MEHANIKA LAHKIH STRUKTUR

UČNI NAČRT PREDMETA/COURSE SYLLABUS

Predmet:	Mehanika lahkih struktur
Course title:	Mechanics of light-weight structures
Članica nosilka/UL Member:	UL FS

Študijski programi in stopnja	**Študijska smer**	**Letnik**	**Semestri**	**Izbirnost**
Strojništvo - Razvojno raziskovalni program, druga stopnja, magistrski	Mehanika (smer)	2. letnik	1. semester	obvezni

Univerzitetna koda predmeta/University course code:	0566904
Koda učne enote na članici/UL Member course code:	6040-M

Predavanja /Lectures	**Seminar /Seminar**	**Vaje /Tutorials**	**Klinične vaje /Clinical tutorials**	**Druge oblike študija /Other forms of study**	**Samostojno delo /Individual student work**	**ECTS**
30		30			65	5

Nosilec predmeta/Lecturer:	Miha Brojan

Izvajalci predavanj:	
Izvajalci seminarjev:	
Izvajalci vaj:	
Izvajalci kliničnih vaj:	
Izvajalci drugih oblik:	
Izvajalci praktičnega usposabljanja:	

Vrsta predmeta/Course	Obvezni strokovni predmet na smeri Mehanika, ki je

type:	izbirni strokovni predmet na ostalih smereh./Compulsory specialised course in the study of Mechanics, which is an elective specialised course in other fields of study.

Jeziki/Languages:	Predavanja/Lectures:	Slovenščina
	Vaje/Tutorial:	Slovenščina

Pogoji za vključitev v delo oz. za opravljanje študijskih obveznosti:	**Prerequisites:**
Izpolnjevanje pogojev za vpis v Magistrski študijski program II. stopnje Strojništvo - Razvojno raziskovalni program.	Meeting the enrollment conditions for the Master's study programme of Mechanical Engineering - Research and Development program.

Vsebina:	**Content (Syllabus outline):**
1. Vsebina 1. Predavanja - Seznanitev s študijskimi pravili in obveznostmi - Predstavitev študijske literature - Pregled celotne vsebine predavanj - Osnovne goemetrijske lastnosti lahkih struktur 2. Vsebina 2. Predavanja - Učinkovita izraba materiala, ugodna porazdelitev napetosti v lahkih konstrukcijah (primerjave zgradb iz biologije) - Pregled vitkih (tankostenskih) konstrukcijskih elementov: nosilec, plošča, lupina - Kompozitna struktura 3. Vsebina 3. Predavanja - Problematika uporabe vitkih elementov (nezveznosti, nelinearnosti, imperfekcije, medsebojni vpliv povezanih elementov, stabilnost) 4. Vsebina 4. Predavanja - Osnovni pojmi stabilnosti konstrukcij, določitev stabilnostih razmer v vitkih strukturah 5. Vsebina 5. Predavanja - Limitna obtežba (preskok	1. Topics of Lecture 1 - Definition of rules and obligations for following and completing the course - Presentation of relevant study literature - Complete overview of course topics - Basic geometric properties of lightweight structures 2. Topics of Lecture 2 - Efficient material use, favourable stress distribution in lightweight structures (comparison with biological structures) - Review of slender (thin-walled) structural elements: beam, plate, shells - Composite structure 3. Topics of Lecture 3 - Problems of slender element application (discontinuities, nonlinearities, imperfections, interactions of connected elements, stability) 4. Topics of Lecture 4 - Basic concepts of stability of structures, determination of

sistema), bifurkacija (primer: tog drog) - (Fizikalno pravilno) ravnovesje na deformiranem nosilcu 6. Vsebina 6. Predavanja - Eulerjev uklon - Uklon imperfektnih nosilcev (geometrijske in obremenitvene imperfekcije) 7. Vsebina 7. Predavanja - Uklon pod vplivom lastne teže - Elastično vpetje 8. Vsebina 8. Predavanja - Nosilec na elastični podlagi, gubanje 9. Vsebina 9. Predavanja - Uklon realnega elasto-plastičnega nosilca - Zvrnitev konzole (uklon stojine pri upogibu I-profila) 10. Vsebina 10. Predavanja - Izboljšanje nosilnosti s pomočjo optimizacije - Definicija optimizacijskega problema (ciljna funkcija, enakostne in neenakostne vezi, Karush-Kuhn-Tuckerjev izrek) 11. Vsebina 11. Predavanja - Enostavni primeri optimizacije - Optimizacija nosilnosti kompozitnega nosilca na primeru letalskega krila 12. Vsebina 12. Predavanja - (Fizikalno pravilno) ravnovesje na deformirani plošči - Föppl-von-Karmanova teorija plošč 1. del 13. Vsebina 13. Predavanja - Föppl-von-Karmanova teorija plošč 2. del - Upogib elastične plošče 14. Vsebina 14. Predavanja - Upogib kompozitne plošče 15. Vsebina 15. Predavanja - Gubanje kompozitnih plošč	stability conditions in slender structures 5. Topics of Lecture 5 - Limit point load (snap-throug), bifurcation (example: rigid bar) - (Physically correct) equilibrium on the deformed beam 6. Topics of Lecture 6 - Euler buckling - Buckling of imperfect beams (geometric and loading imperfectioncs) 7. Topics of Lecture 7 - Buckling of a bar under self-weight - Elastic support 8. Topics of Lecture 8 - Beam on an elastic foundation, wrinkling 9. Topics of Lecture 9 - Buckling of real-life elastic-plastic beam - Torsional buckling (bukling of a web in an I-beam) 10. Topics of Lecture 10 - Improving load-carrying capacity by optimization - Definition of an optimization problem (objective function, equality and inequality contitions, Karush-Kuhn-Tucker theorem) 11. Topics of Lecture 11 - Simple cases in optimizaion - Optimizatiojn of load-carrying capacity of a composite beam (aircraft wing) 12. Topics of Lecture 12 - (Physically correct) equilibrium on a deformed plate - Föppl-von-Karman plate theory, part 1 13. Topics of Lecture 13 - Föppl-von-Karman plate theory, part 2 - Bending of an elastic plate 14. Topics of Lecture 14 - Bending of a composite plate 15. Topics of Lecture 15 - Wrinkling of compostite plates

Temeljna literatura in viri/Readings:

1. I.M. Daniel, I. Ori: Engineering mechanics of composite materials, Oxford University Press, 2006 [COBISS.SI-ID 8966427]
2. R.F. Gibson: Principles of composite material mechanics, CRC Press, 2007 [COBISS.SI-ID 741215]
3. J.S. Arora: Introduction to optimum design, Elsevier, 2004 [COBISS.SI-ID 26084101]
4. K. Kumar, D. Zindani, J.P. Davim: Optimizing engineering problems through heuristic techniques, CRC Press, Taylor & Francis, 2020 [COBISS.SI-ID 17397763]
5. Z.P. Bazant, L. Cedolin: Stability of Structures: Elastic, Inelastic, Fracture, and Damage Theories, WSPC, 1991 [COBISS.SI-ID 630043]
6. G.J. Simitses, D.H. Hodges: Fundamentals of structural stability, Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2006 [COBISS.SI-ID 11903771]

Cilji in kompetence:

Cilji:

1. Naučiti se osnov nealinearne mehanike konstrukcijskih elementov
2. Naučiti se koristno uporabiti (ne)stabilnostne pojave za napredne funkcionalnosti
3. Naučiti se snovanja lahkih konstrukcij za učinkovito izrabo materiala

Kompetence:

1. S7-MAG + P3-MAG: Sposobnost uporabe nelienarne mehanike za preračun konstrukcijskih elementov
2. S2-MAG + P2-MAG: Sposobnost snovanja sistemov z naprednimi funkcionalnostmi
3. S1-MAG + P4-MAG: Sposobnost snovanja lahkih konstrukcij z učinkovito izrabo materiala

Objectives and competences:

Goals:

1. Learn the basics of nonlinear mechanics of structural elements
2. Learn to take advantage of instabilites for advanced functionality
3. Learn to design light-weight structures for efficient material use

Competences:

1. S7-MAG + P3-MAG: Ability to understand the basics of nonlinear mechanics of structural elements
2. S2-MAG + P2-MAG: Ability to take advantage of instabilites for advanced functionality
3. S1-MAG + P4-MAG: Ability to design light-weight structures for efficient material use

Predvideni študijski rezultati:

Znanja:

Z1: Poglobljeno strokovno teoretično in praktično znanje na določenem področju, podprto s širšo teoretično in metodološko osnovo.

- Poglobljeno znanje o nelinearnem

Intended learning outcomes:

Knowledge:

Z1: Thorough professional theoretical and practical knowledge in a selected field of expertise that is supported with a broad theoretical and methodological basis.

odzivu konstrukcijskih elementov • Poglobljeno poznavanje mehanike kompozitnih struktur • Poglobljeno znanje o metodah reševanja nelinearnih problemov za gradnjo lahkih struktur Spretnosti: S1.1 Izvajanje kompleksnih operativno-strokovnih opravil, ki vključujejo tudi uporabo metodoloških orodij. • Določitev nelinearnega mehanskega odziva vitkih elementov • Določitev kritičnih notranjih obremenitev v vitkih konstrukcijskih elementih • Dimenzioniranje lahkih kompozitnih elementov	• In-depth knowledge of nonlinar response of structural elements • In-depth understanding of mechanics of composite structures • In-depth understanding of solution methods of nonlinear problems for the design of light-weight structures Skills: S1.1 Executing complex operationa-professional tasks that incorporate usage of methodological tools. • Determination of nonlinear response of slender elements • Determination of critical inner loads in slender structural elements • Design of light-weight composite elements

Metode poučevanja in učenja:	**Learning and teaching methods:**
Klasične oblike poučevanja: 1. P1 Avditorna predavanja z reševanjem izbranih - za področje značilnih - teoretičnih in praktično uporabnih primerov. 2. P2 Obravnava snovi po urejeni in vnaprej razloženi sistematiki. 3. P3 Avditorne vaje, kjer se teoretično znanje s predavanj podkrepi z računskimi primeri. 4. P4 Laboratorijske vaje z namenskimi didaktičnimi pripomočki • Eksperimentalna naprava za spremljanje upogibnih deformacij • Trgalni stroj • Simulacija preskoka sistema z vzmetmi • Eksperiment v vakuumski komori • Eksperimentalna priprava za prikaz tlačno-volumske karakteristike tankih zaprtih lupin 5. P5 Uporaba študijskega gradiva v obliki • E-domače naloge • E-zapiski	*Conventional teaching methods:* 1. P1 Auditorial lectures with solving selected field-specific theoretical and applied use cases. 2. P2 Presenting the content according to the explained system. 3. P3 Auditorial exrecises, in which theoretical content from the lectures is supplemented with practical examples. 4. P4 Laboratory exercises with special-purpose didactic devices • Experimental apparatus for the analysis of beam bending • Tensile testing machine • Vacuum chamber experiments • Experimental apparatus for the analysis of pressure-volume relation in pressure vessels 5. P5 Application of study material • E-homework • E-manuscripts • Printed versions *Contemporary and flexible teaching methods:*

• Tiskana verzija *Moderne in prožne oblike poučevanja:* 1. P6 Interaktivna predavanja 2. P7 Študij literature in razprava 3. P9 Skupinsko delo (razprave za – proti, razprave o prebranem) *Nekaj primerov uporabe IKT:* 1. P12 Individualizirane domače naloge 2. P14 Virtualni eksperimenti (FEM simulacije) 3. P15 Uporaba video vsebin kot priprava na predavanja in vaje	1. P6 Interactive lectures 2. P7 Literature study and discussion 3. P9 Team work (discussion pro and contra, discussion of the studied content) *Some cases of ICT usage:* 1. P12 Individualised homeworkes in a web classroom 2. P14 Virtual experiments (FEM simulations) 3. P15 Application of videos for preparations to the lectures and exercises

Načini ocenjevanja:	**Delež/ Weight**	**Assessment:**
Izpit (predavanja – teorija)	60,00 %	Examination (lectures - theory)
Izpit (vaje – naloge, prepračuni)	20,00 %	Examination (exercises – design calculations)
Laboratorijske vaje	10,00 %	Laboratory exercises
Domača naloga	10,00 %	Homework

Ocenjevalna lestvica:	**Grading system:**

Reference nosilca/Lecturer's references:

Miha Brojan:

1. ZAVODNIK, Jan, KOŠMRLJ, Andrej, **BROJAN, Miha**. Rate-dependent evolution of wrinkling films due to growth on semi-infinite planar viscoelastic substrates. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. [Online ed.]. Apr. 2023, vol. 173, str. 1-18, ilustr. ISSN 1873-4782. DOI: 10.1016/j.jmps.2023.105219. [COBISS.SI-ID 139863811], [JCR, SNIP, WoS, Scopus]
2. VELDIN, Tomo, BRANK, Boštjan, **BROJAN, Miha**. Computational finite element model for surface wrinkling of shells on soft substrates. *Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation*, ISSN 1007-5704, maj 2019, letn. XX, str. 1-29, ilustr. https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2019.104863, doi: 10.1016/j.cnsns.2019.104863. [COBISS.SI-ID 8813409], [JCR, SNIP, WoS do 20. 9. 2019: št. citatov (TC): 0, čistih citatov (CI): 0, Scopus do 24. 6. 2019: št. citatov (TC): 0, čistih citatov (CI): 0]
3. LAGRANGE, Romain, LÓPEZ JIMÉNEZ, F., TERWAGNE, Denis, **BROJAN, Miha**, REIS, Pedro. From wrinkling to global buckling of a ring on a curved substrate. *Journal of the mechanics and physics of solids*, ISSN 0022-5096.

[Print ed.], Apr. 2016, vol. 89, str. 77-95, ilustr., doi: 10.1016/j.jmps.2016.02.004. [COBISS.SI-ID 14610203], [JCR, SNIP, WoS do 1 10. 2019: št. citatov (TC): 12, čistih citatov (CI): 11, Scopus do 29. 8. 2019: št. citatov (TC): 11, čistih citatov (CI): 10]

4. **BROJAN, Miha**, TERWAGNE, Denis, LAGRANGE, Romain, REIS, Pedro. Wrinkling of thin spherical shells on elastic substrates. V: *3rd Int. Conference on Buckling and Postbuckling Behaviour of Composite Laminated Shell Structures with DESICOS Workshop, 25-27 March 2015, Braunschweig, Germany : final program*. [S. l.: German Aerospace Center - DLR. 2015?], f. 45. [COBISS.SI-ID 13937691]
5. ČEBRON, Matjaž, **BROJAN, Miha**. *Analiza vpliva lonca motorja na karakteristiko centrifugalnih ventilatorjev s kolesi LTI : D310 in D400*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za nelinearno mehaniko, 2016. 19 f., graf. prikazi. [COBISS.SI-ID 14614299]