

Fakulteta za
industrijski inženiring
Faculty of Industrial Engineering

Priložnosti, potenciali, izzivi
Opportunities, Potentials, Challenges

Zbornik recenziranih prispevkov

Proceedings of Reviewed Papers

Zbornik recenziranih prispevkov | Proceedings of Reviewed Papers

4. mednarodna znanstvena konferenca o razvoju industrijskega inženiringa: PRILOŽNOSTI, POTENCIALI, IZZIVI, Otočec pri Novem mestu, 8. april 2019

4th International Scientific Conference on the Development of Industrial Engineering: OPPORTUNITIES, POTENTIALS, CHALLENGES, Otočec pri Novem mestu, 8 april 2019

Organizator konference in založnik | Conference Organizer and Publisher:
Fakulteta za industrijski inženiring Novo mesto | Faculty of Industrial Engineering Novo mesto

Kraj | Place: Šegova ulica 112, Novo mesto
Leto | Year: 2019

Urednica zbornika | Editor of proceedings: mag. Iris Fink Grubačević

Recenzenti | Reviewers: dr. Milan Ambrožič, dr. Boris Bukovec, dr. Mitja Cerovšek, mag. Iris Fink Grubačević, dr. Urška Florjančič, dr. Irena Marinko, dr. Matej Pleterski, dr. Marica Prijanovič Tonkovič, dr. Rudolf Pušenjak, dr. Damir Vrančič

Tehnična urednica | Technical Editor: Lucija Galič, mag. posl. ved

Fakulteta za industrijski inženiring Novo mesto je izključni imetnik vseh materialnih avtorskih pravic na tej publikaciji. Prepovedano je kopiranje ali kakršnokoli razmnoževanje dela brez dovoljenja urednika. Jezikovno, znanstveno in strokovno pravilnost zagotavljajo avtorji gradiva.

The Faculty of Industrial Engineering Novo mesto is the sole owner of all material rights of this publication. It is prohibited to copy or distribute in any manner without the permission of the editor. Authors in this publication are accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work, including, but notwithstanding language, style, data, interpretations, are appropriately investigated and resolved.

Kataložni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani COBISS.SI -ID= 300167936 ISBN 978-961-94246-8-1 (pdf)

KAZALO | TABLE OF CONTENTS

Uvodni nagovor	1
Preface <i>Rudolf Pušenjak</i>	
Methodology for Dispersion Analysis of Thin Plates using FEM Engineering Software	2
<i>Anatolij Nikonov, Barbara Zupančič, Simon Muhič, Julius Kaplunov</i>	
Zmanjšanje teže konstrukcijskih elementov z uvajanjem hibridnih struktur	9
Reducing weight of structural elements by implementation of hybrid structures <i>Danilo Jereb, Anatolij Nikonov, Vili Malnarič, Tomaž Savšek</i>	
Method for analysis of smart sheet metal forming tools strip layout	17
<i>Stjepan Flegarić, Tomaž Savšek, Mario Štorga</i>	
Spectral analysis of multi-layered beams with high-contrast material properties of layers	23
<i>Anatolij Nikonov, Rudolf Pušenjak</i>	
Inovativna oblika elementa za preprečevanje utrujenostne poškodbe pritrdilnega traka rezervoarja goriva	31
Innovative design of an element for prevention of fatigue crack of fastening strap of fuel tank <i>David Stušek, Matic Muc, Jurij Šveglj, Vili Malnarič, Tomaž Savšek</i>	
Določitev frezala za frezanje jekla vrste 1.2343	45
Determination of the milling cutter for steel type 1.2343 <i>Marica Prijanovič Tonkovič, Janez Jamnik</i>	
Dynamic stresses in symmetric three-layered composite plates	55
<i>Milan Ambrožič</i>	
Trajnostni razvoj logističnih procesov	69
Sustainable development of logistics processes <i>Sašo Murtič, Ingrid Franko Uhernik</i>	
Tehnološko izboljšanje logističnih postopkov v industriji	83
Technological improvement of logistics processes in industry <i>Ingrid Franko Uhernik, Sašo Murtič</i>	
Človeški viri in regionalni razvoj — znanje kot družbena vrednota	97
Human resources and regional development — knowledge as value for the society <i>Marjan Ravbar</i>	
Aluminijeve zlitine komponent podvozij vozil	113
Alluminium alloys of vehicle chassis components <i>Mitja Muhič</i>	

Ugotavljanje izolacijske upornosti in dielektrične trdnosti pri LED žarometih.....	122
Determination of insulation resistance and dielectric strength of LED headlights	
<i>David Štine, Marica Prijanovič Tonkovič</i>	
Študija izbire aluminijastih materialov in tehnologij za «Z» nosilec	128
Study of selection of aluminium materials and technologies for "Z" bracket	
<i>Mirko Zupanc, Matej Steinacher, Matej Ernelc, Vili Malnarič</i>	
MARTINA-AM, 3D tisk in inovativne tehnologije obdelave materialov za končno uporabo ...	140
MARTINA-AM, 3D print and inovative materials manufacturing technologies for end use	
<i>Mina Kralj, Boštjan Podlipec, Vesna Žepič Bogataj, Damjan Klobčar, Mitja Petrič, Jaka Burja</i>	
Era digitalnega marketinga	149
The digital marketing era	
<i>Darko Števančec, Mitja Košak, Iris Fink Grubačević</i>	

Uvodni nagovor

Dne 8. aprila 2019 je Fakulteta za industrijski inženiring organizirala in izvedla zelo uspešno 4. Mednarodno znanstveno konferenco o razvoju industrijskega inženiringa s podnaslovom: Priložnosti, potenciali, izzivi. Ob izidu zbornika prispevkov se na kratko ozrimo na udeležence konference in vsebino, ki je bila na konferenci obravnavana. Predvsem lahko z zadovoljstvom ugotovimo, da so na konferenci poleg raziskovalcev iz akademskega okolja in inštitutov v velikem številu aktivno sodelovali predstavniki iz industrije in predstavili veliko število skupnih projektov. V delu konference so s prispevki kot avtorji ali soavtorji sodelovali uveljavljeni znanstveniki in raziskovalci iz tujine, ki se jim programski odbor konference za njihov prispevek še posebej zahvaljuje. Nikakor pa ne smemo pozabiti na odmevne predstavitve mladih raziskovalcev in diplomantov Fakultete za industrijski inženiring Novo mesto, ki so s svojimi prispevki na konferenci prvič sodelovali. Programski odbor konference upa, da bodo tovrstne predstavitve raziskovalnih projektov tudi v bodoče vzpodbuda študentom fakultete in da lahko pričakujemo njihovo še številčnejšo zastopanost.

Letošnja 4. Mednarodna znanstvena konferenca o razvoju industrijskega inženiringa se je pričela z izčrpnim plenarnim predavanjem o razvoju in izgradnji koncepta tovarn prihodnosti v Sloveniji, nato pa se je odvijala v treh sekcijah. Prvi dve sekciji sta bili razdeljeni v dva podsklopa, tretjo sekcijo pa je sestavljal en sklop. Tako je bila prva sekcija razdeljena na razvoj sodobnih tehnologij s petimi in na aplikativne raziskave s tremi prispevki. Po končani sekciji je sledil sproščen pogovor z nominiranko za inženirko leta 2019 iz Helle Saturnus. Druga sekcija je s tremi prispevki odprla predstavitve temeljnih raziskav, ki pa so kljub znanstveno-raziskovalni vsebini neposredno nagovarjale uporabnike iz industrije. Sekcijo so zaključili trije izjemno zanimivi prispevki mladih raziskovalcev, med njimi dveh diplomantov Fakultete za industrijski inženiring Novo mesto. Konferenco je zaključila zadnja, tretja sekcija s štirimi prispevki s področja razvoja družbe in okolja. Med njimi sta dva prispevka osvetlila aktualne probleme družbe iz sociološkega zornega kota, dva prispevka pa sta predstavila razvoj sodobnih logističnih procesov.

Dr. Rudolf Pušenjak
Predsednik programskega odbora

Preface

On April, 8. 2019, the Faculty of Industrial Engineering Novo mesto successfully organized and carried out the 4th International Scientific Conference on Development of Industrial Engineering with working subtitle: Opportunities, Potentials, Challenges. At issuing of the Conference Proceedings let's take a look on the conference participants and on the content that was presented. First of all, we can with pleasure state that beside researchers from the academic environment and institutes many participants from industry contributed to the work of conference and presented a large number of joint projects. The Programme Committee of the Conference especially appreciates contribution of renowned scientists and researchers from abroad, which take part as authors or coauthors of submitted papers. Certainly we should not forget to mention the high-profile presentations of the young researchers who were first introduced at the Conference this year. The Programme Committee is hoping that such presentations of research projects in the future will arouse even more interest for students of faculty.

This year's 4th International Scientific Conference on Development of Industrial Engineering began with extensive plenary lecture on development and construction of the concept of future factories in Slovenia, and then continued to work in three sections. First two sections were divided in two thematic subsections, while the third section was devoted to a single topic. The first section presented five papers on the development of modern technologies in the first subsection and continued with presentations of three papers that contained results of applied research. After finishing the first section a relaxed conversation with the nominee for engineer of the year 2019 from Helle Saturnus was followed. The second section with three contributions opened the presentation of basic research, but which were, despite scientific research content directly intended for users from the industry. The section was concluded by three very interesting contributions of young researchers, among which take part two graduate student of the Faculty of Industrial Engineering Novo mesto. The Conference was finished with third section, which presents four papers from development of the society and environment. Two contributions addressed actual problems of society from sociological aspect and two papers represents the development of modern logistic processes.

Dr. Rudolf Pušenjak
The president of the Programme Committee

Methodology for dispersion analysis of thin plates using FEM engineering software

Anatolij NIKONOV¹, Barbara ZUPANČIČ², Simon MUHIČ²,
Julius KAPLUNOV¹

¹Faculty of Industrial Engineering Novo mesto
Šegova ulica 112, 8000 Novo mesto, Slovenia
E-naslovi: anatolij.nikonov@fini-unm.si, julius.kaplunov@fini-unm.si

²University of Novo mesto Faculty of mechanical engineering
Na Loko 2, 8000 Novo mesto, Slovenia
E-naslovi: barbara.zupancic@fs-unm.si, simon.muhic@fs-unm.si

Povzetek. Razumevanje lastnosti dušenja in disperzijskih pojavov preko identifikacije mehanskih lastnosti plastovitih struktur in reševanja drugih tehničnih problemov pri ravninskem valovanju je ključno pri optimizaciji konstrukcijskega načrtovanja in togostnih lastnosti tankostenskih konstrukcijskih elementov. Pri uporabi pristopov za ta namen se pojavlja več težav. Večnačinska in disperzijska narava valovanja namreč zmanjšuje kvaliteto rezultatov ultrazvočnega testa v povezavi z občutljivostjo testa ter razdaljo potovanja valov. Cilj raziskave je v tem oziru razvoj metodologije za disperzijsko analizo ravninskih valov z uporabo komercialno dostopne MKE inženirske programske opreme. Na ta način pridobljeni rezultati za prvo antisimetrično obliko so v postopku vzpostavljanja metodologije primerjani z disperzijsko krivuljo, pridobljeno z uporabo prosto dostopnih matematičnih orodij za reševanje disperzijske enačbe ter izris disperzijskih krivulj.

Ključne besede: disperzija, dinamična analiza, plastovite plošče, numerične metode, MKE simulacije

Razvrstitev: Znanstveni članek

Abstract. Understanding of damping and dispersion of plate waves appears to be important for optimization of structural design and strengthening structural elements, identifying mechanical properties of layered structures and solving other technical problems. But there are difficulties in applying this technique, namely, the multimodal and dispersive nature of the waveguides can lower the quality of ultrasonic wave test in connection with test sensitivity and the distance of propagation. The goal of the research is to develop the methodology for dispersion analysis of plate waves using the commercial FEM engineering software. Results for the first antisymmetric mode obtained in this way are compared to the corresponding dispersion curve calculated by the freely available mathematical tool for numerical solving of dispersion equations and generating dispersion curves.

Keywords: dispersion, dynamic analysis, layered plates, numerical methods, MKE simulations

Article Classification: Scientific Paper

1 Introduction

Over last few decades, in connection with manufacturing of structural elements based on newly developed materials and technologies, such as the rapidly growing area of meta-materials etc., the dynamic behaviour of layered strongly inhomogeneous elastic solids became very important for design of advanced industrial products. Sandwich structures, that have been

manufactured since long ago, due to their light weight combined with relatively large flexural stiffness, are in a great demand for modern aerospace, automotive, and civil engineering [1].

Multi-layered engineering structures with contrast material and geometric parameters are often subject to intensive dynamic loading drastically affecting their performance [2]. It is also very critical that the expectations for powerful refined theories and robust computational methodologies used in modern advanced applications become more rigorous. This strongly motivates dynamic multi-parametric analysis involving accurate evaluation and qualitative interpretation of vibration spectra and associated displacement and stress fields, which are invaluable both for the optimal design and non-destructive testing.

The contrast properties of layered structures also bring a number of challenges in numerical computation of dynamic response. In particular, for a thin plate, it is due to the proximity of the fundamental bending mode and the lowest shear mode with the value of the cut-off frequency tending to zero, which may easily confuse the traditional 3D FEM framework and also seriously complicates physical interpretation of numerical data [3]. This motivates a deeper theoretical insight into the peculiarities of the dynamic behaviour of layered strongly inhomogeneous thin elastic structures aiming at better validation and implementation of numerical results.

Wave propagation in solids, in particular in plates, is of interest in a number of engineering applications such as seismology, non-destructive testing of structures etc. Understanding of damping and dispersion of plate waves appears to be important for optimization of structural design and strengthening structural elements, identifying mechanical properties of layered structures and solving other technical problems. But there are difficulties in applying this technique, namely, the multimodal and dispersive nature of the waveguides can lower the quality of ultrasonic wave test in connection with test sensitivity and the distance of propagation [4]. Therefore, better understanding of wave propagation in thin walled structures using the models which identify dispersion curves and associated mode shape, is required.

The application of numerical methods has enabled the solution of dispersion equations for homogeneous and inhomogeneous plates. For this reason, a number of specific software applications based on numerical analysis were recently developed. However, to the best of our knowledge, the commercial engineering simulation tools, widely used for structural design and dynamic analysis by industrial engineers, do not incorporate the tools for dispersive analysis of thin walled structures.

The goal of the research is to develop the methodology for dispersion analysis of plate waves using the commercial FEM engineering software. Results for the first antisymmetric mode obtained in this way are compared to the corresponding dispersion curve calculated by the freely available mathematical tool for numerical solving of dispersion equations and generating dispersion curves.

2 Problem statement

Consider 2D harmonic vibrations of a thin plate having thickness $2h$ shown in Figure 1. For plane strain motion in xy plane, the displacement components are: $u = u(x, y, t)$, $v = v(x, y, t)$.

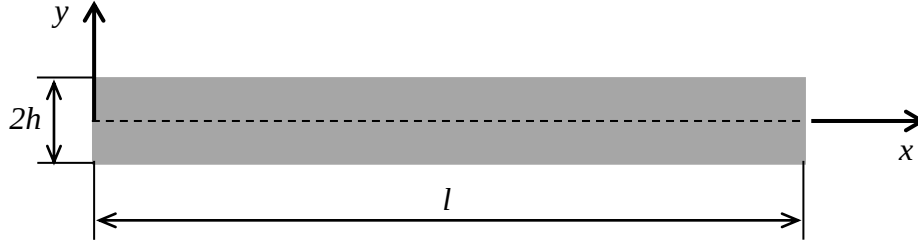


Figure 1. Schematics of a thin isotropic elastic plate

Boundary conditions for antisymmetric vibration in y direction are expressed by the following equations:

$$u = 0, \sigma_{xy} = 0 \quad \text{at } x = 0 \text{ and } x = l. \quad (1)$$

We consider the case of waves in the plate of thickness $2h$ having traction free boundaries. Therefore, the boundary conditions on the faces are:

$$\sigma_{yy} = \sigma_{xy} = 0 \quad \text{at } y = \pm h/2, \quad (2)$$

where σ_{xy} and σ_{yy} are in-plane stresses, and the condition $\sigma_{zy} \equiv 0$ is satisfied identically.

Solution of the boundary-value problem for plates becomes simpler if we split the problem using symmetry. Thus, for u in the yz plane the motion is symmetric (antisymmetric) with respect to $y = 0$ if u contains cosines (sines); for v it is vice versa. Notice that the modes of wave propagation in a thin plate may be separated into two systems of symmetric and antisymmetric modes, respectively. In our investigation the case of antisymmetric waves is considered.

3 Theoretical background

Frequency equations for waves in infinite plates were first presented by Rayleigh [5] and Lamb [6]. Since then, intensive investigations have been devoted to the development of methods of its solution. An approximate plate theory for isotropic elastic plates, taking into account rotary inertia and transverse shear, was proposed by many authors, e.g. [7]. Kirchhoff-Love theory and Timoshenko type theories are based on the hypothesis, which simplify the form of the governing equation of vibrations and at the same time lead to essential disadvantages and errors.

The application of numerical methods has assisted in solving a number of difficult problems including the frequency spectrum analysis of higher modes and complex branches. An extensive review of related problems on wave propagation in rods and plates is given by Graff [8].

Besides, the approximate methods for solving dispersion equations have been developed intensively as well, such as asymptotic methods, e.g. [9]; in this book, the dynamic analysis of thin walled elastic structures employing sophisticated asymptotic approaches in the solution of 3D problems of thin elastic plates and shells is presented. Long/short wave low/high frequency motion is systematically considered. The vibration modes of a plain problem of a 2D plate with free faces leading to the well-known Rayleigh-Lamb equation are studied using asymptotic approach.

In our investigation, we develop the methodology for dispersion analysis of plate waves using the commercial FEM engineering software. We first consider an isotropic layer of thickness $2h$ and infinite lateral extent (see Figure 1). Without loss of generality we restrict

ourselves to plane antisymmetric motion. In this case the Rayleigh–Lamb dispersion relation for a layer with traction-free faces takes the form, e.g. see [8],

$$\gamma^4 \frac{\sinh \alpha}{\alpha} \cosh \beta - \beta^2 K^2 \cosh \alpha \frac{\sinh \beta}{\beta} = 0, \quad (3)$$

with

$$\alpha^2 = K^2 - \kappa^2 \Omega^2, \quad \beta^2 = K^2 - \Omega^2, \quad \gamma^2 = K^2 - \frac{1}{2} \Omega^2. \quad (4)$$

In the above

$$K = kh, \quad \Omega = \frac{\omega h}{c_2}, \quad \kappa = \frac{c_2}{c_1}. \quad (5)$$

Here ω is the angular frequency, k is the wave number, c_1 and c_2 are the longitudinal and shear wave speeds, respectively, given by

$$c_1^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}, \quad c_2^2 = \frac{\mu}{\rho}, \quad (6)$$

where λ and μ are the Lamé constants, and ρ is volume mass density.

4 Numerical results

In this section the numerical results of dispersion analysis will be presented based on antisymmetric wave propagation in a thin isotropic elastic plate.

The main goal was to implement modal analysis at the given boundary conditions for obtaining eigenforms and eigenfrequencies of the single layer and to recognize different bending vibration modes and generate dispersion diagram for the layer. In order to evaluate the wave dispersion results from the FEM modal analysis, we have compared them to dispersion curve obtained by numerical solving of the governing frequency equations for wave propagation in the plate.

The dispersion curves have therefore been extracted based on the results generated by two numerical instruments, namely, using (i) commercial engineering software Ansys Mechanical APDL Release 17.2 Environment and (ii) freely available LAMSS Wavescope 2.5 software (<http://www.me.sc.edu/research/lamss/html/software.html>, accessed January 18, 2019).

For simulating free vibration behaviour of the plate using the above software we defined geometry of the 2D rectangular plate with the following parameters: the length $l = 600 \text{ mm}$, and the height $2h = 1 \text{ mm}$. The following material properties were used in the analysis: elastic modulus $E = 121.13 \text{ GPa}$, Poisson's ratio $\nu = 0.3016$, mass density $\rho = 4460 \text{ kg/m}^3$. The boundary conditions were defined by equations (1).

The results of simulation have been generated by Ansys Mechanical APDL Release 17.2 Environment FEM modal analysis for the first 300 eigenfrequencies. The analysis has been done for six different meshes shown in Table 1.

Table 1. Scheme of different meshes used in ANSYS Mechanical APDL Release 17.2 Environment FEM modal analysis

Mesh designation	Total number of elements	Number of elements per dimension (per thickness x per length)
M1	600	1 x 600
M2	2400	2 x 1200
M3	4800	2 x 2400
M4	9600	2 x 4800
M5	9600	4 x 2400
M6	38400	8 x 4800

It was assumed, that the calculated antisymmetric free vibrations corresponded to the 1st antisymmetric mode in dispersion diagram. Therefore, we have calculated data on the phase velocity, v_{ph} , vs. frequency, f , based on the FEM modal analysis, and compared it to dispersion curve for the 1st antisymmetric mode on dispersion diagram, which had been generated by the freely available LAMSS Wavescope 2.5 software.

The antisymmetric eigenforms obtained by the Ansys Mechanical APDL Release 17.2 Environment FEM modal analysis are presented in Figure 2 for two different eigenfrequencies.

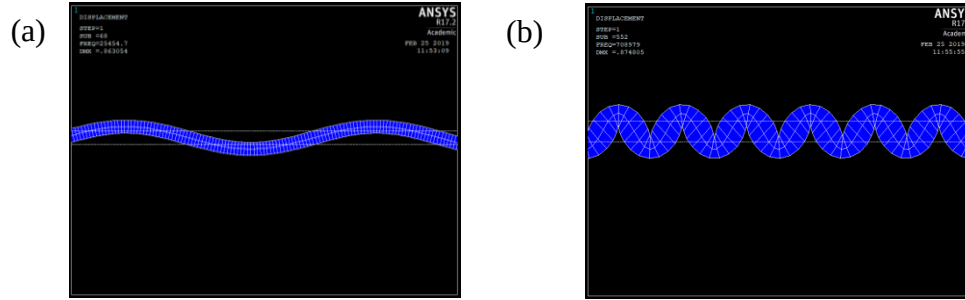


Figure 2. Antisymmetric mode – A0, deformed shape corresponds to the bending eigenform for the two eigenfrequencies: (a) $f = 25.5$ kHz, and (b) $f = 709.0$ kHz

Modal analysis calculations were followed by the post-processing of the results. It was necessary to plot several of the 300 extracted eigenforms, record the corresponding eigenfrequency, f , and extract the information on the wave number $k = 1/\lambda$, where λ was the wavelength. The wavelength was determined by the visual inspection of the number of waves distributed along the plate length.

For each analysed eigenform with the extracted k and f we calculated the phase velocity, $v_{ph} = f/k$, and generated a point on the dispersion curve, presented in terms of v_{ph} vs. f , corresponding to the first antisymmetric mode.

Comparison of the dispersion curves calculated using Ansys Mechanical APDL Release 17.2 Environment with six different meshes to dispersion curve obtained by using LAMSS Wavescope 2.5 software is presented in Figure 3, where:

- the solid red curve corresponds to the curve extracted from LAMSS Wavescope 2.5 software dispersion diagram,
- the solid blue curve corresponds to the FEM modal analysis with mesh M1,
- the dashed back curve corresponds to the FEM modal analysis with mesh M2,
- the solid black curve corresponds to the FEM modal analysis with mesh M3,
- the dashed yellow curve corresponds to the FEM modal analysis with mesh M4,
- the solid green curve corresponds to the FEM modal analysis with mesh M5, and
- the dashed purple curve corresponds to the FEM modal analysis with mesh M6.

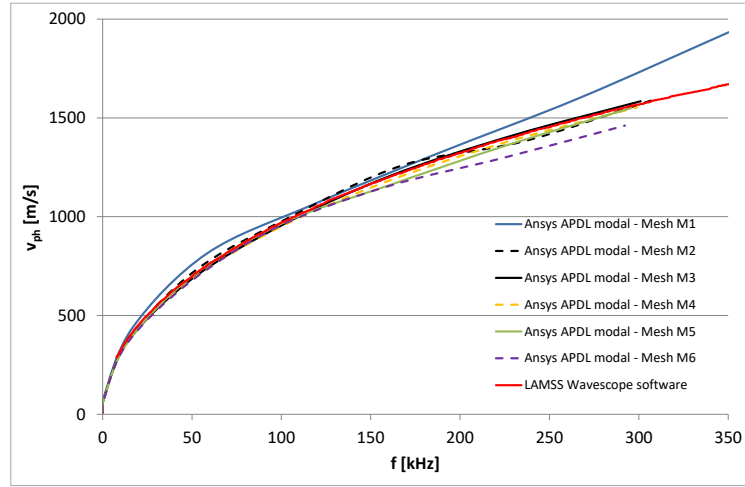


Figure 3. Dispersion curves for the first antisymmetric mode of a thin elastic plate: LAMSS Wavescope 2.5 software generated dispersion curve (—) and curves obtained by Ansys Mechanical APDL Release 17.2 Environment FEM modal analysis

The absolute difference between the phase velocity presented by the reference curve, obtained by the LAMSS Wavescope 2.5 software, and the phase velocity curve, obtained from Ansys Mechanical APDL Release 17.2 Environment FEM modal analysis for different meshes is presented in the following figure in dependence of the number of finite elements. Absolute difference is calculated for the data belonging to the meshes, where both dimensions of each quadrilateral element were the same. The legend in figure shows the eigenfrequency range, since the calculated eigenfrequency belonging to a particular eigenform changes when changing the mesh density. The differences between dispersion curves for the 6 selected ranges of eigenfrequencies in dependence of the number of finite elements are shown in Figure 4.

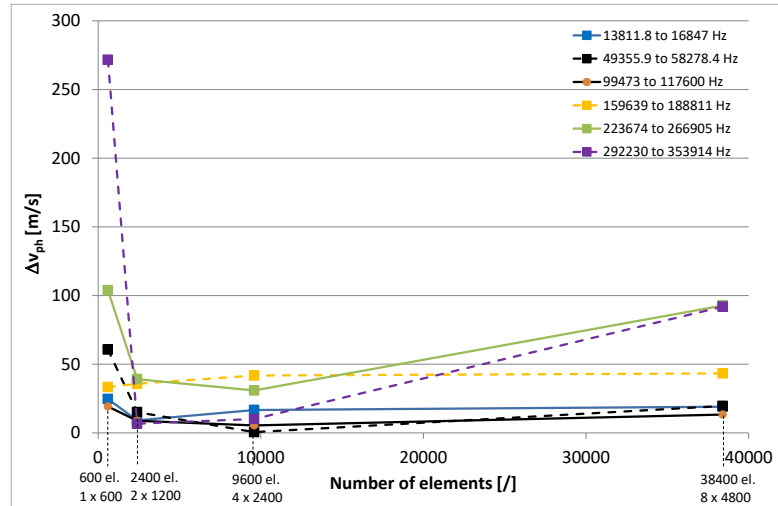


Figure 4. Differences between the LAMSS Wavescope 2.5 software generated dispersion curve and the curves obtained by Ansys Mechanical APDL Release 17.2 Environment FEM modal analysis in dependence of the number of finite elements

It is evident from Figure 4 that increasing the number of finite elements in mesh does not necessarily monotonically influence calculation of the phase velocity in a certain frequency

range. From this result it seems that one of the important steps of the proposed methodology for dispersion analysis of plate waves using the commercial FEM engineering software is to find the most appropriate mesh size.

5 Conclusions

In this paper we have demonstrated the way of performing dispersion waves analysis of a thin isotropic elastic plate by using the commercial FEM engineering software. Results have been obtained in this way and compared to the corresponding dispersion curve calculated by the freely available mathematical tool for numerical solving of dispersion equations. The comparison performed shows very good agreement between results for the first antisymmetric mode captured within the analysed frequency range. This verification indicates that the proposed methodology with FEM modal analysis might be utilized for the characterization of the Lamb wave dispersion behaviour. It further needs to be tested and verified also for finding other antisymmetric and symmetric eigenforms.

The obtained results will be extended to layered contrast structures to validate approximate analytical results published in the paper of Kaplunov *et al.* [10].

Acknowledgements

The authors are grateful to the Slovenian Research Agency (ARRS), Grant Ref. J2-9224, which supported this work.

References

- [1] Vinson, J.R. (1999). The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials. CRC Press.
- [2] Rogerson G.A. (1992). Penetration of impact waves in a six-ply fiber composite laminate. *Journal of Sound and Vibration*, 158(1), 105–120.
- [3] Kaplunov, J.D., Nolde, E.V., & Shorr, B.F.A. (2005). perturbation approach for evaluating natural frequencies of moderately thick elliptic plates. *Journal of Sound and Vibration*, 281, 905–919.
- [4] Craster, R.V., Joseph, L.M., & Kaplunov, J. (2014) Long-wave asymptotic theories: the connection between functionally graded waveguides and periodic media. *Wave Motion*, 51(4), 581–588.
- [5] Rayleigh, L. (1885). On waves propagated along the plane surface of an elastic solid. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 1, 4–11.
- [6] Lamb, H. (1917). On waves in an elastic plate. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 93(648), 114–128.
- [7] Mindlin, R. (1951). Influence of rotary inertia and shear on flexural vibrations of isotropic elastic plates. *Journal of Applied Mechanics*, 18, 31–38.
- [8] Graff, K.F. (2012). *Wave Motion in Elastic Solids*. Courier Corporation..
- [9] Kaplunov, J.D., Kossovich, L.Y., & Nolde, E.V. (1998). *Dynamics of Thin Walled Elastic Bodies*. Academic Press.
- [10] Kaplunov, J., Prikazchikov, D.A., & Prikazchikova, L.A. (2017). Dispersion of elastic waves in a strongly inhomogeneous three-layered plate. *International Journal of Solids and Structures*, 113–114, 169–179.

Zmanjšanje teže konstrukcijskih elementov z uvajanjem hibridnih struktur

Reducing weight of structural elements by implementation of hybrid structures

Danilo JEREB¹, Anatolij NIKONOV¹, Vili MALNARIČ², Tomaž SAVŠEK²

¹Fakulteta za industrijski inženiring Novo mesto,
Šegova ulica 112, 8000 Novo mesto, Slovenija
E-naslovi: avtokleparstvo.jereb@gmail.com, anatolij.nikonov@fini-unm.si

²TPV d.o.o.,
Kandijska cesta 60, 8000 Novo mesto, Slovenija
E-naslovi: v.malnaric@tpv.si, t.savsek@tpv.si

Povzetek. Ključen izziv avtomobilske industrije je zmanjšanje mase vozila. Ena izmed tehničnih rešitev za zmanjševanje mase konstrukcijskih elementov je izdelava hibridnih delov, sestavljenih iz kovinskih in nekovinskih materialov. Spajanje različnih materialov se pogosto uporablja v različnih inženirskih aplikacijah, vključno z avtomobilsko industrijo. Vendar pa neusklajenost togosti vodi do visokih koncentracij napetosti in posledično šibkih stikov. Raziskava je namenjena razvoju in preizkušanju tehnične rešitve za izdelavo hibridnih konstrukcijskih elementov. Eksperimentalna analiza na osnovi izvedenih nateznih in upogibnih testov je pokazala prednosti in slabosti obojih načinov spajanja.

Ključne besede: Lightweight, spajanje, hibridne strukture, steklena vlakna

Razvrstitev: Znanstveni članek

Abstract. A key challenge for the automotive industry is to reduce the mass of the vehicle. One of the potential technical solutions for reducing the mass of the structural elements is the production of hybrid parts made of metals and non-metallic materials. Joining of dissimilar materials is widely used in different engineering applications including automotive industry. However, a stiffness mismatch leads to high stress concentrations, and accordingly weak joints. The research is aimed at developing and testing a technical solution for the production of hybrid structural elements. The experimental analysis based on the performed tensile and bending tests showed the advantages and disadvantages of both methods of joining.

Keywords: Lightweight, Joining, Hybrid structures, Glass fibers

Article Classification: Scientific Paper

1 Uvod

V zadnjih letih je problem trajnosti postal bolj aktualen za številne industrijske aplikacije in zlasti za prometni sektor, ker je drugi največji porabnik energije in največ prispeva k antropogenim emisijam toplogrednih plinov v Evropski uniji. Nove zakonske omejitve glede emisijskih stopenj so prisilile avtomobilski sektor, da preučuje različne sodobne tehnologije za varčevanje z gorivom. Zmanjšanje teže je ena najpomembnejših metod za izboljšanje učinkovitosti porabe goriva in zmanjšanje emisij CO₂ [1,2].

Zmanjšanje teže avtomobila brez ogrožanja varnostnih zahtev in meril učinkovitosti z razumnimi stroški je velik izziv za avtomobilsko industrijo. Ker imajo avtomobilski deli karoserije velik vpliv na celotno maso vozila, se akcijski ukrepi za zmanjšanje lastne teže pogosto osredotočajo na uvajanje različnih lahkih aluminijastih materialov, naprednih visoko trdnih jekel, magnezijevih zlitin pri izdelavi konstrukcijskih elementov. Zato je uporaba tako imenovane tehnologije »multi material design« pogosto optimalna tehnična rešitev. Merila za izbor materialov so močno odvisna od stroškov in proizvodnega procesa [3].

Kot omenjeno je ključen izziv avtomobilske industrije zmanjšanje mase vozila, ki pomembno vpliva na sile, ki so potrebne za premikanje vozila. V prihodnosti bo vse izrazitejša zahteva in trend zmanjševanja mase vozila, ki ga v avtomobilski industriji poimenujemo s skupnim imenom »lightweight«. Lightweight koncept vključuje tudi možnosti uvajanja različnih materialov, kot so na primer polimerni in kompozitni materiali. Novo razvite tehnologije uvajanja polimerov in kompozitov pri izdelavi avtomobilskih komponent značilno izboljšujejo tehnološki nivo avtomobilske industrije. Ena izmed tehničnih rešitev za zmanjševanje mase konstrukcijskih elementov je izdelava hibridnih delov, sestavljenih iz kovinskih in nekovinskih materialov [4].

Spajanje različnih materialov, kot je na primer plastika, ojačana z ogljikovimi vlakni (CFRP), ali plastika, ojačana s steklenimi vlakni (GFRP), z jeklom ali aluminijem, se pogosto uporablja v različnih inženirskih aplikacijah, vključno z avtomobilsko industrijo. Vendar pa se pojavijo težave pri povezovanju izrazito različnih materialov zaradi velike razlike v lastnostih materiala na adherentni površini. Zlasti neusklajenost togosti vodi do visokih koncentracij napetosti in posledično šibkih stikov [5]. Pri spajanju različnih materialov hibridna struktura izkazuje strukturne lastnosti, ki jih posamezni materiali ne dosežejo.

Uporaba plastičnih in kompozitnih materialov v inženirskih aplikacijah se je povečala zaradi določenih prednosti, ki izhajajo iz njihove majhne teže, relativno visoke specifične trdnosti in modula elastičnosti, fleksibilnosti oblikovanja in zmanjševanja proizvodnih stroškov. Napredek v razvoju tehnologij procesiranja in proizvodnih procesov prav tako vodi do večjega zanimanja pri uporabi nekovinskih materialov za avtomobilske aplikacije.

Raziskava je namenjena razvoju in preizkušanju tehnične rešitve za izdelavo hibridnih konstrukcijskih elementov. Uporabljen je bil kompozitni material na osnovi steklenih vlaken z dodajanjem epoksi smole kot veziva. Izdelana sta bila 2 tipa nosilcev z uporabo različnih načinov spajanja aluminijskega in kompozitnega dela. Eksperimentalna analiza na osnovi izvedenih nateznih in upogibnih testov je pokazala prednosti in slabosti obojih načinov spajanja.

2 Postavitev problema

Predmet spajanja kompozitov in kovin se je v zadnjih letih vse bolj osredotočal na željo po optimiziranih lastnostih na različnih lokacijah konstrukcije. V številnih aplikacijah lahko uvedba kompozitov prispeva k splošnemu varčevanju teže, vendar so spoji s kovinsko strukturo zahtevni.

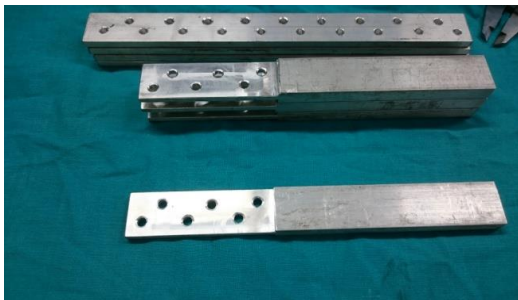
Lepljenje je priljubljena metoda za povezovanje različnih materialov, ker imajo takšni spoji večjo strukturno učinkovitost, odlično življenjsko dobo, posebno majhno težo in bolj enakomerna polja napetosti v primerjavi z alternativnimi metodami, kot sta na primer pritrdjevanje ali kovičenje. Poleg tega lepljenje omogoča spajanje različnih materialov, saj je mogoče preprečiti korozijo in prilagoditi različne toplotne raztezke v spoju [6-8]. Pri spajanju različnih materialov se ustvari »hibridna« struktura, ki daje strukturne lastnosti, ki jih ni mogoče doseči z nobenim od posameznih materialov.

Uporabimo lahko tudi vijačenje, ki pa vodi do pomembnih koncentracij napetosti okoli lukenj za sornike in doda težo. Breto et al. [9] navajajo, da lahko zlepljeni spoji premagajo te pomanjkljivosti, imajo visoko strukturno celovitost in izboljšajo korozijsko učinkovitost. Vendar se napetosti koncentrirajo na koncu vezne linije, kar povzroča napake, ki so pogosto katastrofalne. Zmogljivost se lahko izboljša s prilagajanjem lastnosti lepila.

Eden najpomembnejših in najtežjih korakov pri oblikovanju avtomobila z več materiali je izbira in opredelitev primerne metode spajanja med dvema različnima materialoma. V strukturnih aplikacijah je zato pomembno, da se čim bolj učinkovito poveča skupni prispevek vsakega materiala, da bi zagotovili optimalno mehansko zmogljivost, hkrati pa ohranili težo in stroškovno učinkovito rešitev [10].

Različne tehnike spajanja se lahko uporabijo pri večmaterialnem konceptu v avtomobilskem oblikovanju zaradi raznolikega povezovanja in geometrijske oblike konfiguracij. Ena od najpomembnejših kombinacij različnih materialov je jeklo/aluminij z materiali na osnovi CFRP oz. GFRP.

Ta raziskava obravnava analizo spajanja aluminija s kompozitnim materialom na osnovi steklenih vlaken z dodajanjem epoksi smole. Epoksidna smola, ki je bila uporabljena kot vezivo za ojačitvena steklena vlakna, ima sama po sebi tudi lepilni učinek, ki pa je brez ustrezno pripravljene površine materiala s katerim kompozitni material želimo spojit, premajhen, da bi samostojno opravil nalogo spojitve. Zato je bila predlagana tehnična rešitev, povzeta iz raziskave [11], ki predvideva, da aluminijasti del vzorcev spojimo s kompozitnim materialom preko lukenj, zvrtnih v aluminij, skozi katere bo kot vezivno sredstvo zalita smola. Na Sliki 1 so prikazani vzorci perforiranih aluminijastih nosilcev, predpripravljenih za izdelavo hibridnih vzorcev oz. za lepljenje s kompozitnim materialom.



Slika 1. Konfiguracija modela perforiranega aluminija

Pri izdelavi hibridnih vzorcev za nadaljnjo analizo njihovih mehanskih lastnosti želimo zagotoviti učinkovit spoj med materiali, ki se močno razlikujejo po strukturi in imajo tudi različne mehanske lastnosti. Zelo pomembna pri tem je priprava površin, in sicer je na splošno znano, da hrapavost površine bistveno vpliva na kvaliteto spoja.

3 Materiali in priprava vzorcev

Za pripravo hibridnih vzorcev sta bila izbrana 2 materiala, in sicer aluminij in kompozitni material na osnovi steklenih vlaken ter epoksidne smole. Uporabili smo steklena vlakna dolžine 50 mm, ki so naključno položena. Kot vezivo je služila nepospešena poliesterska smola COLPOLY 7201, ki se uporablja s komponento za pospeševanje strjevanja in s komponento za strjevanje (pospeševalec1 in katalizator). Za neželezno kovino smo izbrali standardno ploščato palico iz aluminija z oznako EZL EN755-5.

Izdelali smo dva tipa vzorcev in pri tem uporabili dva načina spajanja obeh komponent. Pri prvem tipu preizkušancev, ki je bil poimenovan Hibrid-tip1, smo uporabili metodo spajanja materialov po principu laminata, kjer smo materiale sestavili po plasteh, medtem ko ima drugi tip preizkušancev, ki je bil poimenovan Hibrid-tip2, sredinski laminatni spoj, krajna tretjina pa na vsakem koncu pripada svojemu materialu. Tretji tip preizkušancev je bil izdelan iz aluminija. Četrty tip pa je bil izdelan v celoti iz poliestrskih vlaken in epoksidne smole, da nam bo služil za primerjalno analizo kot referenčni material.

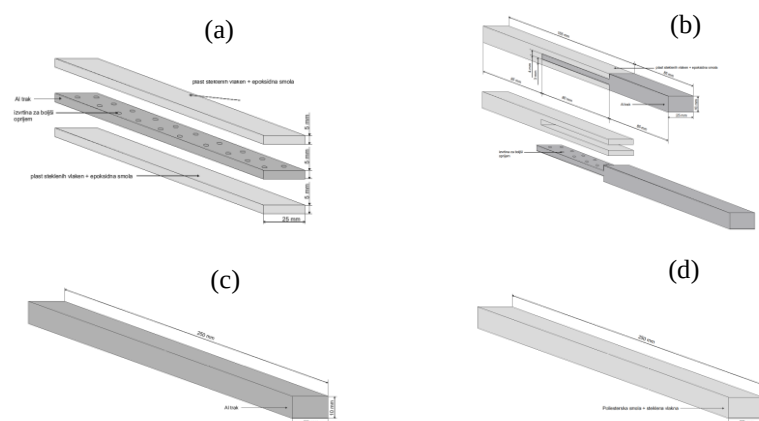
Za vsak tip preizkušanca so bili izdelani po 4 vzorci, od katerih sta bila po dva vzorca namenjena za upogibni, dva pa za natezni test. V nadaljevanju so nam meritve pokazale, da sta zaradi ponovljivosti rezultatov pri meritvah bila dva vzorca za posamezni test dovolj. Na diagramih pri analizi eksperimentalnih rezultatov so prikazane povprečne vrednosti fizikalnih veličin.

Za izdelavo vzorcev smo najprej morali pripraviti materiale. Tako smo steklena vlakna narezali na primerno velikost, prilagojeno za oba tipa preizkušancev, aluminijaste ploščate palice pa obdelali na primerne dolžine in vanje navrtali luknje, ki služijo za boljši oprijem in spoj s kompozitnim materialom. Da smo lahko sestavili vse komponente je bilo potrebno izdelati še kalupe, v katerih smo vse komponente tudi sestavili. Vse sestavni material smo označili in ga tudi stehali, s čemer smo zagotovili kvaliteto in enakost med vzorci.

S tako pripravljenimi materiali smo pričeli z izdelavo testnih vzorcev. Izdelovali smo vsak vzorec posebej, kajti zaradi hitrosti strjevanja epoksidne smole ne bi bilo mogoče zaliti vseh vzorcev v enem časovnem ciklusu pred pričetkom strjevanja veznega materiala. Sam postopek je potekal tako, da smo steklena vlakna, narezana na trakove in primernih dolžin, polagali v kalup in jih sproti prepojili z epoksidno smolo, hkrati pa iztiskali zračne mehurčke iz kompozita, s čimer smo zagotovili neporoznost materiala in s tem najboljše mehanske lastnosti. Ko smo prišli do želene debeline kompozita, smo v kalup vstavili aluminijasto sredico, navrtane luknje pa zapolnili z epoksidno smolo, ki je poskrbela za vez med obema plastema kompozitnega materiala. Tako izdelane vzorce smo pustili v kalupu, da so se posušili, ker pa epoksidna smola končno trdnost doseže v času 24 ur, smo preizkušance še dodatno sušili. Ko so dosegli dokončno trdnost, smo začeli z obdelavo naših vzorcev. Potrebno je bilo pobrusiti robove, ki so nastali zaradi zalivanja. Pred testiranjem smo vse preizkušance izmerili, stehali in primerno označili. Mere preiskušancev so bile ocenjene s kljunastim merilom z natančnostjo 0,05 mm in dolžinskim metrom z natančnostjo 1 mm. Vsi 4 tipi vzorcev so prikazani na Sliki 2, informacije o masah in dimenzijah pa so zbrani v Tabeli 1.

Tabela 1. Podatki o preizkušancih.

Oznaka vzorca	Tip vzorca, material	Masa [g]	Dimenzije [mm]
Hibrid – tip1	hibridni: kompozit/Al	176	25 x 15 x 252
Hibrid – tip2	hibridni: kompozit/Al	125	26 x 10 x 252
GF kompozit	homogeni: GF/epoksi	122	28 x 14 x 253
Aluminij	homogeni: Al	168	25 x 10 x 251



Slika 2. Štirje tipi vzorcev hibridnih in homogenih materialov: (a) Hibrid-tip1, (b) Hibrid-tip2, (c) Aluminij, (d) GF kompozit

4 Eksperimentalna metodologija

Analiza mehanskih lastnosti vseh 4 tipov preizkušancev je bila izvedena z dvema tipoma testov, in sicer z izvajanjem nateznega ter upogibnega testa (glej Sliko 3). Testiranje je potekalo na upogibno-nateznem stroju znamke Zwick/Roell Z150. Glede na dolžino preizkušancev je bila razdalja med podporama nastavljena na 150 mm, hitrost pomika bata pa je bila nastavljena na 10 mm/min.

Pri izvajanju upogibnih testov na hibridnih preizkušancih je bilo ugotovljeno, da so strižne napetosti, ki se pojavijo med plastmi materialov, ki so si med sabo različne, dovolj veliki. Med luknjami, ki smo jih navrtali v aluminijasto sredico, in med epoksidno smolo je prišlo do premočnega striga in vez med kompozitoma je popustila (glej Sliko 4).

Podobni rezultati in problem med spoji se pojavi tudi pri nateznih testih. Strjena epoksidna smola odlično prenaša visoke tlačne sile, manj pa je odporna na upogib in na strižne sile, saj je njena struktura krhkega značaja. Vendar odpornost na ti dve sili znatno izboljšamo z ojačitvenimi steklenimi vlakni.



Slika 3. Izvajanje testov na preizkušancih: (a) natezni test, (b) upogibni test



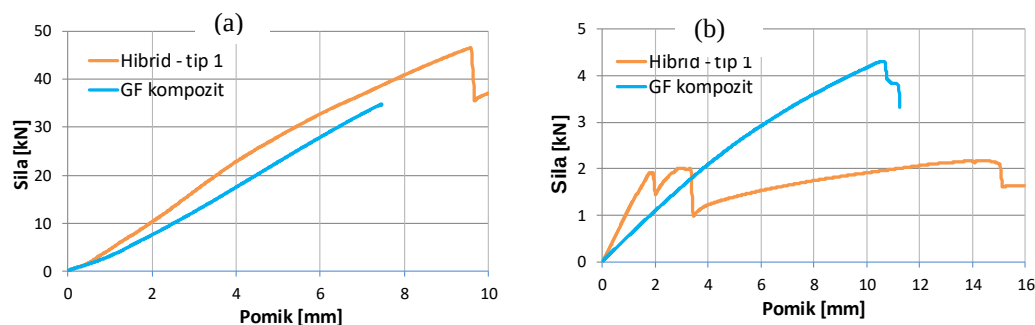
Slika 4. Delaminacija preizkušancev: (a) pri nateznem testu, (b) pri upogibnem testu

5 Rezultati meritev

Cilj raziskave je bila eksperimentalna analiza mehanskih lastnosti hibridnih materialov, s katero ugotovimo, ali lahko z uvajanjem tovrstne metodologije razvoja konstrukcijskih elementov zmanjšamo maso konstrukcij, pri tem pa ohranimo čim večjo togost. Pri tem upoštevamo, da izbira načina spajanja kovinskih in nekovinskih delov hibridne konstrukcije močno vpliva na njihove trdnostne lastnosti. V ta namen, kot je bilo navedeno v 3. poglavju, sta bila primerjana 2 načina spajanja.

Na slikah 5 in 6 so prikazani rezultati nateznih in upogibnih testov na vseh 4 tipih preizkušancev v obliki sile v odvisnosti od pomika.

Pri nateznem testu smo iz rezultatov meritev med hibridnim vzorcem Hibrid-tip1 in kompozitnim vzorcem GF kompozit ugotovili, da je bila predpostavka glede hibridnega vzorca prava. Za aluminijasto sredico se izkaže, da v testu dejansko odigra ojačitveno vlogo in s tem dobljenemu hibridnemu vzorcu poveča togost, saj je krivulja za vzorec Hibrid-tip1 na Sliki 5a bolj strma od krivulje GF kompozita. To pomeni da je vzorec Hibrid-tip1 manj raztegljiv. Res je, da smo pri vzorcu Hibrid-tip1 dosegli za 30% večji togosti, hkrati pa se je masa vzorca povečala za 44%. Vzorec Hibrid-tip1 je na testu prestal silo 45 kN, nato so se vezi med materiali pretrgale in sila na grafu strmo pade. Ugotovimo, da je najprej popustil kompozitni del iz steklenih vlaken, aluminijasta sredica pa po pretrgu vezi še premore nekaj sil pred popolnim pretrgom. Tak material je zelo primeren za sklope, kjer do popolnega preloma ne sme priti hipoma. Kompozitni material pa je na testu prestal silo 35 kN, kar je glede na njegovo maso tudi odličen rezultat.

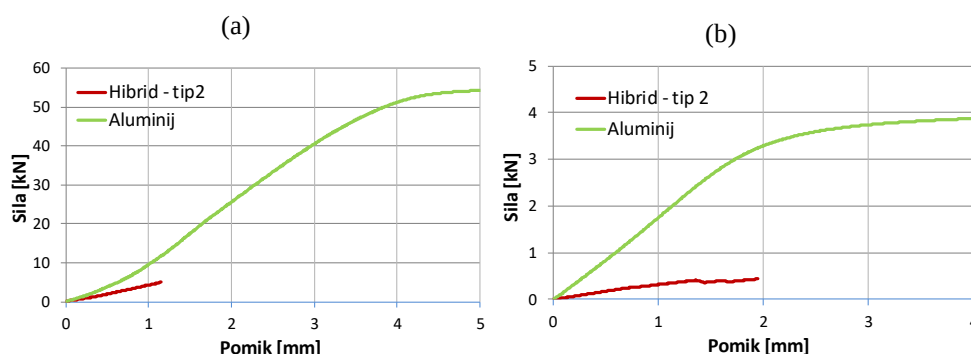


Slika 5. Diagrami sil v odvisnosti od pomikov pri nateznih (levo) in upogibnih (desno) testih za 2 tipa preizkušancev: Hibridni – tip1 in GF kompozit

Na grafu pri upogibnem testu (glej Sliko 5b) vidimo, da je togost hibridnega vzorca Hibrid-tip1 v območju pomika od 0 do 2 mm oz. do začetka pretrga vezi izrazito večja od kompozitnega vzorca GF kompozit. Tudi pri upogibnem testu smo togost vzorca Hibrid-tip1 proti vzorcu GF

kompozit značilno povečali, in sicer skoraj za 100%. Ugotovljeno je bilo, da je vzorec GF kompozit bolj fleksibilen in prenese večje obremenitve od našega hibridnega vzorca pri pomikih bata večjih od 2 mm, vendar je pri začetni sili togost vzorca hibridnega vzorca skoraj dvakrat večja od togosti kompozitnega materiala. Tudi pri upogibnem testu ugotovimo, da ima hibridni vzorec Hibrid-tip1 odlične mehanske lastnosti, vendar pri manjših obremenitvah.

Rezultati testov pri hibridnih vzorcih Hibrid-tip2 proti aluminijastim vzorcem, ki so predstavljeni na Sliki 6, pa niso najbolj spodbudni. Res je, da smo hibridnemu vzorcu zmanjšali težo proti aluminijastim vzorcem za 25%, vendar je kritičen način spoja med kompozitom in aluminijem. Tekom analize smo ugotovili, da bi tak spoj lahko še mnogo izboljšali, vendar način spoja pri hibridnem vzorcu tipa 2 ne omogoča, da bi prenašal podobne obremenitve kot popolnoma aluminijasti material. Aluminij je mnogo bolj tog od hibridnega vzorca tipa 2, saj je togostna krivulja pri hibridnem vzorcu zelo položna. Iz grafov je lepo razvidno, da se vezi, s katerimi sta materiala spojena, pretrgajo hipoma in pri zelo majhnih raztezkih.



Slika 6. Diagrami sil v odvisnosti od pomikov pri nateznih (levo) in upogibnih (desno) testih za 2 tipa preizkušancev: Hibridni – tip2 in Aluminij

6 Zaključek

Iz rezultatov eksperimentalne analize lahko sklepamo, da je pri spajanju kovinskih in nekovinskih materialov zelo pomemben način spoja. Ugotovili smo, da je spoj pri hibridnem vzorcu Hibrid-tip1 zelo učinkovit pri manjših obremenitvah, način spoja pa bi z modifikacijami v tehnološkem postopku priprave vzorcev lahko še izpopolnili tako, da bi dosegel še večjo togost.

Hkrati ugotovimo, da način spoja materialov pri hibridnem vzorcu Hibrid-tip2 ni primeren za večje obremenitve, vendar nam je ta raziskava pokazala, da bi tovrstno spajanje materialov, sicer z nekaterimi popravki in nadgradnjami, lahko uporabili tudi v praksi za določene tehnične rešitve.

Tekom izvajanja meritev in nadaljnje analize je bilo ugotovljeno, da bi poleg križnih zarez v aluminijasti del hibridnih nosilcev, kar bi bistveno pripomoglo k močnejšemu oprijemu kompozitnega materiala, skozi navrtane luknje morali napeljati tudi ojačitvena steklena vlakna.

Zahvala

Raziskovalno delo je bilo delno izvedeno v okviru projekta EVA4GREEN - Ekološki Varen Avtomobil za zeleno mobilnost (Program OP20.00362), ki je sofinanciran s strani Ministrstva za izobraževanje, znanost in šport Republike Slovenije ter Evropskega sklada za regionalni razvoj. Obenem se zahvaljujemo podjetju TPV d.o.o., ki je ponudilo eksperimentalno opremo za izvajanje raziskave.

Reference

- [1] Yuce, C., Karpat, F., Yavuz, N., & Sendeniz, G. (2014). A case study: designing for sustainability and reliability in an automotive seat structure. *Sustainability*, 6(7), 4608-4631.
- [2] Mayyas, A., Qattawi, A., & Shan, O.M.. (2012). Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 1845–1862.
- [3] Yuce, C., Karpat, F., Yavuz, N., & Dogan, O. (2015). A review on advanced joining techniques of multi material part manufacturing for automotive industry. *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, 3(5), 63-68.
- [4] Banea, M.D., & da Silva, L.F.M. (2009). Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 223, 1–18.
- [5] Cao, J., & Grenestedt, L. (2004). Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybridic ship hulls. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(9), 1091–1105.
- [6] Campilho, R.D.S.G., Banea, M.D., Neto, J.A.B.P., & da Silva, L.F.M. (2012). Modelling of single-lap joints using cohesive zone models: effect of the cohesive parameters on the output of the simulations. *The Journal of Adhesion*, 88(4-6), 513–533.
- [7] Anyfantis, K.N. (2012). Finite element predictions of composite-to-metal bonded joints with ductile adhesive materials. *Composite Structures*, 94(8), 2632–2639.
- [8] Anyfantis, K.N., & Tsouvalis, N.G. (2013). Loading and fracture response of CFRP-to-steel adhesively bonded joints with thick adherents – Part I: experiments. *Composite Structures*, 96, 850-857.
- [9] Breto, R., Chiminelli, A., Duvivier, E., Lizaranzu, M., & Jiménez, M.A. (2015). Finite element analysis of functionally graded bond-lines for metal/composite joints. *The Journal of Adhesion*, 91(12), 920-936.
- [10] Kah, P., Suoranta, R., Martikainen, J., & Magnus, C. (2014). Techniques for joining dissimilar materials: metals and polymers. *Reviews on Advanced Materials Science*, 36(2), 152-164.
- [11] Avgoulas, E.I., & Sutcliffe, M.P.F. (2016). Biomimetic-inspired CFRP to perforated steel joints. *Composite Structures*, 152, 929–938.

Method for analysis of smart sheet metal forming tools strip layout

Stjepan FLEGARIĆ¹, Tomaž SAVŠEK², Mario ŠTORGA¹

¹University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Chair of Design and Product Development,

Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb, Croatia

E-naslovi: stjegan.flegaric@fsb.hr, mario.storga@fsb.hr

²TPV d.o.o.,

Kandijska cesta 60, 8000 Novo Mesto, Slovenia

E-naslov: t.savsek@tpv.si

Povzetek. Pametna orodja za preoblikovanje pločevin so kot poseben segment »pametnih izdelkov« postala del koncepta Industrija 4.0. Komponente orodij, ki se uporabljajo v proizvodnih podjetjih, morajo biti povezane v internet stvari. V nasprotju s klasičnimi oblikovalnimi orodji za preoblikovanje pločevine se pri pametnih orodjih uporabljajo senzorji in aktuatorji. Senzorji dajejo informacije o obdelovancih, stanju orodij in procesih v realnem času. Na podlagi teh informacij ter z uporabo ustreznih algoritmov in aktuatorjev je mogoča regulacija parametrov proizvodnega procesa v realnem času. Prispevek predstavlja inovativno metodo za oblikovanje pločevine v pametnem orodju. Metoda omogoča celovito obdelavo kompleksnih zahtev pri proizvodnji izdelkov iz pločevine in je primerna za metodološki pristop k razvoju pametnega proizvoda v industriji.

Ključne besede: pametna orodja za preoblikovanje pločevin, metoda, industrija 4.0

Razvrstitev: Znanstveni članek

Abstract. Smart sheet metal forming tools as a specific segment of "smart products" became part of Industry 4.0, and its components should be connected on the Internet of Things in a production company. In the opposite of conventional sheet metal forming tools design, smart sheet metal forming tools design includes controllable actuators in the direction different from the press opening and sensors that give information about workpieces, tools and process that regulate the production process parameters in real time which affects the product design process. This paper presents a method for analysis and presentation of smart sheet metal forming tool strip layout. This method enables the integrated processing of complex requirements that exist in such a design, and it is appropriate for use as a methodological approach to the development of the smart product in the industry.

Keywords: smart sheet metal forming tools, industry 4.0, strip layout

Article Classification: Scientific Paper

1 Introduction

The differences in the design process of smart and conventional sheet metal forming tools are recognized in the practice and literature, so the goal of the research is to propose and evaluate a new applicable design process model. This paper present method for smart sheet metal forming tools strip layout analysis and presentation as an upgrade of conventional sheet metal forming tools strip layout analysis and presentation methods. The literature review is conducted for the better understanding of the existing models, methods and features of the smart components used in sheet metal tools design.

Manufacturing has always been adopting according to state of the art in technology. Nowadays it is possible to collect a vast amount of the information about the working process, product, tools and environmental conditions by sensors and send them to the digital twin [1]. Contemporary information infrastructure enables analytical insight into such collected data. According to the results of complex algorithms, the control unit gives orders to controllable actuators in the real process in real time. This is enabled by “smart components” that embed knowledge about their function, behavior and structure. “Smart components” are the basic element of “smart products”. Current and future research has to give answers to questions arising out of this new situation.

Smart sheet metal forming tools are a specific segment of smart products. Controllable actuators in the direction different from the press opening direction and sensors that give information about workpieces, tools and processes regulate the production process parameters in real time. In comparison with conventional, smart tools enable production without bad products, without tool damage and without production breaks or with significantly less of them. They also allow the production of more complex products.

In another hand, smart tools include more complex components in tools design, which conventional tools is not, or include them significantly less and more straightforward kind of them. Common conventional tools have inductive sensors as counting sensors and stop sensors. Smart sheet metal forming tools can have, except counting and stop sensors, many different kinds of sensors for different quality control purposes or process regulating purposes. There are also controllable actuators independent of main press movement which are used for active adjusting tool setup or as the source of active working force in some part of forming process. These elements need to be connected together and with the control unit as with power unit, so there also have to be information processing and power infrastructures. This new kinds of components in tools design and components that support them demand new approaches to some of the design phases, new smart tools design process models. These models should enable the integrated processing of complex requirements that exist in such a process. They should include information processes throughout the tools lifecycles as a source of information for the tools design process in real time [2].

2 Sheet metal forming tools strip layout

Most of sheet metal parts are produced in more than one stages. There are different kind of work pieces transport between stages. It can be done by hand and then exist separated operations which can be performed on separated press in different places or on one press in different time or any combinations of this. When work pieces are transported by transport system integrated on press then exist transfer kind of sheet metal forming tool. In both situations incoming work pieces in first stage are in appropriate dimensioned flat plate form. In situation that incoming work pieces in first stage came directly from roll and all work pieces stay connected to each other during the whole forming process until the last, separating, stage all in one single tool then exist progressive tool. If it happened that work piece material be cut out on entry point in progressive sheet metal forming tool in the moment when correct part is finished in last stage of this tool then connected work pieces together with separated, finished, part represent sheet metal strip of this sheet metal forming process. Drawing or CAD model of some sheet metal strip represent conventional sheet metal forming tools strip layout of this sheet metal forming process. Conventional sheet metal forming tool strip layout present shape of every workpieces after forming process in a particular stage in correct geometrical order as will be in tool.

Definition of correct strip layout is first and most demanding step in sheet metal forming tool design. Not only progressive sheet metal forming tool but all kind of mentioned multi stage sheet metal forming tool need similar kind of stage work piece shape definition because it is the way of forming process definition. In work piece shape definition process for some stage should be decided which forming operation, on which way and with which component will be performed in

this a particular stage. In this process designer should always keep in mind hole sheet metal forming process from flat sheet metal to correct part which is start and end point of this process. Boundary condition for this process is environment in customer work shop in sense of available press, its equipment and another infrastructure. It is clear that this process demands very exercised designers and any help that could be provided to them.

Time is always very important. This is especially expressed in tool making industry because of fact that final customer doesn't need tool, customer need correct part always on time. Part producing company, direct customer of tool making company doesn't need tool design they need tool that can produce correct part. Every tool making company that can produce correct tool a week before another one will get the job. All of this make big pressure on tool design office and every method that can increase productivity or improve check protocols is more than needed.

The most demand kind of sheet metal forming tool design is progressive tool design. Work pieces of all except last one stage of progressive sheet metal forming tool strip is one single part. This is the reason that all stages must work simultaneity ensure that nondeformable part of sheet metal strip is always on same level during the forming process.

Literature offer some methods that can be useful in progressive sheet metal forming tools design process. In [3] authors present a computer-aided structural design system for progressive sheet metal forming tools with drawing, bending and punching operation. This system is able to output designs of the main and standard parts of progressive tool using advantage of pre-built design knowledge and data base. Nonstandard cams are very often components in progressive sheet metal tools design. Design system for nonstandard cams based on the feature reuse and group assembly technology was presented in [4]. This system is able to generate designs of the tools substructure with cam in the form of assembly with hole equipment. Both of those systems can decrease design time consumption but both of them need predefined sheet metal strip layout as input data and can be performed after sheet metal strip layout definition process.

There was found also some methods that can be helpful in sheet metal strip layout definition process. Sheet metal strip layout should ensure that in sheet metal forming process which it describes can be produced correct part in customer work shop environment as was mention before but also that this part can be produced using as small as possible input material. Planning of cutting stage have the most important role in input material optimization process. Computerized system for sequencing of embossing and cutting operation based on a classification and fuzzy set theory was present in [5]. This system by the classification method define operation that can be carried out simultaneously and the sequence of the operation groups is then determined using fuzzy set theory. Method for planning and simulation progressive sheet metal forming tool strip layout using Petri nets was found in [6]. In [7] authors describe optimization of sheet metal strip layout according a material consumption of one specific sheet metal progressive tool. In next step they use results of sheet metal strip layout analysis to determine actual forming process load and optimize component thickness. In progressive sheet metal forming tool is situation that complete outer cutting line is made in more than one stage and this have negative affect on cutting line accuracy. Authors in [8] present cutting line optimization method which is based on numerical simulation of whole process with tool surfaces and real press and process parameters that can solve this problem and increase cutting line accuracy.

All these methods for sheet metal forming tools strip layout optimization and analysis founded in literature are related on conventional sheet metal forming tools and conventional presentation of sheet metal forming tools strip layout. Even recent research review paper [9] in chapter about strip layout analyses only conventional sheet metal forming tools and conventional sheet metal strip layout.

In comparison with conventional, smart sheet metal forming tools have controllable actuators in the direction different from the press opening direction and sensors that give information about workpieces, tools and processes regulate the production process parameters in real time

that enable production without bad products, without tool damage and without production loss or with significantly less of them. They also allow the production of more complex products.

Smart sheet metal forming tool strip layout in comparison with conventional is characterized with a smaller number of stage but with a bigger number of operations in one stage. During the smart progressive sheet metal forming tool stage definition is necessary, except questions that should be asked in conventional progressive sheet metal forming tool stage definition process, ask some additional question related on a particular tool stage:

- can using of some actuator enable performing of some additional operation in this stage,
- what is benefit and what is weakness of performing this operation in this stage,
- which kind of actuator could be used,
- which kind of information should or could be used for production process in this stage,
- which kind of information could be collected about tool components condition in this stage,
- which kind of information could be collected about work piece condition in this stage,
- which of collected information could or should be useful for improving production process,
- which kind of sensors or sensors systems could be used for collecting useful information,
- what is applicable dimension and limitation of chosen additional design components?

Except of answers on question on progressive sheet metal forming tools stage level for smart sheet metal forming tool strip layout definition is important to know: what is power and information infrastructure of customer work shop environment in both hardware and software level and what is connection and communication protocols in environment that smart sheet metal forming tool should be included in?

4 Smart sheet metal forming tools strip layout analysis and presentation

Smart sheet metal forming tools can have many different kinds of actuators, sensors and another smart component. In research presented in [10] spring back effect problem was solved including induction heating with close loop control in progressive sheet metal forming tool. State of the art in technology enable including new kind of smart component in sheet metal forming tools constantly. Smart sheet metal forming tools could and should be included on internet of things as part of Industry 4.0.



Figure 1. Conventional sheet metal forming tool strip layout example

All mentioned have effect on way that sheet metal strip layout looks like. Conventional way of analysis and presentation with only work pieces shape and geometrical place of it in tool (Figure 1) doesn't give enough information in this new situation.

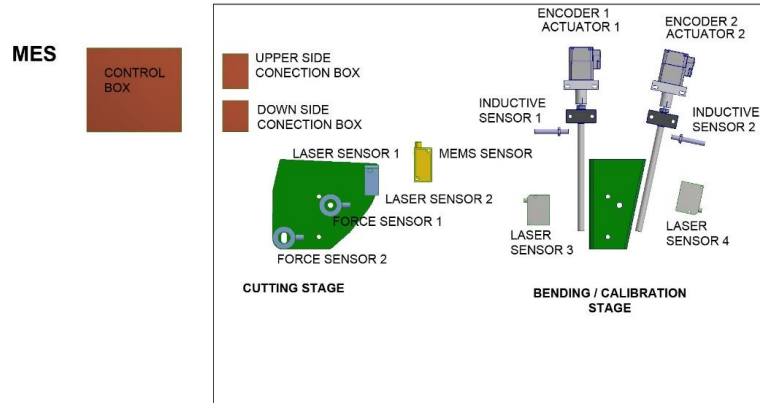


Figure 2. Smart sheet metal forming tool strip layout example

This paper presents a new method for analysis and presentation of smart sheet metal forming tool strip layout. The main characteristic of the new method is that, except for the shape of workpieces and the geometrical place of a particular stage in progressive sheet metal forming tools, it includes a component of information infrastructure predicted in the tool (Figure 2) at different levels of finishing from initial idea to final selection.

Smart sheet metal forming tool strip layout analyzed and presented with this method enabled more effective organization of team work and communication with customers, making it easier. Conventional progressive sheet metal forming tool design is usually provided by one designer. Another one is sometimes included in the drawing-making phase. Control and computer engineering specialists are not necessary members of the development team. Smart sheet metal forming tool development as smart product development at all is not possible without control and computer engineering specialists in the development team. The presented method by clearly presented information in the early phase of tool development that control and computer engineering specialists needed enables that they can be included in the development team in such an early phase of tool development. Multidisciplinary information presented in this way also increases the quality of communication between members of the multidisciplinary development team, which is necessary for smart product development. With all mentioned advantages, the presented method can have an extremely positive effect on smart sheet metal forming tool development process time consumption in comparison with the conventional method for analysis and presentation of sheet metal forming tool strip layout.

5 Conclusion

This paper presents the base of the method for smart sheet metal forming tool strip layout analysis and presentation, which has the potential to be used in all smart product development processes. In this purpose, principle connection lines between information infrastructure components should be added to the presentation, and the method should be completed with two more presentations. The first one describes the function of each information infrastructure component with the expectation of working range and setup parameters, as well as the selection of the component and its control elements. The second one presents the principle diagram of control software function, including the user interface. Completing this method is current work in progress of this research and should be presented in future papers.

Acknowledgement

This paper reports work funded by the EUREKA R&D project E!11181 Smart Tools for Sheet Metal Forming (SmartMForming).

References

- [1] Parrot, A., & Warshaw, L. (2017). *Industry 4.0 and the digital twin: Manufacturing meets its match*. Deloitte University Press, London.
- [2] Flegarić, S., Marjanović, D., Štorga, M., & Bojčetić, N. (2018). Smart sheet metal forming tools design.: R.Doroslovački, ured., *Proceedings of the 13th international scientific conference MMA 2018 – Flexible technologies*, 237-240. Faculty of technical sciences Department of production engineering, Novi Sad.
- [3] Bor-Tsuen, L., Kun-Min, H., Kuan-Yu, S., & Cheng-Yi, H. (2013). Development of an automated structural design system for progressive dies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, 1887-1899.
- [4] Li, G., Long, X., & Zhou, M. (2017). A new design method based on feature reusing of the non-standard cam structure for automotive panels stamping dies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30, 1-16. Pridobljeno na <https://doi.org/10.1007/s10845-017-1368-5>
- [5] Moghaddam, M.J., Soleymani, M.R., & Farsi, M.A. (2013). Sequence planning for stamping operations in progressive dies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26, 347-357.
- [6] Hussein, H.M.A., Kumar, S., & Nasr, E.S.A. (2016). Computer-aided design and simulation of strip layout for progressive die planning using Petri nets. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(4), 1-9.
- [7] Kumar, S., & Patnaik, L. (2017). Design and Analysis of Four Stage Progressive Tool for House-wiring Wire Clip. *CVR Journal of Science and Technology*, 13, 88-95.
- [8] Gui, L., Zhou, M., Wang, W., Xiong, H., & Chen, Z. (2017). Accurate trimming line optimization of multi-station progressive die for complex automotive structural parts. *Int J Adv Manuf Technol*, 95, 1185-1203.
- [9] Zheng, Q., Zhuang, X., & Zhao, Z. (2018). State-of-the-art and future challenge in fine-blanking technology. *Production Engineering*, 13, 61-70.
- [10] Loebbe, C., Hoppe, C., Becker, C., & Tekkaya, A.E. (2015). Closed Loop Springback Control in Progressive Die Bending by Induction Heating. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 16(12), 2441-2449.

Spectral analysis of multi-layered beams with high-contrast material properties of layers

Anatolij NIKONOV, Rudolf PUŠENJAK

*Faculty of Industrial Engineering Novo mesto,
Šegova ulica 112, 8000 Novo mesto, Slovenia
E-mails: anatolij.nikonov@fini-unm.si, rudolf.pusenjak@fini-unm.si*

Povzetek. Pri razvoju natančnih analitičnih modelov večslojnih nosilcev naletimo na precejšnje težave, ki izvirajo iz same narave problema, v katerem se eden poleg drugega stikata dve ali več konstrukcijskih komponent s povsem različnimi lastnostmi. Cilj te raziskave je ugotoviti karakteristične lastnosti prostega nihanja simetričnega večslojnega (sendvič) nosilca, ki je sestavljen iz dveh zunanjih plasti in vmesnega jedra. V raziskavi uporabljamo iz literature dobro znano metodologijo, ki temelji na matriki dinamične togosti. Izvedena je spektralna analiza tri slojnega nosilca z namenom, da ugotovimo, v kolikšni meri razlike v snovnih lastnostih jedra nosilca vplivajo na naravne (lastne) frekvence nosilca. Prav tako pa je raziskan tudi vpliv razmerja debeline zunanjih plasti nosilca in debeline jedra.

Ključne besede: večplastni nosilci, kontrastni lastnosti, spektralna analiza, metoda dinamične togosti

Razvrstitev: Znanstveni članek

Abstract. Obtaining accurate analytical models for a multi-layered beam causes considerable difficulties which arise from the very nature of the problem in which two or more structural components with different properties are joined together. The goal of the research is to investigate free vibration characteristics of symmetric sandwich beam consisting of two faces and a core using the well-established methodology based on utilizing dynamic stiffness matrix. Spectral analysis of three-layered beam with the aim to answer the question how much differences in material properties of the core influence natural frequencies of the beam is performed. Influence of ratio of thicknesses of the face layers and the core is analyzed as well.

Keywords: multi-layered beams, contrast properties, spectral analysis, dynamic stiffness method

Article Classification: Scientific Paper

1 Introduction

Multi-layered beams have widespread applications in engineering as load carrying structural members with high strength to weight ratios. They are often subject to intensive dynamic loading drastically affecting their performance. A laminated construction has distinct advantages over the conventional single-layered one, because it promises high strength and high stiffness to weight ratios and high bending rigidity, which leads to its increasingly widespread application in the fields of mechanical and civil engineering, transportation vehicles, marine, aviation and aerospace [1-3].

This inspires modelling of composite structural elements, containing lightweight components, with a special emphasis on introducing materials exhibiting high-contrast mechanical properties. Therefore, the development of demanding powerful theories and robust computational methodologies involving accurate evaluation and qualitative interpretation of vibration spectra and associated displacement and stress fields, is required. Recent technological developments even more intensively exploit structures with high-contrast in material and geometrical properties of the layers, including, for example, laminated glass beams and plates

widely used in glazing and photovoltaic applications. Laminated glass is usually designed as a three-layered beam or plate, with two stiff facings and a soft polymeric interlayer [4,5]. In automotive and civil engineering, laminated glass has a rather thin polymeric core layer with relatively thick glass facings, resulting in a substantial contrast of core and skin layer thicknesses.

It is known that obtaining an accurate analytical (mathematical) model for a multi-layered beam causes considerable difficulties. The difficulties arise from the very nature of the problem in which two or more structural components with different properties are joined together. The dynamic modeling of multilayer beams has been a topic of interest for many researchers. Many works incorporating the dynamic stiffness method have been reported ever since [6-8]. The derivation of the governing differential equations of motion of the system, development of the dynamic stiffness matrix and finally application of the dynamic stiffness matrix to solve the free vibration problem are of considerable complexity, requiring substantial amount of symbolic and numerical computations.

The goal of the research is to investigate free vibration characteristics of symmetric sandwich beam consisting of two faces and a core using one of the well-established methodologies, e.g. [6-8], based on utilizing dynamic stiffness matrix. Spectral analysis of three-layered beam with the aim to answer the question how much differences in material properties of the core influence natural frequencies of the beam is performed. Influence of ratio of thicknesses of the face layers and the core is analyzed as well.

2 Problem statement and governing equations of motion

Consider a three-layered beam, where x, y are Cartesian coordinates (see Figure 1). The beam consists of a core and two identical faceplates. The core is considered as soft and the faceplates are assumed as stiff, and the thicknesses of the faceplates may vary. Here L is the length of the beam, d the distance between center lines of the faceplates, and h the total thickness of the sandwich beam.

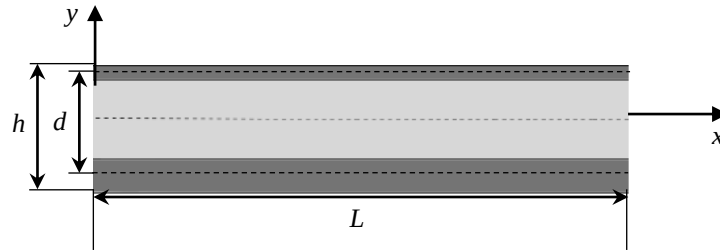


Figure 1. Scheme of a three-layered beam

In the coordinate system shown, the origin is set at the left-hand side of the beam with the x -axis coincident with the axis of the beam. The y -axis of the beam is set upward perpendicular to the x -axis, and the z -axis comes out of plane, following the right-hand rule. Along the z -axis is measured the width of the beam, denoted by b .

The beam only deflects in the $x - y$ plane. The top and bottom faces are modelled as Euler-Bernoulli beams having only axial and bending rigidity and the core is assumed to have only shear rigidity, e.g., the stresses in the core in the longitudinal direction are zero. All three layers are considered to shear the same flexural displacement, v . The cross-section of each layer does not rotate so as to be normal to the common flexure.

The following general assumptions are made when developing the governing differential equations of motion in free vibration of a three-layered sandwich beam [6]:

- All displacements and strains are small so that the theory of linear elasticity applies.

- The faces and core of the sandwich beam are made of homogeneous and isotropic materials and the variation of strain within them is linear.
- Transverse normal strain in the faces and core are negligible.
- Transverse shear within the face layers is negligible.
- There is no slippage or delamination between the layers during deformation.

We assume a time harmonic dependence $\exp(-i\omega t)$, where ω is an angular frequency of the free vibration. For harmonic oscillations, the transverse displacements can be described in the frequency domain by using the transformation

$$v(x, t) = V(x)e^{-i\omega t}. \quad (1)$$

Then the governing differential equation of motion for three-layered beam is written in the form

$$\begin{aligned} \frac{d^6 V}{dx^6} - \frac{Gb}{\zeta d_c}(1 + \kappa \zeta d^2) \frac{d^4 V}{dx^4} - \omega^2 \mu \kappa \left(\frac{d^2 V}{dx^2} - \frac{Gb}{\zeta d_c} V \right) &= 0, \\ \mu &= \mu_1 + \mu_2 + \mu_c, \quad \mu_i = \rho_i b d_i, i = 1, 2, c, \\ \kappa &= 1/(E_1 I_1 + E_2 I_2), \quad \zeta = E_1 A_1 E_2 A_2 / (E_1 A_1 + E_2 A_2), \end{aligned} \quad (2)$$

where G, d_c, μ_c are shear modulus, thickness and mass per unit length related to the core material, respectively; μ_i and d_i ($i = 1, 2$) are masses per unit length and thicknesses of the faceplate 1 (upper) and faceplate 2 (lower), respectively; $E_i A_i$ and $E_i I_i$ are the axial and flexural rigidities of face plate i ($i = 1, 2$); ρ_i denotes material density. The un-subscripted symbol μ in Eq. (2) denotes the total mass per unit length of the sandwich beam. For more detailed information on derivation of the equation (2), the reader is addressed to the paper published by Howson and Zare [8].

Next, we introduce the non-dimensional parameter $\xi = x/L$ so that the equation (2) can be rewritten as

$$[D^6 - \alpha(1 + \beta)D^4 - \lambda(D^2 - \alpha)]V = 0, \quad (3)$$

$$\alpha = GbL^2/\zeta d_c, \quad \beta = \kappa \zeta d^2, \quad \lambda = \omega^2 \mu \kappa L^4,$$

where D is the differential operator $d/d\xi$.

A simply supported sandwich beam with identical faceplates is considered in this research, therefore the boundary conditions are formulated for zero flexural displacements and bending moments at the ends of the beam.

These conditions corresponding to the simply supported case are satisfied by assuming solutions of the form

$$V(\xi) = A \sin n\pi\xi \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (4)$$

where A is an arbitrary constant.

Substituting equation (4) and its derivatives into equation (3) yields the characteristic equation corresponding to the equation of motion as

$$[n^6 \pi^6 + \alpha(1 + \beta)n^4 \pi^4 - \lambda(n^2 \pi^2 + \alpha)]A = 0, \quad (5)$$

which for non-trivial solutions yields natural frequencies of the free vibration

$$\omega_n = n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{n^2 \pi^2 + \alpha(1 + \beta)}{\mu \kappa L^4 (n^2 \pi^2 + \alpha)}}. \quad (6)$$

The equation (6) represents a formula for calculating natural frequencies of the three-layered sandwich beam with contrast material properties of the faceplates and the core, and will be used in the next section for the analysis of influence of ratio of thicknesses of the face layers and the core.

3 Multi-parametric spectral analysis of layered beams

In this section the numerical results of multi-parametric spectral analysis will be presented based on two examples of multilayered beams. For simulating free vibration behavior of the beams, materials with highly contrast mechanical properties were selected (see Table 1). Namely, the materials for faceplates exhibit much higher density and stiffness rather than material for the core.

Table 1. Mechanical properties of the faceplates and core.

	Materials	Density [kg/m ³]	Elastic modulus [GPa]	Shear modulus [GPa]
Faces	Steel	8000	200	-
	Mg Alloy	1800	45	-
Core	Polypropylene	900	1.5	1.3

3.1 Three-layered sandwich beam

Consider a simply supported three-layered sandwich beam with faceplates, made from steel, and the polypropylene core. In addition, we consider equal thickness of faceplates, i.e. $d_1 = d_2$. Multi-parametric spectral analysis of the beam implies thickness of the faces and the core variation in such a way that the total thickness of the sandwich beam is constant, i.e. $h = d_1 + d_2 + d_c = \text{const}$. In turn, with variation of thickness of the faces and the core the mass per unit length changes accordingly.

As a result, the bending stiffness of the sandwich beam changes as well. Especially in the case when the faceplates are made of the same material, the equivalent bending stiffness of three-layered beam can usually be computed with sufficient accuracy if the properties of the facings are known. If it is assumed that the core does not significantly contribute to the stiffness of the sandwich beam, e.g. $E_f/E_c \gtrsim 100$, where $E_f = E_1 = E_2$ and E_c are moduli of elasticity of facing and core, the bending stiffness D is given by the formula [9]

$$D = \frac{E_f b (h^3 - d_c^3)}{12\lambda} \left[1 - \frac{3(d_2 - d_1)^2}{\left(1 + \frac{d_c}{h} + \frac{h}{d_c}\right)(d_2 + d_1)^2} \right], \quad (7)$$

where $\lambda = 0.91$ for isotropic facings.

The following geometrical parameters were selected for numerical calculations: $L = 1000$ mm, $b = 50$ mm, and $h = 10$ mm. In the analysis, the variation of thickness of the faces and the core is performed by increasing $d_1 + d_2$ in the interval $1 \text{ mm} \leq d_1 + d_2 \leq 9 \text{ mm}$ and by properly decreasing d_c so that the total thickness remains constant, $d_1 + d_2 + d_c = h = 10 \text{ mm}$. The results of spectral analysis of the three-layered beam taking into account bending stiffness change versus mass per unit length is shown in Figure 2. The natural frequencies for the 1st and 2nd modes are calculated using the formula (6).

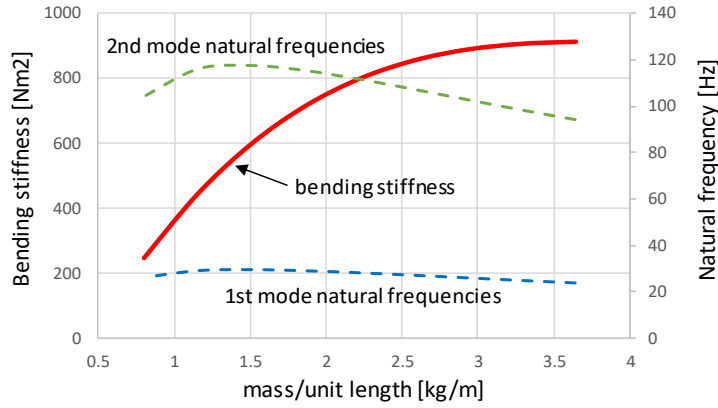


Figure 2. Bending stiffness and natural frequencies for three-layered sandwich beam

3.2 Two-layered bi-material beam

Another example of layered beams considers a two-layered beam consisting of two materials with different mechanical properties, where the first layer is made from steel, and the second layer from Mg Alloy. In this case, the core in the sandwich structure is omitted. As a result, the change of mass per unit length for the sandwich beam is due to varying of the faceplates thicknesses. Meanwhile, the total thickness of the sandwich beam remains constant, i.e. $h = d_1 + d_2 = \text{const}$.

Similar to the first example, the bending stiffness of the sandwich beam changes as well. In the case when we neglect the core thickness, e.g. in the case of bi-material beam, the bending stiffness is given by the formula [10]

$$D = \frac{b}{12} [E_1(d_1^3 + 3d_1d_2^2) + E_2(d_2^3 + 3d_1^2d_2)]. \quad (8)$$

Realizing the passage to the limit when the thickness of the core is approaching to zero, and according to Eq. (3) the corresponding parameter α tends to infinity, $\alpha \rightarrow \infty$, the formula (6) for calculating natural frequencies of a two-layered bi-material beam takes the form

$$\omega_n = n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{1+\beta}{\mu \kappa L^4}}. \quad (9)$$

The geometrical parameters for numerical calculations were selected the same as for the case of the three-layered beam, i.e. $L = 1000$ mm, $b = 50$ mm, and $h = 10$ mm. The analysis of two-layered beam is performed by the variation of thickness of the faces within the interval $0 \leq d_1, d_2 \leq 10$ mm in such a way that the thickness of one of face plates is increased, while the thickness of another plate is respectively decreased so that the total of layered plate thickness remains constant, i.e. $d_1 + d_2 = h = 10$ mm. In the case when $d_1=0$, or $d_2=0$, we have single layer beam. The results of spectral analysis of the two-layered bi-material beam taking into account bending stiffness change versus mass per unit length is shown in Figure 3. The analysis of the bending stiffness curve by means of calculus of the restricted extremes reveals, that inflection point always occurs at $d_1 = d_2$ regardless of the choice of material. Existence of inflection causes lower values of the bending stiffness as might be achieved with monotonic increasing, which is characteristic for three layered sandwich beam. The natural frequencies for the 1st and 2nd modes are calculated using the formula (9).

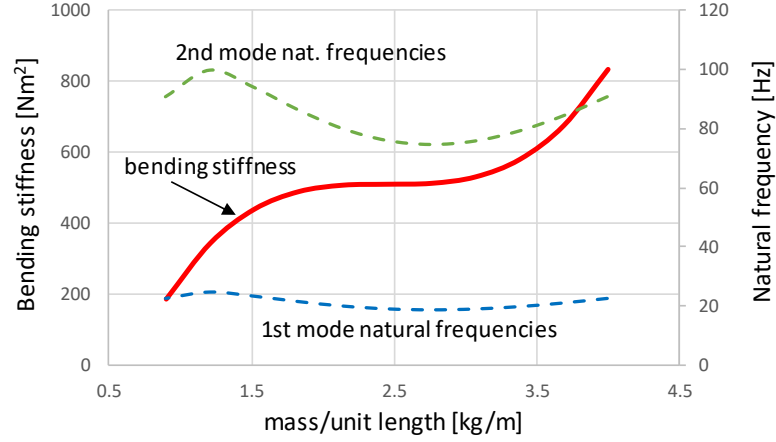


Figure 3. Bending stiffness and natural frequencies for two-layered bi-material beam

4 Discussion and conclusions

Spectral analysis of three-layered and two-layered beams with the aim to answer the question how much differences in material properties of the core and the ratio of thicknesses of the face layers and the core influence natural frequencies of the beam is performed.

An exact dynamic member stiffness matrix (exact finite element), which defines the flexural motion of layered sandwich beams, was developed by many authors, e.g. [6,7], from the closed form solution of the governing differential equation. This enables the powerful modelling features associated with the finite element technique to be utilized. However, such a formulation necessitates the solution of a transcendental eigenvalue problem, and therefore causes computational challenges. This is accomplished using the Wittrick–Williams algorithm, which enables the required natural frequencies to be converged upon to any required accuracy with the certain knowledge that none have been missed.

The method suggested by Howson and Zare provides an alternative to the traditional finite element technique such as the Wittrick–Williams algorithm, which yields the required natural frequencies to any desired accuracy.

In this paper, the effect of the variation of the face layer mass per unit length on the size of bending stiffness and natural frequencies of free vibration were investigated based on the exact solution of the characteristic equation accompanied with the equation of motion of the beam. It was demonstrated that the increase in total mass per unit length of the sandwich beam resulted in a differently shaped increase of the bending stiffness when three-layered and two-layered beams are compared. Due to the assumption $d_1 = d_2$ in the case of three layered sandwich beam, Eq. (7) is reduced on the form $D = \frac{E_f b (h^3 - d_c^3)}{12\lambda}$, which indicates that the bending stiffness increases monotonically as the core thickness d_c decreases towards zero. Taking in mind the constraint $d_1 + d_2 + d_c = h = \text{const.}$, then thickness of faces $d_1 + d_2 = 2d_1$ as well as the total mass per unit length $\mu = \mu_1 + \mu_2 + \mu_c$ increase as the core thickness d_c decreases. From this observation we conclude that bending stiffness of three layered sandwich beam monotonically increases with the total mass per unit length μ and reaches its maximum at $\mu=4.0$ kg/m. Opposite to this, the increase of bending stiffness with total mass per unit length of the bi-material beam shows a more diverse course. If we seek the restricted extrema of Eq. (8) by considering the constraint $h = d_1 + d_2 = \text{const.}$, then the second derivative of bending stiffness vanishes at equal thickness of both layers, $d_1=d_2=5$ mm, which correspond to the total mass per unit length $\mu=2.45$ kg/m and changes sign at that point. Thus bending stiffness curve has an inflection at equal thickness of both layers, while at extreme points $d_1=h$, $d_2=0$ mm and $d_1=0$ mm, $d_2=h$,

respectively the beam has only one layer (steel or Mg Alloy). Using Eq. (8), the bending stiffness in extreme points tends to the values $D=833.33 \text{ Nm}^2$ (for steel) and $D=187.5 \text{ Nm}^2$ (for Mg Alloy), respectively. Qualitatively different behavior is observed also in the course of natural frequencies of three-layered and two-layered beams, respectively. In both cases, the calculus of restricted extrema must be applied to reveal the positions of maxima and minima and corresponding peak as well as minimal values of natural frequencies. In the case of bi-material sandwich beam, the maximum occurs at $\mu=1.152 \text{ kg/m}$, where natural frequencies of the 1st mode and 2nd mode are $f_1= 24.99 \text{ Hz}$ and $f_2= 99.98 \text{ Hz}$, respectively. The minimum occurs at $\mu=2.769 \text{ kg/m}$ and corresponding minimal natural frequencies of the 1st mode and 2nd mode are $f_1= 18.62 \text{ Hz}$ and $f_2= 74.46 \text{ Hz}$, respectively.

In the paper, it was shown that multi-parametric spectral analysis of sandwich beams offers important findings through curves of bending stiffness and natural frequencies of the free vibration as a function of variable total mass per unit length. Moreover, it comes out, that it proves as useful in solving problems of free vibration of both two- and three- layered sandwich beams. The practical outcome of present analysis is that it can be used with benefit, when optimal ratio of thicknesses of the face layers and the core is sought.

The analysis showed that thickness of individual layers has a strong influence on the behavior of harmonically excited layered beams. Namely, natural frequencies of first two modes of beam vibration in the case of a simply supported three-layered sandwich beam firstly increase to reach a maximum and then constantly decrease with increased total mass per unit length, while natural frequencies of two-layered sandwich beam after a similar behavior in a narrow area of lower values of total mass per unit length begin to rise strongly again. The general conclusion in respect of bending stiffness is that it for three-layered sandwich beam monotonically increases in the whole range of total mass per unit length and reaches almost everywhere much greater values than these of two-layered sandwich beam counterpart except in the vicinity of both total mass per unit length endpoints.

Acknowledgement

The authors are grateful to the Slovenian Research Agency (ARRS), Grant Ref. J2-9224, which supported this work, and also to the Program OP20.00362 EVA4GREEN co-financed by the Ministry of Education, Science and Sport of the Republic of Slovenia, and by the European Regional Development Fund.

References

- [1] Mead, D.J. & Markus, S. (1969). The forced vibration of a three-layer, damped sandwich beam with arbitrary boundary conditions. *Journal of Sound and Vibration*, 10(2), 163–75.
- [2] Rao, D.K. (1978). Frequency and loss factors of sandwich beams under various boundary conditions. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 20(5), 271–282.
- [3] Frostig, Y. & Baruch, M. (1994). Free vibration of sandwich beams with a transversely flexible core: a high order approach. *Journal of Sound and Vibration*, 176(2), 195–208.
- [4] Schulze, S.H., Pander, M., Naumenko, K., & Altenbach, H. (2012). Analysis of laminated glass beams for photovoltaic applications. *International Journal of Solids and Structures*, 49(15), 2027–2036.
- [5] Asik, M.Z. & Tezcan, S. (2005). A mathematical model for the behavior of laminated glass beams. *Computers & Structures*, 83(21), 1742–1753.
- [6] Banerjee, J.R. (2003). Free vibration of sandwich beams using the dynamic stiffness method. *Computers and Structures*, 81, 1915–1922.
- [7] Banerjee, J.R., Cheung, C.W., Morishima, R., Perera, M., & Njuguna, J. (2007). Free vibration of a three-layered sandwich beam using the dynamic stiffness method and experiment. *International Journal of Solids and Structures* 44, 44, 7543–7563.

- [8] Howson, W.P. & Zare, A. (2005). Exact dynamic stiffness matrix for flexural vibration of three-layered sandwich beams. *Journal of Sound and Vibration*, 282, 753–767.
- [9] Kuenzi, E.W. (1951). *Flexure of structural sandwich construction*. Technical report No. 1829. Forest Products Laboratory, Forest Service U.S. Department of Agriculture, Wisconsin.
- [10] Flores-Dominguez, M. (2014). Modelling of the bending stiffness of a biomaterial beam by the approximation of one-dimensional of laminated theory. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4, 492-497.

Inovativna oblika elementa za preprečevanje utrujenostne poškodbe pritrdilnega traka rezervoarja goriva

Innovative design of an element for prevention of fatigue crack of fastening strap of fuel tank

**David STUŠEK¹, Matic MUC², Jurij ŠVEGELJ², Vili MALNARIČ^{1,2},
Tomaž SAVŠEK²**

¹*SiEVA d.o.o., PE Novo mesto,
Kandijska cesta 60, 8000 Novo mesto, Slovenija
E-naslovi: d.stusek@tpv.si, v.malnaric@tpv.si*

²*TPV d.o.o.,
Kandijska cesta 60, 8000 Novo mesto, Slovenija
E-naslovi: m.muc@tpv.si, j.svegelj@tpv.si, t.savsek@tpv.si*

Povzetek. Pričujoč prispevek predstavlja koncept in zamisel prototipnega dizajna elementa v sestavu za pritrditev rezervoarja goriva tovornega vozila vodilnega proizvajalca. Raziskovalno – razvojna ekipa podjetja TPV d.o.o. ter SiEVA d.o.o. je razvila rešitev za preprečitev pokanja pritrdilnega traku rezervoarja goriva, ki je bila posledica dinamičnega utrujanja. Predlagana rešitev proizvajalca tovornih vozil je bila sprememba materiala in debeline pritrdilnega traku, kar se je izkazalo za finančno izdatno in neučinkovito rešitev. S preliminarne analize po metodi končnih elementov je bilo ugotovljeno, da ima na poškodbo velik vpliv ohlap sestava pritrdilnega traku, plastičnega elementa in sornika. V primeru trenutnih definicij izdelkov v sestavu se pojavi upogibanje pritrdilnega traku na majhnem radiju, kar privede do velikih gradientov napetosti in posledično utrujenostne poškodbe. Predlagan dizajn plastičnega elementa eliminira ohlap v sestavu ter na podlagi utrujenostnih analiz predstavlja rešitev pokanja pritrdilnega traku, ki je robustna in neobčutljiva rešitev na ohlap, material in debelino pritrdilnega traku.

Ključne besede: utrujenostna poškodba, tovorno vozilo, ohlap v sestavu, gradient napetosti

Razvrstitev: Znanstveni članek

Abstract. Presented article presents a concept and an idea of prototype design of an element in an assembly of fixture of fuel tank on one of the leading truck manufacturer. R&D team of TPV and Sieva developed a solution for prevention of cracking of fastening strap of fuel tank, which was consequence of fatigue damage. The manufacturer suggested to change material and thickness of fastening strap, but those two suggestions turned out to be expensive and non – robust solutions. With preliminary FEM analyses was discovered that fatigue crack is greatly affected by gap in assembly of fastening strap, plastic bushing and steel pin. In case of current design definition of those products in assembly bending in small radius of fastening strap appears, which leads to big stress gradients and consequently fatigue damage. Suggested design of plastic element eliminated gap in assembly and on basis of numerical analyses of fatigue damage represents solution for cracking of fastening strap. In the meantime it turns out to be robust solution, which is independent on gap in assembly, choice of material and thickness of fastening strap.

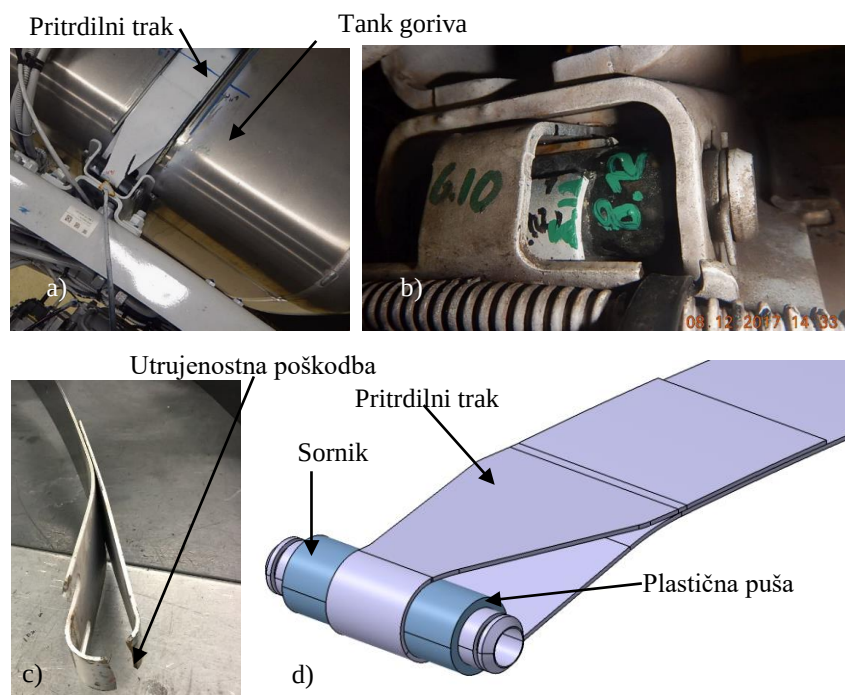
Keywords: fatigue damage, truck, gap in assembly, stress gradient

Article Classification: Scientific Paper

1 Uvod in predstavitev problema

Dandanašnji trendi trajnostnega razvoja izdelkov narekujejo avtomobilskim proizvajalcem in razvojnim inženirjem potrebo po nižanju mase nosilnih komponent. Načela lahke gradnje nosilnih sklopov karoserije se držimo tudi v raziskovalno – razvojnem oddelku podjetja TPV d.o.o. in Sieva d.o.o. in naše vsakodnevne rešitve izzivov, s katerimi se srečujemo na delovnem mestu težijo k temu, da je izdelek oz. predlagana rešitev na eni strani lažja ali v najslabšem primeru enako težka kot trenuten izdelek, a le v primeru da bolje izpoljuje svojo funkcijo ter je seveda ekonomsko upravičena. Velikokrat se zgodi, da je slednja zahteva tisti jeziček na tehtnici, ki odloča o realizaciji oz. aplikaciji tehnične rešitve na izdelku.

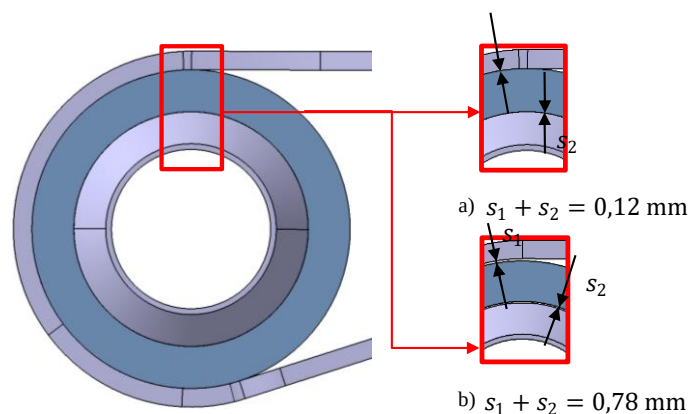
V sledečem prispevku je prikazan podoben primer. Eden izmed vodilnih proizvajalcev tovornih vozil se je obrnil na raziskovalno – razvojno ekipo podjetja TPV d.o.o. s težavo pokanja pritrdilnega traku rezervoarja goriva, ki je prikazan na sliki 1a. Razpoka se pojavlja v zanki pritrdilnega traku v sestavu jeklenega sornika, plastične puše in jeklenega pritrdilnega traku, ki je prikazan na sliki 1b in 1c.



Slika 1. a) Prikaz pritrdilnega traku na tanku goriva, b) prikaz razpoke v sestavu pritrdilni trak - plastična puša – sornik, c) prikaz razpoke na pritrdilnem traku, d) prikaz sestava

Podjetje TPV d.o.o. je trenutno dobavitelj štancanega kosa, medtem ko je preoblikovanje domena drugega podjetja, zato je sprva obstajal sum o tem, da dobavljen material ne ustreza predpisanemu standardu, vendar smo z enosnimi nateznimi preizkusi v preizkusnem laboratoriju ugotovili, da je material znotraj meja, ki jih predpisuje standard in zahteve za izdelek. Temu navkljub je bila ideja proizvajalca tovornih vozil ali sprememba materiala v višje

trdni material ali pa debelejši pritrdilni pas. Vendar ti dve ideji nasprotujejo zgoraj opisanim načelom, saj bi v primeru spremembe material dvignili cenovni rang izdelka, v primeru debelejšega pritrdilnega traku pa bi prav tako podražili izdelek ter tudi zvišali maso izdelka, kar pa je netrajnostni ukrep. Poleg teh dveh rešitev se je naši ekipi porajala tudi nekonvencionalna “out of the box” zamisel, da utegne trak pokati zaradi upogibanja zanke traku okoli sornika, saj je plastična puša zelo podajna, upogibanje pa je možno zaradi velike zračnosti v sestavu. Na sliki 2a in 2b sta prikazani dve skrajni možnosti ujemov sestava. Na sliki 2a je prikazan primer, ko so elementi v sestavu na tolerančnih dimenzijah, ki zagotavljajo najmanjši ohlap v sestavu, ki znaša -0,12 mm, na sliki 2b pa je prikazan primer, ko so elementi v sestavu na tolerančnih dimenzijah, ki zagotavljajo največji ohlap v sestavu, ki znaša -0,78 mm.



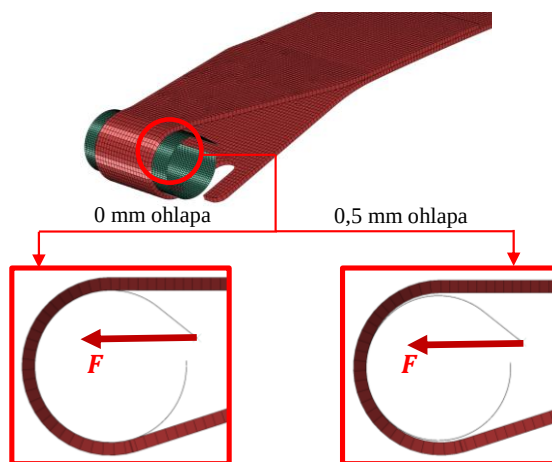
Slika 2. a) Sestav v najmanjšem ohlapu, b) sestav v največjem ohlapu

2 Preliminarne analize in identifikacija problema

Za identifikacijo problema smo pripravili enostaven model za analizo po metodi končnih elementov v program Abaqus. Model je bil sestavljen iz jeklenega pritrdilnega traku z modulom elastičnosti $E = 210000 \text{ MPa}$, ter idealno togega lupinskega sornika. Sornik je bil modeliran s štiri-vozliščnimi končnimi elementi s polno integracijo.

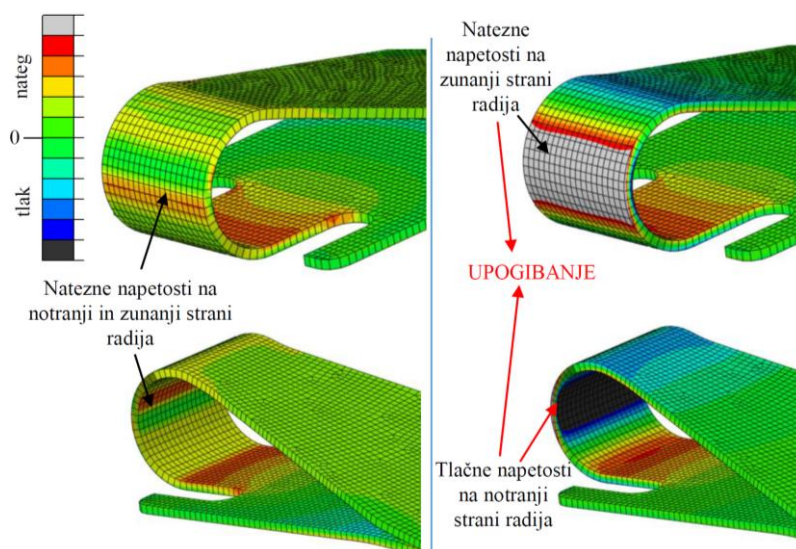
V enem primeru je bil ohlap med pritrdilnim trakom in togim sornikom enak 0 mm, v drugem primeru pa je bil ohlap enak -0,5 mm., kot je prikazano na sliki 3.

Med pritrdilnim trakom in togim sornikom je bil predpisan kontakt, sornik pa je bil obremenjen z enotsko silo. Enotska sila je v enem primeru imela vrednost 0 N, v drugem primeru pa vrednost 6500 N. Tako smo pripravili model, ki posnema utripno obremenjen kos. Tako pripravljen model je primeren tudi za nadaljno analizo v profram Femfat za analizo določitve življenjske dobe.



Slika 3. Prikaz ohlapa med sornikom in pritrdilnim trakom v modelu za analizo po metodi končnih elementov

Rezultat analize je prikazan na sliki na sliki 4. V primeru ničnega ohlapa lahko opazimo, da so vrednosti glavnih napetosti pozitivne, kar pomeni, da je pritrdilni trak v območju zanke obremenjen izključno natezno. Pri primeru ohlapa 0,5 mm pa lahko opazimo, da se na zunanji strani pojavijo natezne napetosti, na notranji strani zanke pa tlačne napetosti, kar nakazuje, da je v tem območju zanka obremenjena upogibno. Pri sili **0 N** je seveda po celotnem traku napetost enaka **0 MPa**.



Slika 4. Primerjava napetostnega stanja

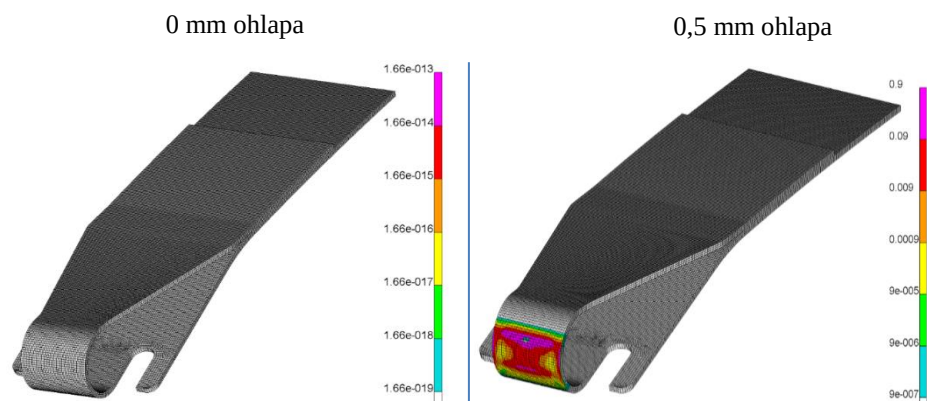
Upogibno napetostno stanje v primerjavi s čistim nateznim napetostnim stanjem je manj primerno iz vidika dinamičnega utrujanja, saj poleg višjih napetosti privede tudi do napetostnih gradientov.

Opravljen je bila tudi analiza v programu Femfat za detekcijo utrujenostnih poškodb oz. določitev življenjske dobe izdelka. V program Femfat se na podlagi napetostno – deformacijske analize v Abaqusu preračuna poškodbeni faktor, D . Torej, vnesli smo napetostno –

deformacijsko stanje traku v primeru, ko na trak deluje sila **0 N** ter, ko na trak deluje sila **6500 N**. Na podlagi teh dveh napetostno – deformacijskih slik program Femfat napelje sinusen potek napetosti med zgornjim in spodnjim napetostnim stanjem za vsako vozlišče modela ter na podlagi teh rezultatov za vsako vozlišče izračuna dinamični faktor, **R** , zapisan v enačbi 1, kjer je **N** število vozlišč numeričnega modela.

$$R = \frac{\sigma_{\min_i}}{\sigma_{\max_i}}; i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

Rezultat je prikazan na sliki 5, kjer je primerjan poškodbeni faktor v primeru, ko ni ohlapa med sornikom in pritrtilnim trakom ter v primeru, ko je ohlap med togim sornikom in trakom enak 0,5 mm. Opazimo lahko signifikantno razliko o relativni vrednosti poškodbenega faktorja med obema primeroma, saj se razlikuje za faktor 10^{13} . Torej imamo rezultat, ki nam pove, da v primeru ničnega ohlapa do poškodbe sploh ne pride, v primeru ohlapa 0,5 mm pa je izdelek zelo občutljiv na utrujenostno poškodbo.



Slika 5. Primerjava poškodbenega faktorja med sestavom brez ohlapa in sestavom z ohlapom 0,5 mm

Iz te analize smo lahko mirne vesti zaključili, da ima ohlap v sestavu velik vpliv na življenjsko dobo pritrtilnega traku rezervoarja goriva.

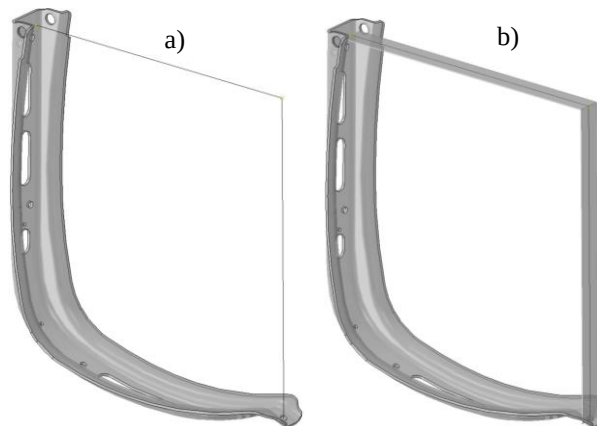
3 Določitev obremenitvenih in robnih pogojev pritrtilnega traku

Kupec se je na nas obrnil samo s problemom, medtem ko so bili vhodni podatki za določitev napetostnega stanja v pritrtilnem traku, kot so obremenitvena sila, ki deluje na pritrtilni trak, neznani. Znana je bila samo sila prednapetja pritrtilnega traku, ki je enaka **5000 N**. Zato je bilo v prvem koraku potrebno sploh določiti obremenitev pritrtilnega traku. Od kupca smo izvedeli, da je volumen tanka goriva enak 300 litrov in, da en tank goriva podpirata dva nosilca, posledično tudi dva pritrtilna trakova. Predpostavili smo, da sila dinamično obremenjuje nosilec in pritrtilni pas med mejama **F_{sp}** in **F_{zg}** , ki sta določeni v enačbah (2) in (3). Spodnja vrednost sile je enaka polovični vrednosti sile teže pri polnem rezervoarju, zgornja vrednost sile pa je enaka 6 – kratniku teže sile (npr. ko tovornjak naleti na hitrostno oviro na cesti).

$$F_{sp} = m \cdot g = 300 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1716,75 \text{ N} \quad (2)$$

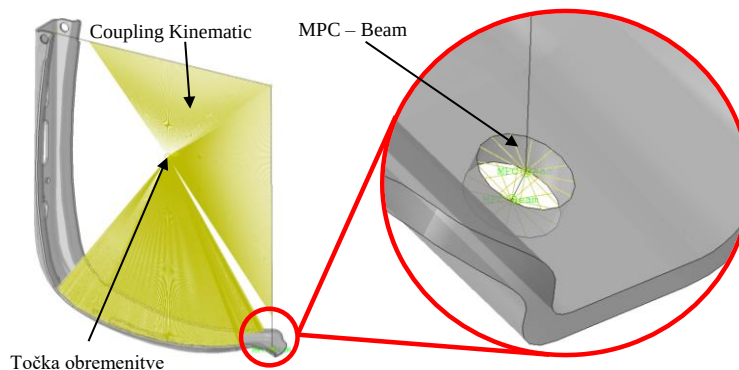
$$F_{zg} = 6 \cdot m \cdot g = 6 \cdot 300 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 10300,5 \text{ N} \quad (3)$$

Za določitev reakcijske sile v sorniku, smo pripravili model, prikazan na sliki 6a. Sestavljen je iz volumskega 3D nosilca ter pritrdilnega elementa, ki je modeliran ko 2D model nosilca s širino 50 mm in višino 2,5, kot je prikazano na sliki 6b.



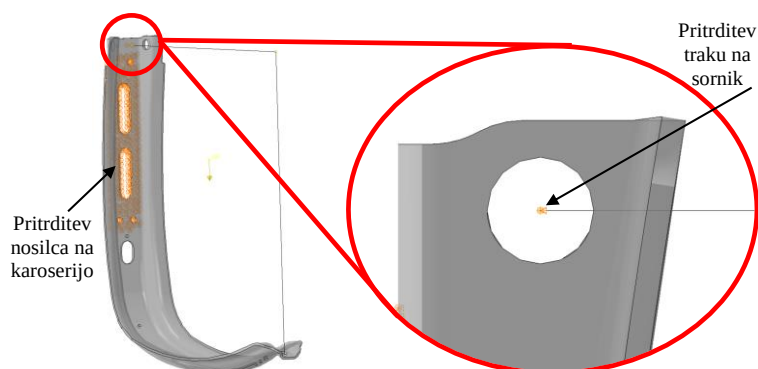
Slika 6. a) Prikaz modela, b) prikaz modela s profilom nosilca

Povezava med "L" nosilcem in pritrdilnim trakom je v realnosti narejena z vijačno zvezo, v modelu za določitev reakcijskih sil pa je ta povezava v program Abaqus opravljena s večtočkovno povezavo z modelom nosilca (MPC – Beam), kot je prikazano na sliki 7. Povezava med točko obremenitve s silo (v težišču rezervoarja goriva) in s kontaktnimi površinami med rezervoarjem goriva, nosilcem in pritrdilnim trakom pa je bila izvedena s togo večtočkovno povezavo (Coupling Kinematic).



Slika 7. Prikaz povezav med nosilcem, pritrdilnim trakom in točko obremenitve

V točki obremenitve, ki je prikazana na sliki 8, je bila aplicirana sila, določena po enačbah (2) in (3). Model pa je bil podprt na dveh mestih, kot je prikazano na sliki 8. Prvo mesto je območje, kjer je "L" nosilec pritrjen na karoserijo tovornega vozila, zato so tam bili omejeni pomiki vozlišč v vseh treh smereh. Drugo mesto pa je bilo podprto v točki, kjer je v realnosti sornik oz. sestav sornik – plastična puša – pritrdilni trak, kot je prikazano na sliki 8. V tej točki je bil omejen pomik v smeri pritrdilnega traku in aksialno v smeri sornika, tako, da smo lahko dobili reakcijsko silo v smeri pritrdilnega traku, ki nas zanima.



Slika 8. Pritrditev sestava v prostoru

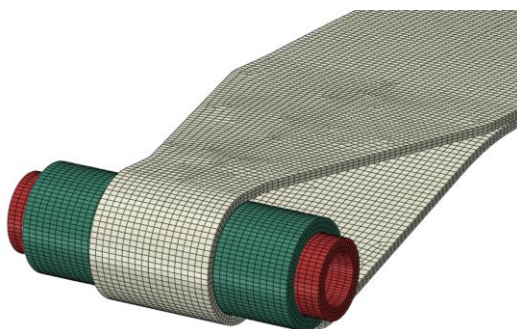
Rezultat te analize je prikazan v tabeli 1, kjer je prikazan reakcijska sila v smeri pritrdilnega traku v odvisnosti od obremenitve; prvič v primeru mirujočega tovornjaka in drugič v primeru naleta na hitrostno oviro, obakrat s silo prednapetja **5000 N**.

Tabela 1. Rezultat analize reakcijske sile v sorniku v smeri pritrdilnega traku

Obremenitveni primer	Akcijska sila v težišču rezervoarja goriva	Rekacijska sila v smeri pritrdilnega traku v sorniku
Mirujoč tovornjak	1716,75 N	5810 N
Nalet na hitrostno oviro (pospešek v vertikalni smeri 6g)	10300,5 N	9850 N

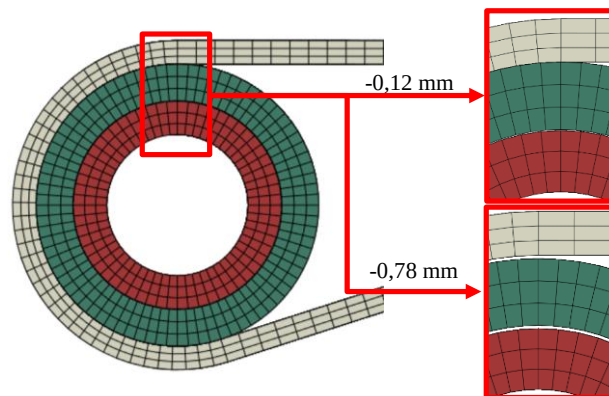
4 "State – of – Art" trenutnega dizajna

Glede na rezultat iz zgoraj opisanega poglavja o identifikaciji problema nas je v tem koraku zanimalo ali bomo podoben rezultat dobili tudi v primeru konkretnega sestava in obremenitvenih primerov. V ta namen smo pripravili model za analizo po metodi končnih elementov, ki je prikazan na sliki 9. Sestavljen je iz jeklenega pritrdilnega traku, originalne plastične puše in jeklenega sornika.



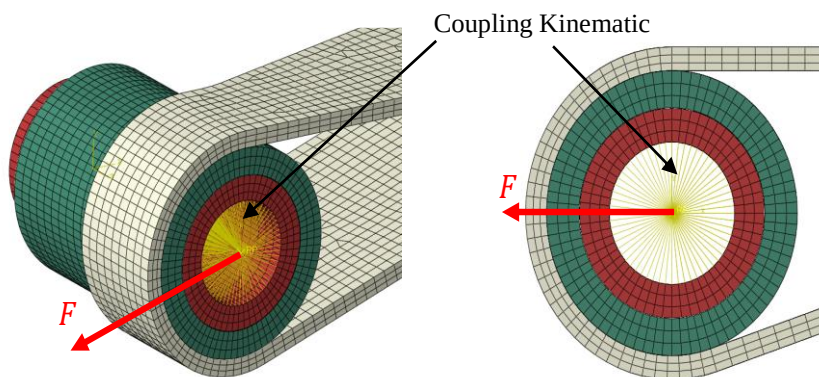
Slika 9. Realni sestav modela za analizo po MKE

Raziskali smo napetostno stanje in analizo utrujenostne poškodbe v dveh primerih; ko je ohlap v sestavu enak $-0,12$ mm, ter ko je ohlap v sestavu $-0,78$ mm, kot je prikazano na sliki 10.

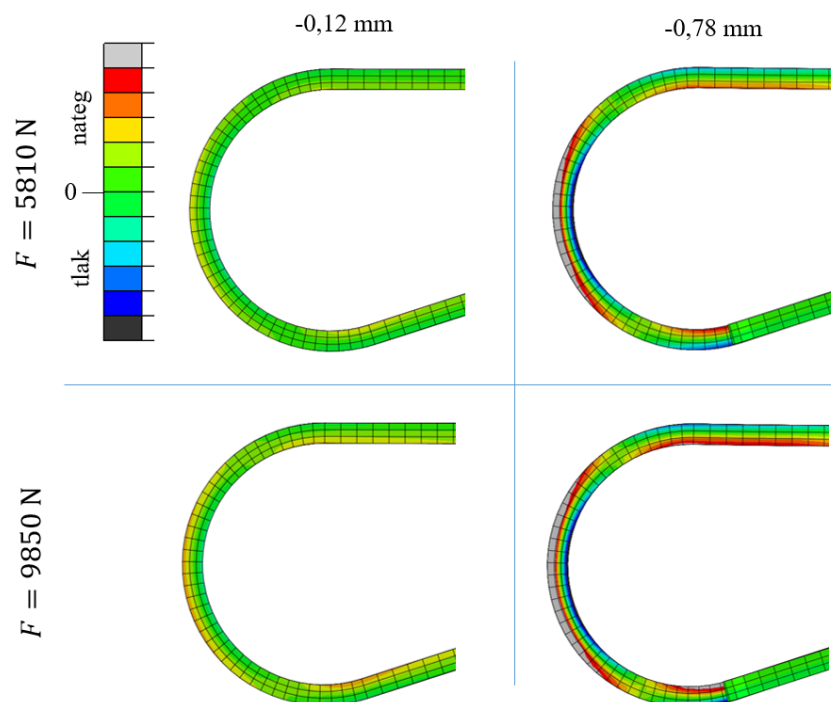


Slika 10. Prikaza ohlapov v sestavu modela po MKE

Model smo obremenili z obremenitvami, zapisanimi v tabeli 1. S silo smo obremenili sornik, ki je obremenitev apliciral preko vzpostavljenega kontakta med sornikom in plastično pušo ter plastično pušo in pritrdilnim trakom. Na sornik je bila aplicirana sila, ki je bila aplicirana v težišču sornika, točka apliciranja pa je bila s sornikom povezana preko točkovne povezave (Kinematic Coupling) z notranjim diametrom sornika, kot je prikazano na sliki 11, medtem ko je na sliki 12 prikazano napetostno stanje v zanki pritrdilnega traku pri nižji in večji obremenitvi (glede na tabelo 1) ter pri največjem in najmanjšem ohlapu v sestavu. V obeh primerih lahko opazimo upogibanje zanke, le da je pri ohlapu $-0,78$ mm upogibanje zelo očitno vidno iz napetostnega stanja.

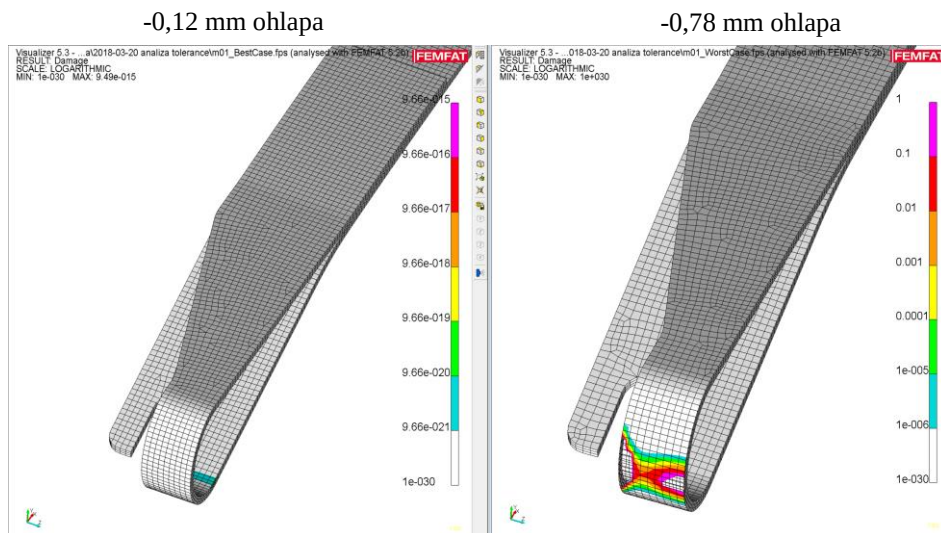


Slika 11. Prikaz obremenitve sestava in povezave točke apliciranja sile in notranjega diametra sornika



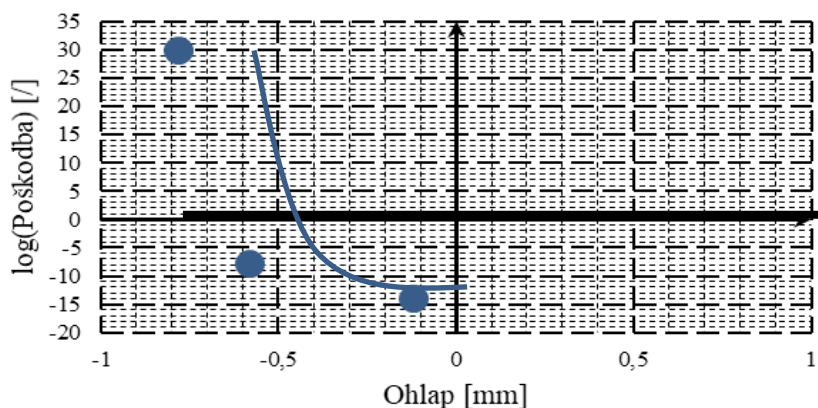
Slika 12. Napetostno stanje v zanki pritrdilnega traku pri trenutni definiciji izdelkov v sestavu

Rezultati analize življenjske dobe so prikazani na sliki 13. Opazimo lahko, da imamo v primeru ohlapa -0,12 mm poškodbo neznatno majhno, njena vrednost je ranga velikosti 10^{-14} . V primeru ohlapa velikosti -0,78 mm pa je vrednost poškodbe ranga 10^{30} , kar pomeni, da je v tem primeru kos v območju malocikličnega utrujanja. Tudi poškodba je identificirana na mestu, kjer se tudi v resnici pojavi.



Slika 13. Primerjava poškodbe v primeru ohlapa -0,12 mm in -0,78 mm

Opravili smo še analizo v primeru ohlapa -0,58 mm, vrednost poškodbe pa je v rangi velikosti 10^{-8} . Rezultat teh analiz je prikazan na sliki 14, ki prikazuje vrednost poškodbe trenutnega dizajna v odvisnosti od ohlapa v sestavu. Iz slike je razvidno, da je trenutni dizajn močno odvisen od velikega ohlapa. Trenutna definicija izdelkov v sestavu na eni strani zdrži zelo dolgo življenjsko dobo, na drugi strani pa ima lahko zelo kratko življenjsko dobo, kar najbrž tudi je primer v trenutnem dizajnu. Zelena črta prikazuje zgornjo mejo vrednosti poškodbe, v katerem lahko po dosedanjih izkušnjah mirno rečemo, da bo izdelek preživel predvideno življenjsko dobo. Okno tega območja je vrednost poškodbe od 0 pa do 0,1.

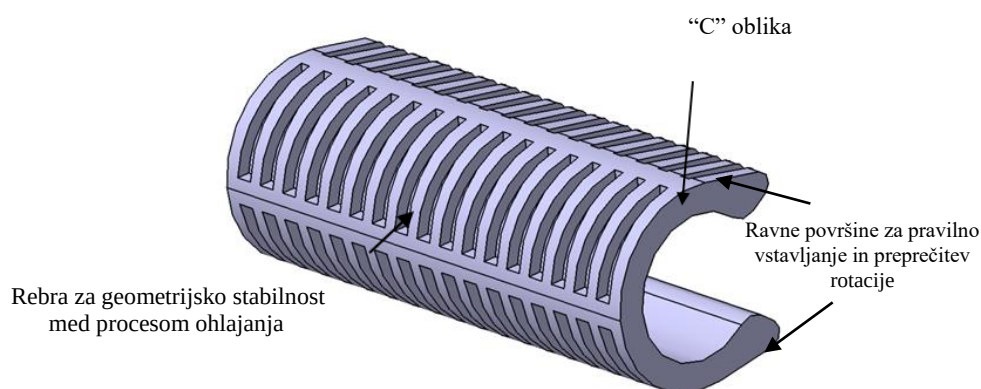


Slika 14. Odvisnost vrednosti poškodbe od ujema v sestavu trenutnega dizajna

5 Predlagana rešitev

Medtem, ko sta jeklen sornik in pritrdilni trak uveljavljena v seriji in bi sprememba definicije enega od teh izdelkov močno vplivala na ekonomičnost rešitve, smo prišli na idejo, da bi spremenili definicijo vmesne plastične puše. Naša ideja je bila, da bi dimenzijsko in tolerančno območje plastične puše definirali tako, da bi v vsakem primeru, neodvisno od realnih dimenzij pritrdilnega traku in sornika (ki morajo biti znotraj toleranc, ki so definirane na risbah

posameznega kosa), imeli tesen ujem v sestavu, v najslabšem primeru bi si lahko privoščili le majhen ohlap. Določene tolerance so v realnih izdelkih potrebne, saj bi rešitev samo ožanja trenutnih toleranc zadevo močno podražila. Zaradi tega smo mi definirali tolerance puše, ki v sestavu vnesejo ujem od $+0,58$ mm do $-0,08$ mm ohlapa, torej je razpon ujemov enak trenutnemu razponu. Obenem smo poskrbeli tudi za to, da sila vtiskovanja jeklenega sornika v sestav ne bi bila prevelika s tem, da puša ne bi bila polna, ampak bi imela obliko črke "C", kar poveča njeno fleksibilnost in preprečuje njeno pokanje in s tem se izognemo visokim napetostim v plastični puši, saj se puša ob vstavitvi sornika deformira in v primeru ujema v sestavu tudi prednapne pritrdilni trak. Da se puša ne bi po nesreči zavrtela ali pa da ne bi bila nepravilno vstavljena v sestav, poskrbita za to dva ravna odseka. Po diskusiji z izdelovalcem plastičnih puš smo prišli tudi do zaključka, da bi radialna rebra poskrbela za geometrijsko stabilnost med procesom ohlajanja izdelka v orodju. Predlagan dizajn in opisane karakteristike so prikazane na sliki 15.

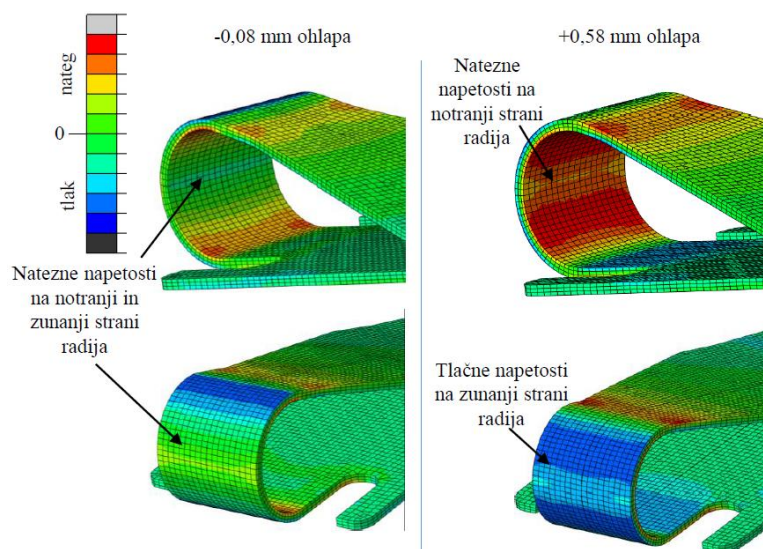


Slika 15. Prikaz dizajna in karakteristik

Z našim predlogom dizajna vmesne puše je v najslabšem primeru za utrujenostno poškodbo je v sestavu $-0,08$ mm ohlapa, v najboljšem primeru pa $+0,58$ tesnega ujema.

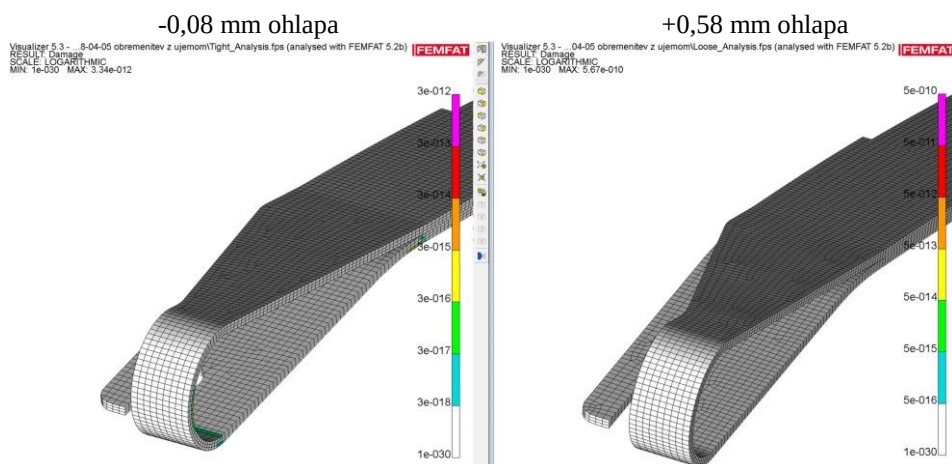
6 Rezultati numeričnih analiz predlaganega modela

Naš predlagan dizajn smo vnesli v model za analizo po metodi končnih elementov, kot je opisano v poglavju 4. Slika 16 prikazuje napetostno stanje pritrdilnega traku v primeru, ko je ohlap v sestavu enak $-0,08$ mm in v primeru, ko je sestav v tesnem ujemu vrednosti $+0,58$ mm.



Slika 16. Slika glavnih napetosti v zanki

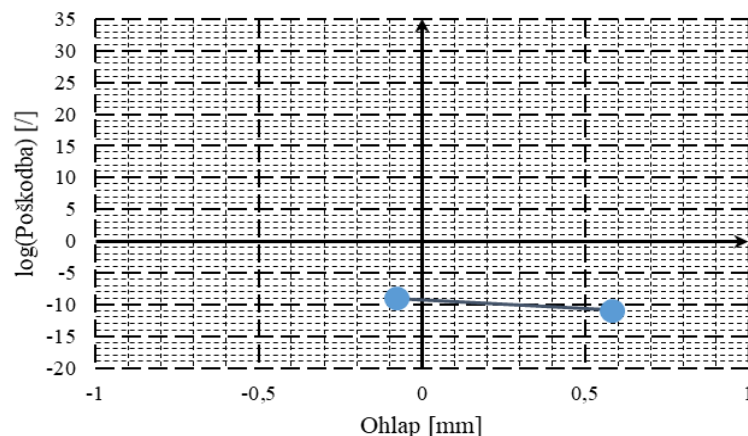
Opazimo lahko, da se v primeru ohlapa -0,08 mm ne pojavi upogibanje v coni zanke ampak natezno napetostno stanje. V primeru tesnega ujema +0,58 pa opazimo upogibanje v nasprotno smer kot v primeru trenutnega dizajna, ki pa je posledica nadmere ujema. Spreminjanje napetosti zaradi dinamičnega obremenjevanja je v primerjavi z vnešenimi upogibnimi napetostmi dovolj majhna, da se s tem dizajnom sestava izognemo utrujenostni poškodbi (smo blizu dinamičnega razmerja $R=1$), kot je prikazano na sliki 17, ki prikazuje območja in vrednosti poškodbe pritrdilnega traku.



Slika 17. Prikaz poškodb pritrdilnega traku s predlaganim dizajnom plastične puše

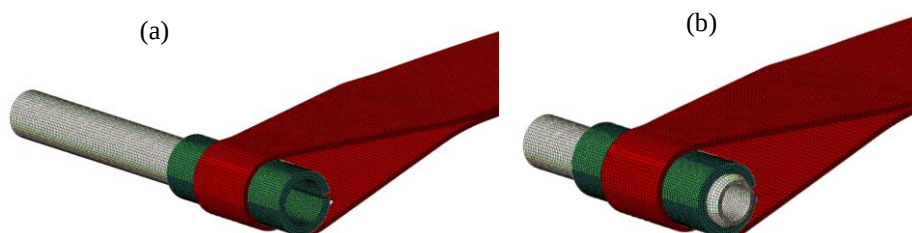
Na sliki 17 opazimo, da se povsem izognemo poškodbi v območju cone, tudi maksimalne vrednosti poškodbe so v rangi pod 10^{-10} , kar pomeni, da je sedaj pritrdilni trak zelo robusten in smo v vsakem primeru z vrednostjo poškodbe na varni strani.

Slika 18 prikazuje odvisnost velikosti poškodbe v odvisnosti od ohlapa v sestavu s predlaganim dizajnom plastične puše. Opazimo lahko, da je v območju ohlapa v sestavu vrednosti poškodbe zelo blizu, oz. praktično 0. Lahko zaključimo, da je predlagan dizajn zelo robustna rešitev, ki je neodvisna od material in debeline pritrdilnega traku.

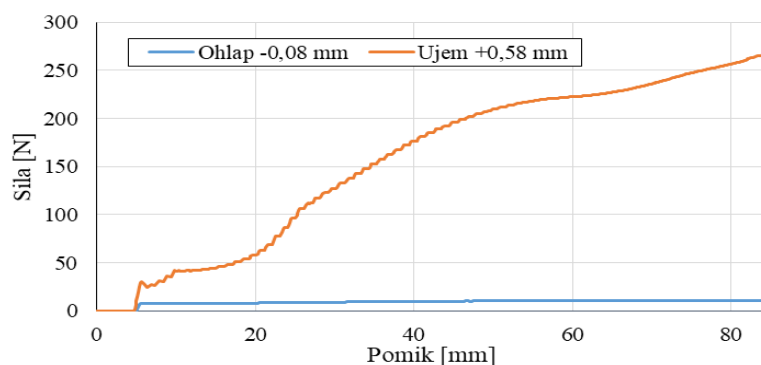


Slika 18. Velikosti poškodbe v odvisnosti od ohlapa v sestavu ob predlaganem dizajnu plastične puše

Ker morajo biti rešitve tudi izvedljive, smo opravili tudi numerično analizo potiska sornika v sestav plastične puše in pritrdilnega traku, kot je prikazano na sliki 19. S to analizo smo želeli oceniti silo vtiskovanja pri montaži pritrdilnega traku na karoserijo.



Slika 19. a) Sornik preden je vtisnjen v plastično pušo, b) sornik vtisnjen v plastično pušo



Slika 20. Sila potiska v sornika v sestav

Slika 20 prikazuje silo v odvisnosti od poti vtiska sornika v sestav za primer, ko je ohlap v sestavu enak -0,08 mm in ko je ujem enak +0,58 mm. Maksimalna vrednost sile vtiska je pri ohlapu enaka 11 N, pri ujemu pa 260 N.

7 Zaključki in smernice za nadaljnje delo

V prispevku je bil predstavljen inovativen dizajn plastične puše, ki eliminira ohlap v sestavu sornika in pritrdilnega traku rezervoarja goriva tovornega vozila. Na podlagi preliminarne analize je bilo ugotovljeno, da ima ohlap v sestavu velik vpliv na utrujenostno poškodbo pritrdilnega traku, zato smo analizirali in določili obremenitve, ki jih pritrdilni trak prestaja tekom življenjske dobe. Ugotovili smo, da v trenutnem primeru definicije izdelkov prihaja do pokanja pritrdilnega traku prav zaradi ohlapa v sestavu. Na podlagi teh analiz smo definirali dizajn plastične puše, ki eliminira ohlap v sestavu in praktično ne pozroča poškodbe na pritrdilnem traku. Tako smo se izognili dražjim ali netrajnostnim rešitvam, kot sta sprememba materiala pritrdilnega traku ali povečanje debeline pritrdilnega traku.

Po analizi in znanem sržu problema je v naši ekipi stekla debata, kaj bi sprememba materiala ali sprememba debeline pritrdilnega traku v končni fazi prinesla. Ali bi se res izognili nadaljnemu pokanju traku? Boljši trdnostni razred materiala pomeni tudi večji raztros mehanskih karakteristik, med katerimi sta tudi meja tečenja in funkcija plastičnega utrjevanja. Ti dve mehanski karakteristiki ključno vplivata na elastično izravnavanje, ki posledično vpliva na variacijo dimenzije radija zanke pritrdilnega traku. Material z višjo mejo tečenja ima tudi večje elastično izravnavanje, kar pomeni, da bi težje zagotavljali ponovljivost dimenzije tudi zaradi same deviacije vrednosti meje tečenja. Debelejši material pa ima manjše elastično izravnavanje, relativno gledano glede na tanjši material, a bi vnesli višje napetosti v operaciji varjenja pritrdilnega traku, ki sledi operaciji krivljenja zanke pritrdilnega traku. Poleg tega pa smo se že v začetni fazi skušali izogniti večanju mase izdelka, kar bi bila netrajnostna rešitev, ki ne sledi načelom lahke gradnje v avtomobilski industriji. Zaključili smo tudi, da bi debelina in material pritrdilnega traku imela zelo majhen vpliv na pokanje pritrdilnega traku in ne bi predstavljala robustne rešitve.

Velja omeniti, da je bila naloga opravljena na podlagi lastnih predpostavk in izkušenj. Zato smo prišli še do nekaj idej kako bi izboljšali natančnost analize:

- Na podlagi testov bi lahko določili realne sile, ki delujejo preko sornika in plastične puše na pritrdilni trak tako, da bi namestili uporovne merilne lističe na pritrdilni trak, kjer je v njem čisto natezno stanje. Z znanimi napetostmi bi lahko določili silo iz enačbe $F = \sigma \cdot A$.
- S simulacijo preoblikovanja bi lahko napovedali raztros tolerance radija krivine pritrdilnega traku in s tem bi lahko spremenili območje ujema v sestavu ter tako zmanjšali silo vtiskovanja sornika v sestav, kar je tudi eden izmed problemov, ki jih je izpostavil kupec.
- V literaturi in po dosedanjih izkušnjah je zaslediti, da zaostale napetosti oz. plastične deformacije pozitivno vplivajo na utrujenostno poškodbo. Z analizo v program Femfat bi lahko tako bolj natančno ocenili poškodbo.

Predstavljeno delo prikazuje tudi dobro prakso interdisciplinarnega sodelovanja med različnimi podjetji, ki lahko privedejo do enostavne, hitre in ekonomsko upravičene rešitve, ki so ponavadi skrite očem.

References

- [1] ABAQUS/CAE. (2017). *Program za analize obremenitev po metodi končnih elementov (FEM)*. Dassault Systemes, Simulia Corporation.
- [2] Dowling, N. (1993). *Mechanical Behaviour of Materials: Engineering Methods of Deformation, Fracture and Fatigue*. New Jersey: Prentice – Hall International Inc.
- [3] FEMFAT 5.2. (n.d.). *Program za analizo dinamičnih obremenitev po metodi končnih elementov (FEM)*. MAGNA, MAGNA Powertrain.
- [4] TPV d. o. o. (n.d.). *Lastni izsledki razvoja in raziskav ter druga dokumentacija*. Neobjavljeno interno gradivo.

Določitev frezala za frezanje jekla vrste 1.2343

Determination of the milling cutter for steel type 1.2343

Marica PRIJANOVIČ TONKOVIČ¹, Janez JAMNIK²

¹ Fakulteta za industrijski inženiring Novo mesto
Šegova ulica 112, 8000 Novo mesto, Slovenija
E-naslov: marica.prijanovic-tonkovic@fini-unm.si

² Polycom Škofja Loka d.o.o.,
Dobje 10, Poljane nad Škofjo Loko, Slovenija
E-naslov: janez.jamnik@polycom.si

Povzetek. Na obstojnost orodij za odrezovanje vplivajo različni faktorji, med katerimi ima velik vpliv material, ki ga obdelujemo. V članku smo raziskovali frezanje orodnega jekla z oznako 1.2343. Frezalo se je med obdelavo prehitro obrabljalo in je prihajalo do dodatnih stroškov ter neskladnosti s terminskim planom. Glede na to smo izvedli preizkuse z različnima frezaloma in sicer s frezalom 1 in s frezalom 2. V proizvodnem procesu se običajno uporablja frezalo 1. Da bi ugotovili obrabno obstojnost frezala, smo na istem materialu izvedli preizkuse z običajnim in alternativnim frezalom.

Za preiskavo smo pripravili testni vzorec, izdelali NC-kodo in ga nato obdelali na frezalnemu stroju. Rezultati preiskav so pokazali, da je frezalo 2 s pozitivnim cepilnim kotom obstojnejše od obstoječega frezala 1, ki ima negativni cepilni kot. Ugotovili smo tudi, da se je čas frezanja podaljšal. Strošek obdelave sestavnega dela pa se je kljub daljšemu času frezanja zmanjšal zaradi stabilnejšega procesa.

Ključne besede: frezalo, frezanje, orodno jeklo, obstojnost, kakovost

Razvrstitev: Znanstveni članek

Abstract. Various factors influence the durability of cutting tools. Among these, a material we process has great influence. In the article, we researched milling of tool steel of the 1.2343 type. The milling cutter was wearing out during the machining process too quickly which caused additional costs and discrepancy with the time schedule. We took this into consideration when we carried out the tests with two different milling cutters, milling cutter 1 and milling cutter 2. The production process usually uses milling cutter 1. In order to determine the wear stability of the milling cutter, we carried out tests on the same material with a conventional and alternative milling cutter.

A test sample was prepared for the research along with the NC code and then it was machined on the milling machine. The results of these tests showed that milling cutter 2 with positive rake angle was more stable than the milling cutter 1 with negative rake angle. Also the milling time was longer. The costs associated with the machining of the component decreased despite prolonged duration of milling because the process was more stable.

Keywords: milling cutter, milling, tool steel, stability, quality

Article Classification: Scientific Paper

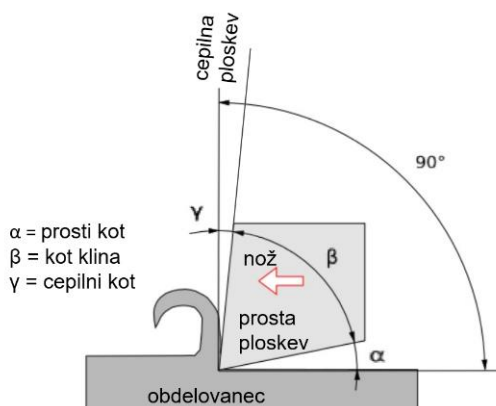
1 Uvod

Izdelke iz polimerov se pogosto izdeluje z brizganjem, kjer se polimerno talino dovaja v kalupno votlino – orodje, ki ima obliko izdelka. Orodja za brizganje polimerov se oblikujejo v orodjarni z različnimi postopki odrezovanja. Eden izmed teh postopkov je frezanje. Za frezanje

se uporabljajo frezala in rezalne ploščice različnih geometrij, ki so narejena iz materialov, kot so orodna jekla, keramika, karbidne trdine, diamant [1–3].

Med frezanjem se odvzema material obdelovanca z določeno rezalno in podajalno hitrostjo ter globino reza. Frezalo ima obliko klina. Med odrezovanjem se pojavi trenje, ki povzroča visoke temperature na robu rezila, kjer se odvzema material [4]. Zato lahko pride do poškodbe frezala. Obraba frezala je odvisna od mehanskih in toplotnih obremenitev, ki jim je frezalo izpostavljeno. Obdelovanec se med odrezovanjem preoblikuje, pri tem pa nastaja toplota, ki segreva material, odrezke in orodje. Na nastalo toploto lahko vplivamo z rezalno in podajalno hitrostjo ter rezalno geometrijo orodja. Vsekakor moramo poznati tudi lastnosti obdelovalnega materiala, da lahko določimo najbolj optimalne parametre in izberemo ustrezno geometrijo frezala [5].

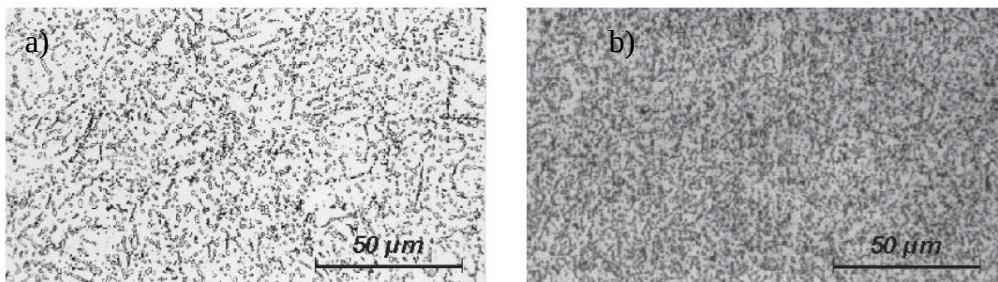
Na Sliki 1 je prikazana osnovna oblika orodij za odrezovanje, kjer je vidna cepilna in prosta ploskev. Pri frezalih je presečišče obeh ploskev rezalni rob. Geometrija rezalnega roba vpliva na njegovo trdnost in obstojnost. Obdelava toplotno obdelanega jekla 1.2343 s trdoto med 48 in 56 HRC poteka s frezali, ki imajo lahko rahlo pozitivno ali negativno geometrijo cepilnega kota γ . Pri takih frezalih je kot klina β večji, zato je rezalni rob trdnjši, zato se zmanjšajo poškodbe rezalnega roba in poveča obstojnost frezala. Frezala s pozitivno geometrijo rezalnega roba so primernejša za frezanje toplotno neobdelanih jekel in toplotno obdelanih jekel s povečano žilavostjo. Pri tem je podajanje manjše.



Slika 1. Prikaz osnovne oblike orodij za odrezavanje [6]

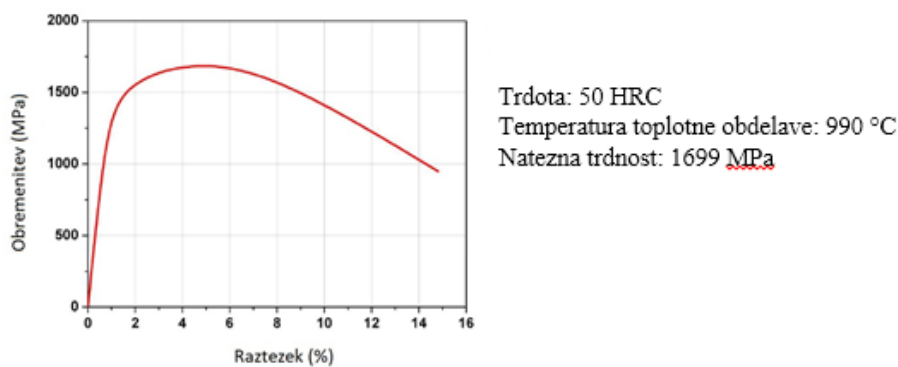
Veliko vlogo pri obrabi frezala imajo zaščitne prevleke na frezalu. Z njimi zaščitimo frezala pred obrabo, saj so trde, odporne na oksidacijo in so visoko temperaturno odporne. Tako se zagotovi večjo obstojnost frezala [7]. Prevleke se nanašajo na površino frezal in predstavljajo tanko plast keramičnih materialov, debeline nekaj μm . Narejene so iz različnih materialov [8]. Razlikujejo se po kemijski sestavi, barvi in namenu uporabe. Barva prevleke je pomembna zaradi lažjega ločevanja frezal in za lažjo oceno obrabljenosti frezala. V orodjarstvu se pogosto za zaščito površin frezal uporabljajo TiAlN- in TiN-prevleke, ki se nanašajo po CVD in PVD postopku [9].

Za izdelavo orodij za brizganje polimerov se uporabljajo orodna jekla, ki so trda in odporna proti obrabi. Delež ogljika, ki ga vsebujejo je med 0,5 % in 2 %. Poleg tega vsebujejo ta jekla še legirane elemente kot so krom, volfram, molibden in vanadij [10]. Med jekla za izdelavo orodij za brizganje polimerov sodi jeklo z oznako 1.2343 proizvajalca Böhler, ki se po svoji mikrostrukturi nekoliko razlikuje od mikrostrukture istega tipa jekla drugih proizvajalcev. Mikrostruktura omenjenega jekla je finostrnata (Slika 2). Jeklo je dokaj izotropno in ima dobro žilavost pri povišani trdoti [11].



Slika 2. Primerjava mikrostrukture: a) standardnega jekla 1.2343, b) jekla W400 VMR [11]

Mikrostruktura vpliva tudi na mehanske lastnosti. Natezna trdnost jekla je bila 1699 MPa, trdota pa je znašala od 48 do 51 HRC. Na Sliki 1.3 je grafično prikazana natezna trdnost za jeklo 1.2343.



Slika 3. Natezna trdnost za jeklo 12343 proizvajalca Böhler pri sobni temperaturi [12]

Ravno zaradi drugačnih mehanskih in mikrostrukturnih lastnosti jekla 1.2343 proizvajalca Böhler, se je frezalo obrabilo hitreje kot pri frezanju jekel drugih proizvajalcev. To je predstavljalo težavo pri nadaljnji obdelavi. Zato je bilo izhodišče raziskave optimizacija frezanja omenjenega jekla, saj se je uporabilo več frezal od predvidenih. Strošek frezal pri procesu frezanja se je povečal, zaradi dodatnega frezanja in odpravljanja težav se je povečal celoten čas frezanja, ta je bil daljši od planiranega. S tem se je terminski plan prestavil, učinkovitost proizvodnje se je zmanjšala, saj je bilo obdelanih manj izdelkov, povečali so se stroški izdelave sestavnega dela. Cilj preiskave je ugotoviti, katero frezalo je najbolj primerno za obdelavo jekla 1.2343 proizvajalca Böhler. Na osnovi analiz in izkušenj smo za preiskavo pripravili dve različni frezali, ki sta se med seboj razlikovali v geometriji cepilnega kota γ .

2 Preizkus

Za ugotavljanje primerne frezala za obdelavo drobno zrnatega jekla 1.2343 smo izvedli testiranje z dvema različnima frezaloma. Frezalo 1 je bilo obstoječe frezalo, s katerim nismo dosegli željenih rezultatov. Novo frezalo 2 smo izbrali glede na podatke o lastnostih jekla in ustreznih frezalih za frezanje jekel [11, 4]. Frezalo 2 ima pozitivno geometrijo. Izvedba preizkusov je potekala v treh fazah. V prvi fazi smo pripravili testni vzorec, ki je zajemal aktivnosti od izdelave modela do brušenja toplotno obdelanega vzorca na končne mere. Za testni vzorec smo pripravili jeklo 1.2343 proizvajalca Böhler, kaljeno na trdoto od 52 do 54 HRC. V drugi fazi smo izdelali program za obdelavo na frezalnem stroju. V zadnji fazi pa smo obdelali testni vzorec na frezalnem stroju. Celoten potek testiranja na vzorcu je prikazan v Tabeli 1.

Tabela 1. Potek testiranja na vzorcu

Vrstni red delovne operacije	
Priprava testnega vzorca	Izdelava modela Dobava jekla Toplotna obdelava Brušenje na končne mere
Izdelava programa	Uvoz in priprava modela Izdelava orodnih poti Pretvorba v NC-kodo Izdelava in ureditev programskega lista
Obdelava testnega vzorca	Priprava testnega vzorca in frezal Ureditev NC-kode Frezanje testnega vzorca

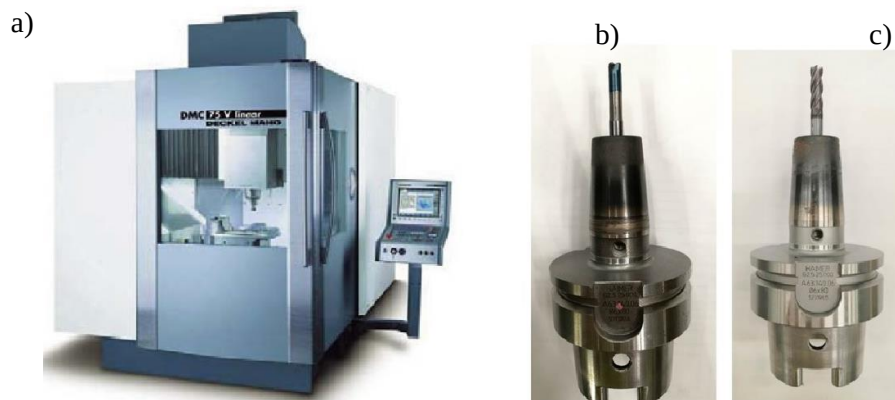
Za izdelavo NC-kode smo uporabili NCG CAM programski paket. Uporabili smo obdelavo za praznjenje žepov, ki se imenuje Area Clearance Passes, s katero program izdela orodne poti. Z uporabo obdelave za praznjenje žepov smo zagotovili stalen oprijem in rez frezala, s tem pa zmanjšali prekinitev med rezi in število vhodov v material. Orodne poti smo pretvorili s postprocesorjem v NC-kodo. Izdelali smo tudi programski list, ki je bil namenjen operaterju, za pripravo frezal in ureditvi NC-kode na stroju.

Za vpetje testnih frezal smo imeli na razpolago več različnih držal, ki se med sabo razlikujejo po debelini in višini stebila. Vpeli smo ju v togo nakrčno držalo z debelejšim stebлом tipa HSK53 primernim za visokohitrostno frezanje [12]. Tako je bil vpliv vpetja pri obeh preizkušancih enak in sta bila podvržena enakim vplivom vibracij.

Frezanje smo izvedli na frezalnem stroju proizvajalca DMC z oznako 75V linear. Testni vzorec smo vpeli na magnetno mizo. S tem smo zagotovili dovolj togo vpetje med frezanjem. Podatki za uporabljeni frezali prekriti s TiAlN-prevleko so v Tabeli 2.2. Po vpetju frezala smo izmerili dolžino frezala skupaj z držalom, ki je znašala za frezalo 1 90,55 mm, za frezalo 2 pa 90,32 mm. Ta podatek smo prenesli v krmilnik stroja. Podatke o programu, frezalu in orientaciji testnega vzorca smo dobili iz programskega lista. Program smo uredili in stroj zagnali. Frezanje je potekalo najprej s starim frezalom označenim kot frezalo 1 in nato še z novim frezalom označenim kot frezalo 2. Na Sliki 1 je prikazan frezalni stroj, na katerem se je izvajalo testiranje in frezali 1 ter 2, ki sta vpeta v nakrčno držalo.

Tabela 2. Podatki za frezalo 1 in 2

Parameter	Oznaka	Frezalo 1	Frezalo 2
Število vrtljajev frezala	n	6000 min ⁻¹	6000 min ⁻¹
Podajalna hitrost frezala	v_f	6000 mm/min	3000 mm/min
Prekrivanje	a_e	2,1 mm	2,1 mm
Globina reza	a_p	0,1 mm	0,1 mm
Premier	D	6,00 mm	6,00 mm
Radij	r	1 mm	1 mm
Št. Zob	z	4	4



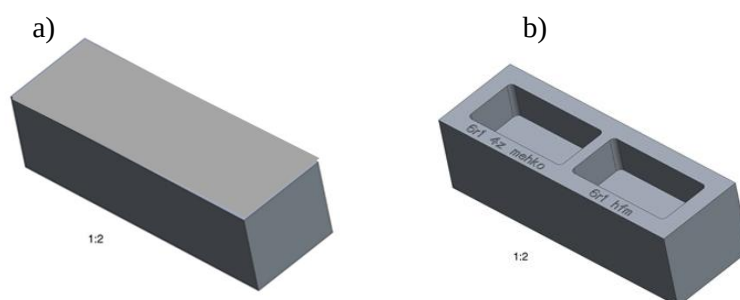
Slika 4. a) Stroj za frezanje DMC 75V Linear, vpetje b) frezala 1 in c) frezala 2 [12]

3 Rezultati

V preiskavi smo ugotavljali obstojnost frezala pri frezanju preizkusnega vzorca na orodnem jeklu 1.2343 proizvajalca Böhler (Slika 3.1). Izračunali smo volumen obdelovalne kotanje. Pri tem smo upoštevali tudi vogalne radije. Pri izračunu smo izhajali iz volumna kvadra ter odšteli vogalne radije, ki se nahajajo v kotanji. Tako smo dobili izračunani volumen kotanje (Tabela 3). Odvzeti volumen jekla je za takšno velikost frezala in vrsto obdelave majhen, iz tega lahko sklepamo, da vzrok za obrabo frezala ni v količini odvzetega volumna.

Tabela 3. Izračun volumna kotanje

Vhodni podatki	Dolžina	d	95 mm
	Širina	š	45 mm
	Višina	v	30 mm
	Vogalni radij	r	4 mm
Izračun			
Volumen kotanje	$V_{kotanje} = d \cdot š \cdot v - \left(\frac{r^2}{2} - \left(\frac{\pi \cdot r^2}{4} - \frac{r^2}{2} \right) \right) = 95 \cdot 45 \cdot 30 - \left(\frac{4^2}{2} - \left(\frac{\pi \cdot 4^2}{4} - \frac{4^2}{2} \right) \right) = 0,128 \text{ dm}^3$		



Slika 5. 3D shema testnega vzorca: a) pred in b) po obdelavi

Celoten čas obdelave testnega vzorca na frezalnem stroju je seštevek posameznih faz obdelave. To je časa priprave: testnega vzorca, frezala, stroja in frezanja s posameznim frezalom (Tabela 4). Čas frezanja s frezalom 2 je daljši zaradi manjše podajalne hitrosti, kot pri frezalu 1.

S pomočjo podajalne hitrosti (v_f je 6 m/min) smo izračunali dolžino frezanja, ki je znašala 582 m pri frezalu 1 in frezalu 2.

Tabela 4. Časi obdelave testnega vzorca

Čas priprave testnega vzorca	12 min
Čas priprave frezala	16 min
Čas priprave stroja	2 min
Čas frezanja s frezalom 1	1 h 37 min
Čas frezanja s frezalom 2	3 h 14 min

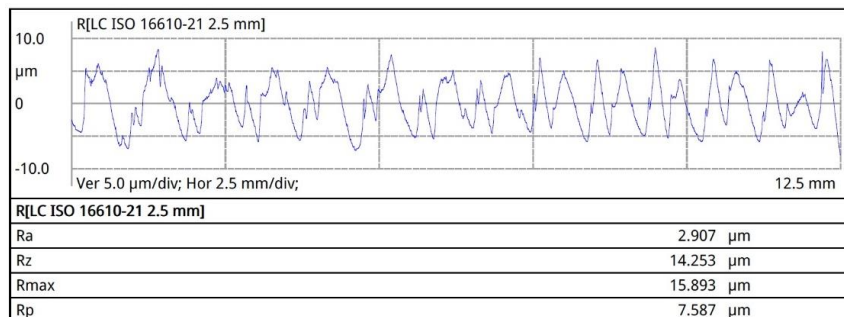
Hrapavost površine smo izračunali iz podatkov o radiju frezala na čelnem delu frezala in podajanju na zob. Dobljen rezultat smo podali kot srednje odstopanje profila R_a . Hrapavost površine smo izračunali s pomočjo formule, ki smo jo pridobili v interni dokumentaciji podjetja Polycom. Podatek o hrapavosti površine je teoretični. Vrednost, ki smo jo izračunali, spada med vrednosti, ki so značilne za fino frezanje kar pomeni, da v primeru prostih tolerančnih mer, ni potrebno fino frezati. Sprejemljiva hrapavost pri grobem frezanju je tudi do 50 μm . Izračuna za oba frezala sta prikazana v Tabeli 5.

Tabela 5. Izračun R_a za frezalo 1 in 2

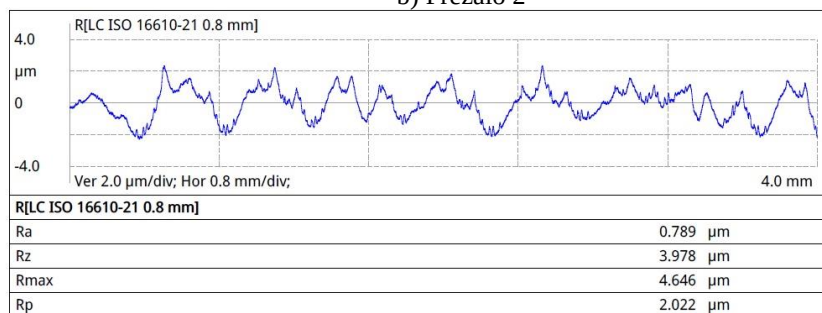
Frezalo 1			
Vhodni podatki	radij frezala	r	1 mm
	podajanje na zob	f_z	0,25 mm
Izračun			
Hrapavost površine	$R_a = \frac{f_z^2}{32 \cdot r} = \frac{0,25^2}{32 \cdot 1}$	R_a	1,95 μm
Frezalo 2			
Vhodni podatki	radij frezala	r	1 mm
	podajanje na zob	f_z	0,125 mm
Izračun			
Hrapavost površine	$R_a = \frac{f_z^2}{32 \cdot r} = \frac{0,125^2}{32 \cdot 1}$	R_a	0,49 μm

Srednjo vrednost hrapavosti R_a smo po obdelavi tudi izmerili. Vrednosti odstopajo navzgor od izračuna, kar je posledica vibracij med frezanjem, obrabljenostjo frezala in tolerančnega območja mer na geometriji frezala. Vrednosti hrapavosti so prikazane na sliki 6.

a) Frezalo 1



b) Frezalo 2



Slika 6. Izmerjena vrednost hrapavosti: a) frezalo 1 b) frezalo 2

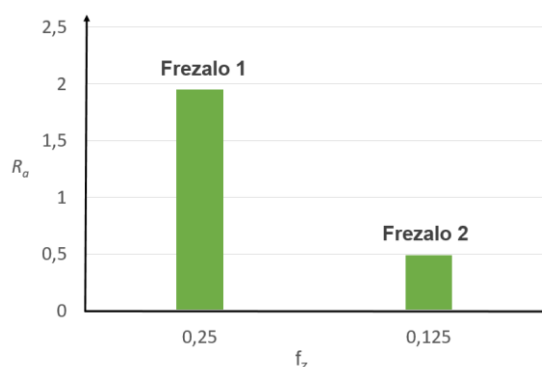
Po končanem frezanju je obraba frezala 1 večja od frezala 2. Obrabljenost frezal smo ocenjevali vizualno. Ocenili smo po lestvici od 1 do 5, pri čemer 1 pomeni, da frezalo ni obrabljeno, 5 pa da je močno obrabljeno. Lestvica je prikazana v Tabeli 3.4. Frezalo 1 smo ocenili, da je močno obrabljeno, saj je rezalni rob okrušen v celoti in ni več primeren za frezanje. Frezalo 2 pa je kljub dvakrat daljšemu času frezanja manj obrabljeno. Ocenili smo, da je malo obrabljeno, ker je imel rezalni rob manjšo poškodbo – prevleka na rezalnem robu je bila za odtenek svetlejša od ostale prevleke.

Tabela 6. Lestvica za oceno obrabljenosti frezala

Ocenjevalna lestvica		Frezalo 1	Frezalo 2	Opomba
Opis ocenjevanja	Vrednost			
Močnejša obrabljenost	5	x		Ni primerno za frezanje, rezalni rob je okrušen delno ali v celoti.
Večja obrabljenost	4			Na rezalnem robu ni prevleke, rezalni rob je okrušen na več mestih.
Srednja obrabljenost	3			Rezalni rob je siv – barvni odtenek se razlikuje od ostale prevleke. Na nekaterih mestih je rezalni rob delno okrušen, obraba je vidna.
Majhna obrabljenost	2		x	Rezalni rob je svetlejši od ostale prevleke, rezalni rob ima lahko manjšo poškodbo, obraba se težje opazi.
Ni obrabljenosti	1			Novo frezalo, malo rabljeno, ni sledi obrabe.

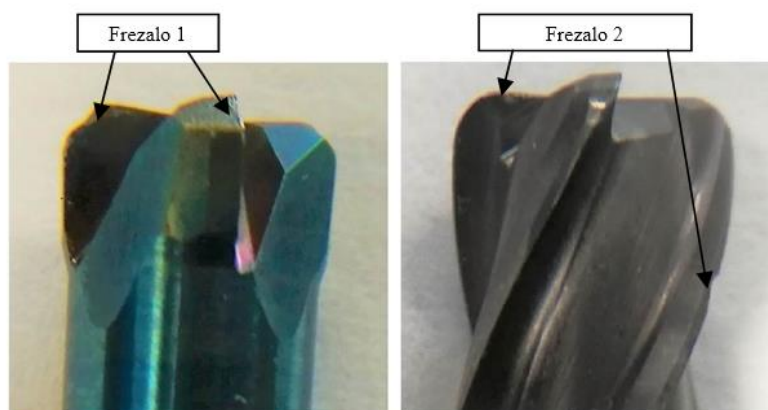
4 Diskusija

V raziskavi smo preiskovali grobo frezanje jekla 1.2343 proizvajalca Böhler. Ker se je frezalo med obdelavo obrabilo hitreje kot pri frezanju jekel enake vrste drugih proizvajalcev, smo izdelali preizkusne vzorce, na katerih smo izvedli frezanje. Na osnovi analiz in priporočil proizvajalcev orodij smo za preiskavo pripravili dve različni frezali, ki sta se med seboj razlikovali v geometriji cepilnega kota γ . Tako je imelo frezalo 1 negativni in frezalo 2 pa pozitivni cepilni kot. Zaradi različnih cepilnih kotov smo med obdelavo nastavili tudi različne obdelovalne parametre. Po končanem frezanju smo na preizkušancih izračunali in izmerili še hrapavost, ki je bila manjša v primeru uporabe frezala 2 (Slika 7).



Slika 7. Teoretične vrednosti R_a za frezalo pri različnih podajanjih na zob [12]

Na Sliki 8 je vidna obraba frezala po končanem frezanju, in sicer je obraba frezala 1 večja od obrabe frezala 2, kljub temu, da se je čas frezanja pri frezalu 2 podaljšal za 97 min.



Slika 8. Frezalo 1 in frezalo 2 po končanem frezanju [12]

Pri frezanju testnega vzorca ni prišlo do loma frezala 1, tako kot se nam je to običajno dogajalo v proizvodnem procesu. Glede na probleme, ki smo jih imeli pri grobem frezanju, smo pričakovali, da bo na testnem vzorcu obraba frezala 1 hitrejša, kot se je potem izkazalo. Možni vzrok je bila nezahtevnost oblike za frezanje. Če bi se frezalo 1 na testnem vzorcu odlomilo, bi se povečal čas frezanja.

Rezultati preiskav so pokazali, kako pomembno je, da se za vsak obdelovalni material najprej izbere pravilne parametre, na osnovi katerih se nato izdeluje izdelek v proizvodnem procesu. Izvedeni preizkusi so potrdili, da je kljub daljšemu času obdelave za proizvodni proces pomembnejša kakovost in zanesljivost, kar se je doseglo s frezalom 2, saj je prepogosta menjava frezal pri običajnem načinu dela prispevala k zaostanku v proizvodnji. Posledično niso bili doseženi roki za izdelavo izdelka, porabljeno je bilo več frezal od predvidenih, čas izdelave se je podaljšal. Zaradi navedenega so se povečali stroški izdelave, ki so bili večji od planiranih.

5 Zaključek

Dobavitelji frezal nimajo vedno na razpolago frezala za določeno vrsto jekla ali pa ne poznajo zadosti lastnosti jekel različnih proizvajalcev. Glede na to je orodjarjem prepuščeno, da si sami izberejo orodje, ki pa je na osnovi hitre odločitve lahko nepravilno. Problem pri obdelavi orodnega jekla smo imeli tudi v našem primeru.

Zato smo v raziskovalni nalogi preiskovali frezanje jekla 1.2343 proizvajalca Böhler. Jeklo ima po toplotni obdelavi dobro žilavost ob sorazmerno visoki trdoti, kar vpliva na rezalne parametre in obstojnost frezala. Za preiskavo smo za isti material izbrali dva različna frezala (frezalo 1 in 2), ki sta se razlikovala v geometriji kotov in podajanju. Pri frezalu 2 smo zmanjšali podajanje na zob in spremenili cepilni kot γ . Po končanem frezanju je bilo frezalo minimalno obrabljeno. Čas frezanja se je podaljšal, hrapavost pa se je zmanjšala iz 2,907 μm na 0,789 μm kar pomeni, da smo v primeru prostih tolerančnih mer, pri katerih ni potrebnega finega frezanja, zagotovili kvalitetnejšo površino v primerjavi s frezalom 1. Frezalo 2 se med obdelavo ne lomi, kar se je dogajalo pri frezalu 1. Pri uporabi frezala 1 smo porabili več frezal od predvidenih, čas frezanja se je s tem podaljšal in s tem so se posledično povečali stroški izdelave. Z uporabo frezala 2 se je doseglo bolj stabilen proces in s tem skladnost izdelave proizvodov s predvidenim planom. Tako smo se izognili dodatnim zastojem in stroškom, kar je pridobitev za podjetje ter stroko.

Reference

- [1] Čuš, F. (2009). *Postopki odrezavanja*. Maribor: Fakulteta za strojništvo.
- [2] SIJ Ravne steel center. (2018, 24. junij). *Orodno jeklo za delo v vročem*. Pridobljeno na <http://sij.rsc.si/assets/rsc-ravne-x-rs400-catalogue-slo-web.pdf>
- [3] Widia. (2018, 12. januar). *High-Performance Solid Carbide End Mills Hard Materials*. Pridobljeno na <https://www.widia.com/en/products/29388747/29665015/29665017/38346356/100022843.html>
- [4] Efunda. (2019, 14. januar). *Milling*. Pridobljeno na <http://www.efunda.com/processes/machining/mill.cfm>
- [5] De Vos, P., & Jan-Eric Ståhl (2017). *Uporabna fizika odrezavanja kovin – dobre prakse*. Škofljica: Profidtp, d.o.o.
- [6] Fachwissen Technik. (2018, 20. avgust). *Grundlagen Spanen*. Pridobljeno na <http://www.fachwissen-technik.de/verfahren/grundlagen-spanen.html>
- [7] Panjan, P., & Čekada, M. (2005). *Zaščita orodij s trdimi PVD-prevlekami*. Ljubljana: Institut Jožef Stefan.
- [8] Liss a. s. (2018, 11. marec). *Comparison of nanocomposite and gradient coatings deposited by pvd technology onto the x40crmov5-1 steel substrate*. Pridobljeno na <http://www.liss.cz/informacni-centrum.php?detail=10>
- [9] Dagget, S. (2005, 1 november). *How to Choose the Right Tool Coating for Your Machining Application*. Pridobljeno na <http://www.moldmakingtechnology.com/articles/how-to-choose-the-right-tool-coating-for-your-machining-application>
- [10] Prijanovič T., M. (2014). *Materiali*. Novo mesto: Višja strokovna šola, Šolski center Novo mesto.

- [11] Böhler-Uddeholm Corp. (2019, 14. januar). *Böhler W400 VMR*. Pridobljeno na <https://www.boehler-edelstahl.com/media/productdb/downloads/W400DE.pdf>
- [12] Polycom Škofja Loka d.o.o. (2018). *Interna dokumentacija podjetja Polycom Škofja Loka d.o.o.* Neobjavljeno interno gradivo.

Dynamic stresses in symmetric three-layered composite plates

Milan AMBROŽIČ

*University of Maribor, Faculty of natural sciences and mathematics,
Koroška 160, Maribor, Slovenija
E-naslov: milan.ambrozic@um.si*

*Faculty of industrial engineering, Šegova 112, Novo mesto, Slovenija
E-naslov: milan.ambrozic@fini-unm.si*

Povzetek. Teoretično raziskujemo komponente dinamičnega deformacijskega in napetostnega tenzorja v primeru simetričnih triplastnih kompozitnih plošč. Poleg nekaterih teoretičnih vidikov se ukvarjamo s primerjavo velikih kovinskih plošč in manjših vzorcev iz krhke inženirske keramike. Ta je veliko bolj občutljiva na natezne napetosti kot na tlačne. Posebej nas zanima odvisnost največjih napetosti v snovi v odvisnosti od sestave plošč/vzorcev in od frekvence harmoničnega časovnega spreminjanja zunanjih obremenitev plošče. Vzamemo primer enakomerne porazdelitve zunanjih sil. Raziskava pokaže bistvene razlike v velikostih maksimalnih napetostih v primeru statičnih in dinamičnih sil. Navajamo možnosti optimizacije sestave in debeline srednje plasti glede na odpornost proti maksimalnim napetosti.

Ključne besede: deformacijski tenzor, napetostni tenzor, upogib plošče, Kirchhoffova teorija, kompoziti

Razvrstitev: Znanstveni članek

Abstract. We study theoretically dynamic strain and stress tensor components in the case of symmetric flat three-layered composite plates. Besides giving some general theoretical aspects we focus on comparison of large metallic plates and smaller brittle engineering ceramic samples. The latter are much more sensitive to tensile stresses as compared to compressive stresses. We are particularly interested in the dependence of maximum stresses in the material on the composition of the plates and on the frequency of the harmonic time variation of the external load on the plate. We consider here the case with uniform distribution of the external force. The investigation shows significant quantitative differences between the maximum stresses in the cases of static and dynamic forces. Optimization of the middle layer composition and thickness is also discussed with the aspect of resistance to the largest stresses.

Keywords: strain tensor, stress tensor, bending of plates, Kirchhoff theory, composites

Article Classification: Scientific Paper

1 Introduction

Multilayered composites are used in various applications. Among them, symmetric three-layered flat composites (plates or smaller samples) have been studied extensively. The ratio between the thickness and lateral dimensions of such composites may vary by orders of magnitude, depending on applications and/or theoretical interest. Even plates (sheets) with finite thickness and infinite lateral dimensions are interesting for theoretical studies, e.g., how the elastic waves of different kinds propagate through such sheets. Most studies are focused to small thickness-to-width ratio of plates, so we refer to our samples as to “thin plates” for brevity. Mechanical properties, such as effective bend strength, fracture toughness, response to harmonic external load, of thin plates are of great importance, particularly when some degree of their

resistivity to external loads in everyday applications is demanded. Here, we compare the response to harmonic external loading of relative small ceramic samples (with dimensions of the order of millimeters or centimeters) with larger composite metal plates (with lateral dimensions of the order of meters).

Alumina/zirconia ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$) ceramic composites are frequently used in various applications in have been studied extensively in regard to their mechanical properties, both experimentally and theoretically. Such composites, where the major component is usually alumina, can have an excellent combination of surface hardness, fracture toughness, bend strength and wear resistance, as well as their applicability even at higher temperatures [1–8]. In the case of homogeneous particulate composition there is an appropriate volume fraction of tetragonal zirconia in alumina matrix (zirconia toughened alumina, ZTA). A few molar percent of yttria or ceria is ordinarily added to zirconia to stabilize its tetragonal crystallinity phase [2, 3]. For instance, Sommer et al. have reported that using 1 mol. % of yttria can rise the bend strength of ZTA ceramics (containing 17 vol. % of yttria stabilized zirconia) up to nearly 1200 MPa and the fracture toughness up to $8.5 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ [9].

Multi-layered brittle laminates in general (with relatively homogeneous layers, but with sharp differences in the composition and consequently material properties between neighboring layers) and particularly alumina/zirconia laminates have thus been studied intensively, either experimentally or theoretically [10–20]. For instance, if the outermost layers of multi-layered composites are made of pure alumina and the content of zirconia increases toward the middle of the composite, two benefits are achieved: 1) alumina as a material with higher hardness prevents wear of the surfaces in applications, 2) compressive residual thermal stresses remain in outer layers due to mismatch of the thermal expansion coefficients of alumina in zirconia. These stresses arise upon cooling the material after sintering process, and they can (partially) compensate detrimental tensile stresses in application of such ceramics. The magnitudes of the residual thermal stresses can be of the order of hundreds of MPa.

Here we are interested only in elastic properties of the plates, although plastic deformations due to large loads are also important. Numerous theoretical investigations have been done particularly in regard to elastic waves through infinite plates and the dispersion relations, i.e., the relations between the wave vector and angular frequency. In general, even when analytical solutions to the problems exist, they are quite complicated, particularly for multilayered plates [21, 22]. This is mainly due to the fact that bending waves are accompanied by shear waves.

In the following we first give the simplest model for the deflection of the homogeneous and 3-layered (or more generally, multi-layered) symmetric plate. We then obtain some representative results for dynamics of the plate and the stress tensor inside it. Next, we study two particular cases of ceramic and metal samples/plates, respectively: alumina/zirconia and aluminum/steel composites. Our main focus is on ceramic samples since they are increasingly used in engineering and biomedical applications. We pay our attention particularly to the question, how the frequency of the time variation of external load influences the magnitude of the largest tensile stresses in the plate, as compared to static load.

2 Mathematical model

Let us first consider the case of homogeneous thin plate subject only to bending deformation. Its Young's modulus is E , its Poisson's ratio is ν , and its mass density is ρ . The thickness of the plate is h , while its lateral dimensions (sides) are $2a$ and $2b$. Although we have focused to the case of quadratic plate, $a = b$, we have made some test calculations also for different rectangular plates, thus we keep here the general consideration of the rectangular plate for reference. We choose the Cartesian coordinate system such that the z -axis is perpendicular to the plate, and the other two axes are parallel to the sides of the plate. Let the coordinate origin be at the center of the plate, so that its bulk coordinates are limited to intervals: $-a \leq x \leq a$, $-b \leq y \leq b$, $-h/2 \leq z \leq h/2$. The neutral plane is at $z = 0$. The deformation according to the Kirchhoff theory for a thin

plate is characterized by the variable $w(x, y, t)$, which means the displacement of the points on neutral plane in the direction of z -axis. The corresponding dynamic equation for w is [23]:

$$D(\nabla^2)^2 w + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = p \quad (1)$$

Here $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ is the two-dimensional (2D) Laplacian. The quantity p on the right side of Eq. (1) is the external contact force on the plate per unit area in z -direction. It is, for instance, the force due to the difference of pressures on both sides of the plate, and it may be an arbitrary function of coordinates x and y , as well as time. We study here only homogeneous pressure over the plate. To be brief, we will name the quantity p simply the pressure, regardless of its origin. In our study $p = p_0 f(t)$ is either static, $f = 1$, or a sine function of time, $f = \sin(\omega_{\text{app}} t)$ with the applied angular frequency ω_{app} . The flexural rigidity (bending stiffness) D in Eq. (1) is:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

Convenient numerical form of Eq. (1), with its extension to layered plate in dimensionless units, is given in Appendix A. Here we list the transformation of physical quantities and parameters into their dimensionless equivalents. All the dimensionless quantities in the text will be distinguished from the quantities with physical units by the star (*) after the symbol. First, we need some reference material parameters, for instance, those of pure alumina. We denote the reference Young modulus and density by E_0 and ρ_0 , respectively. Thus the true dimensionless Young modulus and density of the specific layer may be written as $E^* = E/E_0$ and $\rho^* = \rho/\rho_0$. The pressure will also be normalized with respect to E_0 : $p^* = p/E_0$. Next, we introduce the reference bending stiffness simply as $D_0 = E_0 h^3$, so that $D^* = D/D_0$.

The coordinates x and y will be measured with respect to a : $x^* = x/a$ and $y^* = y/a$. We will use the denotation for the thickness-to-half-side ratio of the plate: $\eta = h/a$. It is also useful to use notation $b^* = b/a$ if the plate sides are different. We note here that in this case we always take $b > a$ ("elongated plate"), since the dynamic response of the plate is determined predominantly by the shorter half-side if $b \gg a$. We renormalize the z -coordinate and the function w with respect to the plate thickness: $z^* = z/h$ and $w^* = w/h$. Finally, the suitable choice of the renormalization of time for our problem is $t^* = t/t_0$, with the reference time:

$$t_0 = \sqrt{\frac{\rho_0}{E_0}} \cdot \frac{a^2}{h} = \sqrt{\frac{\rho_0}{E_0}} \cdot \frac{a}{\eta} \quad (3)$$

When the function w^* is found numerically, the components of the strain tensor $u_{ij} = (\partial u_i/\partial x_j + \partial u_j/\partial x_i)/2$ can be calculated directly. Here indices 1, 2 and 3 correspond to Cartesian directions x , y and z . The nonzero components are [23]:

$$u_{xx} = -\eta^2 \frac{\partial^2 w^*}{\partial x^{*2}} \cdot z^* \quad (4a)$$

$$u_{yy} = -\eta^2 \frac{\partial^2 w^*}{\partial y^{*2}} \cdot z^* \quad (4b)$$

$$u_{xy} = u_{yx} = -\eta^2 \frac{\partial^2 w^*}{\partial x^* \partial y^*} \cdot z^* \quad (4c)$$

$$u_{zz} = \frac{\nu}{1-\nu} \eta^2 \left(\frac{\partial^2 w^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 w^*}{\partial y^{*2}} \right) \cdot z^* \quad (4d)$$

The components σ_{xx} , σ_{yy} and σ_{xy} of the two-dimensional (2D) stress tensor are then calculated by the general formula:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[u_{ij} + \frac{1}{1-2\nu} u_{ll} \delta_{ij} \right] \quad (5)$$

Here, $u_{ll} = u_{xx} + u_{yy} + u_{zz}$ is the trace of strain tensor and δ_{ij} is the Kronecker symbol. The other components of the stress tensor (related to the third coordinate) can be neglected. The eigenvalues σ_1 and σ_2 of the corresponding 2D stress tensor (principal stresses) can then be calculated.

As regards the boundary condition to Eq. (1), we have chosen a simple example of the clamped rigid boundary, i.e., $w = 0$ and $\partial w / \partial x$ or $\partial w / \partial y = 0$ at the corresponding edges of the plate.

3 Results and discussion

First, we choose the homogeneous plate with some representative values of dimensions and material parameters, and we apply the homogeneous (over the plate) pressure with the sine time function: $p = p_0 \sin(\omega_{app} t)$. Here the applied angular frequency is ω_{app} and the corresponding oscillation period is T_{app} , so that $\omega_{app} = 2\pi/T_{app}$. Next, when some general findings for the homogeneous plate are commented, we focus to the three layered plates. We compare different physical responses of the homogeneous plate with symmetrical 3-layered plate with variable thickness of the middle layer. Besides the time variation of the deflection w of the neutral plane, the components of the stress tensor are particularly interesting. In the case of known (static) bending strengths of the materials we compare, for instance, the largest components of tensile stress with these strengths, particularly when the applied frequency ω_{app} is varied.

We take some control points positioned symmetrically on the plate (Fig 1) and follow their time dependence of the displacement from $z = 0$. The first point P_0 is at $x^* = 0, y^* = 0$, thus we look for the function $w^*(0, 0, t^*)$ in the dynamic response of the plate. Other control points have the dimensionless coordinates: $P_1(1/2, 0)$, $P_2(0, b^*/2)$, $P_3(-1/2, 0)$, $P_4(0, -b^*/2)$, $P_5(1/2, b^*/2)$, $P_6(-1/2, b^*/2)$, $P_7(-1/2, -b^*/2)$ and $P_8(1/2, -b^*/2)$.

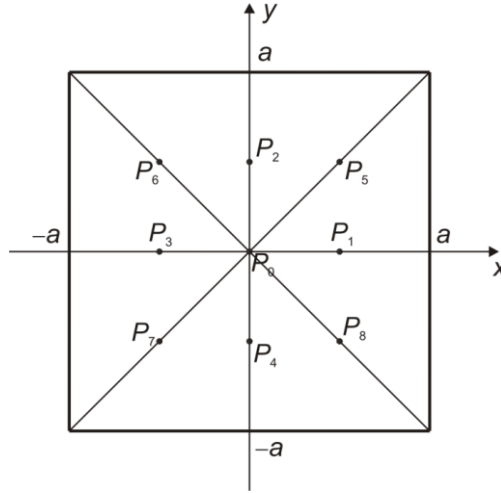


Figure 1. 2D coordinate system and the nine control points for the quadratic plate; in the case of rectangular plate, $b > a$, we take the longer sides $2b$ to be parallel to the y -axis

First, we choose for reference a homogeneous plate the following parameters: $a = b = 100 h$ ($\eta = 0.01$), $E = E_0 = 200 \text{ GPa}$, $\nu = 0.25$, $\rho = \rho_0 = 10 \text{ kg/dm}^3$, $p_0 = 1 \text{ kPa}$. The pressure is homogeneous over the plate. Of course, due to the symmetry of the problem we expect in advance the same value of w^* for control points P_1 to P_4 , and similarly for control points P_5 and P_8 . This was revealed in our simulations. Fig. 2 shows the time dependence of the dimensionless function w^* for different control points in the case $T_{app}^* = T_{app}/t_0 = 10$. Although the

dimensionless graph in Fig. 2 is independent on the actual value of the quadratic size of the plate, we nevertheless we take the reference value $a = 100$ cm for simple scaling of some parameters, such as actual time. In this case, the thickness of the plate is 1 cm and the actual sides are 200 cm. Besides the period $T_{app}^* = 10$ the “free” oscillation period of the basic mode is estimated: $T^* \approx 2.3$. For the given physical parameters the reference time in Eq. (3) is $t_0 \approx 22$ ms, so that the free oscillation period in physical units is about $T \approx 51$ ms. We also note, that the maximum displacement w is of the order of $h/10$ for the given pressure, roughly at the limit of the applicability of the Kirchhoff theory.

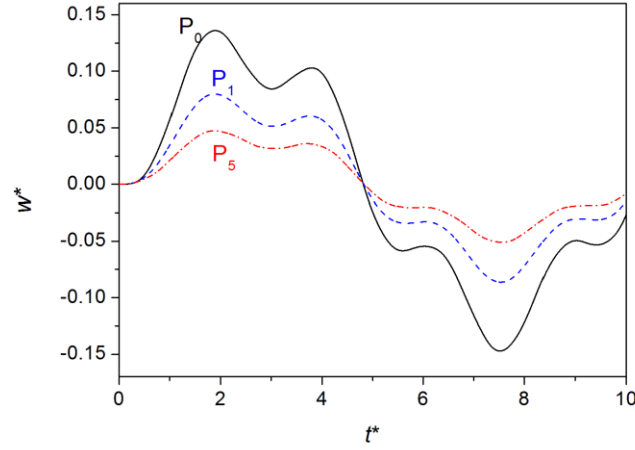


Figure 2. The graph of the $w^*(t^*)$ dependence for different control points

In the case of $a = b$ the principal stresses σ_1 and σ_2 at P_0 are equal due to symmetry. Fig. 3 shows the time dependence of the eigenvalue σ_1 for the point P_0 for the three scenarios. The principal stress depends on coordinate z , so it is presented for the top surface of the plate at P_0 , $z = h/2$. The stress eigenvalue on the opposite surface, $z = -h/2$, has just the opposite sign. As expected, the maximum values of the components of the 2D stress tensor are orders of magnitude larger than the applied pressure. Figs. 3 and 4 clearly indicate that the dynamic stress may be significantly larger than the static value for the same loading amplitude. For instance, as Fig. 4 indicates, the principal stress σ_1 is about 5 MPa at the point P_0 when the plate is in equilibrium under pressure 1 kPa. On the contrary, Fig. 3 compares two characteristic ways of inducing dynamic stresses in the plate: I) the harmonic variation of the pressure according to the data above (solid line), and II) sudden jump of the pressure from zero to 1 kPa at initial time $t = 0$ (dashed line). In the latter case σ_1 reaches the value about 13 MPa, as compared to 5 MPa in equilibrium. But even the relative moderate (“slow”) harmonic time variation of pressure in the first case, i.e., far from resonance (with $T_{app}^* = 10$, as compared to $T^* = 2.3$) increases the principal stress: about 7 MPa in the observed time interval as compared to static value 5 MPa.

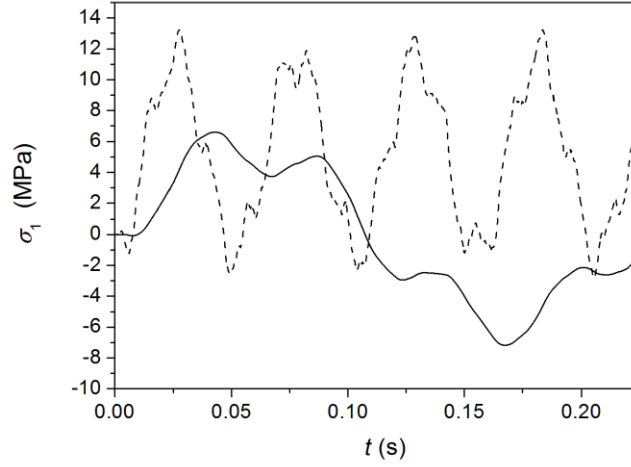


Figure 3. The stress tensor eigenvalue at the point P_0 as a function of time in physical units for two cases: I) harmonic time variation of pressure ($p = p_0 \sin(\omega_{app} t)$; solid line) and II) sudden pressure jump ($p = 0$ for $t < 0$, $p = p_0$ for $t > 0$; dashed line)

The deformation of the plate near the edges can be significant due to specific boundary conditions. Therefore, the stress near the edges cannot be ignored. Fig. 4 shows the profile of both principal stresses along two symmetry lines: $y = 0$ (the line through the points P_3 , P_0 and P_1 from the left to the right in Fig. 1); 2) and $y = x$ (the diagonal line going through points P_7 , P_0 and P_5). The static homogeneous pressure $p = 1$ kPa is chosen in Figure 4.

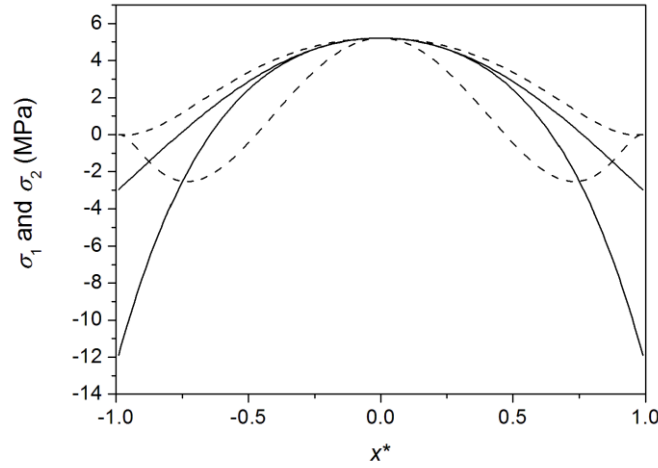


Figure 4. Line profile of both stress eigenvalues – dependence of eigenvalues σ_1 and σ_2 on $x^* = x/a$. The eigenvalue σ_1 is chosen as the larger one (regardless of the corresponding eigenvector). Solid lines: $y = 0$ line, dashed lines: $y = x$ line

For easier comparison the dependence of eigenvalues on the dimensionless coordinate x^* was taken for both “control lines”. As in the case of Fig. 3, the lines on the top surface of the homogeneous plate were taken. However, we must be aware that the eigenvalues on these lines can be either positive or negative. While, for instance the curve $w^*(x^*)$ for $y^* = 0$ is concave at

the central point P_0 , it must be convex near edges $x^* = \pm 1, y^* = 0$ in order to satisfy boundary conditions. But the strongly negative eigenvalue $\sigma_2 \approx -12$ MPa means that the corresponding eigenvalue is +12 MPa on the opposite surface, at the point with the same coordinates x^* and y^* . Thus, as the plate is left to oscillate, strong tensile and compressive stresses periodically appear near the edges, which significantly exceed the stresses near the central point P_0 . This is the result of homogeneous pressure over the plate. In most experimental tests, for instance in the simulations with cycling loads, the pressure is applied over the smaller area of the plate (for instance, below the piston), but also the boundary conditions and geometry are different. It is interesting that the stresses are absent exactly at the corners of the plate in our case (dashed lines in Fig. 4).

Here we just touch the case of different values of the longer half-side b only briefly to indicate the differences in comparison to square plate. We have tested the cases $b = 1.5a, 2a, 5a$ etc., with the same other parameters. We have found, among other facts, that the static value of $w^*(x^* = 0, y^* = 0)$ gradually increases with b , and it correctly approaches the value 0.25, as for the simple one-dimensional (1D) static solution of Eq. (1) for homogeneous pressure. This 1D solution $w(x)$ which also satisfies the boundary conditions $w(\pm a) = \partial w / \partial x(\pm a) = 0$ is an even polynomial of 4th degree.

Now we focus on composite plates of two types: ceramic samples with rather small dimensions and metal plates with large sides. The material parameters of the four materials of our interest are given in Table 1. The ZTA composite ZTA24 is according to Ref. [9] and the number 24 denotes the volume fraction 24 % of zirconia in alumina matrix. We take a symmetric 3-layered composite with alumina outer layers and ZTA24 inner layer. The mechanical properties of the two ceramic materials can be obtained from several references. The densities are simply calculated according to the rule of mixtures and with theoretical values 3.98 g/cm³ for alumina and 6.05 g/cm³ for zirconia. We take just theoretical densities because measurements, for instance, in Ref. [9], have shown that the relative densities are higher than 99 %. The Young modulus and the Poisson number have been calculated with the linear interpolation according to data in [2]. For the bend strength of ZTA24 composite we take the data from [9] for sintering time of 1 hour. Only the value 500 MPa for the strength of pure alumina has been chosen arbitrary in Table 1. This is, because the data from literature vary significantly due to different fabrication procedures (and even different quality of starting powders). Here we mention just three typical and very different approximate values for the bend strength of alumina: 600 MPa [2], 500 MPa [15] and 300 MPa [24]. The values of the bend strengths for the metals aluminum (Al) and steel (Fe) are also approximate.

Table 1. Material parameters of pure alumina (Al_2O_3), ZTA composite (ZTA24), aluminum (Al) and steel (Fe): Young modulus, Poisson number, density and approximate bend strength

Material	E (GPa)	ν	ρ (g/cm ³)	σ_b (MPa)
Al_2O_3	390	0.238	3.98	500
ZTA24	338	0.264	4.48	850
Al	70	0.35	2.70	100
Fe	200	0.30	7.78	300

We consider first ceramic samples. We vary systematically the thickness of the middle layer (keeping the total thickness constant). Besides the static solution at pressure p_0 we also vary the frequency of pressure oscillation according to sine function. Besides the pure alumina plate we choose the ZTA24 for the middle layer. One of the reasons for choosing alumina/zirconia composite in the middle layer is that it causes a mismatch between the thermal expansion coefficients in different layers and consequently compressive thermal stress in the alumina layers. Because of the equilibrium of forces the thermal stress in alumina layers is larger if they are thin in comparison to the middle layer. Since the effect of additional thermal stresses has

been studied intensively we are not going to consider them here. They can be simply added to mechanical stresses.

During time dynamics the largest positive (tensile) eigenvalue at the central point P_0 is traced, as well as over the whole plate; this means the maximum over the plate volume and over time in the second case. Again, it is enough to consider the top and bottom of the plate, $z = \pm h/2$, since the tensile stress reaches maxima there for two reasons: 1) strain and consequently stress components are proportional to z , 2) alumina has larger Young modulus than the inner ZTA layer. It is sufficient to consider only the top surface and to take the absolute values of both σ_1 and σ_2 . It is of practical interest to trace also the position of the point of the plate where the maximum tension appears.

We arbitrary choose a relatively thick “plate” with dimensions $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ (i.e., $a = b = 50 \text{ mm}$, $h = 5 \text{ mm}$, $\eta = 1/10$). These data are within the order of dimensions of typical ceramic testing samples. While the testing bars, for instance in the 3-point uniaxial bending test, are usually smaller (e.g., $40 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ in [9]), we prefer here to take rounded numbers for lengths and also $a = b$ case. We choose such value of pressure amplitude p_0 that for static loading the maximum stress in the case of pure alumina sample is of the order 100 MPa, i.e., the same order of magnitude as the bend strength of pure alumina. According to a simple one-dimensional (1D) estimation $p_0 = 1 \text{ MPa}$. The corresponding relative displacement of the plate at the point P_0 is $w^*(0) \approx 1/80$. This value is small enough to use the Kirchhoff theory safely. Static deflection in 2D is $w^*(0, 0) \approx 0.006$ (0.03 mm in physical units); this is about twice smaller than the 1D estimation, similarly, as we have found above for large plates. The deflection with ZTA middle layer doesn’t differ much from the case of homogeneous alumina sample because the material parameters of ZTA composites are similar (Table 1).

When the thickness of the ZTA middle layer increases (keeping the total thickness 5 mm constant) the static relative deflection of the point P_0 increases gradually from 0.0057 for pure alumina plate to 0.0063 for 4.5 mm thick middle layer. This is mainly due to the smaller Young modulus of the middle layer, resulting in the smaller parameter D . The free oscillation period T^* increases according to Eq. (3) because of two facts: the larger density and smaller Young modulus of the middle layer. The variation of the period T^* is small: from $T^* = 2.32$ for homogeneous alumina sample to $T^* = 2.57$ for 4.5 mm thick middle ZTA layer (and alumina skin layers, each 0.25 mm thick in the latter case).

The dimensionless oscillation time $T^* = 2.32$ is the basis for the set of chosen frequencies in Table 2. We give for reference the corresponding values for the period and frequency for alumina sample in physical units: $T_A = 0.117 \text{ ms}$, $\nu_A = 1/T = 8.53 \text{ kHz}$. The maximum stresses, i.e., the maximum values of the larger principal stress, $\sigma_{\max} = \max(\sigma_1, \sigma_2)$, over testing time and over sample thickness, for the control point P_0 and for the whole sample are presented in Table 2. The frequencies of pressure ν_{app} in the table are given in units of ν_A ; the thickness of the ZTA middle layer is denoted by d_{ZTA} (the value 0 means pure alumina sample).

Table 2. Dependence of $\sigma_{\max}$ (in units MPa) on the pair of parameters d_{TZA} (in millimeters) and ν_{app} . In each cell of the table, the value in the upper line (“P₀”) corresponds to $\sigma_{\max}$ at the point P₀, and the value in the bottom line (“All”) to $\sigma_{\max}$ for all the volume of the plate

d_{TZA}	Points	Statics	$\nu_A/8$	$\nu_A/4$	$\nu_A/2$	ν_A
0	P ₀	51.55	60.20	69.87	101.60	790.55
	All	118.92	132.33	147.76	196.98	1296.17
1	P ₀	51.60	60.44	71.44	105.39	781.64
	All	119.04	133.00	151.48	208.71	1279.23
2	P ₀	51.95	61.23	73.87	113.11	764.58
	All	119.85	134.52	155.66	222.06	1251.81
4	P ₀	54.97	65.92	79.58	135.18	675.64
	All	126.82	144.14	164.64	257.30	1089.66
4.5	P ₀	56.57	68.22	80.73	140.79	625.50
	All	130.49	148.88	171.38	264.98	989.73

It was confirmed in all cases that the maximum stress appears at the middle points of the square plate edges, i.e., at $(\pm a, 0)$ and $(0, \pm a)$, as for static pressure. The stress increases with the frequency ν_{app} , as expected. The large increase of the magnitude of stresses at $\nu_{\text{app}} = \nu_A$ is due to the resonance effect. We also note that while for frequencies lower than ν_A the maximum stress slightly increases with the thickness of the middle layer, the opposite holds in the case $\nu_{\text{app}} = \nu_A$. This is again the effect of resonance: as Table 2 shows that the frequency of the free oscillation slightly decreases with the middle-layer thickness, and so the applied frequency is slightly off-resonance (as compared to pure alumina plate).

For comparison with relatively small ceramic samples we take as a second example the steel/aluminum three-layered metal plate with parameters in Table 1. We consider two possibilities: I) with steel outer layers and aluminum middle layer, and II) with aluminum outer layers and steel middle layer. As in the case of ceramic sample we vary the thickness of the middle layer and the pressure frequency. We take $a = b = 100$ cm, $h = 1$ cm ($\eta = 0.01$), $p_0 = 0.1$ kPa. Such a moderate value of the pressure amplitude is taken in order to retain small relative displacements of the points of the plate, so that the Kirchhoff assumptions remain valid.

We have not checked systematically the free oscillation frequencies for different composite plates. For reference, we have found them for homogeneous alumina (Al) and steel (Fe) plates with the dimensions stated above. We note that homogeneous aluminum and steel plates with the same dimensions oscillate with similar frequencies (Table 3). This is because the ratios of their Young moduli and densities are similar, see Eq. (3), while different Poisson numbers don't change the results significantly. For comparison, we also give the frequencies for 3-layered plates: with aluminum/steel/aluminum layers (Al/Fe/Al) and with steel/aluminum/steel layers (Fe/Al/Fe); here all the layers have the same thickness: $h/3 = 3.3333$ mm. Contrary to the homogeneous plates with similar frequencies the Al/Fe/Al plate is effectively less rigid (slower oscillation), while the Fe/Al/Fe is more rigid (faster oscillation). This difference is obviously the result of the expression (A.3) for the effective dimensionless bending stiffness, i.e., the outer layers are those with larger Young modulus. This effect more than compensates the larger average density of the Fe/Al/Fe plate as compared to Al/Fe/Al plate. Therefore, this result is quite illustrative: if the homogeneous plates made of two different materials have similar oscillation times, we must not make the same conclusion about the composite plates without calculations.

Table 3 also compares the deflection of the neutral plane at the control point P₀ for these plates in the case of equilibrium at static pressure $p_0 = 0.1$ kPa. While the plate thickness is 10 mm in all case, the deflection for the four plates differs significantly because of the larger Young modulus of steel.

Table 3. Free oscillation frequency and the static deflection of P_0 for different plates, all of dimensions $200 \text{ cm} \times 200 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$. The symmetric 3-layered plates Al/Fe/Al and Fe/Al/Fe have the layers of the same thickness $1/3 \text{ cm}$

Material	ν (Hz)	w (mm)
Al	23.1	0.297
Fe	22.4	0.108
Al/Fe/Al	18.6	0.278
Fe/Al/Fe	25.1	0.110

The free oscillation times in Table 3 can be obtained in two ways: I) by solving dynamic equation (1) or its dimensionless form (A.1), after the initial pressure p_0 has been released (the same procedure was used for ceramic samples above), II) directly by scaling analysis of Eq. (1). But it is the most convenient to use Eq. (3) and dimensionless equation Eq. (A.1) in Appendix for such scaling. This works both for homogeneous plates and for layered plates (if they are either quadratic or if they all the same ratio b/a). To illustrate this scaling for two different square plates, let E_{01} , ρ_{01} , a_1 and η_1 be the reference Young modulus, reference density, the half-side and the ratio h_1/a_1 for the first plate (where we have already calculated the oscillation time T_1). Let E_{02} , ρ_{02} , a_2 and η_2 be the corresponding quantities for the second plate (where we want to calculate oscillation time T_2). Furthermore, let D^*_{11} , D^*_{22} , ρ^*_{11} and ρ^*_{22} be the dimensionless bending stiffness and density according to Eqs. (A.2)–(A.4). Then, it follows:

$$T_2 = T_1 \cdot \sqrt{\frac{\rho^*_{22}}{\rho^*_{11}} \cdot \frac{\rho_{02}}{\rho_{01}} \cdot \frac{D^*_{11}}{D^*_{22}} \cdot \frac{E_{01}}{E_{02}} \cdot \frac{a_2}{a_1} \cdot \frac{\eta_1}{\eta_2}}$$

The deflections w of the central point P_0 for different plates in Table 3 are very easy to compare for verification of the numerical solution since according to Eq. (1) w is proportional to $1/D$.

Similarly to Table 2 for ceramic samples the Table 4 for metal plates shows $\sigma_{\max} = \max(\sigma_1, \sigma_2)$, i.e., the maximum of the larger stress eigenvalue during oscillation. Besides homogeneous plates two combinations of 3-layered plates are studied: Al/Fe/Al (aluminum outer layers) and Fe/Al/Fe (steel outer layers). Denotation “thick” is used for thick outer layers (3.3333 mm each), and denotation “thin” for thinner outer layers (each has thickness 0.5 mm, so that the middle layer is 9 mm thick). Now, the oscillation periods in units of t_0 for alumina plate are given. According to Eq. (3) and Table 1, we have $t_0 = 19.6 \text{ ms}$ and the corresponding frequency is 50.9 Hz. We stress that these are not the free oscillation time and frequency of alumina plate, but just the appropriate reference values. Thus, for instance the data in the column with $T_{\text{app}}^* = 10$ correspond to 10 times larger applied oscillation periods of the pressure.

Table 4. Dependence of the maximum tensile stress $\sigma_{\max}$ (in units MPa) in metal plate on the composition and oscillation period T_{app}^* (20, 10 and 5) in units of t_0 . The numbers for $\sigma_{\max}$ have the same meaning as in Table 2: the upper number (“ P_0 ”) in each cell corresponds only to the point P_0 and the bottom number (“All”) to the entire plate

Composition	Points	Statics	20	10	5
Al	P_0	0.5625	0.6253	0.7597	1.1355
	All	1.1898	1.2779	1.4870	2.0241
Fe	P_0	0.5417	0.6220	0.7449	1.1159
	All	1.1898	1.3131	1.5037	2.0704
Al/Fe/Al (thick)	P_0	0.5301	0.6376	0.7802	1.3290
	All	1.1199	1.2756	1.4926	2.2859
Fe/Al/Fe (thick)	P_0	0.5580	0.6390	0.7097	1.0411
	All	1.2201	1.3425	1.4575	1.9650
Al/Fe/Al	P_0	0.2468	0.2903	0.3451	0.5143

(thin)	All	0.5219	0.5835	0.6641	0.9364
Fe/Al/Fe	P ₀	1.0113	1.1544	1.1999	1.8481
(thin)	All	2.2214	2.4261	2.4405	3.5281

As in the case of ceramic samples the stress is not the largest at the point P₀, but at the points (±a, 0) and (0, ±a). The stresses in this case are a few orders of magnitude smaller than for ceramic samples, and according to given material strengths in Table 1 these stresses are not detrimental. This is mainly due to much smaller applied pressure. The corresponding deflections of the plate at the point P₀ are of the order of magnitude $h/100$. This is shown in Table 3 for static case, but as long as the pressure oscillation frequencies are not too high, the maximum deflections in dynamic loading are similar to deflections in static case.

Both, the deflections w and stress tensor components scale linearly with applied pressure. Thus, the results in Table 4 can also be used for scaling at larger pressures, but only up to the limit where deflections of the plate become of the order of $\sim h/10$, so that the assumptions of the Kirchhoff theory are valid. Here we can see the importance of the parameter η (0.1 for ceramic samples and 0.01 for metal plates in our study).

In regard to optimization of the composition of both ceramic samples and large metal plate according to various demands for mechanical properties according to applications we may give the following remarks. As long as the frequencies of the external load are not too high, the dynamic and static responses of both homogeneous and composite plates are similar. The stress in the material increases slightly with the frequency. Thus, in regard to stresses it suffices here to focus on static load. For alumina/zirconia composites, it is convenient to use alumina outer layers, so that the zirconia content increases toward the middle layer; this holds not only for 3-layered composites, but also for those with 5 or more layers. As mentioned in the introduction, such composition provides additional compressive stresses in outer layers. The optimization of such composites in regard to thermal residual stresses in alumina/zirconia symmetrical composites was regarded, for instance, in [17]. We must also note that there is a limit to the volume concentration of the minor zirconia component in alumina matrix due to fabrication limitations as well as formation of micro-cracks in the layers due to thermal stresses [16].

In the case of metallic plates, the situation is different due to various fact, e.g., 1) metals are not brittle like ceramics, 2) there is no such mismatch between the tensile and compressive strength as in the case of ceramics, 3) larger contrasts in the material parameters for different layers can be achieved more easily. If we consider only the applied bending stresses, the composite plate with the thick middle aluminum layer in thinner steel outer layers in 3-layered plate seems to be appropriate at least for two reasons: 1) such plate has smaller weight, 2) the largest stresses appear in the outer layers and steel has approximately 3 times larger bend strength than aluminum. Even if cracking appears in aluminum layer, the outer steel layers might prevent the abrupt break of the plate. It is also desirable to keep the resonant frequency of the plate as high as possible. It is evident from Table 3 that the resonant frequencies for pure aluminum and Fe/Al/Fe plates are similar even for thick outer layers.

Finally, we note that in the case of rapid oscillations of the plate the adiabatic values of Young modulus and Poisson number should be more appropriate in our calculations instead of isothermal values: $E_{ad} = E + \Delta E$, $\nu_{ad} = \nu + \Delta \nu$. According to [23] the relative change of both material parameters is approximately the same:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta \nu}{\nu} \approx \frac{E T \alpha^2}{\rho c_p}$$

where T is absolute temperature, α linear thermal expansion coefficient, ρ density and c_p the specific heat (per mass unit) at constant pressure of the material. Taking the temperature $T = 300$ K and inserting the material data we obtain the following positive relative corrections to isothermal values of E and ν : 0.26 % for Al₂O₃, 0.47 % for Al and 0.24 % for Fe. It is difficult to make a direct evaluation of the corresponding changes in principal stresses. Even in the case of

static pressure and static solution of Eq. (1) for a homogeneous plate, where Young modulus cancels in the final expressions for the stress tensor, the Poisson number appears in different relations. Thus, we can only make a rough estimation that the changes of the stresses in Tables 2 and 4 are about 1 % at most.

4 Conclusions

We have found that by increasing the frequency of the applied harmonic pressure from zero (static load) up to “resonant” frequency the stresses in the ceramic composite laminate are increased by an order of magnitude. The resonant frequency depends on the composition and size of the plate: it is 8.53 kHz for pure alumina (rigidly supported) plate with dimensions 100 mm × 100 mm × 5 mm. For instance, according to Table 2, although the static principal stress at the point P_0 is ~50 MPa, and the maximum principal stress is ~100 MPa (for $p_0 = 1$ MPa) for alumina sample, i.e., well below the material bend strength, these values increase to ~800 MPa and ~1300 MPa, respectively, at the resonant frequency (during observed time of a few oscillations). As expected, the behavior of large metallic plates, either homogeneous or layered, with increasing frequency of pressure oscillation is similar to the behavior of smaller ceramic samples. For low frequencies, the dynamic stresses in the composite do not differ much from the corresponding static values, because also the amplitudes of oscillations of w depend weakly on frequency. This is well known fact in the dynamic behavior of plates, in analogy with the resonant behavior of a simple pendulum. The maximum stress at the four middle points of the square sides is approximately twice the maximum stress of the central point P_0 . This is a result of the geometry (square sample), homogeneous applied pressure and the chosen boundary conditions. For other physical arrangements the expected results are of course different; but it is recommended to keep in mind that in general the stress may not be the largest at the middle of the sample.

We also note that our simulation time was only a few oscillation times of applied pressure. For longer times the damping term of for oscillation component of the plate should be included in Eq. (1). According to the analog oscillation of a simple pendulum the steady state of forced oscillation without any damping the amplitudes of the function w should theoretically approach infinite values. Thus, the results in the last column of Table 2 should be taken with some reservation: even larger values than those quoted may be expected for longer times.

APPENDIX A: Dimensionless form of dynamic equation

Using all the dimensionless quantities stated in the mathematical model the Eq. (1) transforms to:

$$D^* (\nabla^{*2})^2 w^* + \rho^* \frac{\partial^2 w^*}{\partial t^{*2}} = \frac{1}{\eta^4} P^* \quad (A.1)$$

The Laplacian ∇^{*2} contains derivatives with respect to renormalized coordinates x^* and y^* . The boundary conditions in dimensionless form are: $w^*(\pm 1, y^*) = w^*(x^*, \pm b^*) = 0$; $\partial w^*(\pm 1, y^*)/\partial x^* = \partial w^*(x^*, \pm b^*)/\partial y^* = 0$.

Remembering that the parameter $\eta = h/a$ on the right side of Eq. (A.1) is small for thin plates, a small pressure in comparison to the Young modulus can cause a significant bending of the plate.

If the plate is homogeneous, the dimensionless bending stiffness $D^* = D/D_0$ according to Eq. (2) is:

$$D^* = \frac{E / E_0}{12(1 - \nu^2)} \quad (A.2)$$

If the plate is multi-layered, the parameters D^* and ρ^* must be calculated in the following way. Let's take the symmetric composite with odd number N of homogeneous layers, each denoted by index $i = 1-N$. Their thicknesses, Young moduli, Poisson numbers and densities from "bottom" to "top" are: h_i , E_i , ν_i and ρ_i , or in dimensionless form: $h_i^* = h_i/h$, $E_i^* = E_i/E_0$, and $\rho_i^* = \rho_i/\rho_0$. Here the total thickness h is the sum of thicknesses h_i of all layers. The dimensionless bending stiffness is:

$$D^* = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^N \frac{E_i^*}{1-\nu_i^2} \left[(z_{iT}^* - z_n^*)^3 - (z_{iB}^* - z_n^*)^3 \right] \quad (A.3)$$

In (A.3) the boundary z -coordinates of the layers appear; they are renormalized to the total thickness h of the plate. Their symbols mean the following: z_{iT}^* and z_{iB}^* are the coordinates of the top and the bottom of the i -th layer, respectively, while z_n^* is the coordinate of the neutral plane. It is still at the half-thickness for symmetric laminate, as in the case of homogeneous plate. Eqs. (2), (A.2) and (A.3) follow from integration of the volume elastic energy density (which includes factor z^2) over the plate thickness to obtain the energy density per unit area. The expression for the elastic energy density for homogeneous plate is given in [23]. The effective density is:

$$\rho^* = \sum_{i=1}^N \rho_i^* h_i^* \quad (A.4)$$

While static solution of Eq. (A.1) can be obtained by over-relaxation method, the dynamic solution was treated with the small relaxation time step. We have checked the reliability of the numerical method. For instance, we have taken different values of a small time step and compared the match of the graphs. We have found that the dimensionless time step $\Delta t^* = 2.5 \cdot 10^{-6}$ is small enough for good accuracy. We have mainly studied the case $a = b$, but we have also tested some other cases, for instance, $b = 5a$. As expected, we have found that the oscillation period of the plate and stresses in it (for the same pressure) remain within the same order of magnitude for elongated plates, even in the limiting case $b \gg a$. We finally note that the simulation time in our calculations was a few oscillation times of applied pressure.

References

- [1] Evans, A. G., & Heuer, A. H. (1980). Review-Transformation Toughening in Ceramics: Martensitic Transformations in Crack-Tip Stress Fields, *Journal of the American Ceramic Society*, 63(5-6), 241-248.
- [2] Lange, F. F. (1982). Transformation Toughening: Parts 1-5, *The Journal of Materials Science*, 17(5-6), 225-262.
- [3] Becher, P. F. (1983). Slow crack growth behavior in transformation-toughened Al_2O_3 - ZrO_2 (Y_2O_3) ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 66, 485-488.
- [4] Rühle, M., Claussen, N., & Heuer, A. H. (1986). Transformation and Microcrack Toughening as Complementary Processes in ZrO_2 -Toughened Al_2O_3 . *Journal of the American Ceramic Society*, 69(3), 195-197.
- [5] Lutz, H. E., & Claussen, N. (1991). Duplex ceramics. *The Journal of the European Ceramic Society*, 7, 209-226.
- [6] Deville, S., Chevalie, J., Fantozzi, G., Bartolome, J. F., Requena, J., Moya, J. S., et al. (2004). Development of advanced zirconia-toughened alumina nanocomposites for orthopaedic applications. *Key Engineering Mater*, 264-268.
- [7] Miyoshi, K., Farmer, S. C., & Sayir, A. (2005). Wear properties of two-phase Al_2O_3 - ZrO_2 (Y_2O_3) ceramics at temperatures from 296 to 1073 K. *Tribology international*, 38, 974-986.

- [8] Mandal, N., Doloi, B., Mondal, B., & Das, R. (2011). Optimization of flank wear using Zirconia Toughened Alumina (ZTA) cutting tool: Taguchi method and Regression analysis. *Measurement*, 44, 2149–2155.
- [9] Sommer, F., Landfried, R., Kern, F., & Gadov, R. (2012). Mechanical properties of zirconia toughened alumina with 10–24 vol. % 1Y-TZP reinforcement. *Journal of the American Ceramic Society*, 32, 4177–4184.
- [10] Touaiher, I., Saâdaoui, M., Chevalier, J., Preiss, L., & Reveron, H. (2018). Fracture behavior of Ce-TZP/alumina/aluminate composites with different amounts of transformation toughening. Influence of the testing methods. *Journal of the American Ceramic Society*, 38, 1778–1789.
- [11] Virkar, A. V., Jue, J. F., Hansen, J. J., & Cutler, R. A. (1998). Measurement of Residual Stresses in Oxide-ZrO₂ Three-Layer Composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 71(3), 148–151.
- [12] Ho, S., & Suo, Z. (1993). Tunneling Cracks in Constrained Layers. *The Journal of Applied Mechanics*, 60(12), 890–894.
- [13] Green, D. J., Cai, P. Z., & Messing, G. L. (1999). Residual Stresses in Alumina–Zirconia Laminates. *Journal of the American Ceramic Society*, 19, 2511–2517.
- [14] Hsueh, C. H. (2002). Modeling of Elastic Deformation of Multilayers due to Residual Stresses and External Bending. *The Journal of Applied Mechanics*, 6(12), 9652–9656.
- [15] Barnett-Ritcey, D. D., & Nicholson, P. S. (2003). Failure Prediction Maps for a Model Al₂O₃/c-ZrO₂/Al₂O₃/Al₂O₃ Brittle Polycrystalline Trilayer Composite. *Journal of the American Ceramic Society*, 86(1), 121–128.
- [16] Beranič Klopčič, S., Ambrožič, M., Kosmač, T., & Novak, S. (2007). Tunneling cracks in Al₂O₃/Al₂O₃-ZrO₂ layered composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 27(2–3), 1333–1337.
- [17] Ambrožič, M., & Kosmač, T. (2007). Optimization of the Bend Strength of Flat-Layered Alumina–Zirconia Composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 90(5), 1545–1550.
- [18] Bermejo, R., Pascual, J., Lube, T., & Danzer, R. (2008). Optimal strength and toughness of Al₂O₃-ZrO₂ laminates designed with external or internal compressive layers. *Journal of the American Ceramic Society*, 28, 1575–1583.
- [19] Bermejo, R., Supancic, P., Kraleva, I., Morrell, R., & Danzer, R. (2011). Strength reliability of 3D low temperature co-fired multilayer ceramics under biaxial loading. *Journal of the European Ceramic Society*, 31, 745–753.
- [20] Chang, Y., Bermejo, R., Ševeček, O., & Messing, G. L. (2015). Design of alumina–zirconia composites with spatially tailored strength and toughness. *Journal of the European Ceramic Society*, 35, 631–640.
- [21] Kaplunov, J., Prikazchikov, D. A., & Prikazchikova, L. A. (2017). Dispersion of elastic waves in a strongly inhomogeneous three-layered plate. *International Journal of solids and structures*, 113–114, 169–179.
- [22] Erbaş, B., Kaplunov, J., Nolde, E., & Palsü, M. (2018). Composite Wave Models for Elastic Plates. *Proceedings A, The Royal Society*, 474.
- [23] Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. (1986). *Theory of Elasticity, Course of Theoretical Physics (Vol. 7.)*. Oxford: Butterworth–Heinemann.
- [24] Ambrožič, M., Gorjan, L., & Gomilšek, M. (2014). Bend strength variation of ceramics in serial fabrication. *Journal of the European Ceramic Society*, 34, 1873–1879.

Trajnostni razvoj logističnih procesov

Sustainable development of logistics processes

Sašo MURTIČ¹, Ingrid FRANKO UHERNIK^{2,3}

¹ Fakulteta za industrijski inženiring Novo mesto,
Šegova ulica 112, 8000 Novo mesto, Slovenija
E-naslov: saso.murtic@fini-unm.si

² AREMA Visoka šola za regionalni menedžment,
Kidričeva ulica 28, 3250 Rogaška Slatina, Slovenija
E-naslov: ingrid.uhernik@gmail.com

³ Krka d. d.
Šmarješka cesta 6, 8501 Novo mesto, Slovenija
E-naslov: ingrid.uhernik@gmail.com

Povzetek. Raziskovalno vprašanje: Trajnostni razvoj logistike in logističnih procesov je vezan na tehnološko posodabljanje industrijske proizvodnje in posledično na razvoj posameznih postopkov logistike, kar povezuje industrijo in vse tiste postopke, ki so nujni za pripravo in izvedbo industrijske proizvodnje. Smiselno temu je trajnostni razvoj logističnih procesov sledil razvoju in spremembam industrije ter iskal ustrezne vzroke za obvladovanje posameznih postopkov ali procesov, ki jih industrija zahteva.

Namen raziskave: Namen raziskave je ugotoviti v kakšni obliki in s kakšnimi potenciali lahko logistika in z njo logistični procesi sledijo razvoju industrije in njenim zahtevam. S proučevanjem posameznih pojavov, metod in postopkov industrijskega razvoja, smo iskali načine in metode kako izboljšati dobavo materialov za proizvodnjo. Zbirali in opazovali smo dejanske, empirične in merljive podatke, ki smo jih primerjali in iz njih iskali trditve, skozi katero bi lahko potrdili potrebo trajnostnega razvoja v logistiki.

Metoda raziskave: Uporabili smo metode preučevanja tako posameznih elementov logistike kot logističnih procesov, ter skozi posamezne faze iskali možne rešitve. Metoda razlage nam je dala teoretične poglede in usmeritve v raziskovalno področje. Z empirično metodo pa smo iskali podobne ali enake povezave iz preteklosti, ki jih je mogoče meriti ter s pomočjo določenih kriterijev ocenjevati.

Rezultati raziskave: Pridobljeni podatki razvoja industrije so nam pokazali, da je bila logistika prisotna že v prvi fazi industrijskega razvoja industrije 1.0, vendar sta bili oblika in postopki drugačni ter naravnani tedanji stopnji razvoja. Časovno se je logistika prilagajala razvojnim stopnjam, pri čemer je najvišjo stopnjo dosegla v pozni industriji 4.0, ko je dejansko prevzela vlogo dobave materialov, transporta, skladiščenja in skrbi za okolje. Ugotovili smo, da logistika skozi industrijski razvoj sledi tehnološkemu napredku industrije in razvija metode ter uporablja tehnološke posodobitve, ki kažejo na njen trajnostni razvoj.

Organizacija raziskave: K raziskavi smo pristopili z izhodiščem, da so logistični procesi že po svoji vsebini, uporabi in namenu podvrženi ustreznim industrijski organizaciji, presojanju rezultatov ter vrhunskemu menedžmentu. V ta namen smo iskali pojave in postopke, skozi katere je bilo mogoče oceniti potrebe po tehnološkem, znanstvenem ali drugem razvoju, kar nas je vodilo k posameznim procesom v logistiki. Iskali smo tehnološko oporo v procesih dobave materialov za industrijsko proizvodnjo in skozi njih prišli do prikazanih ugotovitev.

Omejitve raziskave: Raziskovalno področje je bilo po svoji vsebini in namenu vezano na preteklost, sedanjost in prihodni razvoj, zato smo morali proučiti določene postopke in načine zagotavljanja logistike skozi industrijski razvoj v preteklosti. Vezani smo bili na proučevanje posameznih postopkov in procesov logistike v industriji, kjer smo zaradi poslovne, inovacijske, tehnološke in druge skrivnosti vendarle imeli omejitve pri določenih podatkih oz. zavezo, da določenih podatkov ne bomo razkrili.

Ključne besede: procesi, trajnostni razvoj, infrastruktura

Razvrstitev: Pregledni znanstveni članek

Abstract. Research question: Sustainable development of logistics and logistic processes is connected to technological modernization of industrial production and, consequently, to development of individual logistics procedures, which connects industry and all those processes that are necessary for the preparation and implementation of industrial production. It is therefore sensible that the sustainable development of logistics processes followed the development and changes in industry, and sought appropriate leverage to cope with individual processes or processes that the industry requires.

Purpose of the research: The purpose of the research is to determine in what form and with what potentials logistics and logistical processes can follow the development of industry and its requirements. By studying individual phenomena, methods and processes of industrial development, we were looking for ways and methods of improving supply of materials for production. We collected and observed the actual, empirical and measurable data that we compared and looked for from them a claim through which we could confirm the need for sustainable development in logistics.

Research method: We used the methods of studying both individual elements of logistics and logistics processes, and looking for possible solutions through individual phases. The method of interpretation gave us theoretical views and orientations in the field of research. Using the empirical method, we searched for similar or identical links from the past that can be measured and evaluated using certain criteria.

The results of the survey: The obtained data from the development of the industry showed us that logistics was already present in the first phase of industrial development of industry 1.0, but the form and procedures were different and adjusted to the current stage of development. Time logistics were adapted to development levels, reaching their highest level in the late industry 4.0, when it actually assumed the role of supplying materials, transport, storage and care for the environment. We have found that logistics through industrial development follows the technological advancement of industry and develops methods and uses technological innovations that show its sustainable development.

Organization of research: We approached the research with the starting point that logistic processes are already in their content, use and purpose subject to the appropriate industrial organization, judgment of results and top management. To this end, we sought the phenomena and procedures through which the needs for technological, scientific or other development could be assessed, which led us to individual processes in logistics. We were looking for technological support in the processes of supplying materials for industrial production, and we came across the findings through them.

Research limitations: The content of the research area was related to past, present and future developments, and therefore we had to examine certain procedures and ways of providing logistics through industrial development in the past. We were involved in the study of individual processes and processes of logistics in the industry where, due to business, innovation, technological and other secrets, we had restrictions on certain data or commitment not to disclose.

Keywords: processes, sustainable development, infrastructure.

Article Classification: Review of Scientific Paper

1 Uvod

Logistika in logistični procesi so ključni del storitvenih dejavnosti vsake organizacije, zato jih je treba sproti preučevati ter iskati možne iztočnice za posodabljanje, možnosti za zmanjševanje stroškov, uvajati sodobne tehnologije in hkrati ustrezno organizirati vodenje in upravljanje (business and management) procesov, obenem pa iskati ustrezne modele poslovanja. V trajnostnem razvoju gre za več, med seboj povezanih metod in procesov, od katerih je časovno odvisna industrijska proizvodnja, oskrba trga, distribucija, izmenjava blagovnih trendov in mednarodna trgovina. Gospodarstvo mora skozi svoj razvoj iskati ustrezne vzroke obvladovanja konkurence, z udeležbo v mednarodni trgovini pa iskati možnosti, ki bodo omogočile širitev proizvodnje, ustrezno oskrbo, nadzor proizvodnih procesov, uporabo sodobnih tehnologij,

spremljanje trga in pridobivanje potrošnikov. Pomembno vlogo v tem procesu trajnostnega razvoja imajo transportne in druge organizacije, ki skozi svoje postopke dela uravnavajo proizvodne in cenovne tokove. Spoznanja vpliva trajnostnega razvoja logističnih procesov so v pomoč posameznikom, podjetjem in organizacijam (fizičnem in pravnim osebam) za prepoznavanje in posodabljanje posameznih faz poslovanja in obenem inštrument za prepoznavanje določenih aktivnosti, ki jim bodo v prihodnje koristile.

Napredna tehnologija, nove industrijske revolucije, digitalizacija sveta, spreminjanje navad, spreminjanje načina življenja, nove potrebe in mnogo širše so razlogi za razvoj industrije, ki je usmerjena v iskanje tehničnih, tehnoloških in strokovnih rešitev, ki bodo zadovoljile potrebe človeka (potrošnika). Pavšalen pregled industrijskega razvoja nam pove, da je industrija skozi čas in v prostoru postopoma dosegala razvoj, ki je temeljil na osnovnih in manj prepoznavnih tehnologijah, vendar je trajnostni trend iskal nove rešitve, zahteval nove in nove tehnološke procese, skonstruiral nove stroje in inoviral nove procese, ki so bili v pomoč industriji.

Poznavalci industrijskega razvoja navajajo, da se je razvoj industrijskega obdobja začel z industrijo 1.0, ki je zajemala obdobje od konca 18. stoletja in je pomenila uvajanje mehanske proizvodnje, ki jo je tedaj gnala moč vode in vodne pare. Trajnosten razvoj je gnal industrijo in znanost v iskanje novih razvojnih možnosti, kar se je posledično kazalo v razvojnem obdobju industrije 2.0, ki se je nadaljevalo v 20. stoletju, s pričetkom uvajanja električne energije (do tedaj je niso poznali), uvajanja številčne proizvodnje, v proizvodnjo je prvič uveden tekoči proizvodni trak, na katerem so delavci v zaporedju proizvodnje opravljali le določena dela. Največji vpliv na razvoj industrije in gospodarstva je imela II. svetovna vojna, ki je povzročila uničenje iz katerega se je razvila nova industrija 3.0. Njen učinek je bil viden v zgodnjih šestdesetih letih 20. stoletja s pojavom prvih oblik informacijskih sistemov, z uvajanjem prvih pol-avtomatiziranih strojev v posamezne proizvodne procese. Šlo je za začetne oblike strojne in avtomatizirane opreme, ki je opravljala zahtevnejša fizična dela, kot so dviganje, stiskanje, prenos in podobno. Dosežen je bil velik gospodarski napredek v proizvodnji, transportu, skladiščenju in v procesih, ki so bili nujni za pripravo industrijske proizvodnje (nalaganje, nakladanje, dviganje, prenos, notranji transport). Pojavijo se prve oblike informacijsko logističnih sistemov in informacijske tehnologije, ki je služila za med-organizacijsko povezovanje [1]. Značilnosti sodobnejšega trajnostnega razvoja je mogoče iskati v razvoju industrije 4.0, v kateri je narejen velik preskok v razvoju, razmišljanju, tehnologiji in predvsem v potrebah človeka po novejšem produktu, novejši obliki življenja. Razvoj inteligentne industrije 4.0 je v popolnosti zasenčil vsa dotedanja razvojna industrijska obdobja in še danes predstavlja tehnološko najvišjo obliko organizacije industrijske proizvodnje, kar nedvomno še danes vpliva na trg, tržne razmere, na potrošnika. Industrija 4.0 se nanaša na inteligentno mreženje strojev in procesov v industriji s pomočjo informacijske in komunikacijske tehnologije, ki je omogočila neposredno povezovanje subjektov [2]. Razvita je sodobna infrastruktura, razvit je sodoben način transporta, razvite so različne oblike prometa, kar je spodbudilo razvoj nove dobe v industrijskem razvoju [3]. Nova inteligentna (pametna) revolucija je prevzela nadzor nad dosedanjimi dosežki znanosti in industrije. Tedanjo strojno mehanizacijo, avtomatsko vodene stroje, opremo in vodila prevzame v upravljanje računalnik s svojo programsko opremo, kar v povezavi v svetu imenujejo internetno industrijsko povezovanje. To je trajnostni razvoj industrije, katere je cilj s čim manjšimi posegi v naravo in naravne vire, dosegati učinkovite rezultate in zadovoljevati trg ter potrošnika. Novodobna tehnologija je iz analognega sistema vodenja tehnoloških procesov prestopila v projekcijo digitalnega sveta, ki je zagotavljal tisočkrat večje povezovalne zmožnosti. Z njo stroji postanejo avtomatizirani, sami mislijo, vodijo jih programi in oprema, ki so jih v industriji in izven poimenovali roboti. Gre za razvojno obdobje, ki je ustvarilo pametne tovarne, prihaja do virtualnega razmišljanja, virtualnega načrtovanja, virtualne proizvodnje in virtualnega procesiranja [4]. Trajnosten razvoj je proces razvoja, ki se ne ustavi, je gospodarski in vesplošni proces, ki sicer poskuša zagotoviti racionalno rabo naravnih in drugih dobrin, obenem pa v industrijo, gospodarstvo in splošno družbo vnaša nove in nove dobrine. Razvija se nov prelom industrije, ki se kaže v smernicah industrije 5.0, v kateri znanost

in industrija pričakujeta personalizacijo proizvodnje oziroma popolno sodelovanje človeka in novodobnih pametnih naprav (stroji, roboti), iz česar je mogoče sklepati, da bosta človek in stroj popolnoma sodelovala s sistemom. Smisel razvoja bodoče industrije je osebna povezava človeka s strojem in robotom v smislu povečane učinkovitosti in ustvarjalnosti v industriji. Skozi ta pregled razvoja industrije vidimo nenehen trajnostni razvoj, kateremu sledi tudi logistika in logistični procesi. Industrija s pomočjo znanosti in tehnoloških postopkov vseskozi razvija postopke in procese proizvodnje, ki bodo omogočili ohranjanje energije, zdravje ljudi in potrebe potrošnikov. Pri tem je treba razumeti, da je industrija skozi tehnološki razvoj, skozi razvoj interneta, informatike, informacijskih sistemov, računalništva, digitalizacijo vodenje postopkov, uvajanje sodobnejših načinov proizvodnje, uvajanje robotov in pametne tehnologije, dosegala največje gospodarske učinke. Zavedajoč se hitrega gospodarskega razvoja, tehnološkega napredka, gospodarske in trgovske konkurence, hitre spremembe proizvodnje, vse večja digitalizacije proizvodnih in drugih procesov, robotizacije posameznih postopkov je industrija ustvarila potrebo po vlaganjih v razvoj tehnologije za potrebe opravljanja logistike in logističnih procesov v industriji in širše [5].

1.1 Področje raziskave trajnostnega razvoja

V fazi izločitve logistike, logističnih postopkov in logističnih procesov iz dejavnosti proizvodnje ter posvečanje industrije k lastnemu proizvodu, je v industrijskem razvojnem obdobju 4.0 je prišlo do spoznanja, da je vsakršna dejavnost v industriji ali drugje, ki ni neposredno vezana na procese proizvodnje, dejavnost, ki je v breme industrije in je treba te postopke obravnavati ločeno. V tej fazi se postavi tudi vprašanje kaj industrija 4.0 sploh pomeni v trajnostnem razvoju industrije in z njo povezane logistike ter kako bo industrija 5.0 nadgradila obstoječi razvoj. Prišli smo do odgovora ki pove, da v industriji 5.0 vijaki komunicirajo z roboti za montažo, samohodni viličarji skladiščijo blago na visokih policah, inteligentni stroji neodvisno usklajujejo proizvodne procese, zaposleni so povezani s stroji in izdelki so neposredno povezani med seboj. Gre za trajajoči razvoj, ki pokaže proizvodno prilagodljivost in povezanost proizvodnje znotraj industrije in med več različnimi industrijami, povezuje jih digitalno omrežje, povezuje jih internet, zaradi česar so bolj izkoriščeni pametni stroji in usklajeni procesi. Ta pozni del industrije 4.0 ter uvajanje novih parametrov pametne industrije 5.0 pripelje do prepoznavne potrebe po večjem sodelovanju proizvodnega dela industrije s storitvenim delom oziroma logistiko. Pokazalo se je, da je mogoče z uporabo določene tehnologije, z avtomatizacijo in sistemskim vodenjem, zmanjšati stroške logistike v predpripravi in po koncu proizvodnje [6]. Pri razvoju industrije 5.0 znanost in industrija pričakujeta razvoj zanesljive industrije, kjer bodo proizvodne linije zgrajene v proizvodnih modulih, ki bodo omogočili hitro menjavo ogrodij, hitro sestavo novih nalog, izboljšanje produktivnosti in učinkovitosti, posamezni ali individualizirani izdelki pa se bodo lahko proizvajali v majhnih količinah po dostopnih cenah. Trajnostni razvoj industrije in njenih sestavnih komponent gre v smeri osredotočenja na naročnike, na potrošnike, pri čemer se potrošniki in proizvajalci v interesnem področju zblížajo. Zanimivost modularnega sistema je v potrošniškem dizajnu, kjer kupci lahko sami oblikujejo izdelke v skladu z njihovimi potrebami, njihovimi željami. Hkrati je cilj novodobne industrije, da pametni izdelki, ki so že dostavljeni in se uporabljajo, pošiljajo odzivne podatke proizvajalcu, neodvisno od uporabnika. Odzivne podatke industrija uporabi za izboljšanje lastnega izdelka ter na podlagi dognanj tržišču ponudi nove izboljšane izdelke, nove storitve. Trajnostni razvoj sledi algoritmom in izračunu idealne infrastrukture, najbližje in najbolj ustrezajoče poti dostave, saj pametni stroji neodvisno modulu sporočajo potrebo po novih materialih ali po novih izdelkih. Smiselno gre za zgrajeno novodobno pametno omrežje, ki omogoča optimalen pretok blaga, izdelkov, naročil in ki omogoča nenehno med-organizacijsko povezovanje. V modularni proizvodnji se podatki nizajo in so vezani za proizvodnjo ali vezani za stanje v proizvodnji, v logistiki ali v drugih procesih, se kombinirajo in vrednotijo po smernicah industrije 4.0 in z usmeritvami industrije 5.0, v čemer se kaže nenehen in trajen

razvoj. Industrija in znanost pridobljene podatke analizirata ter na podlagi dognanj pripravljata nov razvoj postopkov, smernice dizajna in uporabnosti izdelkov in tako tudi smernice k še bolj sodobni proizvodnji. Gre za znanstveni temelj priprave novih in bolj uporabnih modelov, bodisi v industriji, bodisi v drugi gospodarski veji. Izboljšava se pokaže predvsem v pametni tehnologiji za uporabnika, ki je vezana na senzorje, dotike, telefonsko vodenje in upravljanje, satelitsko vodenje in upravljanje in podobno.

Ta ugotovitev pojasni, da trajnostni razvoj zahteva od industrije, logistike, uporabnika, da ravnajo s proizvodi oz. izdelki tako, da bodo čim dlje uporabni, da je zagotovljena njihova odzivnost in da je zagotovljena sledljivost. Cilj je, da se izdelkom zagotovi podatkovna usmerjenost v celotnem njihovem življenju oziroma njihovi uporabi. Z logističnega pogleda je treba že v osnovi zagotoviti v kakšni obliki se lahko materiali reciklirajo, s čemer se zagotavlja materialni cikel, krožno gospodarjenje in trajnostni razvoj [7].

1.2 Temeljna hipoteza raziskave

Trajnostni razvoj industrije, trajnostni razvoj logističnih procesov in prehod industrije 4.0 v novodobno prihajajočo industrijo 5.0 zahteva uvajanje novih tehnologij, uvajanje sodobnih informacijskih sistemov, ki bodo omogočili izvedbo posameznih postopkov in procesov v fazah predpriprave proizvodnje in kasneje v postopku skrbi za končne izdelke. V spoznanju teh zahtev smo prišli do spoznanja, da je za izravnavo vseh procesov v proizvodnji (spoznali so, da je logistika tako pomembna, kolikor je pomembna proizvodnja) do končnega izdelka, treba vednosti logistike vključevati v pametno tehnologijo (računalniško programirano opremo), ki bo omogočila hitro, natančno in strokovno podporo industriji [8]. V ta namen smo postavili hipotezo »Tehnološki napredek, spremembe in novi postopki v industriji so trajnostni razvoj« ter odprli vprašanje, ali je mogoče sodobno opremo (pametni stroji), ki je uporabljata industrija v proizvodnji, z določeno dodelavo in ustreznim programiranjem, uporabiti tudi v postopkih logistike. S primerjanjem opazljivih, empiričnih in merljivih podatkov, povrženih določenim merilom smo prepoznali smernice industrije 4.0 (FoF Factories of the Future) in zahteve po hitrem odzivu na razvojne zahteve industrije 5.0. V razvojnem zagonu industrije in njene logistike smo prepoznali implementacijo dostavne, nosilne, razdeljevalne, skenirane, tehtalne in druge opreme, s katero smo želeli eliminirati časovne in storitvene napake v posameznih fazah logističnih storitev. Opazovanje, eksperimentiranje in oblikovanje novih postopkov pa se kaže kot rezultat uspešnega raziskovalnega dela, obenem pa je vodilo kako usmerjati raziskavo v nove virtualne raziskave.

1.3 Cilji in vizija začrtane raziskave

O trajnostnem razvoju lahko govorimo ves čas industrijskega razvoja, še posebej je mogoče pojasniti, da je industrija že od sedemdesetih let prejšnjega stoletja dalje uporabljala obstoječo tehnologijo, informacijske sisteme ter novo tehnologijo umeščala v industrijske procese. Tedanji delovni računalniki PC, uporaba informacijske tehnologije in prva računalniško podprta avtomatizacija so počasi revolucionirali industrijo. Kmalu za tem je prišlo do prepoznave digitalnega sistema prenosa podatkov ali digitalizacija sveta, kar je pospešilo razvoj, prišlo je do digitalizacije proizvodnje, s čemer je bila uresničena vizija industrije po novi kakovosti z globalnim povezovanjem prek industrije do vsega sveta (internetna povezava). Proučujoč dosežke znanosti, tehnologije in industrijskega razvoja smo cilje in vizijo naše raziskave usmerili v iskanje elementov, ki bodo pokazali trajnostni razvoj posameznih procesov in zagotavljali natančno, varno, časovno usklajeno dobavo materialov v procese industrijske proizvodnje. Zasledovali smo tehnološki napredek in želeli odpraviti fizične oblike dela v logistiki ter skladno z novo tehnologijo uporabiti metode in dosežke, ki bodo omogočili trajnostni razvoj logističnih procesov. Pot je vodila k zagotovitvi logističnih postopkov in procesov, ki bodo zagotavljali hiter in nemoten potek industrijske proizvodnje. V ta nam smo iskali skladnosti uporabe tehnoloških

sistemov »Just in Time«, ki zagotavlja hitro dobavo proizvodnih materialov. Da bi to dosegli smo zaradi časovnih usklajenosti uporabili avtomatizirano opremo (robote) za zagotavljanje procesov v predpripravi, transportu, pakiranju, skeniranju, pakiranju, skladiščenju in nalaganju. V smislu raziskave je bila naša vizija usmerjena v iskanje trajnostnih načinov, kako izvajati logistiko v industrijski proizvodnji, kako uporabiti strojno opremo za izboljšanje procesov logistike in kako industriji omogočiti, da njena proizvodnja teče nemoteno. V postopku uvajanja tehnologije v logistične procese je bilo treba uporabiti digitalno omrežje z različnimi vmesniki, med različnimi uporabniki in med različnimi dobavitelji, kar je zahtevalo nenehno iskanje ustreznih rešitev in spremljanje industrijske proizvodnje. Cilj je bil s pomočjo s pomočjo proučevanja pojavov, z zbiranjem opazljivih, empiričnih in merljivih podatkov, podvrženih merljivemu razmišljanju, pridobiti nova znanja za izboljšanje industrijske proizvodnje.

2 Teoretična izhodišča

2.1 Smernice teoretičnega trajnostnega razvoja logističnih procesov

Smernice teoretičnega trajnostnega razvoja so naravnane smernicam industrijskega razvoja, ki sledi razvoju industrije 4.0 in v razvoj umeščajo vse novosti, ki omogočajo hitrejša in enostavnejša opravljanje teh procesov. Strokovnjaki predstavljajo digitalizacijo kot fenomen in orodje za upravljanje pametnih strojev in navajajo, da je digitalizacija že zdavnaj prispela v srednji razred. V industrijskem smislu gre za navajanje, da tehnologija ni le primat za vodilni in vodstveni sloj ljudi v industriji ali širše, temveč je tehnologija vključena v procese proizvodnje, kar nedvomno vodi v spremembi poslovnih modelov, izdelkov in procesov ter spreminja zahteve po delovni sili. Smernice so ravno naravnane v poučevanje zaposlenih, v osvajanje različnih veščin, s katerimi bodo sledili digitalizaciji dejavnosti industrije [9]. Smernice zajemajo digitalno produkcijo industrije 4.0 in uvajanje delovnih procesov, kjer so avtomatizirani stroji nosilci opravljanje dela in delovna sila le kot nadzornik. Gre za splošno sporazumevanje in delovanje človeka in stroja v digitalnem svetu [10]. Smernice industrije 4.0 kot pobudnik, kot moderator različnih interesov in ambasadorev zagotavljajo pred konkurenčno izmenjavo vseh pomembnih deležnikov iz politike, gospodarstva, znanosti, sindikatov in združenj. Navedemo jo lahko kot platformo, ki je ena vodilnih svetovnih industrijskih 4.0 omrežij, ki razvija osnovne koncepte v delovnih skupinah o tem, kako se spoprijeti z izzivi na poti do industrije 5.0, daje konkretna priporočila znanosti, gospodarstvu in razvojni politiki. Posledično razvojne smernice omogočajo nacionalne in mednarodne izmenjave s številnimi dvostranskimi in večstranskimi sodelovanji, zlasti na področju varnosti in standardizacije informacijske tehnologije [11].

Specifika trajnostnega razvoja v industriji je v njenem nenehnem tehnološkem in organizacijskem razvoju ter iskanju naprednih tehnoloških, informacijskih, digitalnih in drugih elementov, ki naj bi omogočili nemoteno industrijsko proizvodnjo, zmanjševali stroške in zagotovile trg. Te smernice so uvajanje popolnoma avtonomnih procesov predpriprave, proizvodnje in posebno postopkov v proizvodnji, ki naj bi omogočili boljšo pripravo blaga za kupca [12]. Gre za trajnostni razvoj, ki se odraža skozi uvajanje avtonomnega pakiranja, paletiziranja, skladiščenja, dobave itd., pri čemer dosledno uporablja smernice industrije 4.0 [13]. Industrija si želi skozi trajnostni razvoj zagotoviti popolnoma avtonomni sistem obdelave podatkov, naročil, priprave plana in proizvodnje. Cilj je združevanje matematične optimizacije z podatkovno inteligenco, kar je podlaga za razvoj orodij IT za načrtovanje in delovanje v industrijskih proizvodnih sistemih, pri čemer upošteva dosežke vitke proizvodnje [14]. Gre za niz orodij za odkrivanje ter sprotno odpravo neželenih izgub, izboljšanje kakovosti, skrajševanje proizvodnih časov in zmanjševanje stroškov.

2.2 Pomembnost trajnostnega razvoja logističnih procesov v industriji

Delitev posameznih procesov industrijske proizvodnje v notranje (čista proizvodnja) in zunanje (logistika) je v prvotni fazi pomenilo skrb za proizvod in usmerjanje vseh tehničnih in tehnoloških procesov v dizajn, izboljšanje in privlačnost posameznega izdelka. Ker bi zapostavljanje logistike časovno pomenilo oviranje proizvodnje, je prišlo so spoznanja, da je logistika za industrijo ključna, saj gre za vrsto pripravljalnih in izvedbenih del in nalog, brez katerih industrija ne more izvajati svojega poslanstva. Nujno je bilo, da industrija v procesu razvoja industrije 4.0 logistiki nameni možnosti razvoja, ki bo sledil njeni proizvodnji. V fazi trajnostnega razvoja posameznih postopkov, posameznih nalog ali procesov logistike, smo iskali izhodišča za uporabo sodobnih tehnologij, ki jih že nudijo smernice industrije 4.0. Poskusili smo z uporabo sistema kanban, ki pomeni razdeljevanje nalog z oskrbo delovnih mest [15] in ki deluje po načelu vlečenja (»pull«), brez napovedi, na odpoklic količin v sami proizvodnji. Sistem pojasni, da zaznavanje potreb in pravočasna oskrba potekata s pomočjo signala na kartici ali odčitanju praznega zaboja ali odčitanju praznega prostora. Torej so tip proizvoda in število kosov, ki jih je potrebno iz skladišča pripeljati v proizvodnjo ali proizvesti zapisani na kanban kartici. Porabniku (robotu ali stroju) kanban kartica pove, kaj mora v nekem trenutku pripeljati, proizvajati, odpeljati in koliko. Porabnik vedno vzame le toliko blaga, kolikor ga trenutno potrebuje, proizvajalec pa mora nato to količino zopet dopolniti. Sistem kanban nam pojasni, da je primeren za veliko industrijsko serijsko proizvodnjo, kjer je manj nihanj po potrebah po spremembah in kjer so zagotovljeni enakomerni in uravnoteženi proizvodni procesi [16]. Skozi sistem se kaže pomembnost razvoja posameznih sklopov in celote.

2.3 Avtonomna oprema kot ekskluzivna podpora trajnostnemu razvoju logističnih procesov

Kadar uporabljamo pojem avtonomne naprave v industriji, iščemo ekskluzivna izhodišča za podporo trajnostnemu razvoju logističnih procesov, ki naj bi posodobili opravljanje posameznih opravil. Prepoznali smo, da so lahko ekskluzivna podpora v industrijski proizvodnji, za opravljanje logističnih nalog AGV SMARTCART 100TT (Automated guided vehicle), pametni viličarji in druge transportne naprave, različnih oblik. Ugotovili smo, da gre za avtonomne naprave, ki jih uporabljajo za prevoz blaga in materialov iz priročnih skladišč v proizvodnjo [17]. Gre za pametne naprave nove generacije, ki same odločajo, same izvajajo procese, same se energetske obnavljajo (polnijo baterije). Delujejo s pomočjo sledenja po metodi fiksnih sledi po začrtani poti, ki so v programu natančno kodirane, pri čemer robot sledi magnetnemu traku (ali drugi obliki), ki je njegova infrastruktura, uporablja RFID tehnologijo in je povezan v proizvodni sistem, ki nadzoruje poti več robotov. Gre za prve avtonomne naprave, ki jih je mogoče uporabiti in ki opravljajo logistiko in logistične procese v neposredni povezavi v industrijski proizvodnji. Prepoznavne so še druge oblike avtonomnih naprav, ki izvajajo prenos materialov na določenih točkah, kot so roboti v obliki roke, ki izvajajo določene gibe v fazah proizvodnje, kjer človek tega ne more, v razvoju pa so še druge oblike, ki jih preverjajo in testirajo v virtualnih postopkih.

3 Metode

3.1 Potreba po trajnostnem razvoju v logistiki

Na splošno velja definicija, da je trajnostni razvoj zamisel o razvoju človeške družbe, pri katerem bi se izognili nevarnosti, ki jih povzroča osredotočenje na količinski materialni razvoj z izčrpanjem naravnih virov ali onesnaževanjem okolja. Gre za človeški poskus ohranjanja biološkega raznovrstnosti v okolju in prostoru. V smernicah industrije 4.0 pa je razumeti, da gre za skrb za nosilnost naravnih sistemov s socialnimi izzivi, s katerimi se sooča človeštvo. Ta skrb se je z razvojem industrije začela prenašati ter uporabljati v industriji, na kar so leta 1970 opozorili ekologi. Trajnosten razvoj postopkov v industriji, v gospodarstvu in povezano s tem

tudi v logistiki so povezali z rastjo in poseganjem industrije v naravo ter opozorili na nujnost vzpostavitve stabilnega in okolju zdravega gospodarstva. Že iz tega dejstva je razumeti, da je industrija iskala sprejemljive možnosti razvoja gospodarske vzdržnosti, kjer gre za institucionalni okvir, po katerem ljudje proizvajajo, zamenjujejo ter trošijo dobrine in storitve, ki so potrebne za zadovoljevanje njihovih želja in potreb.

Trajnostni razvoj se skozi čas količinsko in kakovostno spreminja, lastnost spreminjanja pa je mogoče opredeliti matematično, časovno, ekonomsko ali s pojmom gospodarske rasti in gospodarskega razvoja. Gospodarska rast vključuje rast ustvarjenih dobrin in storitev, kar lahko industrija doseže količinsko z večjim obsegom dela, kapitala, energije ali pa kakovostno z večjo produktivnostjo in učinkovitostjo kot posledico uporabe znanja pri obstoječih proizvodnih dejavnikih. Svetovna industrija je v neprestanem gibanju, razvoju in iskanju najboljših razvojnih rešitev in nikoli se ne ustavi. Globalizacija je povzročila hudo gospodarsko konkurenco, zato prihaja do hitrih sprememb tako na tehnološkem kot organizacijskem področju, kar neposredno vpliva na trajnostni razvoj industrije in celotne družbe. Ta proces se nadaljuje, spreminja in išče nove izzive ter prostor za svojo ekspanzijo.

Industrija se razvija samo in zgolj zaradi spreminjanja potrošnikovih želja, potreb, navad, statusa, pomembnosti, populizma in podobno, saj gre za navade na strani potrošnje, ki se jim mora proizvodnja prilagajati. Industrijski oziroma trajnostni razvoj znotraj industrije je posledica sočasnih in med seboj prepletenih procesov na strani proizvodnje in potrošnje. Avtonomna tehnologija, avtonomna oprema pa sta dejavnika, ki lahko in ki bosta trajno vplivala na razvoj, zato je industrija nenehno usmerjena v iskanje novih in novih rešitev. Ker je logistika del industrijske proizvodnje v globalu, je mogoče razumeti, da tudi logistika sledi enakim usmeritvam.

3.2 Tehnološka podpora trajnostnemu razvoju v logistiki

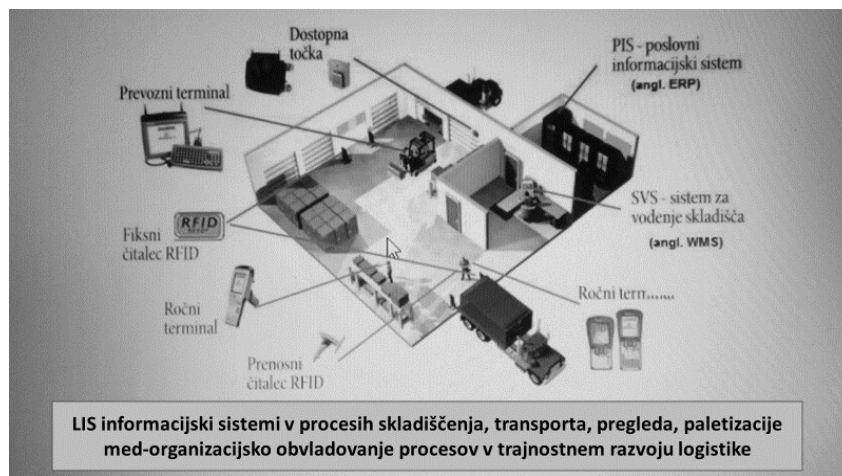
Kadar govorimo o avtonomnih strojih ali pametni opremi na področju logistike je treba pojasniti, da je prisotna že od začetka razvoja industrije in industrijske proizvodnje. Sicer je ta oprema prvotno predstavljala oblike naprav, ki so lahko izvajale težja dela, kot so dviganje, shranjevanje, razvrščanje in podobno. Uporaba sodobna avtonomne naprave ali robota AGV SMARTCART 100TT (ali drugih uporabnih avtonomnih naprav, strojev, robotov) v predpripravi za proizvodnjo in v sami proizvodnji, je predstavljalo novost v posodabljanju industrijske proizvodnje. Naprave so najprej pričeli uporabljati v avtomobilski industriji, industriji bele tehnike, farmaciji, v industriji prehrane in kasneje mnogo širše. Danes gre za avtonomno napravo v obliki robota, ki samostojno in po določenem vzorcu pripelje materiale v proizvodnjo za industrijsko vgradnjo, in sicer iz priročnega skladišča industrije ali od drugod. Lahko opravlja dela med fazami proizvodnje ali odvaža končne izdelke v procese priprave za skladiščenje ali transport [18]. Uvedba avtonomne naprave ali opreme je v začetni fazi pomenila zmanjševanje števila delovnih mest, zmanjšanje operaterjev in uvedbo računalniškega nadzora. Tehnološka podpora je za industrijo pomenila cenejše storitve, manj zaposlenih in več prihranka [19]. Tehnološka podpora z uvedbo AGV in avtonomne opreme v opravljanje logističnih procesov je pomenilo trajnostni razvoj industrije in gospodarstva, pomenilo je natančne in varne procese, doseganje kakovostnih storitev, odpravo napak in odpravo reklamacij. Logistični procesi v nekem grobem kontekstu pomenijo potek materialov od dobavitelja, preko internih proizvodnih procesov do kupcev. Kako to poteka je odvisno od organizacije postopkov, uporabe znanstveni metod in funkcionalnih postopkov, ki neposredno omogočajo izvedbo posameznih procesov. Pomembno je, da so postopki ali procesi usklajeni, vitki, da ne povzročajo izgub, da je vzpostavljeno primerno upravljanje, da ima ustrezen informacijski sistem in tehnološko podporo. To nam pojasni, da je učinkovita logistika ključna za industrijsko proizvodnjo in predvsem je pomembna kot stroškovni faktor v ceni izdelka. Zato je tehnološka podpora nujna, ta podpira trajnostni razvoj, podpira razvoj industrije, izboljšuje procese in skrbi za razvoj industrijske

inteligence. Gre za intelektualni kapital človeka in stroja, ki se združita v procesu industrijske proizvodnje.

4 Rezultati

4.1 Konkretna podpora trajnostnemu razvoju logističnih procesov

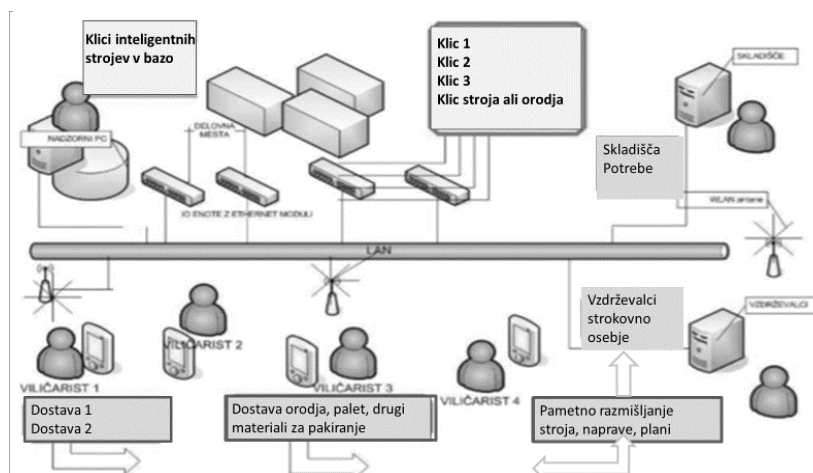
Industrija in celotno gospodarstvo stremita k uvajanju pametne tehnologije in spremljanju razmer na svetovnem trgu kakor ga zahtevajo smernice in industrijski razvoj 5.0. Ta potreba je posebej vidna v avtomobilski industriji, ki je uvedla nov virtualni svet, na katerem temelji nov sodobni in tehnološko izboljšan način proizvodnje. S pomočjo digitalizacije, s pomočjo računalniške opreme in simultanih programov razvojni oddelki v avtomobilski industriji razvijajo virtualne programe, ki omogočajo nastanek namišljenih posameznih orodij za izdelavo delov motornih vozil. Sočasno z razvojem novih tehnologij se razvijajo tudi trendi posodabljanja v logistiki, ki se kažejo v skladiščih, kjer dela opravljajo robotizirani viličarji in ostala robotizirana transportna sredstva. Uporabljajo glasovno vodenje operaterjev ali delavcev, na ustreznih mestih so nameščeni sistemi za natančno lociranje pozicije delavca ali transportnega sredstva, nameščeno je vizualno usmerjanje delavcev za vodenje procesov, za vodenje avtonomnih naprav uporabljajo umetne inteligence. Podobno je tudi na področju organizacije transporta, kjer planiranje in optimizacija transportnih procesov potekata v okviru interaktivnega sodelovanja različnih informacijskih sistemov. V čistem storitvenem področju pa uporabljajo robotizirana avtonomna vozila, ki opravljajo tista težja in zahtevnejša dela, ki so za človeka nevarna ali pa predstavljajo izgubo časa. V teh postopkih je močna tendenca uporabe alternativnih virov energije za opravljanje različnih logističnih procesov in postopkov. LIS ali logistični informacijski sistem je v podporo pri pridobivanju ustreznih informacij o skladišču ali transportu in obenem podpora v med-organizacijskem povezovanju različnih organizacij ali različnih industrij. Povezane so vse oblike skladiščnih in transportnih zmogljivosti, vključena je vsa infrastruktura (cesta, železnica, voda in zrak), vključena so prav tako vsa transportna sredstva. Standardizirani so ustrezni zabojniki (kontejnerji), ki so v procesu skladiščenja in transporta prirejeni tako, da jih v transportu lahko uporabljajo vse oblike transportnih vozil. V novodobnem transportu se vse bolj uporabljajo plinska ali električna vozila (tu je viden konkreten način podpore trajnostnemu razvoju in varstvu okolja). Dosežen je tudi velik napredek pri razvoju mobilnih terminalov in komunikacijskih tehnologij, ki omogočajo stalno povezanost v internet in majhne terminalske naprave z vozili na poti, s skladišči, z naročniki ipd.. Danes je nemogoče konkurenčno nastopati na trgu, če ni ustrezne podpore informacijskega sistema, če ni ustrezne uporabe sodobne tehnologije, saj je brez informacijske podpore, črtnih kod in GPS sistema navigacije logistike nemogoče opravljati logistiko. Uvajanje novih tehnologij, upoštevanje smernic prihajajoče industrije 5.0 zahteva uporabo RFID in robotiziranih manipulatorjev. Konkretna podpora se kaže v razvoju robotiziranega in inteligentnega transporta, popolni sledljivosti blaga na poti, v uvajanju novih načinov identifikacije z enodimenzionalnimi, dvodimenzionalnimi in več dimenzionalnimi črtnimi kodami, radio frekvenčno identifikacijo in širše. S konkretno podporo tehnologije industrije na dolgi rok znižujejo stroške, povečuje svojo ponudbo, širi proizvodnjo [20].



Slika 2. LIS

S pomočjo LIS, tehnologije in računalniške opreme smo iskali napredne postopke izvajanja logističnih procesov in obenem odpravljali možne napake in težave. Cilj je bil z novodobno inteligentno tehnologijo pospešiti logistično delo, odpraviti nastajajoče napake ter preprečiti logistične in proizvodne reklamacije, kar je po smernicah industrije 5.0 zahtevalo uporabo znanih in že preizkušenih metod v svetu. V procesu so številne tehnike in postopki trajnostnega razvoja logističnih procesov, ki se kažejo v zaporedju in omogočajo hitrejšo proizvodnjo, natančne postopke, skrajšanje časa posameznih storitev in manjše stroške.

Vitka proizvodnja je splošna filozofija upravljanja procesov v industriji, ki pomaga izboljšati celotne vrednosti ključnih kazalnikov (KPI Key Performance Indicator). Gre za niz orodij za odkrivanje in stalno odpravljanje izgub, izboljševanje kakovosti, skrajševanje proizvodnih časov in zmanjševanje proizvodnih ali logističnih stroškov. Sistem je bil razvit v TPS – Toyota Production System, kjer so vzpostavili filozofije organiziranja proizvodnje in logistike, vključno z medsebojnim vplivanjem dobaviteljev in kupcev. Proizvodnja je podprta z različnimi orodji, med katerimi sta najbolj znana procesa stalnega izboljševanja procesov kaizen in poka-yoke. Cilj vitke proizvodnje je doseči enakomeren tok dela v celotni proizvodnji, ki bi sama zaznavala napake, zastoje in jih nadomestil z novimi, naprednimi tokovi. Uporaba japonske metode kaizen je v industriji in v logističnih procesih pomenilo nenehno izboljševanje, ki je zasnovan kot dolgoročen proces, integriran v industriji. Osnovna namen uporabe novodobne metode je bil nenehno izboljševanje procesov, uporaba novih znanj, izkušenj in veščin vseh zaposlenih v podjetju. V procesu trajnostnega razvoja industrija v izboljšanju kakovosti, produktivnosti in učinkovitosti proizvodnje uporabljajo še druga orodja, metode, tehnike in strategije (6 sigma, 5S, 20 ključev, celovito upravljanje produktivnosti, Total Productive Maintainmenc, SMED, Just in Time in Just in Sequence).



Slika 3. Shema pretoka informacij v procesu izvajanja logističnih procesov po metodi KANBAN

V trajnostnem razvoju logističnih procesov je uporabna tudi metoda Total Productive Maintenance, ki se odraža v celovitem produktivnem vzdrževanju. Gre za metodo menedžmenta za izboljšanje učinkovitosti inteligentne opreme, je univerzalna in jo je mogoče uporabiti v vsakem proizvodnem sistemu, ne glede na razvojno stopnjo organizacije. V ospredje postavlja vzdrževanje, kot potreben in zelo pomemben del poslovanja, ne odraža pa se kot neprofitna dejavnost ali strošek čeprav je prisotna v vseh oblikah industrije. Njene značilnosti se kažejo v odpravljanju vseh vrst izgub proizvodne učinkovitosti, vključuje vse zaposlene in se opira na skupinsko delo pri uresničevanju idej za izboljšanje, krepi občutek delavca za lastništvo, za njihovo opremo in delovni prostor, vzpostavlja sisteme za vzdrževanje opreme in proizvodnjo ter podaljšanje življenjske dobe strojev in omogoča vsem zaposlenim, da stalno pridobivajo dodatne sposobnosti in znanja. Tudi metoda SMED (Single Minute Exchange of Dies) ima pomemben vpliv na trajnostni razvoj logističnih procesov. Gre za določanje minimalnega časa nastavitve orodij, orodij ali priprava pametnega stroja, proizvodne linije za funkcioniranje za drug proizvod. Nastavitve opreme, stroja, proizvodne linije za drug proizvodni proces traja določen čas, ki ga metoda SMED poskuša skrajšati. Cilj je čim hitreje usposobiti in prilagoditi stroje za proizvodnjo drugega proizvoda, novejšega proizvoda. Uporabne so še mnoge druge metode, ki je v tem kontekstu ni mogoče omenjati.

4.3 Pričakovani učniki trajnostnega razvoja v logističnih procesih

Prepoznavanje sofisticiranih metod in sistemov izvedbe logističnih procesov, vzpostavljanje avtomatskega generiranja posameznih procesov v industriji, priprava proizvodnje, priprava plana iz naročil kupca, priprava strojev in naprav itd. zahteva uvajanje sodobnejših logističnih postopkov podprtih s tehnologijo, logističnih informacijskih sistemov, poslovnih informacijskih sistemov in podpornih inštrumentov proizvodnje. Pričakovanja so bila dosežena na različnih področjih, in sicer že pri uvedbi AGV naprave (transportni robot), pri uvedbi pametnih linij, pametnih viličarjev in druge opreme, ki je z uporabo prinesla določene učinke, ki se jih je dalo meriti v času, v številu izvedenih operacij, v količini obdelanega materiala, v teži itd.. Odpravljeni so posamezni potratni procesi, posamezni neučinkoviti postopki in operacije, ki so pomenile fizično prenašanje materialov, stalno zapisovanje in matematično obdelavo podatkov, odpravljene so naloge, ki so pomenile potratno časa in prostora in uvedeni novi postopki, nove operacije, ki pomenijo napredek celotne industrijske proizvodnje in ki pomenijo trajnostni razvoj logističnih procesov v smislu razvoja industrije 4.0. Sistem novodobne inteligentne opreme v logistiki se razvija kot produkt vseh metod, navedenih v tem poglavju, dosežen je avtonomnem

sistem in personalizacija avtonomne opreme oziroma sodelovanje človeka in stroja. Dosežen je spoj človekovega znanja in pametnega stroja, kar skupaj tvori intelektualni kapital industrije. V teh postopkih je razviden trajnostni razvoj logističnih procesov, prav tako so vidni učinki, ki se kažejo v natančni obdelavi podatkov, izvedbi posameznih postopkov, strokovnem izvajanju logističnih procesov in ustrezni edukaciji operaterjev v industrijski proizvodnji. S prikazanimi postopki, z uporabo avtonomne opreme, z uporabo sodobnih informacijskih, poslovnih in drugih povezovalnih sistemov smo potrdili našo hipotezo, da je razvoj logističnih procesov v industriji ali drugje potreben stalnega trajnostnega razvoja, stalne nadgradnje, stalnega izpopolnjevanja in posodabljanja.

5 Razprava

V konkretnem primeru smo iskali podatke in rezultate uporabe avtomatizirane opreme, inteligentnih naprav in logističnih sistemov, ki bi podprli izvajanje logističnih procesov in okrepili industrijsko proizvodnjo. Cilj je bil skozi trajnostni razvoj avtomatizirati in izpopolniti posamezne procese in postopke logistike in logističnih procesov in tako industriji zagotoviti prihranek v času, prostoru, v sredstvih in porabljenih materialih. Gre za rezultat skupinskega dela, izkušenj, podkrepljenih z metodami iskanja rešitev za zmanjševanja izgub v procesih priprave in proizvodnje ter v zaključnem delu shranjevanja izdelkov in za izboljševanje pretočnosti ter produktivnosti v avtomobilski industriji. Čeprav smo vedeli, da je v znanosti (v praksi veliko manj) vse relativno in je vse mogoče nadgraditi, dopolniti, dodelati, spremeniti, inovirati, smo vztrajno iskali tiste elemente, tiste modele in prednosti, ki bi dali odgovor kaj vse se da storiti, da bi industriji zagotovili konkurenčno prednost, izboljšanje proizvodov, zagotavljanje trga. Področje trajnostnega razvoja v industriji še zdaleč ni zaključeno in bo sledilo tehnološkemu, materialnemu, sistemskemu in raziskovalnemu področju trajnostnega razvoja v industriji. Intelektualni kapital industrije se krepi, razvija in osvaja vesoljne širine, zato je v prihodnosti pričakovati nove spremembe, nove tehnologije, nove metode in nov razvoj. To nam pove, da raziskava ni zaključena, da se nadaljuje v cilju iskanja novih možnosti, boljših rešitev in konkurenčne prednosti.

6 Zaključek

Ugotovili smo, da trajnostni razvoj logističnih procesov predstavlja postopke, informacije, opremo, sisteme, avtomatizacijo, vizualizacijo, digitalizacijo in številne druge postopke, ki opredeljujejo informacije, povezovanje in sodelovanje kot ključni faktor za pomoč industriji pri njenem obvladovanju proizvodnje in doseganju razvoja. Naloga trajnostnega razvoja je preobraziti industrijo, preobraziti človeka in njegove potrebe in vzpostaviti proizvodnjo, ki bo naravnana v varovanje človekovega okolja, v izdelavo tistih artiklov in naprav, ki bodo v pomoč človeku v razvoju. Naloga trajnostnega razvoja nuditi široko podporo razvoju intelektualnega kapitala industrije in širitvi industrijskih programov. Trajnosten razvoj logističnih procesov je treba razumeti kot podporo in razvoj vseh področij industrijske proizvodnje v cilju obvladovanja konkurence, zagotavljanja človeških potreb, kakovosti okolja in socialne pravičnosti kot tri dimenzije (triple bottom line) pri kateri je osnovni vektor tehnologija, zato je to nenehno razvijajoči se proces. Uvedba pametne tehnologije je glavni modul trajnostnega razvoja in posodabljanja industrije, zato je vsako posodabljanje proizvodnje, logistike in logističnih procesov sistemsko izboljšanje. Postavili smo si hipotezo, da je trajnostni razvoj logističnih procesov pomemben dejavnik v razvoju in konkurenčnosti industrije, kar smo skozi našo raziskavo tudi potrdili. Praktični izsledki in proučevanje literature so nam dali teoretično podlago za potrditev naše predpostavke, kar se je pokazalo za potrebno. Področje raziskave globoko sega v razvoj industrije 4.0 in z uporabo avtomatizirane opreme in inteligentnih sistemov presega meje dosedanjega razvoja, kar nam pove, da se počasi razvijajo smernice industrije 5.0, ki bo popolnoma digitalizirala svet in vse okoli njega.

Reference

- [1] Zelenika, R., & Pupovac, D. (2008). *Menedžment logističkih sustava*. Rijeka: Ekonomska fakulteta u Rijeci.
- [2] Plattform Industrie 4.0 : Was ist Industrie 4.0? (2017, 17. may). Pridobljeno na <http://www.plattform40.de/I40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>
- [3] Zelenika, R. (2010). *Ekonomika prometne industrije*. Rijeka: Ekonomski fakultet u Rijeci.
- [4] Westkämper, E., Spath, D., Constantinescu, C., & Lentjes, J. (2013). *Digitale Produktion: Ergebnisse aus dem Innovationscluster Digitale Produktion*. Berlin: Springer.
- [5] Wildemann, H. (2009). *Entwicklungstrends in der Automobil- und Zulieferindustrie*. Empirische Studie, München: TCW Transfer-Centrum.
- [6] Wiendahl, H.P. (2001). *Erfolgsfaktor Logistikqualität. Vorgehen, Methoden und Werkzeuge zur Verbesserung der Logistikleistung*. Berlin Heidelberg: Springer.
- [7] Zelenika, R. (2007). *Upravljanje logističnim mrežama, poglavje Informacijske tehnologije – čimbenik upravljanja logističnim mrežama*. Rijeka: Ekonomski fakultet u Rijeci.
- [8] Nyhuis, P., & Wiendahl, H. P. (2009). *Fundamentals of Production Logistics, Theory, Tools and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- [9] Bergmann, B. (2007). Samopodoba strokovne usposobljenosti. V J. Erpenbeck & L. von Rosenstiel (ur.), *Handbuch der Kompetenzmessung*. Stuttgart: Schaeffer-Poeschel.
- [10] Hartmann, E. (2015). Oblikovanje dela za industrijo 4.0: stare resnice, novi izzivi. V A. Botthoff in E. Hartmann. *Prihodnost dela v industriji 4.0*. Berlin: Springer.
- [11] Schäfers-Hansch, C. (2015). Pogled v prihodnost nadaljnega izobraževanja - Industrija 4.0 z vidika razvoja kadrov. V S. Franken (ur.), *Industrie 4.0 in njeni učinki na svet dela*. Aachen: stesalniki.
- [12] Nyhuis, P., & Seitza, K.F. (2015). *Cyber-Physical Production Systems Combined with Logistic Models – A Learning Factory Concept for an Improved Production Planning and Control*. Germany..
- [13] Mayr, A., Weigelt, M., Grimm, S., Erll, A., Potzel, M., Franke, J., & Kühl, A. (2018). *Lean 4.0 - A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0*. Germany.
- [14] BMWi: Mittelstand 4.0 - Digitalni produkcijski in delovni procesi. (2018, 1. march). Pridobljeno na <http://www.mittelstand-digital.de/DE/Foerderinitiativen/mittelstand-4-0.html>
- [15] Črešnjak, V., & Bastič, M. (2012). *Kanban kot gradnik vitke proizvodnje* (Diplomska naloga). Univerza v Mariboru, Ekonomsko-poslovna fakulteta, Maribor.
- [16] De Lestrang, G. (2017). Ali HR oddelek upočasni digitalno preobrazbo? *Upravljanje znanja, revija za menedžerje*, 6/7.
- [17] Murtič, S., & Franko Uhermik, I. (2018). Roboti v funkciji izvajanja logistike. Priložnosti, potenciali, izzivi, 3. mednarodna znanstvena konferenca razvoja industrijskega inženiringa, Slovenija, Otočec pri Novem mestu, 16. april 2018.
- [18] Zelenika, R. (2001). *Prometni sustavi, tehnologija, organizacija, ekonomika, logistika i menadžment*. Rijeka: Ekonomski fakultet u Rijeci.
- [19] Mehama, J., Nawi, M., & Zhong, R. Y. (2018). *Smart automated guided vehicles for manufacturing in the context of Industry 4.0*. Texas: 46th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 46.
- [20] Nieto, A. M., Gooep, V., & Caillaud, E. (2017). *From Factory of the Future to Future of the Factory: Integration Approaches*. France: IFAC.
- [21] Westkämper, E., Spath, D., Constantinescu, C., & Lentjes, J. (2013). *Digitale Produktion: Ergebnisse aus dem Innovationscluster Digitale Produktion*. Berlin: Springer.

Tehnološko izboljšanje logističnih postopkov v industriji

Technological improvement of logistics processes in industry

Ingrid FRANKO UHERNIK^{1,2}, Sašo MURTIČ³

¹AREMA Visoka šola za regionalni menedžment,
Kidričeva ulica 28, 3250 Rogaška Slatina, Slovenija
E-naslov: ingrid.uhernik@gmail.com

²Krka d. d.
Šmarješka cesta 6, 8501 Novo mesto, Slovenija
E-naslov: ingrid.uhernik@gmail.com

³Fakulteta za industrijski inženiring Novo mesto,
Šegova ulica 112, 8000 Novo mesto, Slovenija
E-naslov: saso.murtic@fini-unm.si

Povzetek. Raziskovalno vprašanje: Logistika je storitvena dejavnost v industriji, gospodarstvu, javni upravi in povsod kjer je potrebno opraviti določene priprave dela, izpeljati določene procese ali opraviti določene faze dela, ki omogočajo nadaljevanje proizvodnje, prodaje, oskrbe in podobno. Gre za več, med seboj povezanih procesov, katere je mogoče opraviti z uporabo določenih strojev, računalniške opreme, računalniških programov.

Namen raziskave: Sodobna tehnologija, huda mednarodna gospodarska in trgovska konkurenca, hitre spremembe proizvodnje, vse večja digitalizacija proizvodnih in drugih procesov, robotizacija posameznih postopkov tudi v logistiki in vse večja vlaganja v razvoj tehnologije so dejavniki, ki spodbujajo raziskave o možnostih uporabe novodobne tehnologije v procese logistike. Namen v raziskavi je bil ugotoviti kako in s kakšnimi razvojnimi potenciali lahko v logistiki uporabljamo novodobno tehnologijo ter kakšni bi bili učinki te uporabe.

Metoda raziskave: Proučevali smo posamezne elemente logistike in logističnih procesov ter skozi njihove faze spoznavati učinke tehnologije. Rezultate je mogoče razlagati različno in obenem iskati ustrezne rešitve, ki bi opravičile uporabo tehnologije v logistiki. Gre za znanstveno metodo proučevanja posameznih pojavov v industriji in pridobivanje novega znanja za izboljšanje posameznih procesov. Metoda temelji na zbiranju opazljivih, empiričnih in merljivih podatkov, ki so podvrženi določenim merilom razmišljanja in se lahko odražajo v izboljšanju procesov, časovni ali cenovni enoti.

Rezultati raziskave: Industrija išče možnosti zmanjševanja stroškov logistike in storitev v pred pripravi, ki jih kupuje na prostem trgu. Raziskava je pokazala, da je z uvajanjem nove tehnologije v faze opravljanja logističnih postopkov mogoče stroške prepoloviti, izboljšati procese in posodobiti proizvodnjo.

Organizacija raziskave: Raziskavo smo usmerili v merjenje in proučevanje posameznih postopkov od prihoda materialov za proizvodnjo, skladiščenje, priprava proizvodnje, paletiziranje in transport končnih izdelkov. Iskali smo tehnološke izboljšave in možnosti uporabe novodobne tehnologije v posameznih fazah od prihoda v industrijo do odhoda iz industrije. Ugotovili smo, da je v industriji veliko logističnih procesov, ki jih ni mogoče vseh istočasno proučevati, zato smo se osredotočili na procese, ki bodo z uporabo sodobne tehnologije cenejši in bolj učinkoviti.

Omejitve raziskave: V raziskovalnem področju smo se omejili na postopkov in tehnologije, ki bi bila uporabna pri izvajanju logistike in logističnih procesov. Omejitev je bolj usmerjena v obliko raziskovalnega področja in manj na tehnologijo, ekonomske ali druge elemente, ki bi kakorkoli omejevali pridobivanje ali preverjanje podatkov.

Ključne besede: logistika, tehnologija, stroški.

Razvrstitev: Pregledni znanstveni članek

Abstract. Research question: Logistics is a service activity in industry, economy, public administration and wherever it is necessary to perform certain preparation of work, to carry out certain processes or to carry out certain stages of work, which enable the continuation of production, sales, supply and similar. These are several interconnected processes that can be performed using certain machines, computer equipment, computer programs.

The purpose of the research: Modern technology, severe international economic and commercial competition, rapid changes in production, increasing digitization of production and other processes, robotization of individual procedures in logistics and increasing investments in technology development are factors that encourage research into the possibilities of using modern technology in logistics processes. The purpose of the research was to determine how and with what development potentials we can use modern technology in logistics and what the effects of this use would be.

Research Method: We studied individual elements of logistics and logistic processes, and through their phases learn about the effects of technology. The results can be interpreted differently and at the same time look for suitable solutions that would justify the use of technology in logistics. It is a scientific method of studying individual phenomena in the industry and acquiring new knowledge to improve individual processes. The method is based on the collection of observable, empirical and measurable data that are subject to certain criteria of reflection and can be reflected in the improvement of processes, time or price unit.

Research results: Industry is looking for opportunities to reduce the cost of logistics and services in advance of the preparation it buys on the free market. The research has shown that by introducing new technology into the stages of logistics operations, costs can be halved, processes improved, and production modernized.

Organization of the research: We focused the research on measuring and studying individual processes from the arrival of materials for production, storage, preparation of production, palletization and transport of finished products. We have been looking for technological improvements and possibilities of using modern technology in individual phases from coming to industry until the departure from industry. We found that there are many logistical processes in the industry that can not be studied at the same time, so we focused on processes that will be cheaper and more efficient using modern technology.

Research limitations: In the research field, we limited ourselves to processes and technologies that would be useful in implementing logistics and logistic processes. The limitation is more focused in the form of a research field and less on technology, economic or other elements that would in any way limit the acquisition or verification of data.

Keywords: logistics, technology, costs.

Article Classification: Rewie of Scientific Paper

1 Uvod

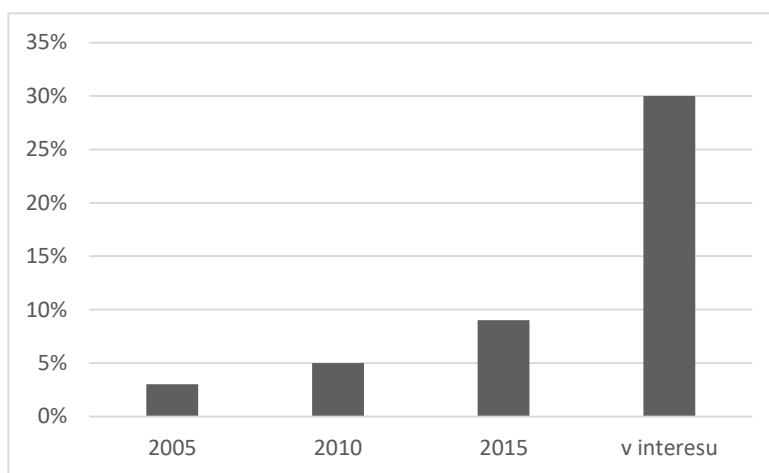
Sodoben razvoj industrije je usmerjen v iskanje tehničnih, tehnoloških in strokovnih rešitev, ki bodo omogočile izboljšavo procesov proizvodnje, pripomogle k boljšemu izdelku in obenem omogočile zniževanje stroškov celotnega procesa industrijske proizvodnje. Tehnološki napredek je industrija postopoma dosegala s svojim razvojem skozi industrijska obdobja, začeniši od industrije 1.0, ki je zajemala obdobje od konca 18. stoletja in je predstavljala uvajanje mehanske proizvodnje, ki jo je gnala z močjo vode in vodne pare. V razvojnem obdobju industrije 2.0 se je nadaljevalo obdobje značilno za 20. stoletje, ko se je uvajala elektrifikacija, masovna proizvodnja in tekoči proizvodni trak, ki prej ni bil prisoten v proizvodnji. Začetek razvoja industrije 3.0 je treba iskati v zgodnjih šestdesetih letih prejšnjega stoletja, v katerih se je pojavila informatizacija, avtomatizacija posameznih proizvodnih procesov in že v tem času se pojavijo prve oblike strojne opreme, ki opravlja bolj zahtevna fizična dela, težaška dela, kot je dviganje stiskanje, prenosil in podobno. Dosežen je bil velik napredek v proizvodnih procesih, industrija je dosegala velike

razvojne širitve in se selila na vse kontinente sveta [1]. Obdobje industrije 4.0 je naredilo velik korak in nekako zasenčilo vsa dosedanja razvojna obdobja in je trenutno najvišja oblika organizacije industrijske ter druge oblike proizvodnje in doseganja tržnih vrednosti. Tehnologijo, avtomatsko vodene stroje, opremo in vodila upravlja računalnik s svojo programsko opremo, kar v povezavi v svetu imenujemo internetno industrijsko povezovanje. Iz analognega sistema delovanja je industrija prestopila v projekcijo digitalnega in tudi virtualnega sveta, ki omogoča tisočkrat večje povezovalne zmožnosti, tehnologijo vodijo programi in strojna oprema, ki jih v procesih industrije in izven imenujemo roboti, ki s svojim delom ustvarjajo pametne tovarne, prihaja do virtualne proizvodnje [2]. V razvoju je industrija 5.0 v kateri se pričakuje personalizacija stroja, kar nam pove, da bosta človek in stroj popolnoma sodelovala s sistemom, strojem in robotom v smislu povečane ustvarjalnosti v industriji ali kje druge, glede na uporabo pametne tehnologije. Vse to kaže, da je industrija skozi tehnološki razvoj, skozi razvoj interneta, informatike, računalništva, digitalizacije vodenja postopkov, uvajanje sodobnejših načinov proizvodnje, uvajanje robotov in pametne tehnologije, ki jo upravljajo informacijski sistemi, z uvajanjem robotov, ki opravljajo različna dela hitreje in natančneje od človeka, uspela zmanjšati stroške proizvodnje in dvigniti nivo kakovosti svojih proizvodov. Vse naštetu pa je storila le na področju same proizvodnje in veliko premalo na področju tistih nalog in storitev, ki niso del proizvodnega procesa pa vendarle proizvodnja brez njih ne more. Gre za logistiko, ki je storitvena dejavnost v industriji, gospodarstvu, javni upravi in povsod kjer je potrebno opraviti določene priprave dela, izpeljati določene procese ali opraviti določene faze dela, ki omogočajo nadaljevanje proizvodnje, prodaje, oskrbe in podobno. Gre za več, med seboj povezanih procesov, ki so pogosto, kakor proizvodnja odvisni od uporabe strojev, računalniške opreme, računalniških programov, različnih aparatov in pripomočkov, ki omogočajo izvedbo posameznih nalog. Sodobna tehnologija in druga tehnološka oprema, huda mednarodna, gospodarska in trgovska konkurenca, hitre spremembe proizvodnje, vse večja digitalizacija proizvodnih in drugih procesov, robotizacija posameznih postopkov v logistiki in vse večja vlaganja v razvoj tehnologije so dejavniki, ki nujno narekujejo raziskave glede uporabe strojne opreme tudi v fazah in procesih logistike v industriji in širše [3]. Gospodarske družbe, ki se ukvarjajo z logistiko in logističnimi procesi, tako skupaj z industrijo iščejo rešitve, kako in na kakšen način uporabiti v postopkih logistike čim več strojne opreme in z njo zmanjšati stroške poslovanja.

1.1 Raziskovalno področje

V industrijskem razvojnem obdobju 4.0 je prišlo do spoznanja, da je vsakršna dejavnost v industriji ali drugje, ki ni neposredno vezana na procese proizvodnje, dejavnost, ki je v breme industrije, čeprav so vedeli, da industrija brez teh storitev ali uslug ne more delovati [4]. Prišlo je do spoznanja, da je treba vse te obremenjujoče elemente proizvodnje izločiti in jih prepustiti tistim pravnim ali fizičnim subjektom, ki so zanje usposobljeni ali jim je to osnovna dejavnost. Po hitrem globalizacijskem razvoju in mednarodni gospodarski krizi je industrija spoznala, da mora svoje resurse usmeriti v tehnološki napredek, ohraniti trg in potrošnike, zato je iz svoje dejavnosti izločila vso skladiščno dejavnost, transport, razbremenilno logistiko in vse tiste storitvene procese, ki jih sama ne more ali ji ni treba izvajati ter jih prepustila zunanjemu izvajalcu (outsourcing). V prvotnem obdobju so se kazale določene organizacijske ovire, kar je industrija stroškovno prenesla na logistiko in nosilce logističnih storitev vendar ne v nedogled. V stroškovnem pogledu je prišlo do zmanjšanja stroškov proizvodnje, čemur je pripomogla uporaba sodobne tehnologije in informacijskih sistemov, je pa še vedno ostal problem visokega stroška spremljajočih dejavnosti logistike, kar se je kazalo v strošku končnega izdelka, ki ga je industrija ponudila na trg. Prvotno razmerje stroškov industrijske proizvodnje in logistike je bilo 50-50 %, kasneje je industrija z različnimi posegi dosegla trenutno najnižje razmerje, ki je 62-38 %. V poznem delu industrije 4.0 in uvajanje nove pametne industrije 5.0, je prepoznana potreba po večjem sodelovanju proizvodnega dela industrije s storitvenim delom oziroma logistiko. To je pokazalo, da je mogoče z uporabo določene tehnologije, z avtomatizacijo in sistemskim

vodenjem, zmanjšati stroške logistike v predpripravi in po koncu proizvodnje [5]. Pričela se je avtomatizacija procesov logističnih storitev z uvajanjem robotov in strojne opreme v vse postopke, operacije in procese logistike. Zbrani podatki v industriji motornih vozil (opravljeni razgovori) kažejo, da se je v začetku uvajanja smernic industrije 4.0, v začetni fazi v procese proizvodnje uvajalo 3 % pametnih strojev, nato 5 % in nato 9 %. V zadnji fazi, ko je prišlo do virtualnega tehnološkega razvoja različnih procesov, preverjanja in preizkusa posameznih sistemov proizvodnje ter uvajanje pametnih strojev (robotov) se ta odstotek povečuje, ni pa še konkretnega izračuna. Cilj industrije je priti vsaj do 30% uvajanja pametnih strojev v proizvodnjo in v logistične procese. Če bi delili posamezne faze proizvodnje avtomobilov, bi ta procent lahko bil tudi 80 ali več, vendar je treba upoštevati celoten postopke izdelave vozila od priprave do končnega izdelka [6].



Graf 1. Časovni prikaz vključenosti tehnologije v proizvodnjo po letih

1.2 Temeljna hipoteza

Uvajanje nove tehnologije, uvajanje informacijskih sistemov v izvedbo posameznih postopkov in procesov v fazah predpriprave proizvodnje in kasnejša skrb za končne izdelke nas vodi do zaključka, da je v storitvene procese nujno treba vključiti sodobno tehnologijo (računalniško programirano opremo), ki bo omogočila hitro, natančno in strokovno podporo industriji [7]. V raziskovalnem področju smo si postavili hipotezo »Tehnološko izboljšanje procesov v logistiki« in tako odprli vprašanje, ali je mogoče s sodobno opremo, ki je sicer že prepoznana v procesih proizvodnje, z določeno dodelavo in ustreznim programiranjem, uporabiti tudi v procesih logistike. Prepoznali smo smernice industrije 4.0 (FoF Factories of the Future), ki zahtevajo hiter odziv na spremembe, zmanjševanje zalog v predpripravi ali v končnem delu proizvodnje, pridobivanje tržne prednosti, večja konkurenčnost, kar nas je pripeljalo k hitremu odzivu. Prepoznaven sistem opravljanja logističnih storitev je temeljil na fizičnem delu, z uporabo pripravljenih predpisov, usmeritev in navodil, visokimi obremenitvami operacij in postopkov, pogosto pa tudi nepotrebnimi reklamacijami zaradi neustreznega označevanja, embaliranja, pakiranja, paletiziranja in podobno. Zavedali smo se, da uvajanje tehnoloških izboljšav v logistične procese pomeni implementacijo dostavne, nosilne, razdeljevalne, skenirane, tehtalne in druge opreme, s katero smo želeli eliminirati časovne in storitvene napake v posameznih fazah logističnih storitev.

1.3 Vizija raziskave

Namen raziskave je bil, v procesih logističnih storitev poiskati elemente, ki bodo omogočili razvoj posameznih procesov in zagotavljali natančno, varno, časovno usklajeno dobavo materialov v procese proizvodnje. Obstoječe stanje je pokazalo, da so postopki logistike za dobavo potrebnih materialov za industrijsko proizvodnjo motornih vozil temeljili na fizičnih pripravah posameznih kosov, fizičnem štetju in popisu, uporabi za to pripravljenih škatel, uporabi vozičkov, viličarjev vodenih s pomočjo delavcev ali drugih transportnih sredstev, ki so pogosto bili v napoto v proizvodnim strojem in zaposlenim na proizvodnem traku, dobava je bila odvisna od človeka in njegove fizične sposobnosti, kar je imelo tako časovne kot stroškovne ovire v proizvodnji. Prepoznava potrebe po sodelovanju proizvodnje in logistike in potrebe po zagotovitvi hitre JIT »Just in Time« sestavnih delov za proizvodnjo, je zaradi časovnih usklajenosti pripeljala do razmišljanja o uporabi posameznih robotov v predpripravi, transportu, pakiranju, skeniranju, paletiranju, skladiščenju in nalaganju. V smislu raziskave je bila naša vizija usmerjena v iskanje načinov, kako izvajati logistiko v industrijski proizvodnji, kako uporabiti sodobno tehnologijo za izboljšanje procesov logistike in kako industriji omogočiti, da njena proizvodnja teče nemoteno.

2 Teoretična izhodišča

2.1 Teoretične smernice logistike v avtomobilski industriji

Specifika industrije motornih vozil je v njenem nenehnem razvoju in iskanju naprednih tehnoloških, informacijskih, digitalnih in drugih elementov, ki bodo omogočili nemoteno proizvodnjo, zmanjševali stroške proizvodnje in ohranjali kupce oziroma trg. V te namene industrijska proizvodnja uvaja popolnoma avtonomne procese predpriprave, proizvodnje in posebej postopke po celotni proizvodnji, ki naj bi omogočili boljšo pripravo blaga za kupca [8]. Ti postopki se odražajo predvsem v uvajanju posameznih tehnologij pakiranja, paletiziranja, skladiščenja in številnih drugih logističnih postopkov, ki so nujni, pri čemer poskušajo uporabiti prednosti in izkušnje katere jim nudijo smernice industrije 4.0 in njej sorodni procesi [9]. Cilj je zagotoviti popolnoma avtonomni sistem obdelave podatkov od naročil, do postavitve plana ter zaključne sestave palet z različnimi izdelki. Gre za združevanje matematične optimizacije in podatkovne inteligence, industrijsko strokovno znanje in izkušnje za razvoj orodij IT za načrtovanje in delovanje v industrijskih proizvodnih sistemih. Gre za znanstveno metodo proučevanja pojavov in pridobivanje novega znanja za izboljšanje industrijske proizvodnje. Pri tem metoda temelji na zbiranju opazljivih, empiričnih in merljivih podatkov, podvrženim določenim merilom razumevanja industrijske proizvodnje. Po smernicah industrije 4.0 je za sodobno obvladovanje logističnih procesov primerna vitka proizvodnja (gre za splošno filozofijo upravljanja procesov), ki pomaga izboljšati celotne vrednosti ključnih kazalnikov (KPI Key Performance Indicator) v industriji. Gre za niz orodij za odkrivanje in stalno odpravljanje izgub, izboljševanje kakovosti, skrajševanje proizvodnih časov in zmanjševanje stroškov (vitka proizvodnja – Toyota Production System - je sistem Toyotine filozofije organiziranja proizvodnje in logistike, vključno z medsebojnim vplivanjem dobaviteljev in kupcev, ki je podprt z različnimi orodji, med katerimi sta najbolj znani stalno izboljševanje procesov (kaizen) in odpravljanje (poka-yoke). Drugi Toyotin pristop vitkosti pa je osredotočen na enakomeren tok dela skozi sistema v osnovi izravnava proizvodnje glede na količino ali izdelek in na način proizvodnje z vlečenjem (kanban). Prednost pristopa enakomernega toka dela je, da naravno zajame celoten proizvodni sistem, pri tem pa odkriva obstoječe probleme kakovosti in s tem prispeva k zmanjševanju izgub. Za izboljšanje kakovosti, produktivnosti in učinkovitosti proizvodnje v industriji motornih vozil se uporabljajo še orodja, metode, tehnike in strategije, kot so 6 sigma, 5S, 20 ključev, celovito upravljanje produktivnosti, TPN (Total Productive

Maintainmenc), SMED, JIT (Just in Time) in JIS (Just in Sequence) in mnoge druge tehnologije, ki so pomembne tudi za logistiko in njene procese.

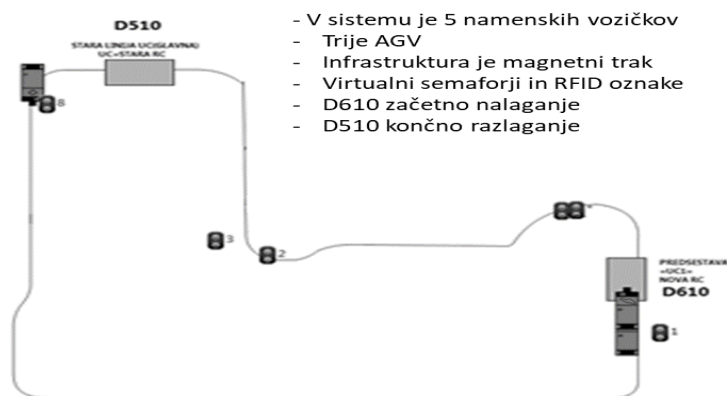
2.2 Specifika logistike v avtomobilski industriji

Logistika v avtomobilski industriji je ključnega pomena, saj gre za vrsto pripravljalnih in izvedbenih del in nalog, brez katerih industrija ne more izvajati svojega industrijskega poslanstva. Gre za številne postopke, procese in naloge, ki omogočajo industrijsko proizvodnjo, ki omogočajo nabavo, oskrbo, skladiščenje in transport za potrebe industrije. V procesu razvoja industrije 4.0 logistika v industriji uporablja znanstvene in druge metode, ki na podlagi zbiranja opazljivih, empiričnih in merljivih podatkov omogočajo nenehni razvoj procesov in zagotavljanja uslug industriji. V konkretnem primeru smo iskali specifiko uporabe logistike za potrebe zagotavljanja proizvodnje v smislu dobave materialov iz skladišč v proizvodnjo. V poštrev je prišel sistem kanban, ki pomeni razdeljevanje nalog in oskrbe delovnih mest [10]. Ta sistem deluje po načelu vlečenja (»pull«), kjer ni nobenih napovedi, saj sistem deluje na odpoklic količin v sami proizvodnji. Gre za zaznavanje potreb in pravočasna oskrba s pomočjo signala, ki je lahko v obliki kartice, praznega zaboja ali praznega prostora. Tip proizvoda in število kosov, ki jih je potrebno iz skladišča pripeljati v proizvodnjo ali proizvesti so zapisani na kanban kartici. Porabniku (robotu ali stroju) kanban kartica pove, kaj mora v nekem trenutku pripeljati, proizvajati, odpeljati in koliko. Porabnik vedno vzame le toliko blaga, kolikor ga trenutno potrebuje, proizvajalec pa mora nato to količino zopet dopolniti. Kanban je primeren za veliko industrijsko serijsko proizvodnjo, kjer je manj nihanj po potrebah po spremembah in kjer je zagotovljeni enakomerni in uravnoteženi proizvodni procesi.

2.3 Tehnologija kot ekskluzivna podpora logistiki v avtomobilski industriji

Tehnologija je skozi industrijski razvoj in uvajanje strojne opreme v proizvodnjo prisotna tudi v logistiki in logističnih procesih. Mogoče jo je zaznati že v prvih oblikah uporabe različnih strojev za potrebe vlečenja, potiskanja, dviganja materialov, prekladanja, nakladanja materialov, v skladiščih in tudi v sami proizvodnji. V prvotnih oblikah je šlo bolj za strojno opremo, ki po svoji strukturi, obliki, namenu in uporabnosti ni bila namenjena zgolj logistiki in izvajanju logističnih procesov, je pa opravila tista dela in naloge, ki so bili sestavni del logistike. V sodobnem industrijskem razvoju, v industriji 4.0 se izvajalci logistike in logističnih procesov vse bolj nagibajo k uporabi pametnih strojev, robotov in programske opreme za opravljanje posameznih trajajočih nalog. V našem raziskovalnem področju smo se v predpripravi industrijske proizvodnje v proizvodnji avtomobilov omejili na podporo AGV robota in robotiziranih ali avtonomnih viličarjev. Kot ekskluzivna tehnološka podpora v industrijski proizvodnji, za opravljanje logističnih nalog se uporablja AGV SMARTCART 100TT (Automated guided vehicle) za prevoz blaga in materialov iz priročnih skladišč v različne dele tovarne, kjer se opravlja proizvodnja. Gre za pametne naprave nove generacije, ki so se sposobne same odločati v smislu vnešenega programa, po postavljeni infrastrukturi in ima ustrezne oblike vodenja. Trenutno se uporablja metoda fiksnih sledi po načrtani poti, ki so v programu natančno kodirane, pri čemer robot sledi magnetnemu traku, ki je njegova infrastruktura, uporablja RFID tehnologijo in je povezan v proizvodni sistem, ki nadzoruje poti več robotov. Po načrtani poti ta strojna oprema prevaža namenske vozičke za potrebe oskrbe industrijske proizvodnje, lahko je nameščen tudi, da iz proizvodnje odvaža končne izdelke v skladišče. Značilna je njegova storilnost, funkcionalnost in varčevanje z energijo. Ključnega pomena je stroškovni efekt, ki ga industrija dosegla v razmerju do uporabe delovne sile za enako delo.

Viličarji kot tehnološka podpora so v pomoč industrijski proizvodnji in so programsko opremljeni ter delo opravljajo kot pametni stroji. Gre za visoko sofisticirane ter tehnološko izpopolnjene stroje in strojno opremo, ki brez človeka opravlja vsa dela, ki so potrebna za prevoz palet končnih izdelkov in njihovo uskladiščenje na ustrezna skladiščna mesta. Njegova



Slika 1. Shematski prikaz posti AGV pri delu, lastna simulacija

3 Methode

3.1 Analiza potrebe po tehnološki podpori v logistiki

Dejstvo, da je industrija prepoznala potrebo po tehnološkem posodabljanju storitvenih in uslužnih dejavnosti oziroma logistike za potrebe proizvodnje, je izvajalce in industrijo prepričalo, da je treba vse postopke in operacije, ki jih lahko opravi strojna oprema umestiti v prostor priprave proizvodnje ali shranjevanja oziroma logistike. Analiza je pokazala, da se je v preteklosti večina operacij v logistiki opravljala ročno, da je šlo zgolj za fizično potiskanje, prenašanje, prelaganje, pakiranje, paletiziranje, štetje kosov, odločanje na podlagi predpisov, navodil ali usmeritev z upoštevanjem človeškega faktorja, kar je pomenilo velike obremenitve operaterjev in delavcev, potrebo po večjem številu operaterjev, veliko število reklamacij zaradi neustreznega ali nestrokovnega dela, zaradi nastale škode, nepravilne rabe materialov, kosov, tehtanja in podobno. Posledice so bile vračanje materialov ali izdelkov s strani kupca, ponovno štetje in obdelava, povečani stroški, nepotrebni stroški, izrabljena delovna sila. Analiza je pokazala, da je nujno treba pristopiti k posodabljanju procesov in uvajanju sodobne strojne opreme, ki bo omogočila odpravo vseh težav, ki jih ima industrija v postopkih industrijske in zunanje logistike.

3.2 Tehnološka podpora v konkretnem procesu

Strojna oprema je na področju logistike prisotna že vrsto let, predvsem v procesu skladiščenja industrijskih polizdelkov, izdelkov za nadaljnjo proizvodnjo ali končnih izdelkov za trg. Ta oprema je predstavljala različne oblike strojev za dviganje, shranjevanje, razvrščanje materialov po določenih kodah in številkah, ki ji računalniški program s pomočjo čitalcev odčitava in izvaja procese. Prepoznavna potreba po tehnološki uporabi AGV SMARTCART 100TT v predpripravi za proizvodnjo in v sami proizvodnji je bila novost, ki je mnoge vrste industrije pritegnila k uporabi. Poleg avtomobilske industrije je AGV možno zaznati v farmaciji, v industriji prehrane in drugod. V konkretnem procesu je navedena pametna oprema v obliki robota, ki samostojno transportira materiale za industrijsko vgradnjo iz skladišča do proizvodnih trakov, med proizvodnimi procesi in pri odvažanju končnih izdelkov v proces pakiranja, paletiziranja in shranjevanja v skladišča [11]. Uvedba je pomenila zmanjševanje števila delovnih mest fizičnih oseb, zmanjšanje operaterjev, računalniški nadzor, operativni nadzor iz nadzornega centra, natančnost opravljenih storitev in prihrank pri energiji. Za industrijo je uvedba AGV v logistiki pomenila cenejše storitve, manj zaposlenih in več [12]. S tehnološkega pogleda pa je uvedba AGV pomenila natančne in varne procese, doseganje kakovostnih storitev brez napak, reklamacij in lažji nadzor. Znanstveno proučevanje opazljivih, empiričnih in merljivih podatkov v industriji z uporabo robota AGV kaže, da je za oskrbo treh proizvodnih trakov v industriji motornih vozil, za tri izmensko delo, potrebno zaposliti tri delavce. Za oskrbo devetih proizvodnih trakov, v treh izmenah zaposliti devet delavcev, ki so pripravljali material za proizvodnjo in ga nalagali v vozičke ter fizično potiskali do proizvodnega traku. V matematičnem izračunu je to pomenilo v povprečju 9000 evrov stroškov za plače zaposlenih v enem mesecu in če smo to pomnožili z 12 mesecev, smo dobili strošek industrije za logistične postopke 108.000,00 evrov. Če smo to primerjali s stroškom nabave in uporabe tehnologije oziroma robota, so bili podatki več kot presenetljivi [13].

3.3 Ljudski resursi v funkciji kreiranja, upravljanja in operacionalizacije logističnih procesov s tehnologijo

Analiza merljivih podatkov je pokazala, da je v prvotni fazi uvajanja pametne strojne opreme v obliki robotov prihajalo do odklona zlasti s strani zaposlenih v logistiki in zaposlenih v industriji. Prvotno mišljenje je bilo, da bodo roboti opravili delo zaposlenega in se bo gospodarska družba oziroma lastnik industrije odločil za odpuščanje delavcev. Z ustrezno edukacijo, z usposabljanjem zaposlenih je prišlo do spoznanja, da je robot v vsej svoji obliki, po strukturi in po funkcijah, ki jih lahko opravi, v pomoč zaposlenim in da opravlja tista težka dela, bi jih sicer moral opravljati človek. Operaterji in delavci so spoznali, da jim ni treba fizično dvigovati predmetov in materialov, da jim ni treba izvajati popisov in izračunov, da jim ni treba opravljati posebnih gibov ali naklonov, ki bi dolgoročno pomenili kronično poklicno bolezen. Počasi je prišlo do spoznavne, da lahko robot in delavec v skladišču, v proizvodnji ali kje drugje usklajeno opravljajo svoje naloge. Robot, tehnološka oprema, računalniško vodena oprema deluje usklajeno z delavcem in se z delavci dopolnjuje. Delavec je v postopku izvajanja logistike ali proizvodnje postal bolj pomemben kot nadzorni člen, ki nadzira in pregleduje opravljeno delo strojne opreme. V razmerju težaškega dela stroj kot pametni robot opravi težaško delo v razmerju 85 – 15 %, kar je spodbudno za industrijo in za zdravje človeka zaposlenega v industriji oziroma v logistiki.

4 Rezultati

4.1 *Predlog modela tehnološkega razvoja in racionalizacija procesov v avtomobilski industriji*

Avtomobilska industrija stremi k uvajanju pametne tehnologije in spremljanju razmer na svetovnem trgu kakor zahtevajo smernice in industrijski razvoj 5.0. Ta potreba je v avtomobilski industriji uvedla nov virtualni svet, na katerem temelji nov sodobni in tehnološko izboljšan način proizvodnje. S pomočjo digitalizacije, računalniške opreme in simultanih programov razvojni oddelki v avtomobilski industriji razvijajo virtualne programe, ki omogočajo nastanek namišljenih posameznih orodij za izdelavo delov motornih vozil. Program v virtualnem svetu naredi posamezni del, mu da obliko kovine, barvo, težo, odpornost, gibljivost, uporabnost in preizkusi njegove zmogljivosti. Prednost virtualne uporabe omogoča številne preizkuse v virtualnem svetu, ki je lahko v tisočih primerih in ko je pridobljena potrditev o zanesljivem izdelku, gre ta v postopek proizvodnje in konkretno uporabo, kjer roboti skozi svoje procese naredijo izdelek. Tudi postopki uporabe AGV, postopki uporabe posameznih robotov v neposredni proizvodnji, postopki uporabe pametnih viličarjev, postopki paletizacije itd. so preizkušeni v virtualnem programskem svetu in ker so pokazali neposredne prednosti, se jih je pričelo uporabljati v procesu avtomobilske industrije. Predlog modela tehnološkega razvoja je zamišljen skozi posamezne operacije in uspešno opravljene simulacije v virtualnem svetu, ki naj bi proučil posamezne postopke poteka nabave materialov, priročno skladiščenje, sortiranje, pripravo in notranji transport. Najbolj je prepoznaven v procesu priprave končnih izdelkov, paletizaciji, shranjevanju in transportu, kjer se za potrebe naročnika pripravi polizdelek ali končni izdelek za nadaljnji transport. Skozi merljive podatke in tehnološko znanje je mogoče priti do izboljšanja logističnih postopkov in posledično do izboljšanja industrijske proizvodnje.

4.2 *Relevantni elementi in komponente modela tehnologije v paletizaciji*

Relevantne predloge, elemente in komponente modela uporabe tehnologije v pakiranju in paletizaciji polizdelkov ali izdelkov za nadaljnjo proizvodnjo za znanega kupca smo iskali v virtualnem svetu. Rezultati so bili presenetljivi, saj so nam pokazali, da je mogoče logistične procese paletiziranja opraviti brez napak, brez zastojev, brez reklamacij. S pomočjo tehnologije in računalniške opreme smo preizkusili novo obliko, v kateri smo odkrivali možne napake in težave. V tem prvem delu avtomatizacije, smo poizkušali rešiti in odpraviti vse kakovostne težave glede odpremljanja industrijskih kosov. Prepoznali smo številne težave in napake, ki so se nam pojavile pri ročnem opravljanju teh logističnih postopkov, prav tako smo vedeli kaj je vzrok za številne reklamacije, ki so povzročale izgubo reputacije, težave ob zagovoru standarda IATF 16949 in na koncu tudi dodatne stroške v obliki izrednih prevozov ter potencialno z zaustavitvijo produkcije pri našem kupcu. Naš cilj je bil z novo tehnologijo pospešiti logistično delo, odpraviti nastajajoče napake ter preprečiti logistične reklamacije. Vzpostavljanje in uvajanje nove tehnologije je po smernicah industrije 5.0 zahtevalo uporabo znanih in že preizkušenih metod v svetu.

Z predlogom tehnologije z uporabo metode Kaizen [14] smo prišli do ustrezne in sprejemljive rešitve z napravo za skeniranje in tehtanje vseh proizvodnih kosov pred odpremo. Naprava je delovala na način, da je vse kose pred odpremo pošiljala skozi pregledno linijo, kjer s skenerjem prečita vse podatke na galiji (s tem že izpolni prvi pogoj glede čitljivosti bar kode) ter podatke posreduje naslednji programski postaji. Na naslednji programski postaji s kamero preveri ali je v sistemu izbran ustrezen zaboj, ali je zaboj poškodovan, ali so vsi izdelki ustrezni in ali je pakirna folija v ustrezni obliki (gabaritu). V končnem delu strojna oprema zaboj še steha, s čemer ugotovi ali je zadostno število izdelkov v zaboju. V kolikor katerikoli od kriterijev ni izpolnjen, strojna oprema avtomatsko izloči zaboj na ponoven pregled in ročno preverjanje. S Kaizen programom po tehnološki implementaciji, so bili eliminirani pogoji logistične reklamacije na osnovi embalažne enote zaboj. Z virtualnimi programi iščemo druge rešitve, ki bi v popolnosti

zadostile vsem kriterijem izvajanja logističnih procesov s strojno opremo in tako odpravili vse bojazni nastanka napak, reklamacij in nepotrebnih stroškov. Iskali smo avtonomni postopek uporabe strojne opreme pri paletizaciji, cilj je bil avtomatska obdelava vseh naročil, izdelava plana sestave in proženje potreb po materialu direktno do skladiščnika. Na ta način smo se s pomočjo virtualne tehnologije in poizkusov pri uporabi strojne opreme približali principu vitke proizvodnje v avtomobilski industriji. Znanstveni pogled nam je pokazal, da virtualni program ne pozna nenamernih napak, ki jih zaznavamo v človeškem delu v logistiki ali v proizvodnji. Zato smo morali izvesti še preizkus namerne napake in izogibanja namernim napakam, in sicer po programu Poka Yoke (Japonski izraz nenamerno, izogibanje), ki temelji na zakonitosti, da človek niti stroj nista sposobna se popolnoma izogniti napakam [15]. V elementih in komponentah modela uporabe tehnologije v logistiki je treba upoštevati pravilno oskrbo in razdeljevanje materialov in zaporednih procesov. To smo dosegli s kanban sistemom razdeljevanja nalog in oskrbe delovnih mest, ki deluje po načelu vlečenja (»pull«). Sistemsko pri tem načelu ni nobenih napovedi, ker deluje na odpoklic količin, kar omogoča, da kupec dobi točno tisto kar potrebuje in točno takrat, ko material potrebuje. Sistem deluje s pomočjo kanban signala, ki je lahko v obliki magnetne kartice z zapisi, praznega zaboja ali praznega prostora. Tip proizvoda in število kosov, ki jih je potrebno proizvesti so zapisani na kanban kartici tako, da porabniku kartica pove, kaj mora v nekem trenutku proizvajati in koliko. Sistem porabniku pove, da vedno vzame le toliko blaga, kolikor ga trenutno potrebuje, proizvajalec pa mora nato to količino zopet dopolniti. Kanban sistem je uporaben v industrijski proizvodnji, ker se lahko le v široki proizvodnji izkaže kot upravičen [16]. V avtomobilski industriji pri izdelavi drobnih materialov uporabljajo elektronski kan ban, za klic viličarjev za dovoz novega materiala iz skladišča in na koncu linije, ko je treba odpeljati sestavljeno paleto in dostaviti novo prazno paleto.

4.3 Pričakovani učinki uporabe nove tehnologije v logistiki

Namen uvajanja in uporabe tehnologije v logistiki in posodabljanje procesov logistike za povečanje zmogljivosti industrijske proizvodnje v avtomobilski industriji je imel dva pomena, in sicer pospešiti proizvodnjo, poenostaviti logistične in proizvodne procese, zmanjšati porabo energije, povečati storilnost in zreducirati materialne stroške končnega proizvoda. Da bi to dosegali s tehnologijo (roboti) je nujno upoštevati nekatere sisteme, ki omogočajo zniževanje stroškov v industrijski ali drugi proizvodnji. V industriji je zelo razširjena metoda JIT (Just in Time), ki omogoča koncept poslovanja brez zalog, ki so ga razvili v šestdesetih letih prejšnjega stoletja na Japonskem. V svoji najosnovnejši obliki JIT zahteva natančno količino proizvodov ob točno določenem času. Pri tem konceptu je treba upoštevati, da proizvodnja ene enote več ali manj, kot je potrebno, zvišuje stroške poslovanja. Material, polizdelek, in končni izdelki morajo biti narejeni oziroma dostavljeni po sistemu JIT ravno ob pravem času – ko jih potrebujemo. Za to sistemsko delovanje mora biti stabilna proizvodnja, prilagodljiva delavna sila, visoka kakovost materialov in izdelkov, dobra vzdržljivost strojne opreme, zanesljivi dobavitelji, hitra menjava orodij na strojih in kontinuirano vzdrževanje ostalih elementov poslovanja.

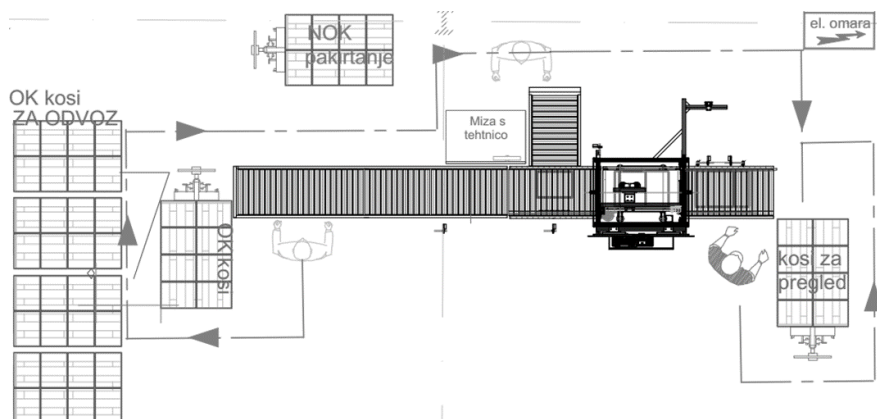
4.3.1 Pričakovani ekonomski učinki uporabe nove tehnologije v logistiki

Z uvedbo nove tehnologije v industrijski proizvodnji motornih vozil in posameznih delov za sestavo različnih vrst in tipov vozil smo pričakovali tudi ekonomske učinke v proizvodnji in v logistiki, ki se kažejo v manjši porabi delovne sile, boljšemu izkoriščanju obstoječih strojev in proizvodnih procesov, boljši izvedbi logističnih procesov. Z uvedbo tehnologije smo se izognili ročnim operacijam, fizičnem štetju, ni odločanja po pisnih navodilih, manjša je obremenitev operaterjev, manjše število zaposlenih, manj reklamacij. Urejeno je avtomatsko pakiranje izdelkov in elektronski sistem za vodenje skladišč po sistemskih programih WMS (Warehouse Management System), kar povsem spremeni obliko in postopke dela logistike, zaradi tega so tudi ekonomski učinki zelo vidni. V prihodnosti je pričakovati umeščanje sodobne programske opreme, ki bo obstoječo tehnologijo dopolnila in obogatila s procesi, sistemsko obdelavo

podatkov in elektronskim prenosu podatkov. Ta čas teče faza virtualnega preizkušanja in ko bo bodo izpolnjeni zahtevani pogoji, bo zadeva vključena v sistemsko delovanje.

4.3.2 Pričakovani relevantni logistični učniki nove tehnologije

Logistični učinki so vidni pri uvedbi strojne opreme v vseh fazah in procesih priprave in izvedbe proizvodnje v avtomobilski industriji. Vzpostavljeno je področje avtomatskega generiranja pakirnega plana iz naročil kupca, kar je sistem zahteval nove logistične postopke, skozi katere naprava mora podatke prebrati direktno iz SAP ali ustrezne baze podatkov SQL. Naročila strank so združena po pošiljkah (lokacijah razklada in naklada), v vsakemu izdelku v naročilu naročniku je dodeljeno določeno število polj na podlagi specifikacije proizvoda, število zahtevanih palet pa se izračuna na podlagi sklopa pravil za pakiranje. Tako se za vsako paleto sestavi končni seznam zabojev oziroma izdelkov (vključno s praznimi zaboji) in izračuna točne koordinate vsakega zaboja za robotiko umestitev (paletizacija), vsi podatki se zapišejo v tabelo rezultatov (SAP / SQL), ti podatki se uporabljajo za tiskanje etikete palet in za izdelavo robotskega navodil za pakiranje. V logističnem učinku je razviden tudi sistem AutoPack, ki je sestavljen iz določenih komponent, s katerimi vodi in upravlja celotno pakirno linijo, znotraj katerega je načrtovalni model, ki izračuna načrt pakiranja s seznama naročil za določeno pošiljko, vsebujejo ID palete, natančne koordinate in vsebino vsakega zaboja, zmanjša število skupnih palet, število mešanih palet in / ali skupno število praznih zabojev (odvisno od parametrov načrtovanja). Upravljalni modul integrira podatkovne vmesnike SAP / SQL (branje / pisanje) in obravnava vso komunikacijo z načrtovalskim motorjem ter upravlja sistem in konfigurira obratovalne parametre. Postopki so bili virtualno preverjeni in ocenjeni za uporabo.



Slika 2. Prikaz uporabe avtomatizirane opreme

4.4 Dosežki uporabe tehnologije v logistiki

Glede na pričakovane učinke strojne opreme v logistiki, glede na sistemsko ureditev uporabe posameznih strojev v predpripravi proizvodnje, kjer se logistični postopki nizajo v pripravi repro materiala za proizvodnjo in se izvajajo z AGV robotom, glede na sistemsko ureditev paletizacije in priprave končnih izdelkov za kupca ter uporabo pametnih viličarjev so doseženi veliki uspehi, ki izkazujejo tako ekonomske kot logistične upravičenosti. Sistem nove uporabe strojne opreme v logistiki so razvili kot produkt vseh metodah navedenih v tem poglavju in dosegli cilj po avtonomnem sistemu paletiziranja za kupca. Postopki potekajo avtomatizirano, da sistem pobere podatke glede odpoklicev iz operacijskega sistema SAP, nato v svojem programskem delu virtualno sestavi vse palete ter kliče material na vhod, kjer se izvede postopek paletizacije in odvoza v regalno skladišče. Sistem je močno poenostavil sisteme dosedanjega dela, saj tehnologija (naprave) hkrati sestavlja 20 palet, kar pomeni, da je manj manipulacije materiala iz

skladišča in nazaj (predhodno so za vsako paleto posebej nabirali material v skladišču), manj napak ali zastojev. Sistemska prednost uporabe nove pametne strojne opreme je hitrost priprave odpreme in ekonomski prihranek, odpravljene so človeške napake. Prednosti se kažejo tudi v sistemskem vodenju strojne opreme, ki sama preverja vse zaboje, zaključi celotno paleto in jo opremi z galio etiketo. Do strojne opreme pride pametni, ki paleto iz naprave odpelje v regalno skladišče ali na tovorno vozilo za transport.

5 Razprava

V konkretnem primeru gre za rezultat skupinskega dela, izkušenj, podkrepljenih z metodami zmanjševanja izgub v procesih priprave in proizvodnje ter v zaključnem delu shranjevanja izdelkov in za izboljševanje pretočnosti ter produktivnosti v avtomobilski industriji. V znanosti je vse relativno in vse je mogoče nadgraditi, dopolniti, dodelati, spremeniti, inovirati, kar daje odgovor, da z raziskavami nismo zaključili. Z znanstveno metodo smo proučevali pojave poteka materiala od vhoda v krog industrije (dobava materialov za proizvodnjo), označevanje, sortiranje, pregled in priprava skladiščenja, določanje posameznih znakov, števil, kod in podobno, odrejanje posameznih materialov za posamezne proizvodne trakove in priprava za notranji transport v proizvodnjo. Tu smo pridobivali nova znanja za izboljšanje posameznih postopkov logistike, s ciljem podpore industrijski proizvodnji. Cilj nam je bil zbrati opazljive in tudi empirične ter merljive podatke, ki jih je mogoče meriti z določenimi metodami merjenja in ocenjevanja ter na podlagi njih sodelovati pri razvoju nove tehnologije, ki bi pripomogla k hitrejšemu obvladovanju logistike v industriji. Postavili smo hipotezo, s katero smo želeli potrditi, da je tehnologija ključna pri razvoju industrije in vseh procesov, ki spremljajo industrijsko proizvodnjo. Našo trditev smo podkrepili z uporabo ustreznih metod v industriji, kot je Kaizen, Poka Yoke, Kanban, Pull, JT ter vse skupaj preizkusili skozi virtualne procese. Ocenili smo, da smo dosegli zastavljene cilje, saj so bili prikazani ekonomski učinki, ki se vidijo v avtomatskem pakiranju po programu VMS (Warehouse Management System). Raziskava se ne zaključi in se nadaljuje v cilju iskanja novih možnosti, boljših rešitev in konkurenčne prednosti za avtomobilsko industrijo. Zanimiva je tudi ugotovitev, ki nam je pokazala, da so zaposleni v avtomobilski industriji spremembe in uvajanje avtonomnega procesa, prepoznali prednosti sistema, katerega prepoznavajo za potrebnega in ga sistemsko izkoriščajo, predvsem na področjih kjer so ergonomsko težke in neproduktivne naloge, ni več ročnega knjiženja in zapisovanja, lažje zaznavajo napake, izgube in druge moteče faktorje v proizvodnji.

6 Zaključek

Industrija, posebej industrija motornih vozil, je specifično področje proizvodnje, ki uravnava trg, uravnava ekonomska, med-organizacijska, med-korporacijska razmerja, pogosto je industrija motornih vozil tudi element med državnih in političnih razmerij. Od nje so odvisne države, skupnosti, mednarodna združenja in celotno gospodarstvo. Zavedajoč se tako zahtevne odgovornosti industrija išče trajnostne rešitve, razvija tehnologijo, razvija infrastrukturo, razvija sisteme in proizvodne procese ter išče strokovne rešitve, ki bi omogočile ohranjanje industrijske proizvodnje, organizacijo trga. Prav tako išče ustrezno razmerje med ponudbo in povpraševanje, razmerje med posegi v naravo in okolje in potrebami za človeški obstoj. Išče metode in vzvode, komercialne in druge možnosti, kako pritegniti kupce ter tako zagotoviti nadaljevanje industrijskega dela in razvoja. Uvedba nove tehnologije, uvedba pametne tehnologije je glavni modul razvoja in posodabljanja avtomobilske in druge industrije, zato je vsako posodabljanje proizvodnje, logistike in logističnih procesov sistemsko izboljšanje industrije. Že uvedba AGV robota (pametnega stroja) je navdihnila mnoge druge proizvajalce, kot so farmacija, proizvajalci hrane, kovinska industrija itd. da so v svoje procese uvedli novosti in tako prihranili pri energiji, pri kadrih, pri varnosti, pri varovanju okolja in mnogo širše. Uvajanje novih sistemov, nove tehnologije, robotov kakršen je AGV, strojev za paletiziranje, uvedba pametnih viličarjev, ki

delujejo brez človeka, uvedba pametnih skladišč, ki se sami oskrbujejo, strojev ki izvajajo različna fizična dela, ki so sicer za človeka nevarna, so korak naprej k splošnemu razvoju znanosti, sistemov, gospodarstva in celotne družbe.

V konkretnem primeru smo pokazali, kako je sistemsko, skozi uporabo različnih metod, z virtualnimi analizami, mogoče priti do novih in novih pametnih strojev, ki so v podporo industriji in posebej v našem konkretnem primeru, so v pomoč avtomobilski industriji. Predstavljena tehnologija, pametni stroji (roboti) so dokaz, da se slovenska industrija razvija v koraku s svetovno industrijo, v nekaterih primerih celo prehiteva svetovno industrijo, kar je lahko v ponos razvojnemu centrom posameznih industrijskih panog in tudi šolam, fakultetam, univerzam, inštitutom in vsem nam, ki smo v procese razvoja vključeni. V konkretnem primeru, kjer smo prikazali sistemsko vključevanje in uporabo pametnih strojev v industriji motornih vozil pri nas v Sloveniji, smo v fazi virtualnega preverjanja sposobnosti posameznih funkcij in uporabi pametnih strojev v širše namene, kar bomo v naslednjih obdobjih tudi prikazali. Prikaz sistema uporabe AGV, pametnega stroja za paletizacijo (ki ga še nismo poimenovali) in pametnega viličarja, je samo delček opreme, delček tehnologije, ki jih industrija razvija. Znanstvena dognanja o posamezni opremi dajejo izhodišča za nadaljnje raziskovanje, s čemer smo postavljeno hipotezo popolnoma potrdili in bralcu dali možnost, da se seznani z novostmi v razvoju industrije ob zavedanju, da smo lahko opisovali in predstavili samo tiste dela razvoja pametne strojne opreme, ki ne predstavlja poslovne skrivnosti posameznega proizvajalca. Zaradi tega tudi nismo omenjali, kje smo znanstvene raziskave opravili in kje smo prikazane podatke dobili.

Reference

- [1] Zelenika, R. (2010). *Ekonomika prometne industrije*. Rijeka: Ekonomski fakultet u Rijeci.
- [2] Westkämper, E., Spath, D., Constantinescu, C., & Lentjes, J. (2013). *Digitale Produktion: Ergebnisse aus dem Innovationscluster Digitale Produktion*. Berlin: Springer.
- [3] Wildemann, H. (2009). *Entwicklungstrends in der Automobil- und Zulieferindustrie*. Empirische Studie, München: TCW Transfer-Centrum.
- [4] Plattform Industrie 4.0: Was ist Industrie 4.0? (2017, 17. maj). Pridobljeno na <http://www.plattform40.de/I40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>
- [5] Wiendahl, H. P. (2001). *Erfolgsfaktor Logistikqualität: Vorgehen, Methoden und Werkzeuge zur Verbesserung der Logistikleistung*. Berlin Heidelberg: Springer.
- [6] Zelenika, R. (2007). *Upravljanje logističnim mrežama, poglavje Informacijske tehnologije – čimbenik upravljanja logističkim mrežama*. Rijeka: Ekonomski fakultet u Rijeci.
- [7] Nyhuis, P., & Wiendahl, H. P. (2009). *Fundamentals of Production Logistics, Theory, Tools and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- [8] Nyhuis, P., & Seitza, K. F. (2015). *Cyber-Physical Production Systems Combined with Logistic Models – A Learning Factory Concept for an Improved Production Planning and Control*. Germany.
- [9] Mayr, A., Weigelt, M., Grimm, S., Erll, A., Potzel, M., Franke, J., & Kühl, A. (2018). *Lean 4.0 - A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0*. Germany: CIRP.
- [10] Črešnjak, V., & Bastič, M. (2012). *Kanban kot gradnik vitke proizvodnje* (Diplomska naloga). Univerza v Mariboru, Ekonomsko-poslovna fakulteta, Maribor.
- [11] Zelenika, R. (2001). *Prometni sustavi, tehnologija, organizacija, ekonomika, logistika i menedžment*. Rijeka: Ekonomski fakultet u Rijeci.
- [12] Mehmi, J., Nawi, M., & Zhong, R.Y. (2018). *Smart automated guided vehicles for manufacturing in the context of Industry 4.0*. Texas: SME.
- [13] Murtič, S., & Franko Uherik, I. (2018). Roboti v funkciji izvajanja logistike. Priložnosti, potenciali, izzivi, 3. mednarodna znanstvena konferenca razvoja industrijskega inženiringa, Slovenija, Otočec pri Novem mestu, 16. april 2018.

- [14] Metoda Kaizen. (2019, 8. januar). Pridobljeno na <http://www.kaizen.si/>
- [15] Jurjevčič, T. (2018/2019). *Trajnostni razvoj izdelkov, procesov in inovacij; izbrane metode razvoja proizvodov in procesov*. Neobjavljen interni dokument.
- [16] Metoda Kanban. (2019, 8. januar). Pridobljeno na: <https://cerasis.com/what-is-kanban/>

Človeški viri in regionalni razvoj — znanje kot družbena vrednota

Human resources and regional development — knowledge as value for the society

Marjan RAVBAR

znanstveni svetnik v pokoju
E-naslov: marjan.ravbar@guest.arnes.si

Povzetek. Raziskave o družbi znanja, regionalnih inovacijskih sistemih in njihovem prispevku h gospodarski rasti so v znanstveni literaturi že uveljavljene. Pričujoči prispevek temelji na geografski analizi povezanosti med tehnološkim razvojem, faktorji konkurenčnosti in gospodarskimi učinki. Izhaja iz podmene, da gospodarska učinkovitost v pokrajini izhaja iz kakovosti človeškega kapitala, kjer so inovacije predpogoj za družbeni napredek, konkurenčnost in razvojni uspeh. V ospredju raziskovalnih zanimanj je geografska razporeditev razvojnih generatorjev, ki so pogosto razlog regionalnih nesorazmerij. Ustvarjalne socialne skupine nedvoumno vplivajo na regionalni razvoj. V njem analiziramo tudi prostorsko razprostranjenost družbe znanja na podlagi socialno-ekonomskih in razvojnih kazalnikov v Sloveniji. Ključna ugotovitev je, da so ta območja neenakomerno razporejena. Z največjimi deleži izstopajo predvsem zaposlitvena središča nacionalnega pomena in okoliške obmestne občine v nastajajočih mestnih regijah. Območja z velikim deležem ustvarjalnih poklicev so bolj inovativna, njihov ekonomski in družbeni razvoj pa je uspešnejši.

Ključne besede: družba znanja, geografija človeških virov, ustvarjalne socialne skupine, regionalni razvoj, Slovenija.

Razvrstitev: Kratki znanstveni prispevek

Abstract. Studies on the knowledge society and regional innovation systems and their contribution to economic growth are already well established in research literature. This contribution is based on a geographical analysis of connections between technological knowledge, competitiveness factors, and economic effects. It proceeds from the hypothesis that economic effectiveness in a region originates from the quality of human capital, in which innovations are the precondition for social progress, competitiveness, and developmental success. Research focuses on the geographical distribution of developmental generators, which often cause regional disparities. Creative social groups have a clear effect on regional development. This article analyzes the spatial expansion of the knowledge society based on socioeconomic and development indicators in Slovenia. The key finding is that these areas are unevenly distributed. The high share of employment centers of national importance and neighboring peri-urban municipalities in emerging urban regions stands out in particular. Areas with a high percentage of creative professions are more innovative and their economic and social development is more successful.

Keywords: knowledge society, geography of human resources, creative social groups, regional development, Slovenia

Article Classification: Short Scientific Paper

1 Uvod

Znanje in informacije sta poleg surovin, kapitala, bližine dela in potrošnje naslednji dejavnik gospodarskega napredka, ki pa ob prelomu iz 20. v 21. stoletje postaja ključnega pomena. Nova znanja, ki se izražajo bodisi z novimi proizvodi ali v obliki iznajdb (patentov), tehnoloških in organizacijskih pristopov prispevajo tudi k nastanku (sodobnih oblik) socialne in regionalne neenakosti. Nove oblike znanj namreč ne nastajajo povsod, hkrati in enakomerno, marveč pronikajo zgolj iz določenih inovacijskih središč, kar v številnih drugih območjih zaostre njihovo izhodiščno položaj.

V sodobnosti se vedno pogosteje razglablja o različnih oblikah družbene učinkovitosti. Klasične raziskave, ki so doslej opozarjale na pomen razvojnih dejavnikov v pokrajinski podobi ter prikazovale gospodarsko sestavo, prometno povezanost, energetsko, komunalno in komunikacijsko infrastrukturo ter opremljenost s socialnimi, izobraževalnimi in storitvenimi dejavnostmi, izgubljajo pomen. V ospredje prihajajo novi vidiki raziskav, ki poskušajo proučiti povezanost med temeljnimi prvinami družbene (ne)uspešnosti. Mednje v zadnjem obdobju sodijo zlasti raziskave o funkcionalni povezanosti gospodarske strukture s pokrajinskimi značilnostmi (naravnimi viri), moderno komunikacijsko opremljenostjo, izobrazbeno ravno prebivalstva, obsegom in razvojem stopnje socialno-gospodarske in politične odprtosti (tolerantnosti) v družbi ter raziskave o inovacijskih lastnostih družbe kot ključnih razvojnih dejavnikov v napredku kakovosti življenjske ravni prebivalstva v geografsko zaključenih območjih [1]. Zlasti pomembne so raziskave o pomenu in vplivu visoko produktivnih dejavnosti (angl. *venture capital*), ki zahtevajo nove tehnološke in organizacijske prijeme. Ti so praviloma povezani s spremenjenimi potrebami na trgu delovne sile, ki jih običajno enačijo z novim znanjem.

Znanje je bilo vedno pomembno razvojno gibalno v družbi in še posebej v tistih geografsko zaokroženih območjih, ki izpolnjujejo gornja merila. Praviloma se to dogaja v vplivnih območjih velike zgoščenosti prebivalstva – v mestnih regijah. Te s tem odločilno prispevajo k preobrazbi gospodarskih struktur v funkcijsko zaokroženih regijah. Te spremembe posledično vplivajo zlasti na socialno ekonomsko preobrazbo (aktivnega) prebivalstva in na prostorske strukture v pokrajini, kjer se v sodobnosti sproža kopičenje znanja ter tudi mrežno povezovanje območij na regionalni in/ali tudi na svetovni ravni. Uporaba znanja s tem nima le daljnosežnih posledic na spremembe v proizvodnih procesih in na preobrazbo odnosov pri organizaciji in razporeditvi proizvodnje, marveč posledično vpliva tudi na stopnjo razvitosti družbene blaginje v pokrajini. Različni družbenogospodarski in naravnogeografski pogoji so torej pogosto razlog regionalnih nesorazmerij, ki jih mozaično sestavljajo posamezna pokrajinska območja z različno stopnjo razvitosti in hitrostjo preobrazbe strukturnih ter socialno-geografskih sprememb na nekaterih pokrajinskih območjih Slovenije.

Sodobna geografska analiza družbe znanja zato ne temelji na klasičnih ekonomsko-geografskih analitskih kazalnikih, kakor so na primer bruto dohodek na prebivalca, branžna struktura aktivnega prebivalstva ali stopnja zaposlenosti, temveč na novih izhodiščih, ki so se v nekaterih visoko razvitih industrijskih deželah izkazale kot preizkušeno merilo za preučevanje inovacijske uspešnosti gospodarskega razvoja. Številne empirične raziskave so dokazale, da uspevajo predvsem »ustvarjalne« družbe, ki že obstoječemu znanju omogočajo izdelavo kar najboljših, najhitrejših in najdonosnejših proizvodov v kombinaciji s storitvenimi in informacijskimi dejavnostmi.

2 Teoretske podlage in ključni pojmi

Družboslovne znanosti so za razumevanje odnosov o medsebojni povezanosti družbe znanja s stopnjo regionalne uspešnosti razvile veliko teorij. Temeljijo zlasti na proučevanju vplivov stopnje izobraženosti (v pomenu ustvarjalnosti) na elemente tehnološkega in družbenega napredka. Le delo in kapital ne določata več gospodarskega napredka, pač pa je ustvarjalnost

odločujoča gonilna sila gospodarske rasti v visoko razvitih družbah. Znanje tudi ni isto kot ustvarjalnost. Ustvarjalni poklici so po mnenju Floride [2] potencial, ki ga sestavlja celotna populacija naroda in s svojo poklicno sestavo prispeva k razvoju. Z ustvarjalnostjo je močno povezana še strpnost med socialnimi skupinami, ki prav tako sproža naložbene aktivnosti in s tem spodbuja gospodarski napredek. Podlaga za njihov razvoj pa so inovacije in interaktivni proces institucionalizirane državne ureditve ter na tej podlagi organizacija družbe.

Pojem »družba znanja« se je postopno začel uveljavljati kot družbenogospodarska razvojna zamisel že pri avstrijsko-ameriškem teoretiku upravljanja Druckerju [3] v začetku sedemdesetih let prejšnjega stoletja. Po prvotnem razumevanju je pomenila gospodarsko ureditev, kjer znanje v primerjavi s surovinami, kapitalom, infrastrukturno opremljenostjo, delom in bližino potrošnje (preskrbovalnih in oskrbnih funkcij) dobiva vse pomembnejšo vlogo. Njegovi učinki so v družbenem razvoju ugodne vplivali na gospodarsko rast, pa tudi na socialno diferenciacijo v družbi. To je bilo tudi obdobje, ko je v razvitih deželah prišlo do močnega povečanja državnih in zasebnih aktivnosti, zlasti v služnostnih dejavnostih ter hkrati do naglega povečevanja števila in kakovosti izobrazbene ravni, zlasti na akademski stopnji.

Teorijo o vzročni povezanosti med družbenim napredkom, količino nakopičenega znanja in tehnološkim razvojem v sodobnih družbah izpričujejo številni praktični dokazi. V družbi, ki želi ljudem prigospodariti čim več blagostanja, se delež ustvarjenega dohodka s surovinami in masovno proizvodnjo zmanjšuje zaradi večanja znanja in izkušenj (know-how) in intelektualnih dejavnosti. Izobrazba in izobraženci so danes najpomembnejši kapital visoko razvitih družb, katerih cilj je zagotavljanje kakovosti življenja s čim manjšo porabo (naravnih) virov.

Različna poimenovanja, kjer znanje v družbenem napredku prevzema vodilno vlogo, je v osemdesetih letih dvajsetega stoletja spodbujala skupina frankofonskih raziskovalcev "Groupe de Recherche Européenne sur les Milieux Innovateurs" (*GREMI*), ki so s teoretskega vidika veliko prispevali k uveljavitvi pojma »ustvarjalno okolje« [4].

Pojem družba znanja je v zadnjih desetletjih prejšnjega stoletja sovpadal z drugimi pojmovanji sodobnih družbenih dogajanj. Pogosto ga spremljajo sinonimi, na primer »ekonomija znanja« (*knowledge economy*) in »na znanju temelječe gospodarstvo« (*knowledge based economy*), za katera je značilno hitro razvojno spreminjanje družbenogospodarskih razmer na podlagi strukturnih sprememb. Za družbo znanja se uporabljajo tudi sorodni izrazi, zlasti na primer »*Lernende Regionen* - učeče se regije« [5-7] in »*milieu créatif* - ustvarjalno okolje« [4] [8-9]. Povezani so z raziskavami o učinkih »postindustrijskega« oziroma »postfordističnega« načina proizvodnje na družbo. Spodbujajo jih zlasti analize o inovativnem regionalnem razvoju kot prisposobi za sposobnost uspešnega prenosa novih znanj v prakso ter intenzivno povezovanje znanstveno-tehnoloških centrov z gospodarskimi omrežji in združenji.

V devetdesetih letih prejšnjega stoletja so družbo znanja pričeli enačiti tudi s pojmom »informacijske družbe« [7][9]. Raziskave so bile usmerjene v široko prežemanje dela z računalniki in njenim omrežjem (internet), ki je zaradi hitrega pretoka informacij (tehnološki transfer) omogočil hitrejšo medsebojno povezovanje gospodarstva in s tem nove oblike inovacijskih in povezovalnih procesov (mreženje). Zlasti se je povečal pomen znanja na področju komunikacijskih dejavnosti in njihovih organizacijskih sestavin (kakor na primer upravljanje z znanjem). Vse to je vplivalo na spremenjen način življenja. Spremenili so se standardi kakovosti življenja, na primer na področju ponudbe in opremljenosti s kulturnimi institucijami, različnih socialnih aktivnosti in možnosti za rekreacijo in prosti čas in podobno. Povečala se je zlasti stopnja mobilnosti prebivalstva, in to na svetovni in tudi regionalni ravni.

Raziskave o družbi znanja in ustvarjalnosti se pri različnih družboslovnih znanstvenih disciplinah, ki se ukvarjajo s to problematiko, medsebojno dopolnjujejo:

- Sociologija prednostno motri nastanek, širjenje in izrabo znanja v institucionalnem kontekstu. Teoretske podlage izhajajo iz Freemanovih (1987) opredelitev inovacijskih sistemov mrežnega povezovanja gospodarskih združenj ter institucij v javnem in zasebnem sektorju, ob hkratni razpršenosti znanja na različnih področjih, čigar aktivnosti so sprožile hkratne

- interakcije na področju tehnoloških inovacij, informacijskih tehnologij in družbeno političnega podpornega okolja. [10]
- Ekonomska spoznanja izhajajo iz neoklasične teorije rasti, ki jo pospešuje povezanost izobraževalnega sistema, inovacij in produktivnosti. Temelji na tehničnem napredku ter spodbudnem političnem in duhovnem ozračju [11-15]. Poznejše raziskave temeljijo na tehnološkem napredku, temelječem na inovacijah, raziskovanju in kopičenju človeškega kapitala kot izvoru rasti. Povezanost novih znanj s podjetništvom rojeva komercializacijo novih idej, ki so gonilna sila gospodarskega napredka in s tem regionalnega razvoja [16-17].
 - Tudi teoretske in empirične raziskave geografije človeških virov so čedalje pomembnejše [18]. Njihovo prevladujoče izhodišče je, da uveljavljanje znanja razlagajo s prostorsko (pre)razporeditvijo njihovih nosilcev. Izhajajo tudi iz teze, da globalizacija omogoča mreženje proizvodnje, ki je vse manj odvisna od regionalne vpetosti v zaključenih geografskih okoljih. Povezovanje v različne nadnacionalne tvorbe pomembno vpliva na prostorske strukture tudi v lokalnih okoljih. Pri tem ima izgrajevanje omrežja prometnih koridorjev daljnosežne posledice za razvoj mest kot razvojnih generatorjev. Omogoča demografske spremembe ter oblikovanje in širitev njihovih gravitacijskih zaledij. Z njimi je povezana naraščajoča mobilnost prebivalstva. Vidni učinek je v oblikovanju mestnih regij in njihovih vplivnih območij, ki tako postajajo središče prestrukturiranja družbenih procesov. Z njimi se oblikujejo nove možnosti za mrežno povezovanje in skrb za pospeševanje ugodnega gospodarskega vzdušja za človeški in socialni kapital, zlasti s ponudbo privlačnih lokacij za naseljevanje, s širjenjem ponudbe materialne in nematerialne infrastrukture. Kopičenje znanja tako vzajemno in obojestransko vpliva na oblikovanje mestnih regij in preobrazbo gospodarskih aktivnosti. V teh razmerah so se mesta kot razvojni generatorji prisiljena prilagajati spremenjenim silnicam, ki spodbujajo tekmovalnost in s tem konkurenčnost. Njihov geografski odsev se odraža v zgoščenosti teh aktivnosti zlasti v mestnih območjih z ugodnimi lokacijskimi pogoji

3 Družba znanja

Razlage o temeljnih značilnostih družbe znanja niso enotne. Tudi na mednarodni ravni ni skupne natančne opredelitve pomena in vloge inovacijskih dejavnosti kot pomembnih sestavin družbe znanja. Pri pojasnjevanju obstajajo različni pristopi za njeno opredelitev. Razpon uporabe predstave pojma družbe znanja sega od ozkih razlag, ki temeljijo na učinkih tehnoloških inovacij, do celovitejših diskurzov.

Prvi pri vrednotenju izhajajo iz predpostavk, da je vzpostavitev na znanju temelječe družbe prvinsko povezana s tehnološkimi spremembami zlasti v industrijski proizvodnji. Po tej razlagi je razvoj inovacij na tehnično-tehnoloških področjih povezan z njihovo uporabo v praksi, ki predstavlja ključni element družbenega napredka [19].

Pod pojmom inovacije razumemo zlasti nastajanje novih proizvodov in organizacijskih rešitev, ki se uveljavijo v proizvodnih procesih ali na trgu ter s tem prispevajo k razvoju produktivnosti in k blaginji v družbi. Ob inovacijah nastajajo nova samostojna podjetja ali pa se obstoječa povezujejo v omrežja z drugimi igralci (na primer s podpornimi podjetji in zlasti z raziskovalnimi ustanovami), ki ustvarjajo ali pa vpijajo nova znanja ter jih pretvarjajo v tržne izdelke. Tudi sposobnost podjetij, ki se prilagajajo spreminjajočim se razmeram na trgu, lahko označujemo kot inovacije [17].

Poleg tega v literaturi posamezni avtorji razlikujejo različne oblike inovacij, zlasti [20]:

- tehnološko/naravoslovne,
- duhovno/družboslovne in
- ustvarjalno/kulturne inovacije.

Možnosti hitrejšega pretoka blaga, storitev in znanja so se z razvojem informacijskih tehnologij bistveno spremenile ter so sprožile globalizacijo gospodarstva in globalno delitev dela. Tehnološke inovacije in nove komunikacijske možnosti so v zadnjih letih 20. stoletja torej

ustvarile razmere za razvoj na znanju temelječe družbe. Dejansko pa gre za tesno prepletanje tehnično-tehnoloških, ekonomsko-geografskih in regionalno-geografskih procesov. Zato v OECD menijo, da gre pri uporabi pojma družbe znanja za izjemno zapleten proces, ki ga spremlja več podsistemov [21]. Poleg tehnično-tehnološkega, kjer prednjačijo tehnološko intenzivne industrijske panoge, imajo posebno vlogo raziskovalne in razvojne dejavnosti, vključno s komercialnim vidikom. Vse pa temeljijo na znanju temelječih storitvah in so usmerjene v organizirano razdeljevanje blaga in storitev (zlasti informacij). Pri tem imata pomembno vlogo zlasti delo in znanje z velikim deležem visoko usposobljenih delavcev [22].

V primerjavi z obdobjem industrijske družbe je razlika v tem, da so tehnološke spremembe, zlasti na področju informacijskih in komunikacijskih tehnologij, pripeljale do korenitih družbenih sprememb v dojemanju družbe znanja. Spremenila se je izobrazbena raven prebivalstva in z njo na primer dejavniki, povezani z vsebinami izobraževalnih sistemov, za razvoj družbe znanja. Nastali so tudi prožnejša pravila in prožnejši standardi, kakor so jih narekovali sistemi za uravnavanje učinkovitosti v tradicionalnem razumevanju industrijske družbe. Inovacije imajo prav tako pomembno vlogo na področju zniževanja stroškov dela. Vse to pa se odraža v socialnih in prostorskih spremembah družbenega okolja.

Ko govorimo o družbi znanja in njenem pomenu, je nedvoumno, da na znanju temelječe gospodarstvo predstavlja gonilno silo razvoja. Strukturne spremembe so postindustrijsko družbo vzročno postavile pred nove izzive ne le na tehnično-tehnološkem, temveč tudi na gospodarskem in družbenem področju. Vsi posamični elementi pojavov človekovega delovanja imajo s tem svoj neposredni ali posredni odsev v pokrajinski stvarnosti. Družbo znanja lahko torej razlagamo s tremi razsežnostmi: tehnično-tehnološko, ekonomsko-geografsko in regionalno-geografsko. Vsaka izmed njih ima svojstvene in samobitne značilnosti, ki izhajajo iz različnih geografskih pojavnih lastnosti v pokrajini (slika 1).



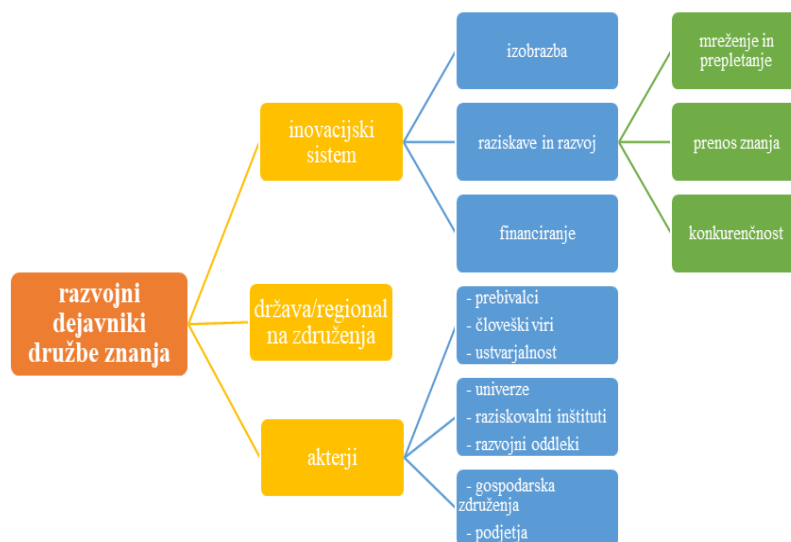
Slika 1. Razsežnosti družbe znanja in učinki na pokrajinsko podobo

Na znanju temelječo družbo torej sestavljajo številni dejavniki. Pomembno je pridobivanje znanja na vseh področjih. Zlasti na naravoslovno-tehničnem, pa tudi na družboslovno-humanističnem. Ključna je njihova pretvorba v številna družbenih dogajanja in prepletanja. Njen osrednji del je učenje, in sicer na institucionalni, individualni in zlasti na podjetniški ravni. Družba znanja je torej neposredno povezana z nenehnim učenjem in ga lahko poimenujemo kot proces, ki je vgrajen v uspešnih družbeno-kulturnih okoljih (na nacionalni in/ali regionalni ravni). Razvoj novih znanj hkrati pomeni intenzivno osebno in institucionalno povezovanje akterjev na različnih področjih, zlasti pa med medsebojno sektorsko povezanimi branžami in tudi v določenih geografsko (medsebojno) povezanih okoljih, ki imajo pogosto tudi svetovne razsežnosti (na primer: grozdi znanja ne poznajo meja).

Znanje, delo in učenje so v sodobnosti v nasprotju s linearnimi modeli iz obdobja industrijske družbe načrtovani interaktivno in so tesno povezani s posebnimi izobraževalnimi, socialnimi in kulturnimi ustanovami ter vedno tudi ne v skladu z ustaljenimi (privzgojenimi) navadami. Sodobna družba znanja ni odvisna le od lastnih sredstev, ampak zlasti od podpornega okolja, ki spodbuja inovacijske procese in jih običajno določa šest medsebojno povezanih področij:

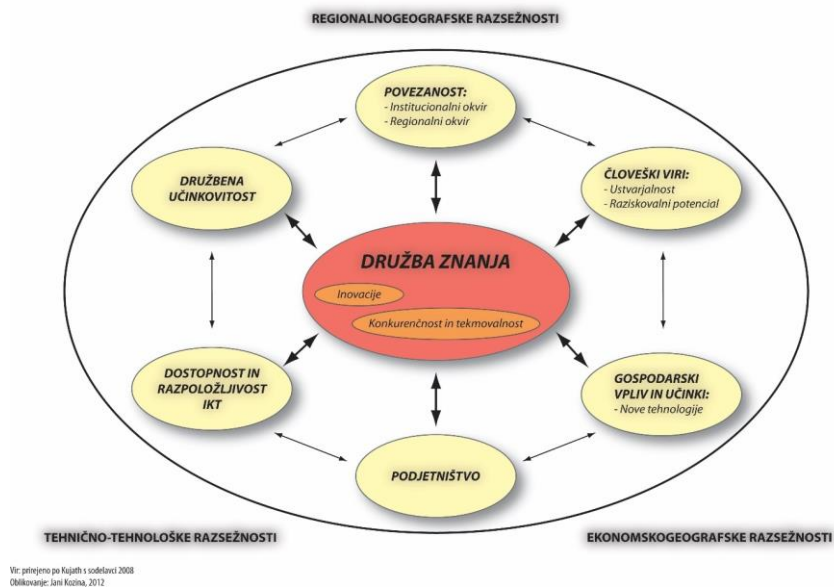
- izobraževalni sistem;
- raziskovalni sistem (univerze, visokošolske in raziskovalne ustanove ter drugi razvojno-raziskovalni oddelki);
- financiranje znanja in inovacij;
- medsebojno povezovanje znotraj in med različnimi skupinami udeležencev;
- prenos novosti v gospodarstvo (proizvodnji) in na trge;
- inovacijam prijazna ureditev z gospodarskimi, političnimi in pravnimi odnosi v družbeni skupnosti, ki spodbuja konkurenčnost.

Hierarhični družbenogospodarski odnosi iz obdobja velikih gospodarskih in/ali državnih upravnih sistemov izgubljajo svoj pomen. Nadomeščajo jih vertikalno in horizontalno organizirane mreže sorodnih medsebojno povezanih sektorskih disciplin in ustanov, ki imajo še posebej pomembno vlogo v naravno in družbeno geografskih zakonitostih inovacijskih procesov na vseh področjih družbenega življenja. Na ta način znižujejo transakcijske, proizvodne in tudi druge družbene stroške. Spodbujajo tudi zaupanje med prebivalstvom, gospodarskimi in družbenimi akterji, izboljšujejo podjetniške veščine ipd. Ustvarjanje novega znanja in njegova izmenjava (na primer inovacij) sta neločljivo povezana tudi z medsebojnim sodelovanjem in komunikacijo ne le na svetovni ravni, ampak so zlasti pomembni v konkretnih lokalno prepletenih in medsebojno povezanih gravitacijskih območjih zlasti mestnih regij (slika 2).



Slika 2. Model razvojnih dejavnikov družbe znanja

Čeprav obstajajo svetovne mreže znanja, pa te kljub temu vendarle potrebujejo institucionalno in organizacijsko podporno okolje v geografsko in funkcijsko zaokroženem območju. Regionalna povezanost prepletov znanja je tako bistvenega pomena za medosebne izmenjave znanja [23]. Čeprav se skupni okvir znanja ustvarja na velike razdalje, so navkljub vsemu vendarle v večini primerov odločujoče osebne povezave znanja, povezane s konkretnimi razvojnimi generatorji v tistih urbanih središčih, ki izpolnjujejo znanju prijazne lokacijske pogoje. Kujath tovrstno povezanost imenuje kot lokacijsko lepljivost (angl. *locational stickiness*), ki se prilagaja posebnim lokalnim razmeram. V njih pa se akterji načrtno seznanjajo s tehnološkimi dosežki in nadalje »preoblikujejo/izboljšujejo« ideje s celega sveta [20]. Prenos znanja in njegova učinkovita uporaba je danes ključnega pomena za gospodarsko uspešnost in socialni razvoj države ter zlasti njenih sestavnih delov v gravitacijsko zaokroženih vplivnih območjih mest. Poudarek je na ustvarjanju, uvajanju in koristni uporabi znanja. To je odvisno od kombinacije obstoječega znanja in/ali od sposobnosti kombiniranja različnih znanj [24].



Slika 3. Razsežnosti družbe znanja

Dejavniki družbe znanja se medsebojno prepletajo. V skladu z razvojno vlogo na znanju temelječe družbe so v njej različni poudarki. Na modelni ravni njene razsežnosti v vsej celovitosti in medsebojni povezanosti prikazuje slika 3. Vodilna načela družbe znanja in njenih vlog v družbenem okolju kot gonilnih globalizacijskih silnic sestavljajo povezanost človeških virov in njihove inovativnosti z družbeno učinkovitostjo, ki zagotavlja konkurenčnost. Združujejo jih tri ključne razsežnosti: tehnično-tehnološke, ekonomsko-geografske in regionalno-geografske. V tem celovitem krogotoku družbene učinkovitosti ima pomembno povezovalno vlogo tudi podporno okolje, ki ga sestavljata institucionalna organiziranost (na regionalni ravni) in dostopnost do sodobne infrastrukturne opremljenosti.

Tehnično-tehnološki vidik je poleg raznovrstnih oblik inovacij odločujoče povezan z dostopnostjo do kakovostnih informacijskih in komunikacijskih tehnologij (IKT). Podporno okolje z ustrezno infrastrukturo. IKT je v sodobni družbi »*conditio sine qua non*« za zagotavljanje družbene učinkovitosti. Vsebuje celotno infrastrukturno omrežje kot enotni sistem, ki zagotavlja razmere za razvoj (angl. »*social overhead capital*«) in ga je mogoče členiti na tri področja: (a) socialno infrastrukturo (mrežo zdravstvenih, izobraževalnih, kulturnih in podobnih ustanov), (b) tehnično infrastrukturo (prometno, telekomunikacijsko, komunalno, oskrbovalno in podobno opremo) ter (c) institucionalno infrastrukturo (javna uprava, notranja varnost, sodstvo in podobno). Infrastruktura pomaga podjetniškemu sektorju pri varčevanju proizvodnih stroškov (zlasti prometnih in transakcijskih). Moderna infrastruktura zajema tudi tiste materialne in institucionalne dejavnosti ter naprave, ki v pokrajini sodelujejo pri proizvodnji in s tem pri gospodarskem razvoju, preskrbi prebivalstva ter oblikovanju naselbinskega sistema. torej odloča zlasti o produktivnosti in učinkovitosti javnih in zasebnih naložb ter sestavlja nujno podlago za nemoteno delovanje regionalnega razvoja.

Gospodarske razsežnosti so povezane z učinki medsebojne povezanosti gospodarskih sektorjev, ki se prepletajo z ekonomijo znanja in človeškega kapitala. Obstajajo tudi pomembne vzročne povezave med podjetništvom in upravno-tehničnimi oblikami, ki lahko spodbujajo ali zavirajo prožnost razvoja podjetništva v določenem okolju.

In končno, regionalno-geografske in socialne razsežnosti utemeljujejo pomembnost izobraževanja in usposabljanja. Preučevanje geografije človeških virov je povezano s preučevanjem izobrazbene ravni prebivalstva, ustvarjalnosti in raziskovalnih potencialov, ki so

podlaga za stabilen pretok nove delovne sile, znanja in spodbujanja sistemskega razmišljanja. Kopičenje ustvarjalnih prebivalstvenih skupin je v določenih geografsko zaokroženih območjih povezano z izbranimi gospodarskimi dejavnostmi, ki so v sodobnih razmerah vpete v tekmovalnost in zato takšna geografsko zaokrožena območja še posebej potrebujejo visoko izobražene in ustvarjalne sodelavce.

Središča gospodarske moči so osredotočena zlasti v urbani(zirani)h območjih. Najpomembnejšo vlogo imajo zlasti tista okolja, ki pospešujejo materialno, socialno, kulturno in simbolno (prepoznavnost), kakor je npr. sodobna infrastrukturna opremljenost. Vendar tudi za (ne)uspešnost mest veljajo posebni lokacijski in družbenogospodarski pogoji. Ta pa se skoraj po pravilu oblikujejo v večjih urbanih območjih s »kritično« velikostjo aktivnega prebivalstva, zlasti v ustvarjalnih poklicih. Kajti ta lahko ponudijo bogastvo materialnih virov, kulturne in socialne raznolikosti ter s tem več priložnosti za raznovrstno ponudbo in povpraševanje na trgu delovne sile, kakršno zahteva družba znanja. Pri tem tovrstno delovno silo razumemo kot bazen znanja, ki je odprt za različne oblike sodelovanja. Temelji na spodbudnem okolju, sodobni komunikacijski in prometni infrastrukturi in raznovrstnosti ponudbe na trgu delovne sile. Skratka, s tega vidika je urbana družba sinonim za oblikovanje nastajajoče družbe znanja. Mestne regije so za družbo znanja torej »*localities of learning*« (Dosi, 1996).

V zadnjem obdobju se veliko govori o novi tehnološko-industrijski postfordistični paradigmi, kjer produkcijski sistemi nakazujejo težnjo po ustvarjanju strukturiranega mozaika prilagodljivih, specializiranih, samoprilagodljivih lokalnih sistemov z medsebojno povezanostjo v okvirih celovitih omrežij (»network«). To tezo so še pred nedavnim močno kritizirali, ker so dvomili, da je mogoča pomembna dihotomija (ločevanje) med masovnimi (fordističnimi) in prilagodljivimi produkcijskimi sistemi. Res je očitno, da masovni produkcijski sistemi tudi v globalizacijskih pogojih niso preteklost, toda prav tako drži, da strukturno prilaganje v takih razmerah zahteva nove organizacijske oblike.

Za naseljevanje ustvarjalnih poklicev so se kot najbolj primerni lokacijski dejavniki izkazali tisti, ki so povezani s prijazno pokrajinsko mikavnostjo (*"natural amenities"*), privlačnimi bivalnimi razmerami (pred tistimi s cenenimi bivalnimi razmerami), raznoliko kulturno ponudbo (*"cultural amenities"*), uspešnim šolskim sistemom ter možnostmi nadaljnega izobraževanja, z znanstvenoraziskovalno (zlasti tehnološko) tradicijo in sodobno infrastrukturno opremo, velikim številom visoko kvalificiranih strokovnjakov v že obstoječih podjetjih z visoko tehnologijo ali tehnoloških parkih (univerzah in/ali raziskovalnih ustanovah), z majhnim deležem industrijskih podjetij, zlasti tistih, ki ne onesnažujejo okolje, in tista območja, ki so se odzvala pozivom po okolju prijazni proizvodnji, območja z bogato ponudbo specializiranih poslovnih storitev (*"business services"*), ki so sposobni še naprej razvijati proizvode visoke tehnologije, območja, ki že dalj časa izkazujejo živahen in stabilen prebivalstveni razvoj ter središča z že izgrajenim omrežjem sodobnih informacijskih povezav.

Produkcijski procesi znanja imajo svetovne in hkrati tudi regionalne razsežnosti. Lastnosti družbe znanja so še posebej povezane s spodbujanjem podpornega okolja na regionalnih/lokalnih ravneh. Zato se v sodobnosti težišča družbe znanja prenašajo z (nad)nacionalnih tudi na regionalne ravni.

4 Izbira kazalnikov in metodologija vrednotenja družbe znanja

Za operacionalizacijo vrednotenja smo oblikovali sistem kazalnikov, ki vsebujejo tehnično-tehnološke, ekonomsko-geografske in regionalno-geografske razsežnosti družbe znanja in so statistično dosegljivi ter bralcu razumljivi in nazorni. Z njimi smo analizirali prostorsko razprostranjenost, učinkovitost ter prednosti in pomanjkljivosti posameznih geografskih območij v Sloveniji. Geografsko zaokrožena območja smo oblikovali na podlagi območij lokalnih skupnosti in/ali razvojnih regij. Pozornost namenjamo temeljnim značilnostim gospodarske in socialno-geografske preobrazbe družbe, ki jo narekuje ustvarjalno okolje kot poglavitno gibalno sodobnega družbenega napredka. Cilj izbire kazalnikov je razumljivo ovrednotiti inovacijsko moč in učinkovitost družbe na lokalni in regionalni ravni. Z vrednotenjem omogočamo tudi možnost konkretizacije razvojnih dejavnikov družbe znanja z natančno opredeljenimi in merljivimi številčnimi vrednostmi. Izbiri kazalnikov, povezano z dostopnimi podatkovnimi zbirkami, prikazuje spodnja tabela.

Tabela 1. Seznam spremenljivk po posameznih razsežnostih družbe znanja

Družba znanja		
Tehnološka razsežnost	Gospodarska razsežnost	Regionalno-geografska razsežnost
Število patentov	Gostota delovnih mest	Izobrazbena raven
Znanstvene objave	Indeks propulzivnosti	Gostota študentov
Indeks podjetništva	Lokacijska divergenca	Indeks zaposlenosti
Dostopnost do interneta	Indeks delovnih mest	Indeks ustvarjalnosti po kraju bivanja
Prometna dostopnost	Indeks ustvarjalnosti po kraju dela	Stopnja urbanizacije
	Število raziskovalcev	Velikost vplivnega območja
	Indeks talenta	Stopnja urbanizacije in rast
	Indeks naložb	

Vrednotenja sistemov družbe znanja na podlagi gornje izbire kazalnikov in uspešnosti posameznih geografskih območij je poenostavitev predpostavke o raznolikih modelih družbe znanja, povezanih z značilnostmi gospodarske rasti, inovativnosti, tehnoloških izboljšav in kakovosti življenjskega okolja.

Pri vrednotenju medsebojne povezanosti družbe znanja smo torej s posebnim naborom kazalnikov v povezanem raziskovalnem modelu primerjali:

(I) tehnično-tehnološki vidik, ki ga podpirajo kazalniki infrastrukturne opremljenosti. V tem sklopu smo najprej primerjali število patentov. V tej povezavi ima pomembno vlogo tudi število točk, zbranih z objavami znanstvenih člankov in navedbe v revijah ter indeks razvoja podjetništva. Infrastrukturno opremljenost smo vrednotili z deležem gospodinjstev z dostopom do širokopasovnega omrežja in dostopnostjo do pomembnejših zaposlitvenih središč.

(II) Ekonomsko-geografski vidik vrednotenja je povezan z gostoto trga delovne sile, zlasti v skupini, ki je povezana z ustvarjalnostjo in obsegom naložb. V ta namen smo izbrali naslednje kazalnike: gostota delovnih mest, indeks zaposlenosti, lokacijska divergenca, indeks propulzivnosti, indeks ustvarjalnosti, indeks talenta in indeks vrednosti naložb.

(III) Regionalno-geografski vidik družbe znanja je povezan z medsebojno povezanostjo izobrazbene ravni, šolajoče se mlade generacije, strukture aktivnega prebivalstva v regionalnih in lokalnih okoljih. Socialno-geografske kazalnike in njihovo razporeditev po kraju bivanja tako predstavljajo: delež delovno aktivnega prebivalstva s terciarno izobrazbo, gostota delovno aktivnega prebivalstva v ustvarjalnih poklicih po kraju bivanja in gostota študentov v terciarnem izobraževanju glede na kraj bivanja. Geografsko privlačnost območij pa dodatno spodbujata tudi indeks zaposlenosti in indeks ustvarjalnosti socialno-geografskih skupin aktivnega prebivalstva.

In končno, gospodarska uspešnost je v določenem okolju odvisna od stopnje gostote prebivalstva in stopnje urbanizacije, ki pospešuje konkurenčnost ter njihovo število določa razvojne priložnosti v določenem geografskem okolju. V ta namen smo vrednotili še velikost neposrednega gravitacijskega zaledja, stopnjo središčnosti in urbaniziranosti.

S preučevanjem družbe znanja želimo odgovoriti na nekaj ključnih vprašanj, kar lahko prispeva k boljšemu razumevanju in osvetlitvi tega celovitega pojava v Sloveniji. Na splošno lahko ta vprašanja razdelimo na dva dela. V prvem želimo s podrobno analizo izbranih kazalnikov preučiti ključne lastnosti dejavnikov družbe znanja in njihovo medsebojno povezanost. V drugem delu pa smo na podlagi bistvenih dejavnikov preverili, ali je Slovenijo na ravni lokalnih skupnosti in/ali regij mogoče razdeliti na posamezna sorodna območja, ki kažejo skupne ali podobne značilnosti družbe znanja. Z odgovori na raziskovalna vprašanja želimo izluščiti usmeritve, kako (s katerimi ukrepi) in kje usmerjati razvoj, ki vodi v približevanje družbi znanja, kakršno poznamo v gospodarsko uspešnih razvitejših državah sveta. Za odgovore na ta vprašanja smo uporabili faktorsko analizo, za tipologijo lokalnih skupnosti v sorodna območja s skupnimi značilnostmi pa razvrščanje v skupine [25].

5 Geografska razporeditev in tipologija območij glede na dejavnike družbe znanja

Analiza statističnih podatkov delovno aktivnega prebivalstva po občinah delovnega mesta in področnih skupinah poklicev, ki jih spremlja SURS, je za leta med 2008 in 2010 pokazala, da je gospodarska kriza močno spremenila trg delovne sile. Število aktivnega prebivalstva se je zmanjšalo od 858.345 na 790.967 ali z 42,4 % na 38,6%. Med razvojnimi regijami so nadpovprečni upad števila aktivnega prebivalstva zabeležili v Pomurju, na Koroškem, Goriškem, Savinjskem in v Zasavju. Med občinami pa se je npr. v Semiču, Svetem Andražu in Svetem Juriju v Slovenskih Goricah, Hodošu, Svetem Tomažu, Sveti Ani, Mirni Peči, Solčavi, Blokah, Središču ob Dravi, Trnovski vasi, Taboru, Hajdini, Gornjih Petrovcih, Tišini in Zavrču delež aktivnega prebivalstva zmanjšal za več kakor četrtno.

Kljub zmanjšanju števila delovno aktivnega prebivalstva in povečanju brezposelnosti, ki se je v dobrih dveh letih skoraj podvojila (od 63.216 v letu 2008 na 115.132 začetkom leta 2011), so v tem obdobju nastale velike spremembe na trgu delovne sile. V obdobju 2008–2010 se je npr. skupno število delovno aktivnega prebivalstva zmanjšalo za 67.378 in to je povzročilo pomembne strukturne spremembe. Pogled v standardno klasifikacijo poklicev razkriva nekaj socialno-ekonomskih razlogov gospodarske krize, ki nakazujejo, da gospodarska struktura zaposlenih ni bila kos svetovnim izzivom. Na eni strani je opazen padec aktivnega prebivalstva v skupini poklicev, ki zahtevajo nižjo raven znanja, in poklicev na srednji ali nizki stopnji zahtevnosti. Ta so se zmanjšala za 78.428 ali za 11 %. Na drugi strani pa se povečuje število zaposlenih v skupini poklicev, ki zahtevajo najvišjo stopnjo izobrazbene ravni. Število aktivnega prebivalstva v tej skupini se je povečalo za 11.050 ali 8 % in predstavlja petino vsega aktivnega prebivalstva. Med njimi jih je 37 % v osrednji Sloveniji.

Analiza razvojnih dejavnikov družbe znanja po razvojnih regijah izkazuje neenakomerno razporeditev, zlasti glede kazalnikov, povezanih z znanstvenimi objavami, indeksom talenta, številom delovnih mest na 1000 prebivalcev, indeksom naložb, prometno dostopnostjo in številom prebivalcev v mestnih središčih in njihovih zaledjih.

Znanstvene objave so med vsemi kazalniki najbolj neenakomerno razporejene. Njihovo število je izrazito vezano na razvojne regije z večjim številom visokošolskih ustanov. Tako prihaja do močne zgoščenosti predvsem v osrednjeslovenski, podravski, obalno-kraški in deloma goriški regiji, kjer imajo svoj sedež vse štiri univerze. V srugih razvojnih regijah je objavljanje člankov v znanstvenih revijah zanemarljivo. Podobno kakor znanstvene objave se prostorsko razporeja tudi njim soroden kazalnik, indeks talenta, čeprav so razlike med regijami v tem primeru nekoliko manjše.

Povezanost v neenakomerni razporeditvi lahko opazimo še med kazalniki, kakor so: število prebivalcev, število delovnih mest na 1000 prebivalcev in indeks naložb. V regijah z večjim

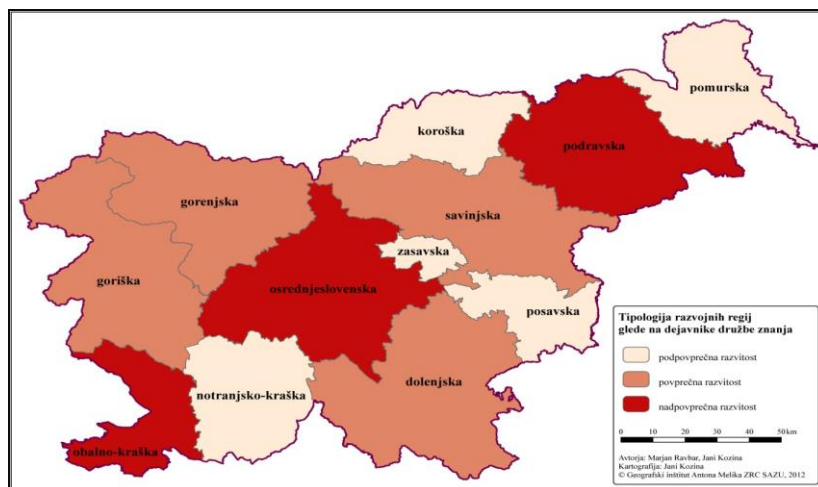
številom prebivalstva je praviloma zgoščeno večje število gospodarskih dejavnosti, kar ima za posledico večje število delovnih mest in investicij. Visoke vrednosti dosegajo zlasti osrednjeslovenska, podravska in savinjska regija, nizke pa koroška, pomurska, notranjsko-kraška, posavska in zasavska regija. Regija, ki glede tega pozitivno izstopa, je obalno-kraška, saj kljub populacijski majhnosti izkazuje zelo intenzivne gospodarske dejavnosti z nadpovprečnim številom delovnih mest in investicij. Po številu prebivalstva je na primer ta regija štirikrat manjša od osrednjeslovenske, ki tudi sicer po vseh treh merilih dosega najvišje vrednosti, vendar se po številu delovnih mest na 1000 prebivalcev in indeksa naložb uvršča takoj za njo. Podobne težnje lahko opazimo tudi v dolenski in goriški regiji, medtem ko je gorenjska primer regije, ki bi glede na svojo velikost morala imeti bistveno več delovnih mest ter močnejše spodbujati naložbe. Tu se nazorno odraža čedalje večji ustroj Kranja kot satelitskega mesta Ljubljane, ki s svojo gospodarsko razvojno strukturo ni dovolj zanimiv za investitorje.

Med dejavniki družbe znanja, ki prikazujejo stanje izobrazbe in infrastrukturne opremljenosti, so regionalne razlike precej manjše. Izobrazbena raven, ki jo prikazuje delež delovno aktivnih prebivalcev po kraju bivanja s terciarno izobrazbo, izstopa edino v osrednjeslovenski regiji. V njej je takih prebivalcev za eno tretjino, medtem ko jih je v drugih regijah med eno petino in dobro četrtino. Je pa s tega vidika opazna delitev na bolj izobraženo zahodno (gorenjska, goriška, notranjsko-kraška, obalno-kraška in osrednjeslovenska regija) in nekoliko manj izobraženo vzhodno (dolenjska, koroška, podravska, pomurska, savinjska, posavska in zasavska regija) Slovenijo. Pri kazalniku števila študentov na 1000 prebivalcev podobno kakor pri izobrazbeni ravni večjih regionalnih razlik ni zaznati. V vsaki regiji živi približno 50 študentov na 1000 prebivalcev, delitve na vzhodno in zahodno Slovenijo pa v tem primeru nismo zaznali. Tudi glede dostopnosti do interneta o večjih regionalnih razlikah ne moremo govoriti. Nekoliko večjo pokritost s priključki širokopasovne internetne povezave lahko opazimo le na območjih, kjer so največja urbana središča (osrednjeslovenska, podravska, obalno-kraška, savinjska in gorenjska regija). Drugi kazalnik, ki prikazuje stanje infrastrukturne opremljenosti, je v tem primeru nekoliko poseben, saj je vrednost prometne dostopnosti do regionalnega središča odvisna tudi od velikosti in prostorskega obsega regij ter geografske raznolikosti razvojnih regij. Tako je na primer po tem kazalniku najvišje ovrednotena najmanjša zasavska regija, pa čeprav po kakovosti zlasti cestne infrastrukture nikakor ne sodi med najboljše opremljene.

Kazalniki, ki prikazujejo razvoj podjetništva, delovnih mest in zaposlenih s poudarkom na ustvarjalnih poklicih, nakazujejo, da v tem obdobju bistvenega povečanja regionalnih razlik ni bilo. Število podjetij se je v omenjenem obdobju v Sloveniji povečalo za skoraj dve tretjini, najmanj v goriški regiji, najbolj pa, zanimivo, v pomurski regiji (kar so očitno posledica državnih razvojnih spodbud za strukturno prestrukturiranje gospodarstva kot nadomestilu za razkroj tekstilne industrije v Pomurju).

Število delovnih mest oziroma zaposlenih se je v tem času na ravni države zmanjšalo, kar je posledica zadnjega obdobja, ko se je začela gospodarska recesija. Do rahlega povečanja je prišlo samo v osrednjeslovenski in obalno-kraški regiji, do največjega zmanjšanja pa v pomurski, zasavski in koroški regiji. Kljub temu se je v preučevanem obdobju močno povečalo število prebivalcev z ustvarjalnim poklicem, kar je za Slovenijo kot družbo znanja dober obet.

Na podlagi sinteznega pregleda dejavnikov družbe znanja lahko razvojne regije razdelimo v tri skupine (slika 4). V prvo skupino sodijo regije, ki izkazujejo nadpovprečne ali vsaj povprečne vrednosti v večini uporabljenih kazalnikov družbe znanja. To so osrednjeslovenska, podravska in obalno-kraška regija. V drugo skupino lahko uvrstimo regije, ki imajo zelo nizke vrednosti za kazalnik znanstvenih objav in nižje vrednosti za kazalnik indeks talenta, medtem ko so vrednosti pri drugih kazalnikih blizu državnega povprečja. To so gorenjska, goriška, dolenska in savinjska regija. Za tretjo skupino so značilne manjše regije, ki izkazujejo zelo nizke vrednosti za kazalnika znanstvene objave in indeks talenta ter nekoliko nižje vrednosti za kazalnika delovna mesta na 1000 prebivalcev in indeks naložb, medtem ko so po drugih kazalnikih vrednosti dokaj povprečne. To so koroška, notranjsko-kraška, pomurska, posavska in zasavska regija.



Slika 4. Tipologija razvojnih regij glede na dejavnike družbe znanja

Lokalne skupnosti smo glede na dejavnike družbe znanja z metodo razvrščanja v skupine razdelili v pet skupin. Na ta način smo dobili sintezno karto, ki prikazuje posamezna območja s skupnimi ali podobnimi značilnostmi dejavnikov družbe znanja (slika 5).

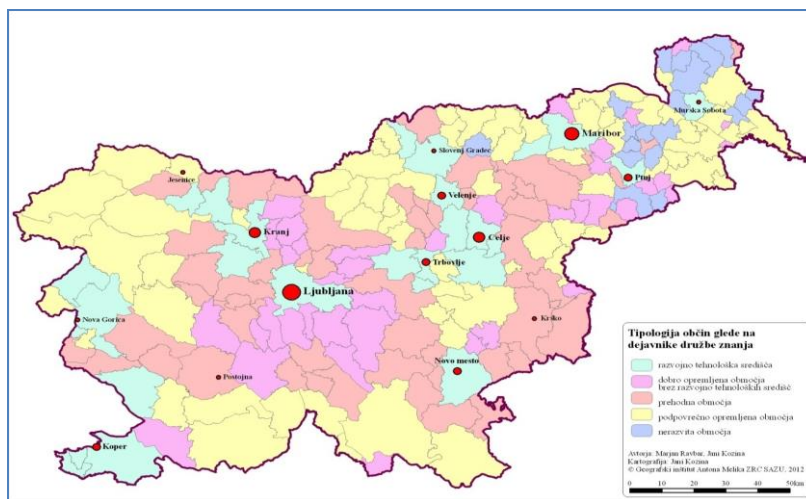
Skupino 1 predstavljajo vodilna razvojno-tehnološka središča. Tvori jih 26 občin (12,4 %). Gre za območja, ki se uvrščajo visoko zlasti na podlagi faktorja mestne aglomerativnosti. Glede tega izstopajo predvsem mestne občine Ljubljana, Maribor, Koper, Celje, Novo mesto in Kranj, ki so hkrati središča visokošolskih ustanov. Zanje so značilna središčnost, pomembno gravitacijsko zaledje in velika gostota poseljenosti in delovnih mest, še zlasti v raziskovalnih dejavnostih, dobra infrastrukturna opremljenost ter velika gospodarska aktivnost, podprta z investicijami. V tej skupini občin so tudi nekatera druga pomembnejša središča regionalnega pomena. Izjema so le nekoliko manjši Jesenice, Postojna in Krško. Hkrati je za to skupino značilno, da se ne uvršča najvišje po drugih treh faktorjih (faktor človeškega kapitala, faktor razvoja (ustvarjalnih) delovnih mest, faktor razvoja (ustvarjalnega) prebivalstva). Konkretnije to pomeni, da imajo občine te skupine v primerjavi z drugimi deli Slovenije relativno nižjo gostoto človeškega kapitala (delež prebivalstva s terciarno izobrazbo in delež študentov po kraju bivanja), v zadnjih letih pa se je v njih zgostilo tudi relativno manj (ustvarjalnih) delovnih mest in tamkaj živečega aktivnega oziroma ustvarjalnega prebivalstva. To lahko pojasnimo z že znanimi dejstvi, da imajo mestna središča poleg mestotvornih tudi veliko mestoslužnih dejavnosti, ki ne zaposlujejo samo visoko kvalificirane delovne sile. V največjih mestih se v primerjavi z drugimi naselji izrazito zgoščajo le poklici za opravljanje najbolj zahtevnih delovnih mest. To so zlasti raziskovalci v raziskovalnih in visokošolskih organizacijah.

Skupino 2 sestavljajo dobro opremljena obmestna območja v zaledju razvojno tehnoloških središč. Skupna značilnost je, da se v vplivnih obmestnih območjih večjih slovenskih mest prebivalstvo še naprej močneje naseljuje, zlasti v skupini ustvarjalnih delovnih mest, kjer je suburbanizacija tudi sicer najbolj izrazita. Tovrstna območja v naši raziskavi predstavljajo skupino dobro opremljenih območij brez razvojno-tehnoloških središč. Vanjo je vključenih 39 občin (18,6 %). Ta skupina v veliki meri odraža željo Slovencev po bivanju v mirnem, zelenem okolju, v bližini večjega mestnega središča, z dobrim dostopom do infrastrukture (Hočevnar in Uršič, 2007). Opisane značilnosti v zavesti Slovencev in tudi na splošno predstavljajo kakovostno bivalno okolje. Že s pogledom na sliko 5 znotraj skupine opremljenih območij brez razvojno-tehnoloških središč močno izstopa prostorska zgoščenost občin v okolici Ljubljane. V njih za razliko od drugih občin iz iste skupine prihaja do močnejšega povečevanja (ustvarjalnega) delovno aktivnega prebivalstva po kraju bivanja in dela.

Skupino 3 sestavlja 56 občin (26,7 %). V bistvu bi jo z vidika družbe znanja lahko označili za izrazito prehodno. Na eni strani je zanjo značilna zelo visoka stopnja človeškega kapitala. V teh občinah je glede na druga območja v Sloveniji delež visoko izobraženega prebivalstva in študentov po kraju bivanja nadpovprečen. S tem je močno povezana tudi nekoliko intenzivnejša gostota (ustvarjalnega) delovno aktivnega prebivalstva po kraju bivanja. Ugodne razmere glede stanja in razvoja človeških virov pa v občinah te skupine niso pravi odsev razvoja podjetništva in (ustvarjalnih) delovnih mest. Občine te skupine imajo torej družbeni potencial za gospodarski razvoj. Zanje ugoden je tudi njihov položaj, saj gre večinoma za območja z dobro infrastrukturno opremljenostjo. Gre torej za območja v širšem zaledju večjih mest in bližini glavnih prometnih osi, ki bodo v prihodnosti zagotovo morala več storiti za prenos pridobljenih znanj v prakso in njihovo uveljavitev v gospodarstvu.

Podpovprečno razvite lokalne skupnosti 4. skupine predstavljajo redkeje poseljena in infrastrukturno slabše opremljena območja. Skupaj obsegajo 70 občin (33,3 %), kar je največ po izbrani tipologiji. Z vsebinskega vidika bi jih lahko označili kot nasprotje razvojno tehnološkim območjem. V tem primeru gre torej za redkeje poseljena in infrastrukturno slabše opremljena območja. Zlasti za lokalne skupnosti iz te skupine v vzhodni polovici države je značilna tudi nižja stopnja človeškega kapitala, medtem ko imajo občine na zahodu države bolj izobraženo prebivalstvo in ugodnejše težnje v zagotavljanju novih (ustvarjalnih) delovnih mest. Slednje velja zlasti za gospodarsko razvitejša območja na območju Idrije, Cerknega in Tolmina.

Zadnjo, 5. skupino zaznamujejo močno podpovprečna območja družbe znanja. V tej skupini so večja sklenjena območja na Goričkem, v Prekmurju, v Slovenskih goricah in Halozah. Gre za najmanjšo skupino, ki skupaj obsega le 19 občin (9,0 %). Po faktorju mestne aglomerativnosti se podobno kakor skupina 4 uvršča nižje na lestvici. Prav tako so za ta območja značilne nižje vrednosti po faktorju človeškega kapitala, kar pomeni, da tu na splošno prebiva manjši delež ljudi z visoko ali potencialno visoko izobrazbo. Je pa za ta območja spodbudno, da so v zadnjih letih naredila pozitiven preskok v razvoju podjetništva ter naseljevanju in zaposlovanju (ustvarjalnega) aktivnega dela prebivalstva. Slednje je najbolj izrazito na območju Haloz, Slovenskih goric in občin v vzhodnem delu Prekmurja.



Slika 5. Tipologija občin glede na dejavnike družbe znanja

6 Sklep

Geografska razprostranjenost družbe znanja, katere sinonim so ustvarjalni človeški potenciali, je eden ključnih generatorjev družbenega razvoja. Z njim so pomembno povezani socialno-ekonomski učinki in tudi regionalna nesorazmerja v pokrajini. Med slovenskimi mesti

(in pokrajinskimi značilnostmi območij) so velike razlike v gospodarski moči in ponudbi zaposlitvenih možnosti (delovnih mest). Temelj za to so razvojne možnosti, ki narekujejo, katere gospodarske in upravne ukrepe je treba sprožiti. Izbira ukrepov je običajno odvisna od zadostnega števila (kritične mase) ustvarjalnih poklicev, ki so te ukrepe sposobni izvajati. Ti dejavniki odločajo o razvojnih priložnostih mest in lokalno pogojenih značilnostih v upravno oblikovanih razvojnih regijah.

Kakor so že napovedovali dokumenti OECD (Dosi, 1996), je vzpon nekaterih območij povezan z gostoto razvojnih aktivnosti v konkurenčnih razvojnih (mestnih) regijah. Socialno-kulturne razmere, družbeni dejavniki in razvojne zmožnosti, ki določajo obseg znanja, so ob podrobnejšem pregledu na ravni lokalnih skupnosti tudi v Sloveniji pokazali na neenakomerno razporeditev in osredotočenost le v nekaj največjih slovenskih mestnih aglomeracijah, ki izžarevajo tehnične in družbene inovacije ter zaradi njih ustvarjajo nove zarodke gospodarske rasti. Rast je v največji meri povezana s sektorsko specializacijo zlasti v ljubljanski razvojni regiji in širjenjem njenega vplivnega območja proti podeželskim območjem ob prometnih koridorjih izven upravno določenega formalnega obsega razvojne regije. Tu je gostota največja. V nasprotju z informacijami, ki so dandanes dosegljive v vsakem trenutku in skoraj slehernem delu države, so znanje, ustvarjalnost in izkušnje, povezani s konkretnimi ustvarjalnimi socialnimi skupinami, po naši analizi večinoma osredotočeni le v Ljubljani, Mariboru, Kopru, Celju z Velenjem, Kranju, Novem mestu ter Novi Gorici s Šempetrom, pri čemer so manjša zaposlitvena središča in odročnejše občine od njih največkrat odrezane, tam živeči prebivalci pa odvisni od obsežnih dnevnih potovanj v našeta urbana središča. Poleg tega se obsežni deli znotraj razvojnih regij v Sloveniji še vedno soočajo s tradicionalnimi razvojnimi problemi med mesti in odročnimi podeželskimi območji, staranjem prebivalstva in omejenim dostopom do storitev in javnih funkcij.

Postopne spremembe v funkcijah slovenskih mest in obmestnih naselij opazujemo že od druge polovice osemdesetih let prejšnjega stoletja. Učinki preobrazbe v prostorskih funkcijah se najbolj izrazito odražajo v propadanju tradicionalnih industrijskih območij in porajanju metropolitizacijskih teženj v okolici značilnih in gospodarsko uspešnih mest, zlasti Ljubljane. Ob začetku stoletja so se začele ponovno poglobljati regionalne razlike. Spremembe v urbanih funkcijah so posledica dejstev, da so se korenito spremenili mehanizmi, ki uravnavajo položaj zaposlitvenih središč v hierarhiji mest. Na vodilnem mestu so inovacijski impulzi in razvoj, ki je spodbujen od zunaj in s pomočjo velikih gospodarskih sistemov, ki se širijo iz središč zlasti na obrobje in vzpostavljajo nove meje gravitacijskih območij s spremenjenimi prostorskimi vzorci. Tudi v širših gravitacijskih zaledjih se na novo oblikujejo območja, ki niso le pasivna, namenjena mobilnim podjetjem, temveč se ob prevladujoči funkciji spalnih naselij postopno oblikujejo zametki propulzivnih služnostnih dejavnosti. Na splošno gre za nove organizacijsko ločene enote večjih proizvodnih firm na temeljih točno določenih lokacijskih značilnosti območij, ki so na podlagi posebnih virov družbe znanja sposobna ustvarjati sodobne inovacijske razvojne proizvodne procese. Pomembna je tudi ugotovitev, da preobrat v funkcijah urbanega sistema ne temelji na enostavnem prelaganju dejavnosti z razvitejših območij na manj razvita, ampak se je izkazalo, da imajo razvojni procesi tudi svojo notranjo dinamiko, ki dajejo propulzivnim območjem poseben razvojni zagon [26].

Usposobljene institucije in/ali organizirana združenja, ki prenašajo znanje, so še bolj neenakomerno razporejene in niso dostopne vsem družbenim skupinam. Ozko so povezane tudi z močjo odločanja in na ta način močno zgoščene v Ljubljani. Prostorsko neenakomerna delitev človeških virov je sicer pod globalizacijskimi vplivi razpršena, na kar vplivajo kakovostni informacijski tokovi. Prostorska nesorazmerja se zaradi migracijskih tokov ljudi z višjo stopnjo izobrazbe usmerjena proti inovacijskim jedrom, zato se samo še zaostrejejo. Tudi povpraševanje gospodarstva po diplomantih različnih izobrazbenih smeri je prostorsko neenakomerno razporejeno.

Regionalno-geografska analiza družbe znanja je tudi v Sloveniji potrdila, da je regionalna proizvodna usmerjenost pogosto razlog gospodarske nesorazmernosti. Odločujočo vlogo pri tem

imata izobrazbena struktura in infrastrukturna opremljenost, ki vplivata na gospodarsko strukturo območij in hitrost strukturnih sprememb. Analiza je pokazala vzročno povezanost med dejavniki konkurenčnosti in gospodarskimi učinki. Kapital (naložbe) in človeški viri (delo, znanje in informacije) so se izkazali kot eden izmed ključnih dejavnikov gospodarskega napredka.

Slovenija je država z veliko odgovornosti na ravni 12 razvojnih regij, ki imajo ključno vlogo pri oblikovanju regionalne politike, čeprav kazalniki kažejo, da funkcionalna realnost na ravni ključnih razvojnih dejavnikov ne upošteva normativno določenih regionalnih meja in jih zato ni moč šteti za resnična funkcionalna območja. Funkcionalne regije so namreč tista območja, v katerih se prepleta velik del dnevnih aktivnosti na področju gospodarskih in družbenih dejavnosti državljanov in gospodarskih združenj. Z upravno določenimi razvojnimi regijami se ne ujemajo niti učinki prelivanja znanja in gospodarskih povezav. Razvojne regije bi morale postati vse bolj medsebojno povezane. Funkcionalna realnosti zdaj presega meje razvojnih regij. Ljudje in podjetja so ne glede na upravno regionalizacijo vse bolj povezani v širših območjih, kar je razvidno iz tokov dnevne migracije, gospodarskih specializacijah in poslovnih vezeh. Gospodarski tokovi se razširjajo tudi prek nacionalnih meja v obliki čezmejnih funkcionalnih regij.

Več bi lahko naredili za usklajevanje medregionalnih politik. Na prenosu znanja temelječa regionalna politika zahteva izboljšanje konkurenčnosti na nacionalni in regionalni ravni, uveljavljanje mehanizmov za povezovanje mest v enotni urbani sistem, oblikovanje stalnih »regionalnih« teles oziroma združenj za krepitev povezovanja in razvijanje regionalne zavesti pri skupnih nalogah, kar z drugimi besedami pomeni oblikovanje inovativnih in prilagodljivih upravljavskih regij. Oblikovanje mrežnih in partnerskih odnosov zahteva preobrazbo obstoječih strategij pri pospeševanju regionalnega razvoja. Uravnoteženi razvoj v sodobni paradigmi vključuje tudi oblikovanje novih razmerij med mesti in podeželjem. Pomembna je zlasti razpršitev znanja in inovacij, ki izboljšuje splošno izobrazbeno raven in poklicne posebnosti tudi v depresivnih območjih kot sestavnih delih povezovanja posameznih enot v večja, medsebojno povezana območja, s čimer se zagotavljajo minimalni standardi dostopnosti do razvojno-inovacijskih generatorjev razvoja.

Pri udejanjanju uravnoteženega policentričnega razvoja ima ključno vlogo tudi uvajanje raznovrstnosti gospodarskih temeljev, zlasti na območjih, ki so močno odvisna od ene same dejavnosti (sektorja). Oblikovanje mrežnih in partnerskih odnosov med slovenskimi mesti pomeni preobrat obstoječih strategij pospeševanja regionalnega razvoja. Pri gospodarsko naravnanih analizah (regionalno upravljanje) si pripravo kvalitativnih ukrepov predstavljamo zlasti pri razvoju endogenih zmogljivosti v razdrobljenih lokalnih skupnostih na podeželju. Druga značilnost pa se izkazuje v pomanjkanju visoke tehnološke (»high-tech«) zaposlenosti v večini razvojnih regij. Spodbujanje rasti produktivnosti dela v teh regijah je pomemben izziv regionalnega razvoja v Sloveniji.

V že oblikovanih mestnih regijah in njihovih vplivnih območjih ne prihaja samo do prostorske razpršenosti proizvodnih zmogljivosti, ampak tudi do zgoščevanja zlasti finančnih in drugih upravljavskih funkcij. Stremljenje h »koncentrirani dekoncentraciji« ekonomsko-geografskih funkcij se ne odraža le v prostorski razporeditvi »prožnih« delovnih mest ustvarjalnih poklicev, ampak tudi v razpršenosti lokacij s sodobnimi tehnologijami. Te zakonitosti veljajo tudi pri neenakomerni razporeditvi človeških virov, ki je prav tako podrejena razprševanju, zlasti glede kraja bivanja, na katero vplivajo predvsem infrastrukturna opremljenost, kakovost bivanja izven mestnih središč in kakovostni informacijski tokovi kot sodobni dejavniki privlačnosti.

Reference

[1] Florida, R. (2004). *The Rise of the Creative Class : and how it's Transforming Work, Leisure, Community and Everyday Life*. New York : Basic Books, a member of the Perseus Books Group.

- [2] Florida, R. (2002). The Economic Geography of Talent. *Annals of the American Association of Geographers*, 92(4), 743-755.
- [3] Drucker, P. (1970). *Technology, Management and Society*. London : Routledge.
- [4] Aydalot, P. (1986). *Milieux innovateurs en l'Europe*. Paris: Gremi.
- [5] Fromhold-Eisebith, M. (1995). Das »kreative Milieu« als Motor regionalwirtschaftlicher Entwicklung. *Forschungstrends und Erfassungsmöglichkeiten. Geographische Zeitschrift* 83, 3-4.
- [6] Fromhold-Eisebith, M. (1999). *Das »kreative Milieu« nur theoretisches Konzept oder Instrument der Regionalentwicklung?* German: Raumordnung und Raumforschung.
- [7] Fromhold-Eisebith, M. (2004). Innovative Milieu and Social Capital – Complementary or Redundant Concepts of Collaboration-based Regional Development? *European planning studies*, 12(6), 747-766.
- [8] Campagni, R. (1991). *Innovation networks: Spatial perspectives*. London: Belhaven Press.
- [9] Maillat, D., Quévit, M., & Senn, L. (1993). *Réseaux d'innovation et milieux innovateurs: un pari pour le développement régional*. Neuchâtel: EDES.
- [10] Freeman, C. (1987). *Technology Policy and Economic Performance: Lessons from Japan*. London: Pinter.
- [11] Schumpeter, J.A. (1934). *The Theory of Economic Development*. London: Taylor and Francis.
- [12] Keynes, J.M. (1936). *General Theory of Employment, Interest and Money*. London: Palgrave Macmillan.
- [13] Solow, R.M. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *Quarterly Journal of Economics*, 70(1).
- [14] Solow, R.M. (1957). Technical Change and the Aggregate Production Function. *Review of Economics and Statistics*, 39(3), 312-320.
- [15] Swan, T.W. (1956). Economic Growth and Capital Accumulation. *Economic Record*, 32, 324.
- [16] Feldman, M. (2000). *Location and Innovation: The New Economic Geography of Innovation, Spillovers and Agglomeration*. Oxford: The Oxford Handbook of Economic Geography.
- [17] Schumpeter, J.A. (1912). *Die Theorie wirtschaftlichen Entwicklung*. Berlin: Duncker und Humblot.
- [18] Läpple, D. (2001). Stadt und Region. *Deutsche Zeitschrift für Komunalwissenschaft* 2. Berlin: Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH.
- [19] Stanovnik, P., & Kos, M. (2005). *Technology Foresight in Slovenia*. Ljubljana: Institute for Economic Research.
- [20] Kujath, H.J. (2008). *Raumentwicklungspolitische Ansätze zur Förderung der Wissensgesellschaft*. Berlin: Deutschland. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- [21] Dosi, G. (1996). *The Contribution of Economic Theory to the Understanding of a Knowledge-based Economy*. Paris : Organisation for Economic Co-operation and Development.
- [22] World Bank. (1999). *Knowledge for Development*. New York: Oxford University Press.
- [23] Jansen, D. (2004). *Networks, Social Capital and Knowledge Production*. Speyer: FÖV.
- [24] Holzmann-Jenkins, A. (2004). *Kommunales Wissensmanagement als Zukunftsaufgabe der Stadt und der Region*. Dunaj.
- [25] Ravbar, M., & Kozina, J. (2012). *Geografski pogledi na družbo znanja v Sloveniji*. Ljubljana: Založba ZRC.
- [26] Maillat, D. (1992). *The Innovation Process and the Role of the Milieu*. Neuchâtel: Enterprises innovatrices et développement territorial.

Aluminijeve zlitine komponent podvozij vozil

Alluminium alloys of vehicle chassis components

Mitja MUHIČ

**Višja strokovna šola, Šolski center Novo mesto,
Šegova ulica 112, Slovenija
E-naslov: mitja.muhic@sc-nm.si*

Povzetek. Aluminijeve zlitine so lahki materiali, ki se vse pogostejše uporabljajo v avtomobilski industriji. Vse pogostejše se uporabljajo zaradi majhne gostote in velike specifične trdnosti kar zmanjšuje maso vozil. Manjša masa omogoča manjšo porabo goriva oziroma energije, ogljični (CO_2) odtis in ostale škodljive emisije (NO_x). Manjša masa izboljša vodljivost in aktivno varnost vozil.

Prispevek obravnava uporabo aluminijevih zlitin komponent podvozij vozil. Podvozje je pomemben konstrukcijski sklop, ki je povezan s karoserijo in pogonom. Prikazane so fizične in mehanske lastnosti materialov iz aluminijevih zlitin. Opisane so uporaba in prednosti aluminijevih zlitin. Predstavljeni so konkretni primeri in trendi uporabe materialov iz aluminijevih zlitin na področju komponent podvozij vozil.

Ključne besede: aluminijeve zlitine, lahka gradnja – nižanje mase, avtomobilska industrija, komponente podvozja

Razvrstitev: Strokovni članek

Abstract. Aluminum alloys are lightweight materials, which are increasingly used in the automotive industry. They are used because of low density and high specific strength, which reduces the mass - weight of vehicles. Lower mass - weight reduces fuel and energy consumption, carbon (CO_2) footprint and other harmful emissions (NO_x). Lower mass - weight improves handling and active safety of vehicles.

The article deals with the use of aluminum alloys of vehicle chassis components. The chassis is an important construction module that is connected to the body and power train. The physical and mechanical properties of aluminum alloy materials are shown. The use and advantages of aluminum alloys are described. Examples and trends in the use of aluminum alloy materials in the area of vehicle chassis and suspension components are presented.

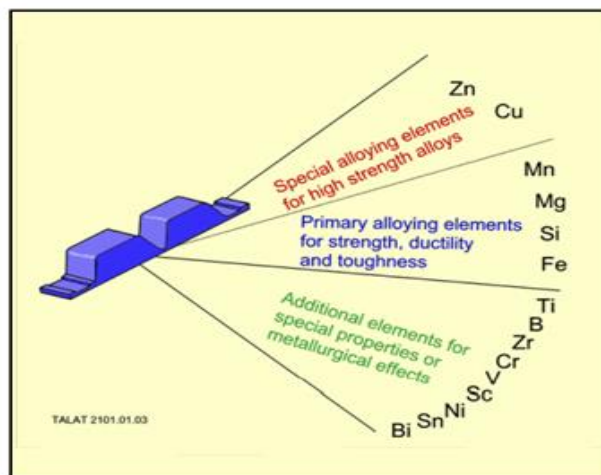
Keywords: Aluminum alloys, Lightweight construction – mass / weight reduction, automotive industry, chassis and suspension components

Article Classification: Professional Paper

1 Uvod

Aluminij je svetovno blago. Predstavlja 7,5 % zemeljske skorje ter je s tem najbolj razširjena kovina in tretji najbolj pogost element v zemeljski skorji. Po vsem svetu je bilo leta 2016 proizvedenih približno 57 milijonov ton aluminija, samo na Kitajskem 31 milijonov ton. Hitro rastoča panoga je tudi reciklaža aluminijevih zlitin. Približno 30 % porabe aluminija gre za transportne aplikacije. Ponudba in cena aluminija sta stabilni, kar je pomembno merilo za uporabo materialov pri trajnostnem razvoju novih izdelkov. Aluminij ima vedno večji potencial za množično proizvedene avtomobile. Odločitve o materialih se sprejemajo precej pred dejansko

produkcijo. Avtomobilski modeli se proizvajajo v večletnem obdobju. Merila za izbiro, razpoložljivost in dobavo materialov morajo zato vključevati zagotovljeno kontinuiteto virov. Aluminijeve zlitine so kovinske zlitine, v katerih je aluminij (Al) prevladujoča kovina oziroma kemijski element. Tipični legirni elementi pri aluminijevih zlitinah so baker, magnezij, mangan, silicij, kositer in cink (Slika 1). Zlitine, ki so večinoma sestavljene iz aluminija, so zelo pomembne in so od začetka najbolj razširjene v letalski in vesoljski industriji. Najlažje med aluminijevimi zlitinami so aluminij-magnezijske zlitine, ki so veliko manj vnetljive kot sicer še lažje magnezijeve zlitine, ki vsebujejo zelo visok odstotek zelo vnetljivega magnezija [1-4].



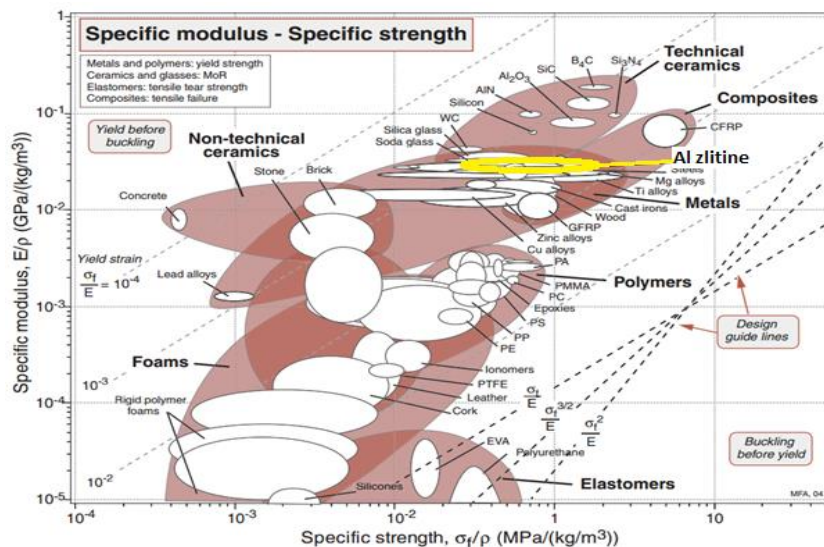
Slika 1. Kemijski elementi v aluminijevih zlitinah

2 Inženirska uporaba in lastnosti aluminijevih zlitin

Aluminijeve zlitine imajo zaradi nizke gostote in dobrih mehanskih lastnosti odlično specifično togost (razmerje med modulom elastičnosti in gostoto) in trdnost (razmerje med natezno trdnostjo in gostoto). Boljše specifične mehanske konstrukcijske lastnosti imajo samo polimeri ojačani z ogljikovimi vlakni in tehnične keramike (Slika 2) [5].

Aluminijeve zlitine delimo na dve glavni skupini, in sicer livne aluminijeve zlitine primerne za izdelavo ulitkov in gnetene aluminijeve zlitine, ki jih predelujemo z gnetenjem (iztiskanje, valjanje, vlečenje, kovanje). Obe skupini nadalje delimo na toplotno obdelane in toplotno neobdelane zlitine. Termo-mehanski procesi med procesom pridelave od taline do končnega izdelka določajo mikrostrukturo, ki je ključna za lastnosti aluminijevih zlitin. Slika 3 prikazuje mednarodne sisteme za označevanja aluminijevih zlitin (AA, EN, ISO) in so osnova za globalno komunikacijo med inženirji, konstruktorji, dobavitelji in proizvajalci. Zlitine so razvrščene po številčnem sistemu (ANSI) ali po imenu, ki označuje njihove glavne legirane sestavine (DIN in ISO) [1, 2, 6].

Približno 85% aluminija se uporablja za gnetene aluminijeve izdelke kot so na primer: valjane plošče, folije in iztiskani - izdelki. Tudi ulitki iz aluminijevih zlitin so cenovno ugodni izdelki zaradi relativno nizke temperature tališča aluminija. Na splošno imajo livne aluminijeve zlitine nižje natezne trdnosti kot gnetene. Najpomembnejše livne zlitine so zlitine aluminij – silicij (Al–Si), kjer visoki deleži silicija (4,0 – 13 %) prispevajo k dobrim livnim lastnostim. Aluminijeve zlitine se pogosto uporabljajo v inženirskih konstrukcijah in komponentah, kjer je potrebna manjša masa ali korozijska odpornost [1 – 3].



Slika 2. Specifični modul elastičnosti (razmerje med modulom elastičnosti in gostoto) in specifična trdnost (razmerje med natezno trdnostjo in gostoto) inženirskih materialov (Aluminijeve zlitine so označene z rumeno) [5]

Aluminium Alloy Designation System (CEN)					
		Major alloying element	Atoms in solution	Work hardening	Precipitation hardening
Wrought Alloys*) EN AW-	1XXX	None (min. 99.00% Al)		X	
	3XXX	Mn	X	X	
	4XXX	Si	X	X	
	5XXX	Mg	X	X	
	2XXX	Cu	X	(X)	X
	6XXX	Mg + Si	X	(X)	X
	7XXX	Zn	X	(X)	X
	8XXX	Other	X	(X)	X
*) letters preceding the alloy numbers have the following meaning					
EN = European Standard					
A = Aluminium					
B = Ingot					
C = Cast Alloy					
M = Master Alloy					
W = Wrought Alloy					

Slika 3. Mednarodni sistemi označevanja aluminijevih zlitin (EN). so osnova za globalno komunikacijo med inženirji, konstruktorji, dobavitelji in proizvajalci [1, 2, 6]

Aluminijeve zlitine s široko paleto lastnosti se uporabljajo v inženirskih konstrukcijah. Če izberemo pravo zlitino za določeno aplikacijo, je treba upoštevati njeno natezno trdnost, gostoto, žilavost, obliko, obdelovalnost, varivost in odpornost na korozijo. Aluminijeve zlitine se v veliki meri uporabljajo v aeronavtiki zaradi odličnega razmerja med trdnostjo in maso. Čista aluminijasta kovina je za inženirske namene preveč mehka in nima visoke natezne trdnosti, ki je potrebna za vozila, letala in helikopterje. Aluminijeve zlitine imajo običajno elastični modul približno 70 GPa, kar je približno ena tretjina elastičnega modula večine vrst jekel in jeklenih zlitin. Posledično se zaradi manjše togosti komponenta ali del iz aluminijeve zlitine pri določeni obremenitvi v elastičnem režimu deformira približno trikrat bolj kot jekleni del enake velikosti in oblike. Čeprav obstajajo aluminijeve zlitine z nekoliko višjimi nateznimi trdnostmi kot pogosto

uporabljene vrste jekla, lahko zamenjava jeklenega dela z aluminijasto zlitino povzroči težave predvsem zaradi manjše togosti in posledično povečanih deformacij. Pri lahki gradnji z aluminijevimi zlitinami moramo biti zaradi tankih sten pazljivi na stabilnostne probleme – uklon materiala [1 – 5].

Zelo razširjeni so iztiskani izdelki iz aluminijevih zlitin zlasti zlitine Al-Mg-Si, zaradi enostavnosti preoblikovanja – iztiskanja pri iztiskanju tudi zelo kompleksnih profilov. Na splošno lahko z aluminijevimi zlitinami dosežemo lažje komponente, kot je to mogoče pri jeklu. Okvirji koles iz aluminijevih zlitin imajo za enako togost in trdnost večje premere cevi pri enaki debelini sten od jeklenih ali titanovih in so še vedno lažji. Podobno je pri avtomobilskih, letalskih in ladijskih okvirjih iz iztiskanih profilov - cevi. Aluminijeve zlitine imajo nizko gostoto ter posledično maso in so dobro odporne na korozijo. Pojav korozije je odvisen od sestave zlitine, obdelave, zasnove konstrukcije izdelka in okolja (npr. morska voda). Nezaščitene površine iz aluminijeve zlitine razvijejo belo, zaščitno plast aluminijevega oksida. Površine običajno zaščitimo z anodnimi - eloksiranjem in / ali običajnimi barvnimi postopki [1 – 5].

3 Uporaba aluminija v avtomobilski industriji – komponente podvozja

Aluminijeve zlitine se uporabljajo kot materiali v avtomobilski industriji za karoserije, pogonske sklope, komponente podvozja itd. Podvozje je pomembna struktura avtomobila. Povezuje karoserijo in pogonski sklop in skrbi za prenos moči na kolesa učinkovito zaviranje in udobje v potniški kabini.

Komponente podvozja morajo biti čim lažje za čim manjšo porabo goriva ter s tem manjši negativni vpliv na okolje in čim višje zmogljivosti zato so lahke aluminijeve zlitine zelo primerne.

Pri 10 % zmanjšanju mase vozila lahko dosežemo 5 – 7 % manjšo porabo goriva. Od leta 1990 se je masa vozil stalno večala zaradi novih sistemov in komponent kot so: varnejša karoserija, zračne blazine, varnostne komponente, elektronske komponente in ostalih funkcij, kot so elektromotorji v raznih sistemih: sedeži, samodejno odpiranje vrat, ...

Najpomembnejša prednost komponent podvozja iz aluminijevih zlitin je njihovo zmanjšanje nevzmetene mase vozila. Zmanjšanje nevzmetene mase bistveno izboljša vozne lastnosti vozila kot so lega na cesti, udobje in posledično varnost.

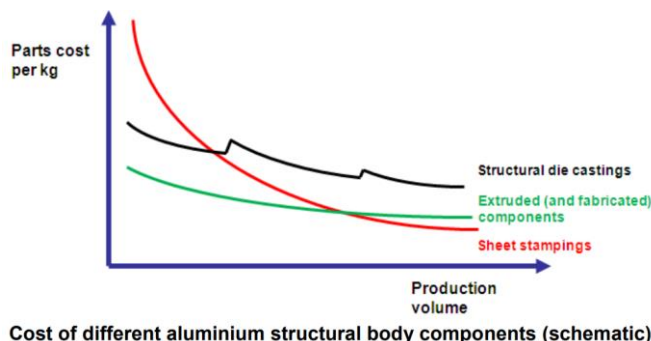
Zmanjšanje nevzmetene mase ima večji pozitiven učinek na vozilo in posledično potnike kot zmanjševanje vzmetene mase (karoserija, pogonski sklop, ...).

Dodatna prednost aluminijastih komponent podvozja so njihove lastnosti dušenja hrupa in vibracij. Aluminijeve zlitine zaradi manjše gostote materiala prenašajo manj hrupa in vibracij s cest in pnevmatik v potniški prostor.

Podvozje mora biti togo in trdno, da prenaša težo in obremenitve ter varno povezuje komponente avtomobila. Poleg tega morajo komponente podvozja prenesti in blažiti vpliv morebitnih trkov tako, da so potniki zaščiteni v največji možni meri. Mehanske lastnosti aluminijastih materialov pri statičnih in dinamičnih obremenitvah so zelo primerne za elemente vozil. Plastične deformacije elementov iz aluminijevih zlitin omogočajo velike absorpcije energije pri trkih.

Vendar samo enostavna zamenjava materiala ne vodi vedno k stroškovno učinkovitim rešitvam. Bistven je celosten pristop in upoštevanje celotnega sistema, ki je sestavljen iz materiala, ustreznih konstrukcijskih konceptov in uporabnih tehnologij za izdelavo. Tehnično in ekonomsko obetavni koncepti aluminijastih avtomobilov so rezultat v aluminij usmerjenih konceptov oblikovanja, konstruiranja in ustrezno prilagojenih tehnologij izdelave. Z različnimi oblikami aluminijastih izdelkov kot so izdelki iz aluminijevih pločevin, iztiskani aluminijasti profili, ulitki iz aluminija itd. ponuja aluminij široko paleto možnosti oblikovanja in konstruiranja. Ustrezna zamenjava jekla z aluminijem ne omogoča le pomembno zmanjšanje mase, temveč vpliva tudi na stroškovno učinkovitost. Izbira najustreznejše oblike aluminijevih

izdelkov je odvisno od vrste vozil (cena, zmogljivosti) in načrtovanega obsega proizvodnje (količine – števila) vozil (Slika 4).



Slika 4. Stroški različnih vrst aluminijevih izdelkov (Al ulitki, Al iztiskani profili in Al pločevine) v odvisnosti od proizvodnih količin [2]

Najpomembnejša prednost aluminija v primerjavi z jeklom je razpoložljivost votlih iztiskanih profilov z zapletenimi prerezi in tankostenskih ulitkov kompleksnih oblik z odličnimi mehanskimi lastnostmi. Aluminijasti elementi imajo poleg funkcije nosilnosti in povečanja togosti tudi funkcijo povezovalnih elementov. Pravilna uporaba iztiskanih (in preoblikovanih) ali livarskih aluminijastih izdelkov omogoča razvoj novih, inovativnih konstrukcijskih rešitev in posledično pomembnih prihrankov pri masi in stroških z integracijo komponent in vključitvijo dodatnih funkcij. Izdelki iz aluminijaste pločevine kažejo podobno upogibno in uklonsko togost kot iz jeklene pločevine, ko se njihova debelina poveča za 40 %. Zmanjšanje mase, ki nastane pri zamenjavi materiala, lahko doseže do 50 % v povprečju pa okoli 30 %. Pri profilih zamenjava jekla z aluminijem omogoča veliko potencialno zmanjšanje mase, posebno kadar se lahko spremeni geometrija profila (prereza), npr. s spremembo odprtega v zaprt profil. Najbolj pogosta in učinkovita pa je zamenjava jeklenih profilov z aluminijastim kadar je možno povečati premer oziroma dimenzije (višino in širino) preseka profila.

Na sliki 5 je prikazan novi Audi A8 (2017), ki ima večino komponent podvozja iz aluminijevih zlitin. Komponente so izdelane s preoblikovanjem aluminijastih pločevin, cevi, profilov ali pa so izdelane z različnimi postopki litja. [7]



Slika 5. Komponente podvozja iz aluminijevih zlitin [7]

Slika 6 prikazuje sestavljeno zadnjo os iz aluminijastih komponent Porsche Panamera (slika levo) in povečan aluminijast okvir izdelan z nizko tlačnim litjem (slika desno) [8]. Os drži kolesa na cesti tako, da zagotovi stalno in enakomerno trakcijo pogonskih koles. Zato je pomembno ustvariti strukturni nosilni modul čim manjše mase in visoke togosti, kar aluminijaste zlitine omogočajo.



Slika 6. Sestavljena zadnja os iz aluminijastih komponent Porsche Panamera (slika levo) in povečan aluminijast okvir izdelan z nizko tlačnim litjem (slika desno) [8]

Slika 7 prikazuje prototipni okvir podvozja zadnje osi iz aluminijeve zlitine izdelan z litjem v pesek [9]. Kljub velikosti je masa okvirja samo 17,1 kg. Material aluminijeve zlitine je AlSi7Mg.



Slika 7. Prototipni okvir podvozja zadnje osi iz aluminijeve zlitine AlSi7Mg izdelan z litjem v pesek [9]

Za ogromne količine v serijski proizvodnji so cenejši kot liti izdelki izdelani iz aluminijastih pločevin, cevi ali profilov (Slika 8). Komponente iz pločevin in cevi so izdelane z različnimi postopki preoblikovanja in nato običajno z varjenjem ali drugimi tehnikami spajanja spojene v nosilno strukturo, kot je primer okvirja zadnje osi BMW serije 5 na sliki 9. Slika 10 prikazuje tabelo mehanskih lastnosti (meja tečenja - $R_{p0,2}$ [MPa], natezna trdnost R_m [MPa] in raztezek A [%]) cevi, pločevin in vlečenih profilov okvirja zadnje osi BMW serije 5 [10].



Slika 8. Okvirji podvozij izdelani iz pločevin iz aluminijevih zlitin AlMgMn s postopkom preoblikovanja s tekočinami pod tlakom – Hydroforming [10]



Rear axle subframe for BMW 5 series models
Source: Hydro Aluminium Rolled Products



Pre-fabricated tube parts for the BMW 5 series rear axle subframe
Source: Hydro Aluminium Rolled Products

Slika 9. Okvir zadnje osi BMW serije 5 zvarjen iz cevi, pločevin in vlečenih profilov (slika zgoraj) pripravljeni preoblikovani glavni pločevinasti elementi pred varjenjem (slika spodaj) [10]

Mechanical properties:	R_{p0,2} [MPa]	R_m [MPa]	Elongation [%]
Tubes (0/H111):	> 105	> 240	A ₅ > 18
Sheets (H24):	> 190	> 270	A ₅ > 8
Extrusions (T4):	> 60	> 120	A ₁₀ > 13

Slika 10. Tabela mehanskih lastnosti (meja tečenja - R_{p0,2} [MPa], natezna trdnost R_m [MPa] in raztezek A [%]) cevi, pločevin in vlečenih profilov okvirja zadnje osi BMW serije 5 [10]

Poleg litja in preoblikovanja pa je zelo pogost tehnološki postopek komponent podvozij kovanje. Kovani so predvsem vitki in izrazito dinamično obremenjeni deli podvozja. S kovanjem dosežemo izjemno trajno dinamično nosilnost komponent kljub izjemno nizki masi. Konkretni izdelki v tem primeru kontrolne roke podvozja različnih oblik iz aluminijevih zlitin izdelanih s postopkom kovanja prikazuje slika 11. [11]



Slika 11. Kontrolne roke podvozja različnih oblik iz aluminijevih zlitin izdelanih s postopkom kovanja [11]

4 Analiza in razprava podatkov

Aluminijeve zlitine so zelo razširjene v dražjih vozilih premijskih znamk, kjer kupci pričakujejo vrhunske vozne lastnosti in zmogljivosti. Lahko bi ocenili, da je delež aluminijevih zlitin v avtomobilu večji, čim višja je cena vozila. Ocena deleža aluminijevih zlitin v vozilih cenejših od 30.000 EUR (nižji in nižji srednji razred) je praktično zanemarljiva, delež v vozilih med 30.000 – 50.000 EUR (srednji razred – premijska vozila) je od 10 – 30 %, delež v vozilih med 50.000 – 100.000 EUR (višji razred – premijska vozila) je med 30 – 50 % in delež v vozilih nad 100.000 EUR (prestižni razred) je nad 50 %. Izjema so super športni avtomobili (nad 500.000 EUR), ki so večinoma narejeni iz še bistveno dražjih polimerov ojačenih z ogljikovimi vlakni [2, 7, 8, 9].

Bolj kot trenutni deleži aluminijevih zlitin je zanimiv trend, ki nakazuje, da se aluminijeve zlitine širijo v cenejše segmente vozil tudi znamk, ki niso premijske, predvsem pokrovi motorjev in prtljažnih vrat. Še pred nekaj leti (5 - 10) so bili deleži aluminijevih zlitin tudi v prestižnih znamkah zanemarljivi danes pa lahko presegajo 50 % celotne mase predvsem, če gledamo komponente podvozij [2, 7, 8, 9]. Razlog za širjenje aluminijevih zlitin je predvsem zahteva po čim lažjih in čim bolj ekoloških vozilih z vrhunskimi voznimi lastnostmi in zmogljivostmi. Pravi material na pravem mestu za določen namen. Pomembna je tudi optimalna oblika in velikost prereza, da material prenaša zahtevane obremenitve in je podvozje čim lažje.

5 Zaključek

Aluminijeve zlitine omogočajo velik potencial za zmanjšanje mase. Omogočajo do 50% (v povprečju pa 30%) zmanjšanje mase v primerjavi z jeklom.

Posledično imajo avtomobili narejeni iz aluminijevih zlitin od 10 do 30 % manjšo porabo goriva.

Zmanjšanje mase omogoča lažje in hitrejšo uvedbo hibridnih, električnih pogonov in pogonov na gorivne celice (vodik).

Prednost aluminijevih zlitin je njihova odpornost proti koroziji.

Dodana vrednost v industrijskih procesih z aluminijevimi zlitinami je višja od ostalih kovin.

Pri lahki gradnji z aluminijevimi zlitinami moramo biti zaradi tankih sten pazljivi na mehanske togostne in stabilnostne probleme – uklon materiala.

Načelo: “pravi material na pravem mestu in prava količina materiala“, za kar pa potrebujemo veliko inženirskega znanja.

Reference

- [1] Wikipedia. (2019). *Aluminium alloy*. Pridobljeno na https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_alloy
- [2] European aluminium. (2016). Pridobljeno na <https://www.european-aluminium.eu/>
- [3] Polmear, I.J. (2017). *Light alloys: Metallurgy of the Light Metals*. Oxford, Cambridge: Butterworth-Heinemann.
- [4] Hatch, J.E. (1984). *Aluminium: Properties and Physical Metallurgy*. Ohio: American Society for Metals.

- [5] Smallman, R.E. & Bishop, R.J. (1999). *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [6] EN Standard Store. (2019). *Engineering standards*. Pridobljeno na <https://www.en-standard.eu/en-standards-engineering-standards/42-metallurgy/>
- [7] Audi AG. (2019). Pridobljeno na <https://www.audi.com/en.html>
- [8] Porsche AG. (2019). Pridobljeno na <https://www.porsche.com/>
- [9] GF Casting Solutions AG. (2019). Pridobljeno na www.gfcs.com
- [10] Hydro Aluminium Rolled Products GmbH. (2019). Pridobljeno na www.hydro.com
- [11] Otto Fuchs KG. (2019). Pridobljeno na www.otto-fuchs.com

Ugotavljanje izolacijske upornosti in dielektrične trdnosti pri LED žarometih

Determination of insulation resistance and dielectric strength of LED headlights

David ŠTINE¹, Marica PRIJANOVIČ TONKOVIČ²

¹ SIQ, Institut za kakovost in meroslovje,
Ulica Mašera Spasića 10, Ljubljana, Slovenija
E-naslov: david.stine94@gmail.com

² Šolski center Novo mesto, Višja strokovna šola,
Šegova ulica 112, Novo mesto, Slovenija
E-naslov: marica.prijanovic@sc-nm.si

Povzetek. Razvoj izdelave sestavnih delov avtomobila nenehno napreduje. To velja tudi za tehnologijo izdelave žarometov, kjer se je zgodil velik preskok s prehodom izdelave iz ksenonskih žarometov na LED tehnologijo. Za zagotavljanje pravilnega delovanja več sestavnih komponent v žarometu skupaj, je potrebno opraviti veliko različnih testiranj, ki nam podajo rezultate o varnosti ter pravilnem delovanju žarometa. Glede na dobljene rezultate pa dobimo povratno informacijo, ki nam pove, kako dober je proizveden izdelek.

Za ugotavljanje kakovosti sestavnih delov žarometov smo z naročnikom pregledali zahteve test plana, ki podaja zaporedje izvajanja določenih testov. Testiranje se je izvajalo v treh paralelah, kjer je bilo točno določeno število vzorcev izpostavljenih klimatskim in mehanskim obremenitvam. Težava se je pojavila pri izvajanju električnih testov E-18 (izolacijska upornost) in E-20 (dielektrična trdnost), kjer je prišlo do preskoka napetosti iz PCB enote na vodnike izdelka. Po izločitvi vseh možnih napak je naročnik glede na ugotovitve testiranja moderniziral izdelek. Ponovno smo izvedli testiranje po dogovorjenem testnem planu. Novi vzorci so imeli 18 μm večjo debelino zaščitnega laka na PCB enoti, zaradi česar se je izboljšala izolacijska upornost in dielektrična trdnost ter s tem kakovost izdelka.

Ključne besede: testiranje, zahteve, standard, test plan, kakovost

Razvrstitev: Strokovni članek

Abstract. The development of the car components continues to advance. This is also true for the technology of headlight production where there was a major breakthrough in switching from xenon headlights to LED technology. To ensure correct operation of the many components in the headlight it was necessary to carry out a number of different tests that would show us results about safety and proper functioning of the headlight. The results give us feedback about the quality of the manufactured product.

To determine the quality of the headlight components we went through the prerequisites of the test plan together with our contractor in which there are demands on the specific order of testing steps. The testing was carried out in three parallel phases where the exact number of samples were put through different thermal and mechanical loads. Some problems occurred in implementing electrical tests E-18 (isolation resistance) and E-20 (dielectrical strength), where there was a problem of displacement of voltage from the PCB unit onto the conductors of the product. After the elimination of possible faults the contractor modernized the product according to the test results. Once again the testing was carried out in accordance

with the test plan. Our samples had 18 μm thicker protective varnish on the PCB unit which improved the isolation resistance and dielectrical strength and accordingly the product quality.

Keywords: testing, demands, standard, test plan, quality

Article Classification: Professional Paper

1 Uvod

Za zagotavljanje kakovosti proizvedenih izdelkov je potrebna kontrola vhodnih surovin, nadzor procesa izdelave izdelka in končna kontrola izdelka. Kontrola je učinkovita, če se čim prej ugotovi, da je v proizvodnem procesu nekaj narobe [1]. Med izdelavo izdelka je pomembna kontrola med procesom, saj na osnovi statističnih podatkov in povratnih informacij optimiziramo proizvodni proces [2]. V avtomobilski industriji se za zagotavljanje kakovosti izdelkov izvajajo poleg porušitvenih tudi neporušitvene metode [3].

Navedene kontrole se med izdelavo izdelka izvajajo v podjetjih, kjer se izdelek izdeluje. A ker so pogosto potrebne posebne naprave, ki so za majhna podjetja predrage ali si želijo, da izdelek kontrolira nevtralna inštitucija, se izvajajo nekatere kontrole v zunanjih inštitucijah. Dokazovanje kakovosti preizkušanca se začne s pregledom test plana in zahtev preiskovanih testov. Vsak test ima specifične zahteve, na katere je potrebno biti pozoren, predvsem kar zadeva zajemanje podatkov ter funkcionalnih pregledov med samim testom. Pred in po testiranju se vzorce natančno pregleda. Pri izvedbi testiranja se testi opravljajo tako kot je to podano v standardu oz. normi in s kalibrirano opremo. Le tako imamo zagotovilo, da so testi opravljeni strokovno ter 100 % zanesljivo [4, 5].

V raziskavi smo se ukvarjali s kontrolo kvalitete izdelave LED diod. Te se vse več uporabljajo za izdelavo žarometov v avtomobilski industriji [6]. LED žarometi, ki se uporabljajo pri avtomobilu, imajo več funkcij, kjer poleg osnovne funkcije – osvetlitve vozišča, vplivajo tudi na videz vozila [7]. Zaradi vse večje uporabe LED diod je potrebno zagotoviti njihovo pravilno in varno delovanje [8], kar se doseže s testiranjem.

Testiranje žarometov je vse bolj zahtevno ter dolgotrajno, saj so proizvodi vse bolj tehnično dovršeni. Skozi celotno testiranje je potrebno beležiti podatke, da lahko odpravimo morebitne težave pri vzorcih. Za ugotavljanje kakovosti LED žarometov so potrebni specifični testi izvedeni po določenem standardu. Na osnovi testov se ugotovi, ali je proizvod ustrezen za uporabo ter varen za delovanje drugih komponent v vozilu. Poleg tega pa mora zagotavljati tudi varnost uporabnika.

V raziskavi nas je zanimalo predvsem, kaj se dogaja med testiranjem LED žarometa, kateri testi so kritični in kje lahko pride do poškodb proizvoda ter tako nepravilnega delovanja žarometa.

2 Potek preizkusov

Za ugotavljanje kakovosti LED žarometa smo pripravili testne vzorce. Pred začetkom testiranja smo pregledali testni plan ter upoštevali želje naročnika, katere meritve bi poleg standardnih še želel imeti. Testiranje se je izvedlo po standardu VW-80000:2013-06 (Norma LV124) [9]. Pregledane vzorce se je razdelilo v tri skupine: A, B in C.

Pri testiranju v skupini A in C se je izvedlo naslednje teste: visoka/nizka temperatura – test shranjevanja, koračno spreminjanje temperature, delovanje pri nizki temperaturi, temperatura barvanja, temperaturni šok, ciklična vlažna vročina, ciklična vlažna vročina s hladnim delom in brez hladnega dela, konstantna vlažna vročina, kondenzacijski test, ponovni temperaturni šok, test škodljivih plinov, življenjski test – visoka temperatura, življenjski test – ciklično, prosti pad, vibracije v klimatski komori, mehanski udarci.

Pri testiranju v skupini B se je izvedlo: visoka/nizka temperatura – test shranjevanja, ciklična vlažna vročina s hladnim delom in brez hladnega dela, konstantna vlažna vročina, kondenzacijski test, temperaturni šok, test škodljivih plinov (izveden v partnerskem laboratoriju).

Preizkuse smo izvajali v klimatski komori Vötsch tipa VCS³ 7060-5 (Slika 1), v katerih se je dosegalo zahtevane parametre vlage ter temperature [10].



Slika 1. Klimatska komora

Med testiranjem smo s pomočjo Keysight zbiralnika podatkov (Slika 2) beležili temperaturo, napetost in tok na 40 kanalih vsakih 10 sekund.

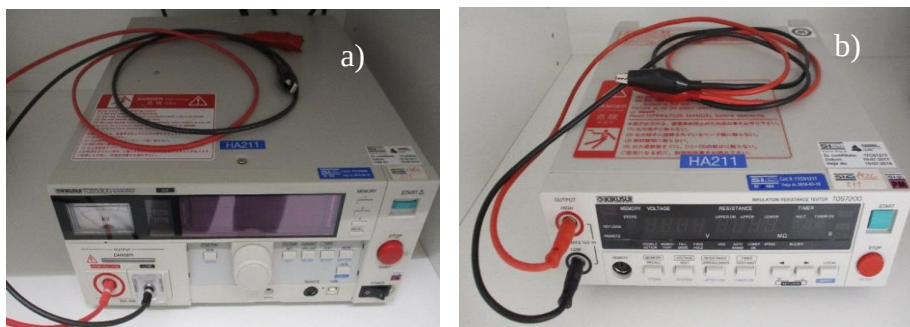


Slika 2. Zbiralnik podatkov

Po končanih testih po standardu VW-80000:2013-06 smo vzorce pregledali tudi glede na izolacijsko upornost E-18 in dielektrično trdnost E-20. Omenjena preizkusa sta namenjena ugotavljanju preboja električne napetosti iz vodnikov na vzorec. Na sliki 3 sta posebna instrumenta (Slika 3 a in 3 b), ki smo ju uporabljali pri meritvi.

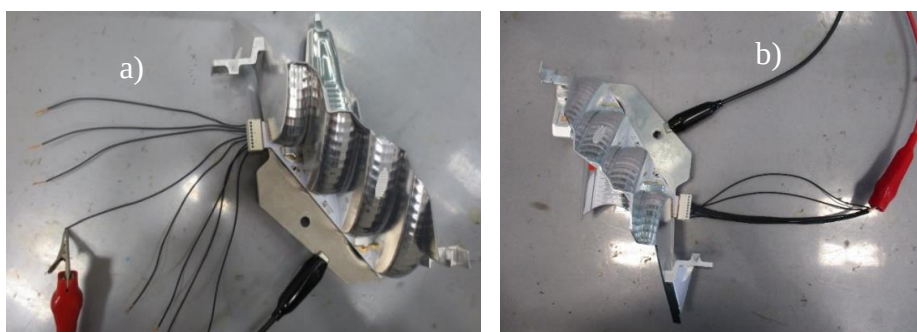
Med meritvijo so bili nastavljeni naslednji parametri:

- testna napetost: 500 V AC,
- frekvenca: 50 Hz,
- trajanje testa: 60 s,
- relativna vlažnost: 50 %,
- testna temperatura: 35 °C.



Slika 3. a) Instrument dielektrične trdnosti; b) instrument izolacijske upornosti

Sliki 4 a in 4 b kažeta vezavo med preizkušanjem za test E-20 (Slika 4 a) in E-18 (Slika 4 b).



Slika 4. a) Vezava E-20 testa; b) vezava E-18 testa

Poleg parametrov za izvedbo testa je bilo podano s strani naročnika tudi, na katerih mestih na izdelku se izvede testiranje. Med preizkušanjem smo usmerili tok iz anode oziroma katode proti ozemljitvi, NTC termistorju in proti komunikaciji ter proti hladilni plošči in reflektorju.

3 Rezultati in diskusija

V raziskavi smo preiskovali kakovost izdelave LED žarometa. Kakovost smo preverjali po standardu VW-80000:2013-06. Ugotavljali smo, kateri testi so kritični za kakovosten proizvod. Opravili smo tudi test dielektrične trdnosti E-20 in izolacijske upornosti E-18. Rezultati meritev so prikazani v tabeli 1. Med meritvami je prišlo do preboja napetosti med posameznimi deli izdelka. Do preskoka napetosti je prišlo pri povezavi med PCB enoto in vodniki.

Tabela 1. Evalvacija testiranja

Vrsta preskusa	Parametri	Evalvacija
Izolacijsko upornost E-18	500 V AC, 50 Hz, 60s	Slabo
Dielektrično trdnost E-20	500 V DC, 50 Hz, 60s	Slabo

Slabi rezultati meritev so pokazali, da je prišlo med preizkušanjem do preboja napetosti in izolacijskega preboja med vodniki ter PCB enoto zaradi pretankega nanosa zaščitnega laka. Zato se je naredilo nove preizkušance, kjer se je povečala debelina laka. Sledil je ponovni preizkus novih vzorcev na test E-20 in E-18 (Tabela 2). Med preizkusom smo konektorje prislonili na PCB enoto, da ne bi med preizkušanjem prišlo do poškodbe laka.

Zaščitni lak na PCB enoti je bil tip PSR-4000 WT02, kateremu je dodan trdilec tipa CA-40 WT02. Mešanica laka in trdilca je bila v razmerju 80 : 20. Barva mešanice je bela, zaradi lažjega

sledenja napak oz. sprememb barve v primeru nepravilnega delovanja. Lakiran izdelek se je izpostavilo temperaturi 75 °C, čas je bil 60 minut, energija pa je bila od 400 do 600 mJ/cm². Po končanem nanosu laka smo preverili njegovo debelino, ki je znašala 40 µm (Tabela 2). Iz tabele je tudi razvidna prvotna debelina, ki je 22 µm.

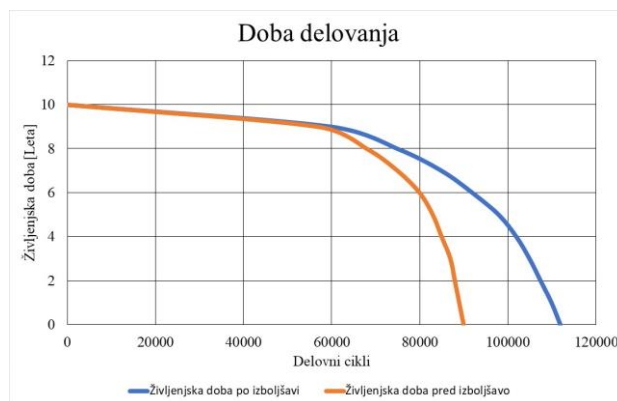
Tabela 2. Rezultati meritev po spremembi debeline laka

Vrsta preskusa	Parametri	Debelina laka (µm)		Evalvacija	
		Pred spremembo	Po spremembi	Pred spremembo	Po spremembi
Izolacijska upornost E-18	500 V AC, 50 Hz, 60 s	22	40	Slabo	Dobro
Dielektrična trdnost E-20	500 V DC, 50 Hz, 60 s	22	40	Slabo	Dobro

Sledila je ponovna kontrola vzorcev na izvedbo testov E18 in E20. Tako se je ponovno pripravilo preizkušance, ki se jih je razdelilo v tri skupine: A, B in C. Izvedlo se je le del testov po test planu, tj. tiste, ki bi imeli vpliv na izolacijsko upornost in dielektrično trdnost. Rezultati meritev so prestali test, kar je dokaz, da je bila zaščitna plast laka pravilno nanesena.

Iz navedenega sledi, da je preverjanje kakovosti izdelka nujno. Izdelke se preverja med procesom izdelave. Nujno je tudi občasno preverjanje na neodvisni inštituciji. Izkazalo se je, da v primeru, da testiranje ne bi bilo izvedeno, bi na trg prišel produkt, ki ne bi bil varen za ostale komponente, ne za ljudi. V takih primerih vidimo, kaj dejansko pomeni testiranje in kakšna je njegova vloga pri varnosti in zanesljivosti.

Slika 5 prikazuje predvideno dobo delovanja pred in po izboljšavi LED žarometov. Vidi se, da je predvidena življenjska doba vzorcev po izboljšavi daljša za približno 25 % oz. 20000 ciklov. To ne pomeni le daljše delovanje žarometov, pač pa tudi drugih komponent, na katere bi lahko vplival slab produkt oz. produkt z napako. Glede na izboljšavo je daljša tudi garancijska doba, ki jo zagotavlja proizvajalec.



Graf 1. Prikaz rezultata izboljšave produkta

4 Zaključek

Preverjanje kakovosti izdelka je nujno potrebno. Izdelke se preverja med procesom izdelave. Nujno je tudi občasno preverjanje na neodvisni inštituciji.

Pri izvajanju testiranja po določenem standardu je izredno pomembna doslednost, natančnost in kvalitetno izvedeni testi. Vedno bolj zahtevni proizvodi nas silijo k vedno bolj zahtevnim testiranjem ter konstantnemu beleženju podatkov. Že najmanjša napaka lahko privede do

kompletne odpovedi sestavnega dela izdelka in s tem okvare ostalih komponent. Tako smo opravili testiranje na proizvodu LED žarometov, ki je pokazalo napako v izdelavi sestavnega dela, ki ima ključen pomen za pravilno delovanje.

Do napake je prišlo pri kritičnih električnih testih E-18 (izolacijska upornost) in E-20 (dielektrična trdnost). Med PCB enoto in vodniki je prišlo do preskoka napetosti. Ugotovilo se je, da se je napaka pojavila zaradi pretankega sloja zaščitnega laka. Zato se je debelina laka spremenila. Potrebno je bilo narediti ponovne teste. Debelina plasti se je povečala iz prvotnih 22 μm na 40 μm . Testiranje se je nadaljevalo po novem test planu, na katerem so ostali zahtevnejši ter bistveni testi iz standardnega predpisa, ki bi lahko vplivali na debelejši lak. Po končanem testiranju so vsi preiskovani vzorci prestali testiranje.

Rezultati preiskav so pokazali, da v primeru, da se testiranje ne bi izvedlo, bi na trg prišel produkt, ki ni varen ne za ostale komponente, ne za uporabnike. V takih primerih vidimo, kaj dejansko pomeni testiranje in kakšna je njegova vloga pri varnosti in zanesljivosti.

Reference

- [1] Čater, T. (2011). *Taktično planiranje in kontrola*. Ljubljana: Ekonomska fakulteta.
- [2] Grum, J. (2004). Zagotavljanje kakovosti materiala in izdelkov. V J. Grum (ur.), 7. konferenca slovenskega društva za neporušitvene preiskave: »Uporaba sodobnih neporušitvenih preiskovalnih metod v tehniki«, Slovenija, Ljubljana, 18. november 2004 (str. 149). Univerza v Ljubljani: Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, str. 149, 2004.
- [3] Hardt, E.D. (2017, 25. september). *Control of Manufacturing Processes, Laboratory for Manufacturing and Productivity*. Pridobljeno na <http://web.mit.edu/2.810/www/files/lectures/lec6-process-control-hardt-2017.pdf>
- [4] IEC 60068-2-64: 2008. (2017). *Okoljski preskusi 2-64. del: Preskusi-Preskus Fh: Vibracije, naključne širokopasovne in vodilo*.
- [5] ISO/IEC 17025: 2005. (2017). *Splošne zahteve za usposobljenost preizkuševalnih in kalibracijskih laboratorijev*.
- [6] Norma LV124 – Standard VW 80000: 2009-10. (2017). *Električni in elektronski sestavni deli motornih vozil do 3,5 t*.
- [7] Popa, B. (2019, 10. januar). *Battle of the Headlights: Halogen vs. Xenon vs. LED vs. Laser vs. Conversion Kits*. Pridobljeno na <https://www.autoevolution.com/news/battle-of-the-headlights-halogen-vs-xenon-vs-led-26530.html>
- [8] SIQ Ljubljana. *Dokumentacija SIQ Ljubljana*. Neobjavljeno interno gradivo.
- [9] Stockburger, J. (2017, 3. november). *Are HID and LED Headlights Worth Buying?* Pridobljeno na <https://www.consumerreports.org/headlights/are-hid-and-led-headlights-worth-buying/>
- [10] Varga, M. (2018, 23. marec). *Od žarnice do LED in laserja, Monitor*. Pridobljeno na <https://www.monitor.si/clanek/od-zarnic-do-led-in-laserja/174524/>

Študija izbire aluminijastih materialov in tehnologij za «Z» nosilec

Study of selection of aluminium materials and technologies for "Z" bracket

Mirko ZUPANC¹, Matej STEINACHER², Matej ERNECL³
Vili MALNARIČ¹

¹TPV d.o.o.,
Kandijska cesta 60, 8000 Novo mesto, Slovenija
E-naslovi: m.zupanc@tpv.si, v.malnaric.si

² Impol Group,
Partizanska 38, 2310 Slovenska Bistrica, Slovenija
E-naslov: matej.steinacher@impol.si

³ TALUM Tovarna aluminija d.d.,
Tovarniška 10, 2325 Kidričevo, Slovenija
E-naslov: matej.ernecl@talum.si

Povzetek. Nosilec je del podvozja, ki ima za glavno funkcijo povečanje togosti konstrukcije vozila in je povezovalni element med karoserijo in Al nosilcem motorja v neposredni bližini vzmetenja. Iz predhodne virtualne simulacije dinamike vozila je kupec zaznal določene potrebe po povečanju togosti karoserije. Iz izhajajočih zahtev, ki zajemajo statične, dinamične obremenitve in seveda togosti, je bila izvedena študija možnih rešitev. Tako je bil v prvi fazi razvit koncept nosilca iz jeklene pločevine, ki je zadovoljil kupčeve zahteve. Med samim razvojem se je večkrat pojavilo vprašanje o možnosti izdelave nosilca iz aluminija, kar je tema študije. Aluminij ima določeno prednost, da je trikrat lažji od jekla in tega dejstva ne smemo zanemariti.

V avtomobilski industriji se uporabljajo tako gnetne kot livne aluminijeve zlitine, kar seveda je odvisno od zahtev aplikacije. Bloki motorjev, platišča ter drugi sklopi so narejeni s postopki litja, medtem ko so deli podvozja, karoserije, pločevina in varnostni deli izdelani s postopki preoblikovanja. Tako so na voljo tudi različne tehnologije izdelave, kot so nizkotlatčno litje, tlačno litje, gravitacijsko litje ter hladno in toplo preoblikovanje.

Največji izzivi so bili doseganje zahtevane togosti, dinamična obremenjevanja in zahtevana minimalna razteznost brez pretrga nosilca. S sodelovanjem s partnerji projekta Martina so bile dizajnirane rešitve za posamezno tehnologijo izdelave in optimirane s pomočjo naprednih virtualnih simulacij. Na osnovi izbranih kriterijev je bila izdelana primerjava med različnimi rešitvami, poudarka so bila na ceni izdelave, masi nosilca ter izpolnjevanje zahtev kupcev.

Ključne besede: aluminij, materiali, nosilec, tehnologije, togost

Razvrstitev: Strokovni članek

Abstract. The bracket is a part of the chassis, which has the main function of increasing the rigidity of the vehicle structure and the connecting element between the bodywork and the Al bracket of a motor in the immediate near of the suspension. From the previous virtual simulation of vehicle dynamics, the customer detected certain needs to increase the rigidity of the bodywork.

From the requirements, covering static, dynamic loads and of course stiffness, a study of possible solutions was carried out.

In the first step, the concept of steel plate holder was developed, which satisfied the customer's requirements. During the development, the question of the possibility of aluminium bracket construction has appeared several times, which is the topic of study. Aluminium has a certain advantage that it is three times lighter than steel and this fact should not be ignored.

In the automotive industry, both wrought and cast aluminum alloys are used, which of course depends on the requirements of the application. Engine blocks, wheels and other assemblies are made by casting processes while parts of the chassis, bodywork, sheets and safety parts are made by forming processes. Different manufacturing technologies are also available, such as low pressure die casting, die casting, gravity casting, and cold and hot forming.

There are also various manufacturing technologies, such as melting, semi-continuous casting, homogenizing annealing, hot forming into semi-finished products, hot or cold product transformation and heat treatment.

The greatest challenges were the achievement of the required rigidity, dynamic loading and the required minimum expansion without breaking the bracket.

By working with partners of project Martina, solutions were developed for each production technology and optimized by using advanced virtual simulations.

Based on the following criteria was made a comparison between different solutions, the emphasis was on the cost of manufacture, weight carrier and fulfil customer requirements.

Keywords: bracket, stiffness, aluminium, technologies, materials

Article Classification: Professional Paper

1 Uvod

V avtomobilski industriji se dogajajo in se bodo dogajale velike spremembe, ki jih pred nekaj leti nazaj nismo bili vajeni. Dogajajo se velike spremembe v filozofiji vozil (električna in samostojno vozeča se vozila), vstop novih podjetij npr. Google, Apple. Ne smemo pozabiti Kitajske, ki vse bolj prodira kot pomemben igralec v razvoju in proizvodnji vozil.

V zadnjih letih se srečujemo z medijskimi pritiski na proizvajalce osebnih vozil (OEM), z obtožbami o lažnih meritvah izpustov vozil. Namreč težko dosežejo norme, ki so zahtevane. Znano je, da velika mesta vse bolj prepovedujejo vstop vozil z neustreznimi izpusti. Tudi v našem okolju imamo težave s čistostjo zraka, predvsem v zimskem času, ko so presežene vrednosti trdih delcev v zraku [6].

Proizvajalci OEM so tako prisiljeni v spremembe po eni strani v smeri elektrifikacije vozil po drugi strani v zmanjševanje teže vozil. Z elektrifikacijo vozil se namreč poveča teža vozil, predvsem na račun vgrajenih baterij. Razvijalci se tako trudijo zmanjšati težo vozil z uvajanjem novih lahkih materialov, novih inovativnih pristopov vgradnje multi-materialov in konceptov dizajniranja vozil. Stroški razvoja so veliki, zato so prisiljeni tudi v medsebojna združevanja.

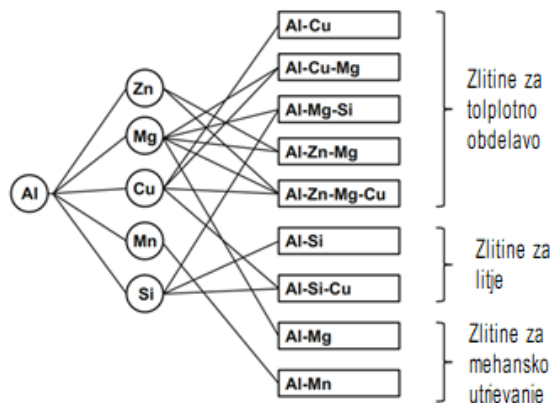
V tej študiji bo obravnavan primer »Z« nosilca, uporabe aluminija, namesto jekla. Pri tem bodo obravnavane različne tehnologije izdelave z njihovimi prednostmi in slabostmi.

Namen študije je, da se seznanimo z uporabo aluminija, s pomočjo študij tehnologij in pravilne izbire materialov za obravnavani nosilec. Namreč iz lastnih izkušenj lahko povem, da je pri razvoju izdelkov zelo pomembno, kaj želiš doseči, potem šele lahko izbereš ustrezno tehnologijo in ustrezen material.

2 Aluminijeve zlitine v avtomobilski industriji

Za večino aluminijastih avtomobilskih delov, ki so izdelani s postopki preoblikovanja, se uporabljajo izločevalno in deformacijsko utrjevalne zlitine. Zlitine Al-Mg-(Mn) dobijo zelene lastnosti s preoblikovanjem, medtem ko je zlitine Al-Mg-Si in Al-Zn-Mg potrebno po preoblikovanju še toplotno obdelati. Za zlitine Al-Mg-Si je značilno, da dosežejo trdnost do 500

MPa ter kažejo zelo dobro korozijsko odpornost. Z zlitinami Al-Zn-Mg pa že lahko dosežejo mehanske lastnosti jekel (Slika 1).



Slika 1. Aluminijeve zlitine

S toplotno obdelavo aluminijevih zlitin povečamo mehanske lastnosti. Mehanizem utrjevanja je izločevalno utrujanje ali staranje. Na splošno sta dva pogoja, ki morata biti izpolnjena pri vsaki zlitini, ki jo je mogoče izločevalno utrditi. Zlitina mora vsebovati elemente, ki tvorijo faze, ki se pri povišani temperaturi raztopijo v trdni raztopini aluminija in morajo ostati v njej raztopljeni po hitrem ohlajanju. Nadalje pa se pri nizkotemperaturni toplotni obdelavi ponovno izločajo v primarnih kristalih aluminija in utrjujejo material. Faza, ki se izloča mora tvoriti trde, koherentne ali pol-koherentne izločke. Za aluminijeve zlitine so značilna različna toplotna stanja. V spodnji tabeli (Tabela 1) so prikazani glavna toplotna stanja aluminijevih zlitin. Spodaj je razvidna vsa širina možnosti toplotne obdelave aluminija in s tem možnost izboljšanja mehanskih lastnosti.

Tabela 1. Toplotne obdelave Al zlitin [7]

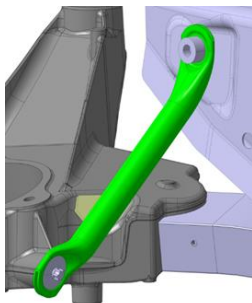
T1 – Ohlajeno z visokotemperaturnega oblikovalnega postopka in naravno starano do stabilnega stanja.
T2 – Ohlajeno z visokotemperaturnega oblikovalnega postopka, hladno preoblikovano in naravno starano do relativno stabiliziranega stanja.
T3 – Topilno žarjeno, hladno preoblikovano in naravno starano.
T4 – Topilno žarjeno in naravno starano do relativno stabilnega stanja.
T5 – Ohlajeno s visokotemperaturnega oblikovalnega postopka in umetno starano.
T6 – Topilno žarjeno in umetno starano.
T7 – Topilno žarjeno in stabilizirano.
T8 – Topilno žarjeno, hladno preoblikovano in umetno starano.
T9 – Topilno žarjeno, umetno starano in hladno preoblikovano po umetnem staranju.
T10 – Ohlajeno z visokotemperaturnega oblikovalnega procesa, hladno preoblikovano in umetno starano.

Za zaključek lahko za aluminij rečemo, da bo obdržal vlogo vodilnega na področju lahkih konstrukcij, ker poleg dobrih mehanskih lastnosti, lahka kovina omogoča uporabo različnih metod preoblikovanja: štancanja, ulivanja in kovanja.

3 Vhodne zahteve nosilca

Za vsako optimalno in dobro rešitev je potrebno dobro razumevanje vhodnih zahtev. Glavna funkcija obravnavanega nosilca je, da poveča togost podvozja. Povezuje karoserijski del vozila z nosilcem motorja. Zahtevnost naloge je predvsem, zaradi pomanjkanja prostora, saj se v bližini

nosilca nahaja še izpušni kolektor. Nosilec je v osnovi obremenjen na upogib, zato je zahtevana togost in na nateg ter tlak (Slika 2).



Slika 2. Okolica Z nosilca

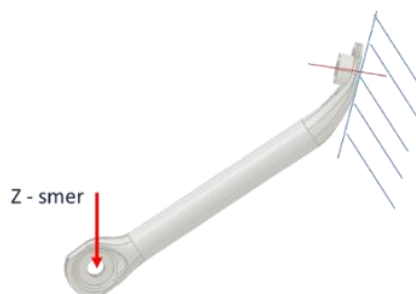
V Tabeli 2 so podane glavne obremenitvene zahteve nosilca. Pri dinamični trdnosti mora nosilec doseči minimalno življenjsko dobo 10^5 ciklov. Maksimalna dovoljena plastična deformacija je 0,5 mm pri obremenitvi $F=3000$ N. Statična porušna trdnost je pri obremenitvi 3500 N ali pri pomiku 5 mm v nategu in tlaku. Nosilec se pri tej obremenitvi oziroma pomiku ne sme porušiti.

Tabela 2. Obremenitvene zahteve nosilca

Obremenitve in pomiki	
Dinamična trdnost	
Pred-napetje (kN)	=0
Amplituda (kN)	+/-1
Minimalno število ciklov	=100.000
Število ciklov (50% preživetje)	>=170.000
Trajne deformacije (mm)	<=0,2
Začetne statične plastične deformacije	
Natezna sila F (kN)	=3
Trajne deformacije U+ (mm)	<=0,5
Tlačna sila F (kN)	=-3
Trajne deformacije U- (mm)	<=0,5
Statična porušitvena trdnost	
Natezna sila Fp (kN)	>=3,5
Pomik brez porušitve Up+ (mm)	>=5
Tlačna sila Fp (kN)	<=-3,5
Pomik brez porušitve Up- (mm)	>=5



Drugi sklop zahtev, ki so bile omenjene, je predpisana togost v smeri Z (Slika 3).



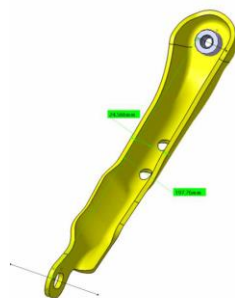
Slika 3. Minimalna zahtevana togost $k=350$ N/mm v Z smeri

Minimalna zahtevana togost je $k=350 \text{ N/mm}$, kar pomeni, da pri sili 350 N, mora biti pomik manjši ali enak 1 mm.

4 Razvoj nosilcev

4.1 Obstoječa rešitev

V Skupini TPV je bil pred leti dizajniran nosilec iz jekla. To bo naša referenca in vodilo pri razvoju nosilca iz aluminija. Masa obstoječega nosilca je 250 g in debelina jeklene pločevine $t=3 \text{ mm}$ (Slika 4).



Slika 4. Obstoječi nosilec S355MC; $t=3 \text{ mm}$, $m=250 \text{ g}$

Vtiskovanje matice M8 je bilo integrirano v sam proces štančanja. Izdelek je bil konkurenčen, glede na ostale poznane tehnologije izdelave. Slabost rešitve sta predvsem v masi kosa in korozijski odpornosti, saj se nosilec nahaja v podvozju vozila, kjer je vsakodnevno izpostavljen različnim okoljskim vplivom. Nahaja se tudi v bližini izpušnega kolektorja. Iz teorije je znano, da temperatura poslabša korozijsko obstojnost materialom.

4.2 Izbor tehnologij

Glede na naše dosedanje izkušnje je bila s partnerji izvedena študija, kjer smo sprejeli odločitev, da se obravnavajo tri vrste tehnologij: štančanje, litje in utopno kovanje.

Znano je, da je proces štančanje ena izmed najbolj optimalnih rešitev za veliko serijsko proizvodnjo. Seveda pa ima tudi svoje slabosti. Debelina sten izdelka je povsod enaka, kar nas omejuje pri optimizaciji konstrukcije. Orodje mora biti pravilno koncipirano, da dobimo ponovljive kose. Material izdelka mora imeti dovolj veliko duktilnost, da med preoblikovanjem ne prihaja do pokanja materiala. Ena od poznanih skrajnih rešitev je, da se poslužujemo preoblikovanja v toplem, kar pa nam podraži proces.

Pri procesu litja aluminija je največja prednost, da so lahko debeline sten različne, lahko se lijejo tudi votle konstrukcije, dosega se dobra površinska in dimenzijska natančnost ter da je struktura materiala homogena. Vse to nam omogoča več svobode pri dizajniranju izdelka. Slabost pa je v tem, da je proces izdelave dražji od štančanja, saj so stroški orodja zelo veliki. Zato je proces primeren, ko ne vidimo rešitve v drugih tehnologijah. Tehnologija preoblikovanja oziroma kovanja je najboljša izbira, sploh če je zlitina za preoblikovanje deformacijsko utrjevalna, saj v tem primeru dosežemo želene lastnosti samo s preoblikovanjem. Ob uporabi izločevalno utrjevalne zlitine je pa potrebno na koncu še izdelek toplotno obdelati. Slabost je omejitev v dizajnu in ceni izdelave izdelka, saj je dražji od štančanega izdelka.

Zgoraj so na kratko opisane prednosti in slabosti posameznih tehnologij. Pri izbiri tehnologije ne smemo pozabiti na vhodne zahteve kupca oziroma potrebno se je vprašati kaj želimo doseči z izdelkom. V nadaljevanju študije bodo dizajnirani trije različni nosilci, glede na izbrane tehnologije.

4.3 Izbira aluminijastega materiala

Za razvoj nosilcev je potrebno najprej določiti lastnosti materiala, ki ustreza zahtevam in določiti omejitve, ki so pri tehnologij izdelave nosilca.

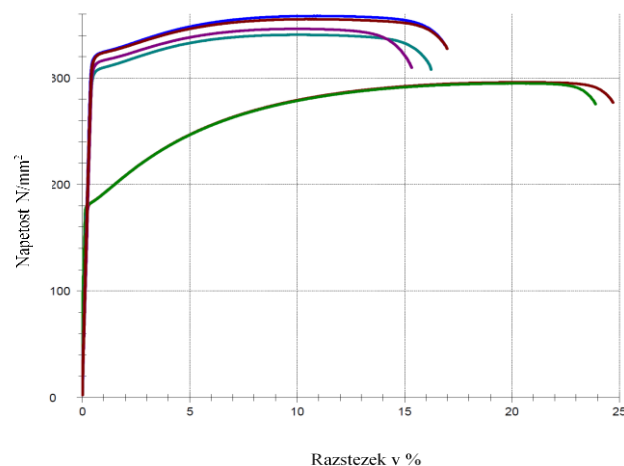
Običajno je, da od izdelka želimo doseči, da ima čim višjo nosilnost in čim manjšo maso.

Pri izbiri tehnologije, se takoj soočimo z vprašanjem možnost izdelave, kot na primer posledica premajhnega specifičnega raztezka, ki vodi pri preoblikovanju do pokanja kosov. Zato je potrebno vedno izbrati neko optimalno rešitev.

Glede na naše dosedanje izkušnje v sodelovanju s partnerji smo se osredotočili na aluminijasto zlitino EN AW 6082 in toplotno obdelavo T4 in T6. Zlitina AW 6082 je srednje trdna zlitina z dobro korozijsko odpornostjo. Ima največjo trdnost izmed vseh zlitin iz serije 6xxx. Zaradi fino zrnate strukture ima zlitina dobro odpornost na dinamične obremenitve.

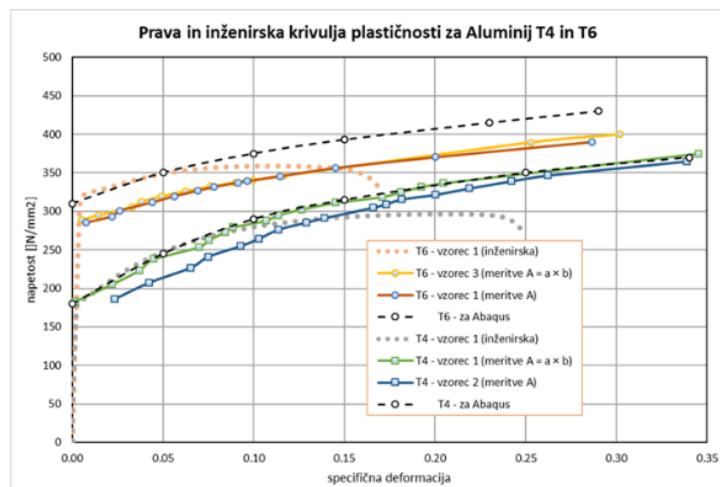
Iz izbranega materiala so bili izdelani vzorci za določitev mehanskih lastnosti materiala. Rezultati nateznih preizkusov so vidni na Sliki 5. Opozoriti je potrebno, da so to inženirske krivulje.

Iz je razvidno, kako lahko s toplotno obdelavo spreminjamo mehanske lastnosti materiala, kar je tudi naš namen študije. Spodnji krivulji predstavljajo toplotno obdelavo T4, zgornje pa T6. Naša želja je, da uporabimo material v toplotnem stanju T6, vendar le ta ne ustreza, ker material kaže premajhne raztezke, maksimalni je 15 %.



Slika 5. Inženirska krivulje σ - ϵ : EN AW 6082; toplotni stanji T4 in T6

Glede na dobljene rezultate, smo želeli raziskati, kakšni so dejanski raztezki obeh materialov upoštevajoč tako imenovanih pravih σ - ϵ krivulj. To se pravi, da se pri določitvi σ - ϵ krivulj, merijo dejanski preseki na epruveti pri posamezni obremenitvi. Postopek meritve je bil razvit in patentiran v Skupini TPV. Rezultati so podani na Sliki 6.



Slika 6. Inženirske in prave σ - ϵ (log deformacije) krivulje; EN AW 6082

Če primerjamo obe merilni metodi pri določitvi σ - ϵ krivulj, vidimo, da so se z našo metodo določitve krivulj, povečale vrednosti nosilnosti in vrednosti specifičnih raztezkov, kar je za naše nadalje delo zelo ugodno.

Pri meritvah je bilo tudi opaženo, da so pri aluminiju kontrakcije bolj enakomerne po celotnem volumnu, kot pri jeklih materialih. Glede na zgornje rezultate, sta bili dokončno določene prave σ - ϵ log deformacije za materiala EN AW 6082 (T4 in T6), ki se bosta v nadaljevanju uporabljali pri numeričnih analizah v Abaqus-u. Krivulji za numerične analize sta podani v črni barvi.

5 Dizajn Z nosilcev

Za nadaljnjo obravnavo nosilca je bil izbran material EN AW 6082-T4. Pri izboru materiala je bilo pomembno, da je specifični raztezek dovolj velik. Za nosilec B je bil izbran material EN AW 6082-T6, zaradi narave tehnologije izdelave. Na sliki 7 so podani dizajni za posamezne tehnologije. Pri tehnologiji izdelave v primeru nosilca A in B je potrebno po glavni operaciji izdelati še navoj M8 s pomočjo mehanske obdelave. Značilno za nosilca A je v dizajnu, saj sta bili izbrani dve debelini. Debelina t_1 se nahaja na prvem delu pri navoju M8, druga debelina t_2 je na območju obarvano v zeleno.

Nosilec A: ulivanje
 $t_1=3,5\text{mm}$, $t_2=3,8\text{mm}$;
 $m=137\text{g}$

Nosilec B: kovanje; $m=105\text{g}$

Nosilec C: pločevina;
 $t=4\text{mm}$; $m=155\text{g}$,



Slika 7. Dizajn nosilcev

Za nosilec C je predvidena izvedba navoja M8 s tornim varjenjem matice iz jekla ali aluminija.

Iz zgornjih rešitev lahko opazimo, da sta si nosilca A in C po dizajnu zelo podobna, kar ne velja za dizajn nosilca B. Nosilca A in B sta za več kot 50 % lažja od jeklenega nosilca, nosilec C pa za 38 %.

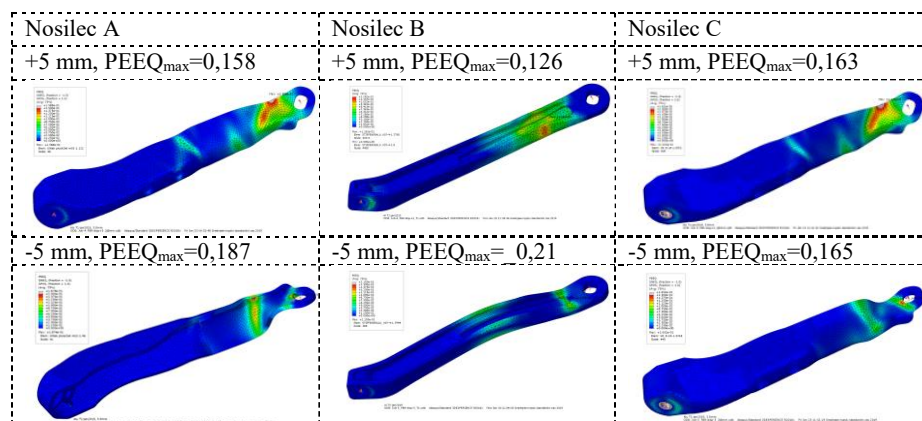
6 Rezultati numeričnih analiz nosilcev

Virtualne simulacije in vrednotenja smo izvedli s programsko opremo Abaqus in FemFat. Najprej so bile izvedene simulacije statičnih in dinamičnih obremenitev na zgornjih modelih. Na ta način so bili dobljeni odzivi na različne vrste obremenitev, kot so nateg, tlak, upogib itd.

Tako so bile pridobljene informacije, v kolikšni meri dane rešitve zadovoljijo predpisane trdnostne zahteve. Opozoriti je potrebno, da je bil za nosilec B izbran material s toplotno obdelavo T4.

6.1 Maksimalne plastične deformacije

Maksimalne plastične deformacije (Slika 8) so se pokazale pri pomiku 5 mm v nategu in tlaku.

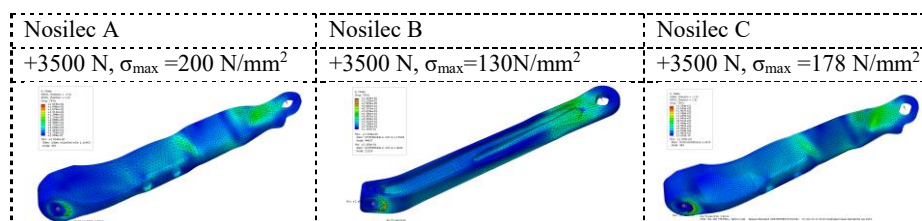


Slika 8. Maksimalne plastične deformacije nosilcev

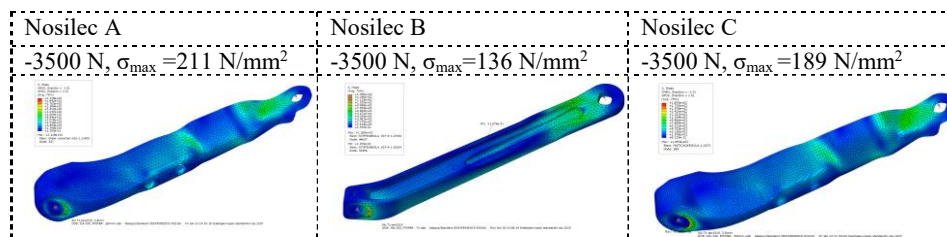
Vrednosti specifičnih deformacij so pri vseh treh rešitvah pod kritično mejo 0,2.

6.2 Maksimalne napetosti po Mises-u pri obremenitvi ± 3500 N

Pri obremenitvi ± 3500 N ni prišlo do plastičnih deformacij, zato so na Sliki 9 in 10 prikazane napetosti po Mises-u.



Slika 9. Maksimalne napetosti po Mises-u pri obremenitvi +3500N

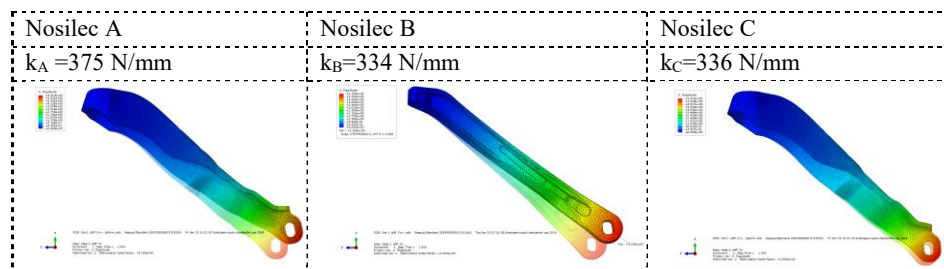


Slika 10. Maksimalne napetosti po Mises-u pri obremenitvi -3500N

Velikost napetosti, glede na graf (slika 6) so blizu meje plastičnosti. Lahko sklepamo, da je zahteva pri pomiku 5 mm, bolj kritična za nosilnost nosilcev od obremenitve 3500 N.

6.3 Togost nosilcev

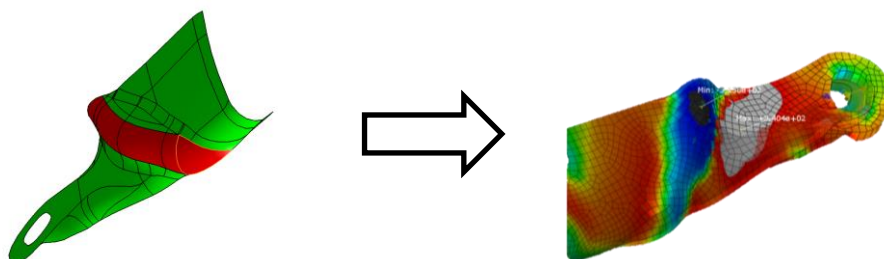
Na Sliki 11 so podane vrednosti togosti nosilcev. Pri vseh treh rešitvah je bila dosežena zahtevana vrednost $k=350 \text{ N/mm}$.



Slika 11. Togost nosilcev $k \text{ (N/mm)}$

Za togost nosilca je bilo pomembno, da se doseže dovolj tog prehod med ležiščem navoja M8 na okolico. To se lepo vidi pri rešitvi nosilca A, kjer je bila možna izvedba z rebri. Najboljša rešitev za togost je nosilec B, ker je mogoče dizajnirati I obliko nosilca. Iz teorije pa je znano, da I nosilec dobro prenaša upogib. Na koncu je potrebno omeniti, da se lahko nosilec B izdelava s tehnologijo tlačnega litja, vendar vemo, da ne bi popolno izkoristili mehanskih lastnosti materiala. Nosilec B tudi zavzame najmanj prostora, tako je nosilec bolj kompakten.

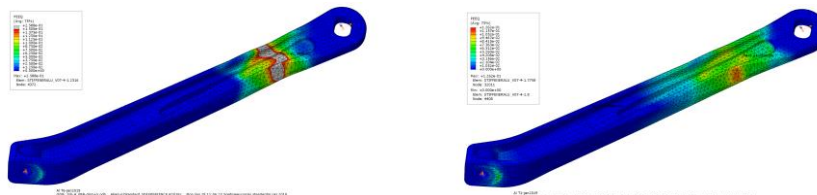
Na nosilcih je bilo izvedenih veliko iteracij na račun, da ni bila presežena porušna trdnost pri pomiku 5 mm in da je bila dosežena zahtevana togost. Namreč, če ima material premajhen raztezek lahko hitro pride do porušitve. Če je rešitev na meji, se lahko poslužujemo z oblikovnimi oslavitvami konstrukcije (Slika 12), s katerimi se želi izogniti koncentracijam napetosti.



Slika 12. Oblikovna oslabitve konstrukcije; vtisek

Ideja je, da se maksimalne napetosti bolj enakomerno porazdeli na čim večje območje. Tako se lahko pričakuje padec maksimalne napetosti. Druga možna rešitev da se to doseže je spreminjanjem debeline sten konstrukcij in seveda z izbiro materiala ter toplotno obdelavo. Pri simulacijah so se pojavile tudi raztezki ranga 60 %, kar je močno preseženo, glede na lastnosti izbranega materiala.

Na Sliki 13 je lepo prikazan primer razlike v maksimalnih specifičnih deformaciji, če spremenimo samo toplotno obdelavo materiala iz T4 na T6. Pri toplotni obdelavi materiala T6 se poveča raztezek na nosilcu B na 26 %. To pomeni, da bi pri obremenitvi na nateg 5 mm prišlo do porušitve.

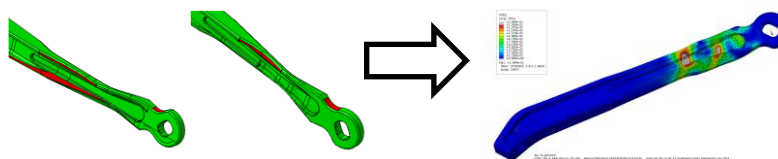


Slika 13. Nosilec B z različnima toplotnima obdelavama; levo T6, desno T4

Prav tako je razvidna velikost območja, kjer se material razteguje. S toplotno obdelavo materiala T6 je to območje enkrat manjše od toplotne obdelave T4.

Kaj storit v tem primeru? Najelegantnejša rešitev je, da nosilec toplotno obdelamo v T4 stanje. V našem primeru je to sprejemljivo. Vendar želimo v nadaljevanju raziskati, če lahko dosežemo s spremembo dizajna, mejo ciljno maksimalno specifično deformacijo 0,2.

Na Sliki 14 se lepo vidi, kako z oblikovnimi posegi v nosilec B dosežemo zeleno mejo specifične deformacije.



Slika 14. Nosilec B; material EN AW 6082-T6

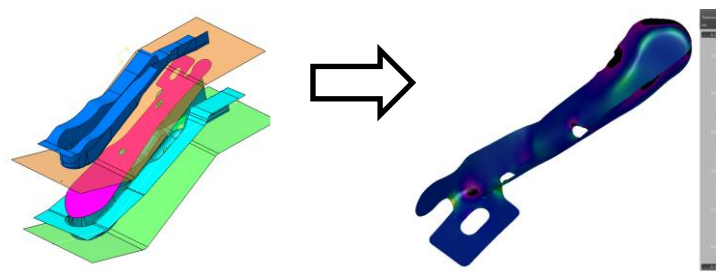
Na sliki so označene oslavitve, z rdečimi polji, s katerimi smo dosegli želene rezultate. Vendar moramo biti pazljivi, da ne pade vrednost na togosti.

7 Končna rešitev Z nosilca

Glede na dobljene rezultate je bila sprejeta odločitev za nosilec C, ki je izdelan iz aluminijaste pločevine. Odločitev za to rešitev je predvsem zaradi velikosti serije, proizvodnji stroškov in obvladovanja kakovosti.

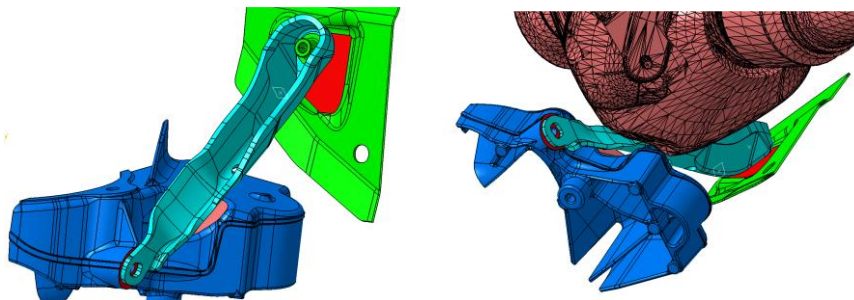
V času študije je bila tudi preverjena tehnološkičnost nosilca s pomočjo numeričnih simulacij v programskem paketu AutoForm. Rezultati kažejo, da se pojavljajo posamezna kritična mesta, vendar ni nič kritično (Slika 15).

V nadaljevanju študije se namerava izdelati prototipno orodje in prototipne kose na osnovi katerih se bo dobila potrditev ali je možno nosilec izdelati v hladnem ali je potrebno preoblikovanje v vročem.



Slika 15. Numerična simulacija preoblikovanja; kritična mesta

Nosilec C je dizajniran iz 4 mm debele pločevine. Matica M8 je pritrjena na nosilec s pomočjo tornega varjenja. Dizajn matice M8 je bil koncipiran tako, da bistveno pripomore k togosti konstrukcije. Nosilec je v celoti izdelan iz aluminija, kar pomeni, da je korozijsko odporen. To pomeni, da ni potrebne dodatne korozijske zaščite nosilca. To je ena od bistvenih prednosti glede na jekleni nosilec. Končna masa nosilca je $m=155$ g, kar je več kot 38 % lažji od jeklenega nosilca. Ena od značilnosti nosilca C, glede na jekleno rešitev, je da ima višje potegnjene vratove, kar je tudi logično, saj je elastični modul aluminija trikrat manjši od jekla.



Slika 16. Okolice končne rešitve nosilca C

Potrebno je omeniti, da so bile pri numeričnih simulacijah preverjene tudi ostale zahteve, kot je dinamična trdnostna nosilca. Vendar se pokaže, da s tem ni težav.

8 Sklep

Študija je pokazala bistvene korake, ki so potrebni pri dizajniranju nosilca. Eden od bistvih del naloge je bilo določiti mehanske lastnosti izbranega materiala. Lahko sklenemo, da je za resno delo potrebno določiti »prave« σ - ϵ krivulje. Saj le tako, bomo dosegli optimalno konstrukcijo in bili prepričani, da bo izdelek izpolnil vse zahteve. Priporočljivo bi bilo izmeriti še večje število vzorcev za posamezni material.

Pri dizajnu nosilcev smo preučili tri glavne tehnologij izdelave. Naj omenim, da z nekaterimi toplotnim obdelavami lahko poslabšamo dimenzije konstrukcije (zvižanje konstrukcije), zato moramo biti pri tem pozorni. Obvladovanje in poznavanje aluminija je potrebno imeti veliko znanja. V študij smo poskušali obravnavati le en delček tega.

S študijo bomo nadaljevali v smeri optimizacije in reševanje spoja med pločevino in matico M8. Poskušali bomo določiti mehanske lastnosti še za druge aluminijaste zlitine. Izdelek lahko vedno izboljšaš, narediš lažjega in boljšega.

Reference

- [1] ABAQUS/CAE. (2017). Program za analize obremenitev po metodi končnih elementov (FEM). Dassault Systèmes, Simulia Corporation.
- [2] Dowling N. (1993). Mechanical Behaviour of Materials: Engineering Methods of Deformation, Fracture, and Fatigue. New Jersey: Prentice-Hall International. Inc.
- [3] FEMFAT 5.2. (n. d.). Program za analizo dinamičnih obremenitev po metodi končnih elementov (FEM). MAGNA, MAGNA Powertrain.
- [4] TPV d. o. o. (n. d.). Lastni izsledki razvoja in raziskav ter druga dokumentacija. Neobjavljeno interno gradivo.
- [5] WorldAutoSteel. (2017, april). *Advanced High-Strength Steels: Application Guidelines, Version 6.0*. Pridobljeno na <https://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/>
- [6] Agencija RS za okolje. (n. d.) Pridobljeno na <http://www.arso.gov.si/>
- [7] Zupanič, F., & Anžel, I. (2007). *Gradiva*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo. Pridobljeno na <https://www.scribd.com/doc/202131213/Gradiva-Ucbenik-FS-UM>

MARTINA - AM, 3D tisk in inovativne tehnologije obdelave materialov za končno uporabo

MARTINA - AM, 3D print and innovative materials manufacturing technologies for end use

**Mina KRALJ¹, Boštjan PODLIPEC², Vesna ŽEPIČ BOGATAJ³, Damjan
KLOBČAR⁴, Mitja PETRIČ⁵, Jaka BURJA⁶**

¹*Razvojni center Jesenice d.o.o.,
Cesta Franceta Prešerna 61, 4270 Jesenice, Slovenija
E-naslov: mina.kralj@rcjesenice.si*

²*SiEVA, podjetje za razvoj in trženje v avtomobilski industriji d.o.o.,
Polje 15, Šempeter pri Gorici, 5290 Šempeter pri Gorici, Slovenija
E-naslov: bostjan.podlipec@sieva.si*

³*TECOS, Razvojni center orodjarstva Slovenije,
Kidričeva 25, 3000 Celje, Slovenija
E-naslov: vesna.zepic.bogataj@tecos.si*

⁴*Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani,
Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-naslov: Damjan.Klobcar@fs.uni-lj.si*

⁵*Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani,
Aškerčeva cesta 12, Slovenija
E-naslov: mitja.petric@omm.ntf.uni-lj.si*

⁶*Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, IMT,
Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-naslov: Jaka.Burja@imt.si*

Povzetek. V okviru programa MARTINA se znotraj projekta RRP5 v sodelovanju s partnerji raziskuje področje naprednih dodatnih tehnologij obdelave materialov za izdelavo kompleksnejših industrijskih komponent. Končni cilj projekta je izdelava in implementacija prototipnih orodnih vložkov za brizganje plastike izdelanih s tehnologijo selektivnega laserskega taljenja - SLM (angl. Selective Laser Melting) in oblikovnega navarjanja žice – WAAM (angl. Wire And Arc Additive Manufacturing). Izdelava orodnih vložkov s konvencionalnimi metodami, ki temeljijo na odvzemanju materiala, je pri kompleksnih oblikah težko izvedljiva in z vidika materiala zelo potratna. Z dodatnimi tehnologijami lahko izdelujemo orodne vložke s primerljivimi mehanskimi lastnostmi, zaradi grajenja po plasteh pa je možna izdelava notranjih konformnih hladilnih kanalov. Tehnologija SLM, se je zaradi natančnosti izdelave izkazala za primernejšo od oblikovnega navarjanja, kjer je izdelava manjših dimenzij zaradi težjega obvladovanja procesa težko izvedljiva. Vpeljava konformnega hlajenja, t.j. hlajenja po geometriji brizganega izdelka, omogoča hitrejšo odvajanje toplote ter enakomernjšo porazdelitev temperature po notranjih stenah tiskanih orodnih vložkov, kar vodi do krajših tehnoloških ciklov brizganja, večje produktivnosti in boljše kvalitete končnih izdelkov.

V članku so predstavljene raziskovalne aktivnosti, prednosti, omejitve in izzivi na področju izdelave orodnih vložkov iz 3D tiskanega kovinskega prahu jekla maraging in oblikovnega navarjanja z žico iz aluminijevega bronca. Predstavljeni so rezultati simulacij hlajenja polimernega izdelka med procesom brizganja, iz katerih

je razviden pozitiven vpliv vpeljave konformnega hladilnega sistema, ki ga je mogoče izdelati samo z naprednimi dodajnimi tehnologijami.

Ključne besede: dodatne tehnologije, selektivno lasersko taljenje, oblikovno navarjanje, orodja za brizganje plastike, konformno hlajenje

Razvrstitev: Strokovni članek

Abstract. As a part of the MARTINA programme the field of advanced materials processing technologies for production of complex industrial components is explored within the framework of the RRP5 project. The ultimate goal of the project is to manufacture and implement the prototypical inserts used in plastic injection moulding tools made with Selective Laser Melting - SLM and Wire And Arc Additive Manufacturing - WAAM. The production of complex tool inserts with conventional methods based on subtracting material is difficult to implement and is very wasteful in terms of material. With additive technologies, we can manufacture the mould inserts with desired internal structures and comparable mechanical properties to the conventional ones. Since the inserts are built three dimensionally, adding layer upon layer, it is possible to shape the internal conformal channels for more effective and uniform cooling of the final parts. In terms of the precision requirements of complex inserts manufacturing, SLM proved to be more appropriate than WAAM, where the production of smaller dimensions is problematic due to the challenging monitoring of the process parameters. The implementation of conformal cooling channels, i.e. cooling which follows the geometry of the injected part, allows faster and better heat dissipation and a more uniform distribution of the outer walls temperature, thus leading to a significantly shorter production cycles of injection process, increased productivity and better quality of the final injected parts.

The article presents research activities, the advantages, disadvantages and challenges in the production of tool inserts for injection molds made with SLM using maraging steel metal powder and wire and arc additive manufacturing using aluminium bronze wire. The results of comparative simulations of plastic injection process are presented, indicating the positive impact of the implemented conformal cooling system, that can be produced only with advanced additive technologies.

Keywords: additive manufacturing, selective laser melting, wire and arc additive manufacturing, conformal cooling

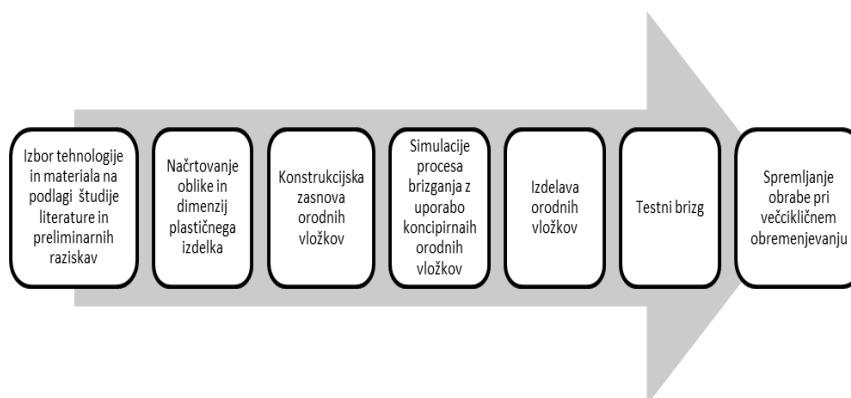
Article Classification: Professional Paper

1 Uvod

Dodatne tehnologije so v zadnjem desetletju postale stalnica in dobra praksa tudi pri izdelavi zahtevnejših industrijskih komponent iz kovinskih materialov. Vedno večja kompleksnost brizganih plastičnih izdelkov, zahteve po ozkih tolerancah in krajših časih izdelave v orodjarstvu predstavljajo velik izziv. Orodni oblikovni vložki so eni najzahtevnejših delov v plastično predelovalni industriji, natančnost njihove izdelave pa neposredno zagotavlja, da bosta oblika in površina končnega izdelka konstrukcijsko ustrezni. Ker so orodni vložki izpostavljeni velikim tlačnim obremenitvam in temperaturnim razlikam, je za doseganje njihove dolge življenjske dobe potrebno zagotoviti ustrezen hladilni sistem. Integracija konformnega hladilnega sistema, pri čemer so hladilni kanali v orodnem vložku speljani po konturi izdelka, omogoča enakomernejši in učinkovitejši odvod toplote. Izdelava kompleksnih hladilnih kanalov je s konvencionalnimi tehnologijami izdelave nemogoča, zato je potreba po znanju o dodatnih tehnologijah kot sta selektivno lasersko taljenje in oblikovno navarjanje z žico, vedno večja. [1]

2 Raziskovalne aktivnosti

Osrednji cilj razvojno raziskovalnega projekta je izdelava in validacija prototipnih orodnih vložkov za brizganje plastike, izdelanih s tehnologijo selektivnega laserskega taljenja - SLM na osnovi kovinskega prahu in cenovno dostopnejšo tehnologijo oblikovnega obločnega navarjanja na osnovi varilne žice z uporabo varilnega robota - WAAM. Potek raziskovalnih aktivnosti je prikazan na Sliki 1.



Slika 1. Potek razvojnih aktivnosti RRP5

3 Selektivno lasersko taljenje

Selektivno lasersko taljenje (ang. *Selective laser melting* - SLM) je dodatna tehnologija, ki za pretaljevanje kovinskega prahu uporablja visoko energijski laserski žarek. Kovinski prah je doveden iz zalgovnika in razporejen z natančnim nanašalnim mehanizmom po površini. Visoko energijski laser nato stali kovinski prah in ga spoji s predhodno izdelano plastjo. Delovna plošča se po vsaki zaključeni plasti spusti za določeno višino sloja in nanese se nova plast prahu. Cikel se ponavlja dokler izdelek ne doseže končne oblike. Postopek poteka v zaščitni inertni atmosferi s čimer se zmanjša pojav oksidacije in razpada materiala. Selektivno lasersko taljenje je trenutno ena izmed najbolj naprednih in zanesljivih dodatnih tehnologij. Uspešno se uporablja za hitro izdelavo prototipov in orodij, predvsem za izdelavo kovinskih vložkov, orodij za brizganje plastike in litje barvnih kovin. Pomembna prednost opisane tehnologije je zmožnost recikliranja in ponovna uporaba ne pretaljenega prahu. SLM tiskani izdelki se ponašajo z mehanskimi lastnostmi, ki so primerljive z izdelavo po konvencionalnih postopkih. Zaradi velikih termičnih in zaostalih napetosti pa lahko prihaja do napak, kot so poroznost in slaba kvaliteta površin, kar zahteva dodatne obdelovalne postopke. Slabost dodatnih tehnologij predstavljajo tudi dolgi procesni časi, materialni stroški ter visoke investicije v potrebno opremo. [2]

4 Oblikovno obločno navarjanje z žico

Oblikovno obločno navarjanje z dodajanjem žice (ang. WAAM – *Wire and Arc Additive manufacturing*) je dodatna tehnologija, pri kateri z električnim oblokom raztalimo dodajni material v obliki žice. V zadnjem času postaja predmet številnih raziskav in se počasi uveljavlja tudi v industriji. Glavne prednosti pred ostalimi aditivnimi tehnologijami so nižja cena opreme in dodatnega materiala, možnost izdelave izdelkov večjih dimenzij, hibridnih in multi-materialnih izdelkov ter hitrost izdelave. Zaradi slabše dimenzijske natančnosti in zaostalih napetosti, ki so posledica velikega vnosa energije je skoraj vedno potrebna dodatna mehanska in toplotna obdelava izdelkov. Opremo za oblikovno obločno navarjanje sestavljajo vir varilnega toka, dodajni material v obliki žice, varilni gorilnik in robot, ki zagotavlja gibanje varilnega gorilnika.

Pomemben del opreme je tudi računalniški paket za generiranje trajektorije gibanja robotskega manipulatorja. Za to tehnologijo še ne obstajajo razviti programi, zato se uporablja CAM programe za izdelavo poti gibanja orodja pri odrezovanju. Za varjenje se lahko uporablja katerikoli postopek kot je na primer varjenje TIG, plazemsko varjenje, večinoma pa se uporablja postopek MIG/MAG in v zadnjem času postopek CMT (ang. *Cold Metal Transfer*), ki zmanjša količino vnesene toplotne energije in preprečuje brizganje. [2]

5 Izbor materialov

Prahovi običajnih orodnih jekel so zaradi višje vsebnosti ogljika občutljiva na pokanje med ohlajanjem in še niso primerna za dotično tehnologijo, kjer so hitrosti taljenja in ohlajanja izjemno visoke, sistemi pa običajno še nimajo delovnega prostora, kjer bi izdelek lahko predgrevali na ustrezno visoko temperaturo. Za potrebe SLM smo izbrali prah iz maraging jekla z oznako proizvajalca EOS MS1(1.2709), pri katerem se kot primarni utrjevalec uporablja nikelj z dodatki kobalta, molibdena in titana. Izdelki narejeni s postopkom SLM iz prahu jekla maraging za doseg ustreznih mehanskih lastnosti ne zahtevajo klasičnega kaljenja ampak samo izločevalno utrjevanje – staranje pri času zadrževanja 3 do 4 ure na temperaturi 490 °C.

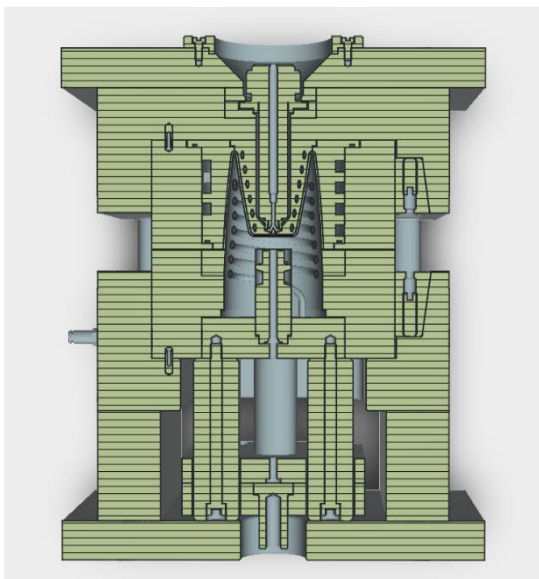
Pri tehnologiji WAAM smo kot dodajni material uporabili žico iz aluminijevega brona – CuAl8, ki ima odlično toplotno prevodnost in obrabno odpornost. Fizikalne in mehanske lastnosti obeh materialov so podane v Tabeli 1.

Tabela 1. Fizikalne in mehanske lastnosti dodajnih materialov[3,4].

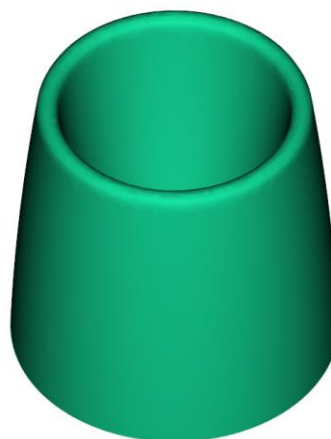
Material	Stanje	Trdota	Natezna trdnost [MPa]	Meja plastičnosti [MPa]	Raztezek [%]	Toplotna prevodnost [W/m°C]
1.2709 - EOS MS1	natiskano	33 - 37 HRC	1100±100	1050 ± 100	10 ± 4	15 ± 0.8
	starano	50 - 56 HRC	2050±100	1990 ± 100	4 ± 2	20 ± 1
2.0921- CuAl8	navarjeno	80-100 HB	390-450	185-200	25-40	65

6 Konstruktivna zasnova plastičnega izdelka in orodnih vložkov

Z uporabo programskega paketa Autodesk Moldflow Insight so bile izvedene simulacije hlajenja brizganih izdelkov kompleksnih geometrij, ki nam omogočajo vpogled v proces in se uporabljajo v fazi konceptualne zasnove izdelka ter konstrukcije orodja. Pri izbiri in modeliranju izdelka, ter posledično konstruiranju orodnih oblikovnih vložkov, smo stremeli predvsem k skrajševanju cikla brizganja, kar je mogoče doseči z uporabo konformnih hladilnih kanalov in obliko izdelka, ki jo s konvencionalnimi tehnologijami izdelave orodij ne dosežemo. Kočni zasnovni dizajn izdelka predstavlja kozarec z dvojnim dnom, kjer kritično mesto hlajenja predstavlja zgornji rob končnega izdelka. Zasnovni modeli izdelka, orodja in orodnih vložkov, konstruirani v programu CAD Solidworks, so prikazani na sledečih slikah.



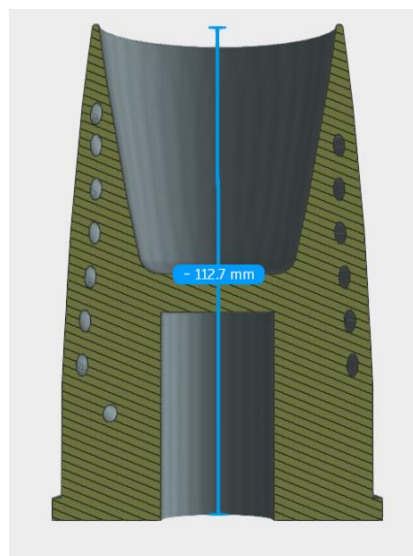
Slika 2. Konstrukcija orodja za brizganje plastike



Slika 3. Končni brizgani izdelek



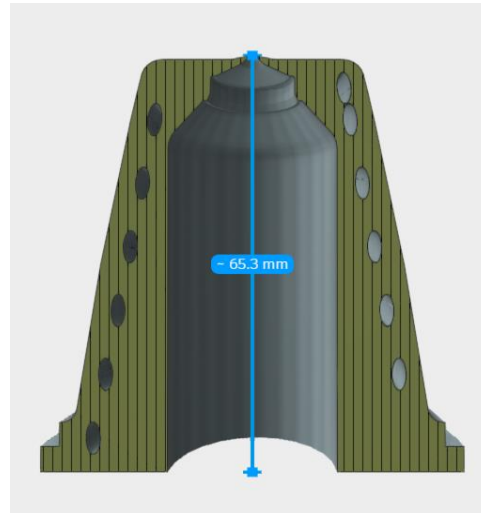
Slika 4. Izmetalna stran orodnega vložka



Slika 5. Izmetalna stran orodnega vložka



Slika 6. Brizgalna stran orodnega vložka



Slika 7. Brizgalna stran orodnega vložka

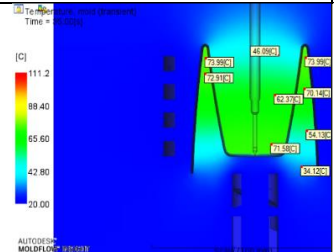
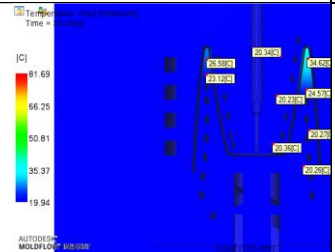
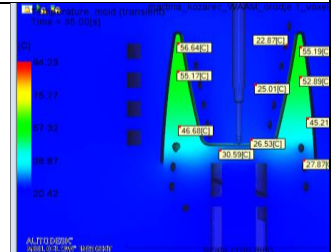
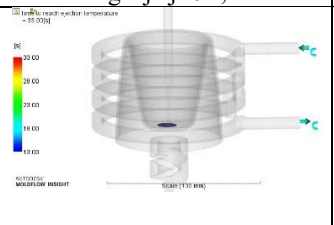
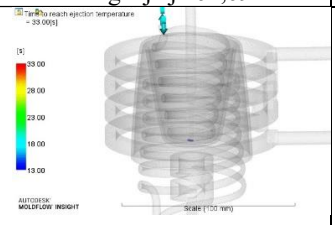
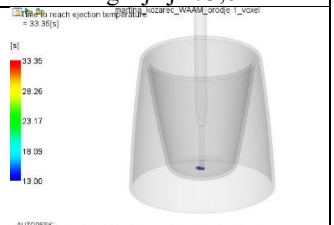
7 Simulacije hlajenja med procesom brizganja

Hladilni sistem v orodju sestavljajo vzporedno in zaporedno vezani kanali skozi katere teče vodni medij. Postavitev hladilnih kanalov je odvisna od oblike izdelka. Pogosto težko zagotovimo enakomeren toplotni tok v vseh delih orodja, zato prihaja do zvijanja izdelka, vpadnih mest itd. Kritična so lahko ozka jedra, ki pri kratkih časih odprtega orodja in neučinkovitem ohlajanju dosežejo temperaturo izmetavanja izdelka. Posledica je podaljšan cikel ali celo ustavitev proizvodnje. Kljub temu, da v projektu RRP5 razvijamo orodne vložke, ki so izdelani po novih naprednih dodajnih tehnologijah (SLM in WAAM) in tako omogočajo tudi izdelavo zahtevnejšega konformnega hlajenja, smo za primerjavo izdelali tudi simulacije klasičnega hladilnega sistema (Tabela 2).

Za primer klasičnega hlajenja je po zunanji obliki izdelka speljana hladilna zanka z zaporednimi kanali, ki skrbi za odvajanje toplote iz sten kosa. Hibridni orodni vložki in vložki v celoti izdelani s tehnologijo SLM vsebujejo elemente konformnega hlajenja – kanale po konturni obliki izdelka integrirane v izmetalno in brizgalno stran orodnega vložka.

Z računalniškimi simulacijami smo primerjali temperaturno obremenitev orodnih vložkov, pri čemer je zaželeno, da je razporeditev temperaturnega polja po površini orodja čimbolj enakomerna. Ciklične termične obremenitve med procesom brizganja namreč povzročajo tako termično kot tudi mehansko utrujanje orodnih vložkov. Neenakomerna temperatura orodnih votlin se lahko posledično odraža v prelitju ali sprijemanju taline, neželenega zvijanja in estetskih napak izdelk po izmetu. Rezultati primerjalnih simulacij med tremi različnimi sistemi hlajenja so prikazani v Tabeli 2.

Tabela 2. Rezultati analize simulacij brizganja pri uporabi orodnih vložkov izdelanih s tremi različnimi tehnologijami izdelave

Klasično hlajenje	Konformno hlajenje - SLM	Konformno hlajenje – SLM/WAAM
		
Maksimalna temperaturna razlika v orodju skozi celoten cikel brizganja je 91,2°C.	Maksimalna temperaturna razlika v orodju skozi celoten cikel brizganja je 61,69°C.	Maksimalna temperaturna razlika v orodju skozi celoten cikel brizganja je 73,81°C.
		
Izdelek se lahko izmeče po času 13 sekund.	Izdelek se lahko izmeče po času 9 sekund, tehnološki cikel se skrajša za 30,1 %.	Izdelek se lahko izmeče po času 11 sekund, tehnološki cikel se skrajša za 15,3 %.

Temperaturne razlike na zunanjih stenah orodja so največje v primeru vložka izdelanega po konvencionalni CNC metodi, kjer konformnega hlajenja ni mogoče zagotoviti. Enakomerneje se temperatura porazdeli po površini orodnih votlin pri vložkih izdelanih po hibridni tehnologiji SLM/WAAM, najmanjše temperaturne razlike na zunanjih stenah orodnih vložkov pa so bile zaznane pri orodnih sistemih izdelanih s tehnologijo SLM. Enakomernejša razporeditev temperaturnega polja in nižje temperature na zunanjih stenah orodnih vložkov, poleg znižanih termičnih obremenitev pomenijo tudi večji prihranek pri času izmeta izdelka iz orodja. V primerjavi s konvencionalno izdelanimi orodnimi vložki, se tehnološki cikel pri hibridnih multi-materialnih orodnih vložkih zmanjša za 15,3 %, pri 3D tiskanih z metodo SLM pa za kar 30,1 %. Poleg večje produktivnosti ima hitrejšo odvajanje toplote iz brizganega izdelka vpliv tudi na znižan pojav zaostalih napetosti in posledično večjo geometrijsko stabilnost brizganih izdelkov. Hkrati slednje pripomore tudi k estetsko kvalitetnejšem končnem izdelku; pri prozornih materialih lahko pri neenakomernem ohlajanju namreč pride do pojava mavrice.

8 Izdelava orodnih vložkov

V zunanjo-partnerskem sodelovanju s podjetjem Marsi smo na stroju EOSINT M280 iz prahu jekla maraging EOS MS1 izdelali 2 prototipna orodna vložka za brizganje plastike. 3D modele orodnih vložkov zmodeliranih v programu Solidworks, smo pretvorili iz STEP v STL datoteko in uvozili v program Materialize Magics, kjer lahko pozicioniramo in orientiramo model ter po potrebi določimo izdelavo podpornih struktur. Pozicioniran model smo uvozili v program proizvajalca stroja za tisk – EOSPRINT, kjer smo glede na vhodni material izbrali skupino

parametrov tiska, ki so že optimalno nastavljeni, glede na hitrost izdelave, željene končne mehanske lastnosti in stanje površine. Parametri kot so debelina sloja, širina območja taljenja, moč in hitrost laserja, se tekom tiska spreminjajo. Datoteko z modelom in določenimi parametri tiska smo uvozili na 3D tiskalnik, kjer se po doseženih zahtevanih pogojih, kot sta inertna atmosfera v komori in temperatura delovne površine, prične s tiskanjem. Po končanem tisku smo z uporabo žične erozije odstranili orodna dela iz delovne plošče. S pomočjo komprimiranega zraka smo iz konformnih kanalov odstranili ves nestaljen prah. Sledila je toplotna obdelava – staranje 6 ur na 530 °C za doseg ustreznosti trdote - 54 HRc. Po toplotni obdelavi se je še mehansko obdelalo površino z brušenjem in finim poliranjem. Končani orodni vložki so prikazani na Sliki 8.



Slika 8. Orodni vložki izdelani s tehnologijo SLM po končani obdelavi

Za proces oblikovnega obločnega navarjanja smo uporabili varilnega robota, ki je na voljo v Laboratoriju za varjenje na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani. Sistem je sestavljen iz 6 osnega robota ABB in varilnega vira Fronius CMT. Pri programiranju navarjanja na steno lončka smo pripravili trajektorijo za gibanje gorilnika v programskem okolju SprutCAM. Simulacija gibanja gorilnika v realnem okolju je predvidela težave pri gibanju robota zaradi težko dostopnih mest za robotsko roko. Težavo smo skušali rešiti s spremenjenim naklonom gorilnika, vendar se je izkazalo, da določenih mest gorilnik ne doseže, zato smo izdelek prestavili v ležeči položaj ter pripravili trajektorijo gibanja gorilnika za navarjanje po segmentih. Orodni vložek brizgalne strani je bil na ta način uspešno izdelan. Oblikovni vložek iz metalne strani pa smo navarjali na varilnem robotu pri čemer smo uporabili tudi zunanjo rotacijsko os, ki ni bila sinhronizirana z varilnim robotom. Pri varjenju tega vložka je prišlo do deformacije navarjenih plasti. To napako smo odkrili pri mehanski obdelavi vložka, kjer je bil del izdelka uspešno navarjen, na določenih mestih pa je prišlo do pomanjkanja materiala. Ta vložek bomo v naslednji fazi dodelali, tako da bomo na manjkajoča mesta navarili dodatno plast materiala. Po tej fazi ne pričakujemo dodatnih napak na izdelku. Orodni vložki so bili z naknadnimi mehanskimi obdelavami dodelani na končno mero in so prikazani na Sliki 9. Parametri postopka WAAM so podani v Tabeli 3.

Tabela 3. Parametri oblikovnega obločnega navarjanja z žico iz aluminijevega bronca

	Izmetalna stran orodnega vložka	Brizgalna stran orodnega vložka
Dodajni material	Žica CuAl8 ϕ 1mm	
Zaščitni plin	100% Argon	
Varilni program	CMT	
Varilni tok	75 A	105 A
Pretok plina	14 l/m	15 l/min

Medvarkovna temperatura	250°C	100°C
-------------------------	-------	-------



Slika 9. Hibridni multi-materialni orodni vložki izdelani s tehnologijama SLM/WAAM po končani fini obdelavi

9 Zaključek

Z dosedanjim delom smo pridobili vpogled v omejitve in prednosti dodatnih tehnologij kot sta selektivno lasersko taljenje in oblikovno obločno navarjanje z žico. Glavna prednost tehnologije SLM je v skoraj neomejenih možnostih modeliranja komponent orodij. Izdelamo lahko orodje s poljubnimi hladilnimi kanali ali optimiziramo volumen in težo z vpeljavo notranjih struktur, ki nadomestijo masivni volumen. Tehnologijo WAAM omejuje ločljivost postopka in za manjše dimenzije, kjer je potrebna velika natančnost, ni primerna, omogoča pa izdelavo hibridnih in multi-materialnih izdelkov. Veliko izzivov nam je pri tej tehnologiji predstavljalo vodenje robota in s tem obvladljivost postopka. Z vpeljavo konformnih hladilnih kanalov smo izboljšali učinek hlajenja in tako skrajšali cikel brizganja ter povečali produktivnost procesa.

V nadaljnjih aktivnostih smo se odločili za optimizacijo zunanega orodnega vložka, pri čemer masivni volumen nadomešča mrežna satirana struktura. Z vpeljavo notranjih struktur predvidevamo manjšo porabo materiala in boljše toplotne razmere. Vse prototipne orodne vložke čaka še spremljanje in ocena obrabe pri večcikličnem brizganju, s čimer se bodo razvojne aktivnosti zaključile.

Reference

- [1] Glojek A., Podpečan B., Kočar A., & Žepič Bogataj, V. (2018). Orodja za brizganje – konvencionalno in konformno hlajenje. *IRT3000*, 5, 164-166.
- [2] Mikelj, A. (2017). *Postopek robotiziranega navarjanja po plasteh in frezanja aluminijeve zlitine AlSi5* (magistrsko delo). Ljubljana.
- [3] Metalcor GmbH. (2019, 30. januar). Pridobljeno na <http://www.metalcor.de/en/datenblatt/139/>
- [4] EOS. (2019, 30. januar). Pridobljeno na <https://www.eos.info/material-m>

Era digitalnega marketinga

The digital marketing era

Darko ŠTEVANČEC¹, Mitja KOŠAK², Iris FINK GRUBAČEVIĆ³

^{1,3}*Fakulteta za industrijski inženiring Novo mesto
Šegova ulica 112, 8000 Novo mesto, Slovenija*

E-naslovi: darko.stevancec@fini-unm.si, iris.finkgrubacevic@fini-unm.si

²*Solos d.o.o.*

Dunajska cesta 114, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-naslov: mitja.kosak@solos.si

Povzetek. *Obstoj podjetja v današnjem času je odvisen od poznavanja vedenja potrošnikov, kajti rast in preživetje podjetij omogočajo le-ti. Čeprav se je v prejšnjem stoletju znanost o teorijah vedenja ljudi najbolj razvila in na tem področju ta dognanja še držijo, so vplivi na potrošnika v zadnjem času, zaradi novih tehnologij, izjemno veliki. Internet in socialna omrežja danes vplivajo na potrošnika tako močno, da si danes ne predstavljamo podjetja, ki se tem tehnologijam zaradi težnje po večjem obvladovanju trga, še ni priključilo. Zaradi navedenih dejstev je nakupno vedenje v povezavi z novejšimi internetnimi storitvami postalo predmet intenzivnega raziskovanja po vsem svetu. V nadaljevanju članka predstavljamo najpomembnejše rezultate raziskave nakupnega vedenja in uporabe socialnih omrežij, narejene na vzorcu slovenskih respondentov.*

Ključne besede: *vedenje potrošnikov, potrošnik, internet, socialna omrežja, Facebook*

Razvrstitev: *Strokovni članek*

Abstract. *Nowadays, any company existence depends on knowledge of consumer behaviour because consumers are the one that enables the growth and survival of companies. Although in the previous century the field of human behaviour theories was most developed and most of the findings are still considered true, the impact on the consumer has been extremely high in recent years due to new technologies. Internet and social networks affect the consumer so strongly that today we cannot imagine a company that would still resist using these technologies. Due to these facts, consumer behaviour in connection with newer internet services has become a subject of intensive research all around the world. In the article we present the most important results of a research on consumer behaviour and the use of social networks, made on a sample of Slovenian respondents.*

Keywords: *consumer behavior, consumer, internet, social networks, Facebook*

Article Classification: *Professional Paper*

1 Uvod

Odkar je leta 1980 nastal pojem »web« ali poslovenjeno spleto, se je poleg revolucionarnih sprememb posameznikove eksistence, ki jih je spleto prinesel, radikalno spreminjalo tudi klasično »kotlerjansko« razumevanje trženja.[1] Sodobno proučevanje potrošnika zajema vede, ki proučujejo človeka kot posameznika s psihološkega vidika, po drugi strani pa imamo sociološki vpogled v polje marketinga, to je družbo, ki jo potrošniki sestavljajo.

2 Digitalni marketing in socialna omrežja

Internet je postal pomemben del realnosti na vseh področjih človekove eksistence. Nekomu ponuja informativne vire, drugi se z njegovo pomočjo povezuje v skupino, marsikdo ga uporablja za zabavo ali izobraževanje, podjetja pa ga uporabljajo kot nosilca spletnih orodij tržnega komuniciranja. Kot so že leta 1997 opozarjali Barua, Ravindran in Whinston [2] je obiskovanje spletnih strani prodajalcev izdelkov mnogo lažje kot fizični obisk prodajaln, vendar pa je po drugi strani potrebno upoštevati tudi stroške spletnega iskanja, kot so preverjanje resničnosti podatkov, preverjanje kredibilnosti prodajalcev itd. V Sloveniji je trženje s pomočjo novih spletnih komunikacijskih kanalov, v primerjavi s klasičnimi marketinškimi kanali, kot so televizija, radio ter tiskani mediji, relativno poceni in hitro. Vendar pa orodja digitalnega marketinga pri nas še vedno ne dosegajo rezultatov uspešnosti dražjih, klasičnih medijev. Na drugi strani pa je opazno prisoten trend rasti vpliva internetnih medijev v Združenih državah Amerike, ki se počasi seli tudi v države EU. Tako na primer vpliv spletnega medija na nakupe oblačil pri mlajši populaciji potrošnikov v Ameriki krepko presega vpliv klasičnega kanala – televizije. [3]

2.1 Socialna omrežja

Programi oziroma aplikacije, ki na spletu medsebojno povezujejo ljudi, se imenujejo socialna omrežja. Definicije socialnih omrežij so različne. Skoraj vse pa omenjajo socialna omrežja kot komunikacijski kanal, ki združuje ljudi na kakršni koli osnovi in v kateri koli obliki. Socialna omrežja nam omogočajo izmenjavo različnih vsebin, skupinsko interakcijo in medsebojno sodelovanje. Danes se omenja več kot 60 različnih oblik socialnih omrežij [4]. Njihova uporaba po celem svetu konstantno narašča iz leta v leto [5]. Najpogostejše aktivnosti uporabnikov socialnih omrežij so izmenjavanje sporočil, igranje igrice, sodelovanje v forumih in članstvo v interesnih skupinah. Te skupine so lahko zaprte ali javne, formalne ali neformalne. Lahko se omejujejo z dogovorom, pripadnostjo ali plačljivim članstvom. Posameznik z ustvarjanjem profila na socialnem omrežju kreira svojo vzporedno osebo, ki samostojno zaživi v virtualnem svetu. Ustvarjena je povsem nova entiteta, često tudi fiktivna, ki jo predstavlja posameznikov profil na družbenem omrežju. Z novo entiteto se poveže v paralelni svet realnosti, socialno omrežje.

Socialna omrežja so predmet družboslovnega proučevanja zaradi številnih razlogov, kot so na primer problemi zasvojenosti z uporabo omrežij, izguba identitete posameznika, siljenje posameznika v nov, njemu tuj življenjski stil in podobno. Z marketinškega aspekta pa so socialna omrežja koristno orodje vplivanja na potrošnike, saj na primer z uporabo t. i. context managementa [6] lahko ugotovimo skoraj vse preference in želje uporabnika ter mu usmerjeno ponujamo vsebine ali oglase, ki preverjeno vplivajo na njegove nakupne odločitve. Socialna omrežja se razlikujejo po svojem nastanku in poslovnem modelu, ki jim je omogočil rast in preživetje [7]. Večini modelov je skupno, da s spoznavanjem življenjskih navad in analizo vzorcev vedenja uporabnikov pridobivajo ključne informacije, ki jih potrebujejo prodajalci za lažjo pot do svojih ciljnih skupin. Zato se socialna omrežja uporabljajo na več načinov in z več nameni. HubSpot [8] kot eno vodilnih podjetij na področju Inbound marketinga kot razlog za vključitev socialnih omrežij v aktivno delovanje v marketinškem spletu navaja predvsem prednosti v poznavanju kupcev, poslušanju, prepoznavanju vzorcev in gradnji odnosa. Socialno omrežje omogoča takojšnjo dvosmerno komunikacijo in povezavo s svojimi kupci. Nadaljnje ciljno usmerjeno oglaševanje omogoča doseganje novih kupcev. Podatki z blogov in socialnih omrežij podjetjem olajšujejo poslovne odločitve. Najobičajnejši način uporabe je preverjanje kupcevih stališč in mnenj o novih produktih in storitvah.

Socialna omrežja podjetjem ponujajo še dodatno uporabno funkcijo digitalnega marketinga. S sistemi, podobnimi običajnim iskalnikom vsebin (npr. Google), se lahko z optimizacijo vsebine pritegne na prodajne spletne strani podjetja dodatne kupce. Z upravljanjem vsebin se

izboljšuje uvrščanje v iskalnikih. Višje je pozicioniran ponujen odgovor na vprašanje v iskalniku, več je možnosti, da uporabnik izbere prav to spletno povezavo. SEO (search engine optimization) pomeni, da se vsebine na spletnih straneh, blogih in v objavah v socialnih medijih spreminjajo in prilagajajo tako, da bi jih iskalniki postavili kot najbolj relevanten odgovor na neko vprašanje. CTR je kratica za »click-through rate«. CTR predstavlja število klikov, ki jih npr. prejme oglas ali izbor na iskalnikih. Pove nam, koliko uporabnikov je izbralo neko ponujeno možnost, ne pove pa, ali se je uporabnik tam zadržal ali dobil odgovor. Socialna omrežja delujejo tudi kot **CRM** (customer relationship management) upravljanje kupcev. [9] Skupina kupcev, ki se jih lahko neposredno nagovarja je skupina uporabnikov, zbrana na osnovi pripadnosti neki blagovni znamki.

3 Metodologija raziskave

Za raziskavo smo uporabili neslučajnostni namenski vzorec. Vključenih je bilo skupaj 260 oseb, od tega 54 % moških in 46 % žensk. Starost anketirancev je bila od 15 do 55 let. Anketiranje se je izvedlo s pomočjo spletne strani Ika, ki omogoča spletno anketiranje respondentov.

Kot merski instrument smo uporabili anketni vprašalnik s sedemstopenjskimi modificiranimi Likertovimi lestvicami, kjer je pomenila ocena 1=čisto nič in ocena 7=povsem.

Sklopi različnih vprašanj so preverjali različna stališča respondentov do spletnega nakupovanja ter izraženost različnih dejavnikov vpliva na nakupne odločitve:

- Načini uporabe in percepcija koristnosti interneta
- Vpliv različnih socialnih omrežij na zadnji nakup
- Višina vrednosti nakupa, ki ima za posledico iskanje informacij na spletu
- Informacije o različnih vrstah izdelkov, ki se preverjajo na spletu.
- Podatke smo obdelali s statističnim programom IBM SPSS Statistics 19.

4 Rezultati

Na začetku poglavja predstavljamo najpomembnejše rezultate testiranja razlik med različnimi skupinami respondentov glede na število kontaktov v različnih socialnih omrežjih in razlike med različnimi skupinami respondentov glede na pripadnost različnim interesnim skupinam. Razlike med skupinami smo testirali z enosmerno analizo varianc (ANOVA), ob predhodnem preverjanju homogenosti varianc med skupinami z Levenovim testom.

Ugotovljene statistično pomembne razlike med uporabniki socialnih omrežij glede na skupno število kontaktov v socialnih omrežjih so naslednje: člani različnih socialnih omrežij se glede na število kontaktov, ki so jih tam ustvarili, medsebojno razlikujejo v aktivnosti rabe interneta nasploh, pri zaupanju v tiskane medije, vplivu različnih socialnih omrežij na njihov zadnji nakup, odločanju za nakup oblačil in kozmetičnih izdelkov ter zbiranju informacij karierni narave (služba, podjetje, šola, izobraževanje).

Članstvo v različnih interesnih skupinah, enako kot število ustvarjenih kontaktov, pomembno razlikuje respondente v intenzivnosti rabe interneta nasploh, vplivu socialnih omrežij na zadnji nakup, zbiranju informacij o tekstilnih in kozmetičnih izdelkih ter kariernih interesih. Poleg tega članstvo v interesnih skupinah razlikuje respondente tudi v percepciji uporabnosti tiskanih medijev.

Večje število kontaktov in pripadnost več interesnim skupinam pomeni večjo moč vplivanja na nakupno vedenje pri udeležencih socialnega omrežja.

V nadaljevanju predstavljamo rezultate multivariantne analize glavnih komponent - PCA faktorske analize na primeru namere nakupa novega kolesa. (10).

Tabela 1. Nakupna namera nakupa kolesa, PCA faktorskih uteži (rotirana)
Rotated Component Matrixa [10]

	Component		
	1	2	3
Proizvajalec	.867	,053	,161
Blagovna znamka	.861	-,038	,147
Tehnične lastnosti	.661	,410	-,21
Na socialnih omrežjih preberem mnenja in priporočila tudi od neznancev	,043	.788	,140
Priporočilu kontaktov na soc. omrežjih zaupam bolj kot spletnim stranem prodajalcev	-,084	.724	,367
Pred nakupom preberem nasvet neodvisnega strokovnjaka	,309	.548	,121
Cena	,526	.534	-,17
Kolo ocenim bolje, če ga uporablja znana oseba ali športnik	,157	,087	.753
Kolesa, ki ga ne uporablja nihče od mojih kontaktov, verjetno ne bom kupil	-,085	,141	.725
Kolo ocenim bolje, če ga uporablja kdo od prijateljev	,410	,291	.450

Z rotirano matriko smo dobili tri komponente nakupne namere:

1. »*Lastnosti izdelka*« je komponenta, ki združuje proizvajalca, blagovno znamko in tehnične lastnosti.
2. »*Priporočilo*« je komponenta, ki pove, da uporabniki, ki imajo nakupno namero, hkrati:
 - na socialnih omrežjih preberejo mnenja in priporočila tudi od neznanih uporabnikov,
 - priporočilu kontaktov neznanih ljudi na socialnih omrežjih zaupajo bolj kot spletnim stranem prodajalcev,
 - pred nakupom preberejo nasvet neodvisnega strokovnjaka in
 - razmišljajo o ceni izdelka.
3. Komponenta »*Posnemanje*« povezuje vpliv prijateljev, znanih oseb in športnikov:
 - kolo ocenim bolje, če ga uporablja znana oseba ali športnik,
 - kolesa, ki ga ne uporablja nihče od mojih kontaktov, verjetno ne bom kupil,
 - kolo ocenim bolje, če ga uporablja kdo od prijateljev.

V tabeli 2 so prikazani deleži regresijskega modela 2, kjer se pojasnjuje vsaka izmed treh glavnih komponent faktorskega modela z dodanimi elementi vpliva socialnih omrežij.

Tabela 2. Delež skupne pojasnjene variance posamezne faktorske komponente [10]

Odvisna spremenljivka: dimenzija nakupne namere	Pojasnenost modela
Komponenta »Lastnosti izdelka« Proizvajalec, blagovna znamka in tehnične lastnosti	24,8 %
Komponenta »Priporočilo« Cena, vpliv socialnih omrežij in neodvisnih strokovnjakov	36,4 %
Komponenta »Posnemanje« Kolo uporabljajo znane osebe, športniki, prijatelji in kontakti.	22,2 %

Največji delež skupne variance pojasnjuje ekstrahirana komponenta "Priporočilo", ki zajema iskanje nasvetov, upoštevanje priporočil ter informiranje o ceni izdelka in indicira večji vpliv na nakupno namero od percepcije lastnosti izdelka ali posnemanja drugih uporabnikov spleta.

5 Diskusija in zaključek

Naši rezultati nakazujejo ugotovitev, da se tudi podjetjem v Sloveniji splača investirati v spletne projekte, spletne predstavitve in svoje profile na socialnih omrežjih. Predvsem v primerih prodaje tekstilnih in kozmetičnih izdelkov lahko napor podjetja z ustvarjanjem interesne skupine na socialnem omrežju direktno pripomorejo k vplivanju na stališča in vedenje svojih kupcev. Prav tako imajo lepo priložnost uporabe marketinških orodij socialnih omrežij tudi ponudniki izobraževalnih in drugih storitev, povezanih s kariero posameznika. Ugotovili smo, da število kontaktov in pripadnost več interesnim skupinam pomeni tudi več moči vplivanja. Nadaljnja prednost uporabe socialnih omrežij kot orodja sodobnega časa je tudi uporaba priporočila kot sredstva vplivanja na uporabnika. Klasično trženje s pomočjo komunikacijskih kanalov, kot so televizija, radio ali tiskani mediji, vplivajo na uporabnike s predstavljanjem lastnosti izdelkov ali posnemanjem (mnemjski voditelji), mnogo težje pa je s temi mediji ustvarjati priporočila kupcem. Tudi iz tega razloga klasični oglaševalski mediji posegajo po spletnih orodjih digitalnega marketinga. Lahko zaključimo, da kljub določenim pomanjkljivostim, ki jih digitalni marketing še vedno vsebuje, predstavlja potencialno prihodnost sodobnega trženja, seveda ob lastnem in tudi silovitem vzporednem tehnološkem razvoju spletnih aplikacij.

Reference

- [1] Kotler, P. (2009). Marketing Management - Trženjsko upravljanje. Ljubljana.
- [2] Wind, J., & Mahajan, V. (2001). Digital Marketing: Global Strategies from the World's Leading Experts, Wind Publishing and Sons. New York.
- [3] Klemenčič, B., Devetak, G., & Števančec, D. (2012). Intercultural Differences in the Purchase and Information Behaviour of Young Consumers. *Organizacija*, 45 (1), 14-23.
- [4] MakeAWebsiteHub.com (2019, 1. marec). Pridobljeno na <https://makeawebsitehub.com/social-media-sites/>
- [5] Internet World Stats. (2019, 1. marec). Pridobljeno na <http://www.internetworldstats.com/stats4.htm#europe>
- [6] HubSpot, Inc. (2019). Pridobljeno na <https://blog.hubspot.com/marketing/what-is-digital-marketing>
- [7] Smart Insight. (2016). Pridobljeno na <http://www.smartinsights.com/digital-marketing-strategy/popular-social-networks-worldwide-chartoftheday>
- [8] HubSpot, Inc. (2016). Pridobljeno na <https://app.hubspot.com/social/1379309/monitoring/1751328>
- [9] Musek, J., & Lešnik, K. (2008). Psihologija potrošnikov - Programi zvestobe in sorodne CRM strategije. Ljubljana: IPSOS.
- [10] Košak, M. (2016). *Vedenje potrošnikov pod vplivom internet in socialnih omrežij* (magistrsko delo). Gea College, Ljubljana.

www.fini-unm.si