

UDK 669.15-194.2:620.178.15:620.172.2

PONAŠANJE NORMALIZIRANOG I POBOLJŠANOG ČELIKA 42CrMo4 U UVJETIMA MONOTONOG OPTEREĆENJA

MONOTONIC BEHAVIOUR OF NORMALISED AND QUENCHED AND TEMPERED STEEL 42CrMo4

Robert BASAN – Robert KUNC – Marina FRANULović

Sažetak: U radu je predstavljeno na eksperimentu zasnovano utvrđivanje ponašanja normaliziranoga i poboljšanoga niskolegiriranog čelika 42CrMo4 (AISI4140) izloženog djelovanju monotonoga aksijalnog vlačnog opterećenja te njegova karakterizacija putem odgovarajućih monotonih parametara. Eksperimenti su izvođeni na ispitnim tijelima standardnog oblika i dimenzija uz korištenje servohidrauličkog stroja pri sobnoj temperaturi. Analizirano je i uspoređeno ponašanje materijala različitih tvrdoća. Određene su vrijednosti osnovnih monotonih parametara materijala te je utvrđena i jednostavnim izrazima okarakterizirana veza između vrijednosti granice tečenja i lomne čvrstoće te temperature popuštanja odnosno postignute tvrdoće materijala.

Ključne riječi:

- monotoni parametri
- ponašanje materijala
- čelik 42CrMo4
- tvrdoća

Abstract: The presented work is concerned primarily with experimental determination of the behaviour of normalised and quenched and tempered low-alloy steel 42CrMo4 (AISI4140) subjected to monotonic uniaxial tensile loading and determination of its monotonic parameters. Experiments were performed on standard specimens using a servo-hydraulic testing machine at room temperature. The behaviours of materials with differing hardnesses were analyzed and compared. After determination of principal monotonic parameters values, correlation was confirmed to exist between tempering temperature, i.e. achieved materials' hardness, and the monotonic yield strength as well as the ultimate strength. Simple expressions are proposed for fast estimation of cited monotonic properties from hardness.

Keywords:

- monotonic properties
- material behaviour
- steel 42CrMo4
- hardness

1. UVOD

Iako je u literaturi prisutna i dostupna sad već znatna količina materijalnih parametara, pogotovo za materijale koji se u tehničkoj praksi najčešće primjenjuju, rijetko je riječ o cjelovitoj i zaokruženoj karakterizaciji pojedinoga materijala. Podaci navedeni u literaturi rijetko uključuju detaljne informacije o izvoru, značajkama proizvodnog procesa i stanju u kojem se materijal prije ispitivanja nalazi te načinu i uvjetima u kojima se eksperimenti izvode. Dostupni podaci eventualno uključuju tek osnovne informacije o kemijskom sastavu, tvrdoći, toplinskoj obradi i izvođenju eksperimenta. Uz to, metode proračunavanja i numeričkog određivanja parametara materijala također imaju utjecaja na njihove vrijednosti [1], a informacije o njima u literaturi su još

1. INTRODUCTION

Although a significant amount of material data is present and available in technical literature, especially for widely used materials, such information is only rarely complete and only a handful of materials seem to be completely and consistently characterised. Data cited in technical reference works often lacks important and detailed information regarding the origin of the material, production process specifics, the state in which the material was supplied, and the method and conditions under which the experiment was conducted. Available data include basic information on chemical composition, hardness, heat treatment and experimental procedure at best. In addition, although calculation methods and numerical procedures for determination of

rjeđe prisutne. Zbog navedenih manjkavosti podaci iz literature vrlo su često nedostadni za kritične primjene pa u takvim slučajevima bez obzira na zahtjevnost i cijenu eksperimentalnog određivanja ponašanja materijala i vrijednosti materijalnih parametara, ono i dalje ostaje neizbježno.

Primjer je takve primjene detaljno modeliranje i predviđanje odziva konstrukcije od poboljšanog čelika izložene statičkim i dinamičkim opterećenjima koja u njemu izazivaju isto takve deformacije i naprezanja. U tom je smislu jedan od osnovnih preduvjeta detaljno poznavanje ponašanja materijala u uvjetima monotonog i cikličkog opterećenja odnosno vrijednosti odgovarajućih materijalnih parametara kojima ga je moguće karakterizirati. Vrlo proširen način opisivanja osnovnog ponašanja materijala izloženog opterećenju, odnosno veze između stvarnog naprezanja i stvarne deformacije, koji je primijenjen u ovom radu je Ramberg-Osgoodova jednadžba [2] koja za slučaj monotonog opterećenja ima oblik:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

2. EKSPERIMENTALNA PROCEDURA

2.1. Materijal

Ispitivani čelik 42CrMo4 (ISO 683/1; W.Nr. 1.7225; AISI4140) predstavnik je skupine niskolegiranih čelika visoke čvrstoće koji se uobičajeno primjenjuje za izradu visokoopterećenih strojnih elemenata poput ležajeva, zupčanika te vratila i osovina. Zahvaljujući dodatku legirajućih elemenata vrlo je prikladan za izravnu toplinsku obradu poboljšavanjem. Točan kemijski sastav ispitivanog materijala i udjeli pojedinih elemenata navedeni su u tablici 1.

Tablica 1. Kemijski sastav ispitivanog čelika 42CrMo4 (vrijednosti u %)

Table 1. Chemical composition of investigated steel 42CrMo4 (values in %)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Sn
42CrMo4	0,43	0,26	0,65	0,015	0,021	1,07	0,19	0,16	0,16	0,021	0,006

2.2. Priprema uzoraka

Ispitna tijela oblika i dimenzija prikazanih na slici 1 izrađena su od valjanoga pločastog materijala pri čemu je os ispitnih tijela okomita na smjer valjanja. Prijelaz između različitih promjera izveden je na način da se osigura minimalna koncentracija naprezanja. Materijal uzoraka toplinski je obrađen postupkom poboljšavanja na način da su uzorci nakon zagrijavanja do 830°C i gašenja

material parameters also significantly influence their values [1], information in this regard is usually even scarcer. Due to the mentioned deficiencies, data from literature is quite often insufficient for critical applications. In such cases, regardless of the complexity and high expense of experimental characterisation of material behaviour and determination of parameter values, such data often remains indispensable.

An example of such a critical application is the detailed modelling and simulation of the stress-strain response of monotonically and dynamically loaded elements and assemblies made of quenched and tempered steel. In this regard, one of the main prerequisites is in-depth information on the material response in such loading conditions that is, on the detailed material parameters, which enables calculation and simulation of material behaviour. A widely accepted method of characterising behaviour that is, true stress – true strain response of material subjected to different loading conditions, is the Ramberg-Osgood equation. For monotonic loading, it can be written in the following form:

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.1. Material

Tested steel 42CrMo4 (ISO 683/1; W.Nr. 1.7225; AISI4140) is typical representative of high-strength-low-alloy steel materials which are frequently used in the making of highly loaded machine elements such as bearings, gears and shafts. Due to the addition of specific alloying elements, it is highly suitable for direct heat treatment by quenching and tempering. It's exact chemical composition is listed in table 1.

2.2. Specimen preparation

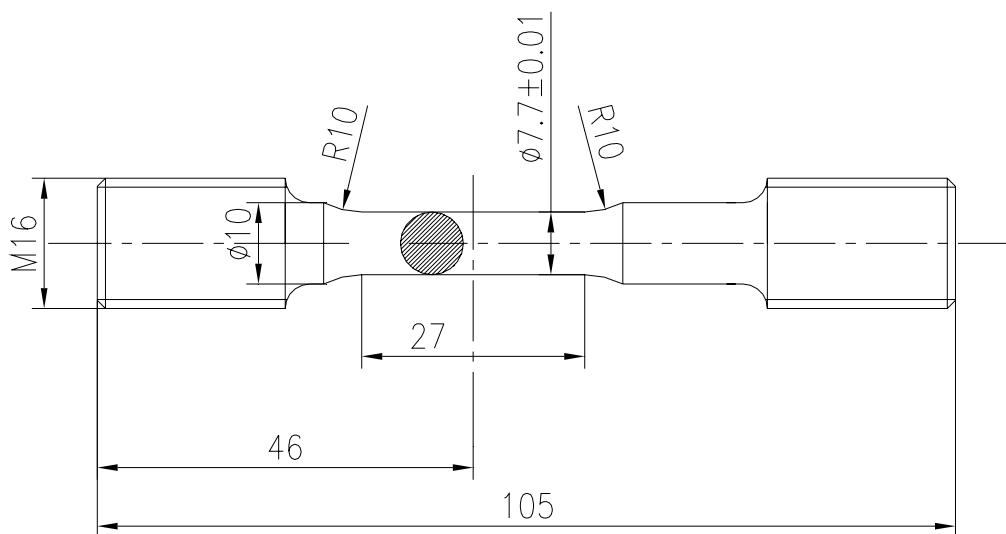
Specimens used were of the shape and dimensions as presented in Figure 1 and machined from rolled plate raw material with the longitudinal axis of specimens vertical to the direction of rolling. Large transition radii between different diameters facilitated minimisation of stress concentration. All specimens were heated to a temperature of 830°C, quenched in an oil bath and

u ulju popušteni 1 sat na različitim temperaturama. Tvrdća uzoraka popuštenih na temperaturi 630°C nakon popuštanja iznosila je 296 HV (282 HB), onih popuštenih na 480°C iznosila je 420 HV (395 HB), a uzoraka popuštenih na 300°C, 546 HV (505 HB).

Nakon provedene toplinske obrade mjerno područje uzoraka fino je brušeno i zatim je ispolirano u smjeru uzdužne osi uzoraka. Time se osim uklanjanja svih tragova grublje obrade i dobivanja odgovarajuće hrapavosti površine postiglo da svi eventualni mikrotragovi, zaostali nakon poliranja, budu u smjeru djelovanja opterećenja za vrijeme ispitivanja. Nakon završene pripreme, vrijednosti promjera mjernog područja svakoga ispitnog tijela precizno su izmjerene mikrometrom.

afterwards tempered for 1 hour at different temperatures. Specimens were tempered at temperatures of 630°C, 480°C and 300°C and achieved respective hardnesses of 296 HV (282 HB), 420 HV (395 HB) and 546 HV (505 HB).

After heat treatment, the gauge section of each specimen was precision grinded in order to achieve desired dimensions and to remove marks of previous coarse machining. Afterwards it was polished in the longitudinal direction so that any remaining microtraces would be in the direction of load applied during testing. After machining, all specimens were carefully inspected and their gauge section diameter was measured with a micrometer.



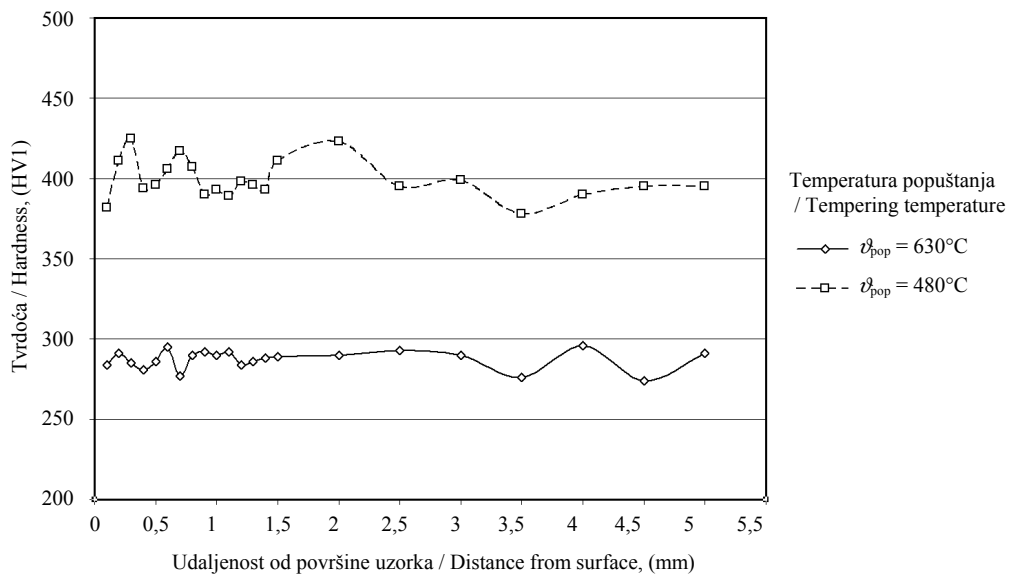
Slika 1. Geometrija i dimenzije ispitnog tijela
Figure 1. Geometry and dimensions of test specimen

Budući da je jedan od osnovnih ciljeva provedenog ispitivanja bio određivanje vrijednosti parametara za materijale određene tvrdoće, provjerena je raspodjela vrijednosti tvrdoće u unutrašnjosti uzoraka.

Odabrani uzorci nakon provedenog testiranja poprečno su prerezani na cilindričnom dijelu promjera 10 mm koji za vrijeme ispitivanja nije doživio trajne deformacije odnosno eventualne promjene strukture i tvrdoće. Tvrdća je na tim mjestima mjerena postupkom HV1 na više mjesta počevši od točke bliske cilindričnoj površini pa sve do sredine prereza. Do dubine od 1,5 mm tvrdoća je mjerena u koracima od 0,1 mm, a nakon toga do sredine ispitnog tijela tvrdoća je mjerena u koracima od 0,5 mm. Mjerenjima je provjerena i potvrđena korektnost toplinske obrade te zadovoljavajuća ujednačenost značajki materijala po cijelom poprečnom presjeku ispitnih tijela.

Primjer izmjerenih vrijednosti tvrdoće na uzorcima popuštenim na temperaturama 630°C i 480°C prikazan je na dijagramu na slici 2.

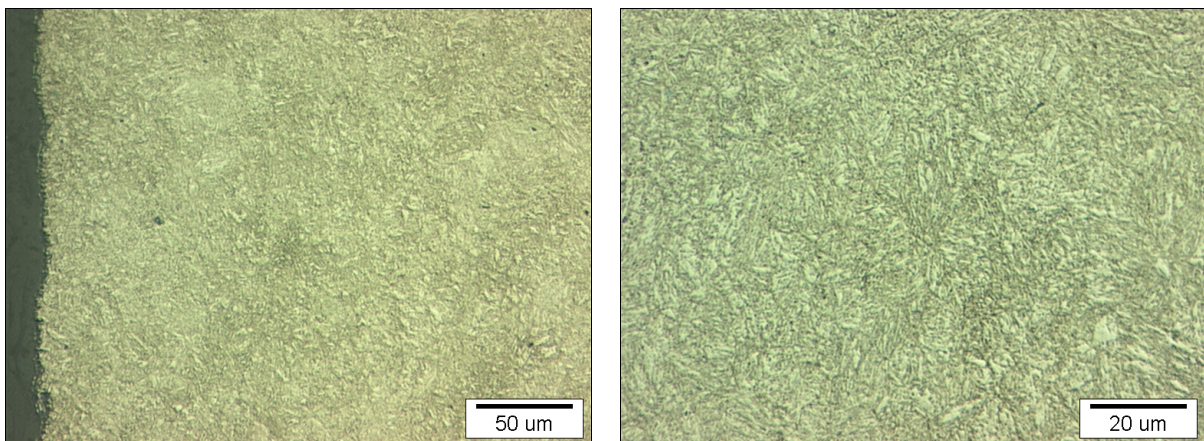
Because one of the main objectives of performed experiments was the accurate determination of the hardened materials' monotonic parameters, the distribution of hardness values inside the specimens was examined. After performing the tests, a number of specimens were cut at the section with a 10 mm diameter since this part of the specimen was not subjected to plastic strains and potential change of microstructure and hardness during the testing. Hardness was measured at a number of points according to HV1 procedure, starting at the point near the cylindrical surface and ending at the center of the cut. Up to the distance of 1,5 mm from the surface hardness was measured in 0,1 mm steps and from thereon it was measured in 0,5 mm steps. Measurement results confirmed that heat treatment was adequate and that hardness distribution was uniform and hence acceptable for the whole cross section of the specimen. An example of values measured for specimens tempered at temperatures of 630°C and 480°C are displayed in the diagram shown in Figure 2.



Slika 2. Tijek vrijednosti tvrdoće mjenjen od površine prema unutrašnjosti ispitnog tijela
 Figure 2. Values of hardness measured from the specimen's surface inwards

Na odabranim uzorcima izvršena je i provjera mikrostrukture materijala. Budući da je i određivanje mikrostrukture izvođeno nakon eksperimenta, da bi se izbjegao utjecaj trajnih deformacija na mikrostrukturu, ona je utvrđivana na površini poprečnog prereza ispitnog tijela na cilindričnom dijelu promjera 10 mm. Na slici 3 prikazana je mikrostruktura materijala uzorka tvrdoće 420 HV. Mikrostruktura materijala svih uzoraka, kako je i očekivano, odgovara mikrostrukтури popuštenog martenzita pri čemu su efekti popuštanja izraženiji na uzorcima koji su bili popušteni na višim temperaturama. Prilikom popuštanja na višim temperaturama došlo je do veće koagulacije mikrostrukturnih sastojaka nego na uzorcima popuštanim na nižim temperaturama kod kojih je igličasta mikrostruktura jače izražena.

On a number of specimens, analysis of material microstructure was performed as well. Since it was also performed after the testing and in order to avoid potential detrimental influence of plastic strains, specimens were cut at the section with a 10 mm diameter, which resulted in a flat circular surface on which analysis was performed. Figure 3 shows the microstructure of the specimen with a hardness of 420 HV. In general, the microstructure of all specimens corresponds to tempered martensite with effects of tempering being more pronounced on specimens with higher tempering temperatures. In such specimens, coagulation of microstructural components was more intense than in specimens tempered at lower temperatures that also had a more pronounced needle structure.



Slika 3. Mikrostruktura uzorka popušanog na temperaturi 480 °C; nagrizeno u nitalu, povećanje 200:1 i 500:1
 Figure 3. Microstructure of test specimen tempered at 480 °C; magnification 200:1 and 500:1, respectively

2.3. Eksperimentalna oprema i uvjeti

Monotoni vlačni eksperimenti izvedeni su na univerzalnom servohidrauličkom ispitnom stroju Schenck Hydropuls PSA opremljenom sustavom za automatiziranu akviziciju podataka HBM MGCPPlus i senzorom sile Schenck PM100R_n nazivne vrijednosti 100 kN. Vrijednosti ukupne deformacije ispitnih tijela za vrijeme ispitivanja praćene su ekstenzometrom HBM tip D4, ID101621900. Duljina na kojoj su mjerene deformacije ispitnog tijela iznosila je 25 mm. Mjerenja su izvedena u laboratorijskim uvjetima pri okolnoj temperaturi od 20°C. Monotoni vlačni eksperimenti uključivali su uobičajeno vlačno opterećenje ispitnih tijela do konačnog loma uz kontinuirano bilježenje vrijednosti opterećenja i deformacije.

3. REZULTATI

Prilikom izvođenja monotoni vlačnih eksperimenata izravno su praćene i bilježene vrijednosti pomaka odnosno inženjerske deformacije e te opterećenja odnosno inženjerskog naprezanja S . Kod izvođenja aksijalnih vlačnih eksperimenata na cilindričnim ispitnim tijelima sve do pojave „neckinga“ odnosno dok naprezanje u materijalu ne dostigne vrijednost vlačne čvrstoće R_m , vrijedi pretpostavka o konstantnosti volumena. U skladu s time moguće je primjenom jednostavnih izraza (2) i (3):

$$\varepsilon = \ln(1 + e), \quad (2)$$

$$\sigma = S(1 + e), \quad (3)$$

iz spomenutih, određenih vrijednosti e i S proračunati vrijednosti stvarne deformacije ε i stvarnog naprezanja σ [2] koje su potrebne za kasnije proračunavanje vrijednosti monotoni parametara materijala.

3.1. Ponašanje materijala

Na dijagramu na slici 4 putem krivulja inženjersko naprezanje – inženjerska deformacija ($S - e$) prikazano je ponašanje različito toplinski obrađenih materijala izloženih djelovanju monotonoga vlačnog opterećenja. Punom linijom predstavljene su ($S - e$) krivulje za materijale koji su bili eksperimentalno ispitivani u okviru ovoga rada, a koji su popušteni na temperaturama 630°C, 480°C i 300°C. Njihove su tvrdoće nakon popuštanja iznosile 296 HV, 420 HV odnosno 546 HV. Isprekidanom crtom predstavljen je normalizirani materijal konačne tvrdoće 195 HV te poboljšani materijal tvrdoće 570 HV koji je popuštan na 200°C. Ti su materijali eksperimentalno ispitivani i djelomično karakterizirani u okviru prethodno provedenog istraživanja [3].

2.3. Test equipment and conditions

Monotonic axial tensile experiments were performed on the universal servo-hydraulic testing machine Schenck Hydropuls PSA equipped with an automated system for data acquisition HBM MGCPPlus and fitted with load cell Schenck PM100R_n of 100 kN load capacity. Values of total strain were controlled with HBM model D4, ID101621900 extensometer. The gauge length on the specimen and that of extensometer was 25 mm. Tests were conducted under laboratory conditions at a room temperature of 20°C. Monotonic tensile experiments performed included continuous loading of the specimens until their final separation occurred. Values of load and displacement were continuously recorded during the tests.

3. RESULTS

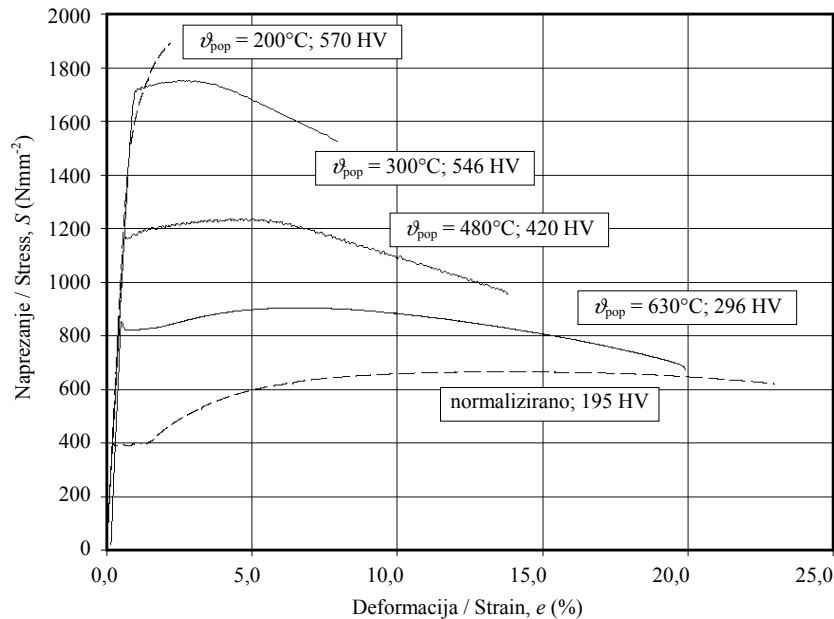
During the monotonic, uniaxial tensile tests, values of displacement, i.e. engineering strain e and load, i.e. engineering stress S , were monitored and documented. Since in performing the mentioned monotonic tensile tests, up until the occurrence of *necking*, i.e. until stress in the material reaches the value of ultimate stress R_m , an assumption of constant volume holds, it is possible to use expressions (2) and (3) for the calculation of true strain ε and true stress σ values from corresponding “engineering” values [2].

Determined values of true strain ε and true stress σ are required later for subsequent calculation of additional monotonic material parameters.

3.1. Material behaviour

Engineering strain – engineering stress ($S - e$) curves presented in the diagram in Figure 4 clearly show the significantly different behaviour of differently heat-treated material when subjected to monotonic tensile loading conditions. Continuous lines represent ($S - e$) curves of tested materials which were tempered at temperatures of 630°C, 480°C and 300°C and which after tempering had a hardness of 296 HV (282 HB), 420 HV (395 HB) and 546 HV (505 HB), respectively.

Dashed lines represent normalised material which had a hardness of 195 HV (186 HB) as well as quenched and tempered material with a hardness of 570 HV (526 HB). These materials have been experimentally tested and partially characterized in the framework of previous research work [3].



Slika 4. Monotone krivulje normaliziranog odnosno različito poboljšanog čelika 42CrMo4
 Figure 4. Monotonic curves of normalised and quenched and tempered 42CrMo4 steel

3.2. Monotoni parametri materijala

Na osnovi vrijednosti napreznja i deformacija zabilježenih za vrijeme monotoničnih vlačnih eksperimenata određene su vrijednosti sljedećih materijalnih parametara: modula elastičnosti E , granice tečenja R_e i vlačne čvrstoće R_m . Međusobnu povezanost vrijednosti stvarne plastične deformacije ε_p i stvarnog napreznja σ iznad granice tečenja vrlo dobro opisuje funkcija:

$$\sigma = K(\varepsilon_p)^n \quad (4)$$

Primjenom nelinearne regresije bez korištenja težinskog faktora na nizove vrijednosti ε_p i σ određene su vrijednosti koeficijenta čvrstoće K i eksponenta deformacijskog očvršćivanja n . Vrijednosti monotoničnih parametara određene za sve ispitivane materijale navedene su u tablici 2, a njima su pridodane i vrijednosti proračunate na osnovi rezultata ranijih eksperimentalnih istraživanja [3].

Iz podataka je vidljivo da se snižavanjem temperature popuštanja odnosno porastom tvrdoće povećava vrijednost vlačne čvrstoće R_m . Situacija je drugačija s granicom tečenja R_e , čija vrijednost porastom tvrdoće isprva također raste, da bi nakon dostizanja maksimuma daljnjim porastom tvrdoće počela padati. Takvo je ponašanje vrijednosti obaju parametara u skladu s onim navedenim u [4]. Na osnovi eksperimentalno određenih podataka i onih dostupnih iz [4] izrađen je dijagram na kojem je prikazana veza između vrijednosti granice tečenja R_e odnosno vlačne čvrstoće R_m i vrijednosti tvrdoće materijala (Slika 5).

3.2. Monotonic material parameters

Based on strain and stress data recorded during the experiment, values of the following monotonic material parameters have been determined: modulus of elasticity E , yield stress R_e and ultimate strength R_m .

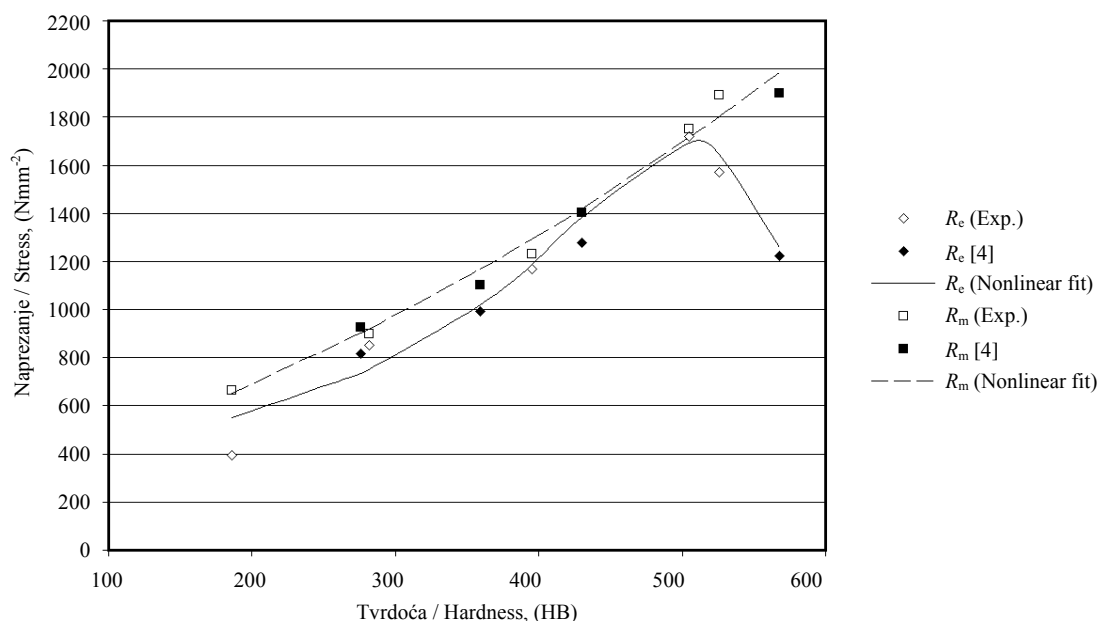
Above the yield stress R_e , the relationship between true plastic deformation ε_p and true stress σ can be well described with the expression:

By applying the method of nonlinear regression with no weight factor to corresponding values of ε_p i σ , values of strength coefficient K and strain hardening exponent n were determined for all materials. These are listed in table 2, and complemented with values calculated for the materials that were the subject of investigation in earlier research work [3].

The presented data show that a decrease of tempering temperature, i.e. an increase of hardness, is followed by a constant increase of the materials ultimate strength R_m . The situation changes somewhat when yield stress R_e is taken into consideration. With an increase of hardness, values of R_e also increase at first, but after reaching a certain maximum value, R_e starts to decrease. Such behaviour of both materials' parameters is consistent with findings reported in [4]. Based on the values of R_e and R_m determined from experimental data and those available from [4] for different 42CrMo4 tempers, a diagram with the curves $(HB - R_e)$ and $(HB - R_m)$ showing this behaviour, was assembled (Figure 5).

Tablica 2. Monotoni parametri ispitivanog čelika 42CrMo4
 Table 2. Monotonic parameters of tested 42CrMo4 steel

ϑ_{pop} (°C)	Tvrdoća / Hardness		E (Nmm ⁻²)	R_e (Nmm ⁻²)	R_m (Nmm ⁻²)	K (Nmm ⁻²)	n (-)
	(HV)	(HB)					
(normalizirano / normalised)	195	186	205000	396	665	1435,7	0,276
630	296	282	197000	850	900	1277,3	0,0979
480	420	395	197000	1170	1230	1431,3	0,0335
300	546	505	197000	1720	1750	1901,8	0,0147
200	570	526	212000	1570	1890	2990,6	0,0994



Slika 5. Vrijednosti monotone granice tečenja R_e i vlačne čvrstoće R_m čelika 42CrMo4 različite tvrdoće
 Figure 5. Values of monotonic yield strength R_e and ultimate strength R_m of 42CrMo4 steels with different hardness

Provedena nelinearna regresija bez težinskog faktora na spomenutim podacima rezultirala je jednostavnim izrazima koji karakteriziraju ovisnost između tvrdoće i granice tečenja odnosno vlačne čvrstoće:

Nonlinear regression with no weight factor performed on data presented in diagram (Figure 5) resulted in simple expressions characterizing the relationship between hardness and yield stress i.e. ultimate stress.

$$R_e = \frac{354,6 - 0,5176 \cdot HB}{1 - \frac{HB}{291} + \left(\frac{HB}{568}\right)^2}, \tag{5}$$

$$R_m = \frac{HB^2}{400} + 1,6 \cdot HB + 270, \tag{6}$$

Njihovim korištenjem moguće je samo na osnovi vrijednosti tvrdoće, jednostavno i precizno procijeniti vrijednosti granice tečenja R_e odnosno vlačne čvrstoće R_m normaliziranoga, poboljšanog odnosno kaljenog čelika 42CrMo4.

By implementing expressions (5) and (6) requiring only hardness, values of yield stress R_e and ultimate strength R_m for normalised and quenched and tempered steel, 42CrMo4 can be estimated quickly and precisely.

4. ZAKLJUČAK

Iako su materijalni parametri u znatnoj mjeri dostupni u literaturi, za kritične primjene ili za posebne slučajeve izvođenje eksperimentalnih ispitivanja ponašanja materijala i dalje je potrebno. Rezultati izvedenih eksperimenata na različito poboljšanom čeliku 42CrMo4, dopunjeni podacima iz literature, omogućili su uočavanje specifičnosti u njegovu ponašanju prilikom izloženosti djelovanju monotonog opterećenja. Na osnovi rezultata ispitivanja predloženi su jednostavni izrazi kojima je samo na osnovi poznate vrijednosti tvrdoće moguće brzo i točno proračunati vrijednosti osnovnih monotonih materijalnih parametara.

5. POPIS OZNAKA

modul elastičnosti	E ,	Nmm^{-2}
inženjerska deformacija	e ,	-
koeficijent čvrstoće	K ,	Nmm^{-2}
eksponent deformacijskog očvršćivanja	n ,	-
granica tečenja	R_e ,	Nmm^{-2}
vlačna čvrstoća	R_m ,	Nmm^{-2}
inženjersko naprezanje	S ,	Nmm^{-2}
ukupna deformacija	ϵ ,	-
elastična deformacija	ϵ_e ,	-
plastična deformacija	ϵ_p ,	-
temperatura popuštanja	ϑ_{pop} ,	$^{\circ}\text{C}$
naprezanje	σ ,	Nmm^{-2}

LITERATURA REFERENCES

- [1] Roessle, M.L.; A. Fatemi: *Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations*, International Journal of Fatigue, 22 (2000), 495-511
- [2] Dowling, N.E.: *Mechanical behavior of materials*, Prentice-Hall International, New Jersey, 1993.

4. CONCLUSION

Although material parameters are made ever more available in technical literature, for purposes of critical or special applications, experimental characterisation of material behaviour is still required. Results of the aforementioned experiments performed on differently heat treated steel 42CrMo4 and complemented with data from literature enable the determination of certain peculiarities in its behaviour when it is subjected to monotonic loading. Based on the obtained experimental results, simple expressions requiring only hardness are proposed, for fast and accurate estimation of basic monotonic material parameters.

5. LIST OF SYMBOLS

modulus of elasticity
engineering strain
strength coefficient
strain hardening exponent
yield stress
ultimate strength
engineering stress
true total strain
true elastic strain
true plastic strain
tempering temperature
true stress

- [3] Kunc, R.; Prebil, I.; Korelc, J.; Rodič, T.; Torkar, M.: *Določanje snovnih lastnosti materiala za računanje nosilnosti velikih kotalnih ležajev z mehaniko poškodbe*, Materijali in tehnologije, 35 (2001) 3-4, 107-112
- [4] Thielen, P.N.: *Fatigue studies on 4140 quenched and tempered steel*, (Dissertation), Northwestern University, Evanston, 1975.

Primljeno / Received: 30.4.2008

Prihvaćeno / Accepted: 3.9.2008

Izvornoznanstveni članak

Original scientific paper

Adresa autora / Authors' address

Robert Basan, dipl. ing.

mr. sc. Marina Franulović, dipl. ing.

Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci

Vukovarska 58, 51000 Rijeka

HRVATSKA

doc. dr. Robert Kunc, u.d.i.s.

Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani

Aškerčeva c. 6, 1000 Ljubljana

SLOVENIJA