



Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

# ZAKLJUČNO POROČILO TEMELJNEGA RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

*Naslov projekta:*

**Razvoj večnamenskih avksetičnih celičnih struktur**

*Šifra projekta: J2-8186*

*Vodja projekta:*

**red. prof. dr. Matej VESENJAK**

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

*Raziskovalna skupina:*

red. prof. dr. Srečko Glodež (FS UM)

red. prof. dr. Zoran Ren (FS UM)

izr. prof. dr. Miran Ulbin (FS UM)

doc. dr. Matej Borovinšek (FS UM)

doc. dr. Nejc Novak (FS UM)

dr. Marko Šori (FS UM)

red. prof. dr. Jernej Klemenc (FS UL)

red. prof. dr. Marko Nagode (FS UL)

asist. dr. Aleš Gosar (FS UL)

asist. dr. Andrej Škrlec (FS UL)

dr. Mitja Franko (FS UL)

asist. Tadej Kocjan (FS UL)

asist. Dejan Tomažinčič (FS UL)

*Čas trajanja projekta:*

1. maj 2017 – 30. april 2020

*Maribor, 2021*



## ZAKLJUČNO POROČILO RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

### A. PODATKI O RAZISKOVALNEM PROJEKTU

#### 1. Osnovni podatki o raziskovalnem projektu

<b>Šifra</b>	J2-8186
<b>Naslov</b>	Razvoj večnamenskih avksetičnih celičnih struktur
<b>Vodja</b>	23463 Matej Vesenjak
<b>Tip</b>	J Temeljni projekt
<b>Obseg učinkovitih ur raziskovalnega dela</b>	8097
<b>Cenovna kategorija</b>	C
<b>Obdobje financiranja</b>	05.2017 - 04.2020
<b>Nosilna raziskovalna organizacija</b>	795 Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo
<b>Raziskovalne organizacije - soizvajalke</b>	782 Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
<b>Raziskovalno področje po šifrantu ARRS</b>	2 TEHNIKA 2.11 Konstruiranje 2.11.02 Specialna konstrukcijska znanja
<b>Družbeno-ekonomski cilj</b>	13.02 Tehnološke vede - RiR financiran iz drugih virov (ne iz SUF)
<b>Raziskovalno področje po šifrantu FORD</b>	2 Tehniške in tehnološke vede 2.03 Mehanika

### B. REZULTATI IN DOSEŽKI RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

#### 2. Povzetek raziskovalnega projekta<sup>1</sup>

SLO

Celične strukture so v zadnjih desetletjih v inženirski in znanstveni skupnosti deležne večje pozornosti zaradi nizke relativne gostote (poroznosti) in posebnih večnamenskih lastnosti (absorpcija energije, učinkovito blaženje, visoka stopnja deformacije, vzdržljivost pri dinamičnih obremenitvah in utrujanju, visoka toplotna in zvočna izolacija), zaradi česar so idealne za uporabo v številnih sodobnih inženirskih aplikacijah. Avksetične celične strukture so nova vrsta celičnih struktur, ki imajo izjemne mehanske lastnosti zaradi svojega edinstvenega deformacijskega odziva: kadar so izpostavljene vzdolžni natezni obremenitvi

se razširijo v prečni smeri in obratno v primeru tlačne obremenitve (izkazujejo negativno Poissonovo razmerje). Njihov nedavni preboj je povezan z napredkom dodajalnih proizvodnih tehnologij, ki omogočajo izdelavo struktur s kompleksno geometrijo. Razumevanje in izboljšanje njihovih zasnov ter odziva pri različnih vrstah obremenitve je za znanstveno in gospodarsko skupnost izjemnega pomena za povečanje učinkovitosti takšnih struktur. Zaradi pomanjkanja razvoja novih avksetičnih modelov in njihove geometrijske (na osnovi mikroračunalniške tomografije) ter mehanske karakterizacije, predvsem, kadar so izpostavljene dinamični obremenitvi, je bil namen temeljnega raziskovalnega projekta razviti nove, topološko optimizirane avksetične strukture z enakomerno in gradirano celično strukturo, kakor tudi obsežno eksperimentalno in računalniško testiranje njihovega odziva pri različnih pogojih obremenitve, vključno z upoštevanjem velikih deformacij, občutljivostjo na deformacijsko hitrost in ponavljajočimi se obremenitvami. Podroben program eksperimentalnih preskusov (sestavljen iz kvazi-statičnih preizkusov, dinamičnih preizkusov srednje hitrosti, udarnih preizkusov in utrujanja) avksetičnih preizkušancev je bil dopolnjen in podprt z naprednim modeliranjem po metodi končnih elementov in računalniškimi simulacijami. Pridobljeni rezultati omogočajo boljše razumevanje kompleksnega mehanizma deformacije tridimenzionalnih avksetičnih struktur, izpostavljenih različnim mehanskim obremenitvenim pogojem (npr. tlak, nateg, upogib, strig). V kombinaciji s parametričnimi računskimi simulacijami, postopki homogenizacije in topološke optimizacije je bilo mogoče identificirati najprimernejše geometrijske in materialne parametre avksetičnih struktur in posledično zagotoviti najsodobnejša znanja za učinkovito uporabo avksetičnih metamaterialov v različnih inženirskih panogah (npr. absorpcija energije) in medicini (npr. žilne opornice in nosilci). Rezultati raziskovalnega projekta so bili objavljeni v številnih vrhunskih znanstvenih revijah in mednarodnih konferencah. Obravnavano področje in rezultati so bili nadalje diseminirani z vabljenimi predavanji na priznanih tujih univerzah in v široki mreži mednarodnega sodelovanja, kar je še dodatno prispevalo k prenosu znanja.

ANG

Cellular structures have received increased attention in the engineering and scientific community over the past decades due to their low relative density (porosity) and particular multi-functional properties (energy absorption, efficient damping, high rate of deformation, durability at dynamic loadings and fatigue, high thermal and acoustic isolation etc.), which makes them ideal for use in many modern light-weight engineering applications. The auxetic cellular structures are a novel type of cellular structures, which exhibit extraordinary mechanical properties due to their unique deformation behaviour: they tend to expand in the lateral direction when subjected to longitudinal tensile loading and vice versa in case of the compressive loading (exhibiting a negative Poisson's ratio). Their recent breakthrough is associated with advances in additive manufacturing technologies, which allow fabrication of structures with complex geometry. Understanding and improving their design and behaviour under different loading regimes is of utmost importance for engineering and commercial community to increase such structures' efficiency. Due to the lack in development of new auxetic designs and their geometrical (based on microcomputed tomography) and mechanical characterisation, especially when subjected to dynamic loading, the purpose of the basic research project was to develop new, topologically optimised three-dimensional auxetic structures with uniform and graded cellular structure and subsequent extensive experimental and computational testing of their behaviour under various loading conditions, including consideration of large strains, strain rate sensitivity and repetitive loading. The detailed experimental testing programme (consisting of quasi-static test, medium velocity dynamic tests, impact tests and fatigue tests) of auxetic specimens was complemented and supported by the advanced finite element modelling and computer simulations. The obtained results provide a better understanding of the complex deformation mechanism of three-dimensional auxetic structures when subjected to various mechanical loading conditions (e.g. compression, tension, bending, shear). In combination with parametric computational simulations, homogenisation and topological optimisation procedures, it was possible to identify the most appropriate geometrical and material parameters of auxetic structures and consequently to provide state-of-the-art knowledge for efficient application of auxetic materials in different engineering (e.g. energy absorption) and medical applications (e.g. vascular stents and scaffolds). The results of the research project were published in numerous top-ranked scientific journals and international conferences. The topic and results were further disseminated via invited lectures at renown foreign universities and within a wide network of collaborative institutions, which even further

contributed to knowledge transfer.

### 3. Poročilo o uresničitvi predloženega programa dela na raziskovalnem projektu<sup>2</sup>

Namen predlaganega raziskovalnega projekta je bila obsežna eksperimentalna in računalniška analiza mehanskega obnašanja obstoječih avksetičnih celičnih struktur, razvoj novih urejenih avksetičnih celičnih struktur z izboljšano celično morfologijo in topologijo za posamezne aplikacije ter razvoj gradiranih avksetičnih celičnih struktur s spremenljivo morfologijo in topologijo.

V nadaljevanju so na kratko predstavljene posamezne naloge in pridobljeni rezultati:

#### **Kategorizacija obstoječih numeričnih in eksperimentalnih analiz in konstitutivnih modelov celičnih struktur ter avksetičnih metamaterialov**

Izvedena je bila natančna analiza do sedaj objavljenih raziskav na področju mehanskega odziva avksetičnih celičnih struktur. Ovrednoteni so bili različni načini eksperimentalnega testiranja in zajemanja podatkov o mehanskih lastnostih ter poteku deformacije med obremenitvijo avksetičnih struktur. Prav tako so bili proučeni in sistematično karakterizirani računalniški modeli, ki so bili uporabljeni v dosedanjih raziskavah tovrstnih struktur. Proučene so bile prednosti in slabosti navedenih načinov testiranja, kar bo pripomoglo k optimalnejši karakterizaciji že obstoječih in na novo razvitih avksetičnih celičnih struktur.

#### **Kategorizacija odvisnosti deformiranja avksetičnih struktur od hitrosti obremenjevanja, modeliranje lomnih in porušitvenih kriterijev**

Analize obstoječih znanstvenih objav s področja porušitvenih kriterijev, lomno mehanskih preizkusov in vpliva deformacijske hitrosti na mehanski odziv avksetičnih celičnih struktur so pokazale veliko pomanjkljivost podatkov. Izvedli smo uvodne eksperimentalne teste in parametrične simulacije z namenom določitve vpliva deformacijske hitrosti na mehanski odziv avksetičnih celičnih struktur [1, 2]. Raziskava vpliva visokih deformacijskih hitrosti je bila izvedena v sodelovanju z Univerzo v Kumamotu, Japonska. Analizirane so bile tudi možnosti uporabe avksetičnih celičnih struktur kot sredice v sendvič strukturah v okviru sodelovanja s Tehnološkim inštitutom Georgia, ZDA.

#### **Karakterizacija izbranih obstoječih avksetičnih celičnih struktur**

V okviru projekta so bile analizirane 2D in 3D geometrije avksetičnih struktur, kot so strukture sestavljene iz obrnjenih tetrapodov in vbočenih šestkotnikov [3]. Izvedeni so bili eksperimentalni testi in računalniške simulacije pri tlačnih obremenitvenih pogojih. Eksperimentalni rezultati so prav tako služili za validacijo računalniških modelov [4]. Preizkušanci so bili izdelani v sodelovanju z Univerzo Friedrich-Alexander, Erlangen-Nürnberg, Nemčija, eksperimentalni testi pa na Univerzi v Splitu, Hrvaška, Univerzi v Kumamotu, Japonska, in Tehnološkem inštitutu Peking, Kitajska [5]. V okviru projekta smo s partnersko ustanovo prav tako izvedli obširen eksperimentalni program utrujanja avksetičnih struktur [6, 7].

#### **Izdelava preizkušancev in eksperimentalno določevanje kvazi-statičnih ter dinamičnih mehanskih lastnosti različnih avksetičnih struktur in ovrednotenje razvitih numeričnih modelov**

Z namenom uspešnejšega razvoja novih avksetičnih struktur so bili izvedeni številni mehanski testi (tlačni in natezni pri kvazi-statični in dinamični obremenitvi) osnovnega gradiva, iz katerega se avksetične strukture lahko izdelujejo. V določenih primerih, kjer se uporabljajo postopki sintranja za izdelavo tridimenzionalnih avksetičnih preizkušancev, so bile mehanske lastnosti osnovnega gradiva pridobljene z inverznim inženirstvom. Zelo pomembna je bila tudi določitev kritičnih hitrosti, ki določajo način deformacije pri dinamičnih obremenitvah.

#### **Računalniško modeliranje, topološka optimizacija in karakterizacija avksetičnih celičnih metamaterialov z enakomerno celično strukturo pri enoosni kvazi-statični in dinamični obremenitvi**

Z namenom razvoja novih geometrij avksetičnih celičnih struktur so bili razviti računalniški modeli, ki služijo za topološko optimizacijo avksetičnih struktur [8]. Optimizacijski postopek odkrivanja novih oblik avksetičnih celičnih struktur temelji na uporabi genetskega algoritma.

Razviti modeli omogočajo optimizacijo geometrije avksetičnih struktur in posledično njihovega mehanskega odziva (togost, nosilnost) [8]. Razvite oblike avksetičnih struktur so bile izpostavljene neponovljivi natezni in tlačni obremenitvi, kakor tudi ciklični obremenitvi [9].

#### **Priprava mikroCT posnetkov in geometrijska rekonstrukcija celičnih podstruktur**

Rezultati projekta vključujejo tudi analizo vpliva sodobnih izdelovalnih postopkov (dodajalne tehnologije) na geometrijo izdelanih avksetičnih struktur in posledično na njihove mehanske lastnosti. Z uporabo računalniških simulacij in mikroCT je bilo možno analizirati vpliv lokalnih nepravilnosti in artefaktov, ki so posledica izdelovalnih postopkov [10]. Omenjena raziskava je bila izvedena v sodelovanju z Nacionalnim tehnološkim inštitutom Okinava in Univerzo v Kumamotu na Japonskem ter Univerzo Friedrich-Alexander, Erlangen-Nürnberg, Nemčija.

#### **Konstitutivno modeliranje in parametrične računalniške simulacije avksetičnih struktur z enakomerno in gradirano celično strukturo za opredelitev vplivnih parametrov na njihovo deformacijsko obnašanje**

Ker je v nekaterih primerih uporabe zaželeno, da se togost celične strukture spreminja v prostoru je bila izvedena obširna študija odziva gradiranih avksetičnih celičnih struktur z različnimi geometrijami [10, 11]. Na ta način je bilo možno namensko vplivati na dinamični odziv in potek deformacije avksetičnih celičnih struktur ter ju ustrezno prilagoditi za potrebe posamezne aplikacije.

#### **Izdelava avksetičnih preizkušancev z gradirano celično strukturo in izvedba eksperimentov pri kvazi statičnih in dinamičnih obremenitvah**

Gradirane avksetične strukture so bile s pomočjo dodajalnih tehnologij na osnovi SEBM. Z namenom analizirati avksetične strukture, izdelane iz različnih osnovnih materialov, sta bila uporabljena dva osnovna materiala: titanova zlitina (visoka trdnost) in baker (visoka duktilnost) [10-12]. Izveden so bile obširne raziskave pri različnih deformacijskih hitrostih in vrstah obremenitve. Zaradi zelo omejene uporabe običajnih celičnih materialov z gradirano poroznostjo raziskave v okviru projekta predstavljajo pomemben vpogled v mehansko obnašanje gradiranih avksetičnih celičnih metamaterialov. Novost predstavlja tudi izdelava in mehanska karakterizacija hibridnih avksetičnih celičnih struktur, napolnjenih s polimernim polnilom [13], s čimer lahko še dodatno povečamo sposobnost absorpcije deformacijske energije.

#### **Razvoj konstitutivnih in homogeniziranih modelov avksetičnih struktur**

Za učinkovitejšo računalniško določevanje mehanskih lastnosti pri različnih obremenitvenih načinih in vpliva osnovnega gradiva ter morfologije in topologije celic avksetičnih struktur, so bili razviti napredni konstitutivni in homogenizirani modeli. Računalniški modeli so bili razviti s pomočjo inverznega inženirstva, optimizacijskih metod in validirani z eksperimentalnim programom [14, 15]. Dinamični udarni testi avksetičnih panelov so bili izvedeni v sodelovanju s Tehnološkim inštitutom Georgia, ZDA.

#### **Računalniško modeliranje in karakterizacija avksetičnih celičnih struktur pri večosnem dinamičnem obremenjevanju**

Kiralne avksetične strukture so bile izpostavljene tudi večosnim obremenitvam [16] z uporabo računskega modela za preučevanje geometrijskega učinka enotske celice na Poissonovo razmerje in deformacijsko obnašanje. Razviti računski model ponuja vpogled v deformacijsko obnašanje analizirane kiralne avksetične celične strukture in omogoča boljše razumevanje njene porušitve ob večosni obremenitvi.

#### **Vrednotenje raziskovalnih rezultatov, priprava navodil in smernic za konstruiranje**

Rezultati geometrijske (mikroCT) in mehanske karakterizacije so bili v okviru posameznih nalog tudi sproti analizirani in ovrednoteni, iz česar izhajajo tudi smernice in navodila za uporabo (gradiranih) avksetičnih struktur. Rezultati so bili kljub temeljni naravi raziskav v zaključni fazi projekta naravnani v smeri možnosti uporabe. Izvedli smo geometrijsko in mehansko analizo odziva avksetičnih tekstilij [17, 18].

[1] VESENJAK M., NOVAK N., REN Z. Crush behaviour of auxetic cellular structures. MatCel'2017, Aveiro 2017. [COBISS.SI-ID 20847126]

[2] NOVAK N., VESENJAK M., TANAKA S., HOKAMOTO K., REN Z. Compressive behaviour of

- chiral auxetic cellular structures at different strain rates. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, vol. 141 [COBISS.SI-ID 23068694]
- [3] NOVAK N., VESENJAK M., REN Z. Crush behaviour of auxetic cellular structures. *Science and technology of materials*, 2018, vol. 30 [COBISS.SI-ID 21650966]
- [4] NOVAK N., VESENJAK M., KRSTULOVIC-OPARA L., REN Z. Mechanical characterisation of auxetic cellular structures built from inverted tetrapods. *Composite structures*, 2018, vol. 196 [COBISS.SI-ID 21390614]
- [5] NOVAK N., HOKAMOTO K., VESENJAK M., REN Z. Mechanical behaviour of auxetic cellular structures built from inverted tetrapods at high strain rates. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, vol. 122 [COBISS.SI-ID 21653270]
- [6] TOMAŽINČIČ D., VESENJAK M., KLEMENC J. Prediction of static and low-cycle durability of porous cellular structures with positive and negative Poisson's ratios. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, vol. 106 [COBISS.SI-ID 22988310]
- [7] TOMAŽINČIČ D., NEČEMER B., VESENJAK M., KLEMENC J. Low-cycle fatigue life of thin-plate auxetic cellular structures made from aluminium alloy 7075-T651. *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, 2019, vol. 42 [COBISS.SI-ID 16549915]
- [8] BOROVIŠEK M., NOVAK N., VESENJAK M., REN Z., ULBIN M. Designing 2D auxetic structures using multi-objective topology optimization. *Materials Science & Engineering. A, Structural materials: Properties, Microstructure and Processing*, 2020, vol. 795 [COBISS.SI-ID 25011971]
- [9] ULBIN M., BOROVIŠEK M., VESENJAK M., GLODEŽ S. Computational fatigue analysis of auxetic cellular structures made of SLM AlSi10Mg alloy. *Metals*, 2020, vol. 10 [COBISS.SI-ID 22684675]
- [10] NOVAK N., BOROVIŠEK M., VESENJAK M., WORMSER M., KÖRNER C., TANAKA S., HOKAMOTO K., REN Z. Crushing behavior of graded auxetic structures built from inverted tetrapods under impact. *Physica status solidi. B, Basic research*, 2019, vol. 256, [COBISS.SI-ID 22067478]
- [11] NOVAK N., VESENJAK M., REN Z. Computational simulation and optimization of functionally graded auxetic structures made from inverted tetrapods. *Physica status solidi. B, Basic research*, 2017, vol. 254 [COBISS.SI-ID 20853014]
- [12] NOVAK N., KRSTULOVIC-OPARA L., REN Z., VESENJAK M.. Compression and shear behaviour of graded chiral auxetic structures. *Mechanics of materials*, 2020, vol. 148 [COBISS.SI-ID 21020675]
- [13] NOVAK N., KRSTULOVIC-OPARA L., REN Z., VESENJAK M. Mechanical properties of hybrid metamaterial with auxetic chiral cellular structure and silicon filler. *Composite structures*, 2020, vol. 234 [COBISS.SI-ID 22797078]
- [14] NOVAK N., VESENJAK M., KENNEDY G., THADHANI N., REN Z. Response of chiral auxetic composite sandwich panel to fragment simulating projectile impact. *Physica status solidi. B*, 2019, [COBISS.SI-ID 22421782]
- [15] NOVAK N., STARČEVIČ L., VESENJAK M., REN Z. Blast response study of the sandwich composite panels with 3D chiral auxetic core. *Composite structures*, 2019, vol. 210 [COBISS.SI-ID 21900054]
- [16] NEČEMER B., GLODEŽ S., NOVAK N., KRAMBERGER J. Numerical modelling of a chiral auxetic cellular structure under multiaxial loading conditions. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, vol. 107 [COBISS.SI-ID 22996246]
- [17] NOVAK N., DOBNIK-DUBROVSKI P., BOROVIŠEK M., VESENJAK M., REN Z. Deformation behaviour of advanced textile composites with auxetic structure. *Composite structures*, 2020, vol. 252 [COBISS.SI-ID 25034755]
- [18] DOBNIK-DUBROVSKI P., NOVAK N., BOROVIŠEK M., VESENJAK M., REN Z. In-plane behavior of auxetic non-woven fabric based on rotating square unit geometry under tensile load. *Polymers*, 2019, vol. 11 [COBISS.SI-ID 22424342]

#### 4. Ocena stopnje uresničitve programa dela na raziskovalnem projektu in zastavljenih ciljev<sup>3</sup>

##### **Kategorizacija obstoječih numeričnih in eksperimentalnih analiz in konstitutivnih modelov celičnih struktur ter avksetičnih metamaterialov**

Ocena stopnje uresničitve: 100%

##### **Kategorizacija odvisnosti deformiranja avksetičnih struktur od hitrosti obremenjevanja, modeliranje lomnih in porušitvenih kriterijev**

Ocena stopnje uresničitve: 100%

**Karakterizacija izbranih obstoječih avksetičnih celičnih struktur**

Ocena stopnje uresničitve: 100%

**Izdelava preizkušancev in eksperimentalno določevanje kvazi-statičnih ter dinamičnih mehanskih lastnosti različnih avksetičnih struktur in ovrednotenje razvitih numeričnih modelov**

Ocena stopnje uresničitve: 100%

**Računalniško modeliranje, topološka optimizacija in karakterizacija avksetičnih celičnih metamaterialov z enakomerno celično strukturo pri enoosni kvazi-statični in dinamični obremenitvi**

Ocena stopnje uresničitve: 100%

**Priprava mikroCT posnetkov in geometrijska rekonstrukcija celičnih podstruktur**

Ocena stopnje uresničitve: 100%

**Konstitutivno modeliranje in parametrične računalniške simulacije avksetičnih struktur z enakomerno in gradirano celično strukturo za opredelitev vplivnih parametrov na njihovo deformacijsko obnašanje**

Ocena stopnje uresničitve: 100%

**Izdelava avksetičnih preizkušancev z gradirano celično strukturo in izvedba eksperimentov pri kvazi-statičnih in dinamičnih obremenitvah**

Ocena stopnje uresničitve: 100%

**Razvoj konstitutivnih in homogeniziranih modelov avksetičnih struktur**

Ocena stopnje uresničitve: 100%

**Računalniško modeliranje in karakterizacija avksetičnih celičnih struktur pri večosnem dinamičnem obremenjevanju**

Ocena stopnje uresničitve: 100%

**Vrednotenje raziskovalnih rezultatov, priprava navodil in smernic za konstruiranje**

Ocena stopnje uresničitve: 100%

Kot vodja projekta ocenjujem, da so bili cilji, ki so bili predvideni v predlogu projekta v celoti doseženi. V smislu števila izjemno kvalitetnih znanstvenih izvirnih članov in sodelovanja s tujimi inštituti in univerzami, pa celo presegajo pričakovan potek raziskav in rezultate. V okviru projekta je bilo izvedenih tudi več vabljenih predavanj na tujih in domačih univerzah, kjer so bile predstavljene avksetične strukture in rezultati projekta, v smislu mehanskega odziva ter optimizacije tovrstnih struktur.

V okviru temeljnega raziskovalnega projekta so bili doseženi naslednji izvorni znanstveni rezultati, ki so bili objavljeni v priznanih znanstvenih revijah in predstavljeni na tematskih mednarodnih znanstvenih konferencah:

- razvoj in izdelava novih avksetičnih celičnih struktur s konstanto in spremenljivo poroznostjo;
- obsežna geometrijska in mehanska karakterizacija pri različnih vrstah obremenitev z uporabo parametričnih računalniških simulacij in eksperimentalnega testiranja;
- razvoj naprednih računskih modelov avksetičnih celičnih struktur;
- podrobna analiza vpliva deformacijske hitrosti na mehanskih odziv avksetičnih celičnih struktur;
- izpeljava smernic za konstruiranje z avksetičnimi celičnimi strukturami v inženirskih aplikacijah.

Predlagani projekt bo bistveno povečal možnosti uporabe večnamenskih avksetičnih celičnih struktur v naprednih inženirskih izdelkih, kar doslej ni bilo mogoče zaradi slabega poznavanja njihovih deformacijskih mehanizmov in pomanjkanja ustreznih proizvodnih tehnologij.

**5.Spremembe programa dela raziskovalnega projekta oziroma spremembe sestave projektne skupine<sup>4</sup>**

V obdobju izvajanja projekta ni bilo bistvenih sprememb in odstopanj od predvidenega programa dela.

Zaradi kadrovskih sprememb na fakulteti se je v zelo omejenem obsegu spremenila projektna skupina. Z dne 1. 2. 2018 je l pogodbo o zaposlitvi prekinil dr. Marko Šori in se zaposlil v gospodarstvu. Z začetkom leta 2018 se je projektni skupini pridružil mladi raziskovalec Branko Nečemer, ki se je v svoji doktorski nalogi med drugim tudi posvetil utrujanju avksetičnih celičnih struktur. V letu 2020 pa v projektni skupini nista več sodelovala dr. Dejan Tomažinčič in dr. Andrej Škrlec.

**6.Najpomembnejši dosežki projektne skupine na raziskovalnem področju<sup>5</sup>**

		Dosežek	
1.	COBISS ID	22684675	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Računalniška analiza utrujanja avksetičnih celičnih struktur izdelanih iz zlitine AlSi10Mg
		ANG	Computational fatigue analysis of auxetic cellular structures made of SLM AlSi10Mg alloy
	Opis	SLO	V tem delu je bila izvedena računalniška analiza utrujanja topološko optimiziranih avksetičnih celičnih struktur izdelanih s pomočjo selektivnega laserskega taljenja iz zlitine AlSi10Mg. Strukture so bile določene iz Pareto fronte pridobljene s pomočjo več-kriterijske optimizacije. Doba trajanja analiziranih struktur je bila določena s pomočjo deformacijske metode, kjer so bili parametri določeni na podlagi kvazi-statičnih nateznih testov. Iz računalniških modelov je bilo določeno, da imajo manj avksetični vzorci daljšo dobo trajanja. Vpliv radija zaokrožitve ima velik vpliv na dobo trajanja. V splošnem se doba trajanja krajša z manjšanjem radija (radij manj kot 0.3 mm), kar je posledica koncentracije napetosti, kot tudi z večanjem radija (radij več kot 0.6 mm), kar je posledica premika območja plastifikacije stran od roba medceličnih povezav. Pridobljeni rezultati bodo služili za nadaljnje raziskave, ki bodo osredotočene na ciklično eksperimentalno testiranje avksetičnih celičnih struktur izdelanih s pomočjo selektivnega laserskega taljenja iz zlitine AlSi10Mg.
		ANG	In this study, a computational fatigue analysis of topology optimised auxetic cellular structures made of Selective Laser Melting (SLM) AlSi10Mg alloy is presented. Structures were selected from the Pareto front obtained by the multi-objective optimisation. The fatigue life of the analysed structures was determined by the strain-life approach using the Universal Slope method, where the needed material parameters were determined according to the experimental results obtained by quasi-static unidirectional tensile tests. The obtained computational results have shown that generally less auxetic structures tend to have a better fatigue life expectancy. Furthermore, the fillet radius has a significant impact on fatigue life. In general, the fatigue life decreases for smaller fillet radiuses (less than 0.3 mm) as a consequence of the high-stress concentrations, and also for larger fillet radiuses (more than 0.6 mm) due to the moving of the plastic zone away from the edge of the cell connections. The obtained computational results serve as a basis for further investigation, which should be focused on the experimental testing of the fabricated auxetic cellular structures made of SLM AlSi10Mg alloy under cyclic loading conditions.
	Objavljeno v	Molecular Diversity Preservation International; Metals; 2020; Vol. 10, iss. 7; str. 1-18; Impact Factor: 2.259; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.689; A': 1; Avtorji / Authors: Ulbin Miran, Borovinšek Matej, Vesenjaj Matej, Glodež Srečko	



	Dosežek	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek
2.	COBISS ID	22988310   Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> Napoved statične in malociklične trajnosti poroznih celičnih struktur z negativnim in pozitivnim Poissonovim razmerjem
		<i>ANG</i> Prediction of static and low-cycle durability of porous cellular structures with positive and negative Poisson's ratios
	Opis	<i>SLO</i> Primerjana je bila statična in malociklična trajnost treh ravninski celični struktur (šestkotnih, avksetičnih in avksetičnih-kiralnih). Tri različne strukture so imele enak kritični prerez in bile izdelane iz aluminijeve zlitine Al7075-T651. Referenčno območje vsake strukture je predstavljalo območje 9 (tri vrstice in trije stolpci) osnovnih celic. Za vsako strukturo so bili izvedeni statični in malociklični preizkusi pri različnih amplitudah obremenitve. Za določitev načrtovanje dobe trajanja so bile v nadaljevanju izvedene računalniške simulacije z enakimi robnimi pogoji. Za ta namen je bila uporabljena mehanika loma, ki je vključevala tudi izbris elementov pri eksplicitnih računalniških simulacijah. Rezultati statičnih simulacij so bili ovrednoteni tudi s pomočjo razširjene metode končnih elementov (XFEM). Vse računalniške simulacije so bile izvedene v programskem paketu Abaqus. Opaženo je bilo dobro ujemanje med računalniškimi in eksperimentalnimi rezultati za vse analizirane avksetične strukture.
		<i>ANG</i> The static and low-cycle durability of three planar cellular structures, hexagonal, auxetic and auxetic-chiral, have been compared. The three structures have the same critical cross-section and are made from an aluminium alloy Al7075-T651. The reference region of each structure is represented by a matrix of nine elementary shaped cells (3 rows by 3 columns). For each structure static and low-cycle fatigue experiments at different loading amplitudes were made. Numerical simulations were then performed for the same boundary conditions to predict the static and low-cycle fatigue durability. For this purpose a continuum damage mechanics approach with element removal was used in explicit dynamic simulations. The results of static simulations were also checked using the eXtended Finite Element Method (XFEM). All the numerical simulations were carried out using Abaqus. Good agreement was observed between the simulated and measured results for each of the three cellular structures.
	Objavljeno v	North-Holland; Theoretical and Applied Fracture Mechanics; 2020; Vol. 106 (102479); str. 1-13; Impact Factor: 2.848; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.252; A': 1; WoS: IU, PU; Avtorji / Authors: Tomažinčič Dejan, Vesenjajk Matej, Klemenc Jernej
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek
3.	COBISS ID	25011971   Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> Konstruiranje 2D avksetičnih struktur z več-kriterijsko topološko optimizacijo
		<i>ANG</i> Designing 2D auxetic structures using multi-objective topology optimization
	Opis	<i>SLO</i> Deformacijsko obnašanje avksetične strukture pod vplivom zunanje obremenitve je bilo obravnavano kot prilagodljiv mehanizem. Več-kriterijska topološka optimizacija, ki je temeljila na genetskem algoritmu in metodi končnih elementov je bila uporabljena za določitev optimalne oblike takšnega dvodimenzionalnega prilagodljivega mehanizma. Obravnavana je bila dvojna simetrija osnovne geometrijske celice, ki je gradnik simetrične avksetične strukture. Statične linearne računalniške simulacije so bile izvedene za določitev mehanskega odziva različnih geometrij. S predstavljeno metodo so bile določene najboljše rešitve, ki ležijo na Pareto fronti in dajejo širok nabor možnih geometrij novih

	Dosežek	
		avksetičnih geometrij. Metoda je izjemno učinkovita in je lahko razširjena na analizo velikih deformacij, nelinearne elastičnosti ali elasto-plastičnosti.
	ANG	The behaviour of the auxetic structure under external load was regarded as the behaviour of the compliant (flexible) mechanism. The multi-objective topological optimization, based on genetic algorithms and the finite element method, was used to find the optimal shape of such two-dimensional compliant mechanism in this study. The optimization was performed on a quarter of a double-symmetric representative unit cell, which is a building block of the symmetrical auxetic structure. Static linear computational simulations were performed to determine the mechanical response of cell topologies. The proposed method leads to a set of best solutions positioned on the Pareto front with different topologies and gives a broad overview of possible designs of new auxetic structures. The method is highly effective and can be easily extended to large deformation formulations, nonlinear elasticity or elasto-plasticity.
	Objavljeno v	Elsevier; Materials Science & Engineering. A, Structural materials: Properties, Microstructure and Processing; 2020; str. 1-16; Impact Factor: 4.081; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.689; A': 1; Avtorji / Authors: Borovinšek Matej, Novak Nejc, Vesenjajk Matej, Ren Zoran, Ulbin Miran
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek
4.	COBISS ID	22996246   Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO Numerično modeliranje kiralnih avksetičnih celičnih struktur pod vplivom večosnih obremenitev
		ANG Numerical modelling of a chiral auxetic cellular structure under multiaxial loading conditions
	Opis	SLO V tem članku so predstavljeni rezultati 3D računalniških simulacij mehanskega obnašanja kiralnih avksetičnih celičnih struktur pod vplivom več-osnih obremenitev. Računalniški model je uporabljen za študijo vpliva geometrije osnovne celice na Poissonovo razmerje in deformacijsko obnašanje analiziranih kiralnih avksetičnih struktur. 3D računalniški model kiralnih avksetičnih struktur je sestavljen iz linijskih končnih elementov v programskem paketu LS-DYNA. Struktura je postavljena med toge plošče, ki simulirajo hidrostatično obremenitev. Povezave so na kontaktnih površinah predpisane v normalni in tangentialni smeri. Razviti računalniški model omogoča natančen vpogled v deformacijsko obnašanje avksetičnih kiralnih struktur in omogoča boljše razumevanje porušitvenega obnašanja avksetičnih struktur pod vplivom več-osnih obremenitev.
		ANG A 3D numerical simulation of the mechanical behaviour of a chiral auxetic cellular structure subjected to multiaxial loading conditions is presented in this paper. The proposed computational models are used to study the geometry effect of the unit cell on the Poisson's ratio and deformation behaviour of the analysed chiral auxetic structure. A 3D computational model of a chiral auxetic structure is built using beam finite elements in the framework of LS DYNA software. Here, the lattice model is positioned between rigid plates and assembled in a way to simulate hydro-compression loading conditions. Between the contacting surfaces, interactions in normal (contact) and tangential (friction) directions are prescribed, with the node-to-surface approach. The developed computational model offers insight into the deformation (damage) behaviour of the analysed chiral auxetic cellular structure, and enables better understanding of its crushing behaviour under multiaxial loading.
	Objavljeno v	North-Holland; Theoretical and Applied Fracture Mechanics; 2020; Vol. 107 (102514); str. 1-7; Impact Factor: 2.848; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.252; A': 1; WoS: IU, PU; Avtorji / Authors:

		Dosežek	
		Nečemer Branko, Glodež Srečko, Novak Nejc, Kramberger Janez	
		Tipologija 1.01 Izvirni znanstveni članek	
5.	COBISS ID	21653270	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Mehansko obnašanje avksetičnih celičnih struktur zgrajenih iz obrnjenih tetrapodov pri visokih hitrostih obremenjevanja
		ANG	Mechanical behaviour of auxetic cellular structures built from inverted tetrapods at high strain rates
	Opis	SLO	Avksetične celične strukture zgrajene iz obrnjenih tetrapodov so bile prvič eksperimentalno testirane pri visokih hitrostih obremenjevanja. Hitrosti deformacij so dosegale 10.000 /s, kjer prevladuje dinamični način deformacije, dosežene pa so bile z zračnim topom. Deformacija je lokalizirana v predelu med udarnim telesom s preizkušancem in fiksno ploščo. Ta deformacijski način povzroči povečanje togosti v primerjavi s kvazi-statičnim odzivom. Rezultati eksperimentalnega testiranja so bili uporabljeni za ovrednotenje razvitih računalniških modelov v računalniškem programu LS-DYNA. Nato so bili validirani računski modeli uporabljeni še za analizo kritične hitrosti deformacije in analizo deformacijskih načinov skupaj z analitično konstitutivnimi modeli porušitve celičnih struktur.
		ANG	Auxetic cellular structures build from inverted tetrapods were experimentally tested at high strain rate compression loading for the first time. The strain rates up to 10,000 /s were achieved with gas powder gun, where the shock deformation mode is predominant. The deformation localizes in the deformation front between the impacting specimen and the fixed plate. This deformation mode results in stiffness increases in comparison to the quasi-static response. The results from experimental testing were used for validation of developed computational models in finite element explicit code LS-DYNA. Furthermore, the validated computational models were used for critical strain rate analysis, determination of critical loading velocities and analysis of deformation modes together with analytical constitutive crushing models of cellular structures.
	Objavljeno v	Pergamon Press; International Journal of Impact Engineering; 2018; Vol. 122; str. 83-90; Impact Factor: 3.173; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.252; A': 1; WoS: IU, PU; Avtorji / Authors: Novak Nejc, Hokamoto Kazuyuki, Vesenjaj Matej, Ren Zoran	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	

### 7. Najpomembnejši dosežki projektne skupine na področju gospodarstva, družbenih in kulturnih dejavnosti<sup>6</sup>

		Dosežek	
1.	COBISS ID	20847126	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Deformacijski odziv avksetičnih celičnih struktur
		ANG	Crush behaviour of auxetic cellular structures
	Opis	SLO	Izvedeno je bilo kvazi-statično tlačno testiranje določenih avksetičnih celičnih struktur do zgoščitve, v dveh različnih smereh, z namenom določitve celotnega deformacijskega obnašanja teh struktur. V nadaljevanju so predstavljeni tudi dinamični testi pri visokih hitrostih obremenjevanja. Ob tem so bili razviti tudi diskretni računalniški modeli zgrajeni iz linijskih končnih elementov, ki so bili validirani na osnovi eksperimentalnih rezultatov. Vrednosti kritičnih hitrosti obremenjevanja so

Dosežek			bile določene na podlagi analitičnih izrazov in opazovanja načina deformacije pri eksperimentih. Validirani računalniški modeli so bili nato uporabljeni za nadaljnjo optimizacijo odziva avksetičnih celičnih struktur in možnost doseganja ciljanega odziva gradiranih struktur na določeno obremenitev.
	ANG		Quasi-static compressive testing up to densification of some selected auxetic structures in two different directions was performed to determine complete deformation behaviour of these structures. Furthermore, the high strain rate experimental testing of selected auxetic cellular structures was performed to determine also the deformation behaviour at higher strain rates. Subsequently, representative discrete computational models built with the beam finite elements were developed and validated by experimental data. The values of the critical strain rate determined by analytical expressions and visual observation of deformation procedure in experiments were also compared. Validated discrete computational models were used for further optimisation of auxetic structure geometry to obtain user defined response during loading of graded structures.
Šifra		B.03	Referat na mednarodni znanstveni konferenci
Objavljeno v			Universidade de Aveiro; Cellular materials: structural behaviour, modelling and characterisation; 2017; Str. 55; Avtorji / Authors: Vesenjaj Matej, Novak Nejc, Ren Zoran
Tipologija		1.12	Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci
2.	COBISS ID	20960278	Vir: COBISS.SI
Naslov	SLO		Celične strukture in materiali – izdelava, lastnosti, karakterizacija in uporaba
	ANG		Cellular structures and materials - fabrication, properties, characterisation and applications
Opis	SLO		Predstavitev je podala kratek splošen pregled celičnih materialov, kjer so bile v prvem delu predstavljene njihove lastnosti, možnosti proizvodnje in uporabe. Nato so bile predstavljene metode za geometrijsko karakterizacijo, eksperimentalno testiranje in računalniško modeliranje po metodi končnih elementov različnih kovinskih celičnih materialov. Geometrijska karakterizacija temelji na analizi slik pridobljenih z mikroročunalniško tomografijo in obdelavo podatkov z namenom določitve notranje geometrije celične strukture, z ozirom na statistično distribucijo, ter morfologijo in topologijo. Rezultati geometrijske analize so izhodišče za pripravo 2D in 3D računalniških modelov, ki so kasneje validirani s kvazi-statičnimi in dinamičnimi testi, podprti pa tudi z infrardečo termografijo. V nadaljevanju so bile predstavljene avksetične celične strukture, katerih glavna značilnost je negativno Poissonovo število. Ta učinek je uporaben v različnih aplikacijah za izboljšanje lastnosti v gostoti, trdoti, trdnosti, absorpciji energije in dušenju. Predstavljenih je bilo več 2D in 3D geometrij. Predstavljeni so bili tudi rezultati kvazi-statičnih in dinamičnih eksperimentalnih testiranj različnih avksetičnih celičnih struktur.
	ANG		The presentation will give a short overview of cellular materials in general. Initially, their properties, fabrication procedures and application possibilities will be discussed. Then their geometrical characterization, experimental testing and computational modelling within the finite element method of various cellular metal types will be described. The geometrical characterisation is based on the analysis of micro computed tomography scans and proper recognition of their internal cellular structure, taking into account the statistical distribution of morphological and topological properties. The results of conducted geometrical analysis provided means to develop methodology for proper 2D and 3D geometrical modelling of irregular cellular materials and consequent

Dosežek		formation of computational models. The numerical models were validated by quasi-static and dynamic mechanical experimental tests supported by infrared thermography.	
Šifra	B.04 Vabljeno predavanje		
Objavljeno v	2017; Avtorji / Authors: Ren Zoran, Glodež Srečko, Vesenjaki Matej, Novak Nejc		
Tipologija	3.14 Predavanje na tuji univerzi		
3.	COBISS ID	22615062	Vir: COBISS.SI
Naslov	SLO	Zbornik mednarodne konference InCELL - International Conference on multifunctional cellular materials, Maribor, Slovenija, September 19-20, 2019	
	ANG	Proceedings of the InCELL - International Conference on multifunctional cellular materials, Maribor, Slovenia, September 19-20, 2019	
Opis	SLO	Mednarodna konferenca je bila osredotočena na lahke večnamenske stohastične in periodične celične strukture in metamateriale (npr. kovinske pene, avksetične strukture, periodične in optimizirane nosilne konstrukcije iz satovja) z lastnostmi, zaradi katerih so privlačni za številne aplikacije, vključno vendar ne omejeno na absorpcijo energije (zaščita pri udarcu), lahke strukturne iz sendvič plošče (kot jedro), naprave za dušenje vibracij ter toplotno in zvočno izolacijo.	
	ANG	The international conference focused on lightweight multifunctional stochastic and periodic cell materials (e.g. metal foams, auxetic structures, periodic and optimized honeycomb load-bearing structures) with properties that make them attractive for many applications, including but not limited to energy absorption (protection in impact), lightweight structural sandwich panels (as core), vibration damping devices and thermal and sound insulation.	
Šifra	B.01 Organizator znanstvenega srečanja		
Objavljeno v	UE Editora; 2019; 98 str.; Avtorji / Authors: Duarte Isabel, Vesenjaki Matej, Ren Zoran		
Tipologija	2.25 Druge monografije in druga zaključena dela		
4.	COBISS ID		Vir: vpis v obrazec
Naslov	SLO	Osnosimetrična kiralna avksetična struktura	
	ANG	Axisymmetric chiral auxetic structure	
Opis	SLO	Pridobljen slovenski patent opisuje osnosimetrično kiralno celično strukturo, ki je sestavljena iz enakih oz. spremenljivih enotskih kiralnih celic in se pri obremenitvi deformira tako, da izkazuje negativno Poissonovo razmerje (avksetičnost) v vseh koordinatnih smereh. S spremembo parametrov enotskih celic osnosimetrične strukture se lahko ustvari prostorsko spremenljiva struktura s spremenljivimi lastnostmi. Pri enoosnih obremenitvah se struktura deformira izotropno v radialni smeri. V fazi prijave pa je tudi evropski patent.	
	ANG	The obtained Slovenian patent describes an axisymmetric chiral cellular structure, which consists of the same or/and variable chiral unit cells. Under loading it deforms in the way to exhibit a negative Poisson ratio (auxeticity) in all coordinate directions. By changing the parameters of the unit cells of the axisymmetric structure, a spatially variable structure with variable properties can be created. At uniaxial loads, the structure deforms isotropically in the radial direction. A European patent is also in the application phase.	
Šifra	F.33 Patent v Sloveniji		

	Dosežek	
	Objavljeno v	Urad RS za intelektualno lastnino - P-202000160
	Tipologija	2.24 Patent
5.	COBISS ID	15976214 Vir: vpis v obrazec
	Naslov	<i>SLO</i> Metals (posebna izdaja): Celične kovine: izdelava, lastnosti in uporaba
		<i>ANG</i> Metals (special issue): Cellular Metals: Fabrication, Properties and Applications
	Opis	<i>SLO</i> Prof. Vesenjak je bil povabljen kot gostujoči urednik mednarodne znanstvene revije Metals (razvrstitev revije: prva četrtina A1), kjer je urejal in recenziral originalne znanstvene prispevke za posebno izdajo: Metal Foams: Synthesis, Characterization and Applications (Kovinske pene: izdelava, karakterizacija in uporaba).
		<i>ANG</i> Prof. Vesenjak je bil povabljen kot gostujoči urednik mednarodne znanstvene revije Metals (razvrstitev revije: prva četrtina A1), kjer je urejal in recenziral originalne znanstvene prispevke za posebno izdajo: Cellular Metals: Fabrication, Properties and Applications (Celične kovine: izdelava, lastnosti in uporaba).
	Šifra	C.03 Vabljeni urednik revije (guest-associated editor)
	Objavljeno v	Basel: Molecular Diversity Preservation International. ISSN 2075-4701.
	Tipologija	4.00 Sekundarno avtorstvo

## 8. Drugi pomembni rezultati projektne skupine<sup>7</sup>

V okviru projekta je bilo poglobljeno sodelovanje na področju avksetičnih struktur z naslednjimi univerzami v tujini:

- Univerza Friedrich-Alexander, Erlangen-Nürnberg, Nemčija (izdelava avksetičnih preizkušancev),
- Univerza v Splitu, Hrvaška (izvedba kvazi-statičnih in dinamičnih eksperimentov),
- Univerza v Kumamotu, Japonska (izvedba dinamičnih eksperimentov),
- Nacionalni tehnološki inštitut, Okinava, Japonska (izvedba mikroračunalniške tomografije)
- Tehnološki inštitut Peking, Kitajska (izvedba dinamičnih eksperimentov),
- Tehnološki inštitut Georgia, ZDA (izvedba balističnih eksperimentov).

Obisk gostujočih raziskovalcev prof. dr. Lovra Krstulovića-Opere in prof. dr. Željka Domazeta (Univerza v Splitu, Hrvaška) na Fakulteti za strojništvo, Univerza v Mariboru. Namen obiskov je bil analiza in ovrednotenje rezultatov eksperimentalnega programa avksetičnih struktur in pregled novih računalniških modelov, s katerimi bo možno ponazoriti odziv tovrstnih struktur.

Obisk prof. dr. Shigeru-ja Tanake (Univerza v Kumamotu, Japonska) na Fakulteti za strojništvo, Univerza v Mariboru. Namen obiska je bila analiza izvedenih dinamičnih eksperimentov in konceptualizacija nadaljnjih eksperimentov pri zelo visokih deformacijskih hitrostih z uporabo eksploziva.

V okviru izvedenega temeljnega projekta predstavlja pomemben rezultat tudi prenos znanja v študijski proces in izvedba večjega števila vabljenih predavanj na tujih inštitutih in univerzah, kar je še dodatno prispevalo k diseminaciji rezultatov in prenosu znanja.

## 9. Pomen raziskovalnih rezultatov projektne skupine<sup>8</sup>

### 9.1. Pomen za razvoj znanosti<sup>9</sup>

*SLO*

Rezultati temeljnega projekta so in bodo v veliki meri prispevali k napredku inženirskih znanosti na področju razvoja in karakterizacije novih avksetičnih celičnih struktur ter

njihovega numeričnega modeliranja, kar znatno poveča možnost uporabe avksetičnih celičnih struktur na različnih področjih. Slednje doslej ni bilo mogoče zaradi pomanjkanja razumevanja in ustreznih proizvodnih tehnologij. Genetski algoritem, uporabljen v okviru tega projekta, predstavlja učinkovito orodje za razvoj novih avksetičnih celičnih struktur. Omogoča namreč kreiranje različnih topologij z najboljšimi lastnostmi in na ta način daje širok pregled nad konstruiranjem novih avksetičnih celičnih struktur. Metoda je zelo učinkovita in jo je mogoče enostavno razširiti. Prav tako je metodo mogoče razširiti na tridimenzionalne avksetične celične strukture in jo uporabiti pri optimiranju avksetičnih struktur iz kompozitnih materialov ter optimiranju termo-elastičnih in piezoelastičnih lastnosti.

Najnovejši napredek na področju dodajalnih tehnologij omogoča ob novih znanjih, pridobljenih v okviru tega projekta, izdelavo različnih avksetičnih struktur z izjemnimi lastnostmi in posledično podrobno karakterizacijo njihovih mehanskih lastnosti, ki prej niso bile mogoče. Različne dodajne tehnologije omogočajo izdelavo zelo kompleksnih avksetičnih celičnih struktur s predhodno definiranimi optimalnimi lastnostmi. Zasnova in optimiranje obravnavane avksetične strukture sta lahko narejeni z ustreznim računalniškim programom, kot je to opisano zgoraj. Z natančno določitvijo oblike in velikosti celic lahko z ustreznim dodajalnim tehnološkim postopkom izdelamo bolj kompleksne avksetične strukture v primerjavi s konvencionalnimi postopki izdelave.

Računski modeli razviti v okviru projekta zagotavljajo možnost natančnega napovedovanja obnašanja enakomernih in gradiranih avksetičnih celičnih struktur pri eno- in več-osnem obremenjevanju, tako pri statični kot tudi pri dinamični obremenitvi. Na področju utrujanja avksetičnih celičnih struktur je bil razvit energijski model, ki zajema fazo iniciranja in fazo širjenja poškodbe v dinamično obremenjeni strukturi. Z uporabo tega modela in upoštevanjem potrebnih materialnih parametrov je mogoče določiti dobo trajanja poljubne avksetične celične strukture. Model je uporaben tudi za utrujenostne analize poljubnih celičnih struktur.

Rezultati projekta predstavljajo osnovo za nadaljnje raziskave na področju računalniškega modeliranja in konstruiranja žilnih opornic ter nosilcev za medicinske namene. Avksetične strukture so namreč zelo primerne za uporabo pri žilnih opornicah zaradi njihovega tipičnega obnašanja (avksetična žilna opornica se namreč pri vstavitvi v žilo razširi tako v radialni kot tudi v vzdolžni smeri, kar omogoča uporabo krajših žilnih opornic). Za razvoj in konstruiranje novih tipov žilnih opornic z ustreznimi lastnostmi bo mogoče uporabiti numerične simulacije in topološko optimizacijo, kot je to opisano zgoraj.

Rezultati opravljenih raziskav so bili objavljeni v številnih visoko rangiranih mednarodnih znanstvenih revijah ter predstavljeni znanstveni skupnosti na številnih mednarodnih znanstvenih konferencah. Celovito raziskovalno delo je bilo osredotočeno na doseganje mednarodno primerljivih rezultatov raziskav, ki sledijo evropskim in svetovnim raziskovalnim trendom (npr. napredna 3D digitalna korelacija). Razviti računski modeli predstavljajo pomemben prispevek k znanosti pri načrtovanju strojnih delov in konstrukcijskih komponent iz avksetičnih celičnih struktur za napovedovanje njihove nosilnosti, dobe trajanja in zanesljivosti. Novo razviti geometrijski modeli in računalniške simulacije avksetičnih celičnih struktur bodo na zmogljivih superračunalniških sistemih v prihodnje prispevali k boljšemu razumevanju obnašanja celičnih struktur v različnih obratovalnih pogojih, kar bo nadalje služilo za oblikovanje konstrukcijskih priporočil.

ANG

The results obtained in the framework of this project have been extensively contributing to the progress of engineering science in development and characterisation of novel auxetic cellular structures and their computational modelling. This significantly enhances the application possibilities of auxetic cellular structures in general engineering, which was so far not possible due to lack of understanding and required manufacturing technologies for their fabrication. A multi-objective genetic algorithm has been used in the framework of this project and represents a useful design tool to find new designs of new auxetic structures. The developed approach leads to a set of best solutions with various topologies and gives a broad overview of possible designs of new auxetic structures. The method is highly effective and could be easily extended. It can also be extended for optimization of bi-material auxetic structures or to the field of multiphysics for optimizing thermo-elastic or piezo-elastic

properties. The same procedure could also be applied to the design of auxetic topologies in three-dimensional space.

The breakthroughs in additive manufacturing (AM) technologies and new knowledge acquired in the framework of this project will enable the fabrication of new class of materials with superior properties and consequently detailed characterisation of their mechanical properties. Different AM technologies provide opportunities to manufacture complex auxetic cellular structures with optimised and predefined geometries. The design and optimisation of auxetic structures can be done by using advanced CAE methodologies as described above. Such precise fabrication control with the use of layered AM makes the auxetic structures superior to the other conventionally manufactured cellular materials.

The developed computational models are providing for more accurate predictions of the behaviour of uniform and graded auxetic structures under uni- and multi-axial loading conditions and with consideration of both static and dynamic loading. In the field of the fatigue behaviour of auxetic cellular structures, an energy approach has been developed which consists of the damage initiation and damage evolution period in the dynamic loaded structure. Using this approach and with consideration of needed material parameters, the fatigue life of an arbitrary auxetic cellular structure may be determined. However, the model may also be used for the fatigue analyses of other cellular structures.

The results of this project represent the basis for the further investigation on the computational modelling and the design of cardiovascular stents. Namely, the auxetic cellular structure represents an appropriate geometry of stent because of its typical characteristic (when positioned and stretched, the auxetic stent expands in the lateral direction, which allows shorter stent to be inserted into a blood vessel). Development and design of new stents with appropriate characteristics could be done using numerical simulations and topology optimization as already described above.

The results of this project were published in top international scientific journals and disseminated and presented at several international scientific conferences. Comprehensive research work was focused on the achievement of internationally comparable research results that follow European and global research trends (e.g. advanced 3D digital correlation). The developed computational models represent a significant contribution to science in design of machine parts and structural components made of auxetic cellular structures for predictions of their loading capacity, service life and reliability. Newly developed geometric models and computer simulations of auxetic cellular structures on supercomputer systems will further contribute to a better understanding of cellular structures behaviour under different loading conditions, which will further provide for new design recommendations.

## 9.2. Pomen za razvoj Slovenije<sup>10</sup>

*SLO*

Raziskovalna skupina je v okviru projekta vzpostavila odlično sodelovanje z več partnerji doma in v tujini. Rezultati raziskav so bili objavljeni v številnih izvirnih znanstvenih člankih v visoko rangiranih znanstvenih revijah in predstavljeni na številnih znanstvenih in strokovnih konferencah po vsem svetu. Poleg tega razviti računalniški modeli in homogenizirani konstitutivni zakoni prispevajo k skrajšanju priprave simulacijskih modelov in večji zanesljivosti rezultatov ob manjši porabi računskih kapacitet (krajši simulacijski čas), zaradi česar bodo v prihodnje zelo privlačni za uporabo v splošni strojogradnji, in bodo zagotavljali širok spekter možne uporabe za kakršne koli potrebe industrije.

Nekateri celični materiali so bili v preteklosti že uspešno vključeni v številne industrijske namene za doseganje novih, lahkih in konkurenčnih izdelkov. Tudi rezultati tega projekta so neposredno uporabni v sodobni industriji, saj nova spoznanja na področju avksetičnih celičnih struktur in spremljajoče računalniško modeliranje ter računalniške simulacije omogočajo optimizacijo in razvoj novih avksetičnih struktur z najprimernejšimi konstrukcijskimi parametri za določeno vrsto uporabe. Edinstveno deformiranje avksetičnih struktur, nizka gostota, izboljšana obrabna obstojnost in absorpcija energije, večja odpornost proti penetraciji in strižna odpornost, lomna žilavost in bio-kompatibilnost



osnovnih materialov so lastnosti, ki so zelo primerne za uporabo v avtomobilski, letalski, vojaški, tekstilni in biomedicinski industriji za naslednje izdelke: čelade, telesni oklepi, varnostni pasovi, sedežne blazine, filtri z enostavnim čiščenjem, povoji s sproščanjem učinkovin, kolenske in komolčne obloge, embalaža, vsadki ipd. Takšne široke možnosti uporabe predstavljajo velik potencial za mala in velika slovenska podjetja za njihovo trženje. Nadalje je zaradi nizke mase avksetičnih struktur potrebno poudariti tudi manjši vpliv na okolje med izdelavo in možnost recikliranja po uporabi.

Rezultati projekta so zelo pomembni za regionalni in splošni razvoj stroke ter inženirske prakse, saj bo sistematičen prenos znanja slovenskim podjetjem omogočil dostop do znanja in sodobnih orodij za razvoj novih izdelkov z avksetičnimi celičnimi strukturami, kar bo znatno povečalo njihovo globalno konkurenčnost. Opravljena karakterizacija različnih avksetičnih celičnih struktur in predlagana konstrukcijska priporočila za njihovo uporabo bosta omogočila hiter in stroškovno učinkovit način ciljno usmerjenega oblikovanja in razvoja visokokakovostnih, inovativnih izdelkov z visoko dodano vrednostjo.

Sodelovanje projektne skupine s številnimi mednarodnimi raziskovalnimi partnerji prispeva k promociji Slovenije v svetu in mednarodni delitvi raziskovalnega dela, ki ga na nekaterih področjih tudi vodijo raziskovalci na tem projektu (npr. geometrijska karakterizacija in napredne računalniške simulacije celičnih struktur). V okviru tega projekta je bila v Mariboru organizirana tudi mednarodna strokovno-znanstvena konferenca s področja celičnih struktur, kar je še dodatno prispevalo k promociji Slovenije na tem raziskovalnem področju. V raziskave je bilo v okviru projekta vključenih več mladih raziskovalcev in študentov, kar se odraža v številnih zelo uspešnih seminarških nalogah, diplomskih in magistrskih delih ter doktorskih disertacijah. Preko tega projekta se je močno okrepilo partnerstvo med sodelujočimi ustanovami, kar bo še dodatno prispevalo k napredku na tem raziskovalnem področju ter pospeševanju raziskav in znanstvene dejavnosti ter promociji slovenskih univerz in Slovenije. Sodelovanje z domačimi in tujimi institucijami bo vodilo do vzpostavitve novih večstranskih projektov na področju avksetičnih celičnih struktur in širše.

ANG

The research group has established an excellent collaboration with several partner institutions in Slovenia and abroad. The research results have been published in many original scientific papers in the highest-ranking journals and presented at numerous scientific and professional conferences all over the world. Additionally, the efficient computational models and extracted homogenised constitutive laws require less processing time of simulation models, providing higher reliability of the results and lower computational effort (short computational time) which makes them very attractive for use in general engineering and assures a wide range of possible applications for any industrial needs.

Some cellular materials have already been successfully incorporated in many industrial applications in form of lightweight and competitive products. The results of this project are also directly applicable in contemporary industry, since the new knowledge in the field of auxetic cellular structures supplemented by computational modelling and simulation allow the subsequent optimisation and development of novel auxetic structures to define the most suitable design parameters for a given application. The unique auxetic deformation behaviour, low density, enhanced abrasion and energy absorption properties, higher indentation/penetration and shear resistance, fracture toughness and biocompatible base materials make them perfect for use in automotive, aerospace, military, textile and biomedical industry as helmets, body armours, seatbelts, dental flosses, seat cushions, easy-to clean filters, drug-release bandages, knee and elbow pads, packing materials, implants etc. Such wide application possibilities will definitely represent huge possibilities for small to large Slovenian companies or enterprises and its placement on the market. Furthermore, due to lower mass needed for fabrication of lightweight auxetic structures with improved mechanical behaviour, there is also a lower impact on the environment during fabrication and the possibility for easy recycling after their use.

The outcome of this project is significant for the regional and general development of the engineering practice since the systematic transfer of knowledge enables Slovenian companies to gain access to knowledge and modern tools for the development of new products with auxetic cellular structures, which will significantly increase their global

competitiveness. Performed characterisation of various cellular structures and proposed design recommendations for their use will enable a fast and cost-effective way of goal-driven design and development of high-quality, innovative products with high added value.

The cooperation of the project group with many international research partners contributed to the promotion of Slovenia in the world and the international division of research effort, which is in some areas also led by our researchers (i.e. geometric characterisation and advanced computer simulations of cellular structures). In the framework of this project, the international scientific conference in the field of cellular structures was organised in Maribor, which was additionally promoting Slovenia in this field of research.

Several young researchers and students have also been involved in the research work in the framework of this project, which resulted in numerous seminar works and bachelor, master as well as doctoral theses. The project has substantially strengthened the partnership and knowledge transfer between collaborating institutions, which has additionally contributed to the advertising of Slovenian universities and Slovenia itself. These partnerships will hopefully lead to establishment of multi-lateral cooperation and new European and international project proposals of mutual interest.

**10. Označite, katerega od navedenih ciljev ste si zastavili pri projektu, katere konkretne rezultate ste dosegli in v kakšni meri so doseženi rezultati uporabljeni.**

Cilj		
<b>F.01</b>	<b>Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.02</b>	<b>Pridobitev novih znanstvenih spoznanj</b>	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	V celoti <input type="text"/>
<b>F.03</b>	<b>Večja usposobljenost raziskovalno-razvojnega osebja</b>	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	V celoti <input type="text"/>
<b>F.04</b>	<b>Dvig tehnološke ravni</b>	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	Uporabljen bo v naslednjih 3 letih <input type="text"/>
<b>F.05</b>	<b>Sposobnost za začetek novega tehnološkega razvoja</b>	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	Uporabljen bo v naslednjih 3 letih <input type="text"/>
<b>F.06</b>	<b>Razvoj novega izdelka</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>

<b>F.07</b>	<b>Izboljšanje obstoječega izdelka</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.08</b>	<b>Razvoj in izdelava prototipa</b>	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	Uporabljen bo v naslednjih 3 letih <input type="text"/>
<b>F.09</b>	<b>Razvoj novega tehnološkega procesa oz. tehnologije</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.10</b>	<b>Izboljšanje obstoječega tehnološkega procesa oz. tehnologije</b>	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	Delno <input type="text"/>
<b>F.11</b>	<b>Razvoj nove storitve</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.12</b>	<b>Izboljšanje obstoječe storitve</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.13</b>	<b>Razvoj novih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.14</b>	<b>Izboljšanje obstoječih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov</b>	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	Delno <input type="text"/>
<b>F.15</b>	<b>Razvoj novega informacijskega sistema/podatkovnih baz</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.16</b>	<b>Izboljšanje obstoječega informacijskega sistema/podatkovnih baz</b>	

	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.17</b>	<b>Prenos obstoječih tehnologij, znanj, metod in postopkov v prakso</b>	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	Uporabljen bo v naslednjih 3 letih <input type="text"/>
<b>F.18</b>	<b>Posredovanje novih znanj neposrednim uporabnikom (seminarji, forumi, konference)</b>	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	V celoti <input type="text"/>
<b>F.19</b>	<b>Znanje, ki vodi k ustanovitvi novega podjetja ("spin off")</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.20</b>	<b>Ustanovitev novega podjetja ("spin off")</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.21</b>	<b>Razvoj novih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.22</b>	<b>Izboljšanje obstoječih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.23</b>	<b>Razvoj novih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev</b>	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	V celoti <input type="text"/>
<b>F.24</b>	<b>Izboljšanje obstoječih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev</b>	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	V celoti <input type="text"/>
<b>F.25</b>	<b>Razvoj novih organizacijskih in upravljavskih rešitev</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE

	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.26</b>	<b>Izboljšanje obstoječih organizacijskih in upravljavskih rešitev</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.27</b>	<b>Prispevek k ohranjanju/varovanje naravne in kulturne dediščine</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.28</b>	<b>Priprava/organizacija razstave</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.29</b>	<b>Prispevek k razvoju nacionalne kulturne identitete</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.30</b>	<b>Strokovna ocena stanja</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.31</b>	<b>Razvoj standardov</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.32</b>	<b>Mednarodni patent</b>	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen bo v naslednjih 3 letih <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	Uporabljen bo v naslednjih 3 letih <input type="text"/>
<b>F.33</b>	<b>Patent v Sloveniji</b>	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	V celoti <input type="text"/>
<b>F.34</b>	<b>Svetovalna dejavnost</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>

<b>F.35</b>	<b>Drugo</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>

**Komentar**

/
---

**11. Označite potencialne vplive oziroma učinke vaših rezultatov na navedena področja**

	Vpliv	Ni vpliva	Majhen vpliv	Srednji vpliv	Velik vpliv	
<b>G.01</b>	<b>Razvoj visokošolskega izobraževanja</b>					
G.01.01.	I. in II. stopnja (bolonjski program)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
G.01.02.	Doktorski študij	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
G.01.03.	Drugo: <input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.02</b>	<b>Gospodarski razvoj</b>					
G.02.01	Razširitev ponudbe novih izdelkov/storitev na trgu	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.02.	Širitev obstoječih trgov	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.03.	Znižanje stroškov proizvodnje	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.04.	Zmanjšanje porabe materialov in energije	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
G.02.05.	Razširitev področja dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.06.	Večja konkurenčna sposobnost	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
G.02.07.	Večji delež izvoza	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.08.	Povečanje dobička	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.09.	Nova delovna mesta	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.10.	Dvig izobrazbene strukture zaposlenih	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.11.	Nov investicijski zagon	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.12.	Drugo: <input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.03</b>	<b>Tehnološki razvoj</b>					
G.03.01.	Tehnološka razširitev/posodobitev dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.02.	Tehnološko prestrukturiranje dejavnosti	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.03.	Uvajanje novih tehnologij	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.04.	Drugo: <input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.04</b>	<b>Družbeni razvoj</b>					
G.04.01	Dvig kvalitete življenja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
G.04.02.	Izboljšanje vodenja in upravljanja	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.03.	Izboljšanje delovanja administracije in javne uprave	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.04.	Razvoj socialnih dejavnosti	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.05.	Razvoj civilne družbe	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.06.	Drugo: <input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.05.</b>	<b>Ohranjanje in razvoj nacionalne naravne in kulturne dediščine in</b>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

	<b>identitete</b>					
<b>G.06.</b>	<b>Varovanje okolja in trajnostni razvoj</b>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.07</b>	<b>Razvoj družbene infrastrukture</b>					
G.07.01.	Informacijsko-komunikacijska infrastruktura	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.02.	Prometna infrastruktura	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.03.	Energetska infrastruktura	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.04.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.08.</b>	<b>Varovanje zdravja in razvoj zdravstvenega varstva</b>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.09.</b>	<b>Drugo:</b>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

**Komentar**

/

**12. Pomen raziskovanja za sofinancerje<sup>11</sup>**

Sofinancer		
Naziv		
Naslov		
Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:		EUR
Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:		%
Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja		Šifra
	1.	
	2.	
	3.	
	4.	
	5.	
Komentar		
Ocena		

**13. Samoevalvacijska ocena učinkov odprtodostopnih recenziranih znanstvenih objav, ki se nanašajo na raziskovalne rezultate<sup>12</sup>**

Sledili smo načelom Nacionalne strategije odprtega dostopa do znanstvenih objav in raziskovalnih podatkov v Republiki Sloveniji in razvili pozitiven odnos do objavljanja raziskovalnih rezultatov v revijah z odprtim dostopom. Založništvo z odprtim dostopom močno vpliva na večjo kakovost celotnega postopka objavljanja znotraj skupine, saj njen hiter uredniški pristop zahteva pozornost raziskovalcev na vsako objavo, ki jo pogosto pregledujeta več kot dva recenzenta. Številni kakovostni pregledi in hitri odzivi omogočajo raziskovalcem, da v zelo kratkem času izboljšajo svoje prispevke. Opažamo tudi bistveno večji vpliv naših znanstvenih objav v odprtem dostopu, saj so bralcem hitreje na voljo na spletu. Za pridobitev več informacij ali podatkov, potrebnih za nadaljnje raziskave, bralci pogosto stopijo v stik z avtorji. To se kaže tudi v večji stopnji citiranosti tovrstnih publikacij.

Rezultati izvedenega projekta so bili do sedaj objavljeni v treh izvirnih znanstvenih člankih v revijah z odprtim dostopom:

MAUKO, Anja, FÍLA, Tomáš, FALTA, Jan, KOUDELKA, Petr, RADA, Václav, NEUHAUSEROVA,

Michaela, ZLÁMAL, Petr, VESENJAK, Matej, JIROUŠEK, Ondřej, REN, Zoran. Dynamic deformation behaviour of chiral auxetic lattices at low and high strain-rates. *Metals*, ISSN 2075-4701, 2021, vol. 11, iss. 1, str. 1-15, doi: 10.3390/met11010052. [COBISS.SI-ID 45907459]

ULBIN, Miran, BOROVIŠEK, Matej, VESENJAK, Matej, GLODEŽ, Srečko. Computational fatigue analysis of auxetic cellular structures made of SLM AlSi10Mg alloy. *Metals*, ISSN 2075-4701, July 2020, vol. 10, iss. 7, str. 1-18, doi: 10.3390/met10070945. [COBISS.SI-ID 22684675]

DOBNIK-DUBROVSKI, Polona, NOVAK, Nejc, BOROVIŠEK, Matej, VESENJAK, Matej, REN, Zoran. In-plane behavior of auxetic non-woven fabric based on rotating square unit geometry under tensile load. *Polymers*, ISSN 2073-4360, 2019, vol. 11, iss. 6, str. 1-13, ilustr., doi: 10.3390/polym11061040. [COBISS.SI-ID 22424342]

**14. Naslov spletne strani za projekte, odobrene na podlagi Javnega razpisa za (so)financiranje raziskovalnih projektov za leto 2015, Javnega razpisa za (so)financiranje raziskovalnih projektov za leto 2017, Javnega razpisa za (so)financiranje raziskovalnih projektov za leto 2018, Javnega razpisa za (so)financiranje raziskovalnih projektov za leto 2019 in Javnega razpisa za (so)financiranje raziskovalnih projektov za leto 2020<sup>13</sup>**

<http://auxnas.fs.um.si/>

## C. IZJAVE

Podpisani izjavljam/o, da:

- so vsi podatki, ki jih navajamo v poročilu, resnični in točni
- se strinjamo z obdelavo podatkov v skladu z zakonodajo o varstvu osebnih podatkov za potrebe ocenjevanja ter obdelavo teh podatkov za evidence ARRS
- so vsi podatki v obrazcu v elektronski obliki identični podatkom v obrazcu v pisni obliki (v primeru, da poročilo ne bo oddano z digitalnima podpisoma)
- so z vsebino zaključnega poročila seznanjeni in se strinjajo vsi soizvajalci projekta

**Potrjujemo zgoraj navedene izjave.**

### Podpisi:

*zastopnik oz. pooblaščen oseba  
raziskovalne organizacije:*

in

*vodja raziskovalnega projekta:*

Univerza v Mariboru, Fakulteta za  
strojništvo

Matej Vesenjajk

**ŽIG**

Datum:

11.5.2021

**Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2021/36**

<sup>1</sup> Napišite povzetek raziskovalnega projekta (največ 3.000 znakov v slovenskem in angleškem jeziku) [Nazaj](#)

<sup>2</sup> Napišite kratko vsebinsko poročilo, kjer boste predstavili raziskovalno hipotezo, opis raziskovanja, ugotovljene rezultate, uporabo rezultatov in sodelovanje s tujimi partnerji. Poročilo naj sledi v predlogu projekta zastavljenim ciljem (oz. nalogam), kjer o vsakem cilju poročate v ločenem razdelku. Razdelek naj se prične z oznako cilja, kot ste jo uporabili v predlogu, in eno-stavčnim opisom cilja. Sledijo naj eden do trije odstavki opisa rezultatov, kjer se pri vseh rezultatih skličete na reference (npr. [1] ali [1, 2]). Po odstavkih z opisom rezultatov za posamezen cilj v alinejah navedite reference za ta cilj (članki, referati, vabljeni predavanja, patenti, ipd.). Alineje naj se pričnejo z ustrezno številko (npr. [1]). Rezultatov brez ustreznih referenc pri opisu rezultatov cilja ne navajajte. Če je le možno, navedbo posamezne reference zaključite z ustrezno šifro COBISS. Pri člankih je navedba šifre COBISS obvezna, navedite pa samo članke, kjer ste se za finančno podporo pri delu na članku



## Zaključno poročilo raziskovalnega projekta - 2021

ustrezno zahvalili ARRS in pri tem navedli šifro ARRS programa/projekta, za katerega pišete poročilo. Celotni razdelek naj vsebuje največ 12.000 znakov, vključno s presledki (velikost pisave 11).. [Nazaj](#)

<sup>3</sup> Uresničitev raziskovalne hipoteze, programa dela in zastavljenih ciljev. Razdelek pričnete z navedbo ciljev (šifra iz predloga projekta, eno-stavčno ime cilja in ocena stopnje uresničitve v procentih — oznake naj bodo enake, kot v razdelku B.3). Sledi odstavek, kjer stopnjo uresničitve podate kvalitativno (v besedilu) za celoten projekt. Če je program projekta poleg ciljev vseboval tudi hipoteze, v sledečem odstavku poročate o tem, katere med hipotezami ste že ovrednotili in kakšen je bil rezultat vrednotenja. Največ 5.000 znakov, vključno s presledki (velikost pisave 11). [Nazaj](#)

<sup>4</sup> V primeru bistvenih odstopanj in sprememb od predvidenega programa raziskovalnega projekta, kot je bil zapisan v predlogu raziskovalnega projekta oziroma v primeru sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine v zadnjem letu izvajanja projekta, napišite obrazložitev. V primeru, da sprememb ni bilo, to navedite. Največ 6.000 znakov vključno s presledki (približno ena stran, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

<sup>5</sup> Navedite dosežke na raziskovalne področju, ki so nastali v okviru tega projekta. Raziskovalni dosežek iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FORD področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A'' ali A'. [Nazaj](#)

<sup>6</sup> Navedite dosežke na področju gospodarstva, družbenih in kulturnih dejavnosti, ki so nastali v okviru tega projekta. Dosežke iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FORD področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A'' ali A'.

Dosežek na področju gospodarstva, družbenih in kulturnih dejavnosti je po svoji strukturi drugačen kot dosežek na raziskovalnem področju. Povzetek dosežka na raziskovalnem področju je praviloma povzetek bibliografske enote (članka, knjige), v kateri je dosežek objavljen.

Povzetek dosežka na področju gospodarstva, družbenih in kulturnih dejavnosti praviloma ni povzetek bibliografske enote, ki ta dosežek dokumentira, ker je dosežek sklop več rezultatov raziskovanja, ki je lahko dokumentiran v različnih bibliografskih enotah. COBISS ID zato ni enoznačen, izjemoma pa ga lahko tudi ni (npr. prehod mlajših sodelavcev v gospodarstvo na pomembnih raziskovalnih nalogah, ali ustanovitev podjetja kot rezultat projekta ... - v obeh primerih ni COBISS ID). [Nazaj](#)

<sup>7</sup> Navedite rezultate raziskovalnega projekta iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) v primeru, da katerega od rezultatov ni mogoče navesti v točkah 6 in 7 (npr. ni voden v sistemu COBISS). Največ 2.000 znakov, vključno s presledki. [Nazaj](#)

<sup>8</sup> Pomen raziskovalnih rezultatov za razvoj znanosti in za razvoj Slovenije bo objavljen na spletni strani: <http://sicris.izum.si/> za posamezen projekt, ki je predmet poročanja [Nazaj](#)

<sup>9</sup> Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

<sup>10</sup> Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

<sup>11</sup> Rubrike izpolnite / prepisite skladno z obrazcem "izjava sofinancerja" <http://www.arrs.gov.si/sl/progproj/rproj/gradivo/>, ki ga mora izpolniti sofinancer. Podpisan obrazec "Izjava sofinancerja" pridobi in hrani nosilna raziskovalna organizacija – izvajalka projekta. [Nazaj](#)

<sup>12</sup> Največ 8.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

<sup>13</sup> Izvajalec mora za projekte, odobrene na podlagi Javnega razpisa za (so)financiranje raziskovalnih projektov za leto 2015, Javnega razpisa za (so)financiranje raziskovalnih projektov za leto 2017, Javnega razpisa za (so)financiranje raziskovalnih projektov za leto 2018, Javnega razpisa za (so)financiranje raziskovalnih projektov za leto 2019 in Javnega razpisa za (so)financiranje raziskovalnih projektov za leto 2020, na spletnem mestu svoje RO odpreti posebno spletno stran, ki je namenjena projektu. Obvezne vsebine spletne strani so: vsebinski opis projekta z osnovnimi podatki glede financiranja, sestava projektne skupine s povezavami na SICRIS, faze projekta in njihova realizacija, bibliografske reference, ki izhajajo neposredno iz izvajanja projekta ter logotip ARRS in drugih sofinancerjev. Spletna stran mora ostati aktivna še 5 let po zaključku projekta. [Nazaj](#)

Obrazec: ARRS-RPROJ-ZP/2021 v1.00  
87-93-EB-28-3C-70-61-C5-83-BC-90-18-51-22-CC-61-45-3F-83-F7