

NUMERIČNO MODELIRANJE TEHNOLOŠKIH PROCESOV

UČNI NAČRT PREDMETA/COURSE SYLLABUS

Predmet:	Numerično modeliranje tehnoloških procesov
Course title:	Numerical Modelling of Technological Processes
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:	0566907
Koda učne enote na članici/UL Member course code:	6043-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:	izr. prof. dr. Miroslav Halilović, izr. prof. dr. Nikolaj Mole, doc. dr. Bojan Starman
-----------------------------------	--

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

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

Ni pogojev.	No conditions.
-------------	----------------

Vsebina:	Content (Syllabus outline):
-----------------	------------------------------------

1. Uvod v modeliranje tehnoloških procesov - Skupne značilnosti modeliranja procesov in razlike med njimi - Vrste analiz glede na materialni odziv (elastičnost,	1. Introduction to technological process modelling - Common features of process modelling and differences between them - Types of material response analysis (elasticity,
--	---

plastičnost, viskoznost) - Tehnološki proces kot začetni in robni problem - Lagrangeov in Eulerjev popis procesov - Sklopljenost fizikalnih fenomenov v tehnoloških procesih 2. Osnove materialnega odziva pri preoblikovanju kovin - Cikel obremenjevanja in razbremenjevanja - Natezni preizkus, dejanska napetost in deformacija - Plastična nestabilnost, Considerev pogoj - Zakoni plastičnega utrjevanja 3. Krivljenje kovinskih profilov - Napetostno-deformacijsko stanje pri elastoplastičnem upogibu - Razvoj plastične cone - Popolna plastifikacija prereza, plastični členek 4. Krivljenje pločevine - Kontaktni problem - Elastična povrnitev - Matematični popis velikih pomikov 5. Globoki vlek pločevine - materialni odziv - Ploskev plastičnega tečenja - Kriteriji plastičnega tečenja - Napetostna stanja med procesom preoblikovanja pločevine - Ortotropni elastoplastični odziv pločevine - Hillov model plastičnosti 6. Globoki vlek pločevine - numerično modeliranje procesa - Vplivni parametri procesa - Numerične tehnike modeliranja - Diskusija o mehanskem odzivu in vplivu procesnih parametrov 7. Masivno preoblikovanje kovin - materialni odziv - Splošna teorija plastičnosti - Haigh-Westergaardov napetostni prostor - Prikaz napetostnega stanja na deviatorični in na meridijski ravnini 8. Masivno preoblikovanje kovin - numerično modeliranje procesa - Generiranje toplote - Numerične tehnike modeliranja - Lagrangeov in Eulerjev pristop - Modeliranje procesov: kovanje, valjanje, krimpanje, izstiskavanje, vlek - Nastanek zaostalnih napetosti - Vplivni parametri procesa 9. Površinsko utrjevanje kovin - Konvencionalno udarno kovanje - Lasersko udarno kovanje - Nastanek zaostalnih napetosti - Modeliranje fazne transformacije v avstenitnem jeklu 10. Brizganje polimerov - materialni odziv - Viskoelastični materialni modeli - Lezenje in relaksacija - Histereza	plasticity, viscosity) - Technological process as an initial and boundary problem - Lagrangian and Eulerian specification of processes - Coupled physical phenomena in technological processes 2. Fundamentals of material response in metal forming - Loading and unloading cycle - Tensile test, true stress and strain - Plastic instability, Considere criterion - Plastic hardening rules 3. Bending of metal profiles - Stress-strain state in elastic-plastic bending - Development of the plastic zone - Fully plastic section, plastic hinge 4. Bending of the sheet metal - Contact problem - Elastic relaxation - Large displacement mathematical formulation 5. Sheet metal deep drawing - material response - Plastic yield surface - Plastic yield criteria - Stress states during sheet metal forming process - Orthotropic elastic-plastic response of the sheet metal - Hill plasticity 6. Sheet metal deep drawing - numerical modelling of the process - Influential process parameters - Numerical modelling techniques - Discussion on mechanical response and influence of process parameters 7. Bulk metal forming - material response - General theory of plasticity - Haigh-Westergaard stress space - Presentation of the stress state on the deviatoric and meridian plane 8. Bulk metal forming - numerical modelling of the process - Heat generation - Numerical modelling techniques - Lagrange and Euler approach - Modelling of processes: forging, rolling, crimping, extrusion, drawing - Residual stresses generation - Influential process parameters 9. Surface hardening of metals - Conventional impact forging - Laser impact forging - Residual stresses generation - Modelling of phase transformation in austenitic steel 10. Polymer injection molding - material response - Viscoelastic material models - Creep and relaxation - Hysteresis
---	---

11. Brizganje polimerov - numerično modeliranje procesa - Modeliranje faz brizganja - Modeliranje krčenja zaradi ohlajanja - Modeliranje izmeta izdelka 12. Brizganje polimernih kompozitov - Elastična ortotropija - Vpliv orientiranosti in dolžine vlaken - Modeliranje orientacije vlaken - Homogenizacijske teorije 13. Termomehansko procesi - Določitev temperaturnega polja - Modeliranje mehanskega odziva - Numerične metode za obravnavo sklopljenega problema - Modeliranje procesov: varjenje, žarjenje za odpravo zaostalih napetosti 14. Toplotne obdelave kovin - Modeliranje lokalnega segrevanja - Matematični popis razvoja mikrostrukture - Modeliranje vnosa toplote - Numerični model procesa toplotne obdelave 15. 3D tisk - modeliranje procesa dodajanja materiala - Numerično modeliranje časovno odvisnega dodajanja staljenega materiala - Numerično modeliranje strjevanja - Priprava geometrijskega modela in mreženje s končnimi elementi - Numerično modeliranje procesa	11. Polymer injection molding - numerical modelling of the process - Modelling of injection phases - Modelling of the cooling contraction - Modelling of the part ejection 12. Injection molding of polymer composites - Orthotropic elasticity - Impact of fiber orientation and length - Modelling of fiber orientation - Homogenization theories 13. Thermo mechanical processes - Determination of temperature field - Mechanical response modelling - Numerical methods for dealing with a coupled problem - Modelling of processes: welding, annealing to remove residual stresses 14. Heat treatment of metals - Modelling of local heating - Mathematical description of microstructural evolution - Modelling of the heat input - Numerical modelling of the heat treatment process 15. 3D printing - modelling of additive manufacturing process - Numerical modelling of the time-dependent addition of molten material - Numerical modelling of solidification - Geometric modelling and finite element mesh generation - Numerical modelling of the process
---	---

Temeljna literatura in viri/Readings:

1. C.H. Gur, J. Pan: Handbook of Thermal Process Modeling of Steels, CRC Press, 2009. [COBISS.SI-ID [720298](#)]
2. S. Kobayashi, S. Oh, T. Altan: Metal Forming and the Finite-Element Method, Oxford Univ. Press, 1989. [COBISS.SI-ID [716310](#)]
3. T. Osswald: Injection Molding Handbook, C. Hanser Verlag, 2002. [COBISS.SI-ID [4936475](#)]
4. A. Sawczuk: Mechanics and plasticity of structures, John Wiley & Sons, 1989. [COBISS.SI-ID [1376005](#)]

Cilji in kompetence:

- Cilji:
1. Obvladovanje numeričnega modeliranja multi-fizikalnih tehnoloških procesov
 2. Razumevanje medsebojne soodvisnosti različnih učinkov v tehnoloških procesih
 3. Izvajanje optimizacije tehnološkega procesa na osnovi rezultatov računalniške simulacije
- Kompetence:
1. Sposobnost numeričnega modeliranja multi-fizikalnih problemov (S1-MAG, S10-MAG, P2-MAG, P3-MAG, P4-MAG)
 2. Sposobnost analiziranja medsebojno kompleksno odvisnih rezultatov računalniške simulacije (S2-MAG, S7-MAG, S10-MAG, P2-MAG, P3-MAG)

Objectives and competences:

- Goals:
1. Mastering the numerical modelling of multi-physical technological processes
 2. Understanding the interdependence of different effects in technological processes
 3. Implementation of technological process optimization based on the results of computer simulation
- Competences:
1. The ability to develop numerical model of multi-physical problems (S1-MAG, S10-MAG, P2-MAG, P3-MAG, P4-MAG)
 2. The ability to analyze the inter-dependent results of computer simulation (S2-MAG, S7-MAG, S10-MAG, P2-MAG, P3-MAG)

3. Izvajanje optimiranja tehnoloških procesov na osnovi rezultatov računalniške simulacije le-teh (S6-MAG, S7-MAG, P1-MAG)	3. Mastery of optimization of technological processes based on the results of computer simulation of them (S6-MAG, S7-MAG, P1-MAG)
--	--

Predvideni študijski rezultati:	Intended learning outcomes:
Znanja: Poglobljeno teoretično in metodološko znanje z elementi raziskovanja na področju numeričnega modeliranja kompleksnih, multi-fizikalnih problemov, ki so sestavni del tehnoloških procesov. Spretnosti: - S2.1 Obvladovanje numeričnega modeliranja zelo zahtevnih multi-fizikalnih problemov - S2.3 Sposobnost raziskovalnega dela na področju razvoja novih numeričnih modelov fizikalnega dogajanja	Knowledge: In-depth theoretical and methodological knowledge with elements of research in the field of numerical modelling of complex, multi-physical problems that are an integral part of technological processes. Skills: - S2.1 Mastering the numerical modelling of very complex multi-physical problems - S2.3 Ability to research work in the development of new numerical models of physical problems

Metode poučevanja in učenja:	Learning and teaching methods:
P1 Avditorna predavanja z reševanjem izbranih - za področje značilnih - teoretičnih in praktično uporabnih primerov P2 Obravnava snovi po urejeni in vnaprej razloženi sistematiki P5 Uporaba študijskega gradiva v obliki PPT prosojnic, ki jih študent za posamezno predavanje dobi pred predavanjem P7 Študij literature in razprava P8 Izdelava in predstavitev aplikativnih seminarских nalog P10 Uporaba anket v realnem času P15 Uporaba video vsebin kot priprava na predavanja in vaje	P1 Lectures with solving selected typical and theoretical examples P2 Study content is discussed according to an orderly and pre-explained systematics P5 Use of study material in the form of PPT slides, which the student receives for each lecture before the lecture P7 Literature studies and discussion P8 Preparation and presentation of applied seminar work P10 Use real-time surveys P15 Using video content as a preparation for lectures and tutorials

Načini ocenjevanja:	Delež/Weight	Assessment:
Teoretične vsebine	50,00 %	Theory
Praktične vsebine	30,00 %	Practical work
Samostojno delo	20,00 %	Coursework

Ocenjevalna lestvica:	Grading system:
5 - 10, pri čemer velja, da je pozitivna ocena od 6 - 10	5 - 10, a student passes the exam if he is graded from 6 to 10

Reference nosilca/Lecturer's references:
Miroslav Halilović: - KREBELJ, Kristjan, HALILOVIČ, Miroslav, MOLE, Nikolaj. The cooling rate dependence of the specific volume in amorphous plastic injection molding. The international journal of advanced manufacturing technology, ISSN 0268-3768, Apr. 2019, str. 1-10. [COBISS.SI-ID 16570395] - CHEN, Bin, STARMAN, Bojan, HALILOVIČ, Miroslav, BERGLUND, Lars A., COPPIETERS, Sam. Finite element model updating for material model calibration : a review and guide to practice. <i>Archives of computational methods in engineering</i>. [Online ed.]. 2024, vol. , str. [1-78], ilustr. ISSN 1886-1784. [COBISS.SI-ID 217373187] - STARMAN, Bojan, PEPELJAK, Tomaž, MAČEK, Andraž, HALILOVIČ, Miroslav, COPPIETERS, Sam. Inverse calibration of out-of-plane shear anisotropy parameters of sheet metal. <i>International Journal of</i>

Solids and Structures. [Online ed.]. May **2025**, vol. 313, [article no.] 113313, 20 str., ilustr. ISSN 1879-2146. [COBISS.SI-ID [227822851](#)]

4. MAČEK, Andraž, UREVC, Janez, STARMAN, Bojan, **HALILOVIČ, Miroslav**. Parameters' confidence intervals evaluation for heterogeneous strain field specimen designs by using digital image correlation. V: HABRAKEN, Anne Marie (ur.). *24th International Conference on Material Forming, Liège, Belgium, 14 - 16 April, 2021 : ESAFORM 2021*. 24th International Conference on Material Forming, Liège, Belgium, 14 - 16 April, **2021**. Liège: AIM. 2021, str. 1-8, ilustr. [COBISS.SI-ID [63325955](#)]
5. STARMAN, Bojan, KOC, Pino, MAČEK, Andraž, **HALILOVIČ, Miroslav**. *Evaluation of peak stresses in a 6" pipe after the installation of steel insulation boxes*. Ljubljana: Faculty of Mechanical Engineering, **2024**. 15 f., graf. prikazi. [COBISS.SI-ID [190519299](#)]

Nikolaj Mole:

1. **MOLE, Nikolaj**, BOJINOVIĆ, Marko, KOC, Pino, ŠTOK, Boris. Effects of prior microstructure and heating rate on the depth of increased hardness in laser hardening : comparison of computer simulation and experimental results. *Metals*, ISSN 2075-4701, Dec. **2018**, vol. 8, iss. 12, p. 1-16. [COBISS.SI-ID [16374043](#)]
2. KREBELJ, Kristjan, **MOLE, Nikolaj**, ŠTOK, Boris. Three-dimensional modeling of the stress evolution in injection molded parts based on a known melt pressure field. *The international journal of advanced manufacturing technology*, ISSN 0268-3768, **2017**, vol. 90, iss. 5, str. 2363-2376. [COBISS.SI-ID [14956571](#)]
3. MARKEŽIČ, Rok, **MOLE, Nikolaj**, NAGLIČ, Iztok, ŠTURM, Roman. Time and temperature dependent softening of H11 hot-work tool steel and definition of an anisothermal tempering kinetic model. *Materials today communications*. **2020**, vol. 22, str. 1-7, ilustr. ISSN 2352-4928. [COBISS.SI-ID [17156379](#)]
4. BOLKA, Špela, BRATUŠ, Vitoslav, STARMAN, Bojan, **MOLE, Nikolaj**. Experimental and numerical analysis of interlocking rib at sheet metal blanking. V: FRATINI, Livan (ur.), et al. *Proceedings of the 21st International ESAFORM Conference on Material Forming : ESAFORM 2018*, (AIP conference proceedings, ISSN 1551-7616, 1960). Palermo: [S. n.]. **2018**, vol. 1960, str. 160003-1-160003-6. [COBISS.SI-ID [16052251](#)]
5. **MOLE, Nikolaj**, CAFUTA, Gašper, KOTAR, Andrej. *Določitev optimalne oblike platine za izdelavo enojnega pomivalnega korita 800x500x190mm : poročilo*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2022. 6 f., graf. prikazi. [COBISS.SI-ID [98009603](#)]

Bojan Starman:

1. OBID, Štefan, HALILOVIČ, Miroslav, UREVC, Janez, **STARMAN, Bojan**. Non-linear elastic tension–compression asymmetric anisotropic model for fibre-reinforced composite materials. *International journal of engineering science*. Apr. **2023**, vol. 185, pg. 1-13. [COBISS.SI-ID [142323971](#)]
2. **STARMAN, Bojan**, HALLBERG, Håkan, WALLIN, Mathias, RISTINMAA, Matti, HALILOVIČ, Miroslav. Differences in phase transformation in laser peened and shot peened 304 austenitic steel. *International journal of mechanical sciences*. **2020**, vol. 176, pg. 1-18. [COBISS.SI-ID [17043227](#)]
3. **STARMAN, Bojan**, HALLBERG, Håkan, WALLIN, Mathias, RISTINMAA, Matti, MOLE, Nikolaj, HALILOVIČ, Miroslav. Modelling of the mechanical response in 304 austenitic steel during laser shock peening and conventional shot peening. *Procedia manufacturing*. **2020**, vol. 47, pg. 450-457. [COBISS.SI-ID [20031491](#)]
4. **STARMAN, Bojan**, MAČEK, Andraž, RUS, Primož, OBID, Štefan, KRALJ, Aleš, HALILOVIČ, Miroslav. Primary seal deformation in multipane glazing units. *Applied sciences*. **2020**, vol. 10, iss. 4, pg. 1-20. [COBISS.SI-ID [17042971](#)]
5. **STARMAN, Bojan**, KOC, Pino, MAČEK, Andraž, HALILOVIČ, Miroslav. *Evaluation of peak stresses in a 6" pipe after the installation of steel insulation boxes*. Ljubljana: Faculty of Mechanical Engineering, **2024**. 15 f., graf. prikazi. [COBISS.SI-ID [190519299](#)]