

VLAČNO ISPITIVANJE ČELIKA ZA ARMIRANJE

TENSILE TESTING OF STEEL FOR THE REINFORCEMENT

Željko Smolčić*, Krešimir Košutić*

Sažetak

U radu je detaljno opisano vlačno ispitivanje čelika za armiranje prema normi HRN EN ISO 15630-1:2010. Navedena norma poziva se na normu HRN EN ISO 6892-1:2016, koja zbog ovisnosti mehaničkih svojstava čelika o brzini nanošenja opterećenja preporučuje metodu A, koja koristi kontrolu brzine deformacije. Vlačno ispitivanje čelika za armiranje B500B je provedeno na tri uzorka primjenom metode A1 iste norme. Cilj rada je približiti čitateljima problematiku osiguranja uvjeta za vlačno ispitivanje čelika za armiranje kontrolom deformacije te dati smjernice za primjenu norme. Rezultati vlačnog ispitivanja čelika za armiranje pokazuju da kidalica Zwick Z 600E može osigurati stroge granice tolerancije na brzine deformacije.

Gljučne riječi: čelik za armiranje, vlak, norma, laboratorijsko ispitivanje

Abstract

The paper describes in detail the tensile testing of steel for the reinforcement according to the HRN EN ISO 15630-1:2010 norm. The aforementioned norm refers to the HRN EN ISO 6892-1:2016 norm, which, due to the dependence of the mechanical properties of steel on the test speed, recommends method A that uses strain control. Tensile testing of steel for the reinforcement B500B was performed on three samples using method A1 of the same norm. The aim of the paper is to bring readers closer to the issue of ensuring the conditions for tensile testing of steel for the reinforcement with strain control and to provide guidelines for the application of the norm. The results of tensile test on steel for the reinforcement show that the Zwick Z 600E universal testing machine can provide strict tolerance limits on strain control rates.

Key words: steel for the reinforcement, tension, norm, laboratory test

*Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: zeljko.smolcic@uniri.hr, kkosutic2@student.uniri.hr

1. Uvod

Vlačno ispitivanje čelika spada u jedno od osnovnih ispitivanja mehaničkih svojstava čelika. Procedura vlačnog ispitivanja čelika definirana je normama koje moraju osigurati da čelik diljem svijeta pokazuje jednake fizikalne, kemijske i mehaničke osobine, bez obzira na zemlju podrijetla. Zbog toga je vlačno ispitivanje čelika neophodno u procesu određivanja zadovoljava li čelik deklarirana svojstva, osiguravajući pri tome kvalitetu proizvoda.

U Hrvatskoj, norma HRN EN ISO 15630-1:2010 [1] propisuje uzimanje uzoraka, pripremu ispitnih uzoraka i ispitivanje svojstava čelika za armiranje. Normom [1] je dana osnovna metoda vlačnog ispitivanja čelika za armiranje, koja se poziva na normu HRN EN ISO 6892-1:2016 [2], a koja je osnovna norma za vlačno ispitivanje metalnih materijala pri sobnoj temperaturi.

Norma [2] definira dvije metode za vlačno ispitivanje metalnih materijala: metoda A i metoda B. Metoda B temelji se na održavanju konstantne brzine naprezanja u elastičnom području, nakon čega se ispitivanje nastavlja uz kontrolu pomaka pomične grede uređaja za ispitivanje (kidalice). Kod metode A postoje dvije metode: metoda A1 i metoda A2. Metoda A1 temelji se na kontroli deformacije u zatvorenoj petlji („closed loop“) do trenutka određivanja granice popuštanja, a nakon određivanja granice popuštanja pa sve do loma koristi se kontrola pomaka pomične grede. Metoda A2 temelji se na kontroli deformacije u otvorenoj petlji („open loop“) koja se postiže kontrolom pomaka pomične grede do trenutka određivanja granice popuštanja, a nakon određivanja granice popuštanja pa sve do loma koristi se kontrola pomaka pomične grede.

Kod čelika su mehanička svojstva ovisna o brzini nanošenja opterećenja. Neki metali imaju granicu popuštanja vrlo osjetljivu na brzinu ispitivanja te je zbog toga potrebno minimizirati varijaciju brzine ispitivanja do trenutka određivanja granice popuštanja, sve s ciljem minimiziranja nepouzdanosti mjerenja. Rezultati ispitivanja čelika na vlak ovise i o krutosti uređaja za ispitivanje (kidalice) [3]. Kod vlačnog ispitivanja čelika na krućoj kidalici i pri istoj brzini pomaka pomične grede, kruća kidalica ima veće brzine deformacije na samom uzorku, što ima za posljedici i viša mehanička svojstva.

Prema normi [2], preporučena metoda ispitivanja čelika na vlak je metoda A zato što se temelji na kontroli brzine deformacije $\dot{\epsilon}_{L_e}$ (metoda A1) ili na procijenjenoj brzini deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka $\dot{\epsilon}_{L_c}$ (metoda A2). Kod obje metode (A1 i A2) definirane su stroge granice tolerancije na brzine deformacije i iznose $\pm 20\%$.

Ovaj rad nastao je u sklopu završnoga rada [4] u kojem je provedeno vlačno ispitivanje čelika za armiranje prema metodama A1, A2 i B norme [2]. Zbog pomanjkanja prostora, u ovom radu prikazana je samo metoda A1 norme [2], koja koristi kontrolu deformacije u zatvorenoj petlji („closed loop“), a za čije je funkcioniranje potrebna povratna informacija iz ekstenzometra.

Vlačno ispitivanje čelika za armiranje je provedeno na univerzalnom tlačno-vlačnom uređaju za ispitivanje (kidalica) *Zwick Z 600E*, koji je nabavljen projektom RISK [5] i koji ispunjava stroge uvjete ispitivanja prema metodi A1 norme [2].

Iako je vlačno ispitivanje čelika za armiranje jedno od osnovnih ispitivanja, u stručnoj literaturi nema dovoljno radova koji detaljno obrađuju ovu problematiku. Zbog toga, cilj rada je detaljno obraditi problematiku osiguranja uvjeta za vlačno ispitivanje čelika za armiranje kontrolom deformacije, kao i dati osnovne smjernice za primjenu norme.

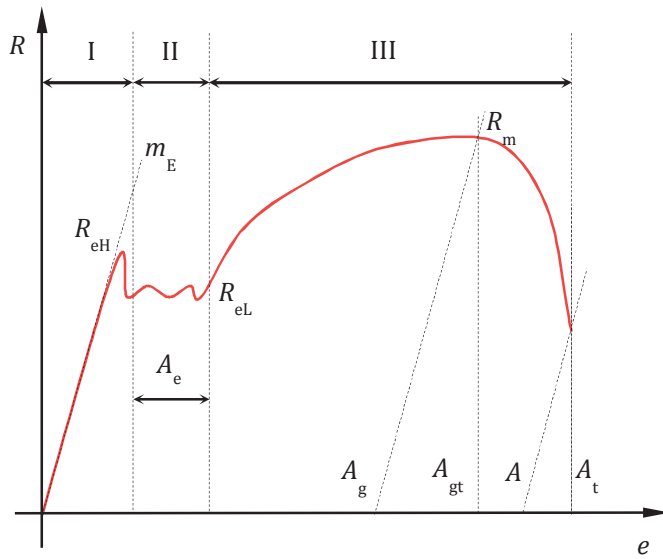
2. Norma HRN EN ISO 15630-1

Norma [1] pokriva sljedeće metode ispitivanja čelika za armiranje: vlačno ispitivanje, ispitivanje na savijanje, ispitivanje na povratno savijanje, ispitivanje na zamor, kemijsku analizu i mjerenje geometrijskih karakteristika.

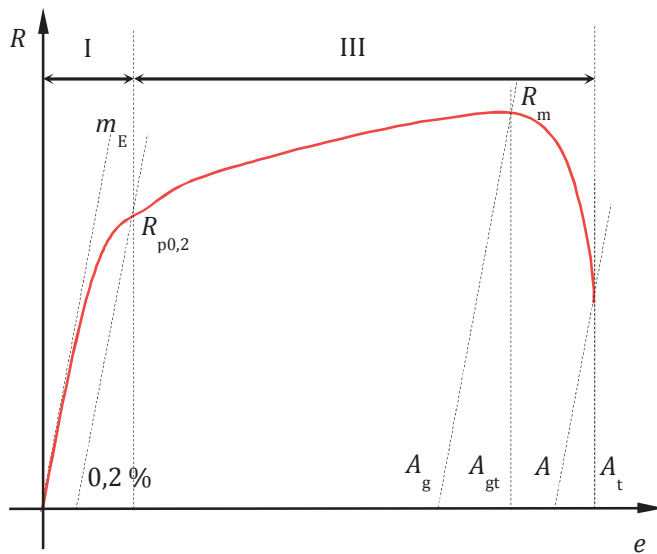
U radu se koristi način označavanja veličina kao u normi [1] i [2], koje su gotovo identične. Dijagram naprezanje – deformacija čelika s izraženom granicom popuštanja dan je na Slici 1, dok je dijagram naprezanje – deformacija čelika bez izražene granice popuštanja dan na Slici 2.

Uzorak za ispitivanje se odsijeca iz šipke, užeta ili žice u stanju u kojem je primljen na ispitivanje, a u slučaju kada je uzorak za ispitivanje savijen, potrebno ga je ispraviti uz minimalnu pojavu plastične deformacije.

Prije određivanja mehaničkih svojstava kod vlačnog ispitivanja uzorak može biti podvrgnut umjetnom starenju, ovisno o zahtjevima norme proizvoda. Ako norma proizvoda ne specificira postupak umjetnog starenja, treba primijeniti sljedeće uvjete: zagrijavanje uzorka na 100 °C, zadržavanje te temperature ± 10 °C tijekom 1 h^{+15}_0 min i nakon toga hlađenje na mirnom zraku do sobne temperature.



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

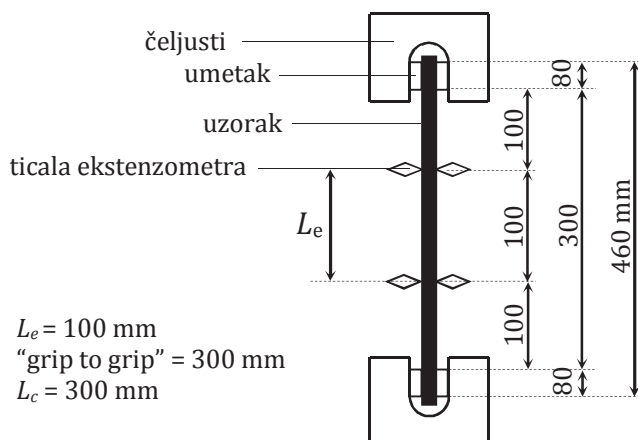


Slika 2. Dijagram naprezanje – deformacija čelika bez izražene granice popuštanja

Slobodna duljina uzorka između čeljusti („grip to grip“) treba biti dovoljna za određivanje trajne deformacije nakon loma izraženog u postocima A .

Uređaj za ispitivanje (kidalica) mora biti verificiran i kalibriran u skladu s normom HRN EN ISO 7500-1:2007/Ispr.1:2009 [6] i treba biti barem klase 1.

Ukoliko se koristi ekstenzometar, on mora biti barem klase 1 u skladu s ISO 9513 [7] za određivanje granice popuštanja pri trajnoj deformaciji od 0,2 % $R_{p0,2}$ i barem klase 2 za određivanje ukupne deformacije pri najvećoj sili izražene u postocima A_{gt} . Ekstenzometar koji se koristi za određivanje ukupne deformacije pri najvećoj sili izraženoj u postocima A_{gt} treba imati mjernu duljinu ekstenzometra L_e od najmanje 100 mm (Slika 3).



Slika 3. Uzorak u hidrauličnim čeljustima

Vlačno ispitivanje treba provesti prema normi [2]. Kod određivanja granice popuštanja pri trajnoj deformaciji od 0,2 % $R_{p0,2}$, ako je ravni dio dijagrama naprezanje – deformacija ograničen ili nije jasno definiran, treba se primijeniti jedna od slijedećih metoda:

- procedura preporučena u normi [2]
- ravnim dijelom 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 nevažecim ukoliko se nagib linije razlikuje za više od 10 % od teorijske vrijednosti modula elastičnosti.

Kod proračuna vlačnih svojstava gornje granice popuštanja R_{eH} ili granice popuštanja pri trajnoj deformaciji od 0,2% $R_{p0,2}$ i vlačnoj čvrstoći R_m koristi se nominalna površina poprečnog presjeka S_n , osim ako je drugačije naznačeno u relevantnoj normi proizvoda.

Ukoliko se lom pojavi u čeljustima ili na razmaku od čeljusti za manje od 20 mm ili nazivnom promjeru šipke d (ukoliko je on veći od 20 mm), ispitivanje se smatra nevažecim.

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

Kod određivanja ukupne deformacije pri najvećoj sili izražene u postocima A_{gt} može se primijeniti norma [2] sa sljedećom modifikacijom:

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

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

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

3. Norma HRN EN ISO 6892-1

Osnovna norma za vlačno ispitivanje metalnih materijala pri sobnoj temperaturi, koja propisuje vrlo stroge uvjete koje moraju ispuniti uređaj za ispitivanje i ekstenzometar, jest norma [2]. Normom [2] predviđene su dvije metode ispitivanja: metoda A i metoda B. Metoda A je preporučena metoda ispitivanja prema normi [2], pa je naglasak u radu dan na metodu A. U radu je naglasak dan na metodu A1 koja je vrlo zahtjevna zbog mogućnosti ispitivanja čelika na vlak kontrolom deformacije $\dot{\epsilon}_{Le}$ u zatvorenoj petlji („closed loop“) za čije je funkcioniranje potrebna povratna informacija iz ekstenzometra.

Vlačno ispitivanje čelika treba provesti na sobnoj temperaturi između 10 °C i 35 °C, osim ako nije specificirano drugačije. Ako se ispitivanje provodi pod kontroliranim uvjetima, tada temperatura treba biti 23 °C ± 5 °C.

3.1 Zahtjevi za uređaj za ispitivanje i ekstenzometar

Norma [2] propisuje vrlo stroge zahtjeve u vezi uređaja za ispitivanje (kidalica) i ekstenzometra.

Mjerni sistem sile uređaja za ispitivanje (kidalice) treba biti u skladu s normom [6], i to bar klase 1. Kod određivanja granice popuštanja pri trajnoj deformaciji R_p ili granice popuštanja pri ukupnoj deformaciji R_t ekstenzometar treba biti u skladu s normom [7], 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 [7], i to bar klase 2 u traženom području.

Pri određivanju modula elastičnosti čelika za armiranje, mjerni sistem sile uređaja za ispitivanje (kidalice) treba biti u skladu s normom [6], i to bar klase 1 u traženom području. Pri određivanju modula elastičnosti čelika za armiranje, ekstenzometar treba biti u skladu s normom [7], i to bar klase 0,5 u traženom području.

3.2 Brzine ispitivanja bazirane na brzini deformacije (metoda A)

Prema normi [2], preporučena metoda vlačnog ispitivanja čelika je metoda A, koja može koristiti dva različita tipa kontrole brzine deformacije, metodu A1 i metodu A2. Glavni cilj korištenja metode A je minimiziranje varijacije rezultata ispitivanja tijekom određivanja parametara koji su osjetljivi na brzinu ispitivanja, a sve s ciljem minimiziranja nepouzdanosti mjerenja. Metoda A1 u zatvorenoj petlji („closed loop“) uključuje kontrolu brzine deformacije $\dot{\epsilon}_{Le}$ i bazira se na povratnoj informaciji iz ekstenzometra. Metoda A2 u otvorenoj petlji („open loop“) uključuje kontrolu procijenjene brzine deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka $\dot{\epsilon}_{Lc}$, koja se postiže pomoću kontrole brzine pomaka pomične grede v_c proračunate množenjem zahtijevane brzine deformacije s duljinom ispitnog dijela uzorka L_c .

Brzine deformacije moraju biti u skladu sa sljedećim zahtjevima:

a) Do trenutka određivanja gornje granice popuštanja R_{eH} , granice popuštanja pri trajnoj deformaciji R_p ili granice popuštanja pri ukupnoj deformaciji R_t treba se koristiti brzina deformacije $\dot{\epsilon}_{Le}$ kod metode A1 ili brzine pomaka pomične grede v_c kod metode A2. U ovome području potrebno je korištenje ekstenzometra za mjerenje deformacije uzorka kao bi se eliminirao utjecaj krutosti kidalice na rezultate ispitivanja [3]. U slučaju da kidalica ne može kontrolirati brzinu deformacije, može se koristiti metoda A2.

b) Tijekom diskontinuiranog popuštanja čelika treba se koristiti procijenjena brzina deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka $\dot{\epsilon}_{Lc}$. U ovom području nemoguće je kontrolirati brzinu deformacije korištenjem ekstenzometra zato što se lokalno popuštanje može dogoditi izvan mjerne duljine ekstenzometra L_e . Potrebna procijenjena brzina deformacije preko

duljine ispitnog dijela uzorka $\dot{\epsilon}_{L_c}$ može se održavati u tom području dovoljno točno korištenjem konstantne brzine pomaka pomične grede v_c u otvorenoj petlji („open loop“), a pomoću izraza:

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

c) U području nakon granice popuštanja pri trajnoj deformaciji R_p ili granice popuštanja pri ukupnoj deformaciji R_t ili na kraju područja popuštanja treba se koristiti brzine deformacije $\dot{\epsilon}_{L_e}$ ili $\dot{\epsilon}_{L_c}$. Korištenje brzine deformacije $\dot{\epsilon}_{L_c}$ 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

Potrebno je održavati brzinu deformacije $\dot{\epsilon}_{L_e}$ konstantnom do trenutka određivanja gornje granice popuštanja R_{eH} ili granice popuštanja pri trajnoj deformaciji R_p ili granice popuštanja pri ukupnoj deformaciji R_t . Brzina deformacije $\dot{\epsilon}_{L_e}$ treba biti u jednom od sljedeća dva raspona:

- raspon 1: $\dot{\epsilon}_{L_e} = 0,000\ 07\ s^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20\ \%$
- raspon 2: $\dot{\epsilon}_{L_e} = 0,000\ 25\ s^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20\ \%$ (preporučeno).

U slučaju da kidalica ne može direktno kontrolirati brzinu deformacije treba koristiti metodu A2.

3.2.2 Brzine deformacije za određivanje R_{eL} i A_e

Procijenjenu brzinu deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka $\dot{\epsilon}_{L_c}$ treba održavati konstantnom tijekom određivanja donje granice popuštanja R_{eL} i deformacije granice popuštanja izražene u postocima A_e sve do kraja diskontinuiranog popuštanja. Brzina deformacije $\dot{\epsilon}_{L_c}$ treba biti u jednom od sljedeća dva raspona:

- raspon 2: $\dot{\epsilon}_{L_c} = 0,000\ 25\ s^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20\ \%$ (preporučeno kada se određuje R_{eL})
- raspon 3: $\dot{\epsilon}_{L_c} = 0,002\ s^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20\ \%$.

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

Tijekom određivanja vlačne čvrstoće R_m , trajne deformacije nakon loma izražene u postocima A , ukupne deformacije pri najvećoj sili izražene u postocima A_{gt} , trajne deformacije pri najvećoj sili izražene u postocima A_g i suženja površine poprečnog presjeka izražene u postocima Z ,

procijenjena brzina deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka $\dot{\epsilon}_{L_e}$ treba biti u jednom od sljedeća tri raspona:

- raspon 2: $\dot{\epsilon}_{L_c} = 0,000\ 25\ s^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20\ \%$
- raspon 3: $\dot{\epsilon}_{L_c} = 0,002\ s^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20\ \%$
- raspon 4: $\dot{\epsilon}_{L_c} = 0,006\ 7\ s^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20\ \%$ (preporučeno).

4. Laboratorijsko ispitivanje

Za vlačno ispitivanje korišten je univerzalni tlačno – vlačni stroj za ispitivanje (kidalica) *Zwick Z 600E* kapaciteta 600 kN [5,8]. Glavna namjena kidalice je monotono statičko ispitivanje, a moguće je raditi uz kontrolu sile, kontrolu pomaka i kontrolu deformacije (ekstenzometar). Kidalica ispunjava stroge uvjete ispitivanja prema metodi A1 norme [2].

Vlačno ispitivanje čelika za armiranje provedeno je na tri uzorka čelika za armiranje B500B 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, opisanom u poglavlju 2.

Pri vlačnom ispitivanju čelika za armiranje poželjno je faze ispitivanja podijeli u pet osnovnih faza [9]: priprema za ispitivanje, predopterećenje, elastično područje (prije popuštanja), popuštanje i plastično područje (nakon popuštanja).

4.1 Priprema za ispitivanje

U hidraulične čeljusti kidalice postavljeni su ulošci za prihvat okruglih uzoraka promjera od 8 do 18 mm budući da je promjer uzoraka 8 mm. Za mjerenje sile korištena je mjerna ćelija kapaciteta 600 kN, a mjerenje deformacije samog uzorka provodi se pomoću odgovarajućih ticala ekstenzometra. Tijekom ispitivanja mjereni su: sila na mjernoj ćeliji, pomak pomične grede, deformacija ekstenzometra i vrijeme trajanja ispitivanja.

Kidalicom upravlja računalo programom *testXpert II* [5,8] pomoću kojeg se zadaju osnovni parametri ispitivanja. Slobodna duljina uzorka između čeljusti („grip to grip“) iznosi 300 mm uz istu duljinu ispitnog dijela uzorka $L_c=300$ mm (Slika 3). Uzorak se postavlja najprije u donje čeljusti (pritisak 30 bara) zato što su donje čeljusti povezane s mjernom ćelijom. Nakon što se mjerna ćelija „nulirala“, uzorak se može prihvatiti pomoću gornjih čeljusti pritiskom od 30 bara na umetke gornjih čeljusti.

Nakon pokretanja ispitivanja uzorka povećava se pritisak na donjim i gornjim čeljustima s 30 bara na 100 bara. Tijekom povećanja pritiska generira se mala tlačna sila u uzorku i dolazi do automatskog povećanja slobodne duljina uzorka između čeljusti („grip to grip“) kako bi se sila na mjernoj čeliji održavala na veličini oko 0 N.

4.2 Predopterećenje

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.

4.3 Elastično područje (prije popuštanja)(područje I)

Elastično područje predstavlja gotovo ravan dio dijagrama naprezanje – deformacija, a eventualno početno odstupanje od pravca posljedica je daljnjeg izravnavanja osi uzorka.

Ispitivanje je provedeno prema metodi A1 uz preporučenu brzinu deformacije u rasponu $2 \dot{\epsilon}_{L_e} = 0,000\ 25\ s^{-1}$, 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 koristiti kontrolu deformacije u zatvorenoj petlji („closed loop“). Brzina pomaka pomične grede v_c u svakom trenutku vlačnog ispitivanja korigira se ovisno o povratnoj informaciji o veličini deformaciji dobivene preko ekstenzometra. Za pravilno funkcioniranje kontrole deformacije u zatvorenoj petlji („closed loop“) ključnu ulogu obavlja kontroler kidalice.

U ovome području određuje se i modul elastičnosti čelik za armiranje prema normi [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 $R_{p0,2}$.

4.4 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 za koje je karakteristično da

dolazi do značajnog povećanja deformacije uz neznatne promjene naprezanja.

Zbog nemogućnosti kontroliranja brzine deformacije korištenjem ekstenzometra, u ovom je području potrebno prema normi promijeniti način kontrole ispitivanja. Prelazi se s kontrole brzine deformacije na kontrolu pomaka pomične grede. U ovom području ispitivanja korištena je preporučena brzina deformacije u rasponu $2 \dot{\epsilon}_{L_c} = 0,000\ 25\ s^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20\ \%$. Potrebna procijenjena brzina deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka $\dot{\epsilon}_{L_c}$ održava se automatski pomoću konstantne brzine pomaka pomične grede v_c u otvorenoj petlji („open loop“) (vidi izraz (2)):

$$v_c = L_c \cdot \dot{\epsilon}_{L_c} = 300\ mm \cdot 0,000\ 25\ s^{-1} = 0,075\ mm/s \quad (3)$$

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).

4.5 Plastično područje (nakon popuštanja) (područje III)

Nakon područja popuštanja pa sve do loma uzorka brzina ispitivanja se prema normi dopušta značajno ubrzati, sve s ciljem skraćivanja trajanja ispitivanja. Korištena je preporučena brzina deformacije u rasponu $4 \dot{\epsilon}_{L_c} = 0,006\ 7\ s^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20\ \%$. Potrebna procijenjena brzina deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka $\dot{\epsilon}_{L_c}$ održava se automatski pomoću konstantne brzine pomaka pomične grede v_c u otvorenoj petlji („open loop“), (vidi izraz (2)):

$$v_c = L_c \cdot \dot{\epsilon}_{L_c} = 300\ mm \cdot 0,006\ 7\ s^{-1} = 2,01\ mm/s \quad (4)$$

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

Tablica 1. Korištene brzine ispitivanja

tip kontrole ispitivanja	brzine deformacije	brzine pomaka pomične grede
kontrola deformacije (raspon 2) (područje I)	$\dot{\epsilon}_{L_e} = 0,000\ 25\ s^{-1}$	-
kontrola pomaka (raspon 2) (područje II)	$\dot{\epsilon}_{L_c} = 0,000\ 25\ s^{-1}$	$v_c = 0,075\ mm/s$
kontrola pomaka (raspon 4) (područje III)	$\dot{\epsilon}_{L_c} = 0,006\ 7\ s^{-1}$	$v_c = 2,01\ mm/s$

Na Slici 4 prikazan je uzorak čelika za armiranje postavljen u hidraulične čeljusti neposredno prije pokretanja ispitivanja.

**Slika 4.** Uzorak neposredno prije ispitivanja

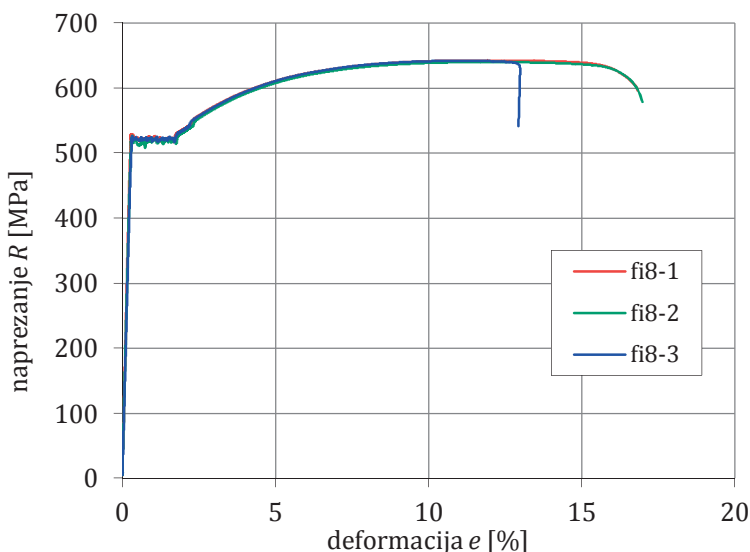
5. Rezultati ispitivanja

Na Slici 5 prikazan je dijagram naprezanje-deformacija tri vlačno ispitana uzoraka čelika za armiranje B500B promjera 8 mm. Vidljivo je da je kod uzoraka fi8-1 i fi8-2 do loma došlo između ticala ekstenzometra, dok je kod uzorka fi8-3 do loma došlo izvan područja ticala ekstenzometra (naglo smanjenje deformacije neposredno prije loma uzorka).

U Tablici 2 su prikazana 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}).

Tablica 3 prikazuje parametre statističke obrade rezultata tri ($n=3$) vlačno ispitana uzoraka čelika za armiranje: srednju vrijednost (\bar{x}), standardnu devijaciju (s) i koeficijent varijacije (v).

Iz Slike 5 i Tablica 2 i 3 vidljivo je da je rasipanje rezultata eksperimenta vrlo malo, što je bilo i za očekivati jer se radi o čeliku koji, za razliku od betona, ima malo rasipanje rezultata eksperimenta. Najveći koeficijent varijacije v je kod određivanja, očekivano, modul elastičnosti E i iznosi 5,23 %, dok je najmanji kod određivanja vlačne čvrstoće R_m i iznosi 0,20 %.



Slika 5. Dijagram naprezanje – deformacija

Tablica 2. Mehanička svojstva čelika za armiranje

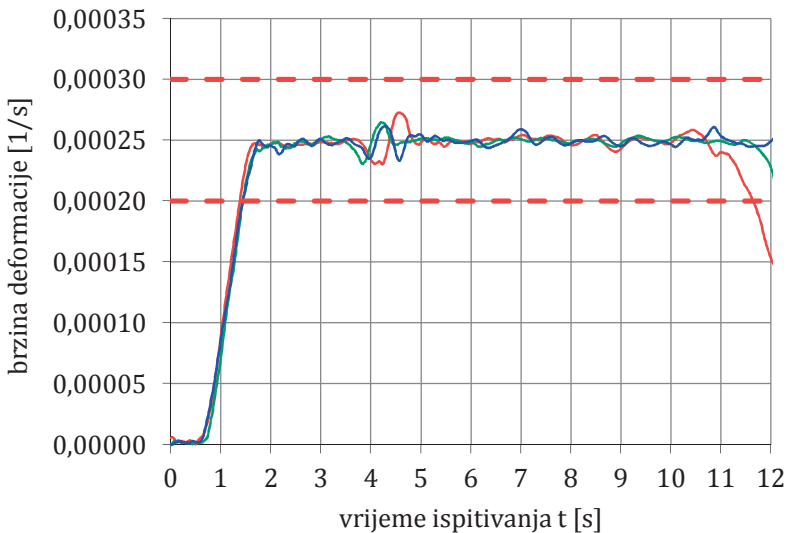
uzorak	E [GPa]	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A_{gt} [%]
Ø8-1	200	529	642	11,93
Ø8-2	192	526	640	11,78
Ø8-3	180	526	642	11,09

Tablica 3. Statistički parametri

$n=3$	E [GPa]	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A_{gt} [%]
\bar{x}	191	527	642	11,60
s	10	1	1	0,45
v [%]	5,23	0,28	0,20	3,89

Na Slici 6 prikazan je dijagram brzina deformacije ($\dot{\epsilon}_{L_e}$)-vrijeme ispitivanja (t) za tri vlačno ispitana uzorka čelika za armiranje. Vidljivo je da su brzine deformacije ($\dot{\epsilon}_{L_e}$) za sva tri uzorka u prvih desetak sekundi unutar strogo definiranih relativnih tolerancija od $\pm 20\%$ za raspon 2 i brzinu deformaciju $\dot{\epsilon}_{L_c} = 0,00025\text{ s}^{-1}$. Na Slici 6, s dvije isprekidane crvene linije prikazane su gornja ($0,00030\text{ s}^{-1}$) i donja ($0,00020\text{ s}^{-1}$) granica tolerancije za brzinu deformaciju $\dot{\epsilon}_{L_c} = 0,00025\text{ s}^{-1}$. Dakle, do trenutka određivanja gornje granice popuštanja (R_{eH}), kicalica može zadovoljiti vrlo stroge uvjete koje zahtijeva metoda A1 norme [2].

Detaljniji prikaz rezultata ispitivanja dan je u završnome radu [4].

**Slika 6.** Dijagram brzina deformacije($\dot{\epsilon}_{L_e}$)-vrijeme ispitivanja (t)

6. Usporedba načina označavanja

Norme [1], [2] i HRN EN 10080:2012 [10] koriste gotovo identičan način označavanja.

U Hrvatskoj se projektiranje betonskih konstrukcija provodi po normi HRN EN 1992-1-1:2013 [11], koja koristi drugačiji način označavanja relevantnih veličina za projektiranje. Zbog toga je u aneksu norme [10] dana tablica koja nam služi za usporedbu načina označavanja između različitih normi (Tablica 4).

Tablica 4. Usporedba oznaka prema normama

naziv	HRN EN 10080:2012 [10]	HRN EN 1992-1-1:2013 [11]
granica popuštanja	R_e	f_y
granica popuštanja pri trajnoj 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

7. Zaključak

U domaćoj i stranoj literaturi nema dovoljno radova koji detaljno obrađuju problematiku vlačnog ispitivanja čelika za armiranje. Stoga ovaj rad može poslužiti široj stručnoj javnosti u razumijevanju normativnog okvira vlačnog ispitivanja čelika za armiranje.

Detaljno je 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.

Poznato je da su mehanička svojstva čelika ovisna su o brzini ispitivanja čeličnih uzoraka. Zbog toga norma HRN EN ISO 6892-1:2016 definira metodu A kao preporučenu metodu ispitivanja, uz korištenje kontrole brzine deformacije do trenutka određivanja granica popuštanja, uz vrlo stroge granice relativnih tolerancija od ± 20 %.

Naglasak je stavljen na metodu A1 za čije je korištenje potrebna odgovarajuća oprema (kidalica, kontroler, ekstenzometar) koja mora zadovoljiti stroga ograničenja norme HRN EN ISO 6892-1:2016.

Rezultati vlačnog ispitivanja čelika za armiranje pokazali su da kidalica *Zwick Z 600E* može osigurati vrlo stroge granice tolerancije na brzine deformacije ($\pm 20\%$).

Ovaj rad može poslužiti stručnoj zajednici pri razumijevanju normi za vlačno ispitivanje čelika za armiranje, a u poglavlju 4 dane su smjernice za provedbu vlačnog ispitivanja čelika jednog od vodećih svjetskih proizvođača uređaja za ispitivanje (kidalica).

Iako se ovaj rad bavi samo metodom A1 norme HRN EN ISO 6892-1:2016, bitno je naglasiti da se vlačno ispitivanje čelika za armiranje može uspješno provoditi i metodama A2 i B norme HRN EN ISO 6892-1:2016. U sklopu završnoga rada provedeno je vlačno ispitivanje čelika za armiranje prema metodama A1, A2 i B norme HRN EN ISO 6892-1:2016 te se dobivaju gotovo isti rezultati neovisno o primijenjenoj metodi ispitivanja (A1, A2 i B). Ovo je bitno za naglasiti jer u Hrvatskoj još uvijek ima dosta uređaja za ispitivanje (kidalica) koje mogu raditi prema metodama A2 i B norme HRN EN ISO 6892-1:2016.

Ispitivanje metodom A1 norme HRN EN ISO 6892-1:2016 je bitno samo kod čelika kod kojih je gornja granica popuštanja R_{eH} jako ovisna o brzini deformacije pri ispitivanju, a čelik za armiranje očito ne spada u tu vrstu čelika.

Zahvala. *Ovaj je članak rezultat rada u okviru znanstveno-istraživačkog UNIRI projekta „Poboljšanje proračunskih modela za ocjenu stanja građevinskih konstrukcija“ koji se financira sredstvima Sveučilišta u Rijeci (br. projekta uniri-tehnic-18-127).*

Literatura

- [1] HRN EN ISO 15630-1:2010. (2010) Čelik za armiranje i prednapinjanje betona - Metode ispitivanja - 1. dio: Armaturene šipke, valjana žica i žica. Zagreb: HZN.
- [2] HRN EN ISO 6892-1:2016. (2016) Metalni materijali - Vlačno ispitivanje - 1. dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi. Zagreb: HZN.
- [3] <http://www.instron.us/-/media/literature-library/whitepapers/2016/04/iso6892.pdf> (1.5.2023.)
- [4] Košutić, K. (2019) Vlačno ispitivanje čelika za armiranje. Završni rad. Rijeka: Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci.
- [5] Cuculić, M., Mrakovčić, S., Jagodnik, V., Smolčić, Ž., Travaš, V. (2016) Potencijali istraživačkog rada na Građevinskom fakultetu u Rijeci. U: Lakušić, S., ur. ZAJEDNIČKE TEME - Sabor hrvatskih graditelja 2016. Cavtat: HSGI, str. 953-962.
- [6] 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. Zagreb: HZN.
- [7] HRN EN ISO 9513:2012. (2012) Metalni materijali – Umjeravanje ekstenzimetara koji se upotrebljavaju u jednoosnome ispitivanju. Zagreb: HZN.
- [8] TestXpert II. (2015) Instruction Manual. Version 2.2. Ulm, Germany: ZwickGmbH&Co.
- [9] <http://go.instron.com/-/media/literature-library/whitepapers/2015/03/rebar-tensile-testing-guide.pdf> (1.5.2023.)
- [10] HRN EN 10080:2012. (2012) Čelik za armiranje betona - Zavarljivi čelik za armiranje - Općenito. Zagreb: HZN.
- [11] HRN EN 1992-1-1:2013. (2013) Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija - Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1992-1-1:2004+AC:2010). Zagreb: HZN.