijevu. Mangan poboljšava mehanička svojstva žilavog lijeva jer povoljno djeluje na stvaranje i stabiliziranje perlita što povećava čvrstoću ali smanjuje duktilnost i obradivost. Mangan smanjuje koncentraciju ugljika u feritu te stabilizira cementit  $\text{Fe}_3\text{C}$ , [3]. Također potiče segregaciju na granicama zrna. Međutim njegov udio u žilavom lijevu potrebno je ograničiti kada se želi dobiti izotermički poboljšan žilavi lijev, [11].

Dozvoljeni udio mangana ovisi o udjelu silicija u lijevu i najvećoj debljini stjenke koja se pojavljuje na odljevku. Na slici 2.4. (a) prikazan je dijagram pomoću kojega se određuju preporučene količine mangana ovisno o udjelu silicija i debljini stjenke. Iz dijagrama je vidljivo da se kod tanjih stijenki (do 30 mm) sklonost mangana k stvaranju karbida može uspješno nadomjestiti povišenjem udjela silicija, [2]. Ova pojava posebno je izražena pri smanjenju debljine stjenke. Tako npr. kod odljevaka koji imaju stjenke debljine 12 mm dozvoljeni udio mangana povećava se s 0,2% na 0,25% ako se udio silicija poveća sa 2,5% na 3%. Kod sporijih ohlađivanja odljevaka srednjih i velikih debljina stijenki, silicij nema nepovoljni utjecaj jer dolazi do njegove segregacije. Na slici 2.4. (b) prikaza je mikrostruktura u kojoj je uslijed visokog udjela mangana došlo do stvaranja karbida po granicama zrna.



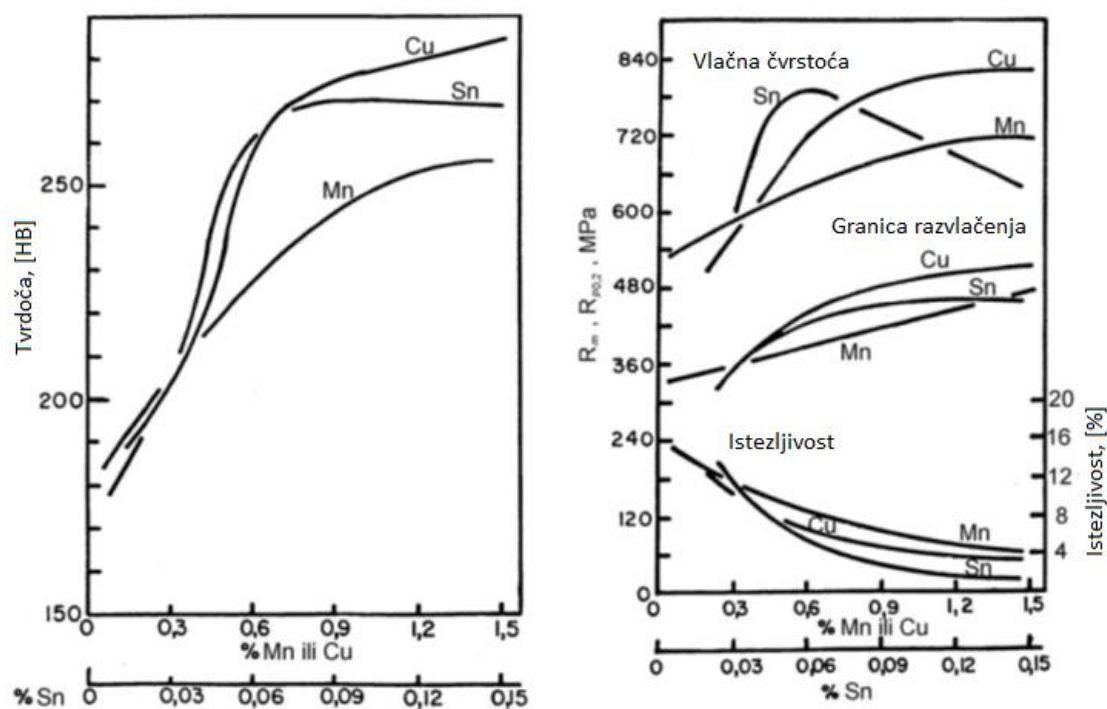
(a)



(b)

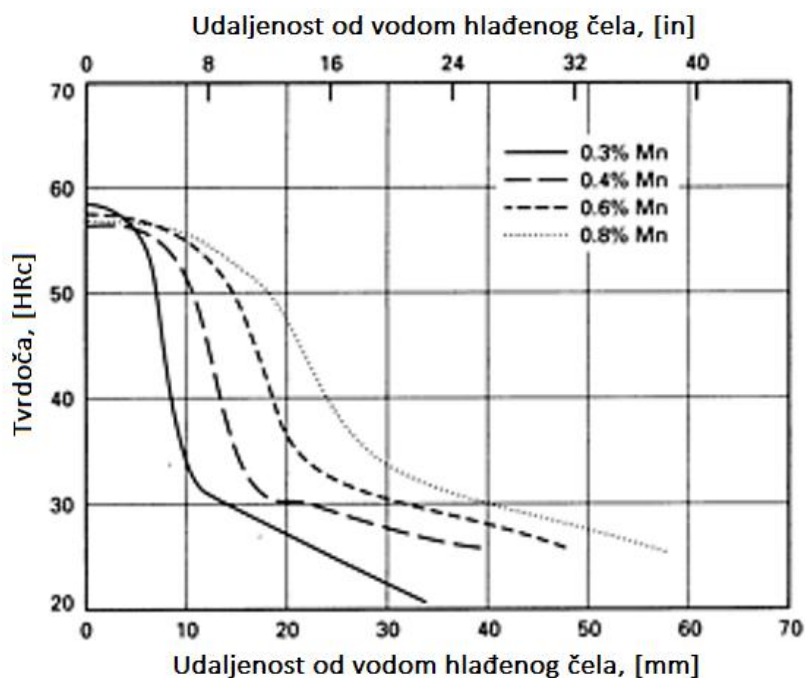
Slika 2.4. (a) Preporučeni udio mangana u žilavom lijevu ovisno o udjelu silicija i debljini stijenke; (b) karbidi po granicama zrna uslijed visokog udjela mangana, [1]

Udio mangana je potrebno održavati što nižim ako se traži visoka istezljivost žilavog lijeva jer mangan pospješuje stvaranje perlita. Ako se pak traže visoka tvrdoća i otpornost na trošenje, udio mangana u žilavom lijevu raste do 1%. Npr. žilavi lijev s 0,35% Mn nakon žarenja ima istezljivost 20%, dok lijev s 0,78% Mn ima istezljivost svega 4%, [12]. Na slici 2.5. vidljiva je promjena tvrdoće, vlačne čvrstoće i tehničke granice razvlačenja sa povećanjem udjela mangana. Također je vidljiv i utjecaj bakra i kositra.



Slika 2.5. Utjecaj mangana, bakra i kositra na mehanička svojstva žilavog lijeva, [13]

Porastom udjela mangana raste tvrdoća i prokaljivost žilavog lijeva; slika 2.6.

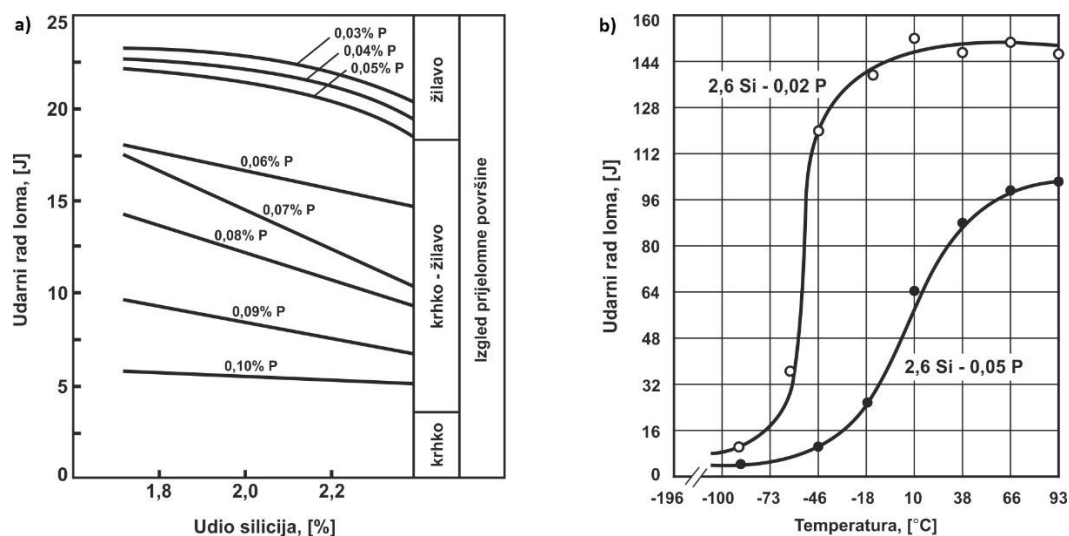


Slika 2.6. Jominy krivulja za žilave lijevove, austenitizirane na 850°C, sa različitim udjelima mangana, [14]

### 2.1.3. Utjecaj sumpora i fosfora

Udjeli sumpora i fosfora uobičajeno su prisutni u kemijskom sastavu žilavog lijeva. Za ljevove niže kvalitete, udjeli mogu doseći 0,15% dok za ljevove više kvalitete su znatno manji, [15]. Sumpor negativno utječe na mikrostrukturu a samim time i mehanička svojstva jer sprječava izlučivanje kuglastog grafita na način da veže na sebe dodatni magnezij ili cerij. Udio sumpora u baznoj talini nastoji se održati između 0,008% i 0,015%. Pri dodavanju magnezija baznoj talini zbog noduliranja nastaje magnezij-sulfid ( $MnS$ ), jer magnezij ima snažan afinitet prema sumporu, [2]. Magnezij može reagirati i sa silicijem i sa kisikom čime nastaje  $MgSiO_3$ . Obje vrste spojeva javljaju se kao uključci troske nakon skrućivanja odljevka, što smanjuje čvrstoću i udarnu radnju loma, [2]. S druge pak strane, ni prenizak udio sumpora (<0.005%) u baznoj talini nije poželjan jer tada talina loše reagira na noduliranje a što se očituje niskim brojem nodula po jedinici površine i sklonosti nastajanju karbida.

Fosfor također negativno utječe na mehanička svojstva ali ne utječe na oblik izlučenog grafita. S obzirom da je fosfor nepoželjan sastojak žilavog lijeva njegov udio treba biti što niži, manji od 0,03%. Razlog zašto fosfor značajno smanjuje istezljivost i udarnu radnju loma žilavog lijeva, slika 2.7. (a), jest što fosfor stvara eutektikum  $Fe_3P$  niskog tališta, koji se nakuplja po granicama zrna u obliku krhke i tvrde faze. Osim toga, fosfor stabilizira perlit te tako povećava tvrdoću i čvrstoću a smanjuje istezljivost. Međutim najnepovoljniji učinak fosfora je na povišenje prijelazne temperature u području žilavog/krhkog loma, slika 2.7. (b).



Slika 2.7. Utjecaj fosfora na: (a) udarnu radnju loma i (b) prijelaznu temperaturu žilavog l., [1]

#### 2.1.4. Utjecaj magnezija

Dodavanje magnezija u baznu talinu izaziva vrlo burnu reakciju jer magnezij ima vrelište na 1090°C a bazna talina je obično zagrijana na približno 1500°C. Magnezij se u talinu ubacuje u obliku predlegura s: niklom, bakrom ili silicijem. Magnezij je primarno cementator i potiče primarno skrućivanje cementita. Međutim, nakon što magnezij odgori, prestaje njegovo djelovanje pa se cementit pod utjecajem silicija prelazi u kuglasti grafit, [1]. Ovisno o udjelu sumpora u baznoj talini potrebni udio magnezija, da bi se stvorila potpuno nodularna struktura grafita, je između 0,02% i 0,06%.a. Međutim, da bi magnezij utjecao na oblikovanje nodula grafita potrebno je baznu talinu dezoksidirati, zatim odsumporiti. Tek tada su stvoreni uvjeti za oblikovanje nodula.

Produkt dezoksidacije taline magnezijem je  $MgO$  koji je: kemijski vrlo stabilan spoj, visokog tališta, niske gustoće i niske topivosti u željezu. Zato se  $MgO$  skuplja na površini taline, a ako ostane zarobljen pri ulijevanju, mogu u odljevku nastati štetni tvrdi uključci. Magnezij sa sumporom tvori magnezijev-sulfid, ( $MgS$ ), koji također zbog male gustoće teži isplivati na površinu taline. Kako je ovaj spoj vrlo nestabilan, od  $MgS$  u reakciji sa zrakom nastaje  $MgO$ , pri čemu se sumpor vraća u talinu i opet na sebe veže magnezij. Zato je vrlo važno uklanjati  $MgS$  s površine taline nakon obrade taline magnezijem, a prije cijepjenja i ulijevanja pripremljene taline u kalup, [2].

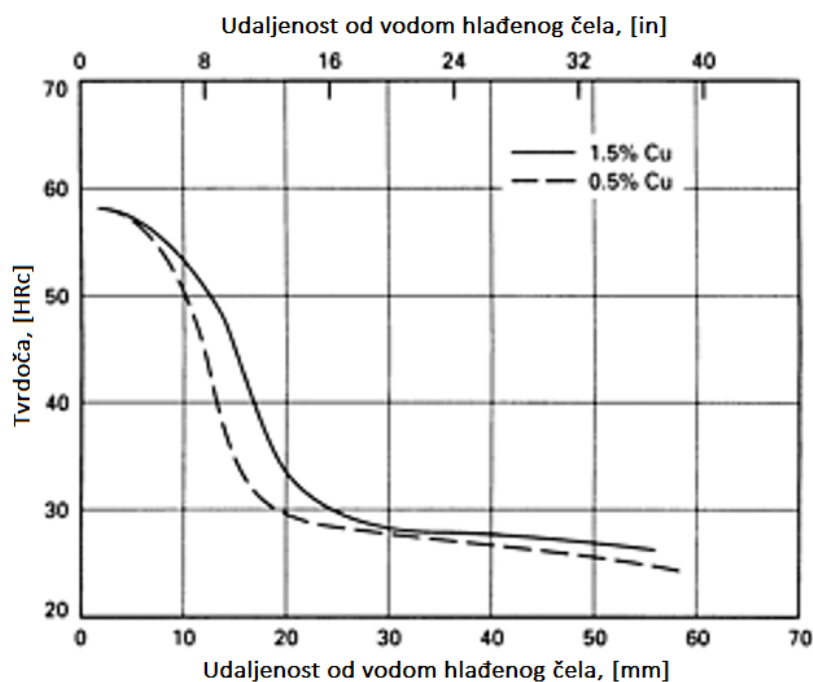
Veća količina magnezija potiče stvaranje eutektičkih karbida, pojavu poroznosti i uključaka troske.

#### 2.1.5. Utjecaj bakra

Bakar se koristi kao utjecajni element za nastajanje perlita kod ljevova s visokom čvrstoćom i dobrom obradivosti, [11]. Dodaje se kada je potrebno postići potpuno perlitnu mikrostrukturu žilavog lijeva. Iako je topivost bakra u željezu oko 2,5% kod perlitnih žilavih ljevova udio bakra bi trebao biti u granicama između 0,4% i 0,8% , [3].

Istraživanja [3, 8] su pokazala da je dovoljno 0,82%  $Cu$  ili 1,74%  $Mn$  kako bi se postigla potpuno perlitna mikrostruktura. Međutim u slučaju legiranja sa manganom javljaju se karbidi na granicama zrna. Osim utjecaja na smanjivanje udarne radnje loma bakar: povisuje

prijelaznu temperaturu, povisuje vlačnu čvrstoću i tvrdoću te povoljno utječe na prokaljivost, slika 2.8. Razlog tome je povećanje udjela perlita te smanjivanje veličine zrna, [2]. Ako se pak želi postići potpuno feritna mikrostruktura žilavog lijeva, udio bakra mora biti što niži, obično do 0,03%.



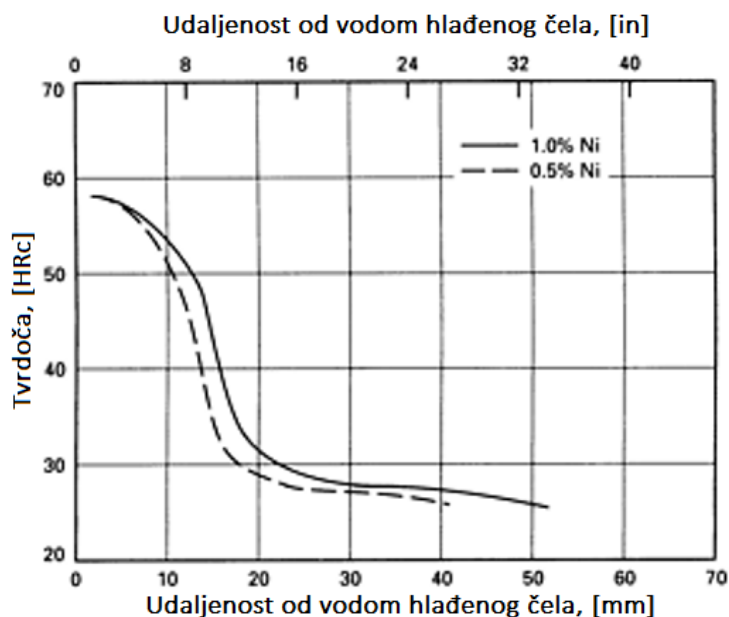
Slika 2.8. Jominy krivulja za žilave lijeve, austenitizirane na 850°C, sa različitim udjelima bakra, [14]

Pri legiranju žilavog lijeva bakrom vrlo je važno koristiti bakar visoke čistoće, kako se ne bi unijeli štetni elementi kao što su: arsen, olovo, telur itd., [2].

### 2.1.6. Utjecaj nikla

Nikal se uobičajeno koristi za povećanje čvrstoće pogodujući stvaranju perlita a s tim i povećanju tvrdoće i prokaljivosti, slika 2.9. To je naročito izraženo kod odljevaka iz izotermički poboljšanog žilavog lijeva gdje je bitna površinska tvrdoća, [11]. Nikal se uobičajeno koristi u udjelima između 0,4% i 2%, [3].





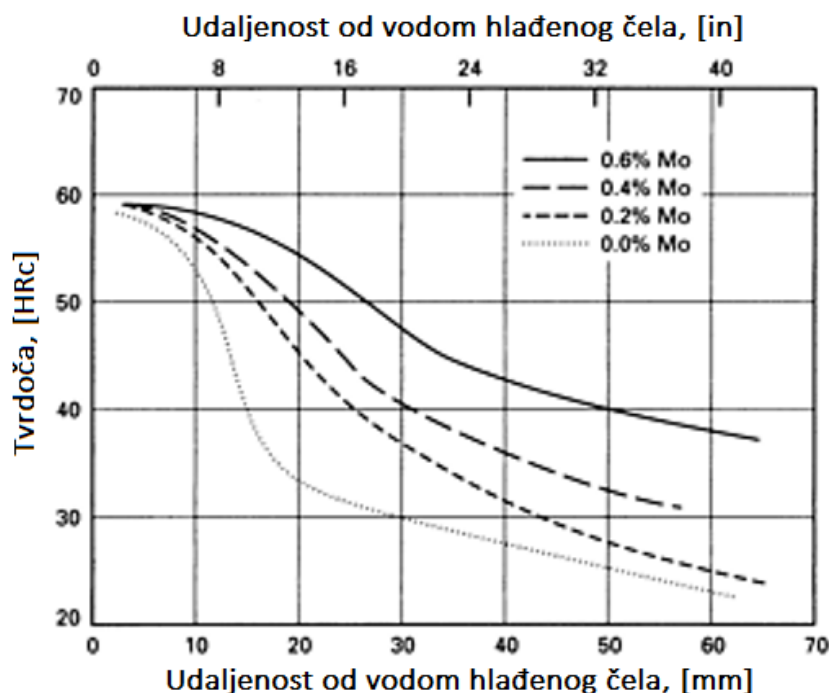
Slika 2.9. Jominy krivulja za žilave ljevove,  $T_A = 850^\circ\text{C}$ , sa različitim udjelima Ni, [14]

Osim navedenog, dodavanjem: 0,5% do 4% Ni povećava se prokaljivost, 18% do 36% Ni postiže se austenitna struktura matrice, poboljšavaju se svojstva feritnih vrsta ljevova pri nižim temperaturama te se povećava granica razvlačenja i vlačna čvrstoća ljevova s niskim udjelom silicija, [2].

### 2.1.7. Utjecaj molibdena

Molibden ima ulogu stabiliziranja mikrostrukture na povišenim temperaturama te se također koristi za poboljšavanje otvrdnjavanja velikih dijelova prilikom proizvodnje izotermički poboljšanog žilavog lijeva. Količina molibdena mora biti strogo kontrolirana zbog njegove tendencije da se izlučuje po granicama zrna kao stabilni karbid, [11]. Molibden se smatra blagim karbidotvorcem te je segregacija po granicama zrna zbog sporog hlađenja izraženija kod odljevaka s debljim stjenkama kao i kod ljevova legiranih drugim karbidotvorcima kao što su: Cr, Mn i V. Molibden također pomaže u poboljšavanju svojstava lijeva kada su u pitanju puzanje i pukotine uslijed naprezanja. Dodavanje 0,5% Mo feritnim žilavim ljevovima povoljno utječe na povećanje otpora puzanju kao i sprječavanju pojave pukotina uslijed naprezanja. To rezultira jako dobrom postojanošću svojstava na visokim temperaturama, [3]. Do 2% Mo značajno povećava vlačnu čvrstoću, udarnu radnju loma na povišenim temperaturama te otpornost puzanju.

Dodavanjem molibdena može se povećati prokaljivost žilavog lijeva, slika 2.10. Dodavanjem do 0,1% Mo postiže se martenzitna struktura bez perlita.



Slika 2.10. Jominy krivulja za žilave ljevove, austenitizirane na 850°C, sa različitim udjelima molibdena, [14]

Molibden također povećava tvrdoću i granicu razvlačenja feritnog žilavog lijeva. Za svako povećanje udjela od 1%, vlačna čvrstoća povećava se za 42 MPa, a tvrdoća za oko 15 HR<sub>B</sub>, dok se istezljivost smanjuje za oko 8%, [2].

### 2.1.8. Utjecaj cerija i rijetkih zemalja

Cerij, poput magnezija, snažno dezoksidira i odsumporava talinu, ali kako mu je vrelište iznad 3000°C, pri njegovom dodavanju u talinu željeznog lijeva ne događa se burna reakcija kao pri dodavanju magnezija. Također, cerij tvori stabilnije okside i sulfide pa se manje cerija gubi, a manja je i vjerojatnost nastanka uključaka, [2]. Ako se cerij koristi kao primarni nodulator dovoljno je 0,035% Ce za postizanje potpuno nodularne strukture u nadeutektičkom žilavom lijevu. Međutim, s obzirom da je cerij istovremeno i jak karbidotvorac, žilavi lijev proizveden cerijem kao nodulatorom je znatno osjetljiviji na pojavu karbida u lijevanom stanju.

---

Najčešće se koristi 0,5% do 1% cerija, kao komponenta rijetkih zemalja, u  $FeSiMg$  leguri za noduliranje. Cerij i ostale rijetke zemlje korištene na ovaj način značajno doprinose povećanju broja nodula. Druge rijetke zemlje uključuju: lantan  $La$ , neodimij  $Nd$  i praseodimij  $Pr$ . S obzirom da je lantan stabilniji karbidotvorac te daje veći broj nodula uz smanjenje opasnosti od pojave pukotina uslijed stezanja, ima prednosti pred cerijem.

## 2.2. Mikrostruktura žilavog lijeva

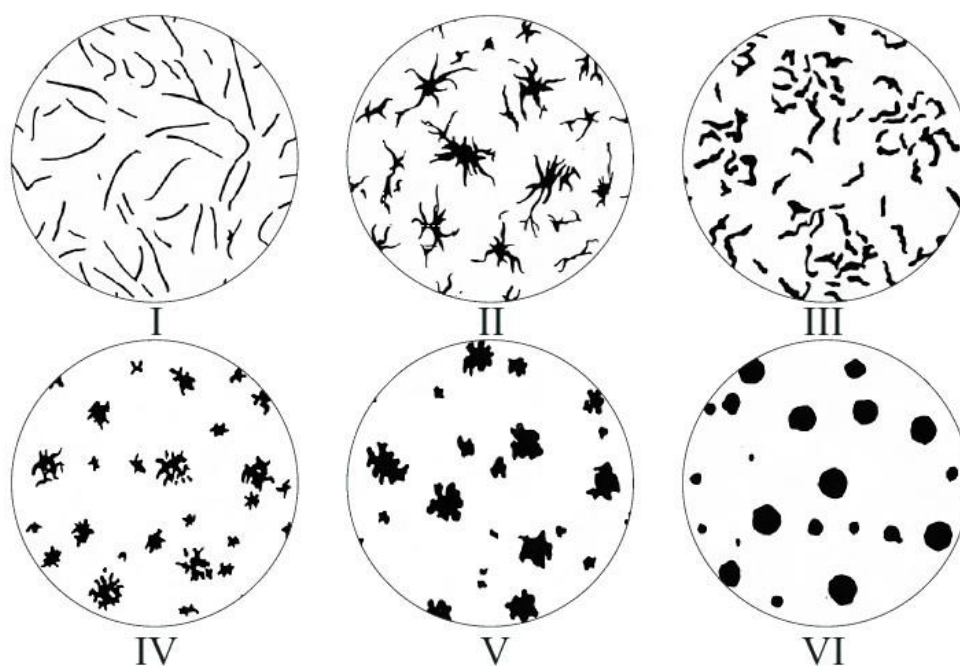
Mehanička svojstva žilavog lijeva direktna su posljedica njegove mikrostrukture pa je stoga izuzetno važno da tehnološki proces dobivanja žilavog lijeva bude uspješno vođen. To znači da je potrebno ostvariti stabilnu eutektičku pretvorbu koja će rezultirati kuglicama grafita u austenitnoj matrici. Eutektikum također može biti i metastabilan pa će onda umjesto grafita nastati cementit ( $Fe_3C$ ) u austenitnoj matrici. Postoji, naravno, i treća mogućnost a to je nastajanje miješane strukture austenita, grafita i cementita.

Konačna mikrostruktura žilavog lijeva određena je, [1]:

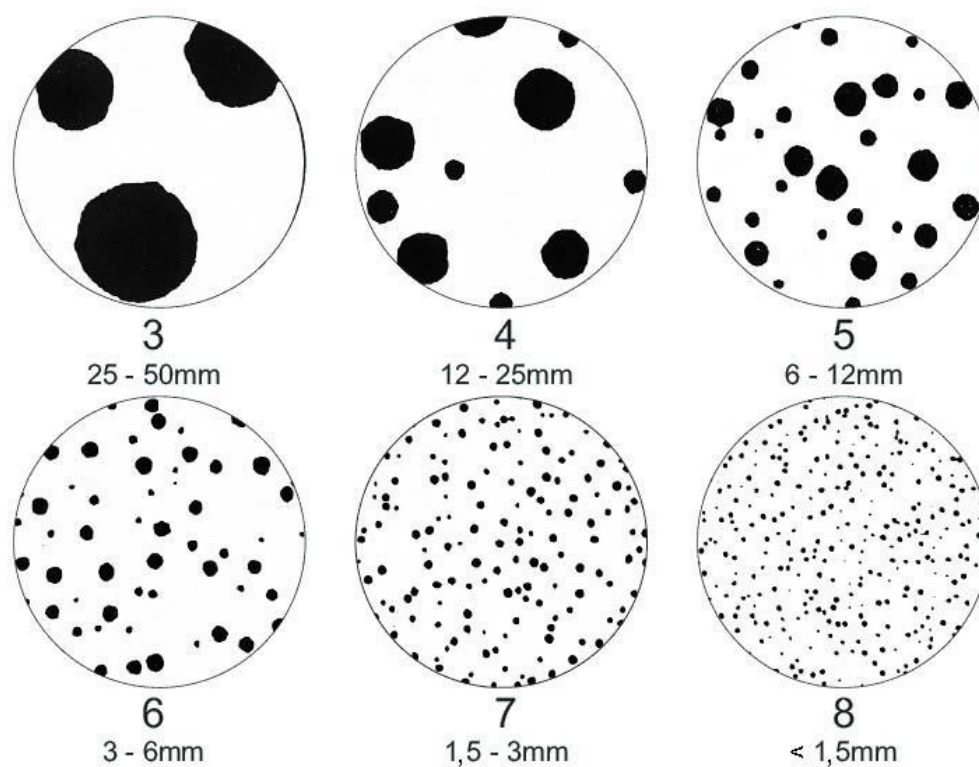
- položajem granica zrna,
- utjecajem legirnih elemenata na granice faza,
- sposobnošću difuzije ugljika u krutini,
- načinom rasporeda legirnih elemenata u matrici,
- sposobnošću nastanka kuglica i rasta zrna.

Mikrostruktura žilavog lijeva ovisi o: brzini hlađenja u krutom stanju, udjelu legirnih elemenata i broju grafitnih kuglica. Ovisno o tim parametrima postiže se: feritna, perlitna ili feritno-perlitna mikrostruktura. Za postizanje feritne strukture potrebno je povisiti A1 temperaturu. To se postiže minimalizacijom svih legirnih elemenata osim silicija te smanjenjem brzine hlađenja. S druge strane, perlitna struktura se postiže nižim koncentracijama  $Si$  s dodatkom  $Mn$  i  $Mo$ , [1].

Sva specifična mehanička svojstva žilavog lijeva posljedica su pojave grafita u obliku kuglica, koje su više ili manje pravilnog oblika. Na slici 2.11. prikazana je propisana klasifikacija oblika grafita, definirana normom HRN EN ISO 945:2002. Prema navedenoj normi, žilavi lijev ima oblik grafita VI. Ista norma propisuje normirane veličine grafitnih kuglica, slika 2.12., u žilavom lijevu uz povećanje od 100 puta, pri čemu se promatraju najveće nodule u slici, [2].



Slika 2.11. klasifikacija grafita u željeznim ljevovima po normi HRN EN ISO 945:2002, [16]

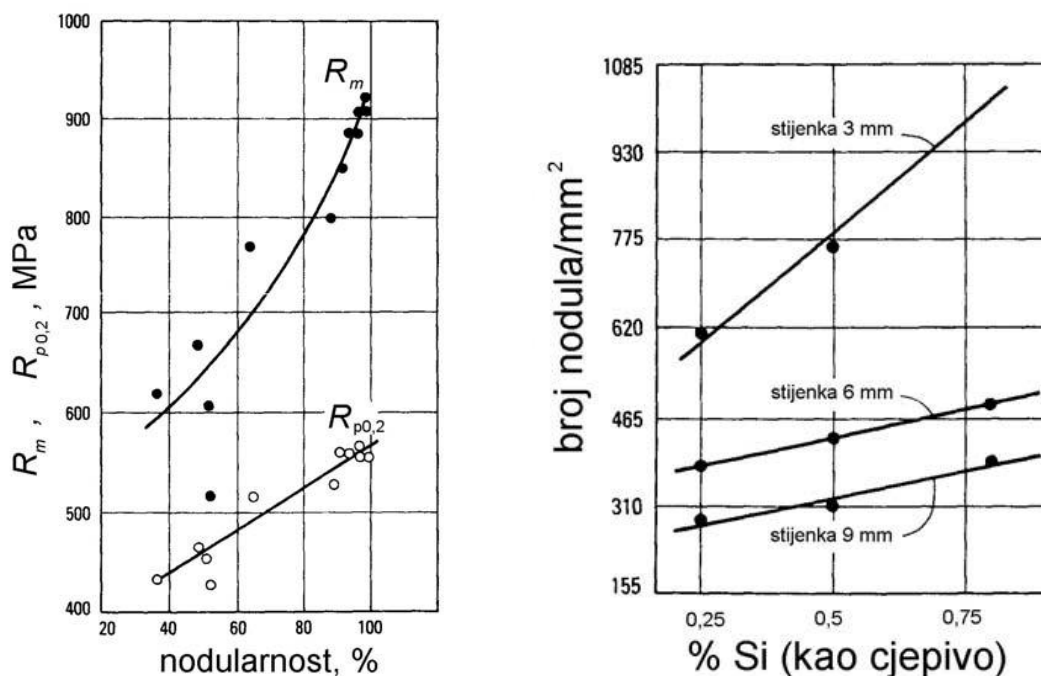


Slika 2.12. Normirane veličine grafitnih kuglica (grafit oblika VI.) u žilavom lijevu po normi HRN EN ISO 945:2002, [16]

Nodularnost, tj. stupanj sferičnosti, volumni je udio kuglastih grafitnih faza prema ukupnom broju grafitnih faza. Cilj proizvodnje jest dobiti žilavi lijev sa što većom nodularnošću, obično iznad 90%, jer mehanička svojstva izravno ovise o pravilnosti kuglica grafita, [2, 17].

Dinamička izdržljivost i vlačna čvrstoća izrazito opadaju s porastom udjela ne kuglastih oblika grafita, dok na granicu razvlačenja nodularnost ima manji utjecaj, slika 2.13. (a). Tanki listići grafita s oštrim rubovima uzrokuju značajan pad vlačne čvrstoće. Smanjena nodularnost: utječe na modul elastičnosti, snižava udarnu radnju loma, povećava sposobnost prigušivanja vibracija, povećava toplinsku vodljivost i smanjuje električni otpor, [2].

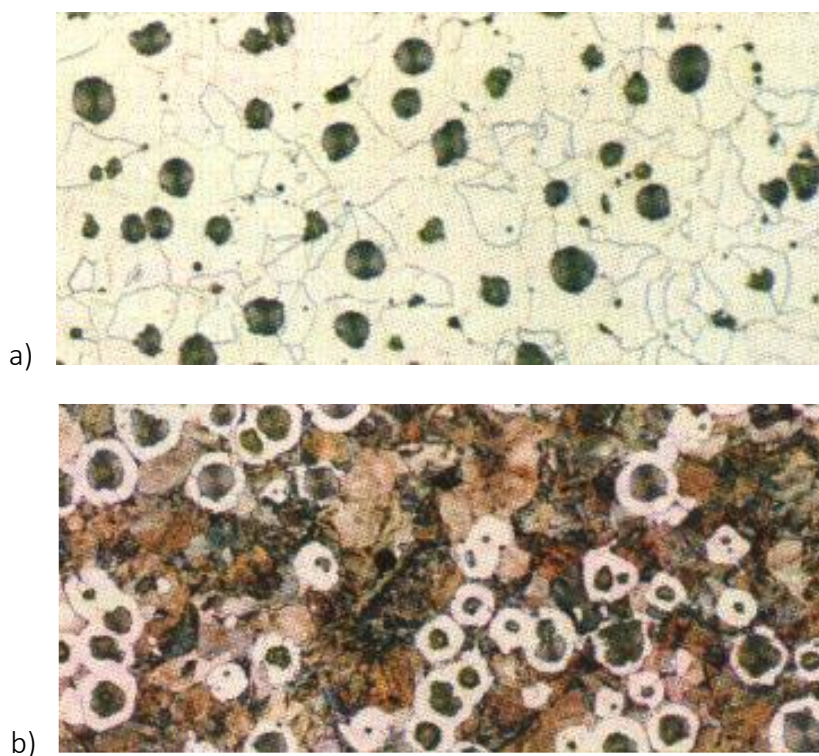
Slika 2.13. (b) prikazuje utjecaj udjela silicija, koji je dodan u talinu kao cjepivo, na broj nodula po jedinici površine za tri odljevka različitih debljina stijenki. Cijepljenje se provodi prilikom proizvodnje žilavog lijeva te se na taj način potiče stabilno skrućivanje, povećava broj nodula i poboljšava nodularnost. Razlog tome jest što se cijepljenjem stvaraju dodatni centri za nukleaciju i rast grafita, [2, 18]. Sa porastom udjela grafita u mikrostrukturi dolazi do blagog pada: vlačne čvrstoće, istezljivosti i gustoće žilavog lijeva.



Slika 2.13. (a) Utjecaj nodularnosti na mehanička svojstva žilavog lijeva, (b) utjecaj udjela silicija (cjepivo) na broj nodula/ $\text{mm}^2$  za tri debljine stijenke, [17]

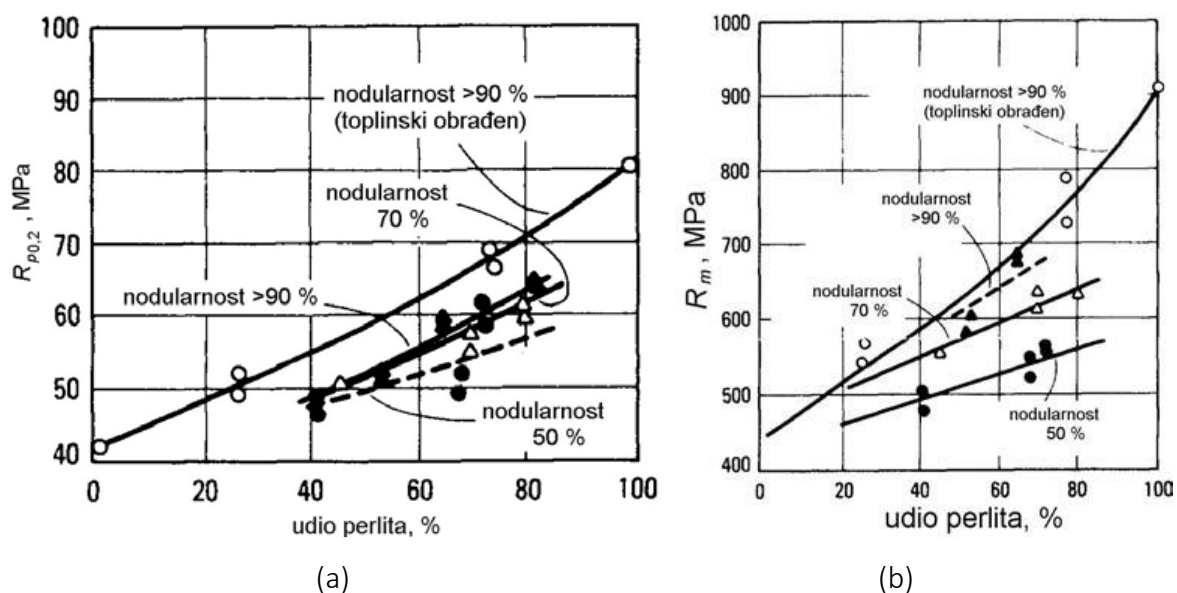
Kao što je već rečeno, matrica može biti: feritna, perlitna, feritno-perlitna ili austenitna. Austenitni žilavi lijev se koristi ponajprije u uvjetima tražene otpornosti na visoke temperature te otpornosti na trošenje i koroziju, [19]. Da bi se utvrdilo koja vrsta matrice je nastala potrebno je provesti metalografsko ispitivanje što zahtjeva odgovarajuću pripremu obradaka. Uzorci se prvo bruse, zatim poliraju a onda nagrizaju nitalom da bi matrica postala vidljiva. Nital je otopina dušične kiseline u etilnom alkoholu.

Slika 2.14. prikazuje mikrostrukture feritnog (a) i perlitnog (b) žilavog lijeva, pri povećanju 100 puta, obje nagrižene 4% nitalom, [20]. Povećanjem udjela feritne matrice lijev ima: nižu vlačnu čvrstoću, višu istezljivost, nižu udarnu radnju loma i višu prijelaznu temperaturu žilavo/krhko. Na slici 2.15 prikazana je promjena tehničke granice razvlačenja (a) i vlačne čvrstoće (b) s promjenom udjela perlita za različite nodularnosti žilavog lijeva. Slika 2.16 prikazuje promjenu vrijednosti udarne radnje loma pri promjeni temperature ispitivanja za različite matrice žilavog lijeva.

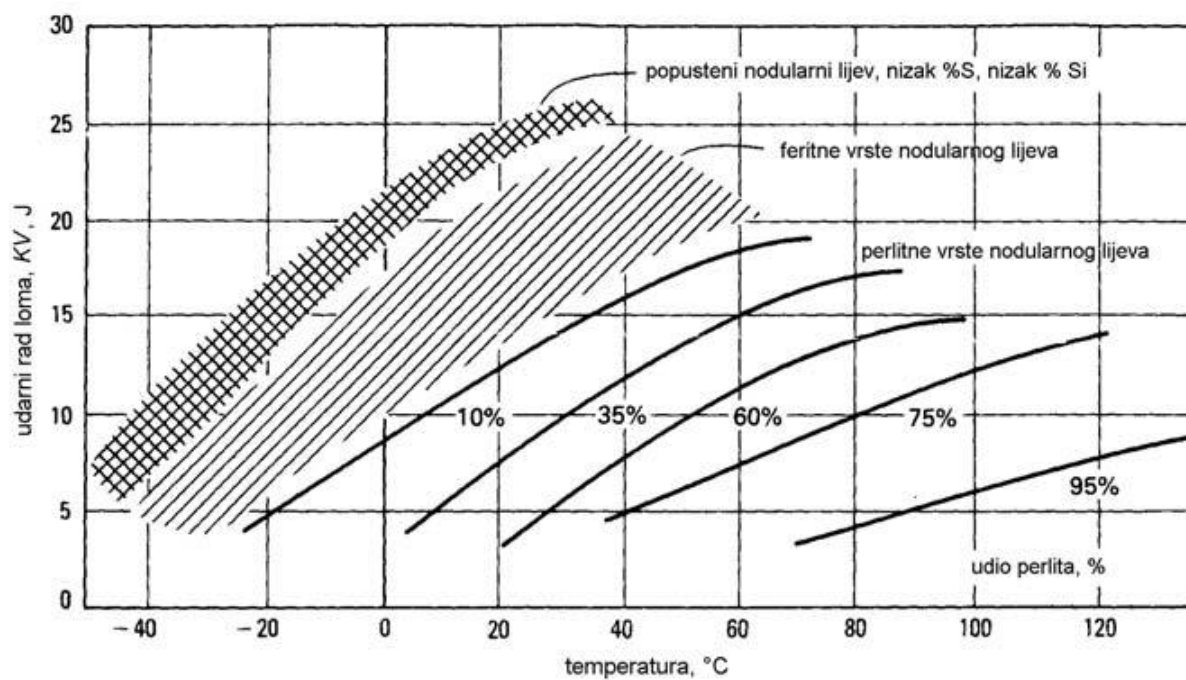


*Slika 2.14. Mikrostruktura feritnog (a) i perlitno-feritnog (b) žilavog lijeva, povećanje 100x, nagríženo 4% nitalom, [20]*





Slika 2.15. Tehnička granica razvlačenja (a) i vlačna čvrstoća (b) žilavog lijeva pri različitim udjelima perlita i različitim nodularnostima, [17]



Slika 2.16. Udarna radnja loma na različitim temperaturama za različite vrste žilavog lijeva, [17]

Debljina stjenke odljevka također utječe na strukturu i svojstva žilavog lijeva. Kako se stjenka stanjuje, povećavaju se brzina kristalizacije i brzina hlađenja čime se dobiva sitnozrnata

mikrostruktura. Isto tako mogu se pojaviti karbidi koji: povećavaju tvrdoću, smanjuju obradivost odvajanjem čestica i smanjuju udarnu radnju loma odljevka. Zato je kod odljevaka tankih stijenki talinu potrebno pojačano cijepiti, i to što kasnije, kako bi se stvorio što veći broj nodula, [2].

### 2.3. Klasifikacija žilavog lijeva

Klasifikacija žilavog lijeva propisana je hrvatskom normom HRN EN 1563:1997. Prema navedenoj normi ljevovi se klasificiraju na temelju: minimalnih vrijednosti vlačne čvrstoće, tehničke granice razvlačenja, istezljivosti i udarne radnje loma. Tablica 2.3. prikazuje normom propisana mehanička svojstva žilavog lijeva ispitana na posebno odlivenim ispitnim uzorcima, [21]. Tablica 2.4. prikazuje normom propisane vrijednosti udarne radnje loma žilavog lijeva ispitnog na uzorcima s V-utorom izrađenih iz posebno odlivenih ispitnih obradaka. Oznake željeznih ljevova propisuje norma HRN EN 1560:2004, pa npr. oznaka EN-GJS-350-22 govori da je riječ o žilavom lijevu koji zadovoljava europsku normu, ima garantiranu vrijednost vlačne čvrstoće 350 N/mm<sup>2</sup> i istezljivost minimalno 22%, [22].

Tablica 2.3. Normom propisana mehanička svojstva žilavog lijeva (HRN EN 1563:1997), [22]

Označavanje materijala :		Vlačna čvrstoća, $R_m$ , [N/mm <sup>2</sup> ], min	Tehnička granica razvlačenja, $R_{p0,2}$ , [N/mm <sup>2</sup> ], min	Istezljivost, A, [%], min
Oznaka:	Broj:			
EN-GJS-350-22-LT <sup>1)</sup>	EN-JS1015	350	220	22
EN-GJS-350-22-RT <sup>2)</sup>	EN-JS1014	350	220	22
EN-GJS-350-22	EN-JS1010	350	220	22
EN-GJS-400-18-LT <sup>1)</sup>	EN-JS1025	400	240	18
EN-GJS-400-18-RT <sup>2)</sup>	EN-JS1024	400	250	18
EN-GJS-400-18	EN-JS1020	400	250	18
EN-GJS-400-15	EN-JS1030	400	250	15
EN-GJS-450-10	EN-JS1040	450	310	10
EN-GJS-500-7	EN-JS1050	500	320	7
EN-GJS-600-3	EN-JS1060	600	370	3
EN-GJS-700-2	EN-JS1070	700	420	2
EN-GJS-800-2	EN-JS1080	800	480	2
EN-GJS-900-2	EN-JS1090	900	600	2

<sup>1)</sup> LT (engl. low temperature) – udarna radnja loma se ispituje na niskim temperaturama

<sup>2)</sup> RT (engl. room temperature) – udarna radnja loma se ispituje na sobnoj temperaturi



Tablica 2.4. Normom propisana udarna radnja loma žilavog lijeva (HRN EN 1563:1997), [22]

Označavanje materijala:		Minimalna vrijednost udarne radnje loma, KV, [J]					
Oznaka:	Broj:	Pri sobnoj temp. 23±5°C		Pri -20±2°C		Pri -40±2°C	
		Sr. vr. 3 mj. <sup>1)</sup>	Pojed. vr. <sup>2)</sup>	Sr. vr. 3 mj. <sup>1)</sup>	Pojed. vr. <sup>2)</sup>	Sr. vr. 3 mj. <sup>1)</sup>	Pojed. vr. <sup>2)</sup>
EN-GJS-350-22-LT	EN-JS1015	-	-	-	-	12	9
EN-GJS-350-22-RT	EN-JS1014	17	14	-	-	-	-
EN-GJS-400-18-LT	EN-JS1025	-	-	12	9	-	-
EN-GJS-400-18-RT	EN-JS1024	14	11	-	-	-	-

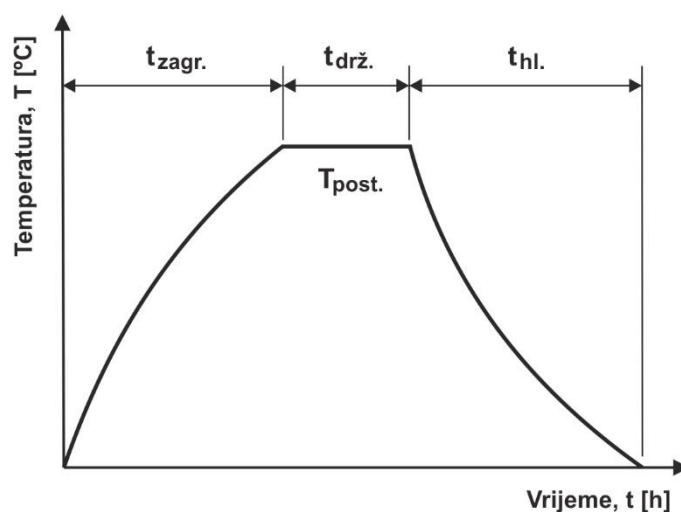
<sup>1)</sup> srednja vrijednost triju mjerenja

<sup>2)</sup> pojedinačna vrijednost

### 3. IZOTERMIČKO POBOLJŠAVANJE (engl. „AUSTEMPERING“)

Osim dodavanjem legirnih elemenata, mikrostruktura i mehanička svojstva se mogu mijenjati i adekvatnom toplinskom obradom. Toplinska obrada je tehnološki proces zagrijavanja legure do određene specifične temperature, držanja na toj temperaturi određeno vrijeme te hlađenja odgovarajućom brzinom u svrhu postizanja željenih svojstava legure. Osim toplinskom obradom i legiranjem, svojstva se mogu mijenjati i plastičnom obradom. U procesu toplinske obrade mijenja se temperatura obratka što se može opisati pomoću dijagrama toplinske obrade, tj. hodogram. Svaki hodogram opisan je s 4 osnovna parametra, slika 3.1., a to su:

- $T_{\text{post.}}$  – najviša temperatura postupka,
- $t_{\text{zagr.}}$  – vrijeme zagrijavanja,
- $t_{\text{drž.}}$  – vrijeme držanja na najvišoj temperaturi,
- $t_{\text{hl.}}$  – vrijeme hlađenja.



Slika 3.1. Hodogram toplinske obrade, [9]

Izotermičko poboljšavanje je toplinska obrada koja se primjenjuje na željeznim legurama. Prvi postupci primjene ove toplinske obrade izvršeni su na sivom lijevu, ali mnogo uspješnijom pokazala se primjena ovog postupka na čelicima te na žilavom lijevu. Predmeti se pri izotermičkom poboljšavanju hlade u ugrijanim kupkama čija je temperatura između 230°C i 450°C, ovisno kakva svojstva se žele postići. Potreban je određeni vremenski period držanja u kupkama da bi se dobila željena mikrostruktura, a samim time i mehanička svojstva.

---

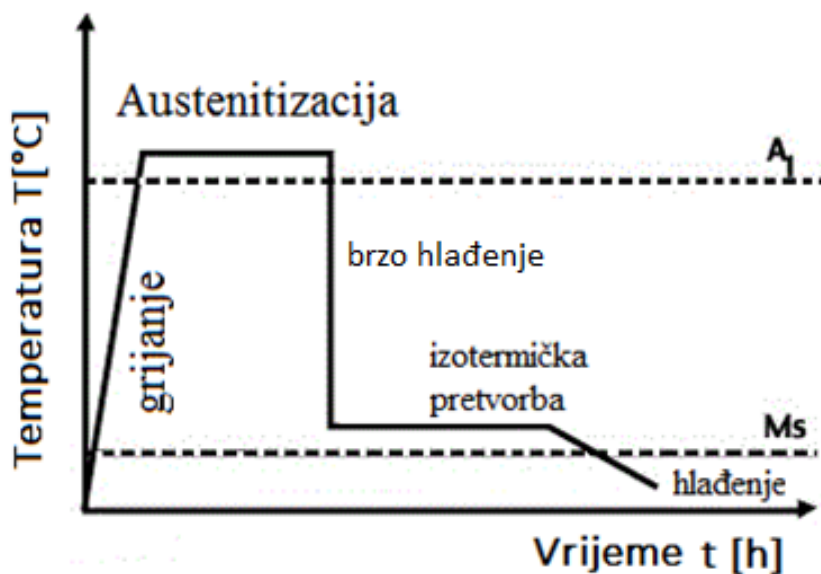
Toplinska obrada izotermičkog poboljšavanja žilavog lijeva slična je toplinskoj obradi izotermičkog poboljšavanja čelika, samo im se konačne mikrostrukture razlikuju, pa s time i svojstva. Dok se kod izotermičkog poboljšavanja čelika postiže bejnitna mikrostruktura, kod žilavog lijeva nastaje struktura sastavljena od ferita i stabilnog, ugljikom bogatog, austenita koja se naziva ausferit. Različitost strukture nastale izotermičkim poboljšavanjem posljedica je velikog udjela silicija u žilavom lijevu koji ograničava nastanak karbida, [1].

Prednost toplinske obrade izotermičkog poboljšavanje je ušteda u proizvodnji u odnosu na klasično poboljšavanje. Kod klasičnog poboljšavanja (kaljenje + popuštanje) utrošak energije je veći zbog dvostrukog zagrijavanja (na temperaturu austenitizacije a zatim na temperaturu popuštanja). Osim energetske, a time i financijske prednosti, izotermičko poboljšavanje ima i prednosti u vidu poboljšavanja mehaničkih svojstava. Zajedničke prednosti svih izotermičkih poboljšanih obradaka nad klasično poboljšanim su, [1]:

- povećana duktilnost,
- povećana udarna radnja loma,
- povećana otpornost na trošenje,
- povećana trajna dinamička čvrstoća.

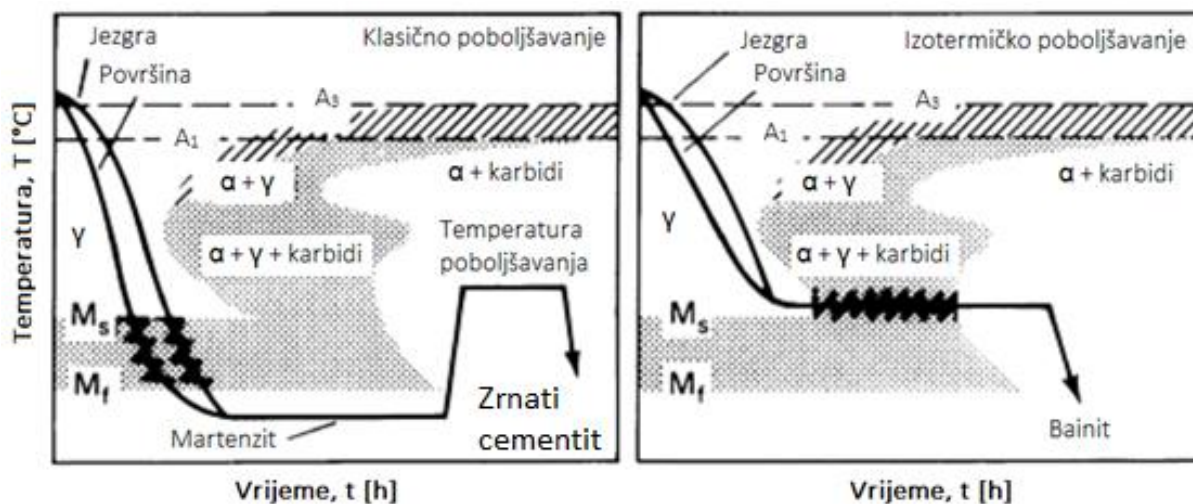
Tijek izotermičke pretvorbe žilavog lijeva prikazan je na slici 3.2. i sastoji se od sljedećih faza:

- a) zagrijavanje žilavog lijeva na temperaturu austenitizacije,  $T_A$  (između 850°C i 950°C),
- b) držanje na temperaturi austenitizacije do potpune austenitizacije odljevka,  $t_{dr\dot{z},A}$  (sastav: austenit + kuglice grafita),
- c) hlađenje obratka dovoljno brzo da se dobije samo ausferit u kupki na temperaturi izotermičke pretvorbe,  $T_{IZ}$  (između 230°C i 450°C),
- d) držanje na temperaturi izotermičke pretvorbe dovoljno dugo da se postigne željena mikrostruktura,  $t_{dr\dot{z},IZ}$
- e) polagano hlađenje na zraku do sobne temperature.



Slika 3.2. Shematski prikaz izotermičke pretvorbe žilavog lijeva, [23]

Ovu toplinsku obradu su osmislili i prvi proveli E.S. Devenporti i E.C. Baines te su je detaljno opisali u patentu broj U.S. 1,924,099. Osnovna razlika između klasičnog poboljšavanja i izotermičkog poboljšavanja prikazana je na slici 3.3.



Slika 3.3. Usporedba TTT dijagrama kod klasičnog i izotermičkog poboljšavanja, [14]

### 3.1. Sredstva za izotermičko poboljšavanje

Medij u kojem se provodi izotermička pretvorba je najčešće solna kupka sastavljena od natrijevog i kalijevog nitrata ( $NaNO_3 + KNO_3$ ) u omjeru 50% : 50%. Operativno područje kupke ovog sastava je od 160°C do 550°C, ovisno o kemijskom sastavu soli. Izotermička pretvorba se vrši i u olovnoj kupki, međutim talište olova je na 327°C što sužava temperaturno područje toplinske obrade. Iznimno se može koristiti i ulje ali uz veliku dozu opreza, [1, 14].

**Solne kupke** najčešće se koriste za izotermičku obradu. Isto tako koriste se i za: popuštanje, žarenje, austenitizaciju, gašenje, itd. Sastav solnih kupki ima ključnu ulogu pri provedbi toplinske obrade. Rastaljene soli su potpuno razložene na katione i anione, toplinski su vrlo stabilne, imaju nizak tlak pare te odličnu toplinsku i električnu vodljivost. Deformacije na obratku su vrlo male, ako se uopće pojave, jer je odvođenje topline vrlo brzo i jednolično. Ove soli imaju nisku viskoznost ali visoku topivost. Sposobnost otapanja plinova im je dobra te se povećava s porastom temperature, a neke rastaljene soli mogu rastvoriti čak i metale, [24].

Solna kupka je najčešće korišteno sredstvo prilikom izotermičke toplinske obrade žilavog lijeva jer, [14, 24]:

- radna temperatura solne kupke je od 160°C do 550°C,
- može se koristiti za procese gašenja s diskontinuiranom promjenom brzine hlađenja,
- jako brzo provodi toplinu i nije zapaljiva,
- ona praktički eliminira problem pojave parnog omotača kod početnog stadija hlađenja,
- njena viskoznost je jednolika kroz širok temperaturni spektar,
- njena viskoznost je mala na temperaturama izotermičke obrade (blizu viskoznosti vode pri sobnoj temperaturi), čime se smanjuju gubitci prilikom vađenja obradaka,
- ostaje stabilna na radnim temperaturama te je potpuno topiva u vodi, čime se olakšava naknadno čišćenje,
- sol se lako može izlučiti iz vode korištene za čišćenje pomoću metoda isparavanja,
- promjenom radne temperature, miješanjem i dodavanjem vode može se značajno utjecati na intenzitet hlađenja. Uobičajeno je da pri radnoj temperaturi od 160°C do 290°C udio vode bude od 0,5% do 2%.

U tablici 3.1. dan je prikaz naziva i karakteristika dviju najčešće korištenih solnih kupki. Sol uskog raspona prikladna je samo za izotermičko poboljšavanje, dok je sol širokog raspona pogodna za izotermičko poboljšavanje, „martempering“ i njihove modifikacije.

Tablica 3.1. Sastav i karakteristike soli za izotermičko poboljšavanje, [14]

	Uski raspon	Široki raspon
Natrijev nitrat, %	45 – 55	0 – 25
Kalcijev nitrat, %	45 – 55	45 – 55
Natrijev nitrit, %	...	25 – 55
Talište, T [°C]	220	150 – 165
Radna temperatura, T [°C]	260 – 595	175 - 540

Soli za solne kupke su lako dobavljive od specijaliziranih proizvođača koji su svoje proizvode i usluge bazirali na toplinskoj obradi metala. Jedan od takvih proizvođača je i „Hef Durferit“ [25], koji nudi više vrsta soli, ovisno o njihovo specifičnoj primjeni. Trgovački nazivi takvih soli te njihova primjena i radna temperatura dani su u tablici 3.2. Fizikalna svojstva dana su u tablici 3.3. a izgled soli AS 140 prije i za vrijeme toplinske obrade prikazan je na slici 3.4.

Tablica 3.2. Nazivi, područja primjena te radne temperature soli za solne kupke, [25]

Naziv soli	Područje primjene	Radna temperatura, T[°C]
AS 140	Za izotermičko poboljšavanje, izotermičko poboljšavanje na martenzit i kaljenje. Nije pogodna za obratke zagrijane iznad 950°C ili tretirane u kupkama sa više od 13% KCN.	160 – 550
AS 220	Za austempering, martempering, kaljenje i plavičanje. Nije pogodna za obratke zagrijane iznad 950°C ili tretirane u kupkama sa više od 13% KCN.	250 – 550
AS 235	Neotrovn sol za austempering, martempering, kaljenje i plavičanje. Nije pogodna za obratke zagrijane iznad 950°C ili tretirane u kupkama sa više od 13% KCN.	280 – 550
AS 300	Neotrovn sol za austempering, kaljenje i plavičanje. Nije pogodna za obratke zagrijane iznad 950°C ili tretirane u kupkama sa više od 13% KCN.	340 – 550
GS 430	Za gašenje i kaljenje obradaka austenitiziranih iznad 950°C.	500 – 560

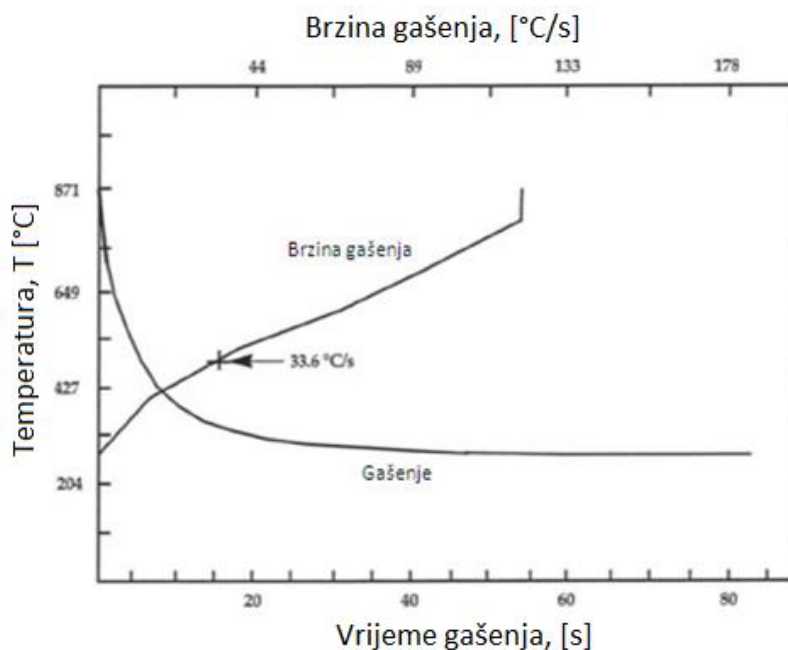
Tablica 3.3. Fizikalna svojstva soli AS 140, [24]

Svojstva	Vrijednosti
Specifična gustoća	1,84 – 1,92 kg/dm <sup>3</sup>
Specifični toplinski kapacitet	0,35 – 0,40 J/kgK
Toplinska vodljivost	0,571 W/mK
Koeficijent prijelaza topline	4,5 – 16,5 kW/m <sup>2</sup> K
Gubitak soli iz solne kupke	50 – 100 g/m <sup>2</sup>



Slika 3.4. Prikaz soli AS 140 prije i za vrijeme toplinske obrade

Na slici 3.5. prikazan dijagram gašenja u mirujućoj solnoj kupci bez dodatka vode.



Slika 3.5. Dijagram gašenja u mirujućoj kupci bez dodavanja vode, [24]

**Dodatak vode u nitratne-nitritne solne kupke.** Intenzitet hlađenja solne kupke može se znatno povećati pažljivim dodavanjem vode. Miješanje solne kupke je potrebno da bi se voda ravnomjerno raspršila. Periodično dodavanje vode je potrebno da se zadrži njen potrební nivo. Voda može biti dodana sa potpunom sigurnošću kako slijedi, [14]:

- voda može biti dodana u vidu maglice, pažljivo kontroliranim tempom, u jako miješano područje solne kupke,
- u postrojenjima gdje sol kruži pomoću pumpe, povratna sol mora se postepeno vraćati u zonu gašenja. Kontrolirani fini mlaz vode se može dodati u postepeno povratnu sol,
- kupka za izotermičko poboljšavanje može biti zasićena vlagom tako da se vodena para direktno upuhava u kupku. Parni dovod bi trebao biti zatvoren i opremljen ispušnim ventilom da se izbjegne otpuštanje kondenzata direktno u solnu kupku,
- dodavanje vodene pare u kupke za izotermičko poboljšavanje se vrši na radnim temperaturama iznad 260°C.

Voda kontinuirano isparava sa površine solne kupke te se stopa isparavanja povećava za vrijeme gašenja vrućeg obratka. Stoga je potrebno periodički dodavati vodu da bi se zadržala potrebna razina vode i jednoliki intenzitet gašenja. Količina vode koja se dodaje u otvorene solne kupke varira u ovisnosti o radnoj temperaturi solne kupke, kao što je prikazano sa preporučenim koncentracijama u tablici 3.4.:

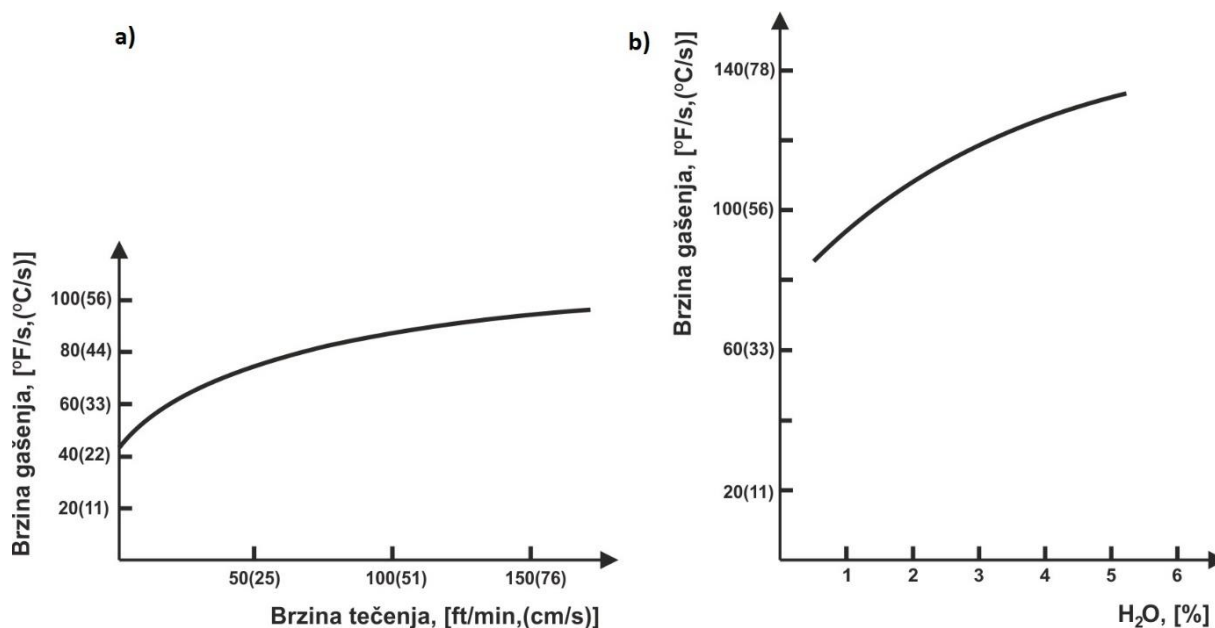


Tablica 3.4. Preporučene koncentracije vode u solnoj kupki, [14]

Temperatura, T [°C]	Koncentracija vode, [%]
205	0,5 do 2
260	0,5 do 1
315	0,25 do 0,5

Vrijednosti prikazane u tablici 3.4. predstavljaju količinu vode otopljene u solnoj kupki pri atmosferskome tlaku. Novije vrste opreme, zatvorenoga tipa, omogućavaju čak i do 10% vode pri temperaturi od 200°C s rezultirajućim porastom intenziteta gašenja.

Na slici 3.6. prikazan je dijagram utjecaja miješanja (a) i prisutnosti (b) vode na intenzitet gašenja solne kupke s nisko temperaturnim talištem (tip AS 140).



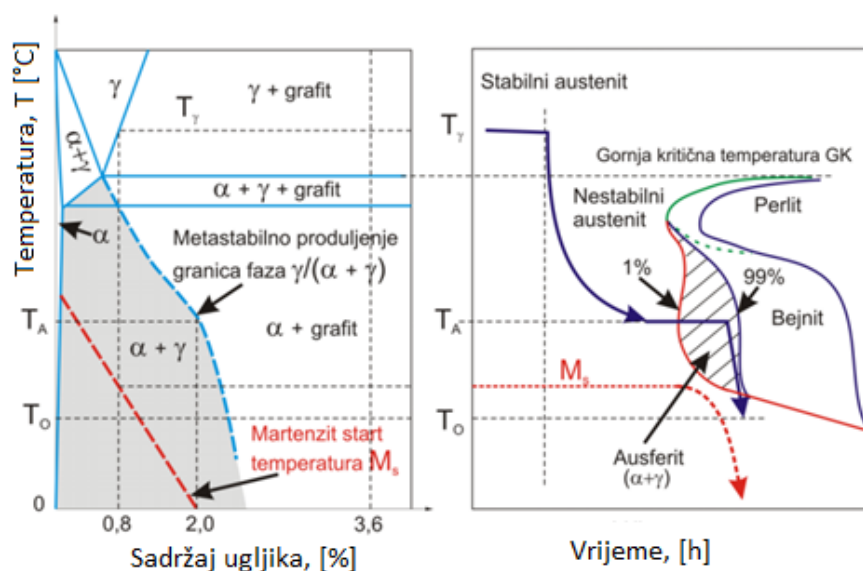
Slika 3.6. Dijagram utjecaja miješanja (a) i sadržaja vode na intenzitet gašenja solne kupke s nisko temperaturnim talištem (tip AS 140), [24]

Ulje se ponekad koristi kao sredstvo za izotermičko poboljšavanje. Međutim, zbog svoje kemijske nestabilnosti te promjenom viskoznosti na temperaturi izotermičke pretvorbe, njegova primjena je ograničena na temperature ispod 245°C. Zbog stvaranja parnog omotača, ulje ima manji intenzitet hlađenja nego solna kupka pa na povišenim temperaturama predstavlja ozbiljnu opasnost od požara, [14].

#### 4. IZOTERMIČKI POBOLJŠAN ŽILAVI LIJEV

Izotermički poboljšani žilavi lijev (engl. „Austempered Ductile Iron - ADI“) posljednji je dodatak u grupi žilavih ljevova dobiven izotermičkim poboljšavanjem klasičnog žilavog lijeva. Izotermički poboljšani žilavi lijev je dvostruko čvršći od perlitnog žilavog lijeva te ima visoku istezljivost i visoku udarnu radnju loma. Ova kombinacija svojstava daje materijal sa superiornom otpornošću trošenju i visokom dinamičkom izdržljivošću. [3].

Toplinska obrada izotermičkog poboljšavanja sastoji se od austenitizacije žilavog lijeva, gašenja na izotermičku temperaturu za kontrolirani vremenski period te hlađenja do sobne temperature, slika 4.1.



Slika 4.1. Metastabilni i izotermički TTT dijagram. U dijagramu je prikazana  $M_s$  temperatura, ovisnost  $M_s$  temperature o vremenu obrade „austempering“ (crvena linija u izotermičkom TTT dijagramu) i metastabilno  $\alpha + \gamma$  područje (u metastabilnom faznom dijagramu), [26]

Na lijevoj strani na slici 4.1. prikazan je načelni metastabilni dijagram s ucrtanim krivuljama početka i završetka pretvorbe austenita, u kojem sadržaj ugljika odgovara matrici nodularnog lijeva. Na desnoj strani slike shematski je prikazan TTT dijagram istog lijeva sa ucrtanom krivuljom hlađenja koja odgovara izotermičkoj toplinskoj obradi. U TTT dijagramu je istaknuto šrafirano područje koje odgovara izotermičkoj transformaciji. Cilj pravilno provedene izotermičke obrade je austenitno feritna lamelarna mikrostruktura, zbog čega se zadržavanje

---

na izotermičkoj temperaturi prekida prije početka nastajanja bejnita. To je istaknuto krivuljom označenom na slici s 99%, [26].

Nekoliko autora, [4, 5, 27], ispravno je ustvrdilo da za vrijeme izotermičkog poboljšavanja, ADI prolazi proces kroz dva stupanja transformacije. U prvom stupnju transformacije, austenit ( $\gamma$ ) se raspada na bejnitni ferit ( $\alpha$ ) i ugljikom obogaćen zaostali austenit ( $\gamma_{hc}$ ), tzv. ausferit.



U drugom stupnju transformacije, ugljikom obogaćen zaostali austenit ( $\gamma_{hc}$ ) dalje se raspada na ferit ( $\alpha$ ) i karbide. Ova pretvorba će se dogoditi ako se obradak predugo drži na izotermičkoj temperaturi, [4].



Pojava karbida u mikrostrukturi čini materijal krhkim te takvu reakciju treba izbjeći. Stoga, optimalna mehanička svojstva ADI-a postižu se po završetku prvog stupnja transformacije te prije početka drugog stupnja, tj. unutar tzv. „vremenskog prozora“, [28, 29].

Istraživanje i određivanje vremenskog prozora privuklo je mnogo interesa u proteklim godinama, [5, 27, 30 - 34]. Vremenski prozor se može definirati kao „mikrostrukturni“ ili „standardni“ vremenski prozor. „Mikrostrukturni“ vremenski prozor definiran je s mikrostrukturnim svojstvima i najbolje se određuje pomoću kriterija koje su predložili *Elliot i Bayati*, [5, 34]. Početak vremenskog prozora predstavlja trenutak kada volumen austenita koji nije reagirao padne na 3% (vrijednost dobivena kvantitativnom metalografijom), dok je završetak vremenskog prozora povezan sa padom volumena ugljikom obogaćenog zaostalog austenita koji je reagirao ( $V\gamma$ ) do 90% od njegovog maximuma (vrijednost  $V\gamma$  određena je difrakcijom X-zraka), [29]. S druge strane, „standardni“ vremenski prozor definiran je u ovisnosti o mehaničkim svojstvima ADI-a dobivenog u mikrostrukturnom vremenskom prozoru, koji mora zadovoljiti standard ASTM A897M:1990. Međutim, postoje tri ADI standarda koja se trenutačno koriste u svijetu: ASTM A897M-16, EN 1564:2001/A1:2008 i ISO 17804:2006, [35]. Kako navedeni standardi variraju u nekim detaljima vezao za broj razreda, iznos minimalne vrijednosti vlačne čvrstoće i istežljivosti za različite razrede, tako i vremenski prozor varira i ovisi o korištenom standardu, [29].

---

Legirni elementi imaju značajan utjecaj na izotermičku temperaturu, vrijeme početka pretvorbe i završetak izotermičke reakcije, te stoga omogućavaju veći vremenski prozor i lakšu kontrolu reakcije. U tom smislu posebno je interesantan utjecaj bakra i nikla. Bakar odgađa nukleaciju feritnih pločica i promovira pločastu morfologiju. Nadalje, bakar onemogućava formiranje karbida u mikrostrukturi. Prisutnost nikla reducira brzinu transformacije i smanjuje temperaturu izotermičke reakcije. Od velike je važnosti sinergijski utjecaj bakra i nikla na ograničavanje nukleacije i rani rast feritnih pločica a s time i produljivanje vremena za izotermičku reakciju, [29, 36, 37].

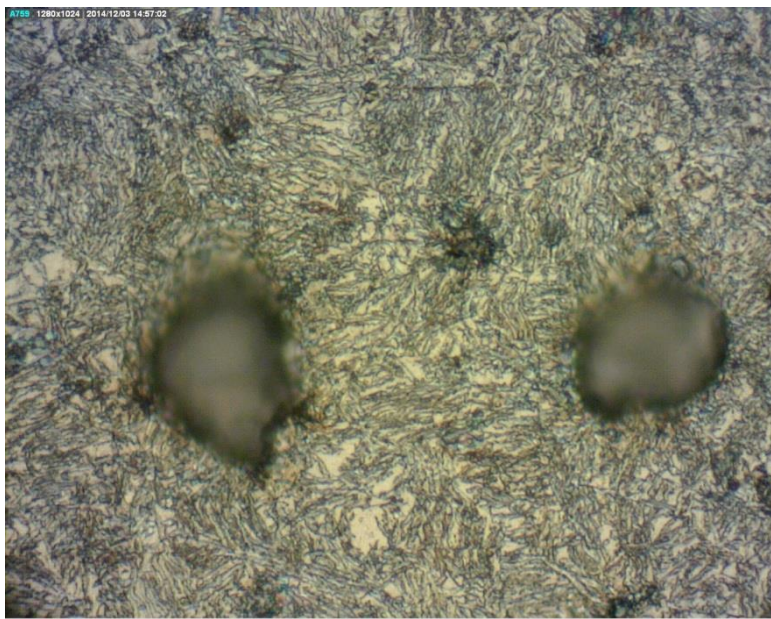
Primjena ADI legura u industriji jako je široka. Bazira se na izvrsnim mehaničkim svojstvima i ekonomskoj isplativosti, [1]:

- poljoprivreda: izvrsna otpornost na trošenje uslijed rada sa zemljom,
- rovokopač: visoka čvrstoća i otpornost na trošenje,
- industrija: elementi izloženi trošenju, pumpe, itd.,
- zupčanici: otpornost na trošenje i bolje upijanje vibracija nego čelik,
- građevinarstvo: elementi izloženi trošenju, drobljenju, mljevenju, itd.,
- prehrambena industrija: drobljenje, miješanje, sortiranje, itd.

Veliki nedostatak ADI legura jest loša zavarljivost te se taj postupak ne preporuča provoditi na ADI legurama, [14].

#### 4.1. Mikrostruktura

Kao što je već ranije rečeno, mikrostruktura ADI-a je specifična i bitno drugačija od mikrostrukture izotermički poboljšanog čelika koja se sastoji od ferita i karbida. Kod ADI legura rezultat izotermičkog poboljšavanja jest struktura koja se naziva *ausferit*, radije nego *niži bejnit*, [38]. Klasičan izgled ausferitne mikrostrukture prikazan je na slici 4.2. Dodatak **silicija** kao legirnog elementa, onemogućava precipitaciju karbida za vrijeme izotermičke reakcije i zadržava ugljikom obogaćeni austenit. Kod izotermičkog poboljšavanja čelika stvara se bejnitni ferit kao posljedica difuzije ugljika u zaostali austenit. Kako se proces sve više odvija tako se sve više bejnita stvara te sve više ugljika difundira u okolni austenit. U ranim fazama, austenit se pretvara u martenzit kako je sadržaj ugljika u austenitu nedovoljan da ga održi stabilnim, ali pri dužim vremenima austenit postaje toplinski stabilan, [38, 39, 40].



*Slika 4.2. Klasičan izgled ausferitne strukture austenitizirane na 900°C i izotermički poboljšanje na 383°C, [1]*

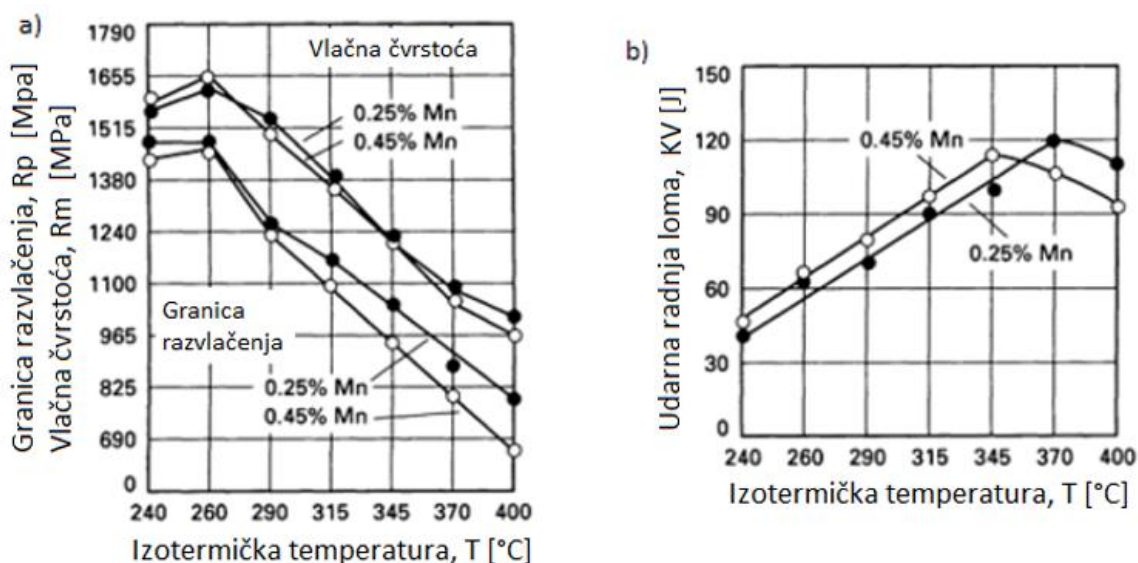
Legirni elementi se mogu koristiti za izbjegavanje pojave visoko temperaturnih produkata (npr. pojava perlita kod proizvoda velikih dimenzija) ili za poboljšavanje mehaničkih svojstava, naročito otvrdnjavanje perlita. Takvi legirni elementi su: bakar, nikal, molibden i mangan, [14]. Vrlo je važno razumjeti i znati da ti legirni elementi imaju sklonost odvajanju za vrijeme skrućivanja tako da ne postoji jednolika raspodjela kroz matricu. To ima potencijalno štetan učinak na izotermičku reakciju a samim time i mehanička svojstva. Udarne radnja loma i duktilnost su posebno pogođena svojstva.

**Mangan** i **molibden** imaju najsnažniji utjecaj na otvrdnjavanje perlita ali će se također odvojiti i izlučiti po granicama zrna odljevka te poticati stvaranje željeznih i legirnih karbida. Dok **bakar** i **nikal** obično bitno ne utječu na otvrdnjavanje, oni se odvajaju prema grafitnim kuglicama i ne stvaraju štetne karbide. Kombinacija ovih legirnih elemenata, koji se odvajaju u suprotnim smjerovima, se ponajviše koristi zbog njihovog sinergijskog učinka na otvrdnjavanje, [14]. Isto tako vrlo važni su i parametri toplinske obrade koji snažno utječu na mehanička svojstva ADI-a i mikrostrukturu. Kako temperatura austenitizacije raste, tako raste i sadržaj ugljika u matrici; stvarni sadržaj ugljika u matrici na kompleksan način ovisi o prisutnim legirnim elementima, njihovim udjelima i njihovoj lokaciji unutar matrice, [14].

Najvažniji pokazatelj sadržaja ugljika u matrici žilavog lijeva je udio silicija; kako se udio silicija povećava za zadanu temperaturu austenitizacije, sadržaj ugljika u matrici se smanjuje. Temperature austenitizacije između 845°C i 950°C su normalne, a vremena austenitizacije od približno 2 h su se pokazala dovoljnima da se matrica u potpunosti ponovno obogati ugljikom. Povišena temperatura austenitizacije, sa povećanim udjelom ugljika, potiče otvrdnjavanje, što dovodi do sporije izotermičke transformacije austenita.

## 4.2. Mehanička svojstva

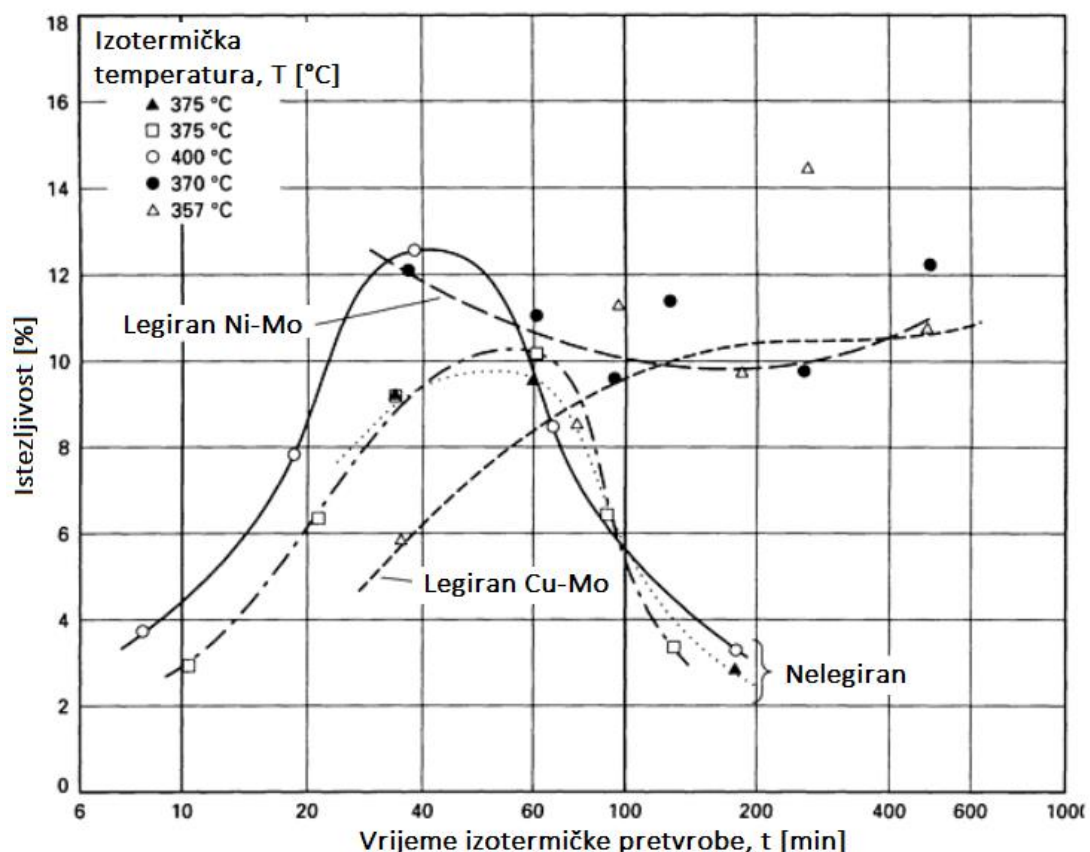
Temperatura izotermičkog poboljšavanja jest najutjecajniji čimbenik na konačnu mikrostrukturu a samim time i mehanička svojstva ADI legura, naročito tvrdoću i čvrstoću, [41]. Kako se temperatura izotermičkog poboljšavanja povećava, tako se čvrstoća i udarna radnja loma mijenjaju. Na slici 4.3. (a) prikazana je promjena čvrstoće u ovisnosti o izotermičkoj temperaturi i udjelu mangana dok je na slici 4.3. (b) prikazana promjena udarne radnje loma.



Slika 4.3. Utjecaj izotermičke temperature i udjela mangana na: (a) granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću, (b) udarnu radnju loma, [40]

Postizanje maksimalne duktilnosti za bilo koju izotermičku temperaturu je zapravo vrlo osjetljiva funkcija vremena, što je i prikazano na slici 4.4. za različite legure žilavog lijeva, [14]. Početno povećanje istezljivosti se događa u prvom stupnju transformacije i doseže svoj

maksimum kada je udio ugljikom obogaćenog zaostalog austenita najveći. Nastavak izotermičkog poboljšavanja negativno utječe na duktilnost jer kako nastupa drugi stupanj transformacije tako se stvara sve više karbida. Uobičajeno vrijeme izotermičke pretvorbe jest između 1 h i 4 h, [14].



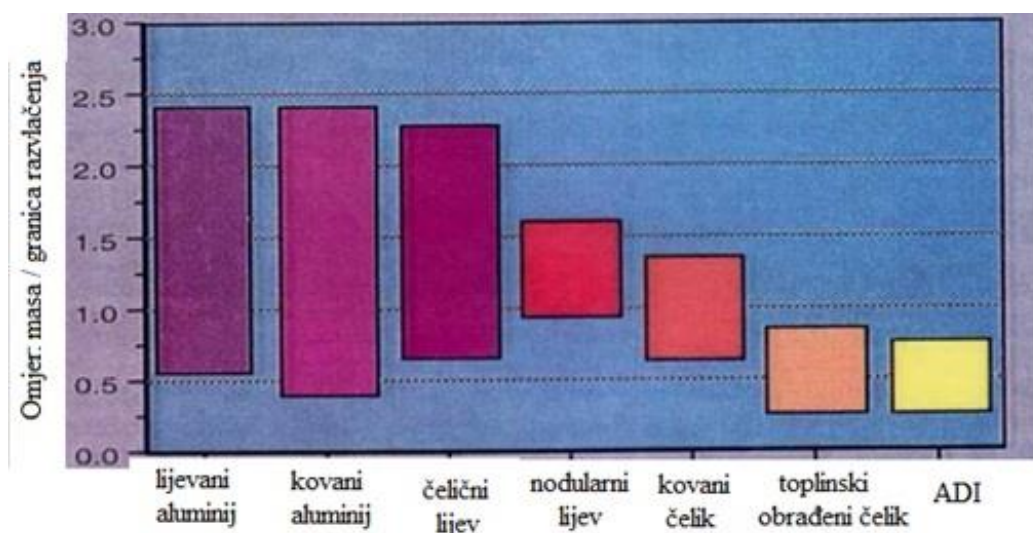
Slika 4.4. Utjecaj vremena izotermičke pretvorbe na istezljivost za različite legure žilavog lijeva, [42]

Mehanička svojstva izotermički poboljšanog žilavog lijeva s visokim sadržajem ugljika u austenitnoj matrici superiorna su u odnosu na standardne vrste žilavog lijeva s feritnom matricom, [1]. Razlog tome je postojanje ausferita, plošno centrirane kubne rešetke austenita kao matrice s feritnim lamelama u toj istoj matrici.



Prednosti ADI legura u odnosu na ostale ljeveve su, [43]:

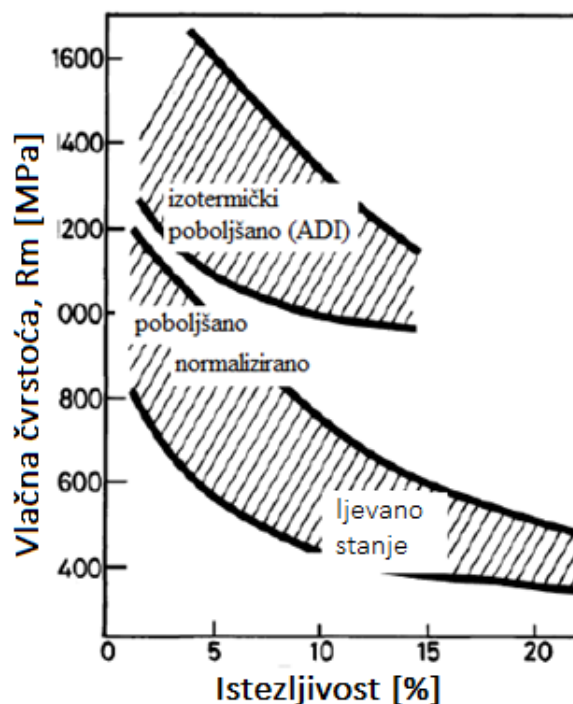
- vlačna čvrstoća i granica razvlačenja ADI legura su najmanje dvostruko veće od vlačne čvrstoće i granice razvlačenja standardnog žilavog lijeva,
- dinamička izdržljivost je 50% veća u odnosu na standardni žilavi lijev, te može biti dodatno povećana obradom deformiranjem,
- izvrsna udarna radnja loma omogućuje primjenu kod raznih alata izloženih udarnim opterećenjima,
- masa ADI legure je 2,4 puta veća od mase aluminija a tvrdoća u odnosu na aluminij može biti i do 3 puta veća. Gustoća ADI legure je 10% niža od gustoće čelika. Iz navedenih činjenica lako se očituje prednost ADI legura nad čelikom i aluminijem kada se gleda omjer mase i granice razvlačenja, slika 4.5.,



Slika 4.5. Usporedba omjera mase i granice razvlačenja sa drugim metalima, [43]

- ADI viših razreda (po ASTM-u) ima izuzetnu tvrdoću koja omogućava izvrsne površinske karakteristike a dobro svojstvo očvršćivanja pod visokim pritiskom stvara izuzetno tanak sloj martenzita na površini,
- ADI je često 15% do 20% jeftiniji od otkivaka i čeličnih ljevova, te je najekonomičniji način objedinjavanja vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i dinamičke čvrstoće. Po svojstvima je usporediv sa toplinski obrađenim čelicima i legiranim čelicima za visoko opterećene konstrukcije, gdje se zahtjeva visoka pouzdanost, slika 4.6.,





Slika 4.6. Vlačna čvrstoća i istežljivost ADI legura u odnose na žilave ljevove, [1]

- zbog visokog omjera čvrstoće i mase u nekim konstrukcijama može zamijeniti i aluminijeve legure,
- energetska efikasnost u proizvodnji je i do 50% veća nego kod čeličnih ljevova.

### 4.3. Klasifikacija

Normiranje tj. klasifikacija izotermički poboljšanog žilavog ljevova vrši se po mehaničkim svojstvima a ne po kemijskom sastavu ljevova. U tablici 4.1. prikazana je klasifikacija izotermički poboljšanog žilavog ljevova po europskoj normi EN 1564:2001/A1:2008 a u tablici 4.2. klasifikacija po američkoj normi ASTM A897M-16.

Tablica 4.1. Klasifikacija ADI legura po europskoj normi EN 1564:2001/A1:2008, [44]

Oznaka	Vlačna čvrstoća, Rm [MPa]	Granica razvlačenja, Rp [MPa]	Istezljivost, [%]	Tvrdoća, [HV10]
EN-GJS-800-8	800	500	8	260 – 320
EN-GJS-1000-5	1000	700	5	300 – 360
EN-GJS-1200-2	1200	850	2	340 – 440
EN-GJS-1400-1	1400	1100	1	380 – 480

Tablica 4.2. Klasifikacija ADI legura po američkoj normi ASTM A897M-16, [44]

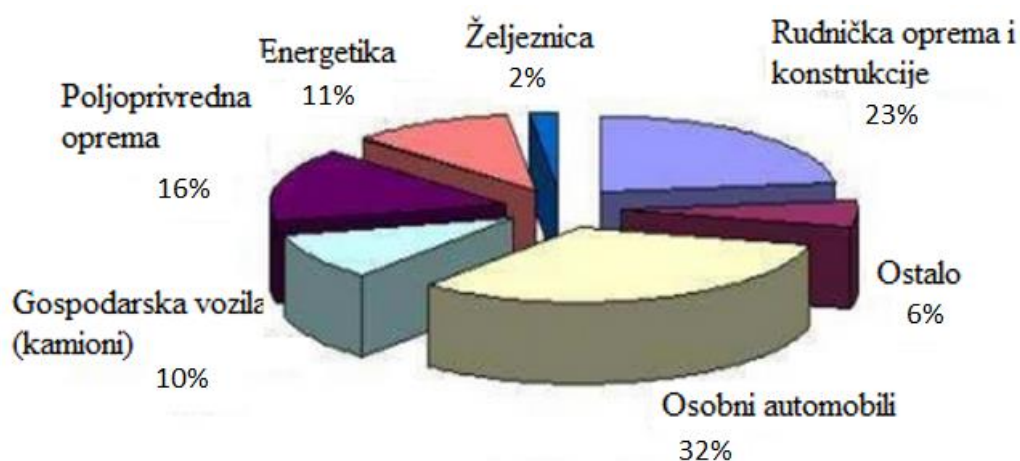
Klasa:	Vlačna čvrstoća, Rm [MPa]	Granica razvlačenja, Rp [MPa]	Istezljivost, [%]	Udarna radnja loma, KV [J]	Tvrdoća [HV10]
1	850	550	10	100	269 – 321
2	1050	700	7	80	302 – 363
3	1200	850	4	60	341 – 444
4	1400	1100	1	35	388 – 477
5	1600	1300	-	-	444 – 555

Iz tablica 4.1. i 4.2. vidljiva je raznovrsnost ADI legura kada su u pitanju mehanička svojstva. Klasa 1 (po ASTM-u) ima čistu ausferitnu mikrostrukturu sa kuglicama grafita, dok klasa 5 također ima ausferitnu mikrostrukturu ali sa značajnim udjelom željeznog karbida.

Uz prednosti ADI ima i neke nedostatke, [1]:

- relativno slaba tehnološka svojstva u izotermički poboljšanom stanju,
- visoke cijene toplinske obrade izotermičkog poboljšavanja u slučaju male proizvodnje,
- slabo svojstvo zavarljivosti, kao i ostali ljevovi,
- operativno područje strojnih dijelova izrađenih od ADI legura je prilično usko (-40°C do 200°C, maksimalno 350°C) zbog mogućih mikrostrukturnih promjena.

Unatoč mnogim istraživanjima, sve mogućnosti primjene izotermički poboljšanog žilavog lijeva još nisu u potpunosti iskorištene. Slika 4.7. prikazuje raspodjelu primjene ADI legura u 2004. godini.



Slika 4.7. Primjena ADI legura po poljima djelatnosti, [1]

## 5. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Kao što je već u prijašnjim poglavljima rečeno, legirni elementi uz parametre toplinske obrade, su najzaslužniji za odgovarajuća mehanička svojstva izotermički poboljšanog žilavog lijeva. Mnogi autori su istraživali utjecaj pojedinih legirnih elemenata na konačna mehanička svojstva izotermički poboljšanog žilavog lijeva i njegovu strukturu. U nastavku prikazan je utjecaj četiriju najutjecajnijih legirnih elemenata: bakra, nikla, molibdena i mangana.

### 5.1. Utjecaj bakra

Bakar kao legirni element onemogućava formiranje karbida u izotermički poboljšanom žilavom lijevu ali ne utječe na difuziju ugljika u austenit niti njegovu stabilnost, [36]. Bakar povećava brzinu transformacije i udio ugljika u matrici za vrijeme austenitizacije te ujedno i povećava austenitnu zonu na faznom dijagramu pretvorbe. Zbog dodatka bakra, reakcija iz drugog stupnja pretvorbe se odgađa a to sprječava pogoršanje mehaničkih svojstava, [45].

Mnogi pokušaji su napravljeni da bi se bolje razumjelo i predvidjelo ponašanje izotermički poboljšanog žilavog lijeva. To podrazumijeva formiranje ausferitne matrice u odnosu na parametre toplinske obrade izotermičkog poboljšavanja što rezultira boljim mehaničkim svojstvima i raznovrsnom primjenom. Kratak opis relevantnih radova iz ovog područja dan je u nastavku.

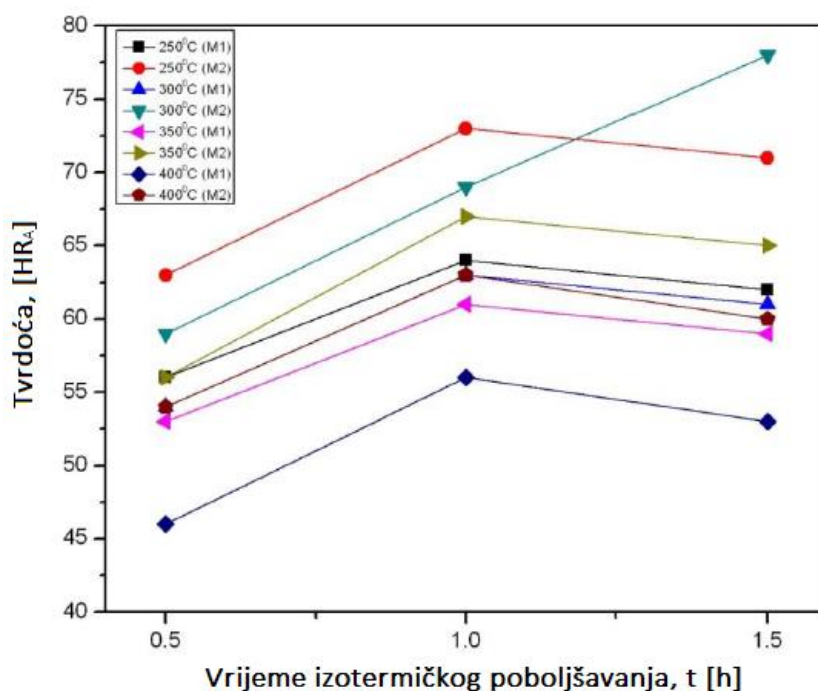
**Behera G.** i **Sohala S. R.** su ispitivali promjenu mehaničkih svojstava dviju legura žilavog lijeva sa različitim udjelima bakra, [3]. Uzorci su podvrgnuti izotermičkom poboljšavanju pri različitim parametrima toplinske obrade dok je kao medij korištena solna kupka sa 50%  $\text{NaNO}_3$  i 50%  $\text{KNO}_3$ . Kemijski sastav obradaka dan je u tablici 5.1.

*Tablica 5.1. Kemijski sastav ispitivanih obradaka žilavog lijeva, [3]*

Obradak	C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Cu [%]	Mg [%]
M1	3,68	2,22	0,16	0,011	0,026	0,02	0,03	0,02	0,003	0,048
M2	3,65	2,20	0,17	0,009	0,022	0,02	0,03	0,02	0,48	0,051

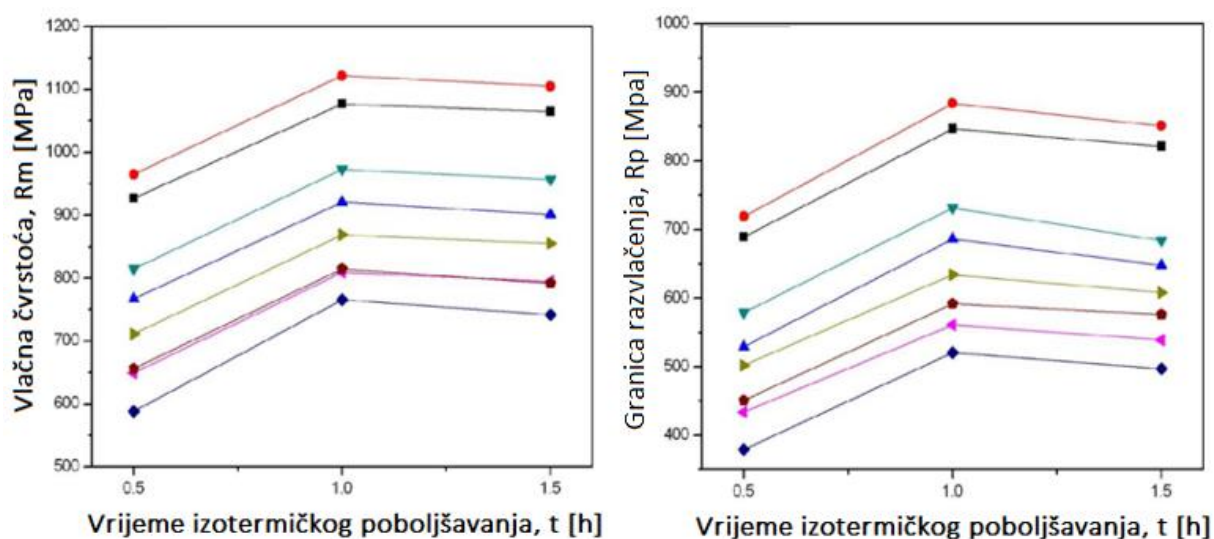
Osim udjela bakra, u svome radu su varirali i parametre toplinske obrade. Temperatura austenitizacije bila je 900°C, vrijeme zadržavanja na temperaturi austenitizacije 1 h, temperature izotermičkog poboljšavanja 250°C, 300°C, 350°C i 400°C a vremena zadržavanja na temperaturi izotermičkog poboljšavanja 0,5 h, 1 h i 1,5 h. Napravili su po 10 obradaka iz svakog odljevka, toplinski ih obradili te ispitivali dobivena mehanička svojstva.

Na slici 5.1. vidljivo je da udio bakra u žilavom lijevu utječe na tvrdoću u odnosu na uzorke bez bakra. Nakon završetka ausferitne pretvorbe, ako se izotermičko poboljšavanje nastavi dulje od 1 h, nastupa transformacija drugog stadija te se zaostali austenit raspada na ferit i karbide. Reakcija dugog stupnja je nepoželjna jer dovodi do pojave krhkosti materijala i pogoršava mehanička svojstva. To rezultira opadanjem tvrdoće, vlačne čvrstoće i granice razvlačenja nakon postignutih maksimalnih vrijednosti.

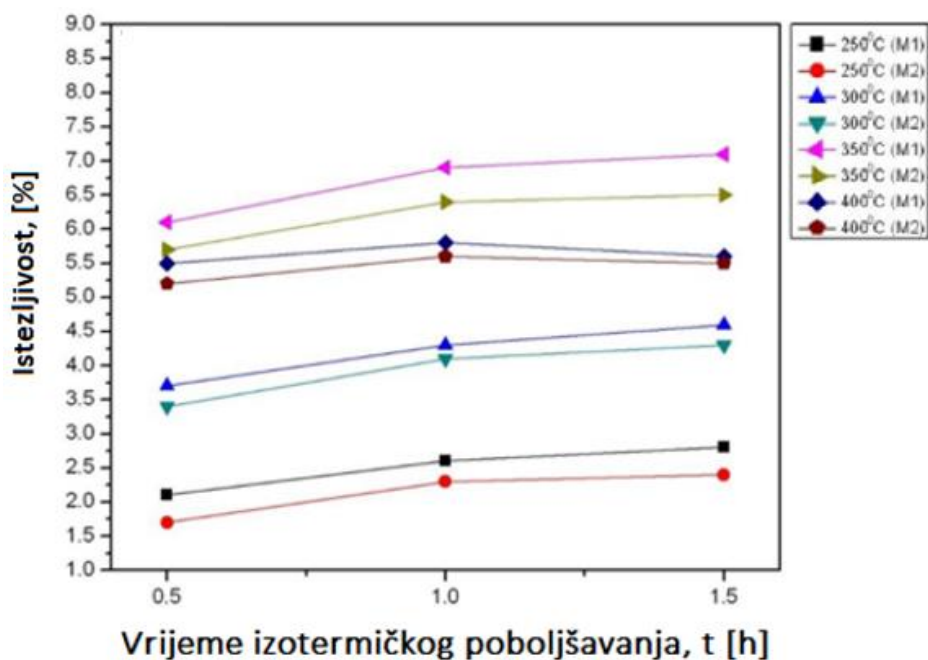


Slika 5.1. Utjecaj udjela bakra i vremena izotermičkog poboljšavanja na tvrdoću, [3]

Slika 5.2. (a) prikazuje promjenu vlačne čvrstoće u odnosu na različita vremena izotermičkog poboljšavanja dok slika 5.2. (b) prikazuje promjenu granice razvlačenja. Također mjerena je i promjena istezljivosti koja je prikazana na slici 5.3. Vidljivo je da je niža duktilnost ADI legura postignuta na nižim izotermičkim temperaturama. To se pripisuje krhkom lomu koji se javlja u matrici kao posljedica prisutnosti martenzita, [3].



Slika 5.2. Utjecaj udjela bakra i vremena izotermičkog poboljšavanja na (a) vlačnu čvrstoću i (b) granicu razvlačenja, [3]



Slika 5.3. Utjecaj udjela bakra i vremena izotermičkog poboljšavanja na istezljivost, [3]

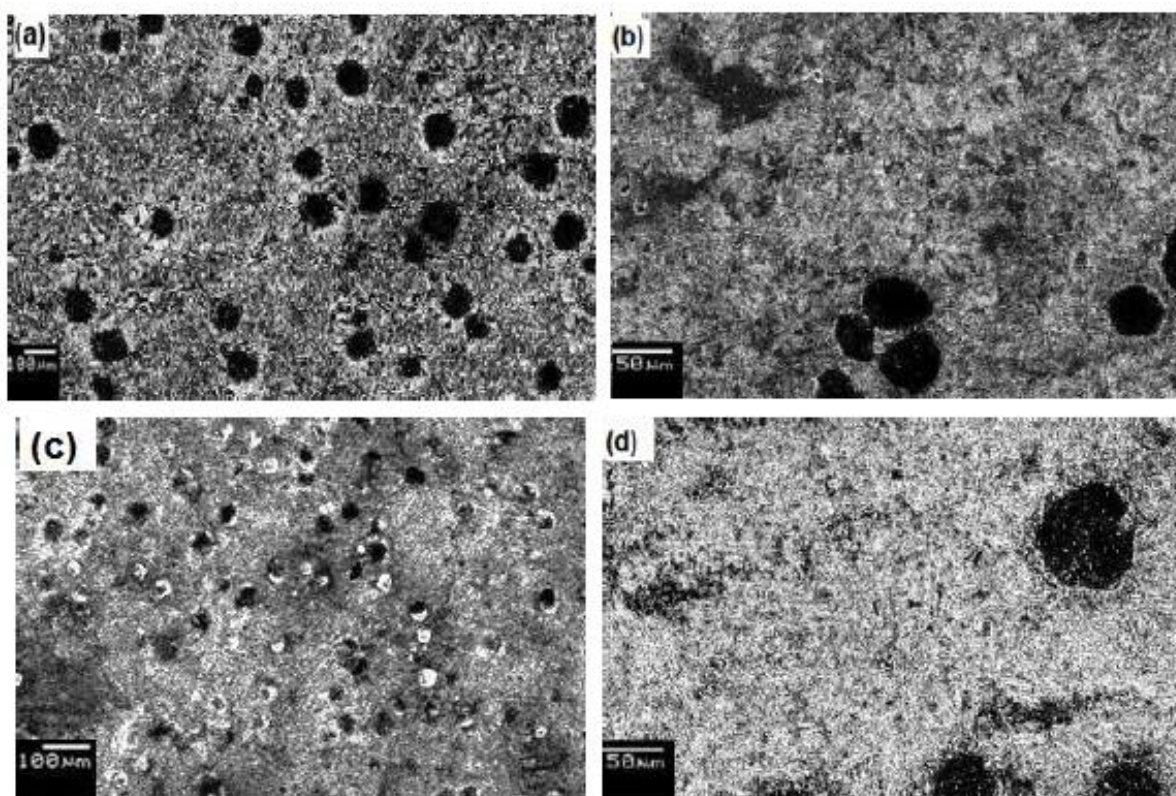
Sharma A., Singh K.K., i Gupta G.K. u svome su radu, [7], izotermički poboljšali dvije legure žilavog lijeva, tablica 5.2., te varirajući parametre toplinske obrade dobili različita mehanička svojstva ADI legura. Svi uzorci su austenitizirani na 950°C te držani na toj temperaturi 2 h. Izotermičko poboljšavanje provedeno je u solnoj kupki kemijskog sastava 40%  $\text{NaNO}_3$  i 60%  $\text{KNO}_3$ , na dvije različite temperature (300°C i 360°C) te dva vremenska perioda, 1 h i 1,5 h.



Tablica 5.2. Kemijski sastav ispitivanih obradaka žilavog lijeva, [7]

Obradak	C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Cu [%]	Mg [%]
1	3,60	2,55	0,25	0,150	-	0,008	0,005	-	0,45	0,107
2	3,67	2,64	0,238	0,150	-	0,072	0,008	-	0,03	0,03

Nakon ispravno provedene toplinske obrade promatrali su dobivenu mikrostrukturu. Na slici 5.4. prikazan je izgled ausferitne strukture za ADI sa 0,45% bakra u svom sastavu i to za različite parametre toplinske obrade.



Slika 5.4. Izotermički poboljšano na (a) 300°C za 1 h, (b) 300°C za 1,5 h, (c) 360°C za 1 h i (d) 360°C za 1,5 h, [7]

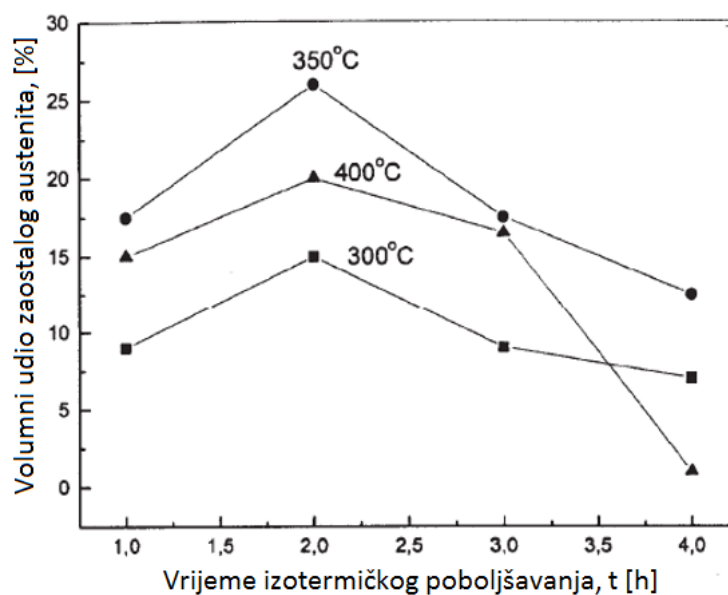
Rezultati provedenih mehaničkih ispitivanja za uzorke sa i bez bakra prikazani su u tablici 5.3.

Tablica 5.3. Mehanička svojstva ispitivanih obradaka ADI legura, [7]

Udio Cu [%]	Izotermička temperatura, T [°C]	Izotermičko vrijeme, t [h]	Vlačna čvrstoća, Rm [MPa]	Udarna radnja loma, KV [J]	Istezljivost [%]	Tvrdoća, [HB]
0,45	300	1	998	28	3,3	308
		1,5	1022	31	3,5	302
	360	1	914	32	5,4	285
		1,5	908	37	5,6	271
0,03	300	1	948	12	4,1	219
		1,5	915	16	4,6	198
	360	1	859	14	6,2	201
		1,5	832	19	6,8	184

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da bakar znatno utječe na promjenu mehaničkih svojstava. Tvrdoća i udarna radnja loma značajno su porasle dok je vlačna čvrstoća malo povećana kod uzorka legiranog sa bakrom. Istezljivost je manja kod uzorka legiranog s bakrom što je i očekivano s obzirom da su, zbog veće količine zaostalog austenita u mikrostrukturi, tvrdoća i čvrstoća porasli. .

**Erić O.**, i suradnici su u svome radu, [45], proučavali utjecaj bakra te bakra i nikla na promjenu mikrostrukture i mehaničkih svojstava ADI legura. Prema njima, dodatkom bakra i nikla odgađa se transformacija zaostalog austenita a što rezultira u pomaku maksimalnog udjela zaostalog austenita na 3 h za razliku od 2 h izotermičkog poboljšavanja kod obradaka legiranih samo sa bakrom. Na ovaj su način pokazali da volumni udio zaostalog austenita znatno utječe na otpornost lomu za obje legure. Kako raste volumni udio zaostalog austenita tako raste i otpornost lomu, slika 5.5.



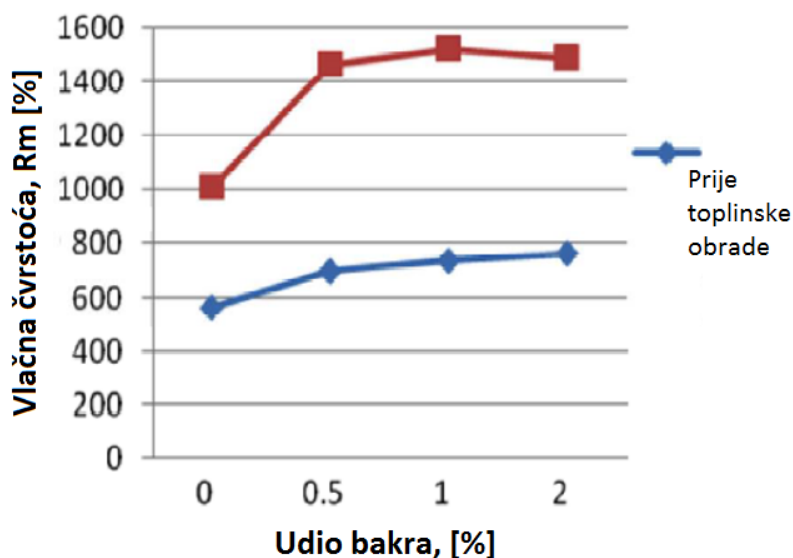
Slika 5.5. Utjecaj vremena i temperature izotermičkog poboljšavanja na volumni udio zaostalog austenita, [45]

Kumar Anil M.M., i Suresh R. su u svome radu, [46], proučavali 3 različita udjela bakra u uzorcima a sve u svrhu dobivanja ADI-a različitih mehaničkih svojstava. Na taj način su bili u mogućnosti ispitati utjecaj bakra na mehanička svojstva ADI legura. Korišteni udjeli bakra su: 0,5%, 1% i 2% te je četvrti obradak bio bez bakra. Svi uzorci su podvrgnuti istim parametrima toplinske obrade te gašeni u ulju (Servo Max 4T). Rezultati vlačne čvrstoće su dani u tablici 5.4. a usporedba vlačne čvrstoće prije i poslije toplinske obrade prikazana je na slici 5.6.

Tablica 5.4. Utjecaj bakra na vlačnu čvrstoću ADI-a, [46]

Udio Cu [%]	Vlačna čvrstoća, Rm [MPa]			
	0%	0,5%	1%	2%
Prije toplinske obrade	561,5	696,1	734,3	762,2
Poslije toplinske obrade	1009,4	1468,1	1523,6	1491,2





Slika 5.6. Vlačna čvrstoća prije i poslije toplinske obrade, [46]

Iz tablice 5.4. i slike 5.6. vidljivo je da bakar utječe na čvrstoću izotermički poboljšanog žilavog lijeva. Razlog tome je usitnjavanje zrna nakon dodatka bakra. Kada je žilavi lijev sa većim udjelom bakra podvrgnut izotermičkom poboljšavanju, pojava ausferita uokolo grafitnih kuglica znatno povećava vlačnu čvrstoću. Međutim, vidljivo je da udio bakra mora biti ograničen na 1% jer sa dodatnim povećanjem udjela bakra, opada udio zaostalog austenita, formiraju se karbidi te se narušavaju mehanička svojstva.

Iz svega navedenoga vidljivo je da ADI bez udjela bakra ima veću tvrdoću od ADI legiranog sa bakrom na nižim temperaturama izotermičkog poboljšavanja. Međutim, na višim temperaturama, npr. 320°C, tvrdoća opada. Niže izotermičke temperature daju finiju strukturu a samim time i veću tvrdoću. Osim obogaćivanja bakrom, nema vidljive razlike u mikrostrukturi nelegiranog i legiranog ADI-a koja bi mogla objasniti značajnu promjenu u tvrdoći, [47]. Evidentno je da je potrebno bolje razumijevanje utjecaja bakra na ovaj materijal. Moguće je da su različiti parametri toplinske obrade potrebni ne bi li se postigla optimalna mehanička svojstva izotermički poboljšanog žilavog lijeva.

## 5.2. Utjecaj nikla

Za razliku od bakra, utjecaj nikla na mikrostrukturu i svojstva ADI legura nije ispitivan. Nikal se često dodaje kao legirni element i ima utjecaj na konačna mehanička svojstva žilavog lijeva ali uvijek u kombinaciji sa drugim legirnim elementima kao što su bakar, molibden i mangan. Nekoliko radova je napravljeno u svrhu ispitivanja mehaničkih svojstava i mikrostrukture ADI legura sa i bez nikla u svom kemijskom sastavu, [29, 48 - 53].

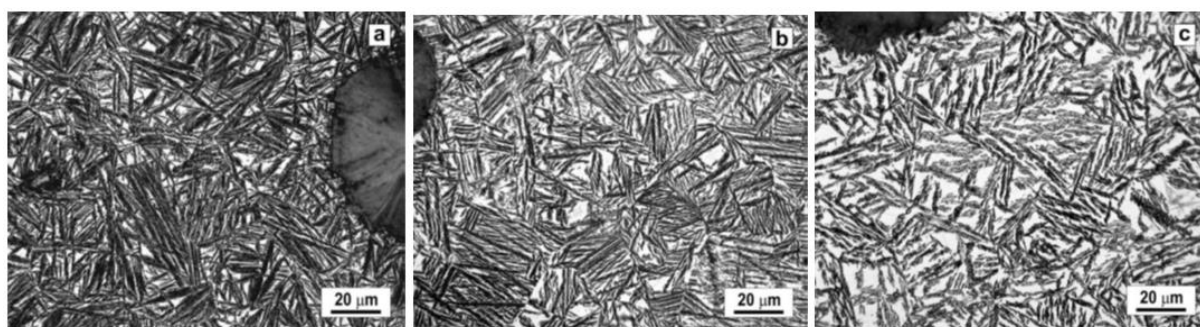
U radovima gdje se nikal pojavljuje kao legirni element, uz prisutnost drugih legirnih elemenata, njegov količinski udio se najčešće kreće oko 0,6% i 1,5%. Također, mehanička svojstva ADI legura legiranih s bakrom i niklom uspoređuju se sa legurama legiranim samo s bakrom, [29, 48, 51, 53]. U komercijalnoj praksi, do 2% nikla i 1,5% bakra koristi se sa proizvodnju ADI legura visoke čvrstoće sa relativno visokom tvrdoćom i duktilnošću.

Poznato je da su mehanička svojstva posljedica dobivene mikrostrukture nakon toplinske obrade tako da je za početak najbolje usporediti morfologiju ADI legura koje u sebi imaju nikal i one koje ga nemaju. I bakar i nikal imaju plošno centriranu kubnu rešetku te su dobro rastvorivi u austenitu. U radu **Rajnovica i suradnika**, [29], vidljiv je utjecaj izotermičke temperature na ausferitnu mikrostrukturu ADI legura legiranih sa bakrom i niklom te je ta mikrostruktura slična onoj kod ADI legura legiranih samo sa bakrom, slika 5.7. Kemijski sastav ispitivanih obradaka dan je u tablici 5.5.

*Tablica 5.5. Kemijski sastav ispitivanih obradaka žilavog lijeva, [29]*

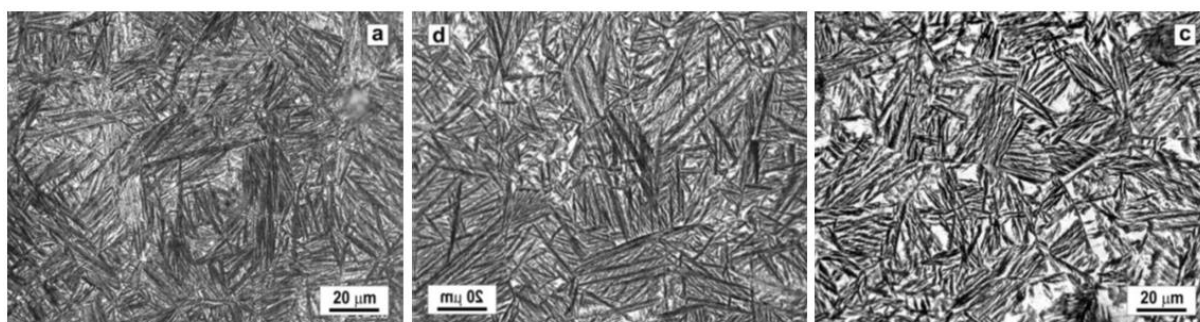
Obradak	C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Cu [%]	Mg [%]
Cu	3,64	2,49	0,30	0,014	0,014	0,008	-	-	0,46	0,066
Cu + Ni	3,48	2,19	0,26	0,012	0,020	0,072	1,51	-	1,57	0,060

Povećanje izotermičke temperature mijenja igličastu morfologiju ausferita na 300°C, slika 5.7. (a), u pločasti izgled na 350°C, slika 5.7. (b), i konačno do grube ausferitne morfologije na 400°C, slika 5.7. (c).



Slika 5.7. Utjecaj izotermičke temperature na mikrostrukturu ADI-a legiranog bakrom i niklom: (a) 300°C na 3 h – igličasti ausferit, (b) 350°C na 3 h – pločasti ausferit, (c) 400°C na 3 h – grubi pločasti ausferit, [29]

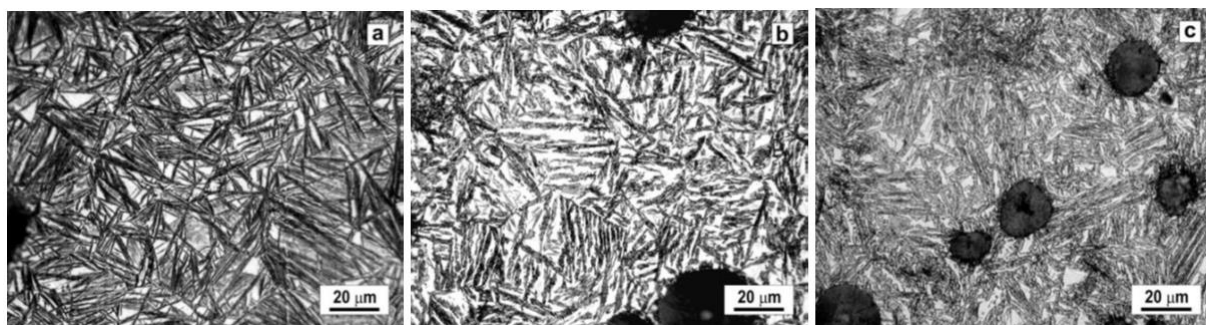
Međutim, ako se mikrostruktura ADI-a legiranog s bakrom i niklom usporedi s mikrostrukturuom ADI-a legiranog samo s bakrom, slika 5.8., vidljivo je da na istoj izotermičkoj temperaturi ADI s bakrom i niklom ima kraće, šire i razdvojenije ausferitne pločice nego ADI legiran samo s bakrom, [29].



Slika 5.8. Utjecaj izotermičke temperature na mikrostrukturu ADI-a legiranog s bakrom: (a) 300°C na 2 h – fine iglice igličastog ausferita, (b) 350°C na 2 h – igličasti ausferit, (c) 400°C na 2 h – pločasti ausferit, [29]

Evidentno je da je ova promjena u morfologiji odraz utjecaja legiranih elemenata. Sinergijski utjecaj bakra i nikla se manifestira onemogućavanjem nukleacije feritnih pločica, [37], i u snižavanju temperature izotermičke transformacije, [32, 54]. Nadalje, legiranje ADI-a s bakrom i niklom, odgađa transformacijsku kinetiku austenita, [31, 55], pomičući maksimalni udio zaostalog austenita na duža vremena, [48].

Osim izotermičke temperature, i vrijeme zadržavanja na izotermičkoj temperaturi ima značajan utjecaj na morfologiju ADI legura. U slučaju ADI-a legiranog s bakrom i niklom, vrijeme zadržavanja ima veći utjecaj na ausferitnu morfologiju nego što je slučaj kod ADI-a legiranog samo s bakrom. Razlog tome je što bakar i nikal potiču difuziju ugljika tijekom dužeg perioda pa s time stvaraju pločasti izgled ausferita, slika 5.9., [29].



Slika 5.9. Utjecaj vremena izotermičke pretvorbe na mikrostrukturu ADI-a legiranog s bakrom i niklom: (a) 350°C na 1 h – igličasti ausferit, (b) 350°C na 6 h – pločasti ausferit, (c) 400°C na 6 h – početak raspada ugljikom obogaćenog ausferita na ferit i karbide (bainit), [29]

Uspoređujući mehanička svojstva, i vlačna čvrstoća i granica razvlačenja imaju slične vrijednosti za ADI legure s bakrom i niklom kao i one ADI legure samo s bakrom. Niže izotermičke temperature daju veće vrijednosti čvrstoće, dok čvrstoća opada s povećanjem izotermičke temperature. Za razliku od temperature, vrijeme zadržavanja na izotermičkoj temperaturi (u intervalu od 1 h do 6 h) nema značajniji utjecaj na čvrstoću, [29]. Iz navedenoga se može zaključiti da ausferitna morfologija, koja se mijenja s izotermičkom temperaturom, ima primarni utjecaj na čvrstoću, dok udio zaostalog austenita (koji se mijenja sa izotermičkom temperaturom i vremenom) nema snažan utjecaj. Veća čvrstoća povezana je s finim igličastim ausferitom koji se stvara na nižim temperaturama izotermičkog poboljšavanja, dok je manjoj čvrstoći uzrok gruba pločasta morfologija. Kao što je ranije zaključeno, dodavanjem legiranih elemenata utječe se na morfologiju ausferita a samim time i na mehanička svojstva ADI legura. Bakar i nikal smanjuju temperaturu izotermičke pretvorbe, omogućavajući stvaranje pločaste morfologije ausferita a time i ADI legure manje čvrstoće u odnosu na ADI legure legirane samo sa bakrom.

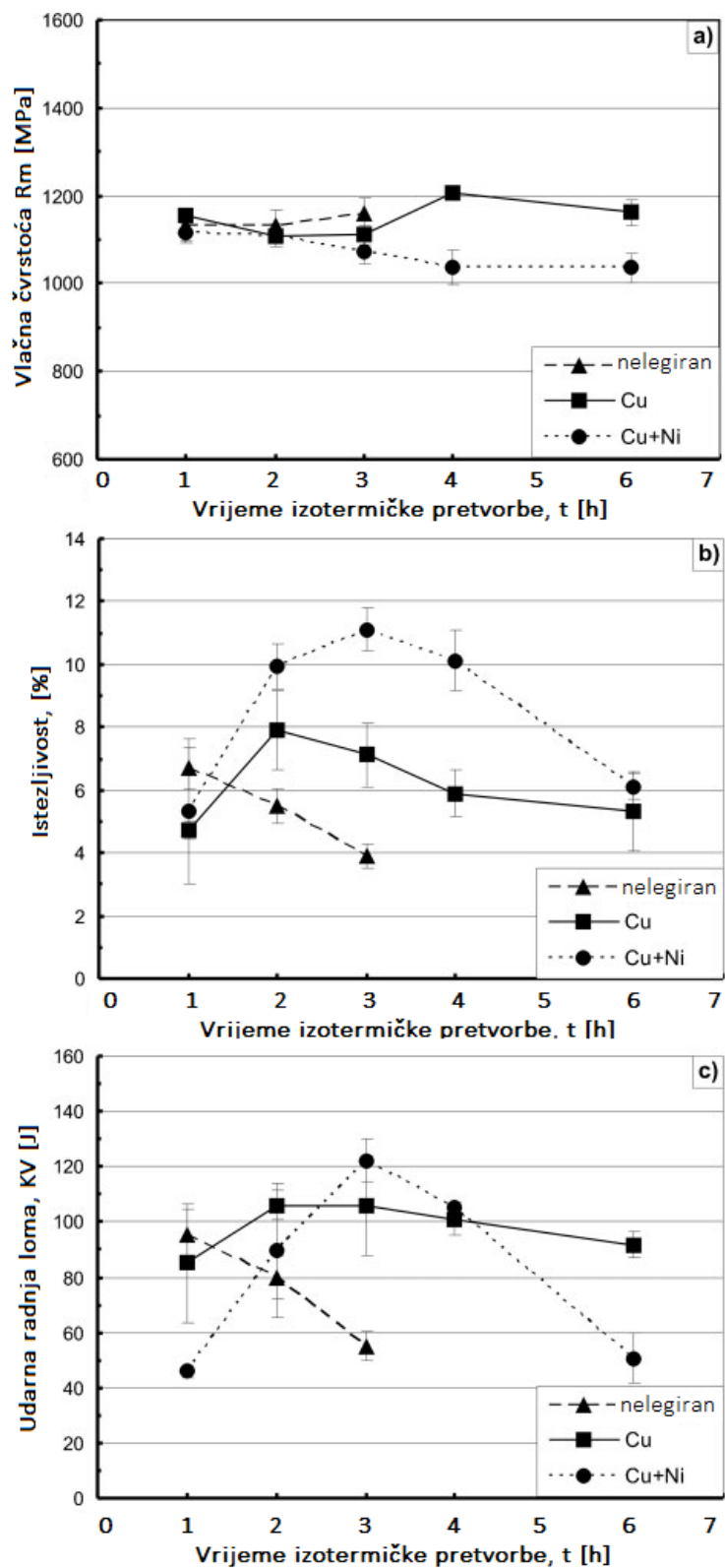
S povećanjem udjela zaostalog austenita, istezljivost i udarna radnja loma se također povećavaju do svog maksimuma. Nakon toga, s opadanjem udjela zaostalog austenita opadaju i istezljivost i udarna radnja loma. Najniže vrijednosti tvrdoće povezane su s maksimalnim udjelom zaostalog austenita, i obrnuto. Na kraćim vremenima izotermičke pretvorbe, martenzit se može pojaviti u mikrostrukтури, [45], dok se na dužim vremenima stvaraju karbidi, [28].

Također postoji razlika u načinu loma ADI-a legiranog sa bakrom i niklom za razliku od ADI-a legiranog samo sa bakrom. ADI legiran sa bakrom i niklom iskazuje veću duktilnost (istezljivost i udarnu radnju loma) i veći udio zaostalog austenita, [29]. Prema normama EN 1564:2001/A1:2008 i ASTM A897M-16, ADI-i legirani sa bakrom i niklom imaju veću duktilnost, ali manju čvrstoću. Osim toga i vremenski prozor je u tom slučaju širi. ADI legiran samo sa bakrom ima uži vremenski prozor i standardni razredi nude veće čvrstoće a manju duktilnost.

Sve navedeno su u svome radu, [48], potvrdili **Sidjanin** i **suradnici** prilikom usporedbe ADI legura sa bakrom te legura sa bakrom i niklom. Kemijski sastav obradaka dan je u tablici 5.6. Temperatura izotermičkog poboljšavanja fiksirana je na 350°C ali vremena zadržavanja varirana su od 1 h do 6 h. Sa dužim vremenima, 1 h, 2 h i 3 h, za nelegirani ADI te ADI legiran sa bakrom kao bakrom i niklom, martenzit nestaje iz mikrostrukture dok se udio zaostalog i stabilnog austenita povećava što rezultira maksimalnim vrijednostima istezljivosti i udarne radnje loma te u potpunosti žilavim lomom. Konačna mehanička svojstva se mijenjaju u ovisnosti o vremenima izotermičke pretvorbe i prikazana su na slici 5.10.

Tablica 5.6. Kemijski sastav ispitivanih obradaka žilavog lijeva, [48]

Obradak	C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Cu [%]	Mg [%]
Nelegiran	3,80	2,90	0,08	0,006	0,020	-	-	-	-	0,032
Cu	3,60	2,50	0,28	0,014	0,014	-	-	-	0,47	0,066
Cu + Ni	3,07	2,15	0,26	0,010	0,020	-	1,50	-	1,60	0,043



Slika 5.10. Mehanička svojstva nelegiranog i legiranog ADI-a u ovisnosti o temperaturi izotermičke pretvorbe, [48].



Povećanje duktilnosti sa povećanjem udjela zaostalog austenita na nižim ispitivanim temperaturama ADI legura potvrđeno je i od strane **Radulovica** i **suradnika**, [56]. Također, **Bošnjak** i **suradnici**, [57], te **Rao** i **Putatunda**, [52], pokazali su da ugađivanje ausferitne mikrostrukture, tj. formiranje finih iglica ferita s austenitnim slojevima između ferita, potiče daljnji porast duktilnosti ADI legura, naročito u slučaju kada je volumni udio zaostalog austenita manji od 25%.

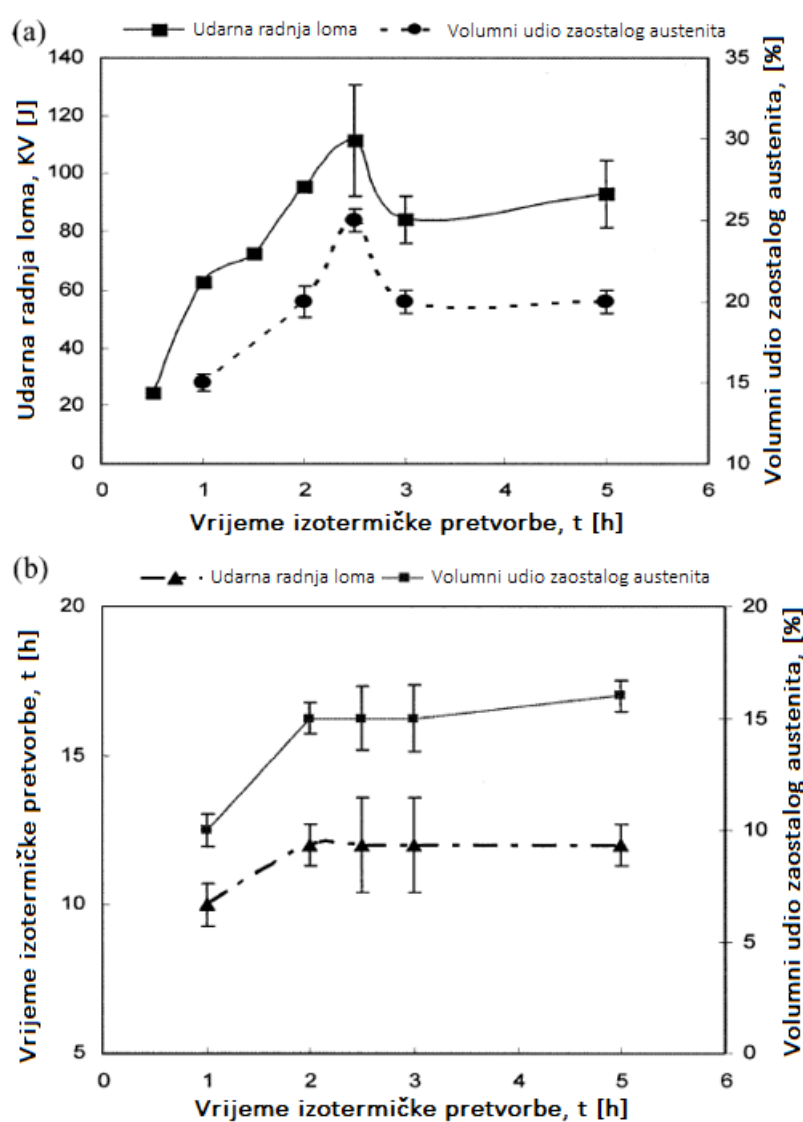
### 5.3. Utjecaj molibdena

Iako je molibden jedan od često korištenih legirnih elemenata kod žilavog lijeva, njegov utjecaj na konačna svojstva ADI legura nije proučavan. Nekoliko istraživanja je provedeno na legurama sa molibdenom u njihovom kemijskom sastavu, [39, 56 - 59], međutim njegov utjecaj nije temeljito istražen. Da bi se približno razumio utjecaj molibdena na mehanička svojstva ADI-a, potrebno je usporediti mehanička svojstva legura sa različitim postotkom molibdena u kemijskom sastavu.

**Erić O.** i **suradnici** su u svome radu, [39], ispitivali tri uzorka žilavog lijeva skoro identičnog kemijskog sastava s malim odstupanjima u udjelu molibdena, tablica 5.7. Iz navedenih obradaka dobili su ADI legure koristeći različite temperature izotermičke pretvorbe (320°C i 400°C) i različita vremena zadržavanja na izotermičkoj temperaturi (0,5 h, 1 h, 2 h, 2,5 h, 3 h i 5 h). Svi uzorci su prvo bili austenitizirani na 860°C na 1 h, u zaštitnoj atmosferi argona. Dobiveni rezultati, koji predstavljaju prosječnu vrijednost nakon 5 ispitivanja, pokazuju da je žilavost za uzorke izotermički poboljšane na 320°C dosegla maksimum od 115 J nakon 2,5 h izotermičkog poboljšavanja. Maksimalna udarna radnja loma odgovara žilavom lomu. Volumni udio zaostalog austenita na toj temperaturi također je najveći (25%). S dužim vremenom izotermičke pretvorbe žilavost opada do vrijednosti između 85 J i 90 J. S druge strane, uzorci izotermički poboljšani na 400°C imaju manju udarnu radnju loma, između 10 J i 12 J, za vremena izotermičke pretvorbe od 0,5 h do 5 h. Rezultati su prikazani na slici 5.11.

Tablica 5.7. Kemijski sastav ispitivanih obradaka žilavog lijeva, [39]

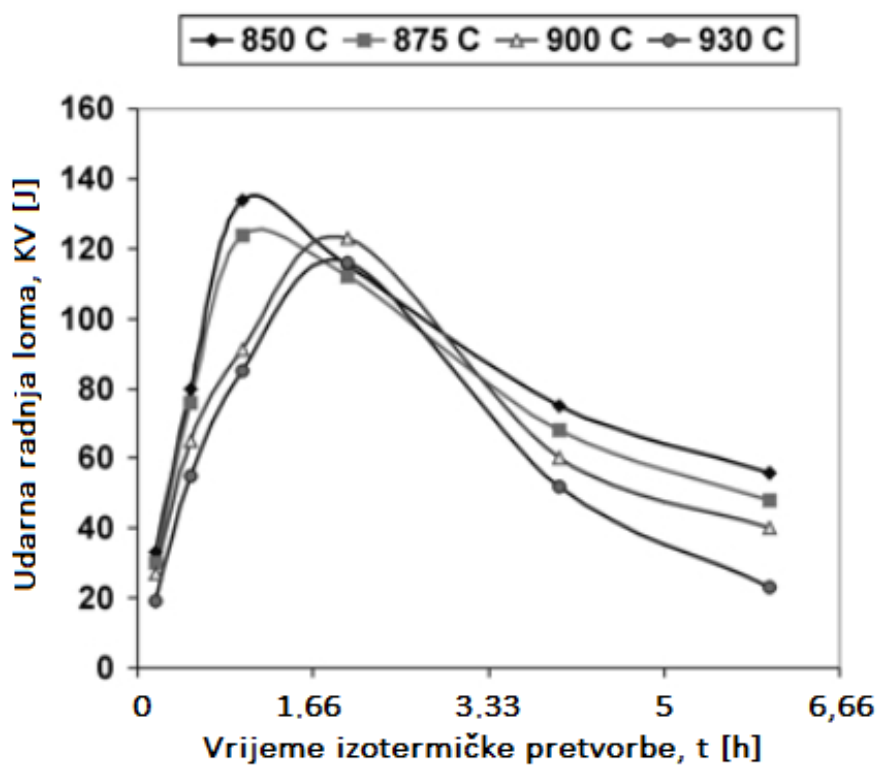
Obradak	C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Cu [%]	Mg [%]	B [%]	W [%]	Al [%]
1.	3,50	2,50	0,30	0,008	0,042	0,05	0,95	0,296	0,80	0,047	0,0004	0,039	0,03
2.	3,52	2,60	0,31	0,008	0,041	0,05	0,95	0,278	0,80	0,048	0,0004	0,039	0,03
3.	3,50	2,50	0,30	0,008	0,042	0,05	0,95	0,299	0,80	0,072	0,0004	0,039	0,03



Slika 5.11. Utjecaj vremena izotermičke pretvorbe na udarnu radnju loma i volumni udio zaostalog austenita ADI legura izotermički poboljšanih na 320°C (a) i 400°C (b), [39]

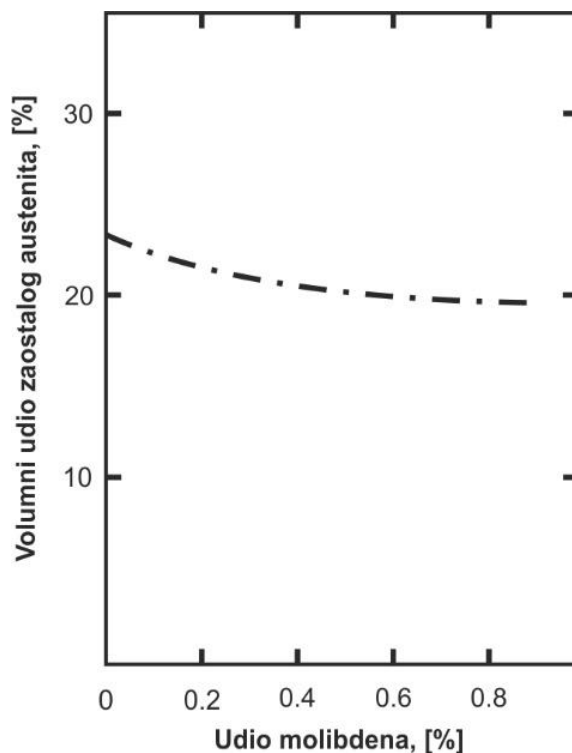


Žilavost ADI legura sa 0,25% molibdena u kemijskom sastavu značajno varira kada se izotermički poboljšaju na različitim temperaturama i na različitim vremenima držanja, [56]. Kao što je i vidljivo na slici 5.12. niže izotermičke temperature i kraća izotermička vremena rezultiraju sa većom udarnom radnjom loma. Pad udarne radnje loma za uzorke austenitizirane na 930°C može biti posljedica smanjivanja udjela ugljika u austenitu nakon precipitacije karbida, što može biti povezano sa udjelom molibdena u kemijskom sastavu. Također, teško postizanje visoke duktilnosti kod ADI legura legiranih sa molibden može biti povezano sa transformacijom zaostalog austenita u martenzit kada se obradak hladi do sobne temperature, [57].



Slika 5.12. Promjena udarne radnje loma ovisno o vremenu izotermičke pretvorbe nakon austenitizacije na 850°C, 875°C, 900°C i 930°C za 2 h, [56]

Za razliku od bakra, atomi molibdena segregiraju po granicama zrna i tamo formiraju karbide. Karbidi koji sadržavaju molibden se teško mogu rastvoriti u procesu izotermičke pretvorbe, stoga nakon izotermičke pretvorbe mikrostruktura austenitne matrice nije jednolika i udio ugljika u matrici može biti manji kod obradaka sa većim sadržajem molibdena, [58]. Slika 5.13. prikazuje da volumni udio zaostalog austenita konstantno opada kako udio molibdena raste.



Slika 5.13. Volumni udio zaostalog austenita u ovisnosti o udjelu Mo kod ADI legura, [58]

Uspoređujući sve navedene rezultate sa rezultatima drugih ispitivanja u kojima je korišten ADI bez molibdena vidljivo je da uzorci sa molibdenom imaju manji volumni udio zaostalog austenita i nižu žilavost od onih obradaka sa molibdenom u svom kemijskom sastavu.

#### 5.4. Utjecaj mangana

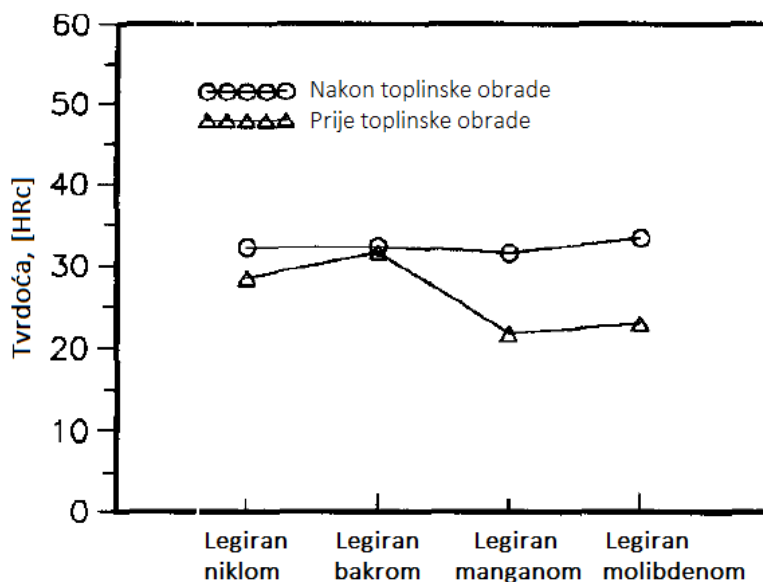
Slično kao i kod molibdena, utjecaj mangana na konačna svojstva ADI legura nije temeljito ispitan. Iako se mangan često nalazi u kemijskom sastavu žilavog lijeva, njegov pojedinačni utjecaj nije utvrđen. Nekoliko radova je napravljeno na žilavim ljevovima s manganom u kemijskom sastavu, [60, 61, 62], tako da se ipak neki zaključci mogu izvesti iz postignutih rezultata. U većini radova, sastavi legura baziraju se na tradicionalnom konceptu niskog udjela mangana jer mangan ima snažnu tendenciju segregacije u područjima između zrna te odgađa prvi stupanj transformacije a samim time zatvara vremenski prozor namijenjen dobivanju ausferitne mikrostrukture i optimalnih mehaničkih svojstava, [62].

Yin B.Y. i suradnici su u svome radu, [60], proučavali četiri uzorka žilavog lijeva različitih kemijskih sastava, tablica 5.8.

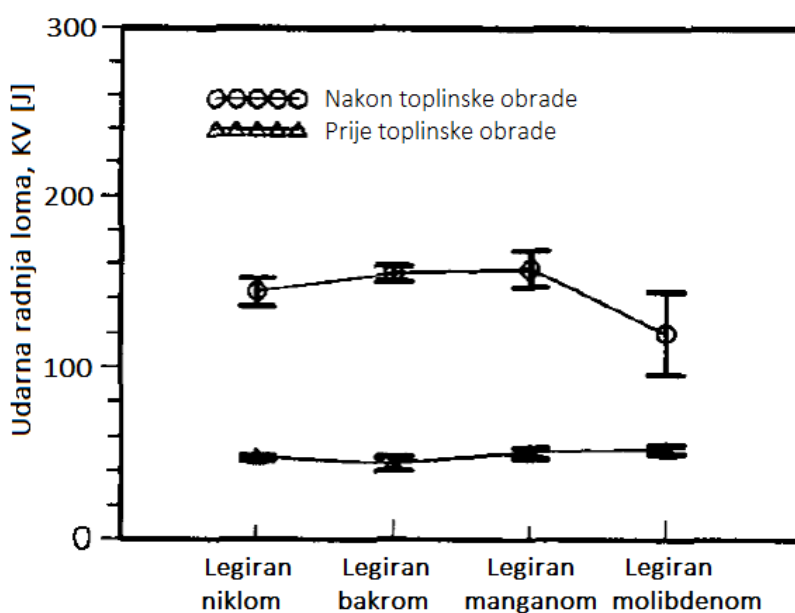
Tablica 5.8. Kemijski sastav ispitivanih obradaka žilavog lijeva, [60]

Obradak	C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Cu [%]	Mg [%]
1.	3,68	2,52	0,29	0,01	0,03	-	1,36	-	-	0,02
2.	3,56	2,46	0,24	0,01	0,03	-	-	-	0,86	0,03
3.	3,73	2,46	0,47	0,01	0,03	-	-	-	-	0,04
4.	3,53	2,53	0,25	0,02	0,04	-	-	0,35	-	0,03

Svi uzorci podvrgnuti su istoj toplinskoj obradi, austenitizirani na 900°C za 1 h a zatim izotermički poboljšani na 400°C za 0,83 h (50 min). Za svaki obradak ispitana je udarna radnja loma i tvrdoća. Slike 5.14. i 5.15. prikazuju promjenu tvrdoće po *Rockwell* metodi i udarnu radnju loma za navedene parametre toplinske obrade obradaka legiranih sa manganom, bakrom, niklom i molibdenom. Iz dobivenih rezultata tvrdoća, čini se da ona značajno ne varira za pojedini obradak, te su blago povećane u odnosu na početno stanje obradaka prije toplinske obrade. Što se tiče udarne radnje loma, vidljivo je da je ona trostruko veća za toplinski obrađene uzorke u odnosu na uzorke prije toplinske obrade. Svi dobiveni rezultati se mogu objasniti sa visokom temperaturom izotermičke pretvorbe, 400°C, koja rezultira niskom tvrdoćom i čvrstoćom ali visokom duktilnošću i udarnom radnjom loma ADI legura.



Slika 5.14. Utjecaj nikla, bakra, mangana i molibdena na tvrdoću ADI legura, [60]



Slika 5.15. Utjecaj nikla bakra, mangana i molibdena na udarnu radnju loma ADI legura, [60]

Mehanička svojstva tih četiriju obradaka su direktno vezana za njihovu mikrostrukturu. Uzorci legirani sa niklom, bakrom i manganom imaju homogenu matricu, tako da nema značajne razlike udarne radnje lome između tih obradaka. Molibden, sa izuzetnom tendencijom segregacije po granicama zrna, usporava bejnitnu reakciju te izaziva mikro skupljanje i poroznosti u tim područjima a što dovodi do najniže vrijednosti udarne radnje loma od sva četiri uzorka.

Uspoređujući rezultate radova u kojima su korišteni uzorci sa manganom prema onim u uzorcima bez mangana, može se zaključiti da mangan povećava tvrdoću ali smanjuje istezljivost i duktilnost. Kod obradaka žilavog lijeva legiranog s bakrom i manganom, rezultati pokazuju odsustvo uobičajene segregacije mangana. To se može objasniti s obrnutim segregacijskim ponašanjem bakra i mangana, [61, 62]. Bakar se ponaša kao i silicij te segregira prema grafitnim kuglicama, dok mangan segregira po granicama zrna. Kada je žilavi lijev legiran s bakrom i manganom u jednakim omjerima, izgledno je da segregacija bakra poništava segregaciju mangana. Osim toga, veći udio mangana (sve do 1,00%) snižava temperaturu transformacije eutektoida, [62].

## 6. ZAKLJUČAK

Izotermički poboljšani žilavi ljevi prema žilavom lijevu prije toplinske obrade ima veću udarnu radnju loma te su linije transformacija pomaknute prema nižim temperaturama. ADI legure s nižom ausferitnom mikrostrukturom pokazuju bolju otpornost lomu od legura s višom ausferitnom mikrostrukturom. Optimalna izotermička temperatura, za maksimalnu otpornost lomu, opada s povećanjem temperature austenitizacije. Čvrstoća, istezljivost, udarna radnja loma i tvrdoća su direktno povezani s količinom ausferita kao i njegovom morfologijom. Na morfologiju utječu legirni elementi, stoga je povezanost između mehaničkih svojstava i parametara izotermičkog poboljšavanja jako kompleksna i specifična za svaku pojedinu ADI leguru.

Legiranje žilavog lijeva s bakrom i niklom daje ADI legure veće duktilnosti, dok legiranje samo s bakrom daje čvršće legure. Vremenski prozor za ADI legure legirane sa bakrom i niklom jest nešto veći od vremenskog prozora za ADI legure legirane samo s bakrom. Iz prikazanih istraživanja vidljivo je da se udio zaostalog austenita povećava sa udjelom bakra ali se smanjuje sa udjelom molibdena. Kada se to dogodi žilavi lom prelazi u krhki lom.

Dodatci bakra i molibdena igraju važnu ulogu u formaciji ausferitne strukture kao i u poboljšavanju mehaničkih svojstava kao što su vlačna čvrstoća i tvrdoća. Udio mangana je uobičajeno ograničen na 0,25% zbog njegove tendencije da segregira po granicama zrna. Međutim, potentna interakcija legirnih elemenata sugerira da mali udjeli više različitih legirnih elemenata su učinkovitiji u poboljšavanju izotermičke obrade nego velike količine samo jednog legirnog elementa. Važno je napomenuti da su mehanička svojstva ADI legura jedino ostvariva kroz adekvatnu mikrostrukturu, koja je posljedica kemijskog sastava žilavog lijeva i parametara toplinske obrade koja mora biti pažljivo kontrolirana.

Na kraju treba naglasiti da u svim navedenim radovima postoje očite razlike u kemijskim sastavima korištenih obradaka kao i razlike u parametrima toplinske obrade. Kemijski sastav je neujednačen izuzev samo jednog legirnog elementa. Isto tako nisu mijenjani svi parametri toplinske obrade kako bi se mogao odrediti utjecaj svakog pojedinog parametra.

Budući radovi bi trebali biti orijentirani ka optimizaciji procesa izotermičkog poboljšavanja za svaki pojedini legirni element što bi u konačnici rezultiralo dobivanjem matematičkog modela koji će moći opisati promjenu mehaničkih svojstava legure za različite udjele pojedinog legirnog elementa a u vezi s ostalim parametrima toplinske obrade.

## LITERATURA

- [1] Gagne, M., „The Sorelmetal Book of Ductile Iron“, Rio Tinto Iron & Titanium, Montreal, Kanada, 2004.
- [2] Žmak I. : „Modeliranje strukture i svojstava žilavog lijeva neuronskim mrežama“, doktorski rad, FSB, Zagreb, 2008.
- [3] Behera G., Sohala S. R., Effect of copper on the properties of austempered ductile iron castings. Bachelor thesis. Department of Metallurgical and Materials Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, India, (2012).
- [4] Sidjanin L., Smallman R. E., Mater. Sci. Tech. – Lond., 8, pp. 1095, (1992).
- [5] Elliot R., Heat Treatments of Metals. 3, pp. 55, (1997).
- [6] Chandler H., Heat treaters guide: practices and procedures for irons and steels. ASTM International, 2 Sub edition (December 1995).
- [7] Sharma A., Singh K.K., Gupta G.K., “Study on the Effects of Austempering Variables and Copper Addition on Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron“, AIMTDR, India, 2016.
- [8] Gabrić I., Šitić S.: „Materijali I“, Sveučilišni odjel za stručne studije, Sveučilište u Splitu, Split, rujan 2012.
- [9] Stupnišek M., Cajner F.: „Osnove toplinske obradbe metala“, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2001.
- [10] “The Fatigue Life of Cast Surface of Malleable and Nodular Iron“, Bulletin 177, Metals Research and Development Foundation.
- [11] D.L. Sponseller, W.G. Scholz, and D.F. Rundle, “Development of Low-Alloy Ductile Irons for Service at 1200-1500 F”, AFS Trans., Vol 76, 1968, 353-368.

- [12] Kerekeš I., „Osnovi livarstva“, Viša tehnička škola u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 1997.
- [13] Guerin L., Gagne M., „Effects of Mn, Cu and Sn on microstructure and properties of ductile iron castings“, *The foundryman*, 80 (1987), 8/9, 336-344.
- [14] ASM Metals Handbook Volume 04 – Heat Treatment, “Heat Treating of Ductile Irons”, p. 1498.
- [15] Ductile iron, <http://www.rastgar.com/rec/papers/paper-2.pdf>.
- [16] HRN EN ISO 945:2002 – Hrvatska norma: Željezni lijev – Označavanje mikrostrukture grafita.
- [17] Metals Handbook, Ninth edition, Vol. 15, Casting, ASM International, Metals Park, Ohio, SAD, 1988.
- [18] Karbić L., „Metode proizvodnje žilavog lijeva“, Ljevaonica i tvornica armatura Varaždin, Varaždin, 1973.
- [19] ASTM A439 – 83 (2004) Standard Specification for Austenitic Ductile Iron Castings.
- [20] Nodular Iron, <http://www.metallography.com/zechnotes/iron/nodular.htm>.
- [21] Ljevarstvo – Nodularni ljevovi (EN 1563:1997+A1:2002).
- [22] Ljevarstvo – Sustav označavanja željeznih ljevova – Simboli i brojevi materijala (EN 1560:1997).
- [23] Sahoo S. K., „A study on the effect of austempering temperature, time and copper addition on the mechanical properties of austempered ductile iron“, magistarski rad, NIT, Rourkela, 2012.
- [24] Dubal G. P., „Salt bath Quenching“, *Advanced Materials & Processes*, Birmingham, December 1991.
- [25] Hef Durferrit, <http://www.hefdurferrit.de/en/>.
- [26] Živković D., Gabrić I., Dadić Z., Čatipović N., Vrljičak I., “Analysis of austempering treatment parameters on properties of ductile iron EN-GJS-400”, *Zbornik radova = Proceedings*, Hrvatsko društvo za strojarske tehnologije, MTSM 2015, Split, 2015.
- [27] Harding R. A., *Kovove Mater.*, 45, p. 1, 2007.

- 
- [28] Sidjanin L., Smallman R. E., Young J. M., *Acta Mater.*, 42, pp. 3149, (1994).  
doi:10.1016/0956-7151(94)90412-X
- [29] Rajnovic D., Eric O., Sidjanin L., The standard processing window of alloyed ADI materials. *Kovove Mater.*, 50, pp. 199-208, (2012).
- [30] Thomson R. C., *Mater. Sci. Tech. – Lond.*, 16, pp. 1412, (2000).
- [31] Bayati H., Elliott R., *Mater. Sci. Forum*, 329, pp. 73, (2000).  
doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.329-330.73
- [32] Zahiri S. H., Davies C. H. J., Pereloma E. V., *Mater. Sci. Tech. – Lond.*, pp. 1761, (2003).
- [33] Eric O., Rajnovic D., Zec S., Sidjanin L., Jovanovic M. T., *Mater. Charact.*, 57, pp. 211, (2006). doi: 10.1016/j.matchar.2006.01.014
- [34] Bayati H., Elliott R., *Int. J. Cast Metal Res.*, 11, pp. 413, (1999).
- [35] Dorn T., Keough J. R., Schroeder T., Thoma T., In: *Proceedings of the Keith D. Millis Symposium*. Ed.: Wood J. N., Hilton Head, South Carolina, USA, Ductile Iron Society and AFS, pp 1. (2003). doi: 10.1016/j.msea.2004.04.076
- [36] Bartra U., Ray S., Prabhakar S. R., *J. Mater. Eng. Perform.*, 13, pp. 64-68, (2004).  
doi:10.1361/10599490417515
- [37] Chang C. H., Shih T. S., *Trans. Jpn. Foundrymen Soc.*, 13, pp. 56, (1994).
- [38] J. Yang, S. K. Putatunda, "Improvement in strength and toughness of austempered ductile cast iron by a novel two-step austempering process", *Mater. Des.* 25 (2004) 219 to 230.
- [39] O. Eric, L. Sidjanin, Z. Miskovic, S. Zec, M. T. Jovanovic, "Microstructure and toughness of Cu, Ni Mo austempered ductile iron", *Mater. Lett.* 58 (2004) 2707 to 2711.
- [40] B.V. Kovacs, „Austempered Ductile Iron: Fact and Fiction“, *Mod. Cast.*, March 1990, p 38-41
- [41] Čatipović, N., Živković, D., Dadić, Z., Sučić, A., Ljumović, P., "Utjecaj izotermičke temperature i vremena držanja na mikrostrukturu i tvrdoću izotermičkog žilavog lijeva", MTSM 2015, Split, rujan 2015.
-



- 
- [42] R.B. Gundlach and J.F. Janowak, „Austempered Ductile Iron Combines Strength with Toughness and Ductility“, *Met. Prog.*, July 1985, p 19-26.
- [43] Nofal A. : „Austempered Ductile Iron (ADI) Production, Properties and Applications“ CMRDI, Kairo, Egipat.
- [44] Total Materia, Austempered Ductile Iron data base, [www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&LN=EN&site=kts&NM=243](http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&LN=EN&site=kts&NM=243).
- [45] O. Eric, L. Sidjanin, Z. Miskovic, S. Zec, M. Jovanovic, “An Austempering study of ductile iron alloyed with copper”, *J. Serb. Chem. Soc.* 70 (7), (2005), 1015-1022.
- [46] Kumar Anil M.M. and Suresh R., “Effect of copper on the properties of austempered ductile iron (ADI)”, *IJMERR*, Vol. 1, No. 3, October 2012.
- [47] Shelton P.W. and Bonner A.A., “The effect of copper additions to the mechanical properties of austempered ductile iron (ADI)”, *JMATPROTEC* 173, (2006), p. 269-274.
- [48] L. Sidjanin, D. Rajnovic, O. Eric and R. E. Smallman, “Austempering study of unalloyed and alloyed ductile irons”, *Materials Science and Technology* 26 Vol. 5, (2010), p. 567-571, doi:10.1179/174328409X407524.
- [49] J. Zhang, N. Zhang, M. Zhang, L. Lu, D. Zeng and Q. Song, “Microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron with different strength grades”, *Materials Letters* 119, (2014), p. 47-50.
- [50] A. Gazda, “Determination of thermal effects accompanying the austempering of copper-nickel ductile iron”, *Thermochimica Acta* 499, (2010), p. 144-148.
- [51] M. Gorny, E. Tyrala and H. Lopez, “Effect of Copper and Nickel on the Transformation Kinetics of Austempered Ductile Iron”, *JMEPEG* Vol. 23, (2014), p. 3505-3510.
- [52] P. Prasad Rao and S. K. Putatunda, “Investigations on the fracture toughness of austempered ductile irons austenitized at different temperatures”, *Materials Science and Engineering A349*, (2003), p. 136-149.
- [53] O. Eric, L. Sidjanin, D. Rajnovic and S. Balos, “Austempering Kinetics of Cu-Ni Alloyed Austempered Ductile Iron”, *Met. Mater. Int.* Vol. 20 No. 6, (2014), p. 1131-1138.
- [54] B. Bosnjak, B. Radulovic, K. Pop-Tonev and V. Asanovic, *ISIJ Int.* 40, (2000), p. 1246. doi: 10.2355/isijinternational.40.1246
-

- [55] T.S. Shih, C. H. Chang and L.Z. Hwang, *AFS Trans* 107, (1991), p.793.
- [56] B. Radulovic, B. Bosnjak, R. Harding, K. Pop-Tonev and V. Asanovic, "The influence of austenitising temperature on the microstructure and mechanical properties of low-alloyed Ni-Mo-Cu austempered ductile iron", *Mater. Tehnol.* 34 (5), (2000), p. 207-212.
- [57] B. Bosnjak and B. Radulovic, "Effect of austenitising temperature on austempering kinetics of Ni-Mo alloyed ductile iron", *MTAEC9* 38 (6), (2004), p. 307-312.
- [58] Yan Mi, "Effect of Cu, Mo, Si on the content of retained austenite of austempered ductile iron", *Scripta Metallurgica et Materialia* 32 (9), (1995), p. 1313-1317.
- [59] Y.J. Kim, H. Shn, H. Park and J.D. Lim, "Investigation into mechanical properties of austempered ductile cast iron (ADI) in accordance with austempering temperature", *Materials Letters* 62, (2008), p. 357-360.
- [60] B.Y. Lin, E.T. Chen and T.S. Lei, "The effect of alloy elements on the microstructure and properties of austempered ductile irons", *Scripta Metallurgica et Materialia* 32 (9), (1995), p. 1363-1367.
- [61] M. Bahmani, R. Elliott and N. Varahram, "The austempering kinetics and mechanical properties of an austempered Cu-Ni-Mo-Mn alloyed ductile iron", *Journal of Materials Science* 32, (1997), p. 4783-4791.
- [62] R.K. Dasgupta, D.K. Mondal and A.K. Chakrabarti, "Evolution of Microstructures During Austempering of Ductile Irons Alloyed with Manganese and Copper", *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2012*, Vol. 44A, (2013), p. 1376- 1387, doi:10.1007/s11661-012-1502-0.

## SAŽETAK

Žilavi lijev je čvrst, izdržljiv i ekonomski isplativ materijal koji zadovoljava sve veće potrebe tržišta za takvim materijalima pa mu stoga i proizvodnja raste. U ovom radu dan je osvrt na kemijski sastav, mehanička svojstva i klasifikaciju žilavog lijeva. Detaljno je objašnjen utjecaj pojedinih legirnih elemenata na mikrostrukturu a samim time i mehanička svojstva žilavog lijeva.

Objašnjena je toplinska obrada izotermičkog poboljšavanja koja za cilj ima stvaranje specifične strukture sačinjene od ferita te zaostalog ugljikom bogatog austenita. Takva struktura se naziva ausferit te pruža superiorna mehanička svojstva izotermički poboljšanog žilavog lijeva naspram drugih vrsta ljevova na bazi željeza te nekih čelika i aluminijskih legura.

Osim same toplinske obrade izotermičkog poboljšavanja, dan je uvid u sredstva za izotermičko poboljšavanje. Najčešće se koriste specijalne solne kupke zbog svojih izvrsnih fizikalnih svojstava ali se po potrebi mogu koristiti i olovne te uljne kupke. Kemijski sastav solne kupke određuje njen radni temperaturni raspon što u konačnici utječe na mehanička svojstva izotermički poboljšanog žilavog lijeva.

Sami izotermički poboljšani žilavi lijev je posljednji dodatak u obitelji žilavih ljevova i jedan je od najistraživanijih materijala na bazi željeza. Izvrsna mehanička svojstva posljedica su specifične mikrostrukture koja se dobije nakon provedenog izotermičkog poboljšavanja. Legirni elementi, kao što su: bakar, nikal, mangan i molibden, imaju značajan utjecaj na konačnu mikrostrukturu a samim time i mehanička svojstva.

Naposljetku prikazan je doseg dosadašnjih istraživanja iz ovog područja, navedeni su rezultati autora koji su istraživali utjecaj pojedinih legirnih elemenata na mehanička svojstva izotermički poboljšanog žilavog lijeva te su na kraju vidljivi nedostaci dosadašnjih istraživanja i potreba za detaljnijim, sveobuhvatnijim istraživanjem u svrhu dobivanja boljeg uvida i dubljeg saznanja o utjecaju legirnih elemenata na mehanička svojstva izotermički poboljšanog žilavog lijeva.