

# NUMERIČNO MODELIRANJE TEHNOLOŠKIH PROCESOV

## UČNI NAČRT PREDMETA/COURSE SYLLABUS

<b>Predmet:</b>	Numerično modeliranje tehnoloških procesov
<b>Course title:</b>	Numerical modelling of technological processes
<b>Članica nosilka/UL Member:</b>	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

<b>Univerzitetna koda predmeta/University course code:</b>	0566907
<b>Koda učne enote na članici/UL Member course code:</b>	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

<b>Nosilec predmeta/Lecturer:</b>	Bojan Starman, Miroslav Halilović, Nikolaj Mole
-----------------------------------	---

<b>Izvajalci predavanj:</b>	
<b>Izvajalci seminarjev:</b>	
<b>Izvajalci vaj:</b>	
<b>Izvajalci kliničnih vaj:</b>	
<b>Izvajalci drugih oblik:</b>	
<b>Izvajalci praktičnega usposabljanja:</b>	

<b>Vrsta predmeta/Course</b>	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:**

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

**Vsebina:****Content (Syllabus outline):**

<p>1. Uvod v modeliranje tehnoloških procesov</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Skupne značilnosti modeliranja procesov in razlike med njimi</li> <li>- Vrste analiz glede na materialni odziv (elastičnost, plastičnost, viskoznost)</li> <li>- Tehnološki proces kot začetni in robni problem</li> <li>- Lagrangeov in Eulerjev popis procesov</li> <li>- Sklopljenost fizikalnih fenomenov v tehnoloških procesih</li> </ul> <p>2. Osnove materialnega odziva pri preoblikovanju kovin</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cikel obremenjevanja in razbremenjevanja</li> <li>- Natezni preizkus, dejanska napetost in deformacija</li> <li>- Plastična nestabilnost, Considerev pogoj</li> <li>- Zakoni plastičnega utrjevanja</li> </ul> <p>3. Krivljenje kovinskih profilov</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Napetostno-deformacijsko stanje pri elastoplastičnem upogibu</li> <li>- Razvoj plastične cone</li> <li>- Popolna plastifikacija prereza, plastični členek</li> </ul> <p>4. Krivljenje pločevine</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kontaktni problem</li> <li>- Elastična povrnitev</li> <li>- Matematični popis velikih pomikov</li> </ul>	<p>1. Introduction to technological process modelling</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Common features of process modelling and differences between them</li> <li>- Types of material response analysis (elasticity, plasticity, viscosity)</li> <li>- Technological process as an initial and boundary problem</li> <li>- Lagrangian and Eulerian specification of processes</li> <li>- Coupled physical phenomena in technological processes</li> </ul> <p>2. Fundamentals of material response in metal forming</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Loading and unloading cycle</li> <li>- Tensile test, true stress and strain</li> <li>- Plastic instability, Considere criterion</li> <li>- Plastic hardening rules</li> </ul> <p>3. Bending of metal profiles</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Stress-strain state in elastic-plastic bending</li> <li>- Development of the plastic zone</li> <li>- Fully plastic section, plastic hinge</li> </ul> <p>4. Bending of the sheet metal</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contact problem</li> <li>- Elastic relaxation</li> <li>- Large displacement mathematical formulation</li> </ul> <p>5. Sheet metal deep drawing - material response</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Plastic yield surface</li> </ul>
---	--

<p>5. Globoki vlek pločevine - materialni odziv</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ploskev plastičnega tečenja</li> <li>- Kriteriji plastičnega tečenja</li> <li>- Napetostna stanja med procesom preoblikovanja pločevine</li> <li>- Ortotropni elastoplastični odziv pločevine</li> <li>- Hillov model plastičnosti</li> </ul> <p>6. Globoki vlek pločevine - numerično modeliranje procesa</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vplivni parametri procesa</li> <li>- Numerične tehnike modeliranja</li> <li>- Diskusija o mehanskem odzivu in vplivu procesnih parametrov</li> </ul> <p>7. Masivno preoblikovanje kovin - materialni odziv</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Splošna teorija plastičnosti</li> <li>- Haigh-Westergaardov napetostni prostor</li> <li>- Prikaz napetostnega stanja na deviatorični in na meridijski ravnini</li> </ul> <p>8. Masivno preoblikovanje kovin - numerično modeliranje procesa</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Generiranje toplote</li> <li>- Numerične tehnike modeliranja</li> <li>- Lagrangeov in Eulerjev pristop</li> <li>- Modeliranje procesov: kovanje, valjanje, krmanje, izstiskavanje, vlek</li> <li>- Nastanek zaostalih napetosti</li> <li>- Vplivni parametri procesa</li> </ul> <p>9. Površinsko utrjevanje kovin</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Konvencionalno udarno kovanje</li> <li>- Lasersko udarno kovanje</li> <li>- Nastanek zaostalih napetosti</li> <li>- Modeliranje fazne transformacije v avstenitnem jeklu</li> </ul> <p>10. Brizganje polimerov - materialni odziv</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Viskoelastični materialni modeli</li> <li>- Lezenje in relaksacija</li> <li>- Histereza</li> </ul> <p>11. Brizganje polimerov - numerično modeliranje procesa</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modeliranje faz brizganja</li> <li>- Modeliranje krčenja zaradi ohlajanja</li> <li>- Modeliranje izmeta izdelka</li> </ul> <p>12. Brizganje polimernih kompozitov</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plastic yield criteria</li> <li>- Stress states during sheet metal forming process</li> <li>- Orthotropic elastic-plastic response of the sheet metal</li> <li>- Hill plasticity</li> </ul> <p>6. Sheet metal deep drawing - numerical modelling of the process</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Influential process parameters</li> <li>- Numerical modelling techniques</li> <li>- Discussion on mechanical response and influence of process parameters</li> </ul> <p>7. Bulk metal forming - material response</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- General theory of plasticity</li> <li>- Haigh-Westergaard stress space</li> <li>- Presentation of the stress state on the deviatoric and meridian plane</li> </ul> <p>8. Bulk metal forming - numerical modelling of the process</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Heat generation</li> <li>- Numerical modelling techniques</li> <li>- Lagrange and Euler approach</li> <li>- Modelling of processes: forging, rolling, crimping, extrusion, drawing</li> <li>- Residual stresses generation</li> <li>- Influential process parameters</li> </ul> <p>9. Surface hardening of metals</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Conventional impact forging</li> <li>- Laser impact forging</li> <li>- Residual stresses generation</li> <li>- Modelling of phase transformation in austenitic steel</li> </ul> <p>10. Polymer injection molding - material response</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Viscoelastic material models</li> <li>- Creep and relaxation</li> <li>- Hysteresis</li> </ul> <p>11. Polymer injection molding - numerical modelling of the process</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelling of injection phases</li> <li>- Modelling of the cooling contraction</li> <li>- Modelling of the part ejection</li> </ul> <p>12. Injection molding of polymer composites</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Orthotropic elasticity</li> <li>- Impact of fiber orientation and length</li> <li>- Modelling of fiber orientation</li> </ul>
--	---

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elastična ortotopija</li> <li>- Vpliv orientiranosti in dolžine vlaken</li> <li>- Modeliranje orientacije vlaken</li> <li>- Homogenizacijske teorije</li> </ul> <p>13. Termomehansko procesi</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Določitev temperaturnega polja</li> <li>- Modeliranje mehanskega odziva</li> <li>- Numerične metode za obravnavo sklopljenega problema</li> <li>- Modeliranje procesov: varjenje, žarjenje za odpravo zaostalih napetosti</li> </ul> <p>14. Toplotne obdelave kovin</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modeliranje lokalnega segrevanja</li> <li>- Matematični popis razvoja mikrostrukture</li> <li>- Modeliranje vnosa toplote</li> <li>- Numerični model procesa toplotne obdelave</li> </ul> <p>15. 3D tisk - modeliranje procesa dodajanja materiala</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Numerično modeliranje časovno odvisnega dodajanja staljenega materiala</li> <li>- Numerično modeliranje strjevanja</li> <li>- Priprava geometrijskega modela in mreženje s končnimi elementi</li> <li>- Numerično modeliranje procesa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Homogenization theories</li> </ul> <p>13. Thermo mechanical processes</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Determination of temperature field</li> <li>- Mechanical response modelling</li> <li>- Numerical methods for dealing with a coupled problem</li> <li>- Modelling of processes: welding, annealing to remove residual stresses</li> </ul> <p>14. Heat treatment of metals</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelling of local heating</li> <li>- Mathematical description of microstructural evolution</li> <li>- Modelling of the heat input</li> <li>- Numerical modelling of the heat treatment process</li> </ul> <p>15. 3D printing - modelling of additive manufacturing process</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Numerical modelling of the time-dependent addition of molten material</li> <li>- Numerical modelling of solidification</li> <li>- Geometric modelling and finite element mesh generation</li> <li>- Numerical modelling of the process</li> </ul>
--	--

### 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

### 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

<p>procesa na osnovi rezultatov računalniške simulacije</p> <p>Kompetence:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sposobnost numeričnega modeliranja multi-fizikalnih problemov (S1-MAG, S10-MAG, P2-MAG, P3-MAG, P4-MAG)</li> <li>2. Sposobnost analiziranja medsebojno kompleksno odvisnih rezultatov računalniške simulacije ( S2-MAG, S7-MAG, S10-MAG, P2-MAG, P3-MAG)</li> <li>3. Izvajanje optimiranja tehnoloških procesov na osnovi rezultatov računalniške simulacije le-teh (S6-MAG, S7-MAG, P1-MAG)</li> </ol>	<p>process optimization based on the results of computer simulation</p> <p>Competences:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. The ability to develop numerical model of multi-physical problems (S1-MAG, S10-MAG, P2-MAG, P3-MAG, P4-MAG)</li> <li>2. The ability to analyze the inter-dependent results of computer simulation ( S2-MAG, S7-MAG, S10-MAG, P2-MAG, P3-MAG)</li> <li>3. Mastery of optimization of technological processes based on the results of computer simulation of them (S6-MAG, S7-MAG, P1-MAG)</li> </ol>
--	---

**Predvideni študijski rezultati:**

**Intended learning outcomes:**

<p>Znanja:</p> <p>Poglobljeno teoretično in metodološko znanje z elementi raziskovanja na področju numeričnega modeliranja kompleksnih, multi-fizikalnih problemov, ki so sestavni del tehnoloških procesov.</p> <p>Spretnosti:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. S2.1 Obvladovanje numeričnega modeliranja zelo zahtevnih multi-fizikalnih problemov</li> <li>2. S2.3 Sposobnost raziskovalnega dela na področju razvoja novih numeričnih modelov fizikalnega dogajanja</li> </ol>	<p>Knowledge:</p> <p>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.</p> <p>Skills:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. S2.1 Mastering the numerical modelling of very complex multi-physical problems</li> <li>2. S2.3 Ability to research work in the development of new numerical models of physical problems</li> </ol>
---	---

**Metode poučevanja in učenja:**

**Learning and teaching methods:**

<p>P1 Avditorna predavanja z reševanjem izbranih - za področje značilnih - teoretičnih in praktično uporabnih primerov</p> <p>P2 Obravnava snovi po urejeni in vnaprej razloženi sistematiki</p> <p>P5 Uporaba študijskega gradiva v obliki PPT prosojnic, ki jih študent za posamezno predavanje dobi pred predavanjem</p> <p>P7 Študij literature in razprava</p>	<p>P1 Lectures with solving selected typical and theoretical examples</p> <p>P2 Study content is discussed according to an orderly and pre-explained systematics</p> <p>P5 Use of study material in the form of PPT slides, which the student receives for each lecture before the lecture</p> <p>P7 Literature studies and discussion</p> <p>P8 Preparation and presentation of</p>
---	--

P8 Izdelava in predstavitev aplikativnih seminarских nalog	applied seminar work
P10 Uporaba anket v realnem času	P10 Use real-time surveys
P15 Uporaba video vsebin kot priprava na predavanja in vaje	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:**

--	--

**Reference nosilca/Lecturer's references:**

**Miroslav Halilovič:**

1. 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](#)] (tip.01)
2. **HALILOVIČ, Miroslav**, ISSA, Sally, WALLIN, Mathias, HALLBERG, Håkan, RISTINMAA, Matti. Prediction of the residual state in 304 austenitic steel after laser shock peening : effects of plastic deformation and martensitic phase transformation. International journal of mechanical sciences, ISSN 0020-7403. [Print ed.], Jun. 2016, vol. 111/112, str. 24-34. [COBISS.SI-ID [14602779](#)] (tip. 1.01)
3. VRH, Marko, **HALILOVIČ, Miroslav**, STARMAN, Bojan, ŠTOK, Boris, COMSA, Dan-Sorin, BANABIC, Dorel. Capability of the BBC2008 yield criterion in predicting the earingprofile in cup deep drawing simulations. European journal of mechanics. A, Solids, ISSN 0997-7538. [Print ed.], May/June. 2014, vol. 45, str. 59-74. [COBISS.SI-ID [13311771](#)] (tip. 1.01)
4. STARMAN, Bojan, VRH, Marko, **HALILOVIČ, Miroslav**, ŠTOK, Boris. Advanced modelling of sheet metal forming considering anisotropy and young's modulus evolution. Strojniški vestnik, ISSN 0039-2480, Feb. 2014, vol. 60, no. 2, str. 84-92. [COBISS.SI-ID [13345307](#)] (tip. 1.01)
5. 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](#)] (tip. 1.08)

### **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](#)] (tip. 01)
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](#)] (tip. 1.01)
3. BOJINOVIĆ, Marko, **MOLE, Nikolaj**, ŠTOK, Boris. A computer simulation study of the effects of temperature change rate on austenite kinetics in laser hardening. *Surface & coatings technology*, ISSN 0257-8972. [Print ed.], Jul. 2015, vol. 273, str.60-76. [COBISS.SI-ID [13943323](#)] (tip.1.01)
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](#)] (tip. 1.08)
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](#)] (tip. 2.12)

### **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](#)] (tip. 01)
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](#)] (tip. 1.01)
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](#)] (tip. 1.01)
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](#)] (tip. 1.01)
5. VRH, Marko, HALILOVIČ, Miroslav, **STARMAN, Bojan**, ŠTOK, Boris, COMSA, Dan-Sorin, BANABIC, Dorel. Capability of the BBC2008 yield criterion in predicting the earing profile in cup deep drawing simulations. *European journal of mechanics. A, Solids*. [Print ed.]. May/Jun. 2014, vol. 45, pg. 59-74. [COBISS.SI-ID [13311771](#)] (tip. 1.01)

