

## ZNAČAJ MJERNE NESIGURNOSTI KOD PREZENTIRANJA REZULTATA ISPITIVANJA ZATEZANJEM

### IMPORTANCE OF MEASUREMENT UNCERTAINTY AT PRESENTATION TENSILE TESTING RESULTS

**Prof dr Mirsada Oruč, dipl.inž.met.**  
**Azamina Klobodanović, dipl.inž.met.**  
**Omer Beganović, dipl.inž.met.**  
**UNIVERZITET U ZENICI**  
**Metalurški institut "Kemal Kapetanović"**  
**ZENICA**

#### REZIME

*Klasični pristup rezultatu mjerenja, koji se zasnivao na analizi greške mjerenja, nije davao zadovoljavajući podatak o kvalitetu mjerenja, odnosno pouzdanosti dobivenog rezultata, iako je jasno da i nakon ocjene svih komponenti greške i provedenih korekcija ostaje sumnja koliko dobro rezultat mjerenja reprezentuje vrijednost mjerne veličine. Kvantificiranje navedene sumnje suštinski je cilj procjene mjerne nesigurnosti kojom se određuje interval vrijednosti unutar kojeg će se nalaziti "stvarna" vrijednost mjerne veličine sa zadatim nivoom povjerenja. U ovom radu dat je prikaz rezultata ispitivanja čelika S355J2 zatezanjem sa izraženom mjernom nesigurnošću na način definisan procedurom akreditovanog Mehaničkog laboratorija Metalurškog instituta.*

**Ključne riječi:** greška, mjerna nesigurnost, akreditirane laboratorije

#### ABSTRACT

*Classical approach to measuring results, that was based on the analysis of measuring error, has not given satisfied data about measurement quality, respectively the reliability of obtained result. It is clear that, also, after estimation of all error components and performed corrections there is still a doubt about how much good measuring result represents value of measured. Quantification of mentioned doubt is essentially aim of evaluating of measurement uncertainty with which it has been estimated interval of values in which there is "true" value, with determined confidence level. In this article results of tensile testing for steel grade S355J2 are reviewed with expressed measurement uncertainty that is determined in accordance with the procedure of accredited Mechanical laboratory of Metallurgical Institute.*

**Key words:** error, measurement uncertainty, accredited laboratories

#### 1. UVOD

Zbog nesavršenosti, odnosno ograničenih mogućnosti mjernih instrumenata, nekompletne definisanosti mjerne veličine ili njene nesavršene realizacije, nedovoljno poznatog uticaja okoline na proces mjerenja, ograničenih sposobnosti ispitivača, kao i zbog mogućih drugih nepoznatih uticaja postoji sumnja u validnost rezultata bilo kojeg mjerenja. Kvantitativno izražena sumnja u validnost rezultata mjerenja predstavlja mjernu nesigurnost. Mjerna

nesigurnost reflektuje nedostatak egzaktnog poznavanja vrijednosti mjerene veličine. Stoga svaki rezultat mjerenja, koji može biti i korigovan u pogledu svih utvrđenih sistematskih uticaja, predstavlja samo ocjenu vrijednosti mjerene veličine, te je kao takav nekompletan ako ne sadrži i nesigurnost te ocjene [1]. U suštini mjerna nesigurnost predstavlja interval vrijednosti unutar kojeg se nalazi “stvarna” vrijednost mjerene veličine. Ukoliko se ocjena vrijednosti mjerene veličine i pripadajuća mjerna nesigurnost nalaze unutar, odnosno izvan specificiranih granica radi se o potpunom slaganju, odnosno potpunom neslaganju rezultata. Ako se donja ili gornja vrijednost intervala nesigurnosti nalazi unutar specificiranih granica, a druga odgovarajuća vrijednost izvan tih granica, radi se o djelimičnoj saglasnosti rezultata [2]. Stoga, bilo koji akreditovani ispitni laboratorij, prema zahtjevima standarda BAS EN ISO 17025, treba biti u mogućnosti da daje rezultat sa izraženom mjernom nesigurnošću, odnosno treba posjedovati odgovarajuću proceduru za ocjenu mjerne nesigurnosti svih rezultata ispitivanja do kojih dolazi po metodama navedenim u skoupu akreditacije.

U nastavku ovog rada dat je primjer proračuna mjerne nesigurnosti rezultata ispitivanja zatezanjem dva uzorka izrađena od nelegiranog konstrukcionog čelika po proceduri koja se primjenjuje u akreditovanom Mehaničkom ispitnom laboratoriju Metalurškog instituta “Kemal Kapetanović” Zenica.

## 2. ISPITIVANJE NELEGIRANIH KONSTRUKCIONIH ČELIKA ZATEZANJEM

Standard EN 10025-2:2004 specificira zahtjeve koje trebaju zadovoljiti nelegirani konstrukcioni čelici. Takođe, definiše način uzorkovanja ispitnih epruveta i metodu prema kojoj treba provesti ispitivanje zatezanjem (EN 10002-1). Mehanički laboratorij Metalurškog instituta provodi ispitivanja nelegiranih konstrukcionih čelika uglavnom u cilju potvrđivanja deklarisanog kvaliteta. U ovom radu prezentirani su rezultati ispitivanja zatezanjem sa izraženom mjernom nesigurnošću šipke  $\phi$  30 mm i lima debljine 10 mm. Oba proizvoda su izrađena od čelika kvaliteta S355J2. Iz šipke  $\phi$ 30mm urađena je okrugla epruveta  $\phi$ 10mm početne mjerne dužine  $l_0 = 50$  mm, dok je iz lima urađena pljosnata epruveta 10x20 mm sa početnom mjernom dužinom  $l_0 = 80$ mm. Kod obe epruvete zadovoljen je standardom zahtijevani odnos  $l_0 = 5,65\sqrt{S_0}$ .

Postupkom ispitivanja zatezanjem potrebno je odrediti  $R_{eH}$  ili  $R_{p0,2}$ ,  $R_m$  i A. Standard EN 10025-2:2004 ne zahtijeva određivanje suženja (Z), međutim u ovom radu će biti prezentiran i način određivanja mjerne nesigurnosti i ove veličine. Navedene veličine određuju se proračunom koji uzima u obzir direktno izmjerene veličine (tabela 1) i kombinaciju vrijednosti direktno izmjerenih veličina i vrijednosti prethodno proračunatih veličina.

Tabela 1. Veličine koje se direktno mjere

Veličina	Oznaka veličine	Jedinica
Početna debljina epruvete pravougaonog poprečnog presjeka	$a_0$	mm
Konačna debljina epruvete pravougaonog poprečnog presjeka	$a_u$	mm
Početna širina epruvete pravougaonog poprečnog presjeka	$b_0$	mm
Konačna širina epruvete pravougaonog poprečnog presjeka	$b_u$	mm
Početni prečnik epruvete kružnog poprečnog presjeka	$d_0$	mm
Konačni prečnik epruvete kružnog poprečnog presjeka	$d_u$	mm
Početna mjerna dužina epruvete	$l_0$	mm
Konačna mjerna dužina epruvete	$l_u$	mm
Karakteristično opterećenje	$F_{eH}, F_m$	N

Tabela 2. Veličine do kojih se dolazi proračunom

Veličina	Oznaka veličine i formula	Jedinica
Početna površina poprečnog presjeka	$S_0 = a_0 \cdot b_0$	mm <sup>2</sup>
Konvencionalni napon tečenja (za trajno izduženje 0,2%)	$R_{p0,2} = F_{p0,2} / S_0$	MPa
Gornji napon tečenja	$R_{eH} = F_{eH} / S_0$	MPa
Zatezna čvrstoća	$R_m = F_m / S_0$	MPa
Konačna površina poprečnog persjeka	$S_u = a_u \cdot b_u$	mm <sup>2</sup>
Procentualno izduženje nakon loma	$A = ((l_u - l_0) / l_0) \cdot 100$	%
Procentualno suženje nakon loma	$Z = ((S_0 - S_u) / S_0) \cdot 100$	%

### 3. OCJENA MJERNE NESIGURNOSTI REZULTATA ISPITIVANJA ZATEZANJEM

Prvi korak u procjeni mjerne nesigurnosti određene veličine jeste postavljanje matematičkog modela. Odgovarajuće formule date u tabeli 2. predstavljaju matematičke modele za ocjenu mjernih nesigurnosti  $R_{eH}/R_{p0,2}$ ,  $R_m$ ,  $A$  i  $Z$  (izlazne veličine) [3]. Za ocjenu nesigurnosti istih veličina potrebno je prethodno odrediti nesigurnost mjerenja veličina koje u pomenutim formulama figurišu sa desne strane znaka jednakosti (ulazne veličine). Umnošci koeficijenata osjetljivosti (parcijalni izvod izlazne veličine po konkretnoj ulaznoj veličini) i nesigurnosti odgovarajućih ulaznih veličina predstavljaju doprinose standardnih nesigurnosti ocjena ulaznih veličina kombinovanoj standardnoj nesigurnosti ocjena izlaznih veličina. Jedan od doprinosa standardnoj nesigurnosti ocjena direktno mjerenih veličina predstavlja nesigurnost mjerila, i to u konkretnom slučaju nesigurnost pomičnog mjerila za mjerenje dužinskih veličina i nesigurnost kidalice na kojoj se mjere odgovarajuća opterećenja (zatezne sile).

#### 3.1. Mjerna nesigurnost direktno mjerenih veličina

Budući da se koristi isti pristup za procjenu mjerne nesigurnosti direktno mjerenih veličina ( $a_0$ ,  $a_u$ ,  $b_0$ ,  $b_u$ ,  $d_0$ ,  $d_u$ ,  $l_0$ ,  $l_u$ ) one se mogu označiti opštom oznakom  $X$ . Sa stanovišta procjene mjerne nesigurnosti gore navedenih veličina u praksi se mogu javiti dva slučaja:

- a) Ako se ocjena zasniva na više ponovljenih mjerenja (tip A ocjena) koristi se slijedeća procedura
  - odredi se srednja vrijednost  $n$  ponovljenih mjerenja veličine  $X$  koja predstavlja njenu najbolju ocjenu za raspoloživi broj podataka

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \text{ (mm)}. \quad \dots(1)$$

- izračuna se standardno odstupanje

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \text{ (mm)}. \quad \dots(2)$$

- odredi se standardna nesigurnost koja odgovara standardnom odstupanju srednje vrijednosti

$$u_x = \frac{t \cdot S_x}{\sqrt{n}} \text{ (mm)}. \quad \dots(3)$$

gdje je  $t$ -faktor Studentove raspodjele koji zavisi od izabranog nivoa povjerenja i broja stepeni slobode  $f$  koji je jednak razlici  $n-1$ ,

- odredi se nesigurnost mjerila kojim su vršena mjerenja

$$u_{mk} = \frac{U}{k} \text{ (mm)}. \quad \dots(4)$$

Vrijednosti U i k se uzimaju iz certifikata o kalibraciji korištenog mjerila.

Nesigurnost mjerne veličine X je

$$u_x = \sqrt{(u_x^-)^2 + (u_{mk})^2} \text{ (mm)}. \quad \dots(5)$$

- b) U slučaju kada je moguće samo ocijeniti granice u kojima se nalazi vrijednost veličine X (tip B ocjene) pripadajuća nesigurnost, za slučaj da se pretpostavi pravougaona raspodjela je

$$u_x = \frac{r}{\sqrt{3}} \text{ (mm)}. \quad \dots(6)$$

gdje je r je polovina intervala između gornje i donje granice područja unutar kojeg se vrijednost veličine X nalazi.

### 3.2. Mjerna nesigurnost veličina do kojih se dolazi proračunom

Mjerna nesigurnost početne i konačne površine poprečnog presjeka pljosnatih i okruglih epruveta određuje se prema sljedećim formulama:

- a) epruvete pravougaonog poprečnog presjeka

$$u_{S_0} = \sqrt{(b_0)^2 u_{a_0}^2 + (a_0)^2 u_{b_0}^2} \text{ (mm}^2\text{)}. \quad \dots(7)$$

$$u_{S_u} = \sqrt{(b_1)^2 u_{a_u}^2 + (a_1)^2 u_{b_u}^2} \text{ (mm}^2\text{)}. \quad \dots(8)$$

- b) epruvete kružnog poprečnog presjeka

$$u_{S_0} = \sqrt{\frac{d_0^2 \pi^2}{4} u_{d_0}^2} \text{ (mm}^2\text{)}. \quad \dots(9)$$

$$u_{S_u} = \sqrt{\frac{d_u^2 \pi^2}{4} u_{d_u}^2} \text{ (mm}^2\text{)}. \quad \dots(10)$$

Mjerna nesigurnost zatezne čvrstoće i gornjeg napona tečenja

$$u_{R_m} = \sqrt{\left(\frac{1}{S_0}\right)^2 u_{F_m}^2 + \left(\frac{F_m}{S_0^2}\right)^2 u_{S_0}^2} \text{ (MPa)}. \quad \dots(11)$$

$$u_{R_{eH}} = \sqrt{\left(\frac{1}{S_0}\right)^2 u_{F_{eH}}^2 + \left(\frac{F_{eH}}{S_0^2}\right)^2 u_{S_0}^2} \text{ (MPa)}. \quad \dots(12)$$

$u_{F_m}$  i  $u_{F_{eH}}$  su standardne mjerne nesigurnosti sile koje se određuju iz poznatih vrijednosti odgovarajućih proširenih nesigurnosti i odgovarajućih faktora prekrivanja. Navedene vrijednosti se daju u certifikatu o kalibraciji kidalice.

Mjerna nesigurnost procentualnog izduženja

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{l_0^2} u_{l_u}^2 + \left(\frac{1}{l_0} - \frac{l_u - l_0}{l_0^2}\right)^2 u_{l_0}^2} \text{ (\%)}. \quad \dots(13)$$

Mjerna nesigurnost procentualnog suženja

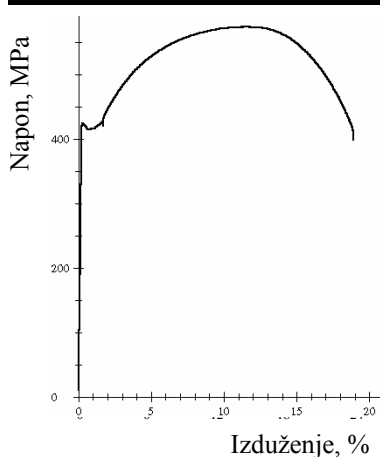
$$u_z = \sqrt{\frac{S_u^2}{S_o^4} u_{S_o}^2 + \frac{1}{S_o^2} u_{S_u}^2} (\%). \quad \dots(14)$$

#### 4. REZULTATI ISPITIVANJA

Ispitivanja su provedena na dvije epruvete, okrugloj, nominalnog promjera 10 mm i pljosnatoj, nominalnih dimenzija 10x20 mm. Mjerenje promjera ( $d_0$ ,  $d_u$ ), debljina ( $a_0$ ,  $a_u$ ), širina ( $b_0$ ,  $b_u$ ) i mjernih dužina ( $l_0$ ,  $l_u$ ) ponovljeno je pet puta na različitim dijelovima epruvete unutar mjerne dužine. Vrijednosti mjerenja karakterističnih dimenzija okruglih epruveta, te utvrđene vrijednosti sile prikazane su u tabeli 3. zajedno sa odgovarajućim mjernim nesigurnostima korištenih mjerila. U tabeli 4. dati su rezultati ispitivanja okrugle epruvete sa izraženim mjernim nesigurnostima dok je na slici 1. dat odgovarajući dijagram zavisnosti napon-izduženje ispitane okrugle epruvete.

Tabela 3. Vrijednosti dobivene ispitivanjem okrugle epruvete i mjerne nesigurnosti korištenih mjerila

Izmjerene dimenzije epruvete					Izmjerena opterećenja (N)	
Mjerenje	Promjer (mm)		Mjerna dužina (mm)		$F_{eH}$	$F_m$
	$d_0$	$d_u$	$l_0$	$l_u$		
1	9,75	6,10	50,10	62,18	31845	43022
2	9,76	6,00	50,08	62,22	Proširene mjerne nesigurnosti sile na korištenoj kidalici $U_{FeH}=162$ N $U_{Fm}=262$ N Faktor prekrivanja $k=2$	
3	9,78	6,16	50,00	62,12		
4	9,78	6,10	50,06	62,18		
5	9,77	6,08	50,06	62,20		
Proširena mjerna nesigurnost pomičnog mjerila $U=0,0236$ mm Faktor prekrivanja $k=1,65$						



Slika 1. Dijagram ispitivanja okrugle epruvete

Tabela 4. Rezultati ispitivanja okrugle epruvete

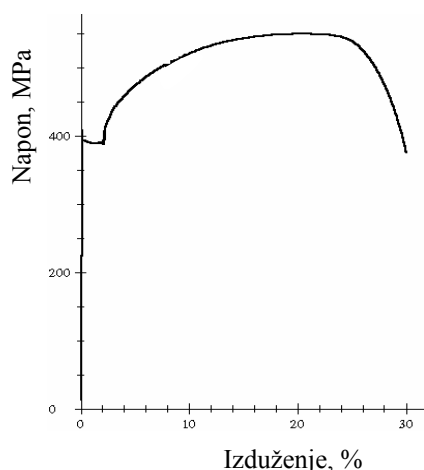
Mjerenja veličina	Rezultat
Gornji napon tečenja	$R_{eH} = 425 \pm 3^* \text{ MPa}$
Zatezna čvrstoća	$R_m = 574 \pm 5^* \text{ MPa}$
Izduženje	$A = 24,2 \pm 0,4^* \%$
Suženje	$Z = 61,2 \pm 1,3^* \%$

\* Proširena mjerna nesigurnost sa nivoom povjerenja od približno 95%.

Vrijednosti mjerenja karakterističnih dimenzija pljosnate epruvete, te utvrđene vrijednosti odgovarajućih sila, sa pripadajućim mjernim nesigurnostima korištenih mjerila, date su u tabeli 5. U tabeli 6. dati su rezultati ispitivanja pljosnate epruvete sa izraženim mjernim nesigurnostima dok je na slici 2. dat odgovarajući dijagram zavisnosti napon-izduženje ispitane pljosnate epruvete.

Tabela 5. Vrijednosti dobivene ispitivanjem pljosnate epruvete i mjerne nesigurnosti korištenih mjerila

Mjerenje	Izmjerene dimenzije epruvete					Izmjerena opterećenja (N)		
	Širina (mm)		Debljina (mm)		Mjerna dužina (mm)		$F_{eH}$	$F_m$
	$b_0$	$b_u$	$a_0$	$a_u$	$l_0$	$l_u$		
1	19,94	13,00	10,24	4,64	80,00	104,80	83309	112221
2	19,96	13,04	10,23	4,62	80,02	104,74	Proširene mjerne nesigurnosti sile na korištenoj kidalici $U_{F_{eH}} = 425$ N $U_{F_m} = 685$ N Faktor prekrivanja $k=2$	
3	19,96	13,00	10,23	4,64	80,02	104,76		
4	19,98	13,02	10,23	4,62	80,04	104,76		
5	19,96	13,00	10,22	4,66	80,02	104,78		
Proširena mjerna nesigurnost pomičnog mjerila $U=0,0236$ mm Faktor prekrivanja $k=1,65$								



Slika 2. Dijagram ispitivanja pljosnate epruvete

Tabela 6. Rezultati ispitivanja pljosnate epruvete

Mjerenja veličina	Rezultat
Gornji napon tečenja	$R_{eH} = 408 \pm 2^* \text{ MPa}$
Zatezna čvrstoća	$R_m = 550 \pm 4^* \text{ MPa}$
Izduženje	$A = 30,9 \pm 0,1^* \%$
Suženje	$Z = 70,4 \pm 0,3^* \%$

\* Proširena mjerna nesigurnost sa nivoom povjerenja od približno 95%.

## 5. ZAKLJUČAK

Prema prezentiranom postupku ocjene mjerne nesigurnosti  $R_{eH}$ ,  $R_m$ ,  $A$  i  $Z$  jedino nesigurnost korištenih mjerila i nesigurnost usljed rasipanja vrijednosti pojedinačnih dimenzionalnih mjerenja doprinose nesigurnosti rezultata navedenih izlaznih veličina. Stoga se jedino korištenjem mjerila sa manjim mjernim nesigurnostima i izradom epruveta sa ujednačenim dimenzijama unutar mjerne dužine može smanjiti mjerna nesigurnost posmatranih veličina. Navedeno je posebno bitno u slučajevima potpunog ili djelomičnog neslaganja rezultata sa specificiranim zahtjevima. U konkretnom slučaju, rezultati ispitivanja šipke  $\phi$  30 mm i lima debljine 10 mm, koji su prezentirani u ovom radu, pokazali su potpuno slaganje rezultata sa zahtjevima standarda EN 10025-2:2004.

## 6. LITERATURA

- [1] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements, ISO, Switzerland 1993, Corrected and reprinted 1995.,
- [2] Bell S.: A Biginer's Guide to Uncertainty of Measurement, NPL, Tedington, UK, 2000.,
- [3] Gabauer W.: The Determination of Uncertainties in Tensile Testing, SM&T, UNCERT COP 07:2000.