

# UTJECAJ PARAMETARA STARENJA NA TVRDOĆU I DIMENZIJSKE PROMJENE MARAGING ČELIKA

## THE EFFECT OF AGING PARAMETERS ON HARDNESS AND DIMENSIONAL CHANGES OF MARAGING STEEL

Kladarić Ivica<sup>1</sup>, Kladarić Slavica<sup>2</sup>, Milinović Andrijana<sup>1</sup>, Berić Nikolina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Trg Ivane Brlić Mažuranić 2, Slavonski Brod, Republika Hrvatska

<sup>2</sup> Veleučilište u Slavanskom Brodu, Dr. Mile Budaka 1, Slavonski Brod, Republika Hrvatska

*Ključne riječi: Maraging čelik, parametri starenja, svojstva*

*Key words: Maraging steel, aging parameters, properties*

### Sažetak

Zbog niza dobrih svojstava kao što su; visoka žilavost, visoka granica tečenja, dobra prokaljivost, dobra zavarljivost, jednostavna i “bezdeformacijska” toplinska obrada, danas se čelici maraging, osim za dijelove konstrukcija, sve češće primjenjuju i u izradi raznih kalupa (npr. za preradu polimera, za tlačno lijevanje itd.). Potrebna mehanička i eksploatacijska svojstva ovi čelici postižu precipitacijskim očvršćivanjem.

U radu je istražen utjecaj parametara starenja na tvrdoću i dimenzijske promjene maraging čelika X2NiCoMo18-9-5. Postupci starenja provedeni su u dilatometru radi praćenja dimenzijskih promjena.

Utvrđeni su parametri starenja kojima se postiže najviša tvrdoća uz prihvatljivu deformaciju. Analizom dilatometričkih krivulja starenja procijenjeno je da se ovaj čelik može uspješno koristiti za konstrukcijske i alatne primjene do maksimalnih radnih temperatura od 500 °C.

## 1 UVOD

Rastući zahtjevi za visokom čvrstoćom tehničkih materijala razlog su razvoja ultračvrstih čelika. Rezultat tog razvoja su i maraging čelici koji se primjenjuju od šezdesetih godina dvadesetog stoljeća.

Prednosti ove vrste čelika jesu: visoke vrijednosti vlačne čvrstoće i granice tečenja, dobra svojstva deformabilnosti, dobra zavarljivost, otpornost na krhki lom, postojanost pri niskim i pri

povišenim temperaturama itd. Osim toga, toplinska obrada ovih čelika je jednostavna, nije potrebna zaštita, nema rizika od deformacija i opasnosti puknuća pri hlađenju [1,2,3].

Maraging čelici isporučuju se u rastvorno žarenom stanju u kojem su relativno mekani i duktilni te kao takvi pogodni za obradu odvajanjem čestica i deformiranjem. Očvršćuju se jednostavnom toplinskom obradom starenja tijekom koje se vrijednosti tvrdoće i čvrstoće gotovo udvostručuju u odnosu na rastvorno žareno stanje. Obrada na konačne mjere provodi se prije starenja za vrijeme kojeg ne postoji opasnost od razugljčenja (jer je sadržaj ugljika u ovim čelicima manji od 0,05 %) i oksidacije[1,2,3,4].

Zbog navedenih prednosti maraging čelici imaju široki raspon primjene, kako u konstrukcijske svrhe (za dijelove zrakoplova i helikoptera što je i bila njihova početna namjena, npr. pogonska osovina, opruge, oklopi, spremnici za tekuće gorivo itd.), tako i za izradu alata (prvenstveno kalupa i ukovnja) [1,2,3].

## 2 EKSPERIMENTALNI RAD

U radu su provedena istraživanja s ciljem utvrđivanja utjecaja parametara starenja (temperature i trajanja) na tvrdoću i dimenzijske promjene maraging čelika X2NiCoMo18-9-5 sastava 0,017 %C; 18,25 %Ni; 8,75 %Co; 5,17 %Mo; 0,56 %Ti; 0,089 %Al; 0,08 %Si i 0,05 %Mn [5]. Toplinska obrada uzoraka (rastvorno žarenje i starenje) provedena je u Netzsch elektroničkom dilatometru 402 EP (slika 1.). Provedbom toplinske obrade u dilatometru omogućeno je kontinuirano praćenje parametara postupka i dimenzijskih promjena [6].



*Slika 1 . Dilatometar 402 EP*

Za potrebe istraživanja izrađeno je trinaest ispitnih uzoraka dimenzija  $\phi 6 \times 50$  mm od maraging čelika X2NiCoMo18-9-5. Svi ispitni uzorci su rastvorno žareni pri 820 °C u trajanju od 30 min. S ciljem utvrđivanja utjecaja parametara starenja na tvrdoću i dimenzijske promjene, ispitivanja su provedena u dva smjera.

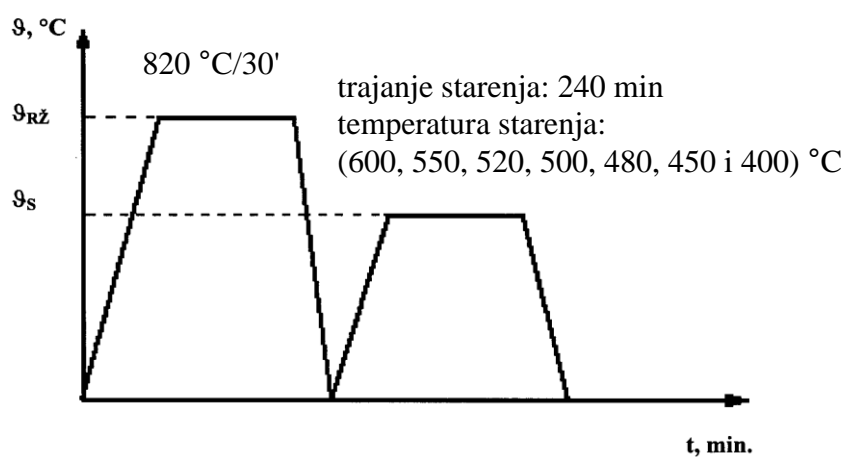
U prvom dijelu ispitivanja provedeno je starenje na sedam ispitnih uzoraka pri različitim temperaturama starenja (600 °C, 550 °C, 520 °C, 500 °C, 480 °C, 450 °C i 400 °C), uz jednako trajanje, tj. 240 min s ciljem utvrđivanja utjecaja temperature starenja na tvrdoću i dimenzijske promjene.

U drugom dijelu ispitivanja provedeno je starenje na šest ispitnih uzoraka pri različitim trajanjima starenja (60 min, 120 min, 240 min, 300 min, 600 min i 1200 min) , uz jednaku temperaturu starenja pri kojoj je postignuta maksimalna tvrdoća, s ciljem utvrđivanja utjecaja trajanja starenja na tvrdoću i dimenzijske promjene.

Po završetku pojedinog ciklusa toplinske obrade na svakom ispitnom uzorku izmjerena je tvrdoća Vickersovom metodom HV1 s po pet mjerenja nakon čega je izračunata srednja vrijednost. Na osnovi snimljenih dilatograma starenja očitani su iznosi dimenzijskih promjena duljine pojedinog ispitnog uzorka.

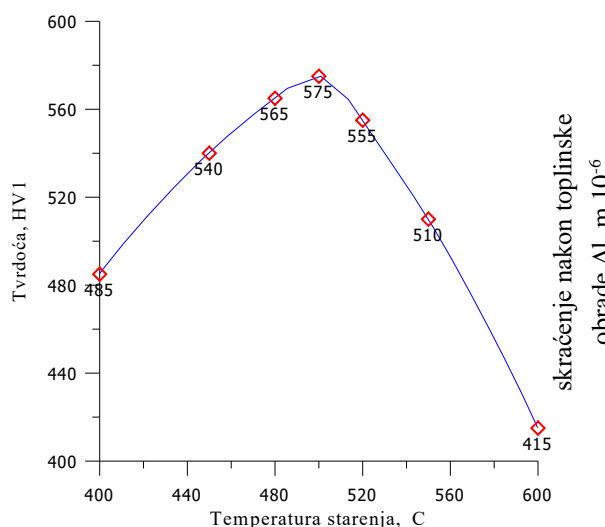
### Utjecaj temperature starenja na tvrdoću i dimenzijske promjene maraging čelika X2NiCoMo18-9-2

Na slici 2. prikazan je dijagram postupka toplinske obrade prve skupine ispitnih uzoraka s ciljem utvrđivanja utjecaja temperature starenja na tvrdoću i dimenzijske promjene.

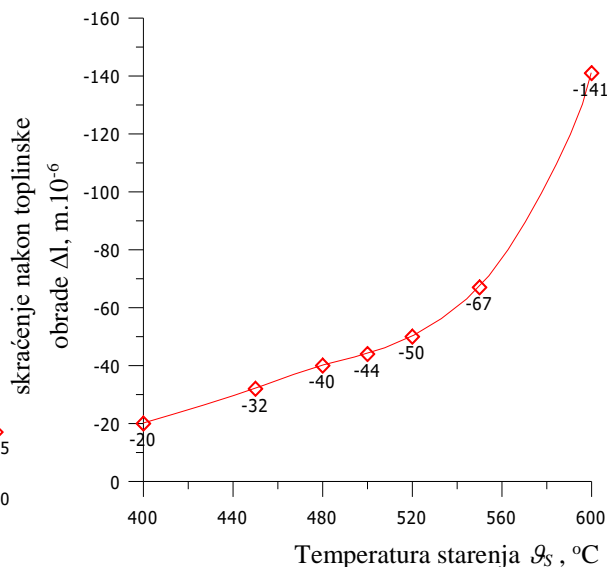


Slika 2. Toplinska obrada maraging čelika X2NiCoMo18-9-2 za utvrđivanje utjecaja temperature starenja na tvrdoću i dimenzijske promjene

Na slici 3. prikazana je promjena tvrdoće nakon starenja u ovisnosti o temperaturi starenja, a na slici 4. nastale dimenzijske promjene duljine ispitnih uzoraka u ovisnosti o temperaturi starenja.



Slika 3. Utjecaj temperature starenja na tvrdoću maraging čelika X2NiCoMo18-9-2



Slika 4. Utjecaj temperature starenja na promjenu duljine uzorka od maraging čelika X2NiCoMo18-9-2

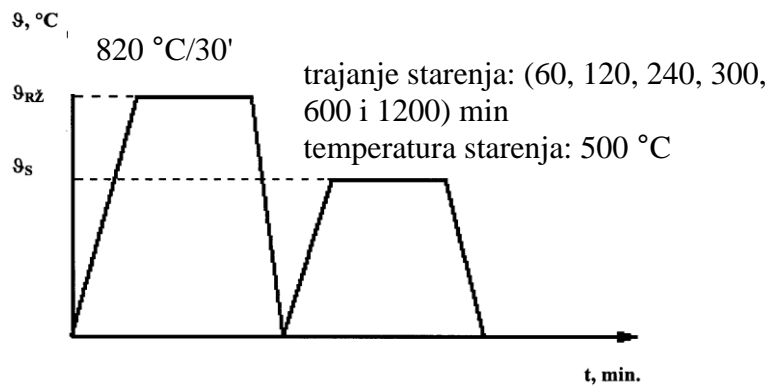
Iz dijagrama prikazanih na slikama 3. i 4. vidljivo je:

- Vrijednosti izmjerenih tvrdoća nakon starenja ukazuju na značajan utjecaj temperature starenja na tvrdoću čelika. Porastom temperature starenja od 400 °C do 500 °C tvrdoća čelika raste, a daljnjim povišenjem temperature dolazi do pada tvrdoće.
- Pri temperaturi starenja od 500 °C postignuta je najviša tvrdoća od 575 HV1.
- Na svim ispitnim uzorcima došlo je do pojave skraćanja duljine nakon provedbe postupka starenja. Porastom temperature starenja skraćenje je sve veće. Pri tome se uočava znatnije skraćenje za temperature starenja iznad 520 °C.

Na osnovi rezultata prvog dijela ispitivanja može se zaključiti da optimalna temperatura starenja maraging čelika X2NiCoMo18-9-5 iznosi 500 °C.

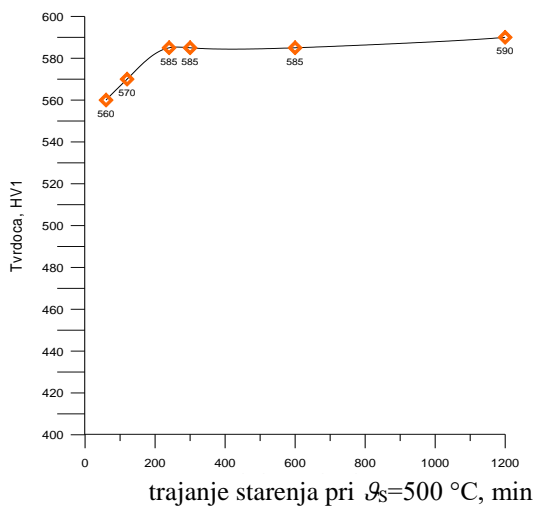
### Utjecaj trajanja starenja na tvrdoću i dimenzijske promjene maraging čelika X2NiCoMo18-9-2

Na slici 5. prikazan je dijagram postupka toplinske obrade druge skupine ispitnih uzoraka s ciljem utvrđivanja utjecaja trajanja starenja na tvrdoću i dimenzijske promjene.

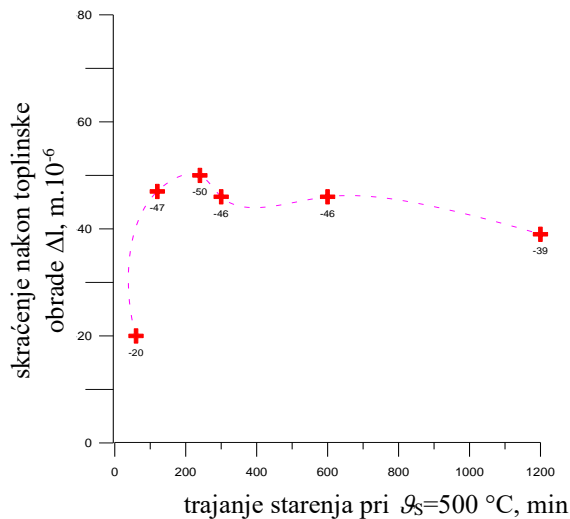


Slika 5. Toplinska obrada maraging čelika X2NiCoMo18-9-2 za utvrđivanje utjecaja trajanja starenja na tvrdoću i dimenzijske promjene

Na slici 6. prikazana je promjena tvrdoće nakon starenja u ovisnosti o trajanju starenja, a na slici 7. nastale dimenzijske promjene duljine ispitnih uzoraka u ovisnosti o trajanju starenja.



Slika 6. Utjecaj trajanja starenja na tvrdoću maraging čelika X2NiCoMo18-9-2



Slika 7. Utjecaj trajanja starenja na promjenu duljine uzorka od maraging čelika X2NiCoMo18-9-2

Iz dijagrama prikazanih na slikama 6. i 7. vidljivo je:

- Na iznose tvrdoća nakon starenja slabiji utjecaj ima trajanje starenja. Produljenjem trajanja starenja od 60 min do 240 min prisutno je izvjesno povišenje tvrdoće za 25 HV1. Daljnjim produljenjem trajanja starenja od 240 min do 1200 min ne postiže se značajna promjena tvrdoće.
- Svi ispitni uzorci su se nakon starenja skratili. Produljenjem trajanja starenja od 60 min do oko 120 min prisutan je značajan porast skraćanja. Daljnjim produljenjem trajanja starenja ne mijenja se značajno skraćanje uzoraka.

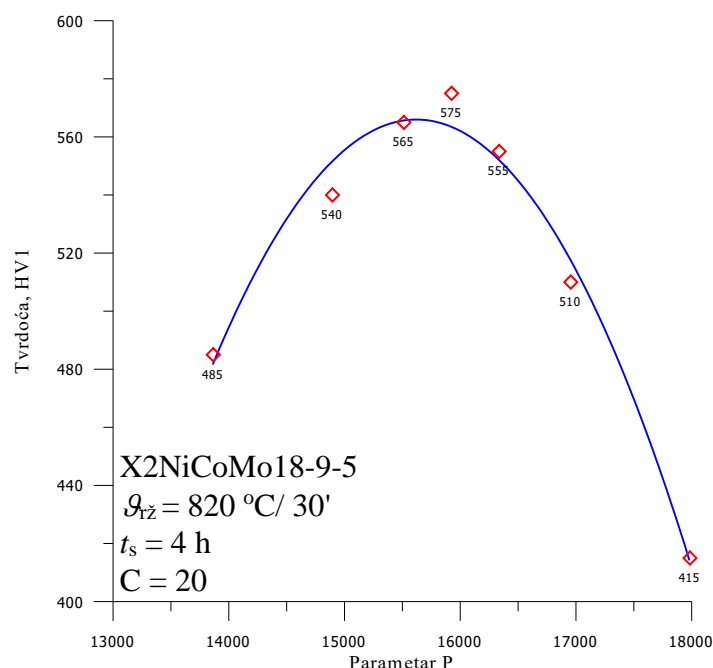
Na osnovi rezultata drugog dijela ispitivanja može se zaključiti da optimalno trajanje starenja maraging čelika X2NiCoMo18-9-2, pri temperaturi starenja od 500 °C, iznosi 240 min. Pri tome se postiže tvrdoća od 585 HV1 i skraćenje ispitnog uzorka od 0,05 mm, odnosno 0,1 % početne duljine.

### Primjena parametra popuštanja pri starenju maraging čelika X2NiCoMo18-9-5

Budući da je učinak starenja difuzijskog karaktera (difuzija atoma legiranih elemenata iz Ni-martenzitne rešetke) isti je ovisan, između ostalog, i o temperaturi i o trajanju procesa. Pri popuštanju čelika poznata je međusobna povezanost temperature i trajanja popuštanja (Hollomon-Jaffeove parametar) pa se čini prikladnim i kod starenja primijeniti isti izraz [4]:

$$P = T(C + \lg t)$$

Koristeći za iznos konstante  $C = 20$  (preporučena vrijednost za visokolegirane čelike), uz trajanje  $t$  od 4 h, izračunate su vrijednosti parametra  $P$ . Primjenom dobivenih rezultata tvrdoća iz ovoga rada (slika 3.) i izračunatog parametra  $P$  konstruirana je krivulja starenja čelika X2NiCoMo18-9-5 (slika 8.).



Slika 8. Ovisnost tvrdoće nakon starenja čelika X2NiCoMo18-9-5 o parametru popuštanja

Iz dijagrama prikazanog na slici 8. vidljivo je:

- Porastom parametra popuštanja  $P$  do oko 15500 tvrdoća čelika raste, a daljnjim povišenjem temperature parametra popuštanja  $P$  dolazi do pada tvrdoće.

### 3 ZAKLJUČAK

Na osnovi provedenih ispitivanja utjecaja temperature i trajanja starenja na tvrdoću i dimenzijske promjene maraging čelika X2NiCoMo18-9-5 zaključuje se sljedeće:

- Temperatura starenja ima značajniji utjecaj od trajanja starenja, kako na tvrdoću, tako i na skraćenje čelika, a što je posljedica difuzijskog karaktera procesa starenja.
- Starenjem maraging čelika X2NiCoMo18-9-5 pri 500 °C u trajanju od 240 min postignuta je maksimalna tvrdoća.
- Starenjem pri navedenim parametrima postignuto je skraćenje ispitnog uzorka od svega 0,1 %.
- Kako je učinak starenja difuzijskog karaktera, maksimalnu vrijednost tvrdoće moguće je postići kada vrijednost parametra popuštanja P bude oko 15500.
- Postignuta razmjerno visoka tvrdoća uz relativno male dimenzijske promjene ukazuje na to da se ovaj čelik može uspješno koristiti u konstrukcijskim i alatnim primjenama do maksimalnih radnih temperatura od 500 °C.

### 4 LITERATURA

- [1] M. Novosel; D. Krumes; I. Kladarić, Željezni materijali – Konstrukcijski čelici, Second edition, Mechanical engineering faculty in Slavonski Brod, Slavonski Brod (2013).
- [2] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof, Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [3] ASM Metals HandBook Volume 1 - Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys, ASM International (1993.)
- [4] ASM Metals Handbook Volume 4 – Heat Treating, ASM International (2002.)
- [5] The Key to Steel – Stahlschlüssel, CD-ROM, version 8.0 (2016.)
- [6] Dilatometry - NETZSCH Thermal Academy, <https://www.netzsch-thermal-academy.com/en/advanced-materials-testing/methods/dilatometry/>, last access 01/08/2019