

FAKULTET INŽENJERSKIH NAUKA
UNIVERZITETA U KRAGUJEVCU

EKSPERIMENTALNA MEHANIKA

Vladimir P. Milovanović

Kragujevac, 2026.

Autor:
Dr Vladimir P. Milovanović, vanredni profesor, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Naslov publikacije:
Eksperimentalna mehanika

Naziv izdavača:
Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, Kragujevac

Za izdavača:
Dr Slobodan Savić, redovni profesor, dekan, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Urednik:
Dr Mladen Josijević, vanredni profesor, prodekan za nastavu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Recenzenti:
Dr Miroslav Živković, redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu
Dr Gordana Jovičić, redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Mesto i godina izdavanja: Kragujevac, 2026. godine.

Tiraž: 200 primeraka

Štampa: Klik commerce doo, Zemun

ISBN broj: 978-86-6335-133-2

Copyright © Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac 2026.

Odlukom Nastavno-naučnog veća Fakulteta inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu broj 01-1/3202-26 od 17.09.2026. godine odobreno je izdavanje ove publikacije kao osnovnog univerzitetskog udžbenika.

Predgovor

Ovaj univerzitetski udžbenik predstavlja objedinjen materijal koji se koristi na predavanjima i auditornim vežbama iz predmeta Eksperimentalna mehanika na Fakultetu inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu. Udžbenik je namenjen studentima ovog fakulteta, ali i studentima svih drugih tehničkih fakulteta u zemlji i okruženju. Sadržaj je u potpunosti usaglašen sa nastavnim planom i programom predmeta i predstavlja osnovni materijal za pripremu polaganja pismenog i usmenog dela ispita.

Udžbenik je nastao kao plod mog dugogodišnjeg rada kao nastavnika na predmetu Eksperimentalna mehanika i iz potrebe za prilagođavanjem nastavnog materijala aktuelnom sadržaju predmeta. Svrha teksta je da čitalac stekne fundamentalna znanja kako o mehanici materijala, tako i o glavnim tehničkim i eksperimentalnim metodama koje se koriste za karakterizaciju materijala. Nadam se da će ovaj udžbenik pomoći studentima da lakše razumeju osnovne koncepte eksperimentalne mehanike materijala, eksperimentalnu opremu i eksperimentalne uređaje i metode.

Svaka celina, to jest svako poglavlje udžbenika predstavlja deo gradiva koji se izučava na predmetu Eksperimentalna mehanika. Udžbenik se sastoji iz šest poglavlja. Poglavlje 1 daje kratak uvod u predmet eksperimentalne mehanike i predstavlja istorijski pregled najvažnijih istraživanja koja su pomogla u razvoju eksperimentalne i teorijske mehanike materijala. Poglavlje 2 predstavlja osnovne principe teorije mehanike materijala, konkretnije, analiziraju se koncepti napona i deformacije i osnovne teorije mehanike. Poglavlje 3 daje detaljan opis eksperimenata, merenja, grešaka merenja i načine obrade i prikaza rezultata. Poglavlje 4 predstavlja materijal koji opisuje merne trake i njihovu primenu u eksperimantalnim ispitivanjima. Poglavlje 5 je ključni deo udžbenika u kome su detaljno opisane eksperimentalne postavke i eksperimentalne procedure koje se koriste za karakterizaciju materijala. Poglavlje 6 predstavlja primenu rezultata eksperimenta pri rešavanju praktičnih problema u industriji.

Zahvalnost dugujem recezentima prof. dr Gordani Jovičić i prof. dr. Miroslavu Živkoviću koji su pregledom rukopisa dali brojne korisne stručne sugestije u cilju unapređenja kvaliteta ovog udžbenika.

Želeo bih da se zahvalim mojoj porodici supruzi Vanji, ćerki Milici, sinovima Jovanu i Lazaru, na ljubavi, razumevanju koje su pokazali i podršci koju su mi pružili tokom pisanja ovog udžbenika.

Na kraju hvala svim studentima koji su birali predmet, pohađali kurs Eksperimentalna mehanika i koji su svojim pitanjima i komentarima doprineli optimalnoj prezentaciji ovog udžbenika. Unapred se zahvaljujem svima koji će mi svojim primedbama i predlozima pomoći da se eventualni nedostaci ovog udžbenika otklone u narednim izdanjima.

U Kragujevcu,

Septembra 2026. godine *Autor*

Sadržaj

1 Istorijat eksperimentalne mehanike 1
2 Mehanika materijala 9
2.1 Uvod 9
2.2 Ravnoteža deformabilnog tela 9
2.3 Napon 15
2.3.1 Prosečan normalni napon pri aksijalnom naprezanju 17
2.3.2 Prosečan napon smicanja 20
2.3.3 Metod dopuštenih napona 23
2.3.4 Metod graničnih stanja 24
2.4 Deformacija 25
2.5 Napon i deformacija kao posledica promene temperature 29
2.6 Mehaničke karakteristike materijala 30
2.6.1 Testovi ispitivanja materijala zatezanjem i na pritisak 30
2.6.2 Dijagram Napon-Deformacija 31
2.6.3 Naponsko-deformaciono ponašanje žilavih i krtih materijala 36
2.6.4 *Hooke*-ov zakon 41
2.6.5 Energija deformacije 43
2.6.6 *Poisson*-ov koeficijent 45
2.6.7 Dijagram Smičući napon-Smičuća deformacija 46
2.6.8 Povezanost materijalnih karakteristika 48
2.6.9 Otkazi u materijalu usled puzanja i zamora 51
3 Eksperiment, merenje, greške merenja, obrada i prikaz rezultata merenja 55
3.1 Eksperiment kao objekat naučnog istraživanja 55
3.2 Merenje – osnov fizičkog eksperimenta 57
3.2.1 Merni instrumenti – merila 59
3.2.2 Karakteristike mernih instrumenata 60

3.3 Međunarodni sistem jedinica SI 63
3.4 Greške merenja 70
3.5 Obrada i prikaz rezultata merenja 74
4 Tenzometrija – Merne trake i njihova primena 77
4.1 Istorijski razvoj mernih traka 79
4.2 Opis merne trake 81
4.3 Princip rada mernih traka 82
4.4 Tehničke karakteristike mernih traka 85
4.5 Kriterijumi za izbor mernih traka 88
4.6 Oblasti primene mernih traka 90
4.7 Procedura za lepljenje i povezivanje mernih traka 92
4.8 *Wheatstone*-ov most 97
4.9 Primena mernih traka pri merenju elementarnih slučajeva opterećenja 100
4.9.1 Aksijalno naprezanje 100
4.9.2 Savijanje 103
4.10 Izvori grešaka kod ispitivanja mernim trakama 106
5 Eksperimenti za određivanje mehaničkih karakteristika materijala 107
5.1 Ispitivanje materijala zatezanjem 107
5.1.1 Uređaji i oprema za ispitivanje materijala zatezanjem 107
5.1.2 Uzorci za ispitivanje metalnih materijala zatezanjem 115
5.1.3 Postupak ispitivanja 118
5.1.4 Određivanje modula elastičnosti, napona tečenja i zatezne čvrstoće 126
5.1.5 Određivanje izduženja i procentualnog sužavanja poprečnog preseka u trenutku loma 129
5.1.6 Određivanje koeficijenta i eksponenta deformacionog ojačanja 142
5.2 Ispitivanje materijala zatezanjem na povišenim temperaturama . 148
5.3 Određivanje zamornih karakteristika materijala 156
5.3.1 Definicija i opis opterećenja usled zamora 157

5.3.2 Uređaji, oprema i uzorci za ispitivanje zamora materijala .. 160

5.3.3 Niskociklični i visokociklični zamor materijala 163

5.3.4 Ponašanje materijala pri niskocikličnom zamoru 166

5.3.5 *ε–N* dijagram 169

5.3.6 *S-N* dijagram 172

5.3.7 Određivanje zamornih karakteristika u uslovima kontrolisanih deformacija 175

5.3.8 Određivanje zamornih karakteristika u kontroli sile/napona 188

5.4 Eksperimentalno određivanje parametara linearno-elastične mehanike loma 196

5.4.1 Žilavost loma 196

5.4.2 Zamorni rast prsline 199

5.5 Ispitivanje materijala na pritisak 202

5.5.1 Uređaji, oprema i uzorci za ispitivanje materijala na pritisak 204

5.5.2 Određivanje vršne čvrstoće i modula elastičnosti 209

5.5.3 Ciklično ispitivanje betonskih uzoraka 217

5.6 Određivanje mehaničkih karakteristika materijala pri velikim brzinama deformacije 221

5.6.1 Zatezni *Hopkinson*-ov štap 221

5.6.2 Prostiranje talasa u zateznom *Hopkinson*-ovom štapu 226

5.6.3 Uzorci za ispitivanje na zateznom *Hopkinson*-ovom štapu . 229

5.6.4 Određivanje brzine deformacije, deformacije i inženjerskog napona 231

5.6.5 Postupak izvođenja eksperimenta za određivanje mehaničkih karakteristika materijala pri velikim brzinama deformacije na zateznom *Hopkinson*-ovom štapu 234

5.6.6 Prikaz rezultata ispitivanja i određivanja mehaničkih karakteristika materijala pri velikim brzinama deformacije 236

6 Primena eksperimentalnih rezultata u numeričkim simulacijama metodom konačnih elemenata 243

Literatura 255

Literatura

ASTM: C39/C39M-21 *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2023.

ASTM: C469/C469M-22 S*tandard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2022.

ASTM: E8M-01 *Standard Test Method for Tension Testing of Metalic Materials*, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2017.

ASTM: E21-20 *Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials*, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2021

ASTM: E399-22, *Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2023

ASTM: E486-90 *Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metalic Materials*, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2004

ASTM: E606-92 *Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing*, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 1998

ASTM: E646-00 S*tandard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Methalic Sheet Materials*, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2010

ASTM: E647-24 *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, STM International: West Conshohocken, PA, USA, 2024

ASTM: E739-91 *Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ε-N) Fatigue Data*, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 1998

Beer F. P., Johnston Jr. E. R., Dewolf J. T., Mazurek D. F., *Mechanics of Materials*, Sixth Edition, McGraw-Hill, New York, USA, 2012.

Dišić A., *Razvoj metodologije i uređaja za dinamičko ispitivanje materijala i zavarenih spojeva sa primenom u numeričkim proračunima konstrukcija pri velikim brzinama deformacije - Doktorska disertacija*, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac, 2018.

Mićunović M., Kojić M., *Statika*, Beograd: Naučna knjiga, 1987.

Milovanović V., *Razvoj metodologije za eksperimentalnu i numeričku procenu integriteta nosećih delova vagonske konstrukcije izloženih cikličnom dinamičkom opterećenju - Doktorska disertacija*, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac, 2016.

ΠΑΠΑΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Χ. Γ., *Πειραματική Μηχανική Υλικών*, ΚΑΛΛΙΠΟΣ, ΑΝΟΙΚΤΕΣ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2024.

Sciammarella, C.A., Sciammarella, F.M. *Experimental Mechanics of Solids*, John Wiley & Sons, West Sussex, UK, 2012.

SRPS EN ISO 2566-1:2022 *Čelik – Konverzija vrednosti izduženja – Deo 1: Ugljenični i niskolegirani čelici* (*Steel - Conversion of elongation values - Part 1: Carbon and low-alloy steels*), Institut za standardizaciju Srbije, 2022.

SRPS EN ISO 6892-1:2020 *Metalni materijali – Ispitivanje zatezanjem – Deo 1: Metoda ispitivanja na sobnoj temperaturi* (*Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature*), Institut za standardizaciju Srbije, 2020.

SRPS EN ISO 6892-2:2018 *Metalni materijali – Ispitivanje zatezanjem – Deo 2: Metoda ispitivanja na povišenoj temperaturi* (*Metallic materials - Tensile testing - Part 2: Method of test at elevated temperature*), Institut za standardizaciju Srbije, 2018.

SRPS EN ISO 7500-1:2018 *Metalni materijali – Kalibracija i verifikacija uređaja za statičko jednoosno ispitivanje – Deo 1: Uređaji za ispitivanje zatezanjem/pritiskom – Kalibracija i verifikacija sistema za merenje sile* (*Metallic materials - Calibration and verification of static uniaxial testing machines - Part 1: Tension/compression testing machines - Calibration and verification of the force-measuring system*), Institut za standardizaciju Srbije, 2018.

SRPS EN ISO 9513:2014 *Metalni materijali — Kalibracija sistema ekstenzometara koji se koriste prilikom jednoosnih ispitivanja* (*Metallic materials - Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing*), Institut za standardizaciju Srbije, 2014.

SRPS EN 12390-1:2021 *Ispitivanje očvrslog betona – Deo 1: Oblik, dimenzije i ostali zahtevi za uzorke i kalupe* (*Testing hardened concrete - Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds*), Institut za standardizaciju Srbije, 2021.

SRPS EN 12390-2:2019 *Ispitivanje očvrslog betona – Deo 2: Izrada i negovanje uzoraka za ispitivanje čvrstoće* (*Testing hardened concrete - Part*

2: Making and curing specimens for strength tests), Institut za standardizaciju Srbije, 2019.

SRPS EN 12390-3:2019 *Ispitivanje očvrslog betona - Deo 3: Čvrstoća pri pritisku uzoraka za ispitivanje* (*Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens*), Institut za standardizaciju Srbije, 2019.

SRPS EN 12390-4:2019 *Ispitivanje očvrslog betona – Deo 4: Čvrstoća pri pritisku – Specifikacija uređaja za ispitivanje* (*Testing hardened concrete - Part 4: Compressive strength - Specification for testing machines*), Institut za standardizaciju Srbije, 2019.

SRPS EN 13001-1:2009 *Cranes - General design - Part 1: General principles and requirements*, Institut za standardizaciju Srbije, 2009.

SRPS EN 13001-2:2021 *Crane safety - General design - Part 2: Load actions*, Institut za standardizaciju Srbije, 2021.

SRPS EN 13001-3-1:2018 *Cranes - General design - Part 3-1: Limit States and proof competence of steel structure*, Institut za standardizaciju Srbije, 2018.

SRPS EN 1993-1-9 /NA:2013 Eurocode 3 - Design of steel structures – Part 1- 9: Fatigue,Institut za standardizaciju Srbije, 2013.

Stephens R., Fatemi A., Stephens R., Fuchs H., *Metal Fatigue in Engineering*, John Wiley & Sons Inc., New York, USA, 2001.

CIP - Каталогизација у публикацији Народна библиотека Србије, Београд

620.1(075.8)

МИЛОВАНОВИЋ, Владимир, 1979-

Eksperimentalna mehanika / Vladimir P. Milovanović. - Kragujevac : Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta, 2026 (Zemun : Klik commerce). - IV, 257 str. : ilustr. ; 25 cm

Tiraž 200. - Bibliografija: str. 255-257.

ISBN 978-86-6335-133-2

а) Испитивање материјала

COBISS.SR-ID 201531401