

Primljen / Received: 17.3.2019.

Ispravljen / Corrected: 9.5.2019.

Prihvaćen / Accepted: 16.10.2019.

Dostupno online / Available online: 10.12.2023.

Usporedba metoda vlačnog ispitivanja čelika za armiranje

Autori:

Izv.prof.dr.sc. **Željko Smolčić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Rijeci

Građevinski fakultet

zeljko.smolcic@uniri.hr

Autor za korespondenciju

**Robert Skender**, ing.građ.

Institut IGH d.d.

robert.skender@igh.hr

Stručni rad

Željko Smolčić, Robert Skender

Usporedba metoda vlačnog ispitivanja čelika za armiranje

U radu je prikazana usporedba metoda vlačnog ispitivanja čelika za armiranje prema normi HRN EN ISO 15630-1:2010 koja se poziva na normu HRN EN ISO 6892-1:2016. Mehanička svojstva čelika ovisna su o brzini nanošenja opterećenja. Zbog toga je prema normi HRN EN ISO 6892-1:2016 preporučena metoda A, koja koristi kontrolu brzine deformacije. Laboratorijsko vlačno ispitivanje čelika za armiranje B500B provedeno je primjenom metoda A1, A2 i B norme HRN EN ISO 6892-1:2016. U radu će se pokazati postoji li nužna primjena metode A1 norme HRN EN ISO 6892-1:2016 ili se zadovoljavajući rezultati dobivaju korištenjem metoda A2 i B norme HRN EN ISO 6892-1:2016. Rezultati ispitivanja pokazali su da neovisno o primjenjenoj metodi ispitivanja možemo očekivati gotovo iste rezultate ispitivanja.

Ključne riječi:

čelik za armiranje, vlak, norma, laboratorijsko ispitivanje, metode

Professional paper

Željko Smolčić, Robert Skender

Comparison of tensile testing methods of steel for the reinforcement

This paper presents a comparison of tensile testing methods of steel for the reinforcement according to HRN EN ISO 15630-1:2010 referring to the norm HRN EN ISO 6892-1:2016. The mechanical properties of the steel are dependent on the test speed. Therefore, according to norm HRN EN ISO 6892-1:2016, the recommended is method A, which uses strain control. The laboratory tensile testing of steel for the reinforcement B500B was tested using the methods A1, A2 and B of norm HRN EN ISO 6892-1:2016.

Key words:

steel for the reinforcement, tension, norm, laboratory test, methods

1. Uvod

Norme za ispitivanje čelika za armiranje trebaju osigurati da čelik za armiranje jednake kvalitete diljem svijeta pokazuje jednake fizikalne, kemijske i mehaničke značajke, bez obzira na zemlju porijekla. Zbog toga su ispitivanja mehaničkih svojstava čelika za armiranje nužna u procesu određivanja zadovoljava li čelik za armiranje deklarirana svojstva, osiguravajući pri tome kvalitetu proizvoda. Ispitivanje mehaničkih svojstava čelika za armiranje može se podijeliti u nekoliko osnovnih kategorija: vlačno ispitivanje, ispitivanje na savijanje, tlačno ispitivanje i ispitivanje na zamor.

Uzimanje uzoraka, priprema ispitnih uzoraka i ispitivanje svojstava čelika za armiranje u Hrvatskoj provodi se prema normi HRN EN ISO 15630-1:2010 [1]. Osnovna metoda vlačnog ispitivanja čelika za armiranje dana je u normi HRN EN ISO 15630-1:2010 [1] koja se dalje poziva na normu HRN EN ISO 6892-1:2016 [2], koja je osnovna norma za vlačno ispitivanje metalnih materijala pri sobnoj temperaturi.

U normi HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] definirane su dvije metode za vlačno ispitivanje metalnih materijala koje se nazivaju metoda A i metoda B. Metoda B bazira se na održavanju konstantne brzine naprezanja u elastičnom području (podešavanjem brzine pomaka pomične grede), nakon toga ispitivanje se provodi uz kontrolu pomaka pomične grede uređaja za ispitivanje (kidalica). Metoda A se dijeli dalje na dvije metode, metodu A1 i metodu A2. Metoda A1 koristi kontrolu brzine deformacije u zatvorenoj petlji (engl. *closed loop*) do trenutka određivanja granice popuštanja. Nakon određivanja granice popuštanje pa sve do loma kontrolira se pomak pomične grede. Metoda A2 koristi kontrolu brzine deformacije u otvorenoj petlji (engl. *open loop*) koja se postiže kontrolom pomaka pomične grede do trenutka određivanja granice popuštanja. Nakon određivanja granice popuštanje pa sve do loma koristi se kontrola pomaka pomične grede.

Kod čelika, kao i kod većine materijala, mehanička svojstva su ovisna o brzini nanošenja opterećenja. Kod nekih metala granica popuštanja je vrlo osjetljiva na brzinu ispitivanja, tako da je bitno minimizirati varijaciju brzine ispitivanja do trenutka određivanja granice popuštanja kako bi se kod rezultata minimizirala nepouzdanost mjerenja. Osim toga, poznato je da rezultati ispitivanja čelika na vlak ovise i o krutosti uređaja za ispitivanje (kidalica) [3]. Kruća kidalica pri istoj brzini pomaka pomične grede ima veće brzine deformacije na samom uzorku, što ima za posljedicu i više vrijednosti mehaničkih svojstava (granica popuštanja).

Zbog toga je metoda A preporučena metoda ispitivanja prema normi HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] koja se može bazirati na kontroli brzine deformacije (metoda A1) ili na procijenjenoj brzini deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka (metoda A2). Kod metoda A1 i A2 definirane su stroge granice tolerancije na brzine deformacije i iznose $\pm 20\%$.

Više informacija o utjecaju brzine ispitivanja na rezultate vlačnog ispitivanja čelika dano je u literaturi [4], a problem odabira

mjerne baze i njegovog utjecaja na rezultate vlačnog ispitivanja u literaturi [4, 5].

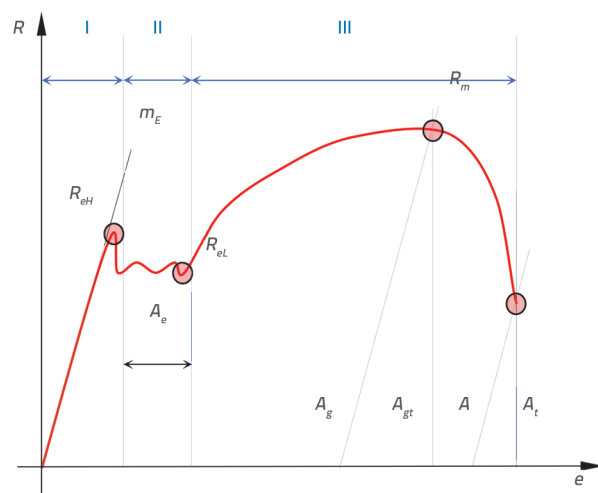
U radu će se usmjeriti na metodu A1 koja koristi kontrolu brzine deformacije u zatvorenoj petlji (engl. *closed loop*), a za čije je funkcioniranje potrebna povratna informacija iz ekstenzometra. Ispitivanja će se provesti po metodama A1, A2 i B norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2], i usporedit će se nastale razlike primjenom različitih metoda ispitivanja. Ukupno je vlačno ispitano devet uzoraka čelika za armiranje (tri uzorka po svakoj metodi ispitivanja). Vlačno ispitivanje čelika za armiranje provedeno je na univerzalnom tlačno-vlačnom uređaju za ispitivanje (kidalica) Zwick Z 600E koji je nabavljen projektom RISK [6] i koji ispunjava stroge uvjete ispitivanja prema metodi A1 norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2].

Cilj je rada usporediti metode vlačnog ispitivanja čelika za armiranje uz primjenu različitih metoda ispitivanja. Na osnovi analize rezultata vlačnog ispitivanja čelika za armiranje pokušat će se pokazati je li nužno primjenjivati metodu A1 norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] ili zadovoljavajuće rezultate možemo dobiti i metodom A2 i B norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2].

2. Pregled norme HRN EN ISO 15630-1:2010

U normi HRN EN ISO 15630-1:2010 [1] dane su metode ispitivanja čelika za armiranje: vlačno ispitivanje, ispitivanje na savijanje, ispitivanje na povratno savijanje, ispitivanje na zamor, kemijska analiza i mjerenje geometrijskih svojstava. U ovom poglavlju rada opisano je samo vlačno ispitivanje čelika za armiranje.

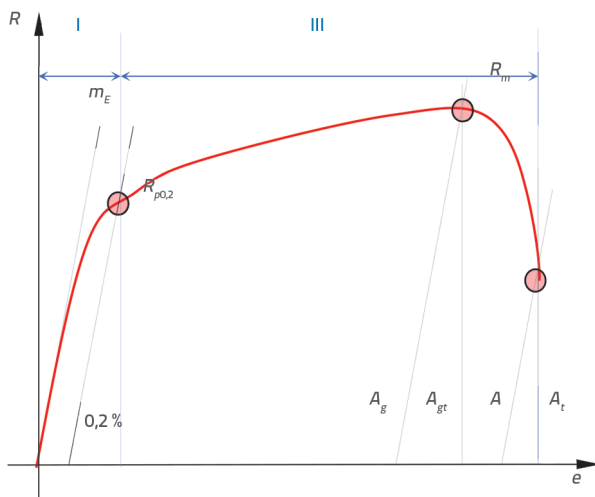
Način označavanja veličina u normi HRN EN ISO 15630-1:2010 [1] i HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] identičan je, pa je i u ovom radu to preuzeto [1, 2]. Prikaz dijagrama naprezanje-deformacija čelika s izraženom granicom popuštanja dan je na slici 1., a prikaz dijagrama naprezanje-deformacija čelika bez izražene granice popuštanja na slici 2.



Slika 1. Dijagram naprezanje-deformacija čelika s izraženom granicom popuštanja

Ako nije drugačije specificirano ili zahtijevano normom proizvoda, uzorak za ispitivanje se odsijeca iz šipke, užeta ili žice u stanju u kojem je primljen na ispitivanje. U slučaju kada je uzorak za ispitivanje savijen, potrebno ga je ispraviti uz minimalnu pojavu plastične deformacije.

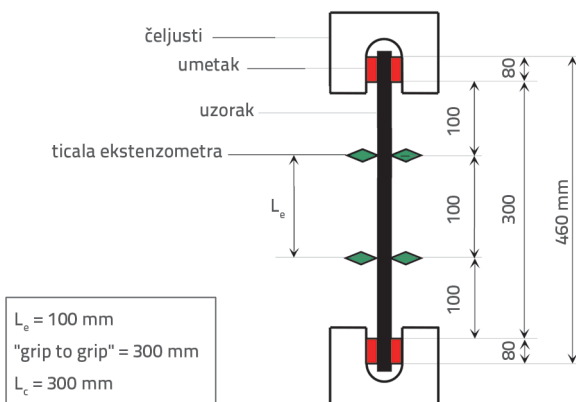
Pri određivanju mehaničkih svojstava kod vlačnog ispitivanja, uzorak može biti podvrgnut umjetnom starenju, ovisno o zahtjevima norme proizvoda. Ako norma proizvoda ne specificira postupak umjetnog starenja, trebaju se primijeniti sljedeći uvjeti: zagrijavanje uzorka na 100 °C, zadržavanje te temperature ± 10 °C tijekom 1h+15 min (60 do 75min) i nakon toga se hladi na mirnom zraku do sobne temperature.



Slika 2. Dijagram naprezanje-deformacija čelika bez izražene granice popuštanja

Slobodna duljina uzorka između čeljusti (engl. *grip to grip*) treba biti dovoljna za određivanje A (zaostale deformacije nakon loma izražene u postocima).

Uređaj za ispitivanje (kidalica) mora biti verificiran i kalibriran u skladu s normom HRN EN ISO 7500-1:2007/Ispr.1:2009 [7] i treba biti barem klase 1.



Slika 3. Uzorak u hidrauličnim čeljustima

Ako se upotrebljava ekstenzometar, on mora biti barem klase 1 u skladu s EN ISO 9513:2012 [8] za određivanje $R_{p0,2}$ (granica popuštanja pri zaostaloj deformaciji od 0,2 %) i barem klase 2 za određivanje A_{gt} (ukupna deformacija pri najvećoj sili izražena u postocima). Ekstenzometar koji se koristi za određivanje A_{gt} (ukupna deformacija pri najvećoj sili izražena u postocima) treba imati L_e (mjerna duljina ekstenzometra) od najmanje 100 mm (slika 3.).

Vlačno ispitivanje treba provesti prema normi HRN EN ISO 6892-1:2016 [2]. Za određivanje $R_{p0,2}$ (granica popuštanja pri zaostaloj deformaciji od 0,2 %), ako je ravni dio dijagrama naprezanje-deformacija ograničen ili nije jasno definiran, treba se primijeniti jedna od sljedećih metoda:

- procedura preporučena u normi HRN EN ISO 6892-1:2016 [2]
- ravni dio dijagrama naprezanje-deformacija smatra se linija koja spaja točke koje odgovaraju $0,2 \cdot F_m$ (najveća sila u vlačnom ispitivanju) i $0,5 \cdot F_m$.

Ispitivanje se može smatrati nevrijedećim ako se nagib linije razlikuje za više od 10 % od teorijske vrijednosti modula elastičnosti.

Za proračun vlačnih svojstava R_{eH} (gornja granica popuštanja) ili $R_{p0,2}$ (granica popuštanja pri zaostaloj deformaciji od 0,2 %) i R_m (vlačna čvrstoća) koristi se S_n (nominalna površina poprečnog presjeka), osim ako je drugačije naznačeno u relevantnoj normi proizvoda.

Pojavi li se lom u čeljustima ili na razmaku od čeljusti za manje od 20 mm ili d (nazivni promjer šipke) (ako je on veći od 20 mm), ispitivanje se smatra neprihvatljivim.

Za određivanje A (zaostale deformacije nakon loma izražene u postocima), L_0 (početna mjerna duljina) treba biti jednaka $5 \cdot d$ (nazivni promjer šipke), osim ako je drugačije naznačeno u relevantnoj normi proizvoda.

Za određivanje A_{gt} (ukupna deformacija pri najvećoj sili izražena u postocima) može se ne primijeniti norma HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] s sljedećom modifikacijom:

- ako je A_{gt} određen ručnom metodom nakon loma, A_{gt} se računa pomoću izraza (1):

$$A_{gt} = A_g + \frac{R_m}{2000} \quad (1)$$

gdje je A_g zaostala deformacija pri najvećoj sili izražena u postocima.

3. Pregled norme HRN EN ISO 6892-1:2016

Norma HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] osnovna je norma za vlačno ispitivanje metalnih materijala pri sobnoj temperaturi. U ovom je poglavlju usmjerenost na vrlo stroge uvjete koje moraju ispuniti uređaji za ispitivanje i ekstenzometar. Normom HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] predviđene su dvije metode ispitivanja: metoda A i metoda B. Budući da je metoda A preporučena prema normi HRN EN ISO 6892-1:2016 [2], težište se stavlja

na metodu A, a posebno na metodu A1. Ona je vrlo zahtjevna zbog mogućnosti ispitivanja na vlak kontrolom deformacije u zatvorenoj petlji (engl. *closed loop*) za čije je funkcioniranje potrebna povratna informacija iz ekstenzometra.

Ispitivanje treba provesti na sobnoj temperaturi između 10 °C i 35 °C, osim ako drugačije nije navedeno. Ako se ispitivanje provodi pod kontroliranim uvjetima, tada temperatura treba biti $23 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$.

3.1. Zahtjevi za uređaj za ispitivanje i ekstenzometar

Zahtjevi norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] prema uređajima za ispitivanje (kidalice) i ekstenzometru su vrlo strogi.

Mjerni sustav sile uređaja za ispitivanje (kidalice) treba biti u skladu s normom HRN EN ISO 7500-1:2007/Ispr.1:2009 [7], i to bar klase 1. Pri određivanju R_p (granice popuštanja pri zaostaloj deformaciji) ili R_t (granice popuštanja pri ukupnoj deformaciji) ekstenzometar treba biti u skladu s normom EN ISO 9513:2012 [8], i to bar klase 1, u traženom području. Za određivanje ostalih mehaničkih svojstava (s deformacijom većom od 5 %) ekstenzometar treba biti u skladu s normom EN ISO 9513:2012 [8], i to bar klase 2, u traženom području.

Kad se određuje modul elastičnosti čelika za armiranje, mjerni sustav sile uređaja za ispitivanje (kidalice) treba biti u skladu s normom HRN EN ISO 7500-1:2007/Ispr.1:2009 [7], i to bar klase 1, u traženom području. Pri određivanju modula elastičnosti čelika za armiranje, ekstenzometar treba biti u skladu s normom EN ISO 9513:2012 [8], i to bar klase 0,5, u traženom području.

3.2. Brzine ispitivanja bazirane na brzini deformacije (metoda A)

Cilj korištenja metode A je minimiziranje varijacije rezultata ispitivanja tijekom određivanja parametara koji su osjetljivi na brzinu ispitivanja, a sve radi minimiziranja nepouzdanosti mjerenja. Definirana su dva različita tipa kontrole brzine deformacije, metoda A1 i metoda A2. Metoda A1 u zatvorenoj petlji (engl. *closed loop*) uključuje kontrolu brzine deformacije e_{Le} i bazirana je na povratnoj informaciji iz ekstenzometra. Metoda A2 u otvorenoj petlji (engl. *open loop*) uključuje kontrolu procijenjene brzine deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka e_{Lc} koja se postiže pomoću kontrole brzine pomaka pomične grede v_c izračunane množenjem zahtijevane brzine deformacije s duljinom ispitnog dijela uzorka L_c .

Brzine deformacije moraju biti u skladu sa sljedećim zahtjevima:

- a) Do trenutka određivanja R_{eH} (gornja granica popuštanja), R_p (granica popuštanja pri zaostaloj deformaciji) ili R_t (granica popuštanja pri ukupnoj deformaciji) treba se koristiti brzina deformacije kod metode A1, ili brzine pomaka pomične grede kod metode A2. U tom području potrebno je upotrijebiti ekstenzometar za mjerenje deformacije uzorka kao bi se eliminirao utjecaj krutosti kidalice na rezultate ispitivanja [3]. Ako kidalica ne može kontrolirati brzinu deformacije, može se primijeniti metoda A2.

- b) Tijekom diskontinuiranog popuštanja treba se koristiti procijenjena brzina deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka. U ovom području nemoguće je kontrolirati brzinu deformacije pomoću ekstenzometra zato jer se lokalno popuštanje može dogoditi izvan mjerne duljine ekstenzometra L_e . Potrebna procijenjena brzina deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka može se održavati u tom području dovoljno točno primjenom konstantne brzine pomaka pomične grede u otvorenoj petlji (engl. *open loop*), pomoću izraza (2):

$$v_c = L_c \cdot \dot{\epsilon}_{Lc} \quad (2)$$

- c) U području nakon R_p (granica popuštanja pri zaostaloj deformaciji) ili R_t (granica popuštanja pri ukupnoj deformaciji) ili na kraju područja popuštanja trebaju se koristiti brzine deformacije $\dot{\epsilon}_{Le}$ ili $\dot{\epsilon}_{Lc}$. Korištenje brzine deformacije $\dot{\epsilon}_{Lc}$ je preporučeno kako bi se izbjegli problemi koji nastaju u trenutku dostizanja čvrstoće uzorka, u slučaju da se suženje presjeka dogodi izvan mjerne duljine ekstenzometra L_e .

3.2.1. Brzine deformacije za određivanje R_{eH} ili R_p ili R_t

Brzinu deformacije $\dot{\epsilon}_{Le}$ treba održavati konstantnom do trenutka određivanja R_{eH} (gornja granica popuštanja) ili R_p (granica popuštanja pri zaostaloj deformaciji) ili R_t (granica popuštanja pri ukupnoj deformaciji). Tijekom određivanja ovih svojstava materijala brzina deformacije e_{Le} treba biti u jednom od sljedeća dva raspona:

- raspon 1: $\dot{\epsilon}_{Le} = 0,00007 \text{ s}^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20 \%$
- raspon 2: $\dot{\epsilon}_{Le} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20 \%$ (preporučeno).

Ako kidalica ne može kontrolirati brzinu deformacije direktno, treba primijeniti metodu A2.

3.2.2. Brzine deformacije za određivanje R_{eL} i A_e

Procijenjenu brzinu deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka e_{Lc} treba održavati konstantnom tijekom određivanja R_{eL} (donja granica popuštanja) i A_e (deformacija granice popuštanja izraženo u postocima) sve do kraja diskontinuiranog popuštanja. Tijekom određivanja ovih svojstava materijala brzina deformacije $\dot{\epsilon}_{Lc}$ treba biti u jednom od sljedeća dva raspona:

- raspon 2: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20 \%$ (preporučeno kada se određuje R_{eL})
- raspon 3: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,002 \text{ s}^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20 \%$.

3.2.3. Brzine deformacije za određivanje R_m , A , A_{gt} , A_g i Z

Tijekom određivanja R_m (vlačna čvrstoća), A (zaostala deformacija nakon loma izražena u postocima), A_{gt} (ukupna deformacija pri najvećoj sili izražena u postocima), A_g (zaostala deformacija pri najvećoj sili izražena u postocima) i Z (suženje

površine poprečnog presjeka izraženo u postocima) procijenjena brzina deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka treba biti u jednom od sljedeća tri raspona:

- raspon 2: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20 \%$
- raspon 3: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,002 \text{ s}^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20 \%$
- raspon 4: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,0067 \text{ s}^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20 \%$ (preporučeno).

3.3. Brzine ispitivanja bazirane na brzini naprezanja (metoda B)

3.3.1. Općenito

Metoda B bazira se na održavanju konstantne brzine naprezanja u elastičnom području. Namjera metode B nije održavanje konstantne brzine naprezanja u zatvorenoj petlji kontrole sile tijekom određivanja parametara popuštanje, već samo podešavanje brzine pomaka pomične grede da bi se dostigla željena brzina naprezanja u elastičnom području (tablica 1.).

Tablica 1. Brzine naprezanja za metodu B

Modul elastičnosti materijala [MPa]	Brzine naprezanja [MPa/s]	
	minimalno	maksimalno
< 150 000	2	20
≥ 150 000	6	60

3.3.2. Gornja granica popuštanja (R_{eH})

Brzina pomaka pomične grede kidalice treba biti konstantna unutar granica brzina naprezanja definiranih u tablici 1..

3.3.3. Donja granica popuštanja (R_{eL})

Ako se određuje samo donja granica popuštanja (R_{eL}), brzina deformacije na duljini ispitnog dijela uzorka tijekom popuštanja treba biti između $0,00025 \text{ s}^{-1}$ i $0,0025 \text{ s}^{-1}$.

3.3.4. Gornja granica popuštanja (R_{eH}) i donja granica popuštanja (R_{eL})

Ako se određuju i gornja granica popuštanja (R_{eH}) i donja granica popuštanja (R_{eL}) tijekom istog ispitivanja, uvjeti za određivanje donje granice popuštanja (R_{eL}) trebaju biti u skladu s poglavljem 3.3.3.

3.3.5. Granica popuštanja pri zaostaloj deformaciji (R_p) i granica popuštanja pri ukupnoj deformaciji (R_t)

Brzine pomaka pomične grede kidalice treba biti konstantna unutar granica brzina naprezanja definiranih u tablici 1. za

elastično područje, tijekom određivanja R_p (granica popuštanja pri zaostaloj deformaciji) ili R_t (granica popuštanja pri ukupnoj deformaciji). Brzina deformacije ne smije prijeći $0,00025 \text{ s}^{-1}$.

3.3.6. Brzine ispitivanja za određivanje R_m , A , A_{gt} , A_g i Z

Tijekom određivanja R_m (vlačna čvrstoća), A (zaostala deformacija nakon loma izražena u postocima), A_{gt} (ukupna deformacija pri najvećoj sili izražena u postocima), A_g (zaostala deformacija pri najvećoj sili izražena u postocima) i Z (suženje površine poprečnog presjeka izraženo u postocima) brzina deformacije (ili ekvivalentna brzine pomaka pomične grede kidalice) ne smije biti veća od $0,008 \text{ s}^{-1}$.

4. Korištena oprema

4.1. Univerzalni tlačno-vlačni uređaj za ispitivanje (kidalica)

Vlačno ispitivanje provedeno je u Laboratoriju za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Rijeci. Korišten je univerzalni tlačno-vlačni uređaj za ispitivanje (kidalica) Zwick Z 600E (slika 4.) koji je kapaciteta 600 kN i pokretan je elektromotorom. Glavna namjena kidalice je monotono statičko ispitivanje, a osim toga moguća su i niskociklička ispitivanja do 0,5 Hz. Ispitivanja na kidalici moguće je raditi uz kontrolu sile, kontrolu pomaka i kontrolu deformacije (ekstenzometar). Brzine ispitivanja pri kontroli pomaka su od 0,001 do 320 mm/min. Kidalica je koncipirana tako da ima dva radna prostora. Gornji radni prostor primarno je namijenjen za vlačna ispitivanja, a donji za tlačna ispitivanja i ispitivanja na savijanje. Za prihvata uzoraka postoje hidraulične čeljusti (600 kN), pneumatske čeljusti (10 kN) i mehaničke čeljusti (10 kN). Uz kidalicu nabavljeni su alati i umetci za ispitivanje okruglih i pravokutnih uzoraka čelika, ispitivanje drva i ispitivanje plastike [6, 9, 10]. Strojem upravlja računalo programom testXpert II [6, 9, 10] kojim se mogu obavljati ispitivanja prema različitim normama (ISO, EN, DIN ASTM i sl.) [6, 9, 10]. Kidalica posjeduje i temperaturnu komoru u kojoj se mogu provoditi ispitivanja od -80°C do 250°C uz pomoć mehaničkih čeljusti (10 kN) [6, 9, 10]. Bitno je naglasiti da kidalica ispunjava stroge uvjete ispitivanja prema metodi A1 norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2].

4.2. Sušionik i termometar

Kondicioniranje uzoraka za vlačno ispitivanje provedeno je u Laboratoriju za prometnice Građevinskog fakulteta u Rijeci. Korišten je Memmert ventilirajući sušionik UF260 [11] koji služi za sušenje i kondicioniranje uzoraka (slika 5.). Volumen sušionika je 256 litara a radno područje temperature je od temperature okoliša $+10^\circ\text{C}$ do 300°C .

Korišten je i uređaj KIMO KISTOCK KTT310SET sa sondama P TF-50 i softverom KIC2-N [12], koji je termometar, data logger i računalni program za obradu podataka (slika 5.). Uređaj služi za mjerenje temperature s pohranom podataka. Mjerno područje

temperature ovisno o tipu sonde: za sondu K od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, za sondu J od $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ i za sondu T od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, a rezolucija je $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 4. Univerzalni tlačno-vlačni uređaj za ispitivanje (kidalica)



Slika 5. Sušionik i termometar

5. Vlačno ispitivanje čelika za armiranje

Vlačno ispitivanje čelika za armiranje provedeno je na devet uzoraka čelika za armiranje (tri uzorka po svakoj metodi ispitivanja) B500B (norma HRN EN 1992-1-1:2013 [13]) promjera 8 mm . Uzorci su dobiveni rezanjem šipke duljine 6 m i promjera 8 mm na uzorke duljine 500 mm . Prije određivanja mehaničkih svojstava uzorak je bio podvrgnut umjetnom starenju (slika 5.), opisanom u poglavlju 2. Čelik za armiranje koji

je korišten za ispitivanje kupljen je u Hrvatskoj, a zemlja porijekla čelika je Italija.

Pri vlačnom ispitivanju čelika za armiranje poželjno je podijeliti ispitivanje u pet osnovnih faza [14]: priprema za ispitivanje, predopterećenje, elastično područje (prije popuštanja), popuštanje i plastično područje (nakon popuštanja).

5.1. Priprema za ispitivanje

U hidraulične čeljusti kidalice postavljeni su ulošci za prihvat okruglih uzoraka promjera od 8 do 18 mm . Za mjerenje sile korištena je mjerna doza kapaciteta 600 kN . Mjerenje deformacije samog uzorka provodi se pomoću odgovarajućih ticala ekstenzometra. Tijekom ispitivanja mjerit će se sila na mjernoj dozi, pomak pomične grede, deformacija ekstenzometra i vrijeme trajanja ispitivanja.

Kidalicom upravlja računalo programom testXpert II [6, 9, 10] pomoću kojeg se zadaju osnovni parametri ispitivanja. Korištena je slobodna duljina uzorka između čeljusti (engl. *grip to grip*) od 300 mm uz istu duljinu ispitnog dijela uzorka $L_c=300\text{ mm}$ (slika 3.). Uzorak se postavlja najprije u donje čeljusti jer su one povezane s mjernom dozom. Uzorak se prihvaća pomoću donjih čeljusti pritiskom od 30 bara na umetke donjih čeljusti. Nakon što se je „nulirala“ mjerna doza, može se uzorak prihvatiti pomoću gornjih čeljusti pritiskom od 30 bara na umetke gornjih čeljusti. Nakon što se pokrene ispitivanje uzorka, povećava se pritisak na donjim i gornjim čeljustima s 30 bara na 100 bara. Tijekom povećanja pritiska generira se tlačna sila u uzorku i dolazi do automatskog povećanja slobodne duljina uzorka između čeljusti (engl. *grip to grip*) kako bi se sila na mjernoj dozi održavala na veličini oko 0 N .

5.2. Predopterećenje

Prije pokretanja ispitivanja poželjno je podesiti predopterećenje na veličinu manju od 5% očekivane granice popuštanja, sve s ciljem eliminiranja znatnijeg početnog pomaka uzorka pri malim silama koji nastaje zbog početnog klizanja između uzorka i umetaka čeljusti i eventualno potrebnog izravnavanja osi uzorka. Zbog toga je predopterećenje iznosilo 5 MPa (oko 1% očekivane granice popuštanja), što znači da se dijagram naprezanje-deformacija uzorka počinje crtati tek od 5 MPa . Brzina predopterećenja je bila 1 mm/min .

Nakon dostizanja predopterećenja od 5 MPa pomiču se ticala ekstenzometra na uzorak, uz „nuliranje“ pomaka ekstenzometra.

5.3. Elastično područje (područje I)

Elastično područje (područje prije popuštanja) predstavlja gotovo ravan dio dijagrama naprezanje-deformacija, a moguće početno odstupanje od pravca posljedica je daljnjeg izravnavanja osi uzorka.

Za ispitivanje koje je provedeno prema metodi A1 korištena je preporučena brzina deformacije u rasponu 2 ($\dot{\epsilon}_{le} = 0,00025\text{ s}^{-1}$), s

relativnom tolerancijom od $\pm 20\%$. Ovaj dio ispitivanja je najosjetljiviji jer je za održavanje brzine deformacije sa strogim granicama tolerancije od $\pm 20\%$ potrebno kontrolirati deformaciju u zatvorenoj petlji (engl. *closed loop*). Brzina pomaka pomične grede v_c u svakom trenutku vlačnog ispitivanja korigira se ovisno o povratnoj informaciji o veličini deformacije dobivene preko ekstenzometra. Za pravilno funkcioniranje kontrole deformacije u zatvorenoj petlji (engl. *closed loop*) ključnu ulogu obavlja kontroler kidalice.

U ovom području određuje se i modul elastičnosti čelika za armiranje prema normi HRN EN ISO 6892-1:2016 [2], kao tangens kuta nagiba pravca linearne regresije u dijagramu naprezanje-deformacija, između naprezanja 10 % od R_{eH} ili $R_{p0,2}$ i 40 % od R_{eH} ili $R_{p0,2}$.

5.4. Popuštanje (područje II)

Nakon dostizanja gornje granice popuštanja R_{eH} kod čelika s izraženom granicom popuštanja, dolazi do naglog pada u dijagramu naprezanje-deformacija. Nakon toga slijedi područje koje je karakteristično da dolazi do značajnog povećanja deformacije uz neznatne promjene naprezanja.

Zbog nemogućnosti kontroliranja brzine deformacije u ovom području pomoću ekstenzometra, potrebno je prema normi promijeniti način kontrole ispitivanja. Prelazi se s kontrole brzine deformacije na kontrolu pomaka pomične grede. U tom području ispitivanja korištena je preporučena brzina deformacije u rasponu 2 ($\dot{e}_{lc} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$), s relativnom tolerancijom od $\pm 20\%$. Potrebna procijenjena brzina deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka e_{lc} održava se automatski pomoću konstantne brzine pomaka pomične grede u otvorenoj petlji (engl. *open loop*), jednadžba (2):

$$v_c = L_c \cdot \dot{e}_{lc} = 300 \text{ mm} \cdot 0,00025 \text{ s}^{-1} = 0,075 \text{ mm/s} \quad (3)$$

U ovoj fazi ispitivanja funkcija ekstenzometra je samo mjerenje deformacije uzorka, a kontrola ispitivanja definirana je preko kontrole pomaka pomične grede konstantnom brzinom v_c (3).

5.5. Plastično područje (područje III)

Nakon područja popuštanja (plastično područje) pa sve do loma uzorka, brzina ispitivanja se prema normi može značajno ubrzati, kako bi se skratilo trajanje ispitivanja. U ovom području ispitivanja korištena je preporučena brzina deformacije u rasponu 4 ($\dot{e}_{lc} = 0,0067 \text{ s}^{-1}$), s relativnom tolerancijom od $\pm 20\%$. Potrebna procijenjena brzina deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka \dot{e}_{lc} održava se automatski pomoću konstantne brzine pomaka pomične grede u otvorenoj petlji (engl. *open loop*), izraz (2):

$$v_c = L_c \cdot \dot{e}_{lc} = 300 \text{ mm} \cdot 0,0067 \text{ s}^{-1} = 2,01 \text{ mm/s} \quad (4)$$

Ekstenzometar i u ovoj fazi ispitivanja služi samo za mjerenje deformacije uzorka, dok je kontrola ispitivanja definirana

preko kontrole pomaka pomične grede konstantnom brzinom v_c (4).

Kriterij za zaustavljanje ispitivanja je trenutak kada sila u vlačnom ispitivanju F padne za 80 % vrijednosti F_m .

U tablici 2. prikazani su korišteni tipovi kontrole vlačnog ispitivanja čelika za armiranje, kao i odgovarajuće brzine deformacije i brzine pomaka pomične grede prema metodi A1 norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2]. Zbog korištenih brzina ispitivanja, način označavanja vlačnog ispitivanja prema normi HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] bio bi ISO 6892-1:2016 A224. Oznaka A znači da je ispitivanje provedeno prema metodi A(1), a oznake 224 označavaju brzine ispitivanja u područjima I (raspon 2), II (raspon 2) i III (raspon 4).

Tablica 2. Korištene brzine ispitivanja za metodu A1

Tip kontrole ispitivanja	Brzine deformacije	Brzine pomaka pomične grede
Kontrola deformacije (raspon 2) (područje I)	$e_{le} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$	-
Kontrola pomaka (raspon 2) (područje II)	$e_{lc} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$	$v_c = 0,075 \text{ mm/s}$
Kontrola pomaka (raspon 4) (područje III)	$e_{lc} = 0,0067 \text{ s}^{-1}$	$v_c = 2,01 \text{ mm/s}$

Kod vlačnog ispitivanja prema metodi A2 norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] korištene su iste brzine kao i za metodu A1 (tablica 2.) osim u području I gdje je korištena kontrola pomaka pomične grede s brzinom deformacije.

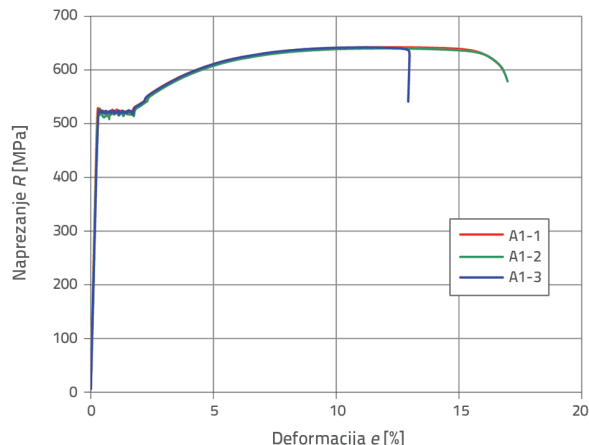
Za ispitivanje prema metodi B norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] korištene su iste brzine kao i za metodu A1 (tablica 2.), osim u području I gdje je korištena kontrola pomaka pomične grede s brzinom naprezanja od $30 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$. Korištena brzina naprezanja od $30 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ istovjetna je brzini deformacije $e_{le} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$ i dobivena je računski uzimajući u obzir krutost kidalice [9]. Treba istaknuti da vlačno ispitivanje čelika za armiranje prema normi HRN EN ISO 6892-1:2016, primjenom metode B, ima vrlo širok raspon dopuštenih brzina naprezanja za čelik od $6 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ do $60 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ (tablica 1.).

Dakle, za ispitivanje prema metodi A1 norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] korištene su preporučene brzine ispitivanja (tablica 2.). Za ispitivanje prema metodi A2 norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] u području I korištena je ista brzina deformacije, samo što je umjesto kontrole deformacije korištena kontrola pomaka pomične grede. Kod metode B norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] u području I umjesto kontrole deformacije korištena je kontrola pomaka pomične grede s ekvivalentnom brzinom naprezanja. Cilj je bio podesiti brzine ispitivanja tako da, iako služeći se različitim metodama, bude što manja razlika između brzina ispitivanja.

Na slici 6. prikazan je uzorak čelika za armiranje postavljen u hidraulične čeljusti neposredno prije pokretanja ispitivanja.



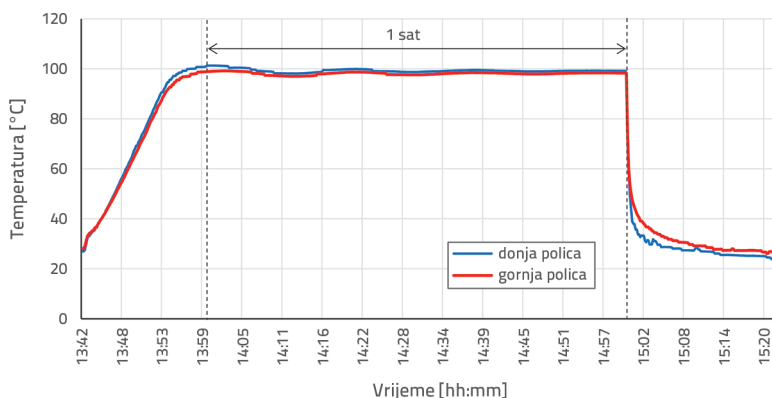
Slika 6. Uzorak neposredno prije ispitivanja



Slika 8. Dijagram naprezanje-deformacija (metoda A1)

6. Rezultati ispitivanja

Prije vlačnog ispitivanja uzorci su bili podvrgnuti umjetnom starenju (slika 5.), a vremenski zapis temperatura za dvije sonde prikazan je na slici 7. Vidljivo je da je temperatura u sušioniku iznosila oko 100°C tijekom jednog sata, uz minimalna odstupanja koja su bila unutar granica tolerancije. Na slici 8. prikazan je dijagram naprezanje-deformacija za tri vlačno ispitana uzorka čelika za armiranje prema metodi A1 norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2]. U tablici 3. prikazana su mehanička svojstva za tri uzorka čelika za armiranje ispitana prema metodi A1 norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2].



Slika 7. Temperature sonde u sušioniku

Tablica 3. Važnija mehanička svojstva čelika za armiranje (metoda A1)

Uzorak	E [GPa]	R _{eh} [MPa]	R _m [MPa]	A _{gt} [%]
A1-1	200	529	642	11,93
A1-2	192	526	640	11,78
A1-3	180	526	642	11,09
\bar{x}	191	527	642	11,60
s	10	1	1	0,45
ν [%]	5,23	0,28	0,20	3,89

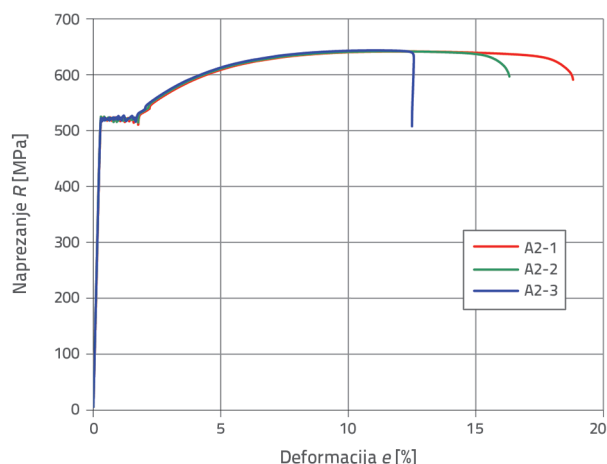
Prikazana su samo ona mehanička svojstva koja nam trebaju pri analizi i proračunu armiranobetonskih konstrukcija: modul elastičnosti (E), gornja granica popuštanja (R_{eh}), vlačna čvrstoća (R_m) i ukupna deformacija pri najvećoj sili izražena u postocima (A_{gt}). Osim toga, tablica 3. prikazuje i osnovne parametre statističke obrade rezultata za tri ($n = 3$) vlačno ispitana uzorka čelika za armiranje. Prikazane su sljedeće statističke veličine: srednja vrijednost (\bar{x}), standardna devijacija (s) i koeficijent varijacije (ν). Brzine deformacije ($\dot{\epsilon}_L$) za sva tri uzorka u prvih desetak sekundi bile su unutar strogo definiranih relativnih tolerancija od $\pm 20\%$ za raspon 2 i brzinu deformacije $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,00025\text{ s}^{-1}$. Dakle, do trenutka određivanja gornje granice popuštanja (R_{eh}) kidalica može zadovoljiti vrlo stroge uvjete koje zahtijeva metoda A1 norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2].

Slika 9. prikazuje dijagram naprezanje-deformacija za tri vlačno ispitana uzorka čelika za armiranje prema metodi A2 norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2]. Tablica 4. prikazuje mehanička svojstva za tri uzorka čelika za armiranje ispitana prema metodi A2 norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2].

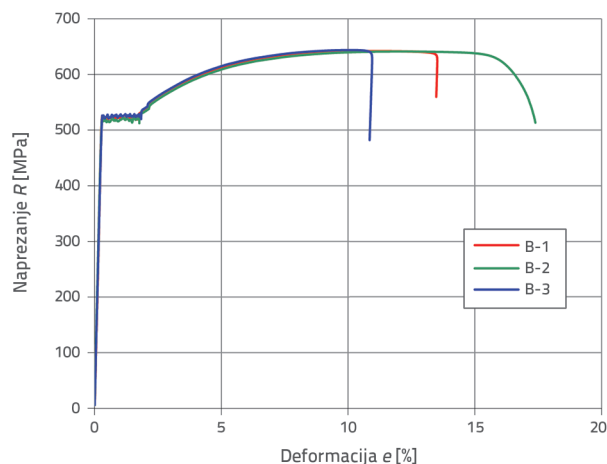
Na slici 10. prikazan je dijagram naprezanje-deformacija za tri vlačno ispitana uzorka čelika za armiranje prema metodi B norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2]. U tablici 5. prikazana

Tablica 4. Važnija mehanička svojstva čelika za armiranje (metoda A2)

Uzorak	E [GPa]	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A_{gt} [%]
A2-1	185	523	642	12,03
A2-2	191	525	642	11,77
A2-3	194	522	644	11,08
\bar{x}	190	524	642	11,63
s	5	1	1	0,49
ν [%]	2,49	0,26	0,16	4,21



Slika 9. Dijagram naprezanje-deformacija (metoda A2)



Slika 10. Dijagram naprezanje-deformacija (metoda B)

su mehanička svojstva za tri uzorka čelika za armiranje ispitana prema metodi B norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2].

Na osnovi rezultata vlačnog ispitivanja čelika za armiranje (tablice 3., 4. i 5.), primjenom metoda A1, A2 i B norme HRN EN ISO 6892-1:2016, vidljivo je jako malo rasipanje rezultata ispitivanja. Najveće rasipanje rezultata je tijekom određivanja ukupne deformacije pri najvećoj sili, izražena u postocima (A_{gt}), gdje koeficijent varijacije (ν) može biti od 3,89 % do 8,13 %. Najmanje rasipanje rezultata je pri određivanju vlačne čvrstoće (R_m), gdje je koeficijent varijacije (ν) u rasponu od 0,16 % do 0,21 %. Rezultati ispitivanja su gotovo neovisni o primjenjenoj metodi ispitivanja (A1, A2 i B), što se može zaključiti analizom rezultata ispitivanja u tablici 3., 4. i 5.

Pri određivanju vlačne čvrstoće (R_m) rezultati vlačnog ispitivanja čelika za armiranje (tablice 3., 4. i 5.) očekivano su gotovo

identični jer su identične i brzine ispitivanja u tom području (kontrola pomaka pomične grede s brzinom deformacije $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$).

Pri određivanju gornje granice popuštanja (R_{eH}) rezultati vlačnog ispitivanja čelika za armiranje (tablice 3., 4. i 5.) također su gotovo identični, što je posljedica podešavanja brzina ispitivanja kod različitih metoda ispitivanja (A1, A2 i B).

Srednje vrijednosti modula elastičnosti (E) čelika za armiranje prema tablicama 3., 4. i 5. u granicama su od 190 MPa do 194 MPa, što je nešto niže od vrijednosti modula elastičnosti od 200 MPa koji se navodi u normi HRN EN 1992-1-1:2013 [13]. Razlog manjih vrijednosti modula elastičnosti (E) čelika za armiranje može biti početna imperfekcija osi šipke, odnosno izravnavanje osi uzorka pri povećanju sile, što ima za posljedicu manje pomake, odnosno niži modul elastičnosti (E) čelika za

Tablica 5. Važnija mehanička svojstva čelika za armiranje (metoda B)

Uzorak	E [GPa]	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A_{gt} [%]
B-1	190	525	642	11,12
B-2	205	523	641	11,87
B-3	188	526	644	10,08
\bar{x}	194	525	642	11,02
s	9	2	1	0,90
ν [%]	4,52	0,35	0,21	8,13

Tablica 6. Usporedba oznaka prema normama

Naziv	HRN EN 10080:2012 [15]	HRN EN 1992-1-1:2013 [13]
granica popuštanja	R_e	f_y
granica popuštanja pri zaostaloj deformaciji od 0,2%	$R_{p0,2}$	$f_{p0,2}$
vlačna čvrstoća	R_m	f_t
odnos vlačna čvrstoća / granica popuštanja	R_m/R_e	f_t/f_y
ukupna deformacija pri najvećoj sili izražena u postocima	A_{gt}	ϵ_u
nazivni promjer	d	\emptyset

armiranje. Na osnovi dijagrama naprezanje-deformacija čelika za armiranje (slika 8., 9. i 10.) može se zaključiti da je to čelik s izraženom granicom popuštanja.

7. Usporedba načina označavanja

Norme HRN EN ISO 15630-1:2010 [1], HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] i HRN EN 10080:2012 [15] (čelik za armiranje betona - Zavarljivi čelik za armiranje - Općenito) imaju identičan način označavanja.

U Hrvatskoj se projektiranje betonskih konstrukcija provodi po normi HRN EN 1992-1-1:2013 [13], koja ima drugačiji način označavanja relevantnih veličina za projektiranje. Zbog toga je u aneksu norme HRN EN 10080:2012 [15] dana tablica koja nam služi za usporedbu načina označavanja između različitih normi (tablica 6.).

8. Zaključak

U radu je detaljno opisano vlačno ispitivanje čelika za armiranje prema normi HRN EN ISO 15630-1:2010, koja se poziva na normu HRN EN ISO 6892-1:2016. Iako je vlačno ispitivanje osnovno ispitivanje čelika za armiranje, mišljenja smo da u domaćoj i stranoj literaturi nema dovoljno radova koji detaljno obrađuju ovu problematiku. Zbog toga će ovaj rad poslužiti široj stručnoj javnosti u razumijevanju normativnog okvira vlačnog ispitivanja čelika za armiranje.

Neki čelici pokazuju veliku ovisnost mehaničkih svojstava o brzini ispitivanja čeličnih uzoraka. Zbog toga je norma HRN EN ISO 6892-1:2016 definirala metodu A kao preporučenu metodu ispitivanja, uz korištenje kontrole brzine deformacije do trenutka određivanja granica popuštanja, uz vrlo stroge granice relativnih tolerancija od $\pm 20\%$.

U radu je težište usmjereno na metodu A1 za čiju primjenu treba odgovarajuća oprema (kidalica, kontroler, ekstenzometar) koja mora zadovoljiti stroga ograničenja norme HRN EN ISO 6892-1:2016.

U radu je provedena usporedba vlačnog ispitivanja čelika za armiranje primjenom metoda A1, A2 i B norme HRN EN ISO 6892-1:2016. Rezultati pokazuju da neovisno o primijenjenoj metodi ispitivanja, kod čelika za armiranje, možemo očekivati gotovo iste rezultate. Čelik za armiranje sigurno nije čelik koji je toliko osjetljiv na brzine deformacije, tako da se za vlačno ispitivanje može primijeniti i metoda A2. Kod starijih kidalica na raspolaganju je metoda B (kontrola brzine naprezanja), iako norma HRN EN ISO 6892-1:2016 preporuča metodu A.

Gornji zaključci vrijede za slučaj kada je vlačno ispitivanje čelika za armiranje provedeno prema metodi B norme HRN EN ISO 6892-1:2016 uz brzinu naprezanja od $30 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$. Rezultati vlačnog ispitivanja čelika za armiranje uz primjenu različitih metoda su očekivani. Naime, cilj je bio podesiti brzine ispitivanja tako da pri ispitivanju pomoću različitih metoda bude što manja razlika između brzina ispitivanja. U buduću bi trebalo napraviti vlačna ispitivanja čelika za armiranje prema normi HRN EN ISO 6892-1:2016 uz primjenu metode B u rasponu dopuštenih brzina naprezanja za čelik od $6 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ do $60 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$.

Zahvala

Ovaj je članak rezultat rada u okviru projekta "Razvoj istraživačke infrastrukture na Kampusu Sveučilišta u Rijeci" (RC.2.2.06-0001) koji je sufinanciran iz Europskog fonda za regionalni razvoj (EFRR) i Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH. Rad je dio projekta "Poboljšanje proračunskih modela za ocjenu stanja građevinskih konstrukcija" (uniri-tehnic-18-127) koji financira Sveučilište u Rijeci.

LITERATURA

[1] HZN: HRN EN ISO 15630-1:2010 Čelik za armiranje i prednapinjanje betona - Metode ispitivanja - 1. dio: Armaturene šipke, valjana žica i žica, 2010.

[2] HZN: HRN EN ISO 6892-1:2016: Metalni materijali - Vlačno ispitivanje - 1. dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi, 2016.

- [3] ISO 6892-1:2016 Ambient Tensile Testing of Metallic Materials, <http://www.instron.us/-/media/literature-library/whitepapers/2016/04/iso6892.pdf>, 15.03.2019.
- [4] Davis, J.R.: Tensile Testing, Second edition, ASM International, 2004.
- [5] Dokšanović, T., Draganić, H., Radić, I., Damjanović, D.: Stress-strain relationships and influence of testing parameters on coupon test results, *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS*, 9 (2018) 16, pp. 50-63, doi: 10.13167/2018.16.5
- [6] Cuculić, M., Mrakovčić, S., Jagodnik, V., Smolčić, Ž., Travaš, V.: Potencijali istraživačkog rada na Građevinskom fakultetu u Rijeci, ZAJEDNIČKE TEME - Sabor hrvatskih graditelja 2016, Cavtat, pp. 953-962, 2016.
- [7] HZN: HRN EN ISO 7500-1:2007/Ispr.1:2009. (2009) Metalni materijali - Provjeravanje statičkih jednoosnih ispitnih uređaja - 1. dio: Ispitni uređaji za zatezanje/kompresiju - Provjeravanje i umjeravanje sustava za mjerenje sile, 2009.
- [8] HZN: EN ISO 9513:2012. (2012) Metalni materijali - Umjeravanje ekstenzimetara koji se upotrebljavaju u jednoosnome ispitivanju, 2012.
- [9] TestXpert II: Instruction Manual. Version 2.2, ZwickGmbH&Co.
- [10] Smolčić, Ž., Ščulac, P.: Tlačno ispitivanje kapitela stupa iz palače Moise u Cresu, *Zbornik radova Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci*, 21 (2018), pp. 133-143, doi: 10.32762/zr.21.1.8.
- [11] Universal Oven UF260, <https://www.memmert.com/products/heating-drying-ovens/universal-oven/UF260/pdf/>, 15.03.2019.
- [12] KISTOCK DATALOGGER HVAC range : KTT310, http://interautomatika.lt/download/KTT310%20datasheet_Engl.pdf, 15.03.2019.
- [13] HZN: HRN EN 1992-1-1:2013 Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija - Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1992-1-1:2004+AC:2010), 2013.
- [14] Steel Reinforcement Bar (Rebar) - A Tensile Testing Guide, <http://go.instron.com/-/media/literature-library/whitepapers/2015/03/rebar-tensile-testing-guide.pdf>, 15.03.2019.
- [15] HZN: HRN EN 10080:2012 Čelik za armiranje betona - Zavarljivi čelik za armiranje - Općenito, 2012.