

**Asistent mr Jelena Dobrić, dipl. građ. inž.<sup>1</sup>**  
**Vanredni profesor dr Zlatko Marković, dipl. građ. inž.<sup>1</sup>**  
**Redovni profesor dr Dragan Buđevac, dipl. građ. inž.<sup>1</sup>**  
**Asistent Marko Pavlović, dipl. građ. inž.<sup>1</sup>**

## **PRIMENA NERĐAJUĆIH ČELIKA U GRAĐEVINARSTVU**

0352-2733, 44 (2011), p. 159-191

UDK: 669.14.018.8  
PREGLEDNI STRUČNI ČLANAK

### **Rezime**

Nerđajući čelici nalaze sve veću primenu u građevinarstvu. Pored niza prednosti kao što su otpornost na koroziju i poboljšana vatrootpornost, ovaj materijal odlikuju i određene specifičnosti u odnosu na klasične ugljenične čelike. Ovaj rad daje kratak prikaz osnovnih karakteristika nerđajućih čelika, kao i postupke proračuna prema najnovijem evropskom propisu, EN 1993-1-4.

**Ključne reči:** nerđajući čelik, nosivost, stabilnost, upotrebljivost, Evrokod 3

---

<sup>1</sup> Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, 11000 Beograd  
Rad primljen septembra 2011.

# APPLICATION OF STAINLESS STEEL IN STRUCTURAL ENGINEERING

## Summary

Stainless steels get wider application in engineering structures. Apart from many advantages such as corrosion and fire resistance this material has some special characteristics in compare to regular carbon steels. In this paper short preview of basic characteristics of stainless steels, as also the design procedure according to latest European code, EN 1993-1-4, is shown.

**Key words:** stainless steel, resistance, buckling, serviceability, Eurocode 3

## 1. UVOD

Zahtev povećane korozione otpornosti čelika primenjenog u konstrukcijama koje su po svom položaju teško pristupačne, dovodi do sve veće primene nerđajućih čelika u građevinarstvu. Ovo je takođe slučaj i u konstrukcijama koje se nalaze u veoma agresivnim sredinama. Izbor nerđajućeg čelika kao osnovnog materijala u nosećim konstrukcijama, ipak, dugi niz godina se smatrao ekstravagantnim. Razlog ovome leži u visokoj početnoj ceni materijala, nepotpunoj tehničkoj regulativi, ogra-

ničenom asortimanu profila, i nerazumevanju brojnih prednosti u primeni ovog materijala od strane projektanata. U toku poslednjih 15 godina u mnogim istraživačkim centrima u svetu sprovedena su značajna eksperimentalna i numerička ispitivanja ponašanja konstruktivnih elemenata od nerđajućih čelika. Cilj ovih istraživanja je izrada i revizija tehničke regulative u oblasti projektovanja i izvođenja. Prva primena nerđajućeg čelika datira od 1912. godine u domaćinstvima, kao materijal za izradu kuhinjskog pribora. Tada je popularizovan termin „stainless“ (bez mrlja). Danas je to opšti izraz za leguru dobijenu od uobičajenih ugljeničnih čelika dodavanjem određenog procenta hroma (Cr), nikla (Ni) i molibdena (Mb), čime se postižu izvanredene osobine u pogledu korozione i vatrootpornosti u agresivnim sredinama. U većini slučajeva, nerđajući čelik je sličan ugljeničnom čeliku, a način konstruisanja i izrade konstrukcija od oba metala je skoro identičan. Ipak, postoje neke bitne razlike zbog kojih se za konstrukcije od nerđajućih čelika ne mogu primeniti pravila proračuna i svi konstruktivni oblici koji odgovaraju nosećim konstrukcijama od ugljeničnih čelika. Ovaj rad daje osnovne smernice za projektovanje konstruktivnih elemenata, razmatra postojeće stanje tehničke regulative, i ukazuje na skorija dostignuća u ovoj oblasti.

## 2. KARAKTERISTIKE MATERIJALA

### 2.1 Hemijski sastav

Kao i kod ugljeničnih čelika, i kod nerđajućih čelika postoji širok opseg kvaliteta koji se ogleda u hemijskom sastavu i načinu tehnološke obrade. Svi nerđajući čelici, u skladu sa svojim specifikacijama mogu da se razvrstaju u šest glavnih klasa koje reprezentuju tri različita stepena legiranja i tri tipa strukture metalnih zrna. To su sledeće klase: austenitni, feritni, dupleks (austenitno-feritni), martenzitni i ojačani nerđajući čelici (dobijeni posebnim metalurškim postupkom-*precipitation hardening*). Pored ugljenika (C) i minimalnog zahtevanog procenta hroma (Cr) od 10,5%, u sastavu mogu biti prisutni i elementi: nikel (Ni), mangan (Mn), molibden (Mo), bakar (Cu), silicijum (Si), sumpor (S), fosfor (P) i azot (N). Procentualno učešće svakog od elemenata definisano je evropskim standardom EN 10088-1. Najčešću primenu u građevinarstvu imaju austenitni i dupleks nerđajući čelici. Austenitni nerđajući čelici imaju u svom sastavu 17-18% hroma (max 26%), 8-11% nikla (max 22%), vrlo malo ugljenika (najčešće 0,08%) i nemaju magnetna svojstva. Najviše su u upotrebi i poseduju najpovoljnija svojstva plastičnosti u poređenju sa ostalim nerđajućim čelicima. Mogu da budu osetljivi na naponsku koroziju na ivicama zrna i pokazuju veće nestabilnosti i deformacije prilikom zavarivanja. Sa opadanjem ukupnog

procenta hroma i nikla u leguri obradivost je lošija, a raste čvrstoća, pa su ovakvi materijali pogodniji u konstruktivnom smislu, a lošiji za postupke plastičnog oblikovanja. U pojedinim slučajevima, kao treći legirajući element može da se upotrebi mangan koji u kristalnoj rešetki zamenjuje atome nikla (u odgovarajućim metalurškim uslovima). Tako dobijena legura ima veću čvrstoću i izdvaja se u posebnu klasu od ostalih austenitnih nerđajućih čelika. Austenitni nerđajući čelici su dobro zavarljivi, a svojstva visoke korozione otpornosti ne gube u procesu hladne obrade. Koriste se najviše u zgradarstvu pre svega zbog lakoće održavanja i lepog izgleda koji inspiriše arhitekte u projektovanju oku dostupnih, transparentnih detalja koji imaju posebnu estetsku dimenziju.

Dupleks nerđajući čelici se primenjuju kod specifičnih konstrukcija kod kojih zahtev visoke korozione otpornosti treba spojiti sa zahtevom velike nosivosti i malih dimenzija (male težine). To su na primer objekti hemijske, naftne i mašinske industrije, kao što su *off-shore* platforme ili protiveksplozivni zidovi. Dupleks nerđajući čelici poseduju dvofaznu austenitno-feritnu mikrostrukturu sa 40-60% gvožđa, 22-24% hroma i 4-5% nikla. Imaju bolju korozionu otpornost od konvencionalnih feritnih čelika i bolju čvrstoću od austenitnih čelika.

## 2.2 Označavanje nerđajućih čelika

Hemijski sastav, mehaničke i tehnološke osobine nerđajućih čelika definisane su evropskim standardom EN 10088. Ovim standardom utvrđuju se tehnički uslovi za izradu i isporuku žica, šipkastog, pljoštog čelika, širokog pljoštog čelika, limova, profila, kružnih, kvadratnih i pravougaonih šupljih profila. Takođe i svih ostalih poluproizvoda koji se isporučuju u vruće valjanom ili hladno oblikovanom stanju, a koji su namenjeni za primenu u građevinarstvu. Ovaj standard ima tri dela:

Deo 1 - koji sadrži listu nerđajućih čelika - broj i ime čelika, hemijski sastav i referentne podatke o nekim fizičko-mehaničkim karakteristikama;

Deo 2 - koji sadrži tehničke uslove isporuke za limove, ploče i trake koroziono otpornih čelika za opšte namene (date su tehničke karakteristike i hemijska kompozicija materijala);

Deo 3 - koji sadrži tehničke uslove isporuke polugotovih proizvoda, šipki, šupljih profila i preseka koroziono otpornih čelika za opšte namene (date su tehničke karakteristike i hemijska kompozicija materijala).

Označavanje čelika prema evropskim normama je definisano sledećim standardima:

- EN 10027-1: Sistem za označavanje čelika; Deo 1: Označavanje čelika, osnovne oznake;
- EN 10027-2: Sistem za označavanje čelika; Deo 2: Brojčane oznake;

- CR 10260: Sistem za označavanje čelika; Dodatne oznake.

Treba napomenuti da je ovaj sistem označavanja od 2003. godine prihvaćen i u našoj zemlji, usvajanjem domaćih standarda koji su identični sa navedenim evropskim standardima. Pomenuti standardi daju detaljna pravila za označavanje čelika i to na dva načina. Prvi sistem označavanja je zasnovan na alfanumeričkim oznakama (imenima) čelika (prema standardima EN 10027-1 i CR 10260), dok se drugi, alternativni sistem označavanja zasniva isključivo na brojačanim oznakama (prema EN 10027-2) i pogodniji je za označavanje legiranih čelika, kao što su nerđajući čelici.

Prema alfanumeričkom sistemu razlikuju se dve osnovne grupe čelika:

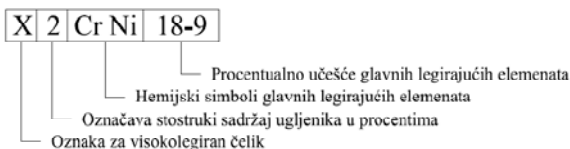
- Grupa 1: čelici koji se označavaju na osnovu njihove primene i mehaničkih svojstava,
- Grupa 2: čelici koji se označavaju na osnovu hemijskog sastava.

Čelici koji se označavaju prema hemijskom sastavu, prema sistemu alfanumeričkog označavanja mogu da se podele u tri podgrupe u zavisnosti od sadržaja legirajućih elemenata.

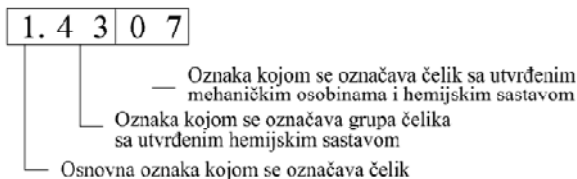
Nerđajući (legirani) čelici se označavaju tako što se na prvom mestu nalazi simbol X koja označava da se radi o legiranim čelicima sa sadržajem legirajućeg elementa većim od 5%. Potom sledi broj koji označava stostruki prosečni sadržaj ugljenika u procentima, pa hemijski

simboli glavnih legirajućih elemenata i brojevi razdvojeni crtama koji označavaju prosečan sadržaj legirajućih elemenata u procentima, respektivno (slika 1).

Prema brojčanom sistemu označavanja svakom čeliku su dodeljuje određeni broj koji se sastoji od 5 arapskih cifara. Na prvom mestu je uvek broj 1 koji je od četvorocifrenog broja koji ga sledi odvojen tačkom, tako da oznaka ima sledeći oblik - 1.XXXX. Glavni nedostatak ovog sistema označavanja je što oznaka ne daje eksplicitne informacije o vrsti, mehaničkim svojstvima i kvalitetu čelika. Međutim, i ovaj način označavanja je sistematizovan tako da određenim vrstama čelika odgovaraju određene grupe brojeva (slika 2).



Slika 1 – Alfnumeričko označavanje nerđajućeg čelika



Slika 2 – Numeričko označavanje nerđajućeg čelika



Mehaničke karakteristike najčešće primenjivanih austenitnih i dupleks nerđajućih čelika prikazani su u tabeli 1, a hemijski sastav u tabeli 2.

Tabela 1 – Mehaničke karakteristike nekih austenitnih i dupleks čelika

Oznaka		Mehaničke karakteristike (min)			
Alfanumerička oznaka	Numerička oznaka	Max debljina elementa $d$	Granica razvlačenja $f_{y0.2}$	Granična čvrstoća na zatezanje $f_u$	Izduženje
		mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%
<b>Austenitni nerđajući čelici - standardne klase</b>					
X10CrNi18-8	1.4310	40	195	500/750	40
X2CrNi18-9	1.4307	160	175	500/700	45
		160<d≤250	175	500/700	35
X2CrNi19-11	1.4306	160	180	460/680	45
		160<d≤250	180	460/680	35
X5CrNi18-10	1.4301	160	190	500/700	45
		160<d≤250	190	500/700	35
X8CrNiS18-9	1.4305	160	190	500/750	35
X4CrNi18-12	1.4303	160	190	500/700	45
		160<d≤250	190	500/700	35
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	160	200	500/700	40
		160<d≤250	200	500/700	30
X2CrNiMoN17-11-2	1.4406	160	280	580/800	40
		160<d≤250	280	580/800	30
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	160	200	500/700	40
		160<d≤250	200	500/700	30
<b>Dupleks nerđajući čelici - standardne klase</b>					
X3CrNiMoN27-5-2	1.4460	160	450	620/880	20
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	160	450	650/880	25

Tabela 2 – Hemijski sastav najznačajnijih austenitnih i dupleks čelika

Oznaka		Hemijski sastav u % mase									
Alfnumerička oznaka	Numerička oznaka	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Cu	Mo	Ni
<b>Austenitni nerđajući čelici - standardne klase</b>											
X10CrNi18-8	1.4310	0.05/0.15	2.00	2.00	0.045	0.015	0.11	16.0/19.0	-	0.80	6.0/9.5
X2CrNi18-9	1.4307	0.030	1.00	2.00	0.045	0.030	0.11	17.5/19.5	-	-	8.0/10.5
X2CrNi19-11	1.4306	0.030	1.00	2.00	0.045	0.030	0.11	18.0/20.0	-	-	10.0/12.0
X5CrNi18-10	1.4301	0.07	1.00	2.00	0.045	0.030	0.11	17.5/19.5	-	-	8.0/10.5
X8CrNiS18-9	1.4305	0.10	1.00	2.00	0.045	0.15/0.35	0.11	17.0/19.0	1.00	-	8.0/10.0
X4CrNi18-12	1.4303	0.06	1.00	2.00	0.045	0.030	0.11	17.0/19.0	-	-	11.0/13.0
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	0.030	1.00	2.00	0.045	0.030	0.11	16.5/18.5	-	2.00/2.50	10.0/13.0
X2CrNiMoN17-11-2	1.4406	0.030	1.00	2.00	0.045	0.030	0.12/0.22	16.5/18.5	-	2.00/2.50	10.0/12.5
X5CrMo17-12-2	1.4401	0.07	1.00	2.00	0.045	0.030	0.11	16.5/18.5	-	2.00/2.50	10.0/13.0
<b>Dupleks nerđajući čelici - standardne klase</b>											
X3CrNiMoN27-5-2	1.4460	0.05	1.00	2.00	0.035	0.030	0.05/0.20	25.0/28.0	-	1.30/2.00	4.5/6.5
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	0.030	1.00	2.00	0.035	0.015	0.10/0.22	21.0/23.0	-	2.50/3.5	4.5/6.5

## 2.3 Vrste proizvoda od nerđajućih čelika

U nosećim konstrukcijama u građevinarstvu najveću zastupljenost imaju: ploče, limovi, šuplji profili, štapovi, hladno oblikovani, vruće valjani profili i spojni elementi. Najširu primenu imaju hladno oblikovani profili, pre svega zbog najveće zastupljenosti na tržištu, niže ukupne cene gotovog elementa i manjeg utroška čelika. Vruće valjani i zavareni preseći imaju znatno manju primenu.

Hladno oblikovani elementi proizvode se postepenim oblikovanjem iz osnovnog lima (trake) u hladnom postupku do željenog oblika bilo presovanjem ili valjanjem. Presovanje kao način oblikovanja upotrebljava se u

slučajevima kada je poprečni presek jednostavnog oblika i kada je potrebna manja količina profila, a često se primenjuje i za izradu prototipa. Valjanje u hladnom stanju široko se upotrebljava za proizvodnju profila i profilisanih limova i pogodno je za masovnu proizvodnju, pa danas predstavlja osnovni postupak za proizvodnju hladno oblikovanih elemenata. Mehaničke karakteristike osnovnog materijala značajno se povećavaju hladnim oblikovanjem, pa se pogodnim oblikom preseka može značajno povećati njegova nosivost. Uticaj povećanje nosivosti nerđajućeg čelika usled hladnog oblikovanja nije trenutno obuhvaćen propisima obzirom da ne postoji dovoljan broj sprovedenih istraživanja koja bi definisala tačan nivo ovog poboljšanja. Neka od ovih ispitivanja se trenutno sprovode na Imperijal Koledžu u Londonu.

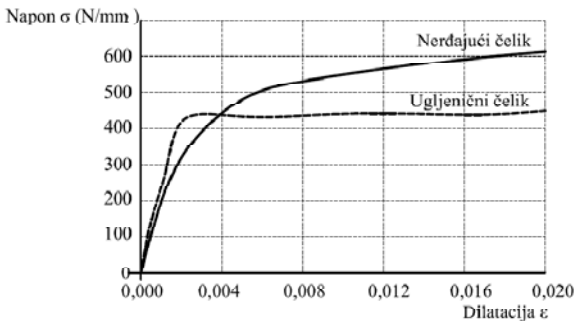
## **2.4 Fizičko mehaničke karakteristike**

Naponsko-deformacijska veza kod nerđajućih čelika se značajno razlikuje od ugljeničnih čelika, što je prikazano na slici 3. Kod ugljeničnih čelika jasno je izražena granica razvlačenja, sa blagim ojačanjem materijala pri porastu deformacija. Kod nerđajućih čelika, nasuprot, kriva napon-deformacija je zaobljena bez jasno izražene granice razvlačenja, sa značajnim ojačanjem materijala sa porastom deformacija i velikom duktilnošću.

Odsustvo jasno izražene granice razvlačenja na krivoj napon-deformacija zahteva definisanje konvencionalne

granice razvlačenja. Konvencionalna granica razvlačenja  $f_{y02}$  definiše nivo napona kome odgovara trajna, nepovratna plastična dilatacija od 0,2% (slika 4).

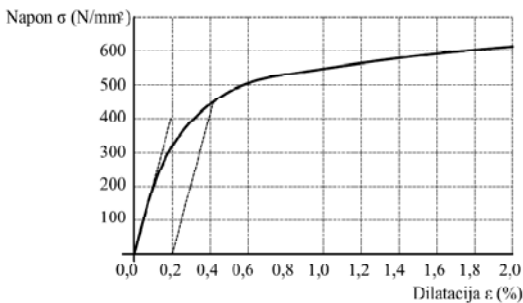
Stepen zakrivljenosti krive napon-deformacija zavisi od kvaliteta osnovnog materijala (hemijskog sastava i tehnološke obrade) kao i nivoa hladne obrade kojoj je materijal izložen. Tako materijali koji su izloženi postupku žarenja imaju oštiji prelom krive i približno linearan prirast napona sa povećanjem deformacije, dok hladno oblikovani materijali imaju zaobljeniju krivu, i pokazuju značajno veću čvrstoću (slika 5).



Slika 3 – Krive napon–dilatacija za nerđajući i ugljenični čelik

Nerđajući čelici pokazuju anizotropiju i nesimetrično naponsko-deformacijsko stanje u zatezanju i pritisku. Oba

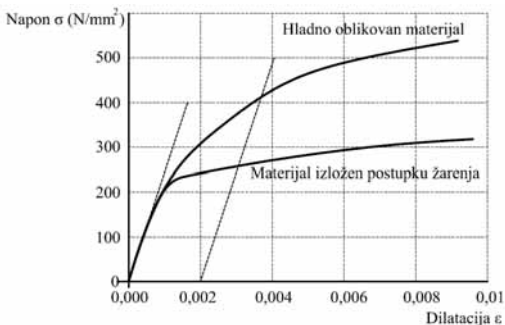
ova efekta se povećavaju sa povećanjem nivoa hladne obrade. Kao primer, kod austenitinih čelika koji su podvrgnuti postupku žarenja razlike u vrednostima konvencionalne granice razvlačenja su manje od 5%, dok su kod hladno oblikovanih čelika te razlike i do 20%. Najveći broj propisa za materijale daje naponsko-deformacijske karakteristike i za pritisak i za zatezanje i u podužnom i u poprečnom pravcu vlakana, što omogućava da se uticaji anizotropije i nesimetrije uzmu u obzir pri proračunu. Međutim, numeričke studije pokazuju da je ponašanje većine konstruktivnih elemenata (pritisnute ploče) relativno neosetljivo na anizotropiju materijala, pa se radi pojednostavljenja i konzervativnog pristupa i u slučaju kompleksnog stanja naprežanja usvajaju minimalne vrednosti mehaničkih karakteristika materijala.



Slika 4 – Definicija konvencionalne granice razvlačenja  $f_{y02}$

Za potrebe proračuna i numeričkih ispitivanja ponašanja ugljeničnih čelika koristi se bilinearna kriva napon-deformacija (elasto-idealno-plastično telo), obzirom da oni ne pokazuju značajnija odstupanja od ovog idealizovanog modela. Kriva  $\sigma$ - $\epsilon$  koja ukazuje na očvršćavanje materijala usled deformacije odstupa za oko 1,5% u odnosu na stvarni odgovor konstrukcije.

Kod nerđajućih čelika, međutim, bilinearan model nije prihvatljiv i njegova direktna primena dovodi do krajnje konzervativnog proračuna i kontrole graničnih stanja nosivosti i upotrebljivosti.



Slika 5 – Naponsko deformacijsko stanje žarenih i hladno oblikovanih materijala

Zbog toga je predložen veći broj preciznijih modela kojima se opisuje naponsko-deformacijsko ponašanje

nerđajućih čelika. Najčešće je primenjivan Ramberg-Ozgdov ili modifikovan Hilov zakon koji je definisan izrazom:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left( \frac{\sigma}{f_{y02}} \right)^n \quad \sigma \leq f_{y02} \quad (1)$$

gde su:

$\sigma$  i  $\varepsilon$  odgovarajuće vrednosti napona i deformacije, respektivno,

$E$  modul elastičnosti,

$f_{y02}$  konvencionalna granica razvlačenja,

$n$  naponsko-deformacijski parametar.

U brojnim istraživačkim studijama zapaženo je odstupanje Ramberg-Ozgdove krive u oblasti većih deformacija od krivih koje se dobijaju eksperimentalnim putem. Mirambel i Ril su kroz seriju istraživanja, uradili modifikaciju osnovnog Ramberg-Ozgdovog izraza, tako što su  $\sigma$ - $\varepsilon$  krivu analitički definisali sa dve funkcije. U ovom modifikovanom modelu granica između dve funkcije je konvencionalna granica razvlačenja  $f_{y02}$ . Gardner i Nederkot [4] prepoznali su značaj Mirambel-Rilovog modela, uz akcenat da primena graničnog napona na zatezanje u drugoj fazi (između  $f_{y02}$  i  $f_u$ ) ima dva nedostatka. Prvo, deformacija koja odgovara naponu  $f_u$  je značajno veća u odnosu na njenu stvarnu vrednost i veće je odstupanje između izmerenih i analitičkih

vrednosti u drugoj nego u prvoj fazi deformacija. Drugo, još važnije, je neprimenljivost modela za naponsko-deformacijsko stanje u pritisku, jer ne postoji granična vrednost napona pritiska.

Definisanje napona koji odgovara plastičnoj deformaciji u iznosu od 1% kao graničnog napona, omogućilo je formulisanje jednačine (2).

Jednačina (1) i dalje važi za vrednosti napona do  $f_{y02}$ .

$$\varepsilon = 0,002 + \frac{f_{y02}}{E} + \frac{\sigma - f_{y02}}{E_y} + \varepsilon_u \cdot \left( \frac{\sigma - f_{y02}}{f_u - f_{y02}} \right)^m \quad f_{y02} < \sigma \leq f_u \quad (2)$$

gde su:

- $\varepsilon_u$  granična vrednost deformacije koja odgovara nivou napona  $f_u$ ,
- $E_y$  tangentni modul elastičnosti,
- $m$  odgovarajući naponsko deformacijski koeficijent.

Jednačina (2) pokazuje odlično slaganje sa eksperimentalnim ispitivanjima i u zoni pritiska i zatezanja.

Naponsko-deformacijske karakteristike materijala u zaobljenim uglovima hladno oblikovanih preseka su drugačije u odnosu na ostale delove preseka zbog odgovora materijala na hladnu deformaciju. Eksperimentalna ispitivanja ukazala su na povećanje konvencionalne granice razvlačenja uz pojavu gubitka duktilnosti u ovim



zonama, pa su predloženi analitički modeli kojima se uzimaju u obzir ovi efekti.

## **2.5 Otpornost na koroziju**

Jedna od najvažnijih karakteristika nerđajućih čelika je njihova otpornost na koroziju čime je omogućena primena u agresivnim sredinama. U prisustvu vazduha, ili u bilo kojoj drugoj sredini bogatoj oksidima, na površini ovih čelika stvara se neprimetno tanak oksidni sloj. Ukoliko se ovaj sloj na bilo koji način ošteti (slučajno ili procesom izrade), vrlo brzo dolazi do njegovog obnavljanja. Iako je ovako nastao film veoma tanak (približno  $5 \times 10^{-6}$  mm), on nije porozan i eventualna oštećenja ne predstavljaju opasnost jer prevenciju predstavlja obavezna reakcija sa kiseonikom. Ovakva zaštita od korozije je pasivna zaštita i njen kvalitet zavisi od hemijskog sastava čelika, obrade površina i stepena agresivnosti sredine.

Da bi čelik bio koroziono postojan (pasivan) moraju biti ispunjena dva glavna uslova:

- legiranje sa minimum 12% hroma (moderni nerđajući čelici sadrže i do 30% hroma),
- postojanje homogene monofazne feritne, austenitne ili martenzitne mikrostrukture radi izbegavanja opasnosti od nastanka područja s različitim elektropotencijalom od potencijala osnovne mase.

Treba pomenuti da u agresivnim sredinama sa visokim sadržajem hlorida koroziona otpornost nerđajućih čelika može biti ekstremno narušena o čemu treba voditi računa, pa se u takvim slučajevima mora tražiti alternativno rešenje. Takođe, nerđajući čelici mogu da se kontaminiraju (zaprljaju) česticama ugljeničnih čelika. Zbog toga je u konstruktivnim detaljima, u kojima je neophodna veza nerđajućeg i ugljeničnog čelika, potrebno odgovarajućim konstruktivnim merama sprečiti njihovo direktno međusobno naleganje kako bi se izbegla moguća kontaktna korozija.

Zahtev očuvanja korozione otpornosti nerđajućeg čelika prisutan je i u procesu proizvodnje i montaže. Površine elemenata treba da ostanu čiste i neoštećene u fazama skladištenja, transporta i ugradnje. U tu svrhu su propisani načini sečenja, hladnog savijanja, bušenja rupa i ostalih radova.

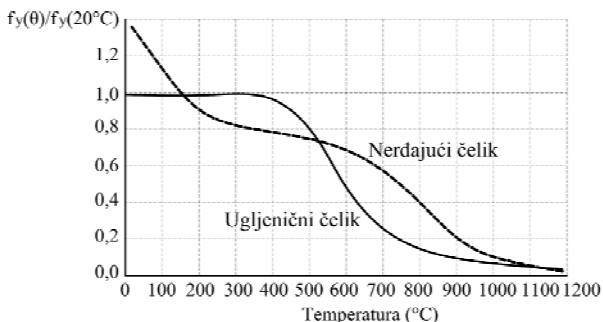
### **3. FAKTORI OD ZNAČAJA NA IZBOR MATERIJALA**

Adekvatan izbor materijala jedan je od najvažnijih parametara od kojih zavisi, ne samo sigurnost i funkcionalnost, već i ekonomičnost i estetika nosećih konstrukcija u celini. Početna cena konstruktivnih elemenata od nerđajućih čelika je za oko četiri puta veća u odnosu na ekvivalente od ugljeničnih čelika. Razlog za ovo leži u

činjenici da je reč o legiranom materijalu sa relativno ograničenom obimom proizvodnje. Iako se ova razlika može donekle umanjiti efikasnijom proizvodnjom, izradom i naprednim tehnikama projektovanja i proračuna koje dozvoljavaju savremeni propisi, značajan disparitet ipak ostaje. Međutim, postoji niz činioca koji treba da budu razmatrani kada je u pitanju krajnja cena na izradi konstrukcije od nerđajućeg čelika, kao što su estetika, trajnost, ponašanje pri požaru i sl.

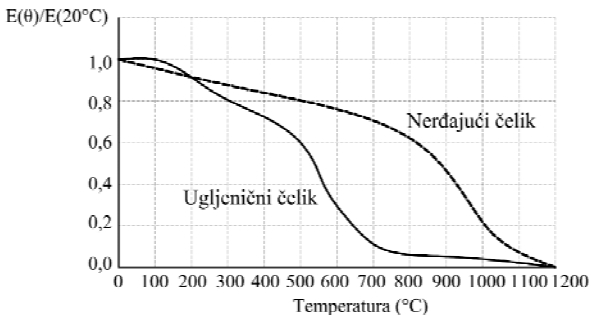
Estetika je značajan faktor u izboru nerđajućeg čelika kao osnovnog materijla u konstruktivnim elementima u građevinarstvu. Zbog sjajnosti površina i sposobnosti da zadrže nenarušen izgled tokom vremena, ovakve konstrukcije su unutar objekta najčešće transparentne i prestižne. Ovu činjenicu ilustruje fasada Krajslerove zgrade u Njujorku koja je završena 1936. godine i koja je i danas i pored blizine okeno čista i svetla.

Koroziona otpornost nerđajućih čelika čini ga jednim od trajnijih materijala koji se koriste u građevinarstvu. Izborom odgovarajućeg kvaliteta, pravilnim projektovanjem i uz minimum održavanja može se ostvariti eksploatacioni vek duži i od 100 godina, što ima konačne pozitivne ekonomske konsekvence.



Slika 6 – Promena granice razvlačenja sa porastom temperature

Na povišenim temperaturama nerđajući čelici pokazuju manje promene mehaničkih svojstava materijala, a time i kapaciteta nosivosti u odnosu na ugljenične čelike, pre svega zbog povoljnog dejstva legiranih elemenata. Poređenje ponašanja nerđajućih i ugljeničnih čelika na povišenoj temperaturi prikazana je na slikama 6 i 7 gde su  $f_y(\theta)$  i  $E(\theta)$ , granica razvlačenja i modul elastičnosti na temperaturi  $\theta$ , a  $f_y(20)$  i  $E(20)$  odgovarajuće vrednosti na sobnoj temperaturi.



Slika 7 – Promena modula elastičnosti sa porastom temperature

Dijagrami pokazuju superiornost nerđajućih čelika u pogledu promene naponsko-deformacijskih karakteristika na povišenim temperaturama, posebno u temperaturnoj oblasti od 600-800°C, gde se obično zahteva požarna otpornost od 30 min. Tako je na temperaturi od 800°C odnos granica razvlačenja  $f_y(\theta)/f_y(20)$  skoro četiri puta veća, a odnos modula elastičnosti  $E(\theta)/E(20)$  skoro sedam puta veći nego kod ugljeničnih čelika. Takođe se može uočiti na slici 6, da je faktor redukcije granice razvlačenja kod nerđajućih čelika na nižim temperaturama veći od jedinice. Ovo je posledica monotone zakrivljenosti radne krive kod nerđajućih čelika i činjenice da se za granično stanje vatrootpornosti (gde je uobičajena pojava velikih deformacija) za

konvencionalnu granicu razvlačenja usvaja napon koji odgovara plastičnoj deformaciji od 2% umesto 0,2%.

Niz eksperimentalnih ispitivanja pokazalo je da je vatrootpornost nerđajućih čelika znatno veća od ugljeničnih što može uticati na smanjenje pa i eliminisanje potrebe za različitim sistemima zaštite od požara. Pored značajnih odstupanja u mehaničkom ponašanju nerđajućih i ugljeničnih čelika na povišenim temperaturama, značajna odstupanja se javljaju i u pogledu termičkih karakteristika kao što su specifična toplota, toplotna provodljivost i termičke dilatacije. Za potrebe proračuna, kod nerđajućih čelika usvojena je vrednost specifične toplote od 500 J/kgK, dok je kod ugljeničnih 600 J/kgK.

Sa projektantskog aspekta važna fizička osobina je koeficijent termičke dilatacija materijala  $\alpha$ , koja je kod ugljeničnih čelika  $1,2 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ . Nerđajući čelici su poznati po izraženim toplotnim deformacijama. Tako, koeficijent termičke dilatacije čelika klase 1.4301 iznosi  $1,6 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ . Viši nivo termičkih dilatacija dovodi do povećanja deformacija. Ukoliko su uslovi oslanjanja takvi da se elemenat ne može slobodno širiti dovodi do povećanja napona. Ovo je, svakako, jedna od nepovoljnih karakteristika nerđajućeg čelika.

Nerđajući čelici, pre svega austenitni, imaju visoku duktilnost i visoku otpornost na udare. Zbog toga je njegova primena posebno opravdana u konstrukcijama kao što su *off-shore* platforme, konstrukcije koje su

potencijalno izložene udaru od ekspozije, u železnici i sl. Nivo duktilnosti u nerđajućim čelicima zavisi od hemijskog sastava materijala, termičke obrade i nivoa hladnog oblikovanja.

Građevinska industija je veliki proizvođač, ali i veliki potrošač otpadnog materijala. Nerđajući čelik i kao otpadni materijal ima visoku cenu, poseduje odličnu izdržljivost, pa stoga nudi široke mogućnosti ponovne primene i reciklaže, što ima praktičan pa samim tim i ekološki i ekonomski značaj.

## **4. SPECIFIČNOSTI PRORAČUNA**

### **4.1 Pregled postojeće tehničke regulative**

Rani razvoj teorijskih osnova i metoda proračuna ovakvih konstrukcija zasnovan je na pionirskim istraživanjima Džonsona i Vintera na Korneli Univerzitetu u SAD. Kao rezultat ovih analiza, 1968. godine objavljen je od strane Američkog instituta za gvožđe i čelik (*AISI*) propis pod imenom „Odredbe za projektovanje konstruktivnih elemenata od hladno oblikovanih nerđajućih čelika“. Propis je revidovan 1974. godine. Dalja istraživanja od strane Američkog društva građevinskih inženjera (*ASCE*) dovode do publikovanja novog standarda i to prvi put 1991. godine i ponovo kao revidovano izdanje 2002. godine. Ovaj standard efikasno je zamenio posto-

jeći *AISI* propis koji je bio na snazi u Severnoj Americi. Godine 1988. u industrijski razvijenim zemljama Evrope, započet je zajednički projekat pod rukovodstvom Instituta za čelične konstrukcije (*SCI - Steel Construction Institute*) sa ciljem harmonizacije i usaglašavanja nacionalnih tehničkih propisa u oblasti projektovanja konstrukcija od nerđajućih čelika. Nakon usaglašavanja rezultata ispitivanja, 1994. Godine Evro Inoks (*Euro Inox*) objavljuje „Priručnik za projektovanje konstrukcija od nerđajućeg čelika“, zasnovan na terminologiji britanskih propisa (*BS - British Standard*) i konceptu graničnih stanja. U aprilu 1996. godine stupio je na snagu Evropski (pred)standard ENV1993-1-4 pod nazivom „Opšta i dodatna pravila za projektovanje konstrukcija od nerđajućeg čelika“, sa ciljem da preraste u Evropski standard (EN) sa obaveznom primenom. U Japanu je 1995. godine objavljen standard koji se isključivo odnosi na zavarene preseke i koji ima ograničenu primenu samo u tom delu sveta. 1997. godine publikovan je odgovarajući standar u Južnoj Africi, zasnovan na Kanadskim propisima za hladno oblikovane ugljenične čelike. Znatno kasnije, 2001. godine standard je publikovan i u Australiji (Novom Zelandu).

Osnove proračuna elemenata od nerđajućih čelika analogne su proračunu konstrukcija od nerđajućeg čelika, ali sa izvesnim modifikacijama koje su rezultat fizičko-mehaničkih specifičnosti ovog materijala. Danas su na



snazi evropski (EN 1993-1-4), američki (SEI/ASCE 8-02) i australski (AS/NZS 4673) standardi koji su još uvek nepotpuni, pa kao takvi podložni su daljoj reorganizaciji.

## **4.2 Osnove proračuna prema standardu EN 1993-1-4**

Evropski standard za proračun konstrukcija od nerđajućih čelika, EN 1993-1-4, ima devet poglavlja i tri aneksa A, B i C. Obim ovog standarda je daleko manji u odnosu na onaj koji važi za ugljenične čelike, obzirom da su ovde pre svega date modifikacije metoda proračuna datih u standardu EN 1993-1-1, koji važi za ugljenične čelike.

Razlike u ponašanju, pa samim tim i u proračunu elemenata od nerđajućih čelika i onih od ugljeničnih, leže pre svega u prirodi naponsko-deformacijskih karakteristika, veličinama geometrijskih imperfekcija i zaostalih napona. Početne geometrijske imperfekcije kod elemenata od nerđajućih čelika imaju u opštem slučaju niže vrednosti zbog strožije kontrole finalnog proizvoda, kako bi se eliminisali svi potencijalni faktori koji mogu negativno da utiču na izgled elementa, što je i potvrđeno pojedinim ispitivanjima. Ispitivanja koja su obuhvatila merenja nivoa zaostalih napona u tehnološkim presecima proizvodnje su pokazala da su ove vrednosti slične onima kod ugljeničnih čelika.

Kontrola graničnih stanja nosivosti podrazumeva kontrolu nosivosti poprečnih preseka i nosivosti elemenata.

Treba istaći da su vrednosti parcijalnih koeficijenata sigurnosti za materijal za 10% veće u odnosu na vrednosti koje su date standardom EN 1993-1-1.

Prvi korak u proračunu je definisanje klase preseka. Klasa preseka je uslovljena fenomenom izbočavanja pritisnutih delova poprečnog preseka, pa stoga zavisi od svih činioca od kojih zavisi i otpornost na izbočavanje: vitkosti razmatranog dela preseka, uslova oslanjanja, načina naprezanja i granice razvlačenja. Vitkost razmatranog dela preseka je jednaka odnosu relevantne širine i debljine dela preseka, i ona treba da bude manja od granične vitkosti za klasu 1, 2 ili 3, da bi presek toj klasi i pripadao. Delovi preseka koji ne zadovoljavaju granice za klasu 3 treba da se klasifikuju kao klasa 4. Kod poprečnih preseka klase 4 neophodno je da se uzme u obzir redukcija nosivosti usled uticaja izbočavanja, što može da se sprovede primenom koncepta efektivne širine, prema EN 1993-1-5. Poređenjem vrednosti graničnih vitkosti sa vrednostima za ugljenične čelike, uočavaju se niže vrednosti kod nerđajućih čelika (tabela 3).

Tabela 3 – Poređenje graničnih vitkosti preseka od ugljeničnih i nerđajućih čelika

Unutrašnji pritisnuti delovi preseka				
	Deo izložen čistom savijanju		Deo izložen pritisku	
Klasa preseka	Ugljenični čelici	Nerđajući čelici	Ugljenični čelici	Nerđajući čelici
1	$c/t = 72\varepsilon$	$c/t = 56\varepsilon$	$c/t = 33\varepsilon$	$c/t = 25,7\varepsilon$
2	$c/t = 83\varepsilon$	$c/t = 58,2\varepsilon$	$c/t = 38\varepsilon$	$c/t = 26,7\varepsilon$
3	$c/t = 124\varepsilon$	$c/t = 74,8\varepsilon$	$c/t = 42\varepsilon$	$c/t = 30,7\varepsilon$
Konzolni delovi preseka (deo izložen pritisku)				
Klasa preseka	Ugljenični čelici		Nerđajući čelici (hladno oblikovani)	
1	$c/t = 9\varepsilon$		$c/t = 10\varepsilon$	
2	$c/t = 10\varepsilon$		$c/t = 10,4\varepsilon$	
3	$c/t = 14\varepsilon$		$c/t = 11,9\varepsilon$	
	$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$		$\varepsilon = \sqrt{235/f_y \cdot E/210000}$	

U proračunu nosivosti poprečnih preseka koji su opterećeni na zatezanje uočava se razlika u izrazu kojim se izračunava granična proračunska nosivost neto preseka na mestu rupa za spojna sredstva. U izrazu datom u EN 1993-1-1, proizvod neto površine preseka na mestu slabljenja, i čvrstoće na zatezanje umanjen je za 10%, dok kod nerđajućih čelika ovaj procenat nije eksplicitno dat, već ga opisuje izraz u funkciji broja zavrtnjeva u preseku

i ukupnog broja zavrtnjeva, prečnika rupe i razmaka između zavrtnjeva.

Osnovne formulacije u dokazu stabilnosti konstruktivnih elemenata prema Evropskom standardu za nerđajuće čelike analogne su preporukama datim u EN 1993-1-1. Kod centrično pritisnutih elemenata, u zavisnosti od oblika izvijanja (fleksiono ili torzionofleksiono izvijanje), načina obrade i tipa preseka, koeficijent imperfekcije  $\alpha$  bira se za tri krive izvijanja b, c i d. Takođe, vrednosti graničnih vitkosti zavise od tipa preseka i mogu biti ili 0,2 ili 0,4. Kod nosača opterećenih na savijanje, eksplicitno je naznačeno da odredba 6.3.2.3 Evrokoda EN 1993-1-1, koja se odnosi na izbor krivi izvijanja kod nerđajućih čelika nije primenljiva. Razlika postoji i u izrazu kojim se izračunava koeficijent  $\Phi_{LT}$ , kao i u veličini koeficijenta imperfekcije  $\alpha_{LT}$  koji ima vrednost 0,34 kod hladno oblikovanih i šupljih profila, odnosno 0,76 kod zavarenih otvorenih preseka. Krive izvijanja kalibrisane su svim raspoloživim rezultatima ispitivanja u cilju dobijanja što jasnije slike. Stiče se utisak da je kontrola nosivosti ekscentrično pritisnutih elemenata na izvijanje jednostavnija i znatno manjeg obima u odnosu na proračun za ugljenične čelike. Izrazi za interakcione koeficijente  $k$ , jednostavniji su i nisu u direktnoj zavisnosti sa oblikom momentnog dijagrama kako je to slučaj sa ugljeničnim čelicima. Jednostavnosti radi, i da bi se izbegao iterativan proračun, kao i radi

konzistencije sa ugljeničnim čelicima, eksplicitno je isključen u proračunu uticaj postepene plastifikacije materijala u formulacijama izvijanja elementa. Treba istaći da u evropskom standardu ne postoji ni jedna odredba koja se odnosi na proračun nosivosti centrično pritisnutih elemenata složenog višedelnog preseka.

Pri proračunu deformacija kod fleksibilnih konstrukcija od nerđajućeg čelika, treba imati u vidu naponsko-deformacijske karakteristike materijala i nižu vrednost početnog modula elastičnosti u odnosu na ugljenične čelike. Preporuka je da se proračun deformacija zasniva na efektivnom preseku (kod preseka klase 4) i na redukovanoj vrednosti modula elastičnosti. U svim standardima, redukovani modul elastičnosti  $E_{s,ser}$  se uzima kao srednja vrednost sekantnog modula elastičnosti  $E_{s,1}$  i  $E_{s,2}$ , koji zavisi od nivoa maksimalnih eksploatacionih napona zatezanja, odnosno pritiska, respektivno, u ivičnim vlaknima preseka:

$$E_{s,ser} = \frac{E_{s,1} + E_{s,2}}{2} \quad (3)$$

$$E_{s,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left( \frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)^n} \quad (4)$$

gde su:

$\sigma_{i,Ed\ ser}$  za  $i=1,2$  eksploatacioni proračunski napon zatezanja odnosno pritiska,

$n$  koeficijent koji zavisi od pravca na naprezanja u odnosu na vlakna materijala.

### 4.3 Veze

Specifičnosti nerđajućih čelika dolaze do izražaja i u oblasti izvođenja i oblikovanja detalja, bilo da su predviđeni kao veze sa zavrtnjevima ili u zavarenoj izradi. Osnovni zahtev koji ovaj materijal mora da zadovolji jeste kroziona otpornost koja treba da obezbedi trajnost konstrukcije. Zato treba izbegavati veze koje treba da se izvedu sa zavrtnjevima od ugljeničnih čelika, imajući u vidu moguću pojavu kontaktne korozije, ili u protivnom sprovesti odgovarajuće mere (primena različitih umetaka) da do nje ne dođe. Kod veza ostvarenih zavarivanjem primenjuju se i sučeoni i ugaoni šavovi. Njihova čvrstoća je definisana zateznom čvrstoćama materijala šava i osnovnog materijala. Zavarivanje se ostvaruje uobičajenim metodama (TIG postupak). Pri realizaciji spoja treba ispoštovati dva osnovna uslova: treba uraditi dobro zavaren spoj koji ima istu otpornost prema koroziji kao i osnovni materijal i treba smanjiti deformaciju pri zavarivanju na minimum. U tu svrhu treba što više smanjiti zagrevanje, jer prethodno

zagrevanje nije ni potrebno ni poželjno. Austenitni nerđajući čelici imaju veliki koeficijent termičke dilatacije a slabu toplotnu provodljivost, pa jako zagrevanje dovodi do prevelikih deformacija, a samim tim i do pojave zaostalih napona. Česta je situacija da treba zavariti nerđajući čelik za konstrukciji, ugljenični. Austenitni čelik se lako zavaruje za većinu ugljeničnih i niskolegiranih čelika. Pri izboru postupka treba voditi računa o efektu rastvaranja dodatnog metala. Prihvaćeni postupak zastupa korišćenje visokolegiranih austenitinih elektroda za spoj od različitih materijala, čime se obezbeđuju adekvatne mehaničke osobine i otpornost prema koroziji. Posle zavarivanja, nečistoću treba ukloniti sa ugljeničnog čelika. Zaštitni premaz koji se koristi kod ugljeničnog čelika treba primeniti i na zavareni spoj, kao i na neposrednu zonu nerđajućeg čelika.

## **5. ZAKLJUČAK**

Specifičan sastav metala i specifičan tretman proizvodnje elemenata i čitave konstrukcije neminovno dovodi do više cene nerđajućeg čelika kao osnovnog materijala. Zato postoji opravdana zainteresovanost da se materijal konstruktivno najbolje iskoristi i racionalizuje.

Koroziona otpornost, kao i povišena vatrootpornost čine ga primarnim materijalom za konstrukcije u agresivnim sredinama. Značajan napredak u primeni nerđajućih

čelika u savremenom konstrukterstvu učinjen je poslednjih desetak godina, pre svega publikacijom značajnog broja istraživanja i tehničkih propisa. U svetu se sve više pažnje posvećuje takozvanim *life-cycle* analizama primenjenih materijala i konstruktivnih sistema. Ovaj pristup oceni konstrukcije ima za cilj procenu funkcionalnosti i isplativosti konstrukcije kroz eksploatacioni vek, a ne samo u početnoj fazi. U tom svetlu, nerđajući čelik može imati značajnu prednost u odnosu na ostale konstruktivne materijale.

Često se kod konstruktivnih elemenata ističu veze, što daje poseban estetski efekat. Konstruktivne forme koje na taj način nastaju imaju kvazianatomske kvalitete uz jasan konstruktivni sistem. Kako površine elemenata mogu biti glatke ili sjajne, matirane, rupičaste, obrđene četkama, mogu bitno da utiču na reflektovanje svetlosti, pa se na taj način mogu postići dodatni efekti. Zbog toga, nerđajući čelik polako postaje uzdanica u arhitektonskom oblikovanju savremenih zgrada.



## 6. LITERATURA

- [1] EN 1993-1-4:2006 "Proračun čeličnih konstrukcija – Deo 1.4: Opšta pravila-Dodatna pravila za nerđajuće čelike", Brisel 2006
- [2] Design Manual For Structural Stainless Steel (Third Edition) / Euro Inox and The Steel Construction Institute, 2006.
- [3] Design Manual for Structural Stainless Steel - Commentary (Third Edition) / Euro Inox and The Steel Construction Institute, 2006.
- [4] L Gardner: "The use of stainless steel in structures", Progress in Structural Engineering and Materials, 2005, str 45-55.
- [5] EN 1993-1-1:2005 "Proračun čeličnih konstrukcija – Deo 1.1: Opšta pravila i pravila za zgrade", Beograd, februar 2006