

Fakulteta za
industrijski inženiring
Faculty of Industrial Engineering

**Pametne specializacije, podjetništvo,
inovacije ter človeški viri**

**Specialisations, Entrepreneurship,
Innovation, and Human Resources**

***Zbornik znanstvenih prispevkov
Conference Proceedings Scientific Papers***



Fakulteta za
industrijski inženiring
Faculty of Industrial Engineering

Pametne specializacije, podjetništvo,
inovacije ter človeški viri

Specialisations, Entrepreneurship,
Innovation, and Human Resources

Zbornik znanstvenih prispevkov | Conference
Proceedings Scientific Papers

Novo mesto, 2017

Zbornik znanstvenih prispevkov | Conference Proceedings Scientific Papers

Pametne specializacije, podjetništvo, inovacije ter človeški viri | Specialisations, Entrepreneurship, Innovation, and Human Resources

Uredila | Editor-in-Chief: doc. dr. Urška Florjančič

Uredniški odbor | Editorial Board: doc. dr. Anatolij Nikonov, prof. dr. Julius Kaplunov, mag. Iris Fink Grubačević, doc. dr. Urška Florjančič

Avtorji (po abecednem vrstnem redu): Matej Fike, Urška Florjančič, Igor Fürstner, Marko Gazvoda, Gorazd Hren, Imre Kovács, Tomaž Jurejevčič, Mitja Muhič, Sašo Murtič, Anatolij Nikonov, Marko Pezdevšek, Igor Plazl, Zdravko Praunseis, Marica Prijanovič Tonkovič, Valentina Rebec, Róbert Sánta, Tomaž Savšek, Jernej Slanovec.

Recenzenti | Reviewers: zasl. prof. dr. Jože Vižintin, prof. dr. Rudolf Pušenjak, doc. dr. Anatolij Nikonov, doc. dr. Urška Florjančič

Založnik | Publisher

Fakulteta za industrijski inženiring Novo mesto | Faculty of Industrial Engineering Novo mesto

Kraj | Place: Šegova ulica 112, Novo mesto

Leto izida | Year: 2017

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=292514048

ISBN 978-961-94246-1-2 (pdf)

Kazalo | Table of Contents

Uvodnik.....	1
Preface <i>doc. dr. Anatolij Nikonov, prof. dr. Julius Kaplunov, mag. Iris Fink Grubačević, doc. dr. Urška Florjančič</i>	
O konferenci.....	2
About conference <i>Jože Vižintin</i>	
PLENARNA PREDAVANJA PLENARY LECTURES	
Escalation Practices in Automotive Development	3
<i>Tomaž Jurejevčič and Jernej Slanovec</i>	
Razvoj avtomatizirane vožnje	15
Automated Driving Development <i>Tomaž Savšek</i>	
TRAJNOSTNE TEHNOLOGIJE SUSTAINABLE TECHNOLOGIES	
Processing of Synthetic Fuels by Nanoalloy Catalysts	30
<i>Imre Kovács</i>	
Določitev optimalnega dolivnega sistema v orodju za brizganje polimerov.....	39
Determining Optimum Feeding System in Tools for Splashing Polymers <i>Marko Gazvoda and Marica Prijanovič Tonkovič</i>	
DEJAVNIKI KONKURENČNOSTI COMPETITIVE ADVANTAGE FACTORS	
Multimodalni logistični center Novo mesto v fokusu gospodarstva Slovenije, osrednje in jugovzhodne Evrope.....	47
The Multimodal Logistical Center Novo mesto Focusing on the Economy of Slovenia for Central and South Eastern Europe <i>Sašo Murtič</i>	
RAZISKAVE, RAZVOJ, INOVACIJE RESEARCH, DEVELOPMENT, INNOVATION	
Razpoke zaradi toplotnega utrujanja na orodjih za tlačno litje aluminijevih zlitin	62
Thermal Fatigue Cracks on Aluminum Alloys Die Casting dies <i>Mitja Muhič</i>	
Krhki lom in odklon razpoke v heterogenih zvarih jeklenih rezervoarjev	75
Brittle Fracture and Crack Path Deviation at Heterogeneous Steel Welds of Storage Tanks <i>Zdravko Praunseis</i>	
Comparison of a Single-Stage Cycle Heat-Pump and a Single-Stage Cycle Heat Pump with Internal Exchangers.....	87
<i>Róbert Sánta and Igor Fürstner</i>	

Navidezna resničnost in hitra izdelava prototipov v pedagoško raziskovalnem procesu na Fakulteti za Energetiko.....	95
VR and RP in engineering education and research process at Faculty of Energy Technology <i>Gorazd Hren, Marko Pezdevšek in Matej Fike</i>	
Primerjava tlačnih izgub v kotlovskih delilnikih.....	102
Comparison of pressure losses in boiler manifolds <i>Matej Fike and Marko Pezdevšek</i>	
Vpliv polnila pri 3D tiskanju na upogibno trdnost.....	111
Effect of Infill Density of 3D Printing on Flexural Strength <i>Marko Pezdevšek, Matej Fike in Gorazd Hren</i>	
Preučevanje stabilnosti strukture polisaharidov z reološkimi metodami	119
Rheological Examination of Polysaccharide Structure Stability <i>Valentina Rebec, Igor Plazl, Urška Florjančič in Anatolij Nikonov</i>	

Uvodnik

Preface

Zasebni visokošolski zavod Fakulteta za industrijski inženiring Novo mesto je nastal na pobudo gospodarstva JV Slovenije in njegovih jasno izraženih potreb in trendov razvoja. JV Slovenija ima tipično industrijski značaj in je vodilna po dodani vrednosti na zaposlenega. V tej regiji je prisotna industrijska tradicija in trend razvojnega potenciala z velikim deležem inovativnosti. Fakulteta izvaja na 1. bolonjski stopnji dodiplomski visokošolski strokovni in univerzitetni študijski program »Inženiring in vozila« ter na 2. in 3. bolonjski stopnji podiplomski magistrski in doktorski študijski program »Inženiring in avtomobilska industrija«. Poslanstvo FINI Novo mesto je izvajanje inovativnih študijskih programov za izobraževanje v skladu z aktualnimi potrebami gospodarstva in negospodarstva na področju zahtevnih tehniških dejavnosti v nacionalnem in evropskem okolju. V izobraževalni proces in prakso fakulteta prenaša rezultate znanstveno raziskovalnega in strokovnega dela ter na ta način zagotavlja razvoj družbe s prenosom lastnega in globalnega znanja. Delovanje je usmerjeno v zagotavljanje visoke kakovosti in svobode ustvarjalnosti.

Fakulteta v sodelovanju s podjetji razvija znanja prihodnosti kot so nove tehnologije, umetna inteligenca, računalniško integrirana proizvodnja, sočasni inženiring, reinženiring in inovacije ter celovita kakovost in poslovna odličnost, obenem pa preko akreditiranih študijskih programov zagotavlja pridobivanje teh znanj in uporabo sodobnih laboratorijev za materiale, tehnologije, motorna vozila in informatiko, uporabo informacijskih tehnologij v izobraževanju, sodobno literaturo in mednarodno povezavo s sorodnimi institucijami v svetu.

Naša fakulteta je letos spomladi pripravila 2. mednarodno znanstveno konferenco o razvoju industrijskega inženiringa. Dogodka so se udeležili številni priznani domači in tuji strokovnjaki iz gospodarstva, univerz, visokošolskih zavodov, inštitutov in druga strokovna javnost, npr. Keele University, Velika Britanija; Univerza Dunajvaros, Madžarska; Univerza v Mariboru in Univerza v Ljubljani; TPV d.o.o., Novo mesto; Hella Saturnus Slovenija d.o.o., Ljubljana; Tomplast d.o.o.; "Enzo Ferrari" Engineering Department Università di Modena e Reggio Emilia via Vignolese, Modena, Italija; Alpineon d.o.o., Inštitut za kovinske materiale in tehnologije ter IBM Slovenija, d.o.o.

Želeli in uspeli smo uveljaviti prakso znanstvenih konferenc s poudarkom na sodelovanju gospodarstva, raziskovalnih in visokošolskih institucij z namenom, da lahko sledimo potrebam trga dela, inovacij, gospodarskega razvoja, konkurenčnosti gospodarstva in posledično pametne specializacije. Program z udeleženci 2. konference kaže povezanost fakultete z gospodarstvom, inštitucijami in mednarodnim okoljem. Tako kot gospodarski subjekti se tudi mi zavedamo, da smo del globalnega okolja, v katerem smo lahko uspešni le s sodelovanjem in v konkurenci z najboljšimi. Rdeča nit konference je bila vloga Industrije 4.0 in doprinos le-te k uspehom Slovenije na globalnem trgu s povezanostjo univerz, raziskovalnih inštitutov ter gospodarskih družb in dejstvo, da so inženirji ključni za razvojno-inovacijske procese. Vključevanje inženirjev v najrazličnejša področja človekovega delovanja bo Sloveniji zagotovilo boljši položaj v svetu.

doc. dr. Anatolij Nikonov, prof. dr. Julius Kaplunov, mag. Iris Fink Grubačević, doc. dr. Urška Florjančič

Uredniški odbor | Editorial Board

O konferenci

About conference

V organizaciji Fakultete za industrijski inženiring Novo Mesto in v sodelovanju z Gospodarsko zbornico Dolenjske in Bele Krajine je bila 19. aprila 2017 na posestvu Pule 2. mednarodna konferenca z naslovom »Razvoj industrijskega inženiringa«. Namen konference je bil odpreti sproščen dialog med akademsko sfero in podjetniki Dolenjske regije ter ostalih delov države Slovenije. Vsebina konference je obsegala pregled dejavnosti na področju pametne specializacije, podjetništva, inovacij ter človeških virov. Na konferenci je bilo predstavljenih devet plenarnih predavanj. Akademsko sfera je predstavila dve predavanji, tri predavanja so prispevali predstavniki inštitutov, ostala štiri predavanja pa so predstavili kolegi iz industrije. Tematika plenarnih predavanj se je dotikala vsebinske usmeritve konference z mogoče rahlim poudarkom na inovacijah, industriji 4.0 in digitalizaciji v industriji. Po plenarnih predavanjih je sledila okrogla miza, na kateri so udeleženci v sproščenem pogovoru razpravljali o vsebinah predstavljenih plenarnih predavanj, s poudarkom na problemih s katerimi se srečujejo pri delu v vsakdanji praksi. Ob tem je treba poudariti, da je bila diskusija zelo živahna. Iz razprave so udeleženci lahko izluščili veliko novih spoznanj in predlogov za nadaljnje delo. Po odmoru sta sledili še dve sekciji s skupno desetimi predavanji. Obe sekciji je zaznamovala odprta diskusija o reševanju odprtih problemov iz neposredne industrijske prakse in nekaj prikazov, kako mladi raziskovalci pristopajo k raziskovalnemu delu na domačih in tujih univerzah. Na konferenci so sodelovali tudi predstavniki univerz iz Anglije, Rusije in Madžarske. Konferenca se je končala v sproščenem pogovoru ob ogledu posterske sekcije v restavraciji posestva Pule.

The Faculty of Industrial Engineering Novo Mesto in cooperation with the Chamber of Commerce Dolenjske and Bele Krajine organized on April 19, 2017 at Estate Pule its 2nd International Scientific Conference on the Development of Industrial Engineering. The purpose of the conference was to open a dialogue between academia and entrepreneurs of the Dolenjska region and other parts of Slovenia. The content of the conference included an overview of the activities in the field of Smart Specialization, Entrepreneurship, Innovation and Human Resources. The conference invited nine plenary lectures. The academic sphere was represented with two lectures, three lectures were presented by colleagues from institutes, and four lectures by colleagues from industry. The themes of the plenary lectures touched on the substantive policy of the conference with a slight emphasis on innovation, Industry 4.0 and digitization in industries. After the plenary lectures, a round table was conducted on the topics presented with an emphasis on the problems encountered of daily work practice. The discussions were very lively and from the discussions the participants were given new insights and proposals for further work. After the break two additional sessions followed with a total of ten lectures. Both sections were marked by open discussion on solving open problems of direct industrial practices and some impressions of how young researchers come to the research work at domestic and foreign universities. At the conference representatives of universities from England, Russia and Hungary also participated. The conference ended in a relaxed conversation during the poster session in the restaurant of Estate Pula.

prof. dr. Jože Vižintin

Predsednik programskega odbora | President of the Programming Committee

ESCALATION PRACTICES IN AUTOMOTIVE DEVELOPMENT

Tomaž Jurejevčič*

Hella Saturnus Slovenija d.o.o., Letališka 17, 1000, Ljubljana, Slovenija
tomaz.jurejevcic@hella.com

Jernej Slanovec

Hella Saturnus Slovenija d.o.o., Letališka 17, 1000, Ljubljana, Slovenija
jernej.slanovec@hella.com

ABSTRACT

Purpose: In automotive industry many risk-involved situations occur and when detected, an escalation process takes place. Although defined and controlled by process guidelines and being supported by experts, escalation brings increased emotional pressure and stress for parties involved. The purpose of the article is to present status of escalation processes and gaps between theory and practice cases. Results of the analysis are recommendations of good engineering practice derived also from actual experiences and learned lessons.

Design/Methodology/Approach: The method of analysis involves practical cases from automotive development process, lessons learned, anonymous survey of automotive engineers and classification of experiences.

Results: Results of the survey have shown that the controlled escalation process for know-how related escalations is needed to establish the environment where the team is able to provide new, sometimes unconventional ideas for the problem to be solved

Findings: Recommendations of good engineering practices and measures are derived that enable organization and managers to put the expertise and experiences of employees into action for problem solving during escalation.

Research limitations: The research was performed on rather limited sample of automotive engineers employed by one organization which might be influenced by particular organizational behavior/practice.

Practical implications and contributions: The impact on society and environment can be seen through influence of findings to the official/ formal educational process where students can be acquainted with the latest challenges from the engineering practice. In this way graduates can be better prepared for the onboarding process after finishing their studies.

Originality/Value: In this paper some practices are presented that, although simple and some seen already, with proper adjustment stemming from real life processes give a fruitful settlement of escalations in automotive development business.

Keywords: escalation process, stress, lessons learned, supplier chain, automotive development.

* Corresponding author

1 Introduction

1.1 Competitive business environment

Traditionally engineering was always highly creative activity that tried to give answers and solutions to various technical and construction problems. From early days of engineering those answers are always expected to be final, correct, long-term reliable and in terms of the targeted products, successful both from technical and economy aspects.

At the beginning of automotive era the development time and resources were more flexible, especially for first-of-kind products. Lead times have been longer and more capacity to finish the job was available. Engineers were more versatile in terms of their knowledge about products and technologies. They had gotten experienced in more comfortable way because processes were slower hence there was time to re-think critical steps and process decisions.

Today however the development activities in automotive industry are executed as projects, that are organized within design & development network, formed by one or more companies acting in supply chain. Due to the project nature of development activities today we are faced both with technical know-how challenges as well as capacity- and resources related challenges.

1.2 Risk of over- and under-engineering

In past 30 years information technologies intensified development & production processes and the market has become highly competitive environment where the risk of project with negative technical and economical results increased and represents a factor of survival for the company. A failure mode that is not assumed during product development phase but can happen during product lifetime represents a constant risk for a financial collapse of the company.

Threats mentioned can yield a working environment where the engineers are put under extreme pressure and stress. The consequence can be:

- On one hand that engineers are forced to design a product to the limit of its performance capability hence product tends to fail at higher failure rates.
- On other hand that, instead of taking advantage from the fine-tuned balance between performance capabilities and operating boundary conditions, engineers don't dare to design the product to its limits. Products are thus becoming over-engineered hence in time due to non-optimized product costs the company can become non-profitable.

Both risks can produce states where engineering organization is faced with the crisis at product development or at production processes being resolved through escalation process.

2 Theoretical framework

2.1 Definition and classification of escalations

When open issue at the project is detected then countermeasures are planned and introduced. If measures are not successful then additional management tool is used – the escalation process. During escalation additional pressure is applied from the (internal- or external) customer towards the (internal- or external) supplier to resolve the issue as soon as possible.

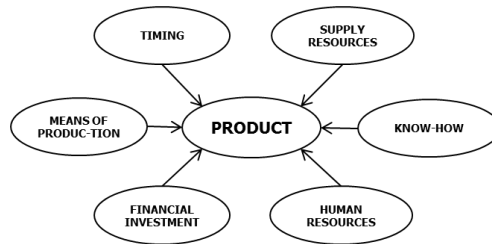


Figure 1. Resources – when short then possible reasons for escalation

We can distinguish among several types of escalations, Figure 1, but for automotive the two most important would have been:

- A. Escalation based on deviation from planned activities during development – name it “resource escalation”, Figure 2.
- B. Escalation based on unplanned events during product design and especially during production process – name it “know-how escalation”, Figure 2.

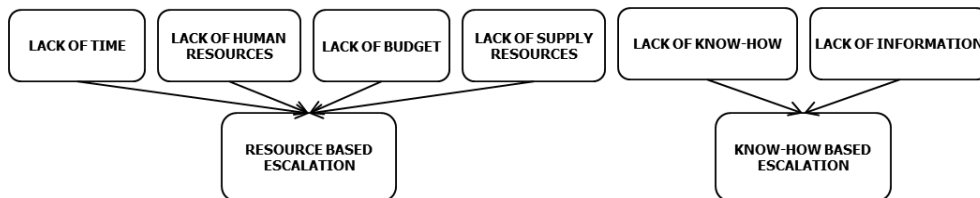


Figure 2. Types of escalations

The first type - resource escalation – arises typically when there is lack of resources on the project – either we are talking about:

- human resources needed to do additional tasks or
- financial budget to cover extra expenses on the project or
- too short time available to accomplish planned tasks or non-planned extra tasks.

The second type – know-how escalation – takes place when a non-planned event occurs, e.g.:

- After production ramp-up of new product a series failure occurs at the beginning of product operation, or
- during the DVP&R (Design Verification Plan and Report) testing and verification phase results are negative, meaning the product does not fulfill customer specifications.

At know-how escalation the fundamental root-cause is lack of information or/and lack of know-how. Both are also basic conditions to be fulfilled for the solution to be found.

2.2 Escalation as problem solving in production process

The majority of escalations in production process deal with problem of resources – therefore it is more of resource-type and less of know-how-type.

In general the target of escalation is the introduction of the problem solving process, Figure 3, using tools like DMAIC, PDCA, 8D-report.

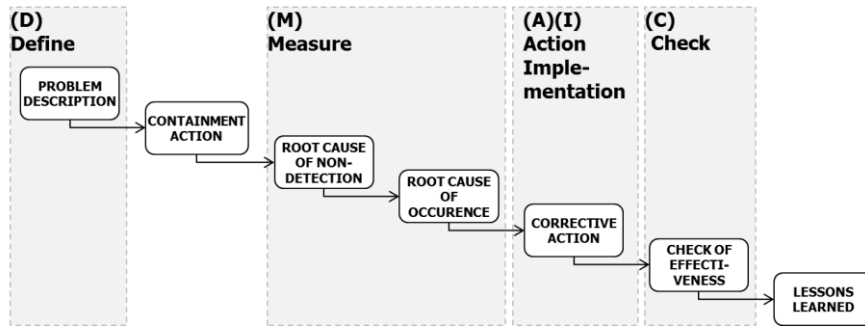


Figure 3. Waterfall diagram of escalation problem solving process. (ISO/TS 16949:2002: PDCA, p.x)

Problem solving is structured in the waterfall diagram, Figure 3. The corresponding control questions suggest that the process is structured in V-model, Figure 4. One can also consider an underlying set of mind flows (e.g. “from ‘What?’ to ‘Why?’”, etc.) as levels of purpose at particular maturity of escalation process.

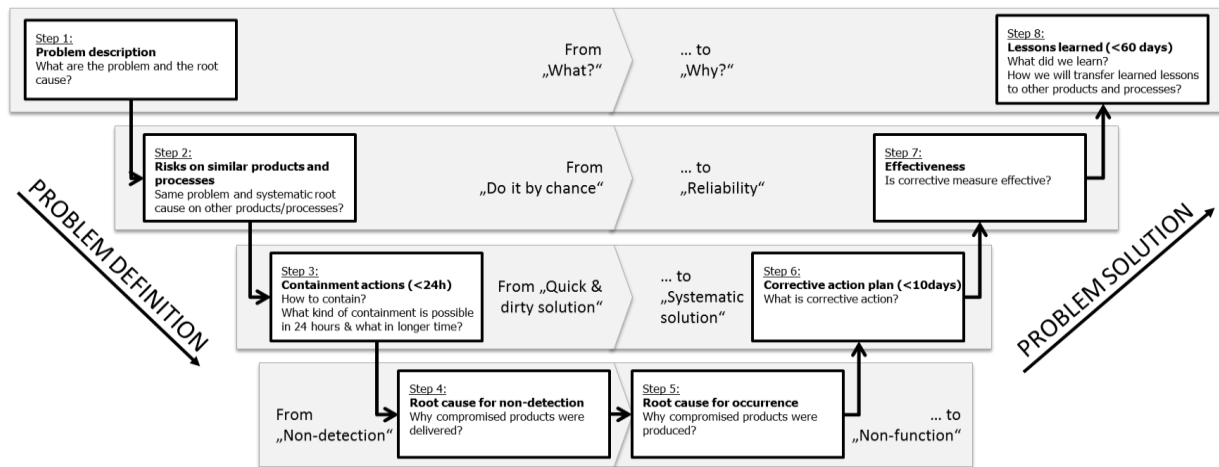


Figure 4. Escalation problem solving steps compared to the V-model (<https://en.wikipedia.org/wiki/V-Model>)

The escalation process is defined by *guidelines* and *norms* (Swift 2015) (Vorest AG, 2014) (ISO/TS 16949:2002(E), pp.28 - 30) mainly for the production processes. There are several levels of production process escalations in case of flaws detected:

- Level E0, **Standard process** - special 100% inspection of deliveries for 1-month.
- Level E1, **Intensified process** - corrective measures must be fulfilled to downgrade the level from E1 to E0.
- Level E2, **Warning** - corrective measures and additional customer conditions must be fulfilled to downgrade the level E2 to E1.
- Level E3, **New Business Hold (NBH)** - supplier is temporarily blocked for new business and exit criteria must be fulfilled to be removed from NBH.
- Level E4, **Disqualification** – exclusion of supplier from supplier base.

Typically as a consequence of escalation process the supplier management is involved in order to assure more resources, shorten lead-time and discuss with the customer exit conditions on proper managing levels.

3 Method

In order to check various aspects of escalations an anonymous survey was executed at automotive Tier-1 supplier where 189 potential respondents were asked to answer the survey. The survey consisted of 20 questions with predefined answers (from 6 to 9 answers per question possible) in order to get normalized response database for later analysis.

The method of this analysis was implemented using following survey inquiries:

- (i) To understand the age, educational background, level of experiences of respondents several questions were raised, like:
 - How old are you? How many years you are working at the company?
 - What is your position in company's organization?
- (ii) To understand the working pressure and the handling of daily stress of respondents several questions were raised like:
 - How often do you experience escalations at development projects?
 - How do you feel and how are you acting when escalation happens? Is your thinking ability and creativity influenced by the escalation pressure? Does stress represent positive or negative stimulation for you?
 - What do you do first when customer escalates the issue (claim, concern)? Who do you ask for help and support when escalation happens?
 - Whom would you rather have as a teammate: young good educated colleague (potentially less experience) or matured professional with long-term experiences (potentially less theoretical background)? What is more important during escalation: good relationship with the customer or good theoretical background?

4 Results

4.1 Survey results

The survey lasted 5 working days and out of 189 addressed respondents 72 of them (38%) have given feedbacks. Some of the results are presented in Figure 5 and Figure 6.

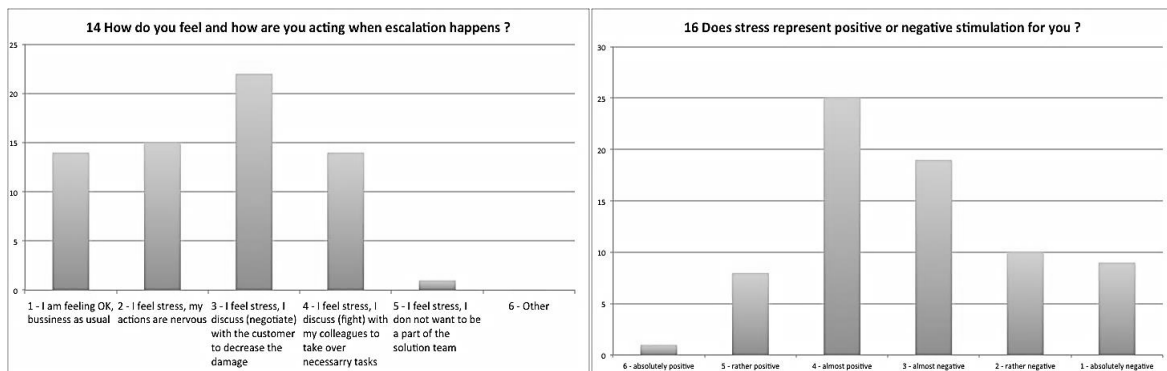


Figure 5. Relationship between escalation and stress: it seems that for the respondents the escalation causes stress that in approx. 70% cases is a challenging experience and if subjected to stress 53% of respondents feel it as rather negative experience

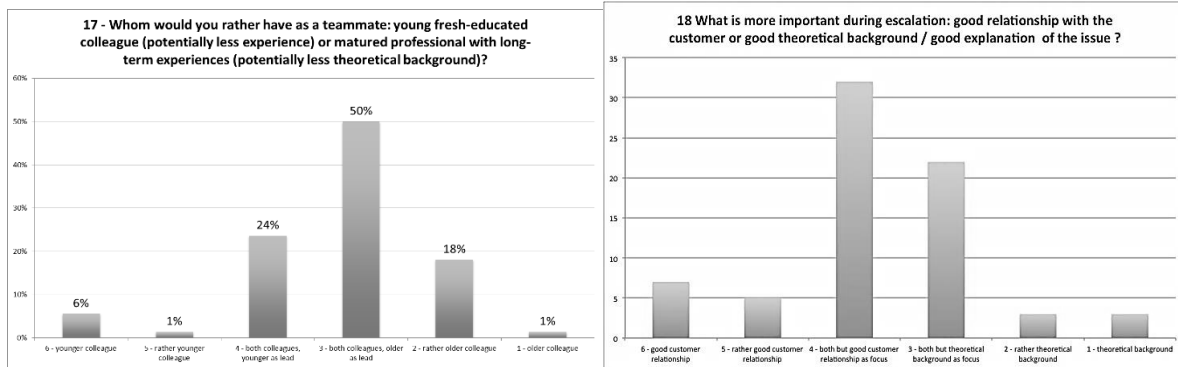


Figure 6. Relationship between theoretical background, experiences and customer relationships: the respondents rely slightly more on experiences and good relationship with customer than on good theoretical background

4.2 Escalation as problem solving in development process

4.2.1 Development process deliverables and escalation type

Compared to production processes also during design and industrialization development phases many risk-involved situations can produce an escalation. Similar to escalations in production also this escalation process must have root-cause analysis and corrective actions.

So far the automotive escalation process seems to be declared and defined in detailed way. But looking at second glance we can see that definition is aimed mainly to the production processes. Why? The answer lies within the fact that the production process differs from the development process in terms of deliverables and their quantities. For example:

- When dealing with automotive production process then parts are normally produced in large series. When faced with issues, the principles of statistical analysis can be applied. Based on that analysis one can find and deal with root causes, introduce corrective measures and track the effects of corrective measure implementation, Figure 7.
- But when dealing with design process then we are talking about one-of-kind deliverable, represented as a set of technical data, drawings and technical documents, that define information base for the related tools and production technologies yet to be developed. When here faced with an issue one cannot get solution using statistical approach. There are no quantities where statistics would enable steering toward solution, Figure 7.

For later example the know-how is essential. Therefore it can be concluded that in development the know-how escalation takes place more often than resource escalation.

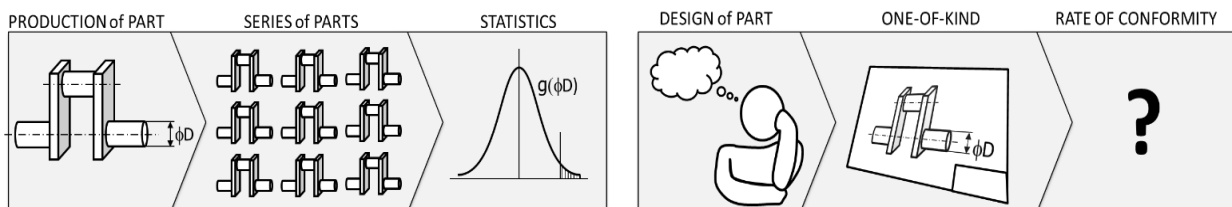


Figure 7. The difference between production process deliverables and design process deliverables in terms of measure of success / conformity

This has been proven with the results of the survey with answers to the question "What is by your opinion the most often root cause for escalations during product's development phases?". Answers on

Fig. 8 show that the cause with highest vote of 24% was "hidden errors at the product due to improper design (concept, maturity)". The second most probable cause (22%) was "improper quality of developed products due to lack of proper formal agreements with the customer..." which also reflects lack of information and know-how.

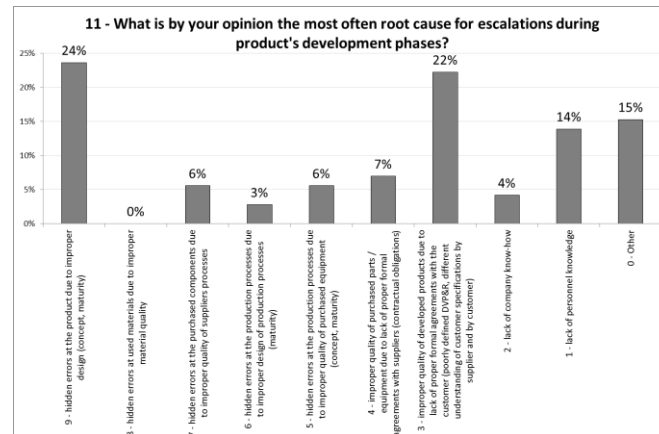


Fig. 8 Root causes for escalations in design phases

4.2.2 Experiences as performing factor in escalation process

The escalation process in development phase relies on definitions valid for escalations in production which do not comply perfectly with the nature of development process. Although such escalation process is defined by process guidelines and being supported by technical experts, it still brings increased emotional pressure and stress for the parties involved.

There are several methods and theories (Swift, 2015, p.1; Vorest AG, 2014, p.1; DMAICTools, 2016, p.1) on how to handle critical situation in the development teams. There are many customer guidelines for suppliers (Schaeffler, 2015, pp.1-3; VOSS Automotive Group, 2014, pp.12-14; Faurecia, 2013, pp.25-30) that describe requirements of escalation and step-out of escalation. But a methodology about how to maintain the resulting pressure during escalation and how to use energy and ideas in best way to find solution is rare. Majority of recommendations are considering organizational aspects of the situation during escalation but few of them could offer reliable path toward the resolution using the technical expertise and experiences of involved personnel.

We know however that during every team set-up four significant phases happen: forming, storming, norming and performing phase, Figure 9. Let us check how escalation process can be casted into those phases in order to recognize significance of experiences and know-how to manage escalations. For involved project team-members the escalation represents even more workload pressure and stress compared to the ordinary problem solving. What happens?

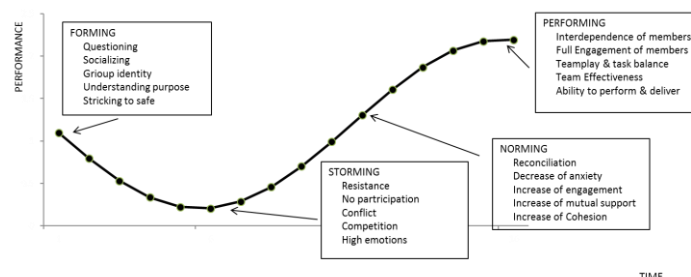


Figure 9. Development phases of project team as performing resource

The first reaction on customer escalation message is team forming phase. If organization has escalation process defined and people are skilled they try to follow those process guidelines where team is defined and conceptual roadmap toward solution is explained.

Beside regular problem-solving which typically consist of solving of technical problems, the team must also assure information flow toward customers and toward management stakeholders. This communication tends to become difficult therefore the level of stress at team-members is even increased, their working time dedicated to problem solving is reduced and due to this we might end-up with higher costs and longer lead-times.

Escalation is not normal mode of operations hence the involved people are mentally and emotionally challenged. An instant seek of way out is induced by higher level of adrenaline and people react instinctively saving them against disaster. It is a storming phase.

It is evident that for successful development process results it is necessary to save developers from high level of negative stress and keep them in good mental condition. In order to do this, a controlled escalation process should be introduced also for know-how related escalations.

It is very important that in the team there are (senior) colleagues with lots of expert experiences. They can suggest proper steps while searching for the solution, they are helpful with their broad professional network when seeking the expert information and in psychological aspect they can act as pillars of stability within the team. This has been proven with the survey answers to the question "Whom would you rather have as a teammate: young fresh-educated colleague (potentially less experience) or matured professional with long-term experiences" where the highest score (50%) gets the answer "both colleagues, older as lead" and second highest scored answer (24%) was "both colleagues, younger as lead", Figure 6.

A controlled escalation process for know-how related escalations represent the environment where the team can provide new, maybe unconventional ideas for the problem to be solved. In this way the chances for fast and successful resolution of the problem are higher and the crisis can be brought in a controlled way to successful end. All these influences happen normally within norming and performing phases.

5 Discussion

5.1 Stress factor during escalation process

As mentioned the breakthrough should be done within the norming phase of the team lifetime. In order to do that it is important for the team to understand what is happening on rational and on emotional level of cooperation. Generally during escalation certain psychological pressure exists which can be intensive – the team-members need to perform in an excellent way under very challenging conditions - to list just few of them:

- Short or zero timing for execution of needed activities.
- Need to control several activities running in parallel.
- Regular / daily cross-examinations from customer side.
- Customer demand to present solution in person at the customer location.
- Customer demand to provide interim solution with high level of confidence.
- Customer demand to provide final solution with ultimate level of confidence.
- Lack of proper information and know-how.

- Lack of internal and external resources (availability of production, materials & stock).
- Lack of budget.
- Lack of stakeholder's (management) support, etc.

All these conditions represent at the same time the levers used by the customer (and sometimes suppliers) to push the team to provide the solution in zero time.

Team members with organizational- and especially with customer relationship experiences are extremely important here. They are able to steer the discussion with the customer in a way to calm down the situation hence enabling the rest of the team to start thinking without burden of stress in order to provide new ideas for interim- and final solution of the problem.

5.2 Development escalation process and measures

In order that problem is maintained in fast and efficient way the escalation must be handled as process where necessary steps and actions take place. The following principles and measures are recommended when organizing escalation in development as a controlled process:

- **Principle 1:** after information that something went wrong the immediate reaction is necessary! For the one who got the information no delay is allowed and no weekend off-line mode is acceptable, no excuse for passive approach should be accepted. He/she must immediately raise the voice and escalate the issue within own organizational structure.
- **Principle 2:** Top management must be informed about the escalation accordingly and must provide full support for organization of escalation process with corrective actions.
- **Principle 3:** All relevant experts from different fields should be summoned and delegated/ nominated by stakeholders (management) to the Task force team (TF).
- **Principle 4:** The leader of the Task force team is nominated. He must be awarded will full authority and power for decision making within the scope of escalation.
- **Principle 5:** Team Room (War Room, Large Room, Obeya – Toyota Production System) should be organized as physical location where Task force team meets or is located. For the team to work and exchange information with working environment and customer the Team Room should have all necessary infrastructure, e.g. mail access, phone line, telecon equipment, overhead projector, computer, whiteboards, pinboards, flipcharts, digital photo camera, scanner, printer, enough electrical power plugs, extension cables, cabinet/rack for keeping of samples and prototypes, accessories for marking of samples (pens, markers, etc.), brainstorming accessories (pens, markers, pins, Post-it, glue, tapes, cardboards, paper sheets, etc.), furniture (desk, chairs), Cafeteria/ refreshment corner.
- **Principle 6:** Immediate systematic work of the TF team must be organized and scheduled.

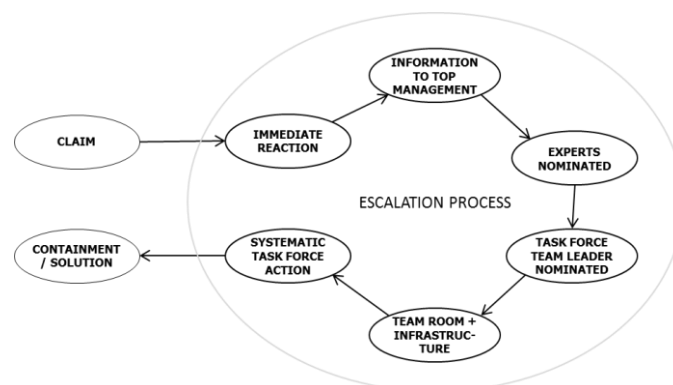


Figure 10. Development escalation process – workflow

Activities that should be systematically executed when escalation happens are:

- Each information contents must be declared with additional data like source of information, time of collection. Information should be presented at one spot (e.g. whiteboard, pin-board, common folder on file server, common database, etc.) where they can be further classified / clustered. For clustering of information different approach should be used, e.g. clustering according to expert areas or clustering according to geographical locations of sources.
- When Task Force team members are nominated they must be at the same time released from other tasks - what should be assured by their line-managers.
- Kick-off meeting must be organized, Task force team and all stakeholders have to attend.
- Regular meetings must be scheduled (daily) – it is very important that the team meets at regularly scheduled routines in order to keep strong focus to tasks and to react on changed circumstances instantly.
- Team meeting must be clearly structured – it must have fixed agenda with clear reporter names, meeting coordinating person and List of open points (LOP).
- Information and communication channels with the customer as well as with important suppliers must be established. Customer relationships can be established both on formal level and also on informal, personal level. At later, the relationships are more informal and it is likely that also unofficial information that is important for problem solving (e.g. details about particular claim or failure mode) can be acquired from customer.
- The suppliers and customers can be involved in technical discussions. With this we are acting as partner dealing with customer in transparent way which is beneficial for increase of trust at the customer side. During this activity it is important that every team member understands the level of transparency that is appropriate to particular external party at given moment. It must not be the case that two or more team-members are communicating about the same issue with one external party unless otherwise agreed upon.
- Before communication to the customer / supplier (by emails, with official statements) it is essential to align in the team about standpoint and wording of the message.
- Supporting environment must be established (extended team), e.g. simulation engineering support, laboratory support, purchasing and sales support, production technology support, maintenance support, prototyping support, engineering design support, etc. Some of the experts from this extended supporting environment can be also members of the TF team.
- The rest of organization should be informed that the regular daily tasks of the TF team-members will be delayed or even cancelled, therefore the escalation might have a negative impact also on their projects.
- Every small step toward successful resolution of the problem must be a reason for celebration. With this approach we keep high level of team-members' motivation. Every team-member must get full support and trust from other team-members. It is essential that the team takes special care for integrity of its team-members, in order that if things go completely wrong the team disintegration does not occur (e.g. mutual accusations between team-members). The later situation can occur due to high negative stress levels, where the cause is fundamental one: the fear against loss of personal careers.
- After successful solution of the problem the technical lessons-learned workshop must be organized in order to collect new know-how and implemented technical ideas, which should be included into FMEA master model.
- After the solution also lessons learned workshop about the organization of escalation must be organized in order to collect experiences and provide facts-feedback throughout organization and

to management. The most valuable contributors must be rewarded by management. Successful resolution of crisis must be celebrated within the team.

- At the end of escalation the Task force team should be formally disengaged by stakeholder decision upon final report on executed actions and solution of escalation.

In order to maintain escalation process successfully those principles should be considered in the company quality system in escalation process guideline.

6 Conclusion

As summary we can conclude that escalation types are important for solution approach selection. To distinguish escalation types it is important to understand boundary conditions and requirement scope of particular escalation. Generally only two major types of escalation occur in automotive: resource escalations and know-how escalations.

Solving of resource type of escalations is relatively easy because it only requires management to approve additionally needed capacities and resources. However solving of know-how type of escalations is more complex because one should find and implement expert knowledge or in worst case where there is no knowledge available, one must generate new ideas and know-how. Moreover the generation of new know-how must be done in zero time frame. How?

The ordinary approach of involvement of higher management does not help a lot. Generally one must rely on usage of new ideas generation methods like brainstorming, and afterwards supported by functional checking of rapid prototyped products. For this kind of escalation activities one must have available personnel that is professionally trained for coordination of escalations and for communication with the customer. Research has showed that experienced personnel is therefore of crucial importance for efficient steering toward solution: 69% of respondents trust more to “matured professional with long-term experiences”, Figure 6.

To successfully maintain escalation process important principles should be respected and must be considered in the process guidelines that are essential to management and organization of the company. Escalation process must have ultimate priority compared to other activities in the organization. All other processes must be de-prioritized or even put to the ice during escalation period. The best people must be engaged and proper team must be nominated to the task-force team. Budgeting and other resources must be assigned to escalation process and management must follow-up progress of escalation continuously until the final solution of the crisis.

The research was rather limited to the sample from local environment not including the intercompany aspects and international base of respondents. As potential further research opportunity the collection, assessment and classification of know-how resulting from organization lessons-learned sessions should be considered.

References

1. ISO/TS 16949:2002(E) (2002) - Quality Management System - Particular requirements for the application of ISO 9001:2000 for automotive production and relevant service part organizations for the Automotive Industry,

2. Paul Swift, BeyondLean.com, (2015), *Lean Six Sigma Green Belt Training*, Retrieved from <http://www.beyondlean.com/lean-six-sigma-green-belt-training.html>
3. Six Sigma-Mehr Wissen, Vorest AG, (2013-2014), *Der DMAIC-Zyklus im Überblick*, Retrieved from http://www.six-sigma.me/six_sigma_dmaic_zyklus/
4. DMAICTools.com, (2016), *Define, Measure, Analyze, Improve, Control (New!)*, Retrieved from <https://www.dmaictools.com/>
5. Schaeffler, (2015), QAA with Production Material Suppliers, Escalation process, Retrieved from http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/12_suppliers/quality/quality_assurance_agreement__qaa_/special_agreement/S_296001-6_Escalation_Process.doc
6. VOSS Automotive Group, (2014), *Supplier quality guideline* (Issue 02.06.2014 Rev00), Retrieved from http://www.voss.de/files/auto_400_downloads/Lieferantenrichtlinie_EN_Rev00_20140717.pdf
7. Faurecia, Supplier requirements manual (2013), Retrieved from http://www.faurecia.com/files/media/site_com_corporate/Suppliers/documents/FAURECIA_SUPPLIER_REQUIREMENTS_MANUAL.pdf
8. Epinephrine, Retrieved from <https://en.wikipedia.org/wiki/Epinephrine>
9. Tomaž Jurejevčič, *Escalation practices in Automotive Development*, RUO, december 2016, letnik 5, številka 4, Retrieved from <http://www.fos.unm.si/si/dejavnosti/zaloznistvo/?v=ejue>
10. Wikipedia, *V-Model*, Retrieved from <https://en.wikipedia.org/wiki/V-Model>

Tomaž Jurejevčič, finished his postgraduate studies in mechanical engineering at the Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, had been 10 years employed at University of Ljubljana, last 18 years he works in industry. He works at Hella group for the last 15 years where he has been so far at several leading positions in development. He is now Head of Technical center at Hella Saturnus Slovenia. In last 3 years he has cooperated with Faculty of Industrial Engineering. He is author or co-author of several articles both from the field of automotive development methods, organization and automotive quality. Complete bibliography available at <http://splet02.izum.si/cobiss/BibPersonal.jsp?init=t&code=&type=conor> (researcher's code: 10108).

Jernej Slanovec, graduated in Natural Science at University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics, and holds a Master's degree in Solid State Physics. He worked as a basic research engineer in electricity metering industry, and later in automotive industry as a simulation engineer. For the last 9 years he has been working at Hella Saturnus Slovenia where he is now Head of Simulation department. His areas of technical expertise include CAE, heat transfer and magnetism along with broad general knowledge about automotive lighting industry. Bibliography is available at <http://izumbib.izum.si/bibliografije/Y20170416160122-26005.html> (researcher's code 26005).

RAZVOJ AVTOMATIZIRANE VOŽNJE

AUTOMATED DRIVING DEVELOPMENT

Tomaž Savšek*

TPV d.o.o., Kandijska cesta 60, 8000, Novo mesto, Slovenija
t.savsek@tpv.si

POVZETEK

V članku bomo osvetlili začetke avtomatizirane vožnje ter evropsko pobudo za razvoj inteligentnega vozila. Predstavili bomo avtomatizirano vožnjo kot eno od ključnih področij razvoja cestne mobilnosti. Osvetlili bomo družbene izzive, pregledali glavne dejavnike in cilje razvoja ter poti uvajanja avtomatizirane vožnje. Posebej bomo predstavili pot razvoja avtomatiziranih osebnih vozil in pot razvoja avtomatiziranih gospodarskih vozil. Poti razvoja osebnih vozil in gospodarskih vozil bodo zaokrožili s sistemi v urbanem okolju, ki bodo v bodočnosti omogočali avtomatizirano vožnjo. Že danes so v vozilih vgrajeni sistemi, ki presegajo in dopolnjujejo človekove sposobnosti. Od tu bomo skozi članek gradili razvojno pot vse do leta 2030, ko se predvidevajo aplikacije že povsem avtonomnih vozil v cestnem prometu. Zaključili bomo s skupno vizijo in predstavili različne vidike uvajanja tovrstnih sistemov v cestno mobilnost.

Ključne besede: avtomatizirana vožnja, cestna mobilnost, urbano okolje, razvojna pot.

ABSTRACT

The article will highlight the beginnings of automated driving and a European initiative for the development of intelligent vehicles. We will introduce automated driving as one of the key areas for the development of road mobility. We will discuss societal challenges; review the main factors and goals of the development and introduction of automated driving roadmaps. We will present the development of automated passenger cars and the way of the development of automated commercial vehicles. Paths of the development of passenger cars and commercial vehicles will complement the systems in an urban environment, which will in future enable automated driving. We will finish with a shared vision on automated driving in road mobility until 2030.

Keywords: automated driving, road mobility, urban, development roadmap.

* Predavatelj in nosilec predmetov Avtomobilizem (I. st.), Informacijski in elektronski nadzorni sistemi v vozilih (II. st.) ter Inteligentni sistemi za vodenje - krmiljenje naprav in avtomobilov (III. st.) na FINI Novo mesto.

1 Uvod

Leta 2006 je Evropska Komisija spodbudila usmerjene raziskave na področju razvoja inteligentnih vozil (Reding, 2006). Kaj je spodbudilo te raziskave in čemu so potrebne?

V državah članicah EU je približno 300 milijonov voznikov avtomobilov, ki bi si radi olajšali vožnjo, z manj težavami na poti, manj zamudami ter manj možnostmi za nesreče in poškodbe. Od vseh naših dnevnih aktivnosti je ravno vožnja v cestnem prometu tista, ki lahko naše celotno življenje spremeni v trenutku ali ga zaradi prometne nesreče celo konča. Pobuda Inteligentni avtomobil je poskus, da se premaknemo v novo okolje, ko vozila ne bodo megla več trčiti, in ko se bodo prometni zastoji drastično zmanjšali.

Onesnaževanje okolja, varnost v prometu in zastoji so resnični evropski problemi, ki vplivajo na vse evropske države, zato je najti skupne rešitve. Poleg tega, je uvajanje že obstoječih sicer zelo kvalitetnih inteligentnih sistemov, ki temeljijo na informacijskih in komunikacijskih tehnologijah (IKT), na trg zelo počasno.

Pobuda Komisije za razvoj inteligentnih avtomobilov je odgovor na potrebe državljanov, industrije in držav članic, da bi rešila družbene probleme povezane s prometom ter izboljšala uporabo IKT. To je tudi glavno sporočilo strategije i2010, ki je eno od treh vodilnih pobud, ki kažejo, kako evropska raziskovalna in politika na področju IKT spodbuja inovacije.

2 Družbeni izzivi za avtomatizirano vožnjo

Namen strategije i2010 je spodbuditi razvoj inteligentnih avtomobilov, ki bodo prispevali k reševanju naslednjih družbenih izzivov, vezanih na transport (Reding, 2006, Minarini, 2010):

1. *učinkovitejša raba goriv* z boljšim upravljanjem vozil in prometa;
2. *povečanje varnosti*, zmanjšanje števila smrtnih žrtev in poškodovanih na cestah s pravočasnim opozarjanjem voznika na nevarnosti;
3. *zmanjševanje zastojev* z vsestranskim povečanjem učinkovitosti prometnih sistemov.

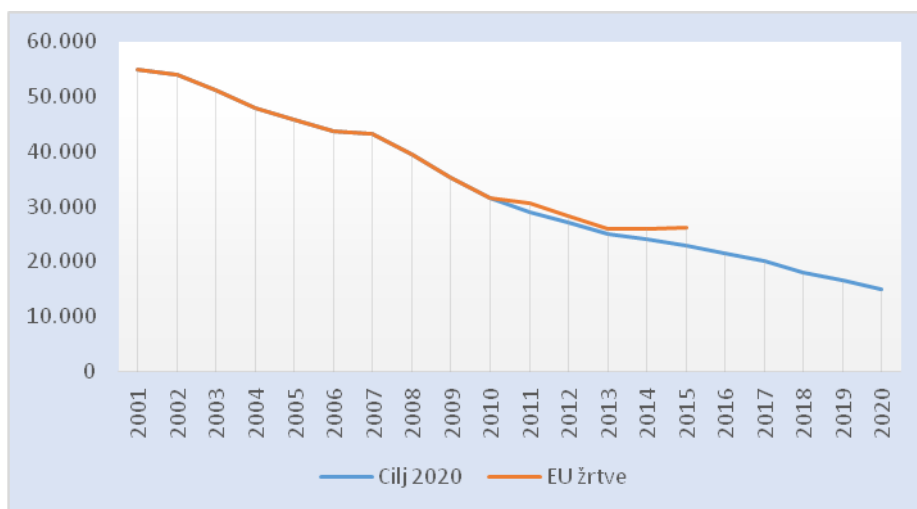
2.1 Učinkovitejša raba goriv

Energijska učinkovitost oziroma neučinkovitost obstoječih vozil v cestnem prometu, ki v veliki večini temelji na motorjih z notranjih zgorevanjem, je izredno nizka. Poleg tega se veliko energije neučinkovito porabi tudi zaradi neoptimalnih prevozov tako osebja kot tovora. Dejstvo je, da se 26% vse energije v EU porabi za transport, od tega kar 83% za cestni transport. Oziroma če pogledamo še drugače, 71% porabe fosilnih goriv v EU gre za transport, od tega 60% za cestni transport. Ker večina vozil temelji na pogonih, ki uporabljajo fosilna goriva (nafta, plin in ostali derivati), je posledično cestni transport eden največjih generatorjev CO₂ in ostalih škodljivih emisij.

2.2 Učinkovitejša raba goriv

Od vseh prometnih težav je ravno varnost tista, kjer lahko nastopijo najbolj hude posledice za vsakdanje življenje državljanov. Že v t. i. »beli knjigi« spodbujanja varnosti v cestnem prometu iz leta 2001 so si zadali cilj prepolovitev števila smrtnih žrtev na cestah do leta 2010. Diagram na sliki 1 prikazuje število smrtnih žrtev na cestah EU. Od leta 2001, ko je bilo skoraj 55.000 žrtev, se je tudi po zaslugi uvajanja varnostnih sistemov to število v letu 2010 zmanjšalo na 31.500. Cilj do leta 2020 je ne več kot 15.000 žrtev na cestah EU. V letu 2015 je bilo še vedno več kot 26.000 smrtnih žrtev, kar je nad pričakovanji,

zato bodo v prihodnjih letih na tem področju varnosti ključno vlogo prevzeli ravno napredni inteligentni sistemi.



Slika 1. Število smrtnih žrtev na cestah EU

2.3 Zmanjševanje zastojev

Prometni zastoji v EU predstavljajo izgubo 1% letnega BDP. 10% časa preživimo v prometu, zato je nujno, da se rešitve ne osredotočajo le na vozila, temveč bi z izboljšano programsko opremo, ki v realnem času uporablja podatke o prometu, v nadzornih centrih za mestni promet lahko privedli do boljšega upravljanja cestnega prometa in dosegli do 40% zmanjšanje stoječega prometa v zastojih. To ima za posledico tudi znatno varčevanje z energijo. Rešitve obstajajo, so vedno boljše, zanesljivejše, cenejše in bližje trgu.

2.4 Kako reševati navedene družbene izzive?

Povsem na mestu je vprašanje, kako se spoprijeti z navedenimi družbenimi izzivi. Del odgovora je nedvomno v IKT, ki omogoča gradnjo inteligentnih vozil in infrastrukture, zagotavljajo nove napredne rešitve. Ti inteligentni sistemi lahko pomagajo vozniku pri funkcij vožnje, s čimer bi preprečili oziroma se izognili številnim nesrečam. Tovrstni sistemi lahko v realnem času zagotovijo vozniku podatke o cestnem omrežju, s čimer se izognemo zastojem. Vozniki lahko optimizirajo potovanje ali zmogljivost motorja, s čimer se izboljša skupna energetska učinkovitost prevoza.

Samo kot primer omenimo *eCall*, sistem za klic v sili. Če bi bila vsa vozila opremljena s sistemom *eCall* je ocena, da bi bilo mogoče v EU doseči zmanjšanje smrtnih žrtev med 5% in 10% in prihrani bi do 22 milijard EUR na leto. Poleg tega bi lahko sistem *eCall* zmanjšal čas zastojev med 10% in 20% z dodatnimi prihranki pri stroških med 2 do 4 milijarde EUR.

Prav tako elektronski stabilizacijski programi (ESP) zmanjšuje število nesreč v povprečju za 20%. Bočni opozorilni podporni sistemi bi lahko prihranili 1.500 nesreč v letu 2010 s samo 0,6% prodorom na trg, medtem ko bi stopnja 7% vstopa na trg v letu 2020 privedla do 14.000 manj nesreč.

Na žalost, kljub njihovem potencialu, večina inteligentnih sistemov še ni na trgu. Ko pa pridejo na trg je njihovo uvajanje zelo dolgo. Primeri takih sistemov so:

- sistem za preprečevanje blokiranja koles med zaviranjem (angl. Anti-lock Braking System - ABS); trajalo je več kot 20 let do predstavitve sistema do polne uvedbe;

- *elektronski program stabilnosti vozila* (angl. Electronic Stability Control - ESP); trajalo je več kot 10 let, da je dosegel 40 % trga EU;
- *program, ki vzdržuje hitrost vozila in razdaljo do sprednjega vozila* (angl. Adaptive Cruise Control - ACC); poteklo je že več kot 35 let od prve razvojne faze (Arem et. al., 2007), a še vedno je uveden v zelo majhnem deležu vozil.

Razlogov za tako počasno uvajanje naprednih inteligentnih sistemov je veliko, med poglavitnimi so pravne ovire, interoperabilnost, izjemna konkurenca v avtomobilskem sektorju, relativno visoki stroški inteligentnih sistemov in posledično pomanjkanje povpraševanja kupcev, predvsem pa pomanjkanje informacij v družbi o potencialnih prednostih uporabe tovrstnih sistemov. Razlogi za relativno počasno uvajanje tovrstnih sistemov so tudi v človeški naravi učenja in dojemanja. Za upravljanje vozil je potrebno pridobiti določena znanja, rutino in izkušnje, ki pa v primeru uvajanja avtomatiziranih vozil niso več potrebni v taki intenzivnosti (Saffarian, de Winter, & Happee, 2012).

3 Načrt za razvoj avtomatizirane vožnje

V zadnji letih je nastalo več pobud, načrtov oziroma strategij na področju avtomatizirane vožnje. V Evropi so največ na tem področju storile Nemčija, Francija, Velika Britanija, Avstrija in Finska. Na nivoju EU je bila v letu 2016 sprejeta Amsterdamska deklaracija, katero so podpisale vse članice EU. Izven EU so na tem področju zelo aktivne tudi Združene države Amerike, Kanada, Avstralija, Nova Zelandija, Japonska in Koreja. Aktivne so tehnološke platforme kot so ERTRAC, EPoSS in iMobility Forum, avtomobilska industrija kot so Robert Bosch, Continental in Renault ter združenja avtomobilskih dobaviteljev v CLEPA in JAMA. Zaradi dobre preglednosti, sistematičnosti in celovite vključitve vseh ključnih deležnikov bi bomo v nadaljevanju kot podlago za naš pregled vzeli načrt razvoja avtomatizirane vožnje, ki jo je pripravila tehnološka platforma ERTRAC ().

3.1 Področje in cilji

Avtomatizirana vožnja je ena od ključnih tehnologij, kjer se v prihodnjih letih pričakuje največji tehnološki napredek na področju cestne mobilnosti. Bistveno bo vplivala in oblikovala našo mobilnost v prihodnosti in s tem povezano kakovost življenja. Glavni dejavniki, ki bodo spodbujali vpeljavo sistemov za avtomatizirano vožnjo, so:

- *varnost*: zmanjšanje nesreč kot posledica človeških napak;
- *učinkovitost in okoljski cilji*: povečanje učinkovitosti prevoznih sistemov in zmanjšanje časa, prebitega v prometnih zastojih. Bolj tekoči promet bo pomagal zmanjšati porabo energije in izpuste iz vozil;
- *udobje*: omogoča več svobode uporabnikom vozil za druge dejavnosti, kot so aktivni sistemi za avtomatizirano vožnjo;
- *socialna vključenost*: Zagotoviti mobilnost za vse, tudi za starejše in prizadete uporabnike;
- *dostopnost*: olajšati dostop do mestnih središč.

Avtomatizirana vožnja je ključna usmeritev evropske transportne politike. Podpira številne cilje in družbene izzive, kot so cesta varnost, dekarbonizacija (zmanjševanje uporabe fosilnih goriv), zanesljivost cestnih prevozov, koncept pametnih mest in omogoča socialno vključenost predvsem pripadnikov ranljivih skupin. S tehnološkega vidika je avtomatizirana vožnja evolucijski proces, ki bo vključeval vse ključne deležnike in jim omogočal razvoj s primerno hitrostjo. Proces se je že začel z razvojem sistemov, kot so ABS in ESP. Poleg razvoja naprednih sistemov za pomoč vozniku kot je npr. ADAS (angl. Advanced Driver Assistance Systems), se bodo vzporedno razvijali tudi sistemi za vožnjo

brez voznika. Naprej bomo (oziroma smo v posameznih primerih že) priča sistemom v zaprtih območjih kot so letališča, poligoni in tovarne, v nadaljevanju pa se bodo tovrstni avtonomni sistemi pojavili tudi v javnem prometu.

V ta namen bo potrebno vložiti izdatna sredstva. Dejstvo je, da je evropska avtomobilska industrija največji privatni investitor v razvoj in raziskave v Evropi. Štiri od TOP5 podjetij, ki največ investirajo v razvoj in raziskave, so iz avtomobilske industrije. Predvideva se, da bo na globalnem trgu do 44 mio avtonomnih vozil do leta 2030¹. Vpliv avtomatizirane vožnje na svetovno ekonomijo bo v višini do 71 mlrd € do leta 2030^{2,3}. V ožjem smislu bo to vplivalo na rast avtomobilskega sektorja v EU, kar pomeni predvsem nove službe v verigi avtomobilske industrije. V širšem smislu bo to vplivalo na večjo produktivnost, manj izgubljenega časa v prometnih zastojih, manj nesreč s hudimi posledicami, večja učinkovitost transportnih sistemov in manj porabljene energije.

Uporaba razvojno raziskovalnih rezultatov na področju avtomatizirane vožnje bo podprla vodilno vlogo Evrope na področju tehnologije in trga. Temu bo nedvomno potrebno prilagoditi zakonodajo in regulativni okvir. Pomembno je, da bo razvojno raziskovalnim rezultatom sledila tudi industrializacija, ki je ključna z pozitivni ekonomski učinek. Vsekakor se moramo izogniti scenariju »razvito v Evropi, narejeno zunaj«. Za Slovenijo je na tem področju izredno pomemben tudi pan-Evropski vidik, ki vse bolj stopa v ospredje.

SAE Nivo	Spopnja avtomatizacije	Opis nivoja	Izvajanje krmiljenja in pospeševanja / zaviranja	Spremljanje okolice vožnje	Prepustitev izvedbe dinamične vozne naloge	Zmožnosti sistema (način vožnje)
Človek - voznik spremlja okolico vožnje						
0	Ni avtomatizacije	Stalna in popolna vloga človeka - voznika v vseh vidikih dinamične vozne naloge, tudi v primeru opozorila intervencijskih sistemov.	Človek - voznik	Človek - voznik	Človek - voznik	n/a
1	Pomoč vozniku	Način vožnje - posebna izvedba s sistemom za pomoč vozniku pri krmiljenju ali pospeševanju / zaviranju z uporabo informacij iz okolice in s pričakovanjem, da človek - voznik opravlja vse ostale vidike dinamične vozne naloge.	Človek - voznik in sistem	Človek - voznik	Človek - voznik	Nekateri vozni načini
2	Delna avtomatizacija	Način vožnje - posebna izvedba z enim ali več sistemov za pomoč vozniku pri krmiljenju in pospeševanju / zaviranju z uporabo informacij iz okolice in s pričakovanjem, da človek - voznik opravlja vse ostale vidike dinamične vozne naloge.	Sistem	Človek - voznik	Človek - voznik	Nekateri vozni načini
Avtomatiziran vozni sistem ("Sistem") spremlja okolico vožnje						
3	Pogojna avtomatizacija	Način vožnje - posebna zmogljivost avtomatiziranega voznega sistema z vsemi vidiki dinamične vozne naloge s pričakovanjem, da se bo človek - voznik primerno odzval na zahtevo po intervenciji.	Sistem	Sistem	Človek - voznik	Nekateri vozni načini
4	Pretežna avtomatizacija	Način vožnje - posebna zmogljivost avtomatiziranega voznega sistema z vsemi vidiki dinamične vozne naloge tudi v primeru, da se človek - voznik ne bo primerno odzval na zahtevo po intervenciji.	Sistem	Sistem	Sistem	Nekateri vozni načini
5	Popolna avtomatizacija	Stalna in popolna zmogljivost avtomatiziranega voznega sistema z vsemi vidiki dinamične vozne naloge, pod vsemi cestnimi in ostalimi pogoji okolice, ki bi bile sicer lahko vodene s strani človeka - voznika.	Sistem	Sistem	Sistem	Vsi vozni načini

Slika 2. Nivoji avtomatizirane vožnje za cestna vozila

3.2 Definicije

Združenje SAE (Society of Automotive Engineers) je pripravilo skupno izrazoslovje in definicije za področje avtomatizirane vožnje (SAE J3016, 2016). Namen skupnih definicij je poenostaviti komunikacijo in olajšati sodelovanje tako na tehničnem področju kot tudi pri pripravi politik in predpisov. Nivoji avtomatizirane vožnje za cestna vozila so prikazani v tabeli na sliki 2, pri čemer so ključne definicije:

¹ Autonomous Vehicles, Navigant Research, Aug/13.

² KPMG, Connected and Autonomous Vehicles – The UK Economic Opportunity.

³ Boston Consulting Group (2015) Revolution in the Driver's Seat: The Road to Autonomous Vehicle

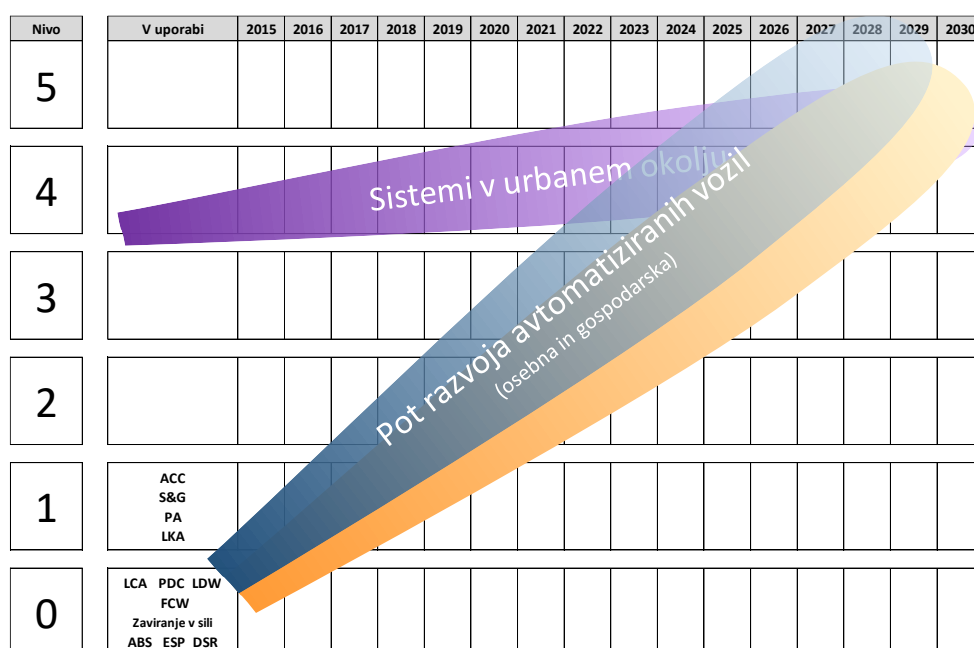
- *dinamična vozna naloga* vključuje *operativne* (krmiljenje, zaviranje, pospeševanje, spremljanje vozil in vozišča) in *taktične* (odzivanje na dogodke, ki vpliva na to, kdaj menjati vozni pas, obrniti, uporabiti svetlobne ali zvočne signale itd.) *vidike vožnje*, ne pa tudi strateški vidik (npr. določitev ciljev in vmesnih točk);
- *način vožnje* je vrsta voznega scenarija z značilnimi zahtevami za dinamične vozne naloge (npr. vključevanje na avtocesto, potovanje pri visoki hitrosti, vožnja z nizko hitrostjo v zastojih, operacije v zaprtih območjih itd.);
- *zahteva za intervencijo* je obvestilo avtomatiziranega sistema človeku oz. vozniku, da mora takoj začeti ali nadaljevati opravljanje dinamične vozne naloge.

Na trgu je že več sistemov, ki posegajo v vožnjo kot so sistemi ABS, ESC in sistemi za zaviranje v sili. Sistemi običajno presegajo človekove zmožnosti. Še tako izkušen voznik bi težko bolje obvladal vozilo, kot ga obvladajo tovrstni sistemi. Sistemi so del aktivnega varnostnega sistema v vozilih. V prihodnosti bodo ti isti služili kot podlaga za višji nivo avtomatizacije in njihovo uvedbo: npr. sistemi za izogibanje oviram in za zaustavljanje vozila v sili.

4 Poti uvajanja

Skozi razvoj strategije sta se oblikovali *dve poti* uvajanja avtomatizirane vožnje, ki se bosta v prihodnosti prepletali in dopolnjevali:

1. *pot razvoja vozil*; danes je že kar precej sistemov za avtomatizirano vožnjo na nivoju 0 in 1 (v grafu na sliki 3, levo spodaj). Ti sistemi bodo osnova za razvoj in uvajanje avtomatizirane vožnje tako za osebna kot tudi gospodarska vozila;
2. *sistemi v urbanih okoljih*; zaradi največje koncentracije prebivalstva v urbanih okoljih (več kot 85% svetovne populacije živi v urbanih okoljih, v nekaterih razvitih državah kot npr. Japonska preko 93%) je tudi cestni promet v urbanih okoljih največji, zato je temu področju posvečeno največ pozornosti. V nekaterih omejenih okoljih že danes obstajajo sistemi za avtonomno vožnjo pri nižjih hitrostih.

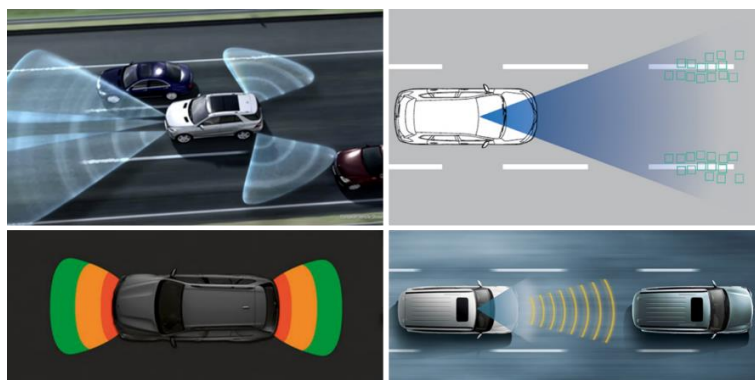


Slika 3. Glavne poti uvajanja avtomatizirane vožnje

4.1 Sedanji sistemi v vozilih – nivo 0

Na trgu je že več podpornih sistemov tako za osebna kot tudi tovorna vozila:

1. *Sistem za pomoč pri menjavi voznega pasu* (angl. Lane Change Assist - LCA); nadzoruje območje na levi in desni strani vozila, vključno s slepim kotom, in do 50 metrov za vozilom. Sistem opozori na potencialno nevarno situacijo s prižiganjem signalne luči v zunanjih ogledalih. LCA predstavlja velik potencial pri preprečevanju nesreč. Analize⁴ so pokazale, da sistem LCA preprečuje do 25% nesreč, ki nastanejo pri menjavanju voznega pasu. Prikaz delovanja sistema LCA je na sliki 4, levo zgoraj.
2. *Nadzor razdalje pri parkiranju* (angl. Park Distance Control - PDC); pomaga vozniku pri manevriranju v tesnih prostorih in s tem zmanjšuje stres tako, da voznika obvešča o oddaljenosti od ovir s pomočjo akustičnega ali optičnega signala. Prikaz delovanja sistema PDC je na sliki 4, levo spodaj.
3. *Opozorilo pred zapustitvijo voznega pasu* (angl. Lane Departure Warning - LWD); pomaga preprečevati nesreče, ki bi nastale zaradi nenamernega tavanja po voznem pasu. Predstavlja pomemben varnostni element na avtocestah in glavnih magistralnih cestah. Če obstaja namig, da bi vozilo nenamerno zapustilo vozni pas, sistem opozori voznika vizualno, zvočno ali s tresenjem volana. Pri tem jedro sistema predstavlja algoritem za prepoznavanje črt na vozišču. Obstaja veliko metod za prepoznavanje črt, med najuspešnejše se uvršča nedvomno Houghova transformacija (Hough, 1962, Duda, Hart, 1972), ki v kombinaciji s fuzzy logiko kaže velik potencial za prepoznavanje črt v avtomatiziranih vozilih tudi v slabše definiranim območju (Savšek, 1992, Du, Tu, 2016). Prikaz delovanja sistema LWD je na sliki 4, desno zgoraj.
4. *Sistem za opozarjanje pred čelnim trkom* (angl. Forward Collision Warning - FCW); uporablja radarski senzor za zaznavanje situacije, ko je razdalja do prednjega vozila kritična in pomaga zmanjšati zavorno pot vozila. V nevarnih situacijah sistem opozori voznika s pomočjo vizualnih in zvočnih signalov in / ali z opozorilnim sunkom zavor. Sistem deluje neodvisno do sistema ACC. Na podlagi analiz in raziskav sistem FCW predstavlja velik potencial za povečanje varnosti (Mehler et. al., 2014). Prikaz delovanja sistema FCW je na sliki 4, desno spodaj.



Slika 4. Sedanji sistemi v vozilih – nivo 0: LCA (levo zgoraj), PDC (levo spodaj), LWD (desno zgoraj) in FCW (desno spodaj)

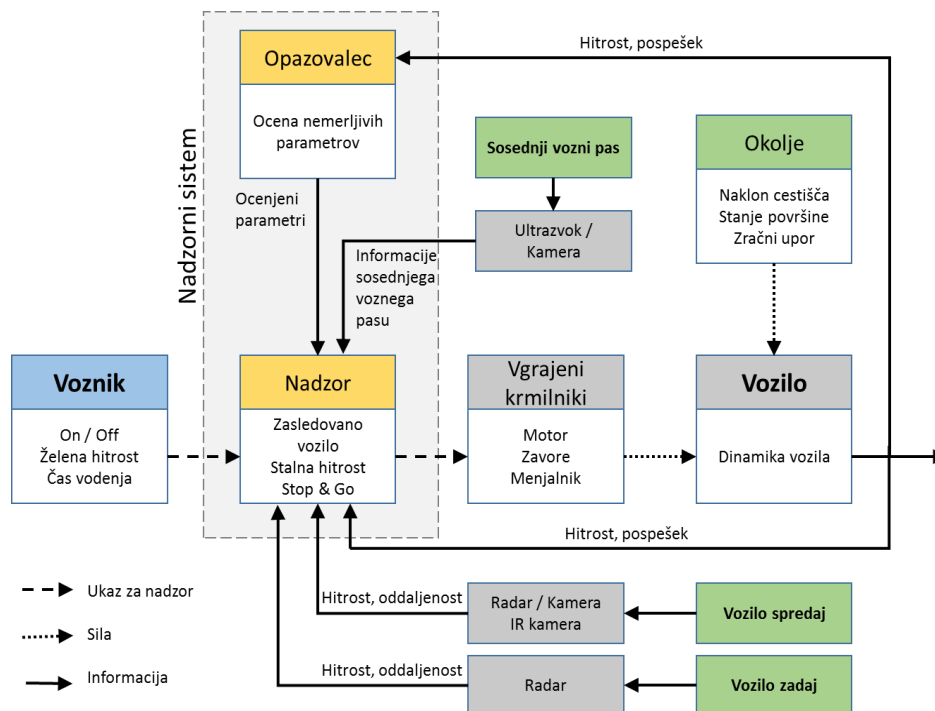
4.2 Sedanji sistemi v vozilih – nivo 1

Na trgu je že več sistemov za potniška in tovorna vozila:

1. *Tempomat z avtomatskim nadzorom razdalje* (angl. Adaptive Cruise Control - ACC); uporablja senzor razdalje za merjenje razdalje in hitrosti glede na vozilo spredaj. Voznik nastavi hitrost in

⁴ German Road Safety Council (DVR).

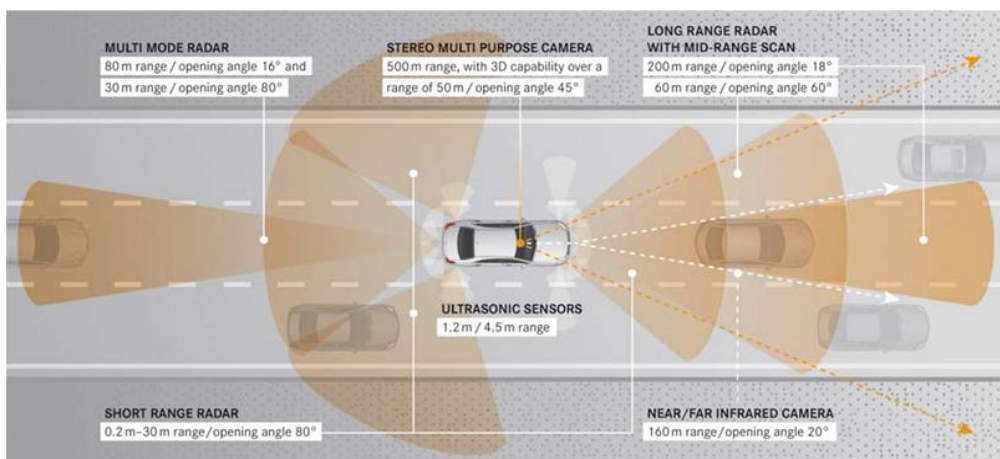
zahtevane časovne zamike. »Tarča« in dejanska oddaljenost do naslednjega objekta v prometu se izpisuje na prikazovalniku. Slika 5 prikazuje funkcionalno shemo delovanja tempomata z avtomatskim nadzorom razdalje do vozila spredaj.



Slika 5. Funkcionalna shema delovanja sistema ACC+Stop&Go

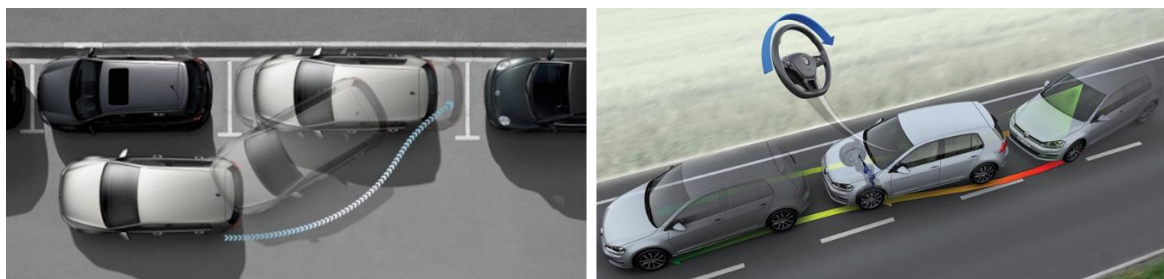
2. *Prilagodljiv tempomat s funkcijo ustavi in spelji* (angl. ACC+Stop&Go) vključuje samodejni nadzor razdalje (pri hitrosti 0-250 km/h) in zazna vozilo spredaj glede na omejitve sistema. Vozilo ohranja varno razdaljo s samodejnim aktiviranjem zavore in pospeševanjem. V gostem prometu in v zastojih upravlja zaviranje in pospeševanje. Slika 6 shematično prikazuje območje delovanja senzorjev, ki se uporabljajo pri tovrstnem sistemu:

- radar kratkega dosega za zaznavanje vozil v neposredni bližini spredaj in zadaj,
- radar dolgega dosega za zaznavanje vozil spredaj na razdalji do 200 m,
- infrardeča kamera za zaznavanje vozil spredaj na večji razdalji, predvsem ponoči in v slabi vidljivosti,
- ultrazvočni senzorji za zaznavanje objektov v neposredni okolici vozila,
- večnamenska stereo kamera ter
- več modalni radar za zaznavanje vozil zadaj na večji razdalji.



Slika 6. Shematični prikaz senzorjev sistema ACC+Stop&Go

3. *Pomočnik za parkiranje* (angl. Park Assist - PA); samodejno krmili avto pri vzvratnem bočnem parkiranju ali parkiranju v boks. Tako parkiran avto zapelje avtomatsko tudi iz parkirnega mesta. Sistem pomaga vozniku s samodejnim izvajanjem optimalnega pomikanja krmilnega mehanizma, da se izvede vzvratno parkiranje po idealni liniji. Merjenje parkirnega prostora, postavitve vozila v začetni položaj in premikanje krmilnega mehanizma izvede sistem samodejno. Voznik mora operirati s plinom in zavoro. To pomeni, da voznik v vsakem trenutku ohranja nadzor nad vozilom. Prikaz delovanja sistema PA je na sliki 7, levo.
4. *Pomočnik za držanje smeri na voznem pasu* (angl. Lane Keeping Assist - LKA); samodejno postane aktiven od določene hitrosti dalje (običajno od 50 km/h). Sistem zazna označbe voznih pasov in s tem določa položaj vozila. Če vozilo začne drseti z voznega pasu, sistem sprejme popravljalne ukrepe. Če je največja dovoljena akcija ni dovolj, da vozilo ostane na pasu, ali če hitrost pade pod 50 km/h, sistem opozori voznika (npr. z vibracijo volana). Potem je naloga voznika, da izvede popravilne ukrepe. Prikaz delovanja sistema LKA je na sliki 7, desno.



Slika 7. Sedanji sistemi v vozilih – nivo 1: pomočnik za parkiranje (levo) in pomočnik za držanje smeri vozila na voznem pasu (desno)

4.3 Pot razvoja avtomatiziranih osebnih vozil

Pot razvoja avtomatiziranih osebnih vozil vključuje na eni strani sisteme, ki omogočajo (i) avtomatizirano parkiranje vozila, na drugi strani pa razvoj sistemov, ki omogočajo (ii) avtomatizirano vožnjo v prometu na avtocesti. Obe smeri v končni fazi vodita do (iii) popolnoma avtomatizirane vožnje osebnih vozil.

- (i) *Avtomatizirana pomoč pri parkiranju* vključuje dve fazi:

- *Delno avtomatsko parkiranje* (nivo 2) na in iz parkirnega prostora, na javnem parkirišču in/ali v zasebni garaži. S pametnimi telefoni ali pametnimi ključi se je začel proces parkiranja, ki se uporabljajo kot daljinski upravljalci za izvedbo parkirnega manevra. Voznik se lahko

nahaja tudi izven vozila, vendar mora stalno spremljati sistem, da lahko ustavi parkirni manever, če je potrebno.

- *Visoko avtomatizirano parkiranje* (nivo 4) vključuje manevriranje na in iz parkirnega mesta brez voznikove asistencije. V času parkiranja vozniku ni treba spremljati sistema. Ko je sistem aktiven, lahko zapusti vozilo brez nadzora. Preko pametnega telefona ali ključa se aktivira parkirni manever. Prav tako se aktivira vračilo vozila k vozniku.
- (ii) *Avtomatizirana vožnja po avtocesti* vključuje več faz, ki se razlikujejo predvsem od hitrosti, ki jih vozila pri tem dosegajo:
 - *Sistem za pomoč pri vožnji v prometnih zastojih* (nivo 2) nadzoruje vozilo v smeri vožnje in hkrati sledi prometnemu toku na sosednjih pasovih. Deluje pri nizkih hitrostih do 30 km/h. Sistem je mogoče razumeti kot razširitev ACC s funkcijo Stop&Go, a brez podpore pri menjavi voznega pasu.
 - *Pogojno avtomatizirana vožnja v prometnih zastojih* (nivo 3) do 60 km/h na avtocestah ali njim podobnih cestah. Sistem se lahko aktivira v primeru scenarija »prometni zastoj«. Sistem zazna počasno vožnjo vozila spredaj in začne upravljati vozilo tako vzdolžno kot bočno. Voznik aktivira sistem, vendar ni nujno, da ga spremlja neprekinjeno. V vsakem trenutku ga lahko izklopi. V nadaljevanju bo sistem vključeval tudi funkcijo spremembe voznega pasu. Sistem od voznika ne more prevzeti nadzora.
 - *Pogojno avtomatizirana vožnja* (nivo 3) do 130 km/h na avtocestah ali njim podobnih cestah. Sistem deluje od vstopa do izstopa na avtocesto, na vseh pasovih, sposoben je izvesti tudi prehitevanje drugih vozil. Voznik aktivira sistem, vendar ni nujno, da spremlja sistem neprekinjeno. Voznik lahko v vsakem trenutku razveljavi ukaz ali izklopi sistem. Sistem lahko od voznika zahteva, da voznik v določenem času prevzame nadzor nad vozilom, v kolikor sistem pride do roba svojih zmogljivosti.
 - *Avtomatizirana vožnja* (nivo 4) do 130 km/h na avtocesti ali njej podobni cesti. Sistem deluje od vstopa do izstopa na avtocesto, na vseh pasovih, omogoča prehitevanja in spremembe voznega pasu. Voznik aktivira sistem, vendar ni nujno, da spremlja sistem neprekinjeno. Voznik lahko v vsakem trenutku razveljavi ukaz ali izklopi sistem. Ko je sistem v normalnem območju delovanja (npr. na avtocesti), ne sme zahtevati od voznika, da voznik prevzame nadzor. Ob uvajanju sodelujočih sistemov bi se lahko oblikovali tudi ad-hoc konvoji, če je na voljo V2V (vozilo – vozilo) komunikacija.
- (iii) *Popolnoma avtomatizirano vozilo* (nivo 5) mora biti sposobno izpeljati celotno vožnjo od točke A do B, brez kakršnegakoli posredovanja ali dodatnega vnosa s strani potnika. Voznik lahko časovno omeji ali izklopi sistem. Trenutno se lahko poda le groba ocena, kdaj bo tak sistem na voljo na trgu.

4.4 Pot razvoja avtomatiziranih gospodarskih vozil

Pot razvoja avtomatiziranih gospodarskih vozil vključuje na eni strani sisteme, ki omogočajo (i) vožnjo v konvojih, na drugi strani pa razvoj sistemov, ki omogočajo (ii) avtomatizirano vožnjo v prometu na avtocesti. Obe smeri v končni fazi vodita do (iii) popolnoma avtomatizirane vožnje tovornjakov.

(i) *Vožnja v konvojih vključuje dve fazi:*

- *Delno avtomatizirano povezovanje tovornjakov* v konvoju oz. vodu (angl. platoon), kjer se vozila povezujejo preko sodelujočega (angl. Cooperative) sistema ACC (CACC). Sistem nadzira motor, pogonski sklop in zavore tako, da se vzdržuje kratka, a še vedno varna razdalja do vodečega oziroma predhodnega vozila v konvoju. Vozniki so še vedno odgovorni za vse druge vozne funkcije vozila. Sistemi CACC imajo veliko priložnost ne le pri tovornih vozilih temveč tudi pri povezovanju osebnih vozil, zato na tem področju

- potekajo intenzivne raziskave tako v Združenih državah Amerike (Amoozadeha et. al., 2015) kot tudi v Evropi (Chan, et. al., 2012).
- *Povezovanje tovornjakov v konvoje* na posebnem voznem pasu, ki je opremljen in rezerviran le za tovrstna vozila. Vozilo mora biti sposobno obdržati svoj položaj v konvoju s stalno razdaljo ali s stalno časovno razliko od prednjega vozila. Obnašanje prvega vozila v konvoju (npr. pospeševanje/zaviranje in krmiljenje) se posreduje preko komunikacije vozilo – vozila (v2v). Sistem mora vsebovati postopek, da se posamezno vozilo vključi in zapusti konvoj. Postopno uvajanje tovrstnih sistemov je mogoče doseči ob naslednjih začetih predpostavkah:
 - a. začeti z razvojem sistemov na tovornjaki, saj se za uporabnike predvideva močna finančna zaradi 10% do 15% *prihranka goriva*;
 - b. začeti s postopnim razvojem sistemov, kjer se oblikujejo *majhnimi konvoji* (na začetku samo 2 tovornjaka). Uvajanje bo potekalo v sodelovanju z lastniki transportnih podjetij in sicer na območju z veliko gostoto tovornjakov na cestah;
 - c. začeti razvojem sistemom, kjer so vozniki v naslednjih tovornjaki še vedno prisotni. Razlog je predvsem v *pravnih vidikih* uporabe vozil brez voznika v javnem prometu;
 - d. vzpostaviti *odprt* sistem upravljanja konvojev, da se lahko vključijo primerno opremljeni tovornjaki različnih proizvajalcev in lastnikov.
 - (ii) *Avtomatizirana vožnja po avtocesti* vključuje več faz, ki se razlikujejo predvsem od hitrosti, ki jih vozila pri tem dosegajo:
 - *Sistem za pomoč pri vožnji v prometnih zastojih* (nivo 2) nadzoruje vozilo v smeri vožnje, hkrati sledi prometnemu toku na sosednjih pasovih. Deluje pri nizkih hitrostih do 30 km/h. Sistem je mogoče razumeti kot razširitev ACC s funkcijo Stop & Go (tj. brez podpore spremembe voznega pasu).
 - *Pogojno avtomatizirana vožnja v prometnih zastojih* (nivo 3) do 60 km/h na avtocestah in podobnih cestah. Sistem se lahko aktivira v primeru scenarija »prometni zastoj«. Sistem zazna počasno vožnjo vozila spredaj in začne upravljati vozilo tako vzdolžno kot bočno. Voznik aktivira sistem, vendar ni nujno, da ga spremlja neprekinjeno. V vsakem trenutku ga lahko izklopi. Ob nadaljnjem razvoju bo sistem vključeval tudi funkcijo spremembe voznega pasu. Sistem od voznika ne more zahtevati, da prevzame nadzor.
 - *Pogojno avtomatizirana vožnja* (nivo 3) do 90 km/h na avtocestah ali podobnih cestah. Sistem deluje od vstopa do izstopa na avtocesto, na vseh pasovih. Voznik aktivira sistem, vendar ni nujno, da spremlja sistem neprekinjeno. Voznik lahko v vsakem trenutku razveljavi ukaz ali izklopi sistem. Sistem lahko od voznika zahteva, da le-ta prevzame nadzor v določenem času, če avtomatizacija pride do roba zmogljivosti sistema. Kasnejše verzije bodo vključevale tudi menjavo pasov in prehitevanje.
 - *Avtomatizirana vožnja z ad-hoc vključevanjem v konvoj* (nivo 4) do 110 km/h na avtocesti ali avtocesti podobni cesti. Sistem deluje od vstopa do izstopa na avtocesto, na vseh pasovih, omogoča tudi prehitevanje in spremembo voznega pasu. Voznik aktivira sistem, vendar ni nujno, da spremlja sistem neprekinjeno. Voznik lahko v vsakem trenutku razveljavi ukaz ali izklopi sistem. Ko je sistem v normalnem območju delovanja (npr. na avtocesti), ne sme zahtevati od voznika, da prevzame nadzor. Glede na uvajanje sodelujočih sistemov, bi se lahko oblikovali ad-hoc konvoji, če je na voljo komunikacija vozilo – vozilo (v2v).
 - (iii) *Popolnoma avtomatiziran tovornjak* (nivo 5) mora biti sposoben speljati celotno vožnjo od točke A do B, brez kakršnegakoli dodatnega vnosa ali intervencije s strani voznika. Voznik lahko časovno omeji ali izklopi sistem. V tem trenutku se lahko poda le groba ocena, kdaj bo tak sistem na voljo na trgu.

4.5 Sistemi v urbanem okolju

Pot razvoja sistemov v urbanem poteka bo potekala po načelu »nizka hitrost – visoka stopnja avtomatizacije«. Na posameznih območjih v Evropi danes že obstajajo posebne rešitve z visoko stopnjo avtomatizacije, ki pa zahteva nizko hitrost vozil in/ali namensko infrastrukturo. Naštejmo nekaj značilnih primerov:

1. *Kibernetična vozila* (angl. Cybercar) so majhna avtomatizirana vozila za individualni ali skupinski prevoz oseb ali blaga. Značilnosti le-teh so:
 - popolnoma avtomatiziran transportni sistem, ki deluje na zahtevo. V normalnih obratovalnih pogojih ne zahteva interakcije s človekom;
 - vozila so popolnoma avtonomna, pri čemer uporabljajo informacije iz nadzornega prometnega centra, informacije od infrastrukture ter informacije od drugih udeležencev v cestnem prometu;
 - vozila so majhna, bodisi za individualni prevoz (1-4 osebe) ali za prevoz manjših skupin (do 20 oseb);
 - vozila uporabljajo ločeno infrastrukturo ali pa si delijo prostor z ostalimi udeleženci v prometu.
2. *Visokotehnoški avtobusi* (angl. High-Tech Buses) so avtobusi na gumijastimi kolesi, ki pa delujejo bolj kot tramvaji kakor pa tradicionalni avtobusi. Njihove značilnosti so:
 - vozila za množični prevoz (več kot 20 oseb);
 - vozila uporabljajo ločeno infrastrukturo ali pa si delijo prostor z ostalimi udeleženci v prometu;
 - uporabljajo različne vrste avtomatiziranih sistemov, bodisi za usmerjanje ali za pomoč vozniku;
 - v vozilu je vedno voznik, ki lahko v vsakem trenutku prevzame nadzor nad vozilom, tako da vozilo lahko uporablja tudi javne prometne površine.
3. *Hiter osebni prevoz* (angl. Personal Rapid Transit - PRT) je transportni sistem, ki vključuje majhne popolnoma samodejna vozila za prevoz oseb. Značilnosti:
 - PRT deluje izključno na lastni infrastrukturi in ni interakcije z drugim prometom;
 - popolnoma avtomatiziran sistem, ki v normalnih obratovalnih pogojih ne zahteva interakcije s človekom;
 - uporabljajo se majhna vozila, običajno za 4 do 6 oseb na vozilo;
 - PRT ponuja storitev na zahtevo, kjer se ljudje prevažajo neposredno od začetne do kočne postaje, brez ustavljanja na vmesnih postajah, brez menjave vozila in v najboljšem primeru brez čakanja.
4. *Napredna mestna vozila* (angl. Advanced City Cars) so na novo oblikovana namenska mestna vozila. Vključujejo sodobno pogonsko tehnologijo z ničelnim ali izredno nizkim onesnaževanjem ter sistemi za pomoč vozniku, kot so inteligentno prilagajanje hitrosti (angl. Intelligent Speed Adaptation), pomoč pri parkiranju, preprečevanje trčenja in sistem Stop & Go. Ta vozila bi vključevala tudi nadzor dostopa skupaj z napredno komunikacijo, s čimer bi jih enostavno vključili v storitev delitev avtomobilov (angl. car-sharing).
5. *Dvo-modalna vozila* (angl. dual-mode vehicles) so razvita iz tradicionalnih avtomobilov. Lahko podpirajo popolnoma samodejno vožnjo kot tudi ročno vožnjo. Ena od prvih aplikacij avtomatske vožnje bo premikanje avtomobilov v sistemu izposoje vozil z uporabo tehnike konvojev. Vozila bo možno avtomatsko prepeljati od ene točke do druge, odvisno od povpraševanja oziroma predvidene gostote prevozov na zahtevo. V posebnih območjih ali pri uporabi posebne infrastrukture ta vozila lahko postanejo tudi popolnoma kibernetična vozila. Dvo-modalna vozila predstavljajo prehod od tradicionalnih avtomobilov k vozilom za popolnoma samodejno vožnjo.

4.6 Rešitve »zadnja milja«

Problem »zadnja milja« (angl. Last mile) se pojavlja v urbanih naseljih, ko največ časa za transport porabimo ravno prvi oziroma zadnji kilometer oziroma miljo. Zaradi psihološkega učinka ob koncu poti, ko smo velikokrat že v časovni stiski, se tega problema bistveno bolj zavedamo kot pa na začetku poti, zato tudi oznaka »zadnja milja«. Slika 8 prikazuje idejo premagovanja zadnje milje.



Slika 8. Ideja »zadnje milje«

V prihodnosti se bo problem zadnje milje reševal na različne načine (npr. peš, s kolesom, rolko in podobnimi prevoznimi sredstvi). Vezano na avtomatizirana vozila, so na vidiku naslednje rešitve. V tem trenutku lahko podamo le grobo oceno, kakšni bodo ti sistemi in kdaj bodo na voljo:

1. *Kibernetično vozilo 1. generacije* (nivo 4) je transportna rešitev, ki je na območju delovanja v celoti avtomatizirana. Največja hitrost je 40 km/h. Deluje v specifičnem območju z namensko infrastrukturo.
2. *Kibernetično vozilo 2. generacije* (nivo 4) je transportna rešitev, ki je na območju delovanja v celoti avtomatizirana. Hitrost ni omejena. Deluje v specifičnem območju s prilagojeno infrastrukturo.
3. *Avtomatizirane kibernetične rešitve* (nivo 5) omogočajo popolnoma avtomatizirano vožnjo, ki lahko načeloma potnika prepeljejo na vsa zelena mesta.
4. V javnem prevozu se bodo vse bolj uveljavljali *avtomatizirani avtobusi ali PRT* (nivo 4):
 - *PRT 1. generacije*; avtomatiziran avtobus vozi po ločenih avtobusnih voznih pasovih in z namensko infrastrukturo, z največjo hitrostjo 40 km/h.
 - *PRT 2. generacije*; avtomatiziran avtobus vozi po namenskih avtobusnih voznih pasovih in s podporno infrastrukturo z običajno hitrostjo vozil v mestih. Ko bo sistem na trgu, se bodo lahko dodajale funkcionalnosti, kot je prilagodljiv sistem za nadzor prometa v mestih, ki nadzoruje semaforje in avtobusu priporoča hitrost vožnje, da ujame »zeleni val«.
 - *Popolnoma avtomatiziran avtobus*; vozi v mešanem prometu na določenem območju delovanja.

5 Razprava - poti razvoja do leta 2030

Zavedanje o pomenu avtomobilske industrije in avtomatizirane vožnje v Evropi je vse večje, zato je leta 2015 Evropska komisija ustanovila skupino na visoki ravni za konkurenčnost in trajnostno rast avtomobilske industrije v Evropski Uniji pod imenom GEAR 2030. Namen skupine je, da vodi dialog za spodbujanje rasti avtomobilske industrije v Evropi, da pomaga Evropski komisiji pri pripravi in uresničevanju načrta razvoja avtomatizirane in avtonomne vožnje ter da poskrbi za izmenjavo izkušenj in najboljših praks na področju izobraževanja in usposabljanja v relevantnih sektorjih. Skupina pripravlja skupno vizijo razvoja avtomatizirane vožnje do leta 2030 ter nabor ukrepov, ki obsegajo:

- a) pregled pravnih in političnih vprašanj za prihajajoče sisteme, ki zahtevajo obsežna testiranja na visoko avtomatiziranih vozilih,
- b) usklajevanje raziskav in financiranja,

c) konkurenčnost in mednarodne vidike sodelovanja.

Na področju avtomatizirane cestne vožnje bo tako v naslednjih letih poudarek predvsem na raziskavah na naslednjih področjih: zaznavanje lokacije vozila in okolice, varni sistemi avtomatizirane vožnje v kompleksnih prometnih, avtomatski šoferji oziroma piloti, cesta infrastruktura, povezljivost za napredni nivo avtomatizacije ter ne nazadnje socialno sprejemljivosti za uporabnike. Kakorkoli že, združevanje sistemov, ki na eni strani zagotavljajo povezljivost vozil in sistemov, ki na drugi strani omogočajo avtomatizacijo posameznih voznih aktivnosti, bodo vodili k popolnoma avtomatizirani vožnji, katero se načrtuje nekje po letu 2030. Slika 9 simbolično prikazuje razvoj avtomatizirane vožnje v naslednjih letih.

Seveda je vprašanje, kje na poti razvoja avtomatizirane vožnje je Slovenija. Velik korak je bil nedvomno narejen s sprejemom Slovenske strategije pametne specializacije S4 (SVRK, 2015), ki vključuje tudi področje mobilnost. V okviru strategije S4 se je začelo vzpostavljati strateško razvojno inovacijsko partnerstvo na področju mobilnosti SRIP ACS+, ki v svojem akcijskem načrtu vključuje tudi razvoj tehnologij za avtomatizirano in avtonomno vožnjo.



Slika 9. Razvoj avtomatiziranih vozil

Viri

1. Amoozadeha M., Dengb H., Chuaha C-N., Zhangb H.M., & Ghosalc D. (2015). *Platoon management with cooperative adaptive cruise control enabled by VANET*, Vehicular Communications, Volume 2, Issue 2, April 2015, pp. 110–123.
2. Arem, B. van, Driever H., Feenstra P., Ploeg J., Klunder G., Wilmink I., Zoutendijk A., Papp Z. (2007). *Design and evaluation of an Integrated Full-Range Speed Assistant*, TNO Report 2007-D-R0280/B, Delft, March 2007.
3. Chan E., Gilhead P., Jelínek P., Krejčí P., & Robinson P. (2012). *Cooperative control of SARTRE automated platoon vehicles*, ITS World Congress, Vienna.

4. Du S.Z., Tu C.L. (2016). *An Autonomous Vehicle Navigation System Based on Hough Transform and Fuzzy Logic*. In: Hussain A. (eds) *Electronics, Communications and Networks, Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol 382. Springer, Singapore.
5. Duda, R.O., Hart, P.E. (1972). *Use of the Hough Transform to detect lines and curves in pictures*, *Communications of the ACM*, Vol. 15, pp. 11-15.
6. EARPA (2015). *Automated Driving Roadmap, ERTRAC Task Force »Connectivity and Automated Driving«*, ERTRAC, Version 5.0, European Road Transport Research Advisory Council, Bruselj.
7. European Commission (2015). *Setting up the High Level Group on the Competitiveness and Sustainable Growth of the Automotive Industry in the European Union (GEAR 2030)*, Commission decision, No. C(2015) 6943 final, Bruselj.
8. Hough, P.V.C. (1962), *Method and Means for Recognizing Complex Patterns*, U.S. Patent, No. 3069654.
9. Mehler B., Reimer B., Lavallière M., Dobres J., & Coughlin J.F. (2014). *Evaluating Technologies Relevant to the Enhancement of Driver Safety*, Massachusetts Institute of Technology AgeLab, AAA Foundation for Traffic Safety, Washington, DC.
10. Minarini, F. (2010). *Development of ICT systems for safer, cleaner and more efficient Mobility: The Intelligent Car Initiative*, ICT for Transport, Directorate General Information Society and Media, European Commission.
11. Reding, V. (2006). *The Intelligent Car Initiative: Raising Awareness of ICT for Smarter, Safer and Cleaner vehicle*, Speech delivered at the Intelligent Car Launching Event, Brussels.
12. Saffarian M., Winter J. C. F. de, Happee R. (2012). *Proceedings of the human factors and ergonomics society 56th annual meeting*, October 2012, SAGE Publishing, pp. 2296-2300.
13. SAE J3016 (2016). *Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems*, SAE International, Standard, No. J3016_201609.
14. Savšek, T. (1992). *Razpoznavanje vzorcev sive slike z uporabo relacijskih struktur*. Magistrsko delo, Univerza v Ljubljana, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana.
15. SRIP ACS+ (2016), *Akcijski načrt strateškega razvojno inovacijskega partnerstva na področju mobilnosti SRIP ACS+*, Ljubljana.
16. SVRK (2015), *Slovenska Strategija Pametne Specializacije – S4*. Služba Vlade Republike Slovenije za razvoj in evropsko kohezijsko politiko, Ljubljana.

Doc. dr. Tomaž Savšek, doktor elektrotehničnih znanosti in pomočnik generalnega direktorja v podjetju TPV, kjer vodi področje javno-zasebnega partnerstva s poudarkom na razvojno-raziskovalnih projektih, ki jih podjetje izvaja samostojno ali v sodelovanju z drugimi podjetji in inštitucijami znanja. Njegova področja znanja so računalniška obdelava signalov, teorija fuzzy množic, računalniški sistemi za podporo odločanju, simulacijski sistemi in operacijske raziskave. Na Fakulteti za industrijski inženiring Novo mesto je predavatelj in nosilec predmetov Avtomobilizem (I. st.), Informacijski in elektronski nadzorni sistemi v vozilih (II. st.) ter Inteligentni sistemi za vodenje - krmiljenje naprav in avtomobilov (III. st.)

PROCESSING OF SYNTHETIC FUELS BY NANOALLOY CATALYSTS

Imre Kovács

University of Dunaújváros, Táncsics M. u. 1/A, H-2401, Dunaújváros, Hungary

amerigo1960@gmail.com

kovacsimre@uniduna.hu

ABSTRACT

The increasing demand of fuel and the shortage of crude oil sources of the world makes the research on renewable and alternative energy sources relevant both from theoretical and industrial point of view. Some of these promising candidates – such as hydrogen, biogas – are still not involved in our everyday live. There is a technology, Fischer-Tropsch synthesis, which offers a solution. With the help of nano alloys, of cobalt (or iron) and some noble metals, synthetic fuel can be manufactured. Some results on the formation, characterization of these alloys will be presented in this study. Based on X-ray absorption methods, EXAFS and NEXAFS, we could give an overview and interpretation on such working catalysts.

Keywords: alternative energy, Fischer-Tropsch synthesis, cobalt alloys, XAS, biogas, syngas

1 Introduction

The crude oil balance of trade in the EU community was over 500 Mt in a year during the last two decades and was 509 Mt in 2015 [1]. The price of gasoline and diesel fuel approximated the value of 2 \$ per liter. During the last few decades some alternative solutions emerged. One of them is to replace gasoline to methanol or the application of MTBE (methyl-tert-butyl ether) which is an important gasoline octane number enhancer [2]. Auto gas, is Europe's leading alternative fuel with over 7.5 million light duty and passenger vehicles on the road in the EU while diesel engines will account for 9 percent of new-car sales in Europe by 2030 [3,4]. In general vehicles convert the chemical energy of a substance to mechanical energy either *a.*) by burning as in an internal combustion engine as mentioned above or *b.*) by reacting them in a fuel cell to run electric motors [5].

Hydrogen can be used either by burning it in an internal combustion engine or by reacting with oxygen in a fuel cell to run electric cars. As of 2016, there are 3 hydrogen cars publicly available in selected markets; the Toyota Mirai, the Hyundai ix35 FCEV and the Honda Clarity. As of 2014, 95% of hydrogen was made from natural gas [5]. A suggested benefit of large-scale deployment of hydrogen vehicles is that it could lead to decreased emissions of greenhouse gases and ozone precursors. The use of hydrogen has also its drawbacks such as: *a.*) high CO₂ emissions when produced from natural gas or by water-gas reaction; *b.*) capital cost burden; *c.*) low energy content per unit volume; *d.*) compression of hydrogen, and *e.*) the large investment in infrastructure that would be required to fuel vehicles. Some of the drawbacks can be eliminated when hydrogen is produced using renewable sources, but that is still an expensive process [6]. The poor storability of LH₂, the high purity required in fuel cells and the explosion risk makes its common appearance in everyday vehicles questionable. The storability means high pressures and low temperatures. Fuel cell catalysts are very sensitive to CO content [7, 8]. The infrastructure dilemma seems insurmountable. Onboard storage of hydrogen in either gaseous or liquid

form would result in incredibly expensive vehicles, and a large-scale shift to hydrogen entails supplementing or supplanting the existing liquid fuel delivery infrastructure. [9].

In theory the more promising solutions will have higher volumetric energy density at ambient conditions, and will use the energy supplier channels already present. One possibility is the use of biofuels which can be converted to ethanol [10, 11]. The ethanol-acetaldehyde reaction can give one mole H_2 per ethanol mole [12]. Formic acid is also a good candidate for such chemical energy storage systems [13, 14].

The internal combustion engines are spread all over the world, the importance of their fuel supply might be extremely important. The large scale chemical technologies are based upon the formation of synthesis gas (also called syngas) which is a mixture of carbon monoxide, carbon dioxide and hydrogen. It can be produced from natural gas, coal, biomass, or virtually from any hydrocarbon feedstock [15]. The relationship of the above mentioned reactions are summed up in Figure 1.

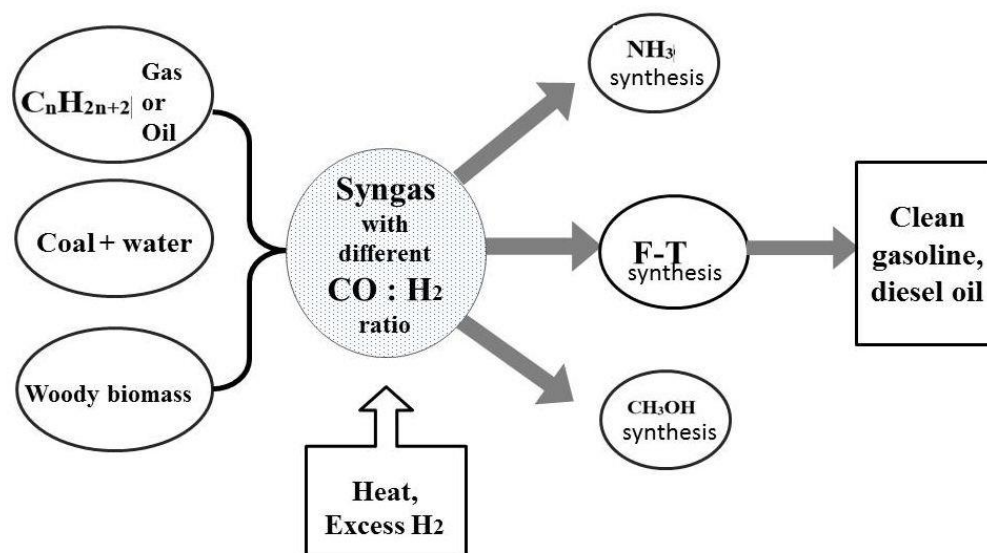


Figure 1. Possible reaction routes for production of synthetic fuels and applications of syngas

2 The short history of Fischer-Tropsch technology

The basics of these chemical reactions were discovered at the beginning of XIX-th century and the production of paraffines has been published in 1926 [16]. It was found, that cobalt and iron containing catalysts are active. Although there is an enormous number of research papers, reviews and patents published on the Fischer-Tropsch catalysts preparation, size, support, promoters, durability etc. the importance of this research field justifies the ongoing research. Some of the basics can be found in [17]. In our research we focused on the reducibility of cobalt containing catalysts and on the effect of noble metal promoters [18].

The technology requires energy so it is important to decrease the reaction temperatures but keep it high enough to reduce successfully the metals, especially Co. It is both of theoretical and economical importance to know the electronic and structural changes on the catalyst particles under the reduction and working conditions. The x-ray absorption spectroscopies, EXAFS, NEXAFS, are advantageous and offer the answer [19].

3 The investigation tools

For the NEXAFS studies a silica-supported cobalt catalyst with 13 wt% cobalt loading was used. Two different pretreatment methods were investigated one with large clusters of Co_3O_4 (above 15 nm) and a second sample, which appeared amorphous in XRD. The samples were characterized by XRD, EXAFS and catalytic tests [20].

The reducibility of cobalt containing bimetallic catalysts with noble metal promoters, Ru, Re, Pt was our second point of interest. The ratio of the two metals and the total loading was systematically varied. The total metal loading was 10wt% and, if not stated otherwise, a 1:9 Pt:Co atomic ratio was used (denoted as Pt10Co90/ Al_2O_3 and Pt10Co90/NaY). Only Al_2O_3 and zeolite, NaY were chosen as supports. The notation was similar for Ru, Re and Co bimetallic samples. The reduction of the catalysts was characterized by H_2 -TPR method too.

The Co $\text{L}_{\text{II,III}}$ edge spectra were collected at the LURE synchrotron facility in Orsay using the synchrotron radiation from the SACO storage ring running at 800 MeV with an average current of 300 mA and a lifetime of 10 h. The beam line (SACEMOR) placed after a bending magnet is equipped with a high-resolution Spherical Mirror-Plane Grating Monochromator (S. M.-P. G. M. 12 m).

In situ X-ray absorption experiments were also performed at LURE using the DCI storage ring. Measurements were performed in the transmission mode using ionization chambers. The estimated resolution for Co K and Pt L_{III} edges recorded at $E=7709$ and 11564 eV, respectively, was 3 eV. The sample was placed in a cell with a controllable atmosphere. The sample was heated under a stream of air to 400°C with a heating rate of $10^\circ\text{C}/\text{min}$. The powder was then held at this temperature for 2 h. After flushing with pure N_2 , the gas stream was switched to pure H_2 flow, and then the sample was cooled down under H_2 to room temperature for the collection of EXAFS spectra at the Co K and the Pt L_{III} edges.

Data evaluation is summed up in Figure 2. The experimentally determined absorbance function must be transformed. This consists of the following steps:

1. linear fitting of pre-edge part, extrapolation, subtraction of this line.
2. determination of the atomic absorption function.
3. $\Delta\mu$ construction, then $\chi(E) = \{\mu(E) - \mu_1(E)\} / \Delta\mu(E)$, "normalized function".
4. determination of E_0 , necessary for transformation to k-space.
"EXAFS oscillations" then transformed by Fourier -transformation.

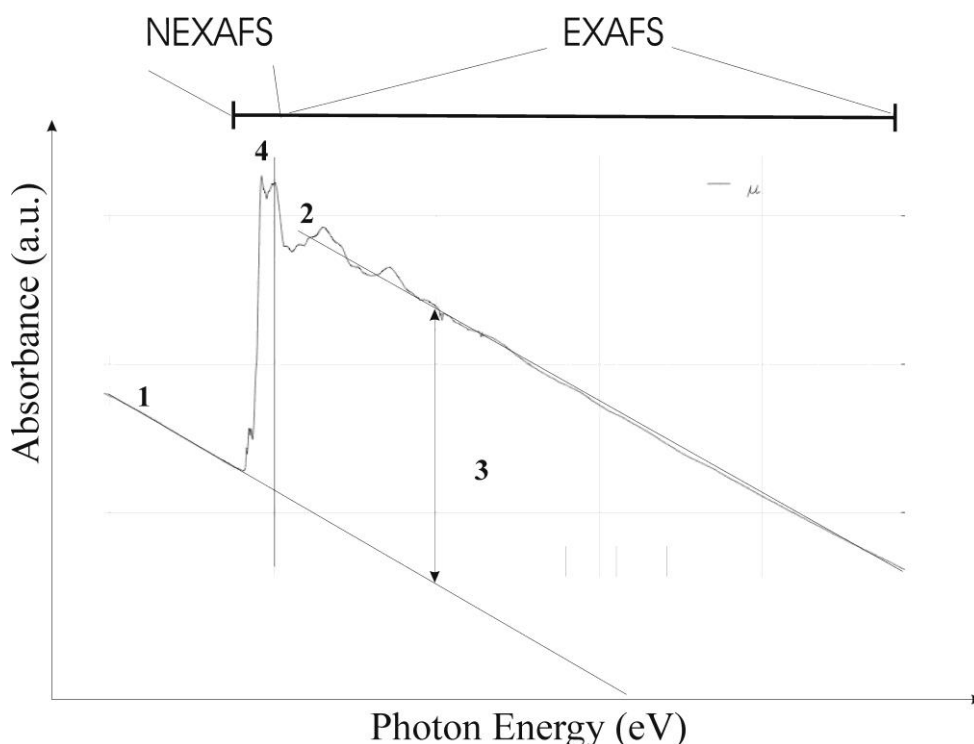


Figure 2. Some details of an XAS absorption edge. For further explanation see the text

The radial distribution function instead of k , the transformation the k^3 calculation is more sensitive to the second, third or higher neighbors. Forward and backward calculations are necessary to fit the proper atomic arrangements.

Structural parameters of the different reference compounds used in this work are available in previous publications for Pt [21] and for Co [22]. Regarding the Pt–Co bonds, the corresponding backscattering amplitude and phase were calculated using the FeFF code [23] assuming that the Debye–Waller factor associated with Pt–Co bonds is equal to that of Pt–Pt. Finally, the fitting procedure on the first coordination shell was performed using the classic single-scattering approximation.

The data range used in the forward k^3 weighted Fourier transform (FT) was 3.0–12.0 $\text{\AA}^{-1}$. For inverse k^3 weighted FT, numerical simulations were performed between 1.55 and 2.80 $\text{\AA}$ for Co and between 1.14 and 2.84 $\text{\AA}$ for Pt. During the fitting procedure, special attention was paid to the correlations among the coordination number (N), the Debye–Waller factor (σ) [24], the interatomic distance and the energy shift [25]. For all simulations, the edge shift ΔE was maintained at a value less than 4 eV [26]. The uncertainty in the coordination numbers (ΔN) evaluated from the EXAFS data is usually less than 20%. Least-squares fitting involves only a single coordination shell, which is well resolved from its neighboring shells. A typical residual equal to 10^{-2} has been obtained for each numerical simulation.

4 Results and Discussions

4.1 NEXAFS results on supported Co_3O_4

Figure 3 shows the Co L_{III} edge of “large” grain ($d > 15$ nm) catalyst sample together with some corresponding reference compounds. The rough data were baseline subtracted. Before interpreting the NEXAFS spectra we must refer to previous calculations done by De Groot [26]. Cobalt ions in different oxidation states and crystallographic positions differ in XAS fine structure, too. The theoretical and

experimental results confirm that the Co_3O_4 on support or as bulk material has a spinel structure. The NEXAFS of Co_3O_4 spinel is a linear combination of the Co^{2+} in T_d and two times the Co^{3+} O_h spectra. [27]

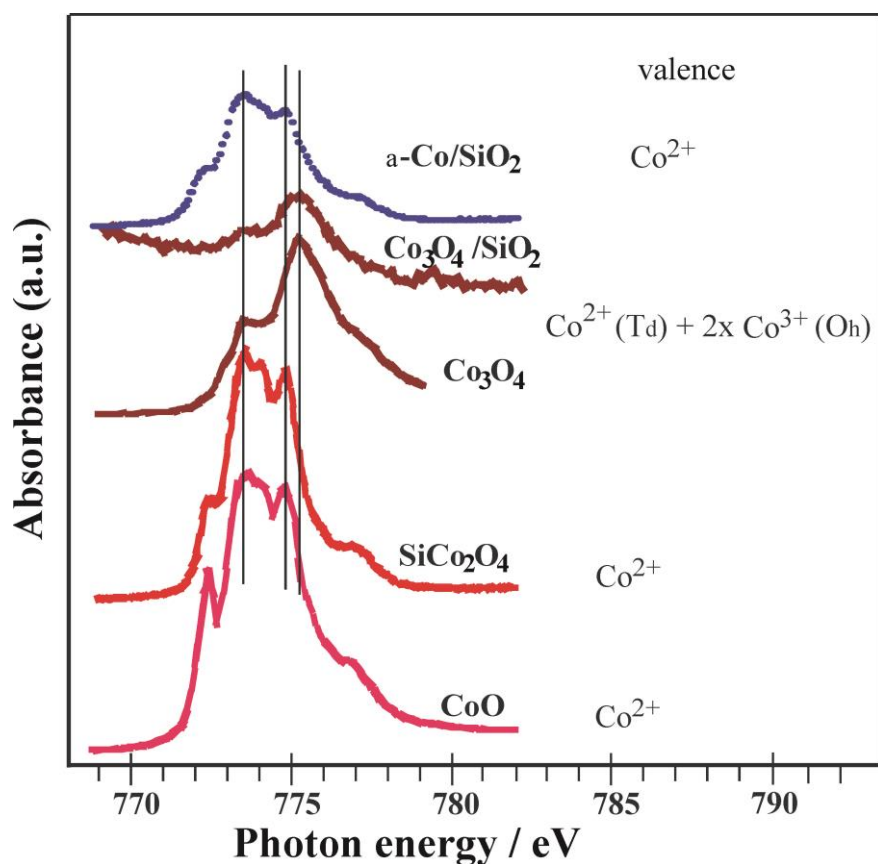


Figure 3. The Co- L_{III} edges of different Co containing compounds. The dominant Co oxidation state and crystallographic positions are indicated on each spectrum.

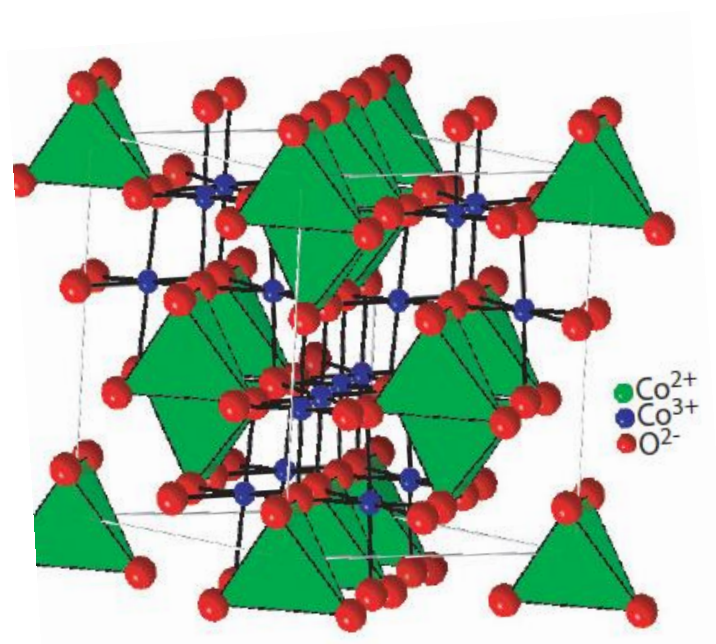


Figure 4. The spinel structure of the Co_3O_4 .

4.2 Bimetallic Pt-Co nano-alloy particles

The addition of Pt salt to the catalysts decreased the reduction temperature of Co salt to metallic Co from 800 °C down to 400 °C from the H₂-TPR measurements [28]. The interpretation of the effect of platinum loadings suppose structural studies, such as bimetallic alloy formation, or separate particles of reduced Pt adsorb the H₂ molecules and H atoms migrate to Co₃O₄. To answer these questions of the reduction of the Pt-Co bimetallic catalysts in-situ EXAFS studies were performed.

The NEXAFS part of the Co edge is shown in Figure 5a and in Figure 5b. The FT modulus was calculated from the EXAFS oscillation. Figure 6a presents the NEXAFS spectrum of Pt L_{III} edge while in Figure 6b the FT modulus of the EXAFS part is shown. Numerical simulations were carried out as described in section 3. The best fit parameters are collected in Table 1 and 2.

In the initial state both metals are surrounded by O atoms, with coordination numbers of 6 and 4.2-4.4, for Co₃ and for Pt, respectively. After reduction by H₂ metal-oxygen bonds disappeared and Co-Co and Pt-Co bonds appeared with ca. 2.5 Å length. The coordination numbers were around or below 8. This suggests that the first coordination sphere is not completed. Oxygen exposure changes the coordination of Co atoms, forming Co – O bonds. Some Co-Co remained and the Pt coordination was slightly affected by O₂.

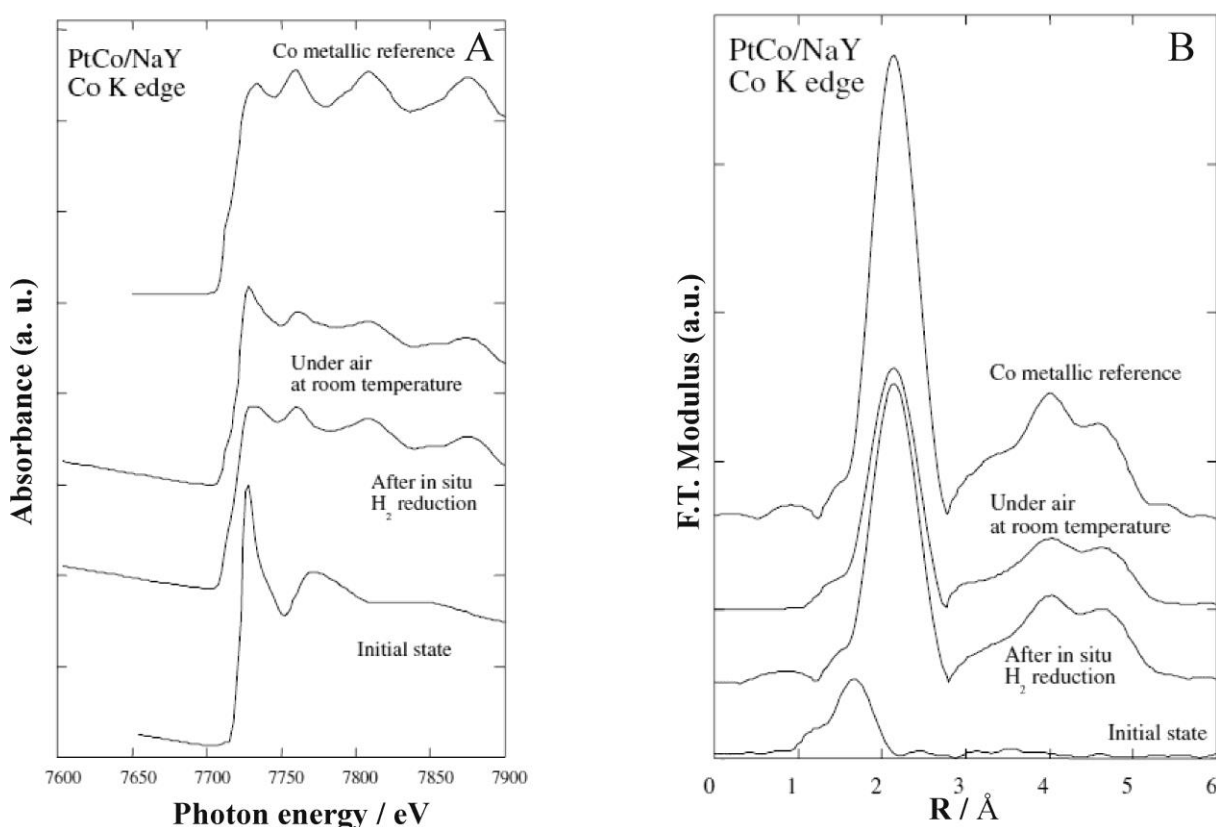


Figure 5. XAS collected near the Co K edge, a. NEXAFS and b. FT modules.

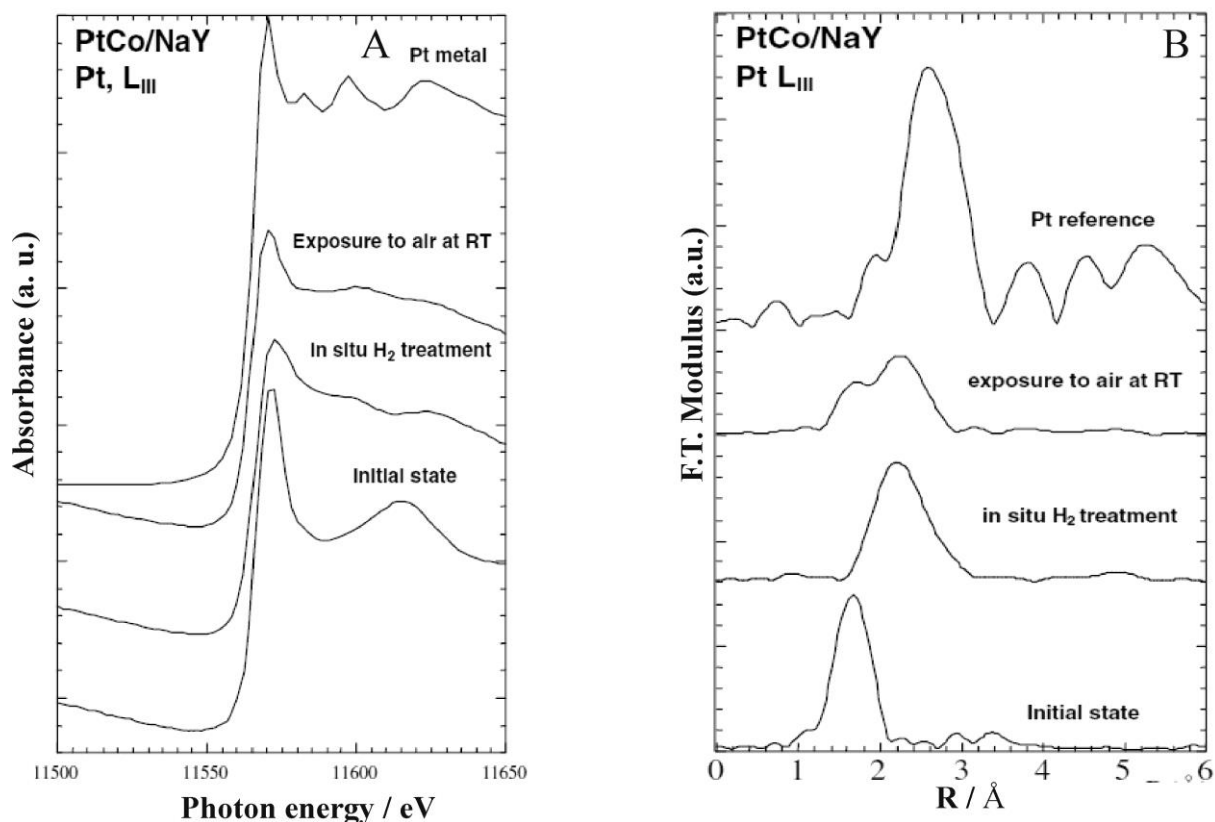


Figure 6. XAS collected near the Pt L_{III} edge, a. NEXAFS and b. FT modules.

Table 1. EXAFS data on the Co K edge

Sample	Treatment	N _{Co-O}	R _{Co-O} (Å)	N _{Co-Co}	R _{Co-Co} (Å)	Δσ (Å)	ΔN (eV)
Pt10Co90/NaY	Initial	6	2.08			0.003	0.0
	Reduced			7.7	2.5	0.003	0.0
	Oxidized			5.9	2.51	0.0	0.0

Table 2. EXAFS data on the Pt L_{III} edge

Sample	Treatment	N _{Pt-O}	R _{Pt-O} (Å)	N _{Pt-Co}	R _{Pt-Co} (Å)	Δσ (Å)	ΔN (eV)
Pt10Co90/NaY	Initial	4.4	2.05			0.017	0.26
	Reduced			5.4	2.57	0.026	1.9
	Oxidized	1.0	2.06	2.5	2.52	0.002	-0.001

5 Conclusion

From theoretical point of view, unless a commonly used theoretical model leading to the accurate electronic structure of metal nanoparticles is accepted, the application of X-ray absorption spectroscopy in heterogeneous catalysis is not simple. The interaction with the support, which induces a charge transfer and which may control the morphology of the cluster, has to be taken into account.

The results obtained on reference compounds and supported catalysts show that fine details at the Co L_{III} edge can be used as a fingerprint of the different phases present in the material as the L-edge spectra can be built through a linear combination.

Addition of Pt to Co containing catalysts facilitates the reduction of Co^{2+} ions and monometallic Co clusters and bimetallic Pt-Co nanosized particles are formed. EXAFS gives evidence of such particles.

6 Acknowledgements

The Author is greatly acknowledged to the late Professor László Guzzi for his guidance.

This work was supported by the COST D15 program, by the Chemistry Department of the CNRS, by the János Bolyai fellowship, from the H.A.S., by the Research Fund through Grant OTKA T 026 378 and by the Hungarian Synchrotron Committee.

The author is indebted to Dr. D. Bazin (Orsay, France) and Dr. F.M.F. De Groot (University of Groningen) for valuable help.

References

1. http://data.trendeconomy.com/industries/Crude_Oil_Balance/EuropeanUnion, last read at 19. 03. 2017.
2. Olah, G. S., & Molnar, A. (2003). *Hydrocarbon Chemistry*, 2nd edition, John Wiley & Sons
3. The European Automotive LPG Market: Current Status, Trends, and Forecasts A Report for the Cars 2020 Working Group on Clean Vehicles AEGPL, The European LPG Association., <http://www.aegpl.eu/media/81353/05%2027%202013%20-%20the%20european%20automotive%20lpg%20market.pdf> , last read at 19. 03. 2017.
4. <http://europe.autonews.com/article/20160630/ANE/160639997/diesels-will-have-just-9-of-europe-market-by-2030-study-says>, last read at 19. 03. 2017.
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_economy
6. Romm, Joseph. Tesla Trumps Toyota: Why Hydrogen Cars Can't Compete With Pure Electric Cars, *ThinkProgress*, August 5, 2014.
7. Teschner D., Woortsch A., Pozdnyakova-Tellinger O., Kröhnert J., Vass E. M., Hävecker M., Zafeirotas S., Schnörch P., Jentoft P.C., Knop-Gericke A., & Schlögl R., (2007). Partial pressure dependent in situ spectroscopic study on the preferential CO oxidation in hydrogen (PROX) over Pt/ceria catalysts, *Journal of Catalysis*, 249(2), 318-327, doi: 10.1016/j.jcat.2007.05.010
8. Tompos, A., Margitfalvi, J.L., Szabó, E.Gy., Pászti, Z., Sajó, I., & Radnóczy, Gy., (2009). Role of modifiers in multi-component MgO-supported Au catalysts designed for preferential CO oxidation, *Journal of Catalysis*, 266(2), 207-217, doi: 10.1016/j.jcat.2009.06.007
9. Luft, G., & Korin, A., (2009). *Energy Security Challenges for the 21st Century*. Santa Barbara, California: Praeger Security International. p.329. ISBN 978-0-275-99997-1
10. Balonek C. M., Lillebø, A. H., Rane, R., Rytter, E., Schmidt, L. D Holmen, A., Effect of Alkali Metal Impurities on Co–Re Catalysts for Fischer–Tropsch Synthesis from Biomass-Derived Syngas. *Catalysis Letters* (2010) 138:8–13, doi: 10.1007/s10562-010-0366-4
11. Wangen, E. S., Osatiashtiani, A., & Blekkan, E. A., (2011). Reforming of Syngas from biomass Gasification: Deactivation by Tar and Potassium Species, *Topics in Catalysis*, 54, 960-966, doi:10.1007/s11244-011-9718-6
12. Erdőhelyi, A., Raskó, J., Kecskés, T., Tóth, M., Dömök, M., & Baán, K., (2006) Hydrogen formation in ethanol reforming on supported noble metal catalysts, *Catalysis Today*, 116(2-3), 367-376.
13. Brandt, K., Steinhausen, M., & Wandelt, K. (2008). Catalytic and electro-catalytic oxidation of formic acid on the pure and Cu-modified Pd(111)-surface. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 616(1–2), 27–37, doi: 10.1016/j.jelechem.2007.12.015

14. Kovács, I., Kiss, J., & Solymosi, F. (2017). On the role of adsorbed formate in the oxidation of C1 species on clean and modified Pd(100) surfaces. *Vacuum* 138(1), 152-156. doi: 10.1016/j.vacuum.2016.11.037
15. van de Loosdrecht J. & J.W. Niemantsverdriet, J.W. (2013). Synthesis Gas to Hydrogen, Methanol and Synthetic Fuels, *Chemical Energy Storage*, (Schloegl, R. Ed.), Berlin, De Gruyter
16. Fischer, F. & Tropsch, H., (1926). Berichte der Bunsengesellschaft 59, 830
17. Khodakov, A. Y., Chu, W., & Fongarland, P., (2007) Advances in the Development of Novel Cobalt Fischer-Tropsch Catalysts for Synthesis of Long-Chain Hydrocarbons and Clean Fuels, *Chemical Reviews*, 107, 1692-1744.
18. Guzzi, L., (2005), nano-particles: featuring structure and reactivity, *Catalysis Today*, 101(2), 53-64.
- De Groot, F., Fuggle, J. C., Thole, B. T., & Sawatzky, G. A., (1990), 2p x-ray absorption of 3d transition-metal compounds, *Physical Review B*, 42 (9), 5459.
19. Guzzi, L., Sundararajan, R., Koppány, Zs., Zsoldos, Z., Schay, Z., (1997), *J. Catal.* **167**, 482.
20. Schneider, S., Bazin, D., Garin, F., Maire, G., Capelle, M., Meunier, G., & Noirot, R., (1999), *Applied Catalysis A-General*, 189(1), 139.
21. A. Khodakov, A., Lynch, J., Bazin, D., Rebours, B., Zanier, N., Moisson, B., & Chaumette, P., (1997), *Journal of Catalysis*, 168, 16.
22. Rehr, J. J., & Albers, R.C., (1990), *Physical Review B*, 41, 8149.
23. Sayers, D.A., in: X-ray Absorption: Principles, Applications, Techniques of EXAFS, SEXAFS and XANES, editors. Koningsberger, D.C., & Prins R., (Wiley, 1988).
24. Michalowicz, A., & Vlaic, G., (1998), *Journal of Synchrotron Radiation*, 5, 1317.
25. Guzzi, L., Hoffer, T., Zsoldos, Z., Zyade, S., Maire, G., & Garin, F., (1991), *Journal of Physical Chemistry*. 95, 802.
26. Bazin, D., Parent, P., Laffon, C., Ducreux, O., Lynch, J., Kovács, I., Guzzi, L., & De Groot, F., (1999) Following the reduction under H₂ of supported cobalt catalysts through the L absorption edges, *Journal of Synchrotron Radiation*, 6(3), 430-432, doi:10.1107/S0909049599000072
27. Bazin, D., Kovács, I., Guzzi, L., Parent, P., Laffon, C., DeGroot, F., Ducreux, O., & Lynch, J., (2000), Genesis of Co/SiO₂ catalysts: XAS study at the cobalt LIII, LII absorption edges, *Journal of Catalysis*, 189(2) 456-462, doi: 10.1006/jcat.1999.2654
28. Guzzi, L., Bazin, D., Kovács, I., Borkó, L., Schay, Z., Lynch, J., Parent, P., Lafon C., Stefler, G., Koppány, & Z., Sajó, I., (2002) Structure of Pt-Co/Al₂O₃ and Pt-Co/NaY bimetallic catalysts: characterization by in situ EXAFS, TPR, XPS and by activity in Co (carbon monoxide) hydrogenation. *Topics in Catalysis* **20**(1-4), 129-139. doi:10.1023/A:1016363702307

Imre Kovács studied chemistry in Szeged. After graduation in 1984, he was a fellow in the Reaction Kinetics Research Group of the Hungarian Academy of Sciences in Szeged. In 1990 he defended his Theses and in 1996 he obtained the C.Sc. degree. From 1996 to 2009 he was at the Institute of Isotopes of the Hungarian Academy of Sciences. Since 2013 he is at the College of Dunaújváros, which became the University of Applied Sciences. His scientific interests are in the field of solid state chemistry, physical and chemical properties of surfaces and catalysis. In his studies, among others, he used electron spectroscopic methods, (UPS, XPS, AES, EELS, HREELS), as well as (EXAFS, NEXAFS) and STM. His results were published in *Journal of Physical Chemistry*, *Surface Science*, *Journal of Catalysis* etc. and were referred more than 400 times at 2016.

DOLOČITEV OPTIMALNEGA DOLIVNEGA SISTEMA V ORODJU ZA BRIZGANJE POLIMEROV

DETERMINING OPTIMUM FEEDING SYSTEM IN INJECTION MOLDING TOOLS

Marica Prijanovič Tonkovič¹

¹ FINI Novo mesto, Šegova 112, 8000 Novo mesto, Slovenia
marica.prijanovic-tonkovic@guest.arnes.si

Marko Gazvoda²

²Tomplast d.o.o., Mirna, Slovenia
gazvodamarko@gmail.com

POVZETEK

Pri izdelavi izdelkov iz elastomera je pomemben dolivni sistem, po katerem teče talina elastomera, da na koncu dobimo ustrezen izdelek. V prispevku je predstavljena optimizacija dolivnega sistema pri orodju za brizganje elastomera.

Pri izdelavi optimizacije dolivnega sistema je bila uporabljena računalniška simulacija brizganja, ki je bila narejena s programsko opremo Cadmould. Na orodju s kombinacijo toplokanalnega in hladnokanalnega dolivnega sistema je bil optimiran hladnokanalni dolivni sistem. Za preiskavo smo uporabili elastomer vrste TPE TC8COZ trdote 80 Shore A. Preiskovali smo dva načina dovoda taline v kalupno votlino in sicer dovod polimera skozi osem in šestnajst dolivnih ustij. Na osnovi analiz je bil izdelan dolivni sistem, kjer se je zapolnjevala kalupna votlina skozi šestnajst dolivnih ustij. Tako je bila omogočena boljša nastavitev brizgalnih parametrov in posledično boljše dovajanje elastomerne taline v kalupno votlino brez pregrevanja in deformacij, ki degradirajo elastomerno maso.

Ključne besede: analiza, brizganje, elastomer, kalupna votlina, optimiranje, parametri, skrčec

ABSTRACT

In making products from elastomers, injection system through which the melt of elastomer flows, is very important in order to achieve the adequate product. This article presents the optimization of the injection system in the elastomer injection tool.

In optimization process of the injection system a computerized simulation of injection was used and it was made with Cadmould software. On the tool with a combination of hot runner and cold runner injection system, the latter was optimized. For this research we used elastomer of type TPE TC8COZ of hardness 80 Shore A. We researched two ways of feeding the melt into the mould cavity i.e. the feeding of polymers through eight and sixteen injection gates. Based on analysis we made a injection system where the mould cavity was filled through sixteen injection gates. This ensured better settings of injection parameters and consequently better feeding of elastomer melt into the mould cavity without overheating and deformations which impair elastomer melt.

Keywords: analysis, injection, elastomer, mould cavity, optimization, parameters

1 Uvod

Polimeri predstavljajo najpomembnejše tehnične materiale modernega časa. Za njihovo uspešno uporabo moramo poznati njihove prednosti in pomanjkljivosti. Lahko se predelujejo na več različnih načinov in sicer z ekstrudiranjem, vpihavanjem, brizganjem, vakuumiranjem. Poleg termoplastov in duroplastov se pogosto uporabljajo skoraj v vseh panogah termoplastični elastomeri, ki temeljijo na hidrogeniranem stiren-blok kopolimeru, poliolefinih, parafinskih belih oljih, anorganskih polnilih in drugih dodatkih (kraiburg-tpe.com, 2016, 23. april). Fizično so mešanica plastike in gume. Izkazujejo lastnosti obeh, saj so termoplastični elastomer ustvarili le s fizičnim mešanjem termoplastov in elastomera, med njima ni kemijske ali kovalentne vezi (Amin, S. & Amin, M., 2011, 29. september).

Pri procesu brizganja ima pomembno vlogo orodje za brizganje, v katerem je speljan dolivni sistem po katerem teče polimerna talina. Naloga dolivnega sistema je, da vodi raztaljeni polimer iz brizgalnega stroja po najkrajši poti, brez večjih izgub tlaka in temperature, do kalupne votline v orodju (Privšek, 2000, str. 21). Pravilno dovedena talina vpliva na kakovost in mehanske lastnosti izdelka.

Dovod taline v kalupno votlino se začne z izstopom taline na šobi brizgalnega stroja in vstopom v brizgalno orodje. Nato se pot nadaljuje po toplokanalnem in hladnokanalnem delu dolivnega sistema skozi zaviti tunelni doliv do ustja, ki predstavlja vhod v kalupno votlino orodja. Zaviti tunelni doliv se imenuje tudi »banana doliv« (Kunststoffe.de, 2017, 4. marec). Čeprav talina te kanale prepotuje v delčku sekunde, so učinki kanalov na talino veliki in se kažejo v najbolj ekstremnih pogojih, ki jih polimer izkusi v katerikoli fazi pri vseh metodah predelave.

Pogoje brizganja se lahko simulira s programsko opremo za brizganje polimerov, s katero pogosto ni mogoče natančno predvideti ekstremnih pogojev, ki delujejo na talino v razvejanih dolivnih kanalih. Na trgu obstajajo različne programske opreme za izdelavo simulacij brizganja. V naši raziskavi smo uporabili programsko opremo Cadmould (simcon-worldwide.com, 2015, 1. november).

Med polnjenjem kalupne votline vpliva na polimerno talino: brizgalni tlak, naknadni tlak, hitrost brizganja, zapiralna sila orodja in drugi parametri. Temperatura taline polimera pa je odvisna od:

- grelnih teles cilindra,
- protitlaka,
- hoda polža,
- časa zadrževanja mase v cilindru,
- število vrtljajev polža (Privšek & Rot, Ljubljana 2015, str. 100).

Vsi zgoraj naštetimi vplivi se na izdelku odražajo v dimenzijah, masi ali mehanskih lastnostih.

Pomemben del dolivnega sistema je ustje, ki mora biti pravilno dimenzionirano. Premajhen premer ustja se odraža v strižni napetosti materiala in prehitri zamrznitvi, ki preprečuje pravilno zapolnjevanje kalupne votline. Premer ustja je običajno od 30 do 70 % debeline stene izdelka. Pri brizganju izdelkov z manjšim premerom ustja smo običajno omejeni pri nastavitvi parametrov, predvsem pri velikosti in času delovanja nakladnega tlaka. Dolžina tunela pri tunelskem dolivku mora biti čim krajša, saj krajši tunel zmanjša padec tlaka in izboljša delovanje nakladnega tlaka ter zmanjšuje težave pri izmetavanju (Beaumont, 2007, str. 164–165).

S kakšno hitrostjo deluje sila na talino med brizganjem, nam pove strižna hitrost. Pretirana strižna hitrost degradira material. S strižno hitrostjo je neposredno povezana strižna napetost, ki je merilo striga v polimernem materialu. Če je material hitro ohlajen, je večja verjetnost, da so v izdelku ujete strižne napetosti, ki se niso sprostile med strjevanjem. To običajno pomeni zaostale napetosti v materialu in potencial za nastanek z njimi povezanih težav. Če se izdelek ohlaja počasi, se večina molekul, ki so pod napetostjo, lahko sprostijo (Beaumont, 2007, str. 60–61). Za material TPE TC8COZ (matweb.com, 2015, 14. november) je predpisana strižna hitrost 100000 s^{-1} .

Na kakovost brizganega izdelka vplivajo pravilno nastavljeni brizgalni parametri. Poleg tega pa je izdelek kakovosten, če je pravilno izdelan dolivni sistem. Naloga dolivnega sistema je, da pride raztaljeni polimer iz brizgalnega stroja po najkrajši poti in čim hitreje do kalupne votline orodja. Zato smo v članku preiskovali vpliv dolivnega sistema na kakovost izdelka iz elastomera, zlasti na zmanjšanje deformacij in skrčkov med brizganjem elastomera.

2 Material in način dolivanja

Predelava polimerov z brizganjem odpira velike uporabne možnosti. S tem postopkom se vse več predeluje tudi elastomere. V članku smo preiskovali predelavo elastomera vrste TPE TC8COZ. Preiskavo smo izvedli na brizgalnem stroju Krauss Maffei tipa KM 200 CX (kraussmaffei.com, 2017, 3. marec). Material smo nasuli v obliki granul v lijak, ga v cilindru z grelci stalili in talino pod tlakom vbrizgali v orodje, kjer se je polimerna masa strdila. Na koncu smo dobili izdelek TVVO (Slika 2.1), ki je vgrajen v sprednjih vratih avtomobila. V Tabeli 2.1 so podane dimenzije izdelka. Temperatura polimerne taline je bila v povprečju med 180 in 220 °C.

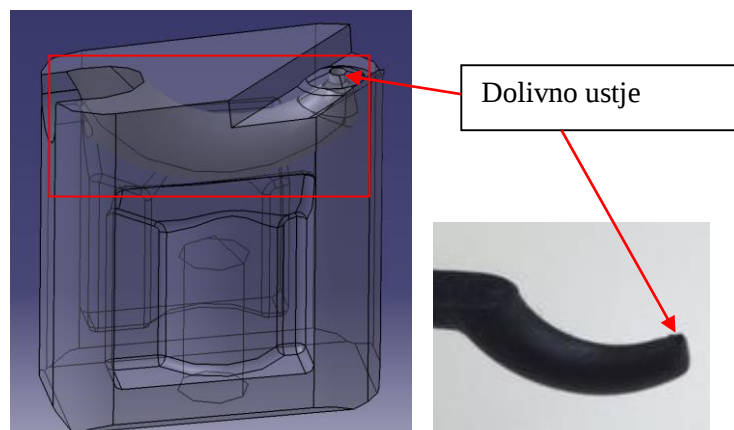


Slika 2.1. Izdelek TVVO levi in desni

Tabela 2.1. Karakteristike izdelka

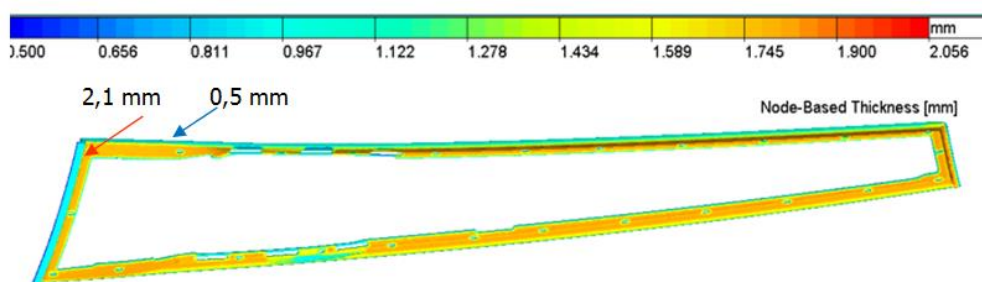
Podatki o izdelku	Vrednost
Dolžina [mm]	739,4
Širina [mm]	113,4
Višina [mm]	36,4
Masa izdelka [g]	37,6

Kot smo že navedli, mora biti dolžina tunela čim krajša, saj krajši tunel zmanjša padec tlaka in izboljša delovanje naknadnega tlaka ter zmanjšuje težave pri izmetavanju. Slika 2.2 prikazuje obliko tunnelskega dolivka na preiskovanem izdelku.



Slika 2.2. Zaviti tunnelski dolivek

Izdelek TVVO ima različne debeline stene, zato smo v dolivnem sistemu postavili dolivna mesta na najdebelejšo steno. S tem smo zagotovili, da je teka talina od debelejšega proti tanjšemu delu. Tako se prepreči možnost za posedanje površine in lunke v debelejših stenah, prav tako se zmanjša možnost nekontroliranega krčenja materiala. Na Sliki 2.3 je prikaz debeline sten na izdelku. Rdeča puščica kaže območje, kjer je debelina stene 2,1 mm, modra pa kaže najtanjšo steno izdelka, ki znaša 0,5 mm.



Slika 2.3. Debeline sten na izdelku

Iz Tabele 2.2 je pa razvidno, da ima izdelek različne debeline sten. Razlika med najtanjšo in najdebelejšo je 1,6 mm.

Tabela 2.2. Debeline sten na izdelku

Stena izdelka	Vrednost
Minimalna debelina stene [mm]	0,5
Največja debelina stene [mm]	2,1
Povprečna debelina sten [mm]	1,8

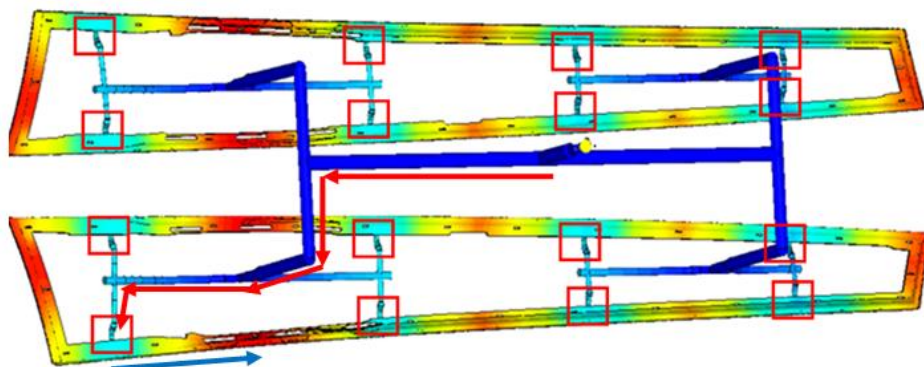
V članku smo preiskovali vpliv oblike dolivnega sistema na predelavo polimernega materiala in krčenje izdelka. Za preiskavo smo izdelali dva preizkusa simulacije s programsko opremo Cadmould in sicer:

- preizkus 1: dolivanje skozi osem ustij in
- preizkus 2: dolivanje skozi šestnajst ustij.

2.1 Dolivni sistem skozi osem ustij

Pri preizkusu 1 je bil dolivni sistem sestavljen iz toplokanalnega in hladnokanalnega dela, iz katerega je dotekala talina v kalupno votlino skozi 8 dolivnih ustij premera 0,44 mm. Drugi kanali hladnega dolivnega sistema so imeli premer od 4 do 5 mm. Na spodnji sliki (Slika 2.4) je prikazan dolivni sistem

in postavitev obeh izdelkov v orodju. Pozicije dolivnih mest so označene z rdečimi kvadrati. Na sliki je z modro barvo označen začetek polnjenja, z rdečo barvo pa mesto srečanja fronte taline iz sosednjega ustja. Zapiralna sila je bila 1756 kN, strižna hitrost pa 219200 s^{-1} .

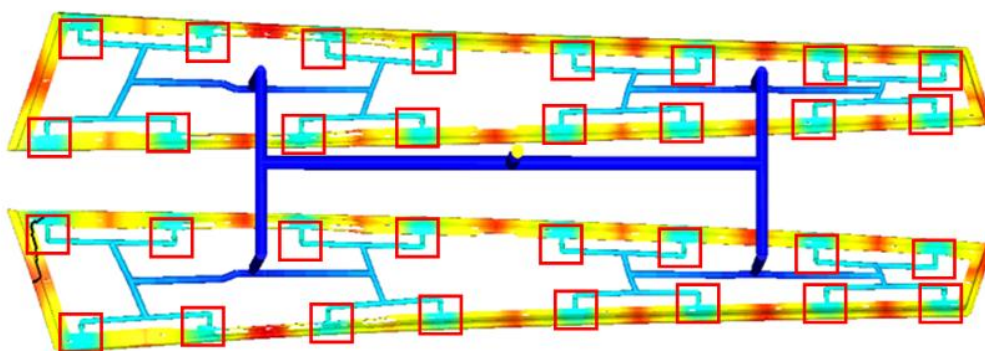


Slika 2.4. Dolivni sistem pri preizkusu 1

S pomočjo programske opreme Cadmould smo izračunali najdaljšo pot tečenja taline v hladnem dolivu in sicer od šobe do vstopa v kalupno votlino. Ta je znašala 270 mm (rdeča puščica). Nato smo izračunali še pot taline v kalupni votlini od dolivnega ustja do mesta hladnega spoja, ki je bila 120 mm (modra puščica). Pot, ki jo je talina opravila, je bila predolga, zato ni bilo mogoče vplivati na kakovost površine ter krčenje materiala z naknadnim tlakom.

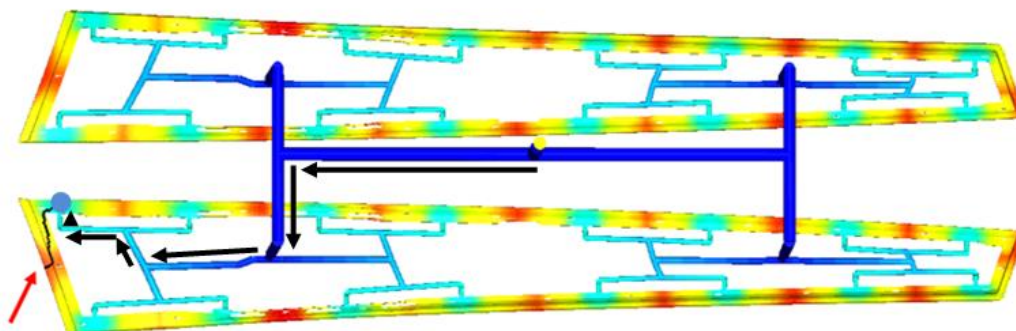
2.2 Dolivni sistem skozi šestnajst ustij

Pri preizkusu 2 smo spremenili število ustij. Izdelali smo simulacijo, kjer je dotekala polimerna talina v kalupno votlino skozi 16 dolivnih ustij premera 0,8 mm, medtem ko so kanali hladnega dela doliva imeli premer od 3,9 do 5,4 mm. Zapiralna sila je bila 1384 kN, strižna hitrost pa 70816 s^{-1} . Slika 2.5 prikazuje dolivna mesta, ki so označena z rdečimi kvadrati na izdelku. Na teh mestih vstopa talina v kalupno votlino.



Slika 2.5. Dolivni sistem pri preizkusu 2

Dolžina poti tečenja taline po hladnokanalnem dolivnem sistemu je bila 250 mm (črna puščica, Slika 2.6), v kalupni votlini od dolivnega ustja do točke hladnega spoja pa 63 mm. Na sliki 2.6 je z črno barvo označena pot tečenja taline po kalupni votlini od ustja (modra pika) do fronte taline iz sosednjega ustja (rdeča puščica).



Slika 2.6. Polnjenja kalupne votline preizkušanca 2

3 Rezultati in diskusija

V proizvodnem procesu smo imeli izdelke, ki dimenzijsko niso ustrezali zahtevi kupca, saj je med procesom strjevanja prišlo do nepravilnega skrčenja izdelka. Zato smo v raziskovalni nalogi preiskovali vpliv dolivnega sistema na brizganje polimera TPE TC8COZ in krčenje materiala po brizganju. Pri izdelavi orodja je določitev skrčka materiala zelo pomembna, saj vpliva na kakovost izdelanega orodja in izdelka. Za preiskavo smo naredili simulacijo brizganja, kjer smo ugotavljali kakovost brizganja skozi osem in šestnajst dolivnih ustij.

Primerjava rezultatov pridobljenih z računalniško simulacijo brizganja obeh načinov dolivanja pri orodju za brizganje izdelka TVVO je predstavljena v Tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Zbirna tabela podatkov dolivnega sistema preizkusa 1 in 2

Dolivni sistem	Preizkus 1	Preizkus 2	Enota
Število dolivnih ustij	8	16	/
Število hladnih spojev	8	16	/
Dolžina poti tečenja materiala v kalupni votlini	120	63	[mm]
Padec tlaka v kalupni votlini	503	88	[bar]
Povprečna temperatura na stenah kalupne votline	57	57	[°C]
Skupna deformacija po vseh treh oseh	5,66	2,37	[mm]
Največji prostorninski skrček	11,67	9,78	[%]
Povprečni linearni skrček	2,4	1,5	[%]

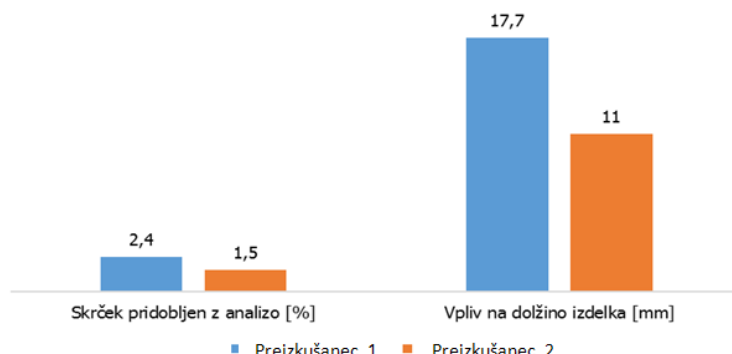
Na račun večjega števila dolivnih mest se je dolžina poti tečenja materiala v kalupni votlini močno zmanjšala. Tako so omogočeni boljši pogoji predelave materiala TPE TC8COZ in preprečeno je nekontrolirano krčenje izdelkov (Tabela 3.2).

Tabela 3.2. Primerjava linearnega skrčka obeh dolivnih sistemov

Koncept dolivnega sistema	Preizkus 1	Preizkus 2
Linearni skrček, pridobljen z analizo [%]	2,4	1,5
Vpliv na dimenzijo izdelka [mm]	17,7	11

Iz tabele je razvidno, da ima način dovoda taline v kalupno votlino velik vpliv na krčenje izdelkov. Rezultate preiskav pridobljene z računalniško simulacijo brizganja smo prikazali tudi grafično. Na Sliki 3.1 je prikazan linearni skrček obeh načinov polnjenja in kakšen vpliv ima na dimenzije izdelka, ki meri v dolžino 739,4 mm. S povečanjem števila dolivnih mest se je občutno zmanjšalo krčenje, ki se je

pojavljalo v izdelku. Tako se je preizkušane 2 skrčil za 6,7 mm manj, kot preizkušane 1. Kot je bilo omenjeno, je linearni skrček pogojen s prostorninskim skrčkom. Povezava med prostorninskim in linearnim skrčkom je odvisna od sprostitve napetosti in orientiranosti molekul, ki skupno rezultirata dimenzijsko ustreznost izdelka.



Slika 3.1. Primerjava obeh načinov dolivanja

Raziskava kaže, da je priporočljivo, kadar se uporabljajo materiali z velikimi skrčki ali materiali, ki so nepoznani, da se pred izdelavo serijskega orodja naredi prototipno orodje. Nujna je tudi izvedba računalniške simulacije brizganja, s katero se preveri tečenje materiala in obnašanje materiala v času celotnega procesa brizganja. S simulacijo brizganja se preveri način brizganja, ki si ga zamislimo na podlagi izkušenj in je dejansko orodje za preverjanje ideje. Za izdelavo orodja za serijsko proizvodnjo ni dovolj samo to, da se naredi računalniško simulacijo brizganja, temveč je treba upoštevati tudi izkušnje. Poleg tega pa prav tako ni mogoče predvideti vseh težav, ki se lahko pojavijo pozneje pri brizganju.

Tečenje polimerne taline v kalupni votlini je odvisno od mnogih dejavnikov, kot so predelovalne temperature, vrste materiala, temperatura orodja, vrsta dolivnega sistema itn.

Pri orodju za izdelek TVVO smo poti tečenja materiala v kalupni votlini skrajšali s 120 mm na 63 mm. Da z dolžino poti tečenja materiala vplivamo na krčenje izdelka, smo potrdili z rezultati dejanskega brizganja. Po izvedbi preizkusa 2 dolivnega sistema so bili izdelki dimenzijsko ustrezni.

4 Zaključek

Članek preučuje vpliv načina dolivanja pri orodju za brizganje elastomera na proces brizganja in kakovost izdelkov. Opisana sta dolivna sistema, ki smo jih analizirali s pomočjo simulacije s programsko opremo Cadmould. Na osnovi analiz simulacije smo izdelali dejanski dolivni sistem, pri katerem smo spremenili dovod taline v kalupno votlino.

Ugotovili smo, da dolivni sistem preizkušane 2 omogoča:

- boljše pogoje predelave materiala TPE TC8COZ in
- boljšo dimenzijsko ustreznost izdelka.

Kot je iz raziskave razvidno, je zelo pomembno, kakšen dolivni sistem je izbran za predelavo določenega materiala. Z izvedbo analiz je razloženo, kakšen vpliv ima koncept dolivnega sistema na kakovost izdelka in krčenje materiala.

Viri

1. Amin, S. & Amin, M. (2011, 29. september). Thermoplastic elastomeric TPE materials and their use in outdoor electrical insulation. *ResearchGate*. Pridobljeno na https://www.researchgate.net/publication/267698476_Thermoplastic_elastomeric_TPE_materials_and_their_use_in_outdoor_electrical_insulation
2. Beaumont, J. P. (2007). *Runner and Gating Design Handbook*, Munich: C. Hanser; Cincinnati: Hanser Gardner, cop. 2007
3. Kraiburg-tpe.com (2016, 23. april). *Thermolast K*. Pridobljeno na http://www.kraiburg-tpe.com/en/products/thermolast/thermolast_k
4. Kraussmaffei.com (2017, 3. marec). *Kraussmaffei*. Pridobljeno na <http://www.kraussmaffei.com/imm-en/>
5. Kunststoffe.de (2017, 4. marec). *Banana gates*. Pridobljeno na <https://www.kunststoffe.de/en/products/overview/article/inserts-for-tunnel-gates-banana-gates-637445.html>
6. Matweb.com. (2015, 14. november). *MATERIAL PROPERTY DATA*. Pridobljeno na <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=90a60eaaa35f42e5913021d1acf7f4c8>
7. Privšek, H., (2000). *Interno gradivo podjetja Hella Saturnus Slovenija: Orodja za tlačno litje termoplastičnih mas*. Neobjavljeno delo.
8. Privšek, H. & Rot, M. (2015). *Umetnost brizganja*. Škofljica: PROFIDTP, d.o.o.
9. Simcon-worldwide.com. (2015, 1. november). *Cadmould*. Pridobljeno na <http://www.simcon-worldwide.com/en/products-and-services/injection-molding-simulation/about-cadmould.html>

MULTIMODALNI LOGISTIČNI CENTER NOVO MESTO V FOKUSU GOSPODARSTVA SLOVENIJE ZA OSREDNJO IN JUGOVZHODNO EVROPO

Sašo Murtič

FINI Novo mesto, Šegova 112, 8000 Novo mesto, Slovenia
saso.murtic@fini-unm.si

POVZETEK

Na področju svetovnega gospodarskega razvoja se je v zadnjih tridesetih letih pričakovano zgodila razvojna revolucija, ki je globalno povezala svetovno industrijo, svetovni trg in velike mednarodne korporacije. Trg je ponudil nove proizvode, izboljšano in posodobljeno tehniko in tehnologijo, obenem pa so se na trgu pojavili novi in prej neznani proizvodi, ki so pritegnili številne kupce in spremenili toge postopke v proizvodnji in procesih, ki podpirajo proizvodnjo. Novi proizvodi so spremenili obliko komuniciranja, povezovanja, prenosa podatkov in elektronskega poslovanja. Izvedeni so bili novi premiki na področju gospodarskega medorganizacijskega povezovanja ter na področju medijske tehnologije in digitalizacije gospodarskih postopkov (Davidović, 2000). Prav tako so bili izvedeni veliki znanstveni koraki tudi na področju avtomobilske industrije, ki so uvedli robote v proizvodnjo. Industrija je dizajnirala in oblikovala nova in sodobnejša motorna vozila, razvila so se električna vozila. Na področju infrastrukture so bile zgrajene nove in hitre železniške povezave, v zračnem prostoru pa so se pojavili nizkocenovni prevozi med celinami sveta. Prišlo je do gospodarskega razvoja Kitajske, Indije in drugih delov vzhodnega sveta, kjer so se odpirala nova tržišča. Prišlo je do velike ekspanzije proizvodov med celinami, sledila je menjava blaga med Evropo, Azijo, Ameriko in drugimi kontinenti. Prišlo je do sprememb tudi na področju trajnostnega razvoja, varovanja okolja in narave, do selitev prebivalstva in splošne medkulturne ekspanzije. Nagle in zahtevne spremembe lahko pripišemo globaliziranemu razvoju gospodarstva, globalizaciji proizvodnje in trga, logistiki ter logističnim procesom. Vse skupaj je v marsičem spremenilo potek in razvoj sveta, povzročilo številne premike v smislu širitve trga in medcelinskega povezovanja. Vsi ti premiki so močno vplivali tudi na infrastrukturo, transport in logistiko. Pojavil se je nov kontejnerski medcelinski transport, ki je zahteval razvoj pristanišč v obmorskih in rečnih krajih. Razvili so se veliki multimodalni logistični centri, ki so sprejemali blago ter izvajali logistične procese za naročnika. Države so železnico in ceste priključevali k pomorskim in rečnim lukam in gradili letališča v neposredni bližini. V sklopu tega razvoja smo, skozi relevantne in preverjene podatke iskali možnosti za umeščanje multimodalnih logističnih centrov v prostoru Slovenije ter njihovo povezanost v regiji in izven Republike Slovenije. Novo mesto z okolico smo opredelili kot gospodarsko najbolj razvito regijo v državi in postavili hipotezo, da je mogoče v njegov prostor umestiti sodoben logistični center, ki bi v fokusu gospodarstva Slovenije imel pomembno vlogo pri izvajanju logistike in logističnih procesov za osrednjo in jugovzhodno Evropo.

Ključne besede: multimodalni, infrastruktura, logistika in logistični procesi, kontejnerizacija, digitalizacija, logistična platforma.

1 Uvod

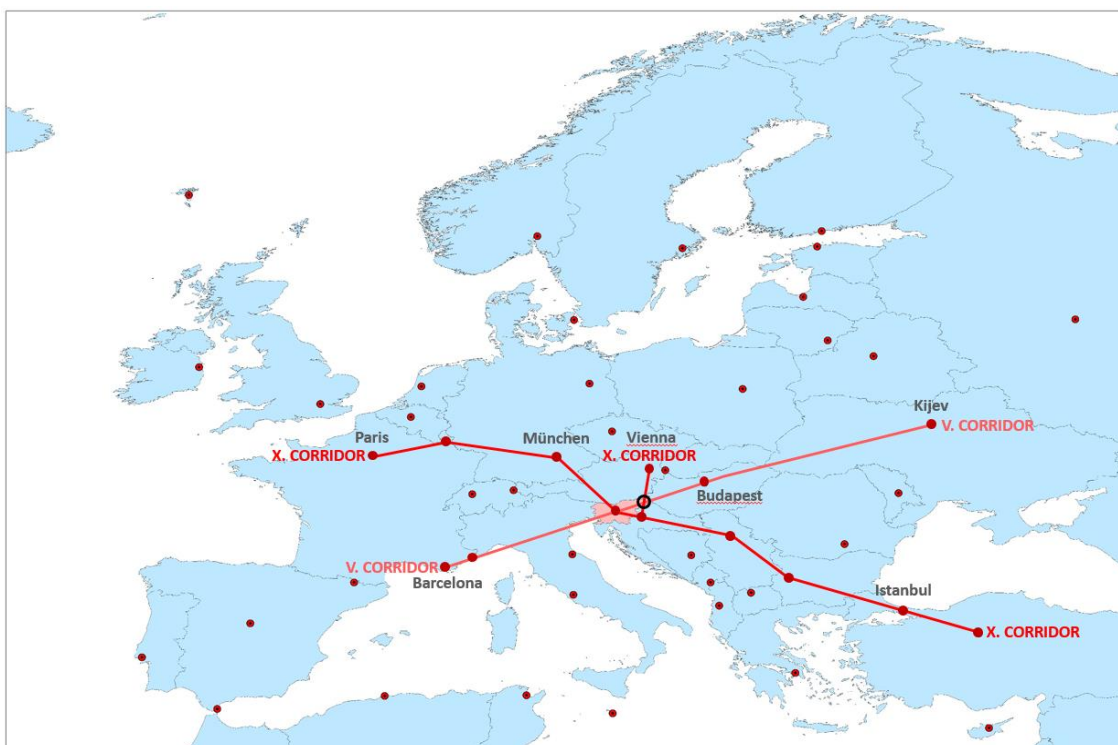
Razviti svet, predvsem razvite države Evrope, Amerike in ne Azije so v letih globalizacije spoznale, da je delovanje industrije in celotnega gospodarstva zastarelo. Nekateri proizvodi so bili prepoznani za neuporabne, trg je postal zasičen z neuporabnimi artikli, istočasno se je začel ekspanzijski razvoj industrije in gospodarstva v državah, ki so do sedaj imele dolgoletno gospodarsko stagniranje. Na Evropsko in Ameriško tržišče je nekontrolirano vse bolj prodiralo poceni izdelano blago s Kitajske, Indije, Tajske, Turčije in drugih držav z vzhoda. Prodor tekstila in tekstilnih izdelkov z vzhoda je zdesetkal tekstilno industrijo v Evropi in kljub dogovorjenim uvoznim kvotam, Evropa in Evropska unija nista zmogli nadzirati pretoka blaga. Proizvajalci tekstila so spoznali, da je ceneje uvažati gotove izdelke iz Tajlanda, Kitajske, Turčije in drugod ter jih prodajati pod lastno znamko. Nekateri so svojo proizvodnjo selili v države s cenejšo delovno silo, nekateri pa so iz svoje proizvodnje izločili logistiko in številne logistične procese, ki so jih kupovali na prostem trgu. Prišlo je do spremenjene proizvodnje in do velike globalizacije (Stiglitz 2002), ki je zajela predvsem Združene države Amerike, posledično pa vse države, ki so z njo poslovali. Nagle spremembe so povzročile povečano gibanje blaga, kapitala in ljudi, kar so države s težavo nadzirale, še manj so nadzirale varstvo okolja in zdravja ljudi. Države niso uspevale nadzirati pretoka blaga, proizvodnje in menjave, kar je pomenilo tudi neučinkovito obdavčevanje in manj taks v državnem proračunu. Združenja držav so pričela sklepati sporazume o menjavi blaga, določene so bile kvote in države uvoznice. Ekspanzijski razvoj Kitajske, Indije in drugih držav Azije in Afrike, je povzročil odprtje novih tržišč za Evropsko in Ameriško avtomobilsko industrijo. Velike količine pripeljanega blaga na tržišča so pogojevale nove oblike in postopke transporta. Razvil se je kontejnerski transport, ki v 75% potuje z ladjami po morjih in večjih rekah, le manjši del (25%) po kopnem in še manjši del v zračnem prostoru (Ogorelec 2004). Nova oblika menjave blaga je povezala svetovno industrijo, svetovni trg in velike mednarodne korporacije, posledično pa se je oblikovala nova logistika in logistični procesi (Zelenika 2001), ki postopke mednarodne menjave omogočajo (Logožar 2002, 2004). Trgovci so spoznali, da morajo med seboj sodelovati in tako se je oblikoval nov model menjave blaga in obvladovanja tržnega območja na posameznih celinah, oziroma v posameznih državah.

Na področju avtomobilske industrije je bil narejen velik korak na področju dizajna in konstruiranja vozil, pojavila so se vozila z električnim pogonom, prav tako so v vozila pričeli vgrajevati elektronsko opremo, ki omogoča boljši nadzor nad vozilom, samodejno parkiranje in avtopilote. Razvil se je množični industrijski inženiring, ki je omogočil nove patente, nove in izboljšane sklope vozil in druge tehnike. Znanost je ponovno naredila velik korak v razvoju sodobne tehnike in tehnologije. Gibanje blaga, kapitala in ljudi je povzročilo izgradnjo velikih pristanišč, velikih logističnih centrov in sodobnejše infrastrukture. Države so med seboj tekmoval v pridobivanju ladjedelniškega transporta, gradile velika pristanišča in velike logistične centre. V pristaniščih so zgradile železnico, avtocesto in v neposredni bližini tudi letališča. Posledično so se razvile nove transportne tehnologije (Gajšek 2007) in sodobni logistični centri, ki nudijo različne oblike storitev.

1.1 Področje raziskave (znanstvena problematika)

Strategija razvoja prometa v Sloveniji (Sklep Vlade RS, št. 37000-3/15/8), Nacionalni program razvoja železniškega prometa v Sloveniji (Uradni list RS, št. 13/96, 75/16 – ReNPRP30), Resolucija o Nacionalnem programu razvoja civilnega letalstva (Uradni list RS, št. 113/06 in 33/09), Resolucija o nacionalnem programu razvoja prometa v Republiki Sloveniji za obdobje do leta 2030 (ReNPRP30), stran 10524. in predpisi EU so Sloveniji narekovali spremljanje gospodarskega in infrastrukturnega razvoja Evrope in širše. Razvite države Evrope so se hitro prilagodile gospodarskim spremembam,

razvile in posodobile so pristanišča, širile letališko infrastrukturo ter posodabljale železnico. V področju transporta ljudi in tovara so videli prednost v železnici (razvili so hitre železnice), vendar so še vedno ohranjale in posodabljale avtoceste, saj omogočajo velike in hitre pretoke blaga, kapitala in ljudi (Murtič, 2012). V Sloveniji po osamosvojitvi ni bilo veliko vlaganj v infrastrukturo, ampak so bili šele kasneje vidni premiki v izgradnji avtocestnega križa, ki je povezoval pristanišče Luko Koper z Ljubljano in naprej proti Madžarski, Ukrajini, Rusiji ter proti Avstriji in naprej. Vzpostavljena avtocestna povezava v smeri Hrvaške in naprej je povezala Slovenijo z osrednjo in jugovzhodno Evropo. Zaradi dogodkov na Balkanu, je železnica bila zapostavljena, povezava z osrednjo in jugovzhodno Evropo pa je bila prekinjena. Po umiritvi razmer je na nivoju Evropske Unije bila sprejeta nova transportna politika vezana na razvoj transnacionalnih evropskih transportnih koridorjev v sklopu katere je bila sprejeta tudi Uredba (EU-LEX 32013R1315, št. 1315/2013) glede smernic EU za razvoj vseevropskega prometnega omrežja. Uredba na nivoju Evrope uvaja usklajen razvoj prometnega omrežja, ki predvideva posodabljanje in nadgrajevanje obstoječih železniških sistemov, gradnjo manjkajočih delov omrežja, odpravo nivojskega križanja, s hkratnim uvajanjem novega inženiringa in novih logističnih procesov, ki bodo omogočili čim večjo učinkovitost posameznih sistemov ter njihovo povezljivost v enoten učinkovit sistem. Pri tem je ključno podpreti združevanje posameznih prometnih sistemov znotraj posameznega transportnega koridorja, saj se s tovrstnim združevanjem zmanjšujejo vplivi na okolje in okoljska tveganja za Slovenijo in Evropo. Koridorji avtoceste, železnice in pristanišč se povezujejo, dopolnjujejo in omogočajo umeščanje MMC v prostor Slovenije. Raziskava je pokazala, da je Slovenija zaradi svoje lege, v zgodovinskem razvoju morala slediti evropskemu razvoju cestnega in železniškega omrežja. Kratek pregled nam pove, da je Slovenija svojo prvo železniško povezavo s preostalo Evropo dobila že leta 1846, ko je bila v sklopu Avstro-Ogrske monarhije, in sicer z železnico vzpostavljeno povezavo med Gradcem in Celjem. Ob vzpostavitvi prve železniške proge do I. svetovne vojne so bili s Trstom, Zagrebom, Reko, Celovcem, Beljakom in Trbižem povezani tudi nekateri drugi slovenski kraji, na teritoriju Slovenije pa je bila v tem času zgrajena tudi večina današnjih lokalnih železniških povezav. Z vidika povezljivosti slovenskega prostora s preostalim delom Evrope je zagotovo ena pomembnejših tako imenovana Južna železnica Dunaj-Trst (zametek današnje V. koridorja), ki je bila dokončana leta 1857 (Wikipedija, marec 2016). Razvoj železnic na slovenskem je doživel nov preporod v času skupne države Jugoslavije (prej še Kraljevine SHS), ko so čez ozemlje Slovenije zahodno in osrednjo Evropo povezali z Bližnjim vzhodom – zametek X. koridorja. V tem času so med Parizom, Ljubljano, Zagrebom, Beogradom in Istanbulom redno vozili vlaki med katerimi je bil najbolj znan Orient Express (nočni skok). Spremenjene geopolitične razmere so vplivale tudi na železniški promet, saj so se z ustanovitvijo Evropske Unije in razpadom Jugoslavije spremenili tudi prometni tokovi, kar je pripeljalo do zaviranja razvoja železnic in današnjega stanja na področju železniškega prometa v državi. S poudarkom na razvoju cestnega prometa, predvsem na veliko vlaganje in izgradnjo avtocestnega križa Jesenice-Brežice in Murska Sobota-Koper, se je močno ustavil razvoj železnic. Posledično so bile zaradi upada prometa in nerentabilnosti ukinjene določene železniške proge, s čimer je bila z vidika enakomernega oziroma trajnostnega razvoja našega prostora ponekod storjena nepopravljiva škoda. S prostorskim razvojem določenih krajev so bili namreč pozidani koridorji obstoječih železnic, s čimer je bil trajno izgubljen dragocen prostor. Osrednja evropska lega in strateški položaj Slovenije, kjer se križajo mnoge cestne, železniške in zračne poti ter dostop do morja, dajejo obsežne možnosti za razvoj naše države, zato je ključno, da Slovenija v svoji strategiji in razvoju sledi ciljem razvoja Evropske Unije na področju posodabljanja transnacionalnih omrežij transportnih koridorjev. S tem se omogoči večjo povezanost gospodarstva Slovenije z osrednjo in jugovzhodno Evropo. Vse to daje Sloveniji priložnost, da ob dobro umeščeni infrastrukturi zgradi velike MMLC, ki bodo omogočili pretok blaga, ljudi in kapitala, s čimer bi omogočili Sloveniji postati pomembna država v Evropski Uniji, ki razvija in podpira gospodarske tokove osrednje in jugovzhodne Evrope (Murtič, Janžovnik, Blatnik, 2016).



Slika 1. Prometne povezave. Vpetost Slovenije v transnacionalne koridorje (vir: E-GURS, podlaga: portal EU).

1.2 Multimodalni logistični center kot znanstvena hipoteza

Logistika kot znanstveni pojem, kot definicija in kot uporabna dejavnost je v prostoru Republike Slovenije za državo in za gospodarske družbe postala pomembna po osamosvojitvi. Podatki kažejo, da so prizadevanja za vključitev Slovenije v mednarodne gospodarske tokove stara že nekaj desetletij, njeno povezovanje z državami zahoda pa se je začelo že v trajnostnem razvoju prej skupne države. Slovenija se je v zgodnjih sedemdesetih in osemdesetih letih prejšnjega stoletja povezovala s številnimi državami razvite zahodne in severne Evrope, s čimer je že tedaj omogočila industrijsko proizvodnjo na področju avtomobilizma (Revoz Novo mesto, Adria in TPV), elektronike (Iskra, Gorenje, LTH), farmacije (Krka in LEK), telekomunikacij, medijev in številnih drugih področij, ki so bili z vidika gospodarstva pomembna za razvoj države. Skozi gospodarske povezave, se je razvijala tudi logistika in logistični procesi, ki so s svojimi postopki in operacijami omogočali industrijsko proizvodnjo in medorganizacijsko sodelovanje. Pojavila se je nova paradigma meodorganizacijskega obvladovanja logističnih procesov in delitve dela med posameznimi fazami industrijske proizvodnje.

Kljub vidnim povezavam Slovenije in slovenskega gospodarstva z državami razvitega zahodnega dela Evrope se je postavljalo ključno znanstveno vprašanje, kako in v kolikšni meri Slovenija v sodobnih razvojnih časih lahko sledi spreminjanju sveta, Evrope in Evropske unije. Prav tako se je postavljalo vprašanje ali je Slovenija lahko spremljala spreminjanje na področju logistike in logističnih procesov, kar smo želeli raziskati, ter podati ugotovite glede možnosti za umeščanje multimodalnega logističnega centra (V nadaljevanju: MMLC) v posamezne regije. Iz ugotovitve, da je Evropa kmalu spoznala, da je za dvig konkurenčnosti v svetovnem trgovinskem prostoru potrebno imeti tudi dobre cestne in železniške povezave ter hitre dostope do pristanišč in letališč, ne preseneča dejstvo, da so številne evropske države prepoznale lastne transportne potenciale ter začele svoj razvoj usmerjati v infrastrukturne projekte in povečevanje kapacitet parkirišč in letališč v sklopu katerih so nastajali logistični centri. Čemu bi služili novi MMLC, če ne pretoku blaga, kapitala in ljudi, obenem pa bi

ponudili logistične storitve, ki omogočajo razvoj gospodarstva in trgovine (vse infrastrukture gredo v MMLC). Novi globalni izzivi, zlasti spoznanje, da je za prihodnost našega planeta ključen trajnosten razvoj, je tudi v Sloveniji pripeljal do novih paradigem v smislu transporta, skladiščenja itd., zato ni presenečenje, da se v novi perspektivi Evrope za obdobje 2013-2020 velik poudarek daje predvsem nizkoogljičnim oblikam transporta (ceste - električna vozila, železnice - elektrifikacija, pomorske poti in letališča), povezovanju različnih oblik transporta (multimodalnost), celotnim prometnim strategijam in pametni specializaciji v sklopu katere se daje poudarek tudi na oblikovanju pametnih mest in umeščanju MMLC v prostor.

Dostopni podatki opozarjajo, da se je Slovenija na nastale spremembe prepočasi odzivala, prepočasi je prepoznala potrebe gospodarstva, potrebe po prestrukturiranju določenega dela gospodarstva in ni sledila razvoju pristanišča, železnice (drugi tir Divača - Koper), ter razvoju MMLC. Ponoven zagon gospodarstva, prepoznavna dejstva, da je trgu potrebno ponuditi kakovostne izdelke in kakovostne storitve, je Slovenijo prisililo k iskanju lastne podobe v vseevropskem prostoru. V tem času so v sosednjih državah pohiteli z gradnjo cest in železniškega omrežja, pospešeno razvijajo pristanišča in letališča, v neposredni meji s Slovenijo gradijo velike MMLC in slovenskemu gospodarstvu jemljejo delo. Slovenija nima razdelane strategije razvoja logistične platforme za osrednjo in jugovzhodno Evropo in nima povezanih MMLC, ki bi povezovali železnico, cesto, pristanišče in letališča, čeprav ima vse naravne in gospodarske predpogoje. Umeščenost industrije v prostoru kaže potrebo po sodobnih centrih, ki bi nudili logistiko in logistične procese, ki jih industrija v svoji dejavnosti nima.

1.3 Vizija razvoja logistike

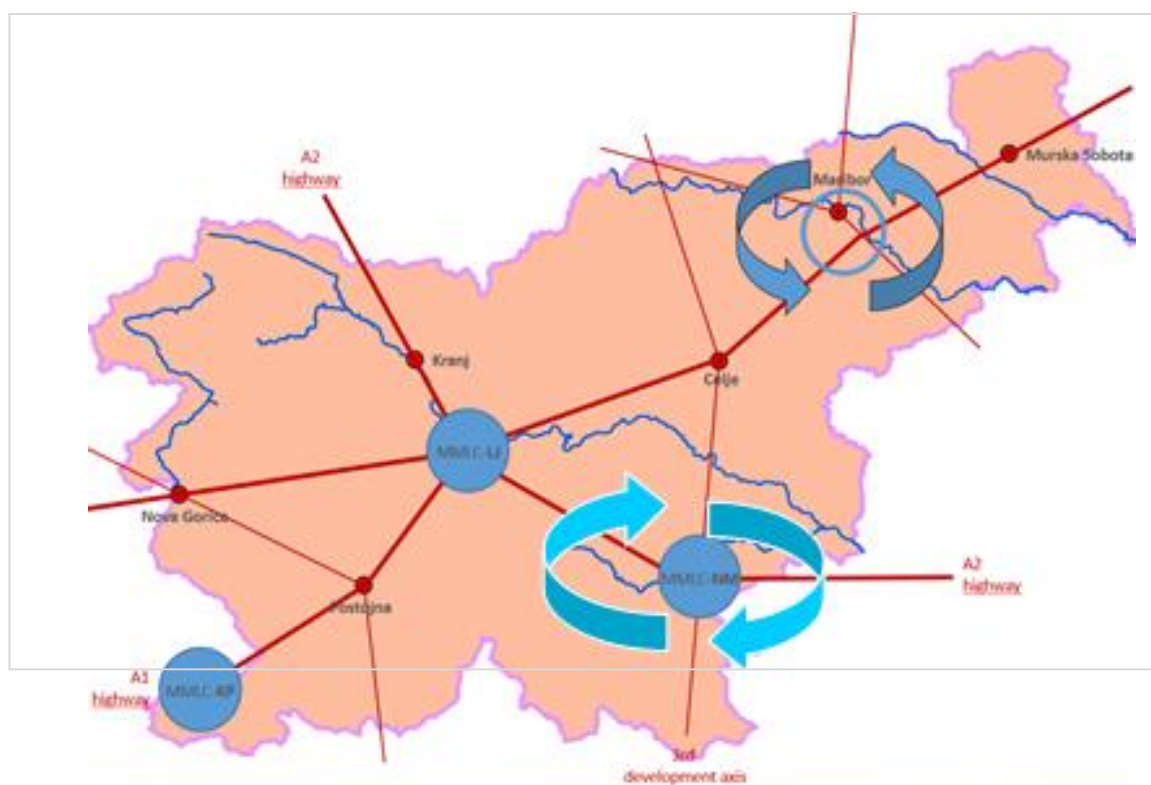
Skozi prizmo vizije gospodarstva Slovenije lahko ugotovimo, da so v preteklosti bili poskusi priprave vizije razvoja v obliki projektov za celotno ozemlje Slovenije, vendar so ti projekti bili politično pogojeni. V letu 2009 je bila na Ministrstvu za promet razvita ideja o projektu »*Slovenija logistična platforma za osrednjo in jugovzhodno Evropo*« (Jakomin 2009), bile so organizirane znanstvene in strokovne konference v Mariboru, Ljubljani in Portorožu, na katerih smo poudarjali pomen in potrebo po umeščanju MMLC v prostor Slovenije. Izvedene so bile številne naložbe, zlasti v cestno infrastrukturo (Novice, 27.11.2009 – Hotel Kranjska Gora), ki so vzpodbudila zanimanje tujih investorjev (Ferligoj, Leskovšek, Kogovšek 1995), prihajale so številne delegacije iz Šanghaja, Hong Konga, Malezije in drugih pomembnih gospodarsko razvitih držav, vzpostavljene so bile številne politične in gospodarske meddržavne povezave (Čizman 2007), s čemer se je obetal razvoj in tuja vlaganja v gospodarstvo, infrastrukturo, MMLC in prostor Republike Slovenije. Z načrtnim razvojem in vlaganjem tujega kapitala naj bi Slovenija svoj logistični razvoj usmerjala v štiri celovita in gospodarsko zaokrožena območja: Koper (Luka Koper), Ljubljano (Zalog-Polje), Novo mesto z okolico ter Maribor (Letališče Edvarda Rusjana). Določitev MMLC so temeljili na prepoznavi že obstoječe povezovalne infrastrukture in že obstoječih industrijsko razvitih območij, ki še delujejo ali ki imajo vse potencialne za ponoven zagon in vključitev v trajnostni razvoj. Obstoječi avtocestni in železniški križ sta povezana v mednarodne infrastrukturne koridorje in prostoru Slovenije dajeta realne možnosti za dober pretok blaga, ljudi in kapitala, Pristanišče in državna letališča pa so v podporo železnici in cesti ter omogočajo odlične povezave ter spodbujajo gospodarsko rast. Tudi velika slovenska mesta (Ljubljana, Maribor, Koper...) so podprla gospodarski razvoj in umeščanje s projektom predvidene platforme, vendar je vse ostalo samo pri tem. Vizija razvoja sicer ima svetlejšo prihodnost, vsaj če pogledamo prizadevanja Vlade Republike Slovenije in slovenskega gospodarstva za izgradnjo drugega tira med Divačo in Kopro, umeščanjem gospodarske družbe Magna d.d. v prostor ob letališču Edvarda Rusjana Maribor, povezanosti železnice in ranžirne postaje v Ljubljani z BTC in posebej z umeščanjem MMLC

Novo mesto z okolico, ki vključuje gospodarstvo Dolenjske, Posavja in Bele Krajine, kjer se povezuje logistični center Feniks v Cerkljah na Dolenjskem z industrijo Novega mesta in okolice.

Z umeščanjem MMLC v prostor Novega mesta z okolico bi bilo mogoče industrijo in druge gospodarske veje Dolenjske, Posavja in Bele Krajine povezati z osrednjo in jugovzhodno Evropo ter osrednjo in jugovzhodno Evropo z razvitim delom Evrope.

1.4 Dosedanje aktivnosti in ocena dosedanjega dela

V iskanju ustreznih rešitev za slovensko gospodarstvo je Vlada Republike Slovenije načrtovala in sprejela številne strategije razvoja infrastrukture, industrije in posameznih gospodarskih vej. Povezovala je slovensko industrijo in gospodarstvo s sorodnimi v Evropi in zunaj nje, poiskala investitorje, ki bi bili pripravljeni vlagati v prostor ter iz proračuna financirala tiste veje gospodarstva, ki so bile nujne ali so kazale možen hiter napredek.



Slika 2. Predvideni logistični centri v Sloveniji. Slovenija kot logistična platforma s štirimi MMLC-ji (vir: E-GRUS, podlaga: RPE-meja SLO, GURS 2015).

V sklopu vizije razvoja Slovenije, je Vlada za MMLC Luka Koper sprejela državni prostorski načrt za celovito prostorsko ureditev pristanišča za mednarodni promet Koper, in sicer leta 2011 (Ur. l. RS, št. 48/11). Po vzorcu Luke Koper, ki je že delovala kot urejen MMLC, je s projektom urejanja logističnih con bilo predvideno, da Republika Slovenija z državnimi prostorskimi načrti (v nadaljevanju: DPN), načrtuje in umesti v prostor MMLC Ljubljana, Maribor in Novo mesto. Na umeščene MMLC bi povezala obstoječo infrastrukturo in tako omogočila delovanje celotnega gospodarstva, mednarodni pretok blaga in storitev, mednarodno povezovanje industrije in drugega gospodarstva ter tako sledila razvoju Evropske Unije. Skladno z razvojnimi možnostmi in sprejetimi prostorskimi akti so z aktivnostmi umeščanja MMLC nadaljevale mestne občine Ljubljana in Maribor. Mestna občina Ljubljana je pripravila več različnih študij o pretoku prometa skozi Ljubljano in jih prostorsko tudi

ureja. V postopku je priprava DPN za hitro železniško progo Ljubljana Jesenice v smeri Italije, s povezavo na letališče Jožeta Pučnika ter odsek železniške proge iz smeri Kopra skozi Vič in s povezavo na Šiško v Ljubljani (<http://www.dpa.mop.gov.si/?izbira=dpa&opt=priprava>). MMLC Maribor je zanimiv predvsem zaradi letališča ter neposredne povezave na avtocesto in železnico, dane pa so še njegove možnosti razvoja zaradi prostorskih danosti (v postopku je sprejem DPN za letališče Edvarda Rusjana Maribor, ki je v zaključni fazi priprave Pobude, sledi sklep Vlade RS o pričetku priprave – vpogled na isti internetni strani Ministrstva za infrastrukturo). Za razliko Letališča Jožeta Pučnika Ljubljana, katerega razvoj je zaradi njegove lege nekoliko omejen (Alpe, poselitev, požarni gozdovi, naravne vrednost ...), so razvojne možnosti Letališča Edvarda Rusjana skoraj neomejene. Če pri tem upoštevamo še dejstvo, da ima letališče neposredno možnost povezave na železniško in avtocestno omrežje, ter da je v neposredni bližini tudi plovna reka Drava (rečni promet), se zdi razvoj MMLC v sklopu omenjenega letališča povsem logičen. MMLC Novo mesto je v primerjavi z Ljubljano ali Mariborom povsem drugačen, obenem pa ima vse afinitete, ki dajejo prednosti in upravičene ekonomske možnosti za umestitev v prostor. Novo mesto ima cca 37.000 prebivalcev in cca 42.000 delovnih mest (podatki so starejši in ne preverjeni), kar Mestno občino Novo mesto uvršča v sam gospodarski vrh v Republiki Sloveniji. Za območje umeščanja MMLC Novo mesto sodi letališče Cerklje ob Krki, v okviru katerega je Vlada Republike Slovenije, maja 2008, pod št. 6081 sprejela Uredbo o državnem prostorskem načrtu za Letališče Cerklje ob Krki, stran 10336, v okviru katerega je v prostor letališča umeščena logistična cona FENIX. Sprejeta je tudi trasa DPN za III. razvojno os, ki povezuje mesto Celje z Novim mestom. Tako Novo mesto, ki povezuje gospodarstva južne in jugovzhodne Slovenije (Dolenjske, Posavja in Bele krajine) daje vse možnosti za uspešno umeščanje MMLC v prostor. Iz predstavljenih aktivnosti je možno sklepati, da je država na območju predvidenega MMLC Novo mesto naredila korenite gospodarske korake, ki bodo v prihodnje pripomogli k večjemu povezovanju slovenskega gospodarstva z osrednjo in jugovzhodno Evropo in regijami.

1.5 Metode raziskave

Glede na postavljeno hipotezo o potrebi umeščanja MMLC v Prostor Novega mesta, ciljno v prostor jugovzhodne regije Slovenije, ki zajema Dolenjsko, Posavje in Belo krajino smo tehnično proučevanje možnosti umeščanja MMLC v prostor ter pridobivanje podatkov, ki bi upravičevali sam postopek zastavili na zbiranju, opazovanju in merjenju podatkov. Ti podatki naj bi podali empirične in merljive dokaze za eksperimentiranje in oblikovanje postavljene hipoteze o potrebi in vlogi MMLC v Novem mestu. Zato je bila nujna uporaba znanstvene metode, ki bo dala nova spoznanja ali bo ovrgla našo trditev. V članku smo želeli opisati potrebo po logističnih centrih v Republiki Sloveniji, nato smo postavili hipotezo, da Slovenija in njen jugovzhodni del potrebuje sodoben MMLC, ki bo imel povezovalno vlogo v gospodarstvu Slovenije, osrednje in jugovzhodne Evrope. Zavedali smo se, da so pridobljeni podatki spremenljivi glede na čas in gospodarsko gibanje, zato smo našo hipotezo postavili v širše časovno obdobje.

Uporabili smo tudi metodo opazovanja, kot znanstveno metodo, kjer smo časovno, v natančno določenih obdobjih opazovali prihode in odhode tovornih vozil v Novo mesto in iz Novega mesta, določili smo uporabne vzorce in jih časovno razporedili po dnevih, mesecih in letu, vezano na gospodarske spremembe in industrijsko aktivnost v regiji. Pridobljene podatke smo proučili. Analizirali in eksperimentirali smo časovno rast, povečanje ali zmanjšanje industrijske in druge proizvodnje v Novem mestu in regiji ter tako dobili uporabne podatke, ki so nam časovno opravičevali našo hipotezo in s tem potrebo po umeščanju MMLC v prostor.

1.6 Struktura znanstvenega projekta

Osnovni namen umeščanja MMLC v prostor je bil industrijo in gospodarske dejavnosti v regiji in v celotni državi dvigniti na višjo gospodarsko raven, ki bo pokazala, da je Sloveniji, osrednji in jugovzhodni Evropi potrebna oblika in metodološko dovršen MMLC, ki opravičuje svoj obstoj. V ta namen smo raziskali pojave in aktivnosti, ki vplivajo na gospodarski razvoj, industrijo, pretok blaga in materialov ter jih predstavili kot kriterije, ki opravičujejo umeščanje MMLC v sam prostor. Čeprav so nam podatki služili bolj kot pogoji, pod katerimi je mogoče aplicirati znanstvene teorije v prakso, so bili ti podatki zadosten argument, ki opravičuje vlogo in pomen medorganizacijskega obvladovanja logistike in logističnih procesov v postopku gospodarskega sodelovanja Slovenije, osrednje in jugovzhodne Evrope. V članku smo na preprost način odgovorili na vprašanje, na kakšen način lahko MMLC funkcionira v prostoru in v kolikšni meri lahko prispeva h gospodarski rasti Slovenije in njenih sosednjih regij, obenem smo dokazali, da MMLC lahko prispeva k napredku industrije in industrijski znanosti. S hipotezo smo izhajali iz prepričanja, da je potencialni prispevek znanosti sicer posreden in da zadeva probleme, na katere je že v preteklosti opozarjala znanost in praksa, čeprav so ti gospodarski problemi v absolutni domeni države in ne znanosti pa vendarle ne država, ne lokalna skupnost tega ne prepozna. Vezano na industrijo, na gospodarstvo, se je znanost osredotočila na razvoj tehnike in tehnologije industrijskih oziroma gospodarskih procesov znotraj proizvodnje, robotizacijo in digitalizacijo posameznih proizvodnih postopkov in zunanjo logistiko ter logistične procese pa prepustila času. Osrednje vodilo članka predstavlja koncept gospodarske potrebe po uravnavanju, spodbujanju in povezovanju logistike in logističnih procesov v gospodarstvu, v regiji in širše ter izkazuje potrebe po mednarodnem povezovanju in iskanju znanstvenih in praktičnih metod, ki bodo pripomogle h gospodarski rasti. V sedanji strukturi delovanja industrije in gospodarstva v Sloveniji in širše je čutiti praznino, ki se kaže predvsem v neizrabi znanosti in ustreznih metod delovanja, ki bi pripomogle k hitrejši gospodarski rasti, mednarodni menjavi in k večji uveljavitvi Slovenije in slovenskega gospodarstva v širšem svetovnem krogu. Razumeti je, da ne država in ne lokalne skupnosti v Republiki Sloveniji ne prepoznajo geopolitične vloge države, še manj potrebe po umeščanju MMLC v prostor in temu vprašanju ne namenja dovolj interesov.

2 Pomembni kazalniki MMLC v Sloveniji in širše

Smiselnost opredelitve Novega mesta z okolico, kjer bi bilo mogoče umestiti MMLC, je bila predvsem v spoznanju, da je Mestna občina Novo mesto, s svojimi štirimi gospodarskimi giganti, gospodarsko najbolj stoječa občina, kjer je več delovnih mest, kot prebivalcev. Oskrba novomeške industrije Krka, Tovarna zdravil, d.d., Novo mesto, Revoz, Tovarna motornih vozil, d.d., Novo mesto, TPV, Tovarna posebnih vozil, d.d., Novo mesto in Adria, Tovarna avtodomov, prikolic in počitniških hišic, d.d., zahteva izvajanje logistike, številne Transporte in izvedbo številnih logističnih procesov, ki ekonomsko opravičujejo svoje postopke. Poleg navedene industrije, se je v preteklosti v neposredni okolici razvila močna lesnopredelovalna industrija, tovarna obutve, tovarne elektronike in izolacijskih materialov, pojavile pa so se še številne druge stroke in obrati.

Novo mesto je prestolnica Dolenjske, ki je umeščena v jugovzhodni del Slovenije, kjer s Posavjem in Belo krajino stoji na sredini poti, saj je na zahodu oddaljeno 70 km od Ljubljane, Slovenskega glavnega mesta in na vzhodu 70 km od Zagreba, ki je glavno mesto Republike Hrvaške (več o Novem mestu beri portal Mestne občine Novo mesto). Ravno ta umeščenost Novega mesta, na sredini poti med dvema velikima mestoma, kjer se pretaka velika količina blaga, kapitala in giblje veliko število ljudi, daje izjemne poslovne možnosti za umeščanje MMLC. Poleg obstoječe industrije, ki je s svojim potencialom in proizvodnjo vezano na oba mesta (trgovina in prodaja izdelkov industrije v oba mesta, gibanje

delovne sile in zaposlovanje stroke in delavcev iz obeh mest v industriji v Novem mestu), se razvijajo številne trgovske, turistične, industrijske in storitvene dejavnosti. Pomembni kazalniki, ki opravičujejo namen članka je dejstvo, da skozi Novo mesto poteka avtocestni križ, ki povezuje zahodno in osrednjo Evropo z jugovzhodnimi in bližnjevzhodnimi državami. Skozi Novo mesto poteka tudi druga najdaljša in najpomembnejša železniška proga, ki povezuje glavno mesto Ljubljano z Novim mestom, Črnomljem, Metliko in naprej s Karlovcem v Republiki Hrvaški. Gre za železniško progo, ki gospodarsko povezuje Slovenijo s Hrvaško v smeri morja in hrvaških pristanišč. Gre za železnico, ki lahko v kritičnih trenutkih zamenja ali prevzame določen pretok blaga iz Hrvaške v Slovenijo in obratno. Železnica v Novem mestu razpolaga z nekaj ranžirnih postaj in ima železniško povezavo v območja, kjer je največ lesa in lesne surovine za oskrbovanje slovenske in evropske lesne industrije. Ima tudi letališče, ki sicer deluje kot športno-rekreativno in panoramsko letališče, vendar je v preteklosti že bilo namenjeno za mednarodno vojaško in poslovno delovanje. V neposredni bližini je tudi civilno vojaško letališče Cerklje ob Krki, v sklopu katerega je zgrajena logistična cona FENIX, ki je sposobno nuditi logistične in druge storitve za vojaške in civilne namene. Ob avtocesti v smeri Ljubljane je zgrajen logistični center, v katerem deluje italijanska tovarna, ki izdeluje posamezne sklope za tovarno avtomobilov Reno, v občini Črnomelj pa tovarna počitniških hišic. Podatki kažejo, da posamezne veje industrije, veje gospodarstva itd., logistiko in logistične procese kupujejo na trgu neusklajeno, brez sodelovanja med posameznimi vejami, kar povzroča več stroškov ter neskladno izrabo infrastrukture in prostora.

Močna industrija, velike možnosti za razvoj trgovine, velike možnosti za storitvene dejavnosti, velike možnosti za nadaljnjo širitev industrije, izjemna infrastrukturna povezava (cesta, železnica in zračni prostor) so kazalniki, ki so dali izhodišča, za preverjanje ekonomske upravičenosti umeščanja MMLC v prostor Novega mesta z okolico. Posebnost MMLC Novo mesto z okolico je v neposredni medsebojni povezavi avtoceste, železnice in letališča, katerih naravne danosti dajejo najboljše možnosti za medorganizacijsko obvladovanje logističnih procesov širokega obsega (Murtič, 2012). Ta se kaže predvsem v možnosti kombiniranega transporta z železnico in avtocesto ter obratno iz avtoceste in železnice. Z manjšim vlaganjem v letališče Novo mesto in uporabo letališča Cerklje ob Krki, bi bila dana možnost še za kombinacijo za poslovne lete pa tudi turizem, pošto in manjše pošiljke (kargo). Gre za pomembne kazalnike, ki opravičujejo namen, saj opozarjajo na možnosti vseslovenskega in mednarodnega sodelovanja, ki posledično upravičujejo geopolitični položaj Slovenije v prostoru.

3 Zbiranje, analiza in ocena logistike v Novem mestu in okolici

Izhodišča za zbiranje in potrjevanje relevantnih podatkov, ki bi ekonomsko upravičili umeščanje MMLC v Novo mesto z okolico, so bili transporti in storitve, ki so neposredno vezane na industrijo v Novem mestu ter transporti za oskrbo prebivalstva v širšem novomeškem območju. Odločili smo se za neposredno ugotavljanje podatkov na terenu tako, da smo določili prometne točke na obeh vpadnicah z avtoceste v Novo mesto ter na regionalnih cestah, ki povezujejo Novo mesto z mesti in naselji v regiji in širše. Zbiranje podatkov smo opravili v letu 2010, 2011 in 2012, v trimesečnem zaporedju, in sicer en teden v aprilu, en teden v maju in en teden v juniju. Popisovalci na terenu so v času med 06.00 in 18.00 uro, na izstopno vstopni Ljubljanski cesti na avtocesto, v smeri Ljubljane, na izstopno vstopni Adrijaničevi cesti, v smeri Zagreb, popisovali tovorna vozila, ki so vstopala v območje Novega mesta. Drugi popisovalci so na regionalni Belokranjski cesti v smeri Metlike, na Topliški cesti, v smeri Dolenjskih toplic in na Šentjernejski cesti, popisovali vozila, ki so nadaljevala pot v smeri Metlike, Šentjerneja ali Dolenjskih Toplic ali vozila, ki so prihajala iz teh smeri. Kazalniki, ki so bili relevantni v raziskavi, so bila tovorna in kombinirana vozila, ki so namenjena za prevoz tovora, saj smo lahko na

podlagi popisa teh vozil, prišli do relativno točnih podatkov o oskrbi in delovanju industrije, gospodarstva in trgovine v Novomeški regiji. Istočasno so popisovalci na obeh vstopnih točkah z avtoceste beležili število tovornih vozil, ki so se gibala po avtocesti v smeri Ljubljane in v smeri Zagreba. Za popis smo si zastavili tabelarni zapis, v katerega smo navedli vozila, ki so prihajala iz smeri Ljubljane v Novo mesto (to so bila predvsem vozila, ki so oskrbovala novomeško industrijo), vozila, ki so prihajala iz smeri Zagreba (to so vozila, ki so oskrbovala novomeško industrijo in obenem odvažala gotove proizvode). Popis vozil, ki so potovala (tranzit) v smeri Ljubljane ali v smeri Zagreba, so bila za evidenco, evidenca pa je bila podlaga za oceno koliko vozil potuje (tranzit) in kakšne bi bile možnosti ponudbe logističnih storitev, če bi v Novem mestu deloval večji logistični center.

Prihod in dohod tovornih vozil po dnevih v tednu smo popisovali po dejanskem številu prihodov ali odhodov, za prikaz pa smo uporabili povprečje, kar nam pove, da je seštevek vseh popisanih vozil v majhnem razponu deset ali nekaj več vozil na točno določene dneve v tednu. Pridobljene podatke smo ovrednotili in statistično obdelali s programskim paketom SPSS 19.0. Rezultati so pokazali zanimive podatke, iz katerih je mogoče narediti številne variante in usmeritve. Tabela 1 predstavlja število tovornih vozil, ki so iz avtoceste vstopili v Novo mesto iz smeri Ljubljane in iz smeri Zagreba. Vzporedno pokaže podatek, koliko vozil je isti dan izstopilo iz Novega mesta v smeri Ljubljane in Zagreba. Podatki so zbrani po dnevih, začenši s ponedeljkom in nadaljevanje do petka v tednu. Tabela 2 predstavlja število vseh tovornih vozil, ki so vstopila v ali izstopila iz Novega mesta na avtocesto. Tabela 3 predstavlja število tovornih vozil, ki tedensko potujejo (tranzit) mimo Novega mesta v smeri Ljubljane in v smeri Zagreba.

Tabela 1. Pregled prihoda in odhoda tovornih vozil iz smeri Ljubljane in Zagreba v Novo mesto. Vir: Lastna simulacija podatkov

	LJUBLJANA	ZAGREB	SKUPAJ
PONEDELJEK	380	100	480
TOREK	420	120	540
SREDA	380	90	470
ČETRTEK	420	120	540
PETEK	360	100	460
SKUPAJ	1960	530	2490

Tabela 2. Skupno število vseh vozil, ki so vstopila ali izstopila iz Novega mesta. Vir: Lastna simulacija podatkov

PONEDELJEK		TOREK		SREDA		ČETRTEK		PETEK	
prihodi	odhodi	prihodi	odhodi	prihodi	odhodi	prihodi	odhodi	prihodi	odhodi
480	450	540	540	470	440	540	540	460	430

Tabela 3. Tranzit tovornih vozil skozi Novo mesto v smeri Ljubljane in Zagreba po dnevih. Vir: Lastna simulacija podatkov

	PONEDELJEK	TOREK	SREDA	ČETRTEK	PETEK	SKUPAJ
LJUBLJANA	3100	3300	3000	3300	2800	15500
ZAGREB	2800	3500	2850	3650	4100	16900
SKUPAJ	5900	6800	5850	69500	6900	32400

Cilj pridobivanja podatkov je bil v relativno enakem časovnem obdobju pridobiti podatke (kazalnike), ki nam bodo pokazali kakšen je promet tovornih vozil v Novem mestu, ali ta vozila potujejo skozi Novo mesto, ali ta vozila oskrbujejo novomeško industrijo, trg in prebivalstvo in kakšne so obstoječe

logistične kapacitete, ki oskrbujejo ta vozila. Popis je bil izveden v treh intervalih, ki smo jih opravili tako, da smo v letu 2010 popis opravili v tretjem tednu v mesecu aprilu, naslednje leto 2011 smo popis opravili na istih točkah, in sicer v tretjem tednu v mesecu maju in v letu 2012 smo popis opravili na istih točkah, in sicer v prvem tednu v mesecu juniju. Ocenili smo, da bodo podatki, ki so pridobljeni v treh letih zaporedoma, v približno enakih časovnih in vremenskih pogojih in v različnih mesecih, v približno enakem gospodarskem razvoju in zahtevi trga, podali dovolj podatkov, za oceno koliko tovornih vozil prihaja v Novo mesto, s kakšnim namenom in koliko časa se zadržujejo. Pri tem smo upoštevali, da je to še vedno čas, ko je novomeška industrija poslovala s polno kapaciteto in ko recesija v celoti še ni zajela ne trga ne industrijske proizvodnje v Sloveniji.

Pregled podatkov nam je pokazal, da je v času popisa, v povprečju, v Novo mesto, in sicer ob ponedeljkih, iz smeri Ljubljane in iz smeri Zagreba, prihajalo 480 tovornih vozil in odhajalo 450. Razlika 30 tovornih vozil je v tovornih vozilih, ki so vstopili v Novo mesto in so pot nadaljevali v smeri Metlike, Črnomlja, Dolenjskih toplic. Nekaj teh vozil je potovalo (tranzit) v smeri Karlovca v Republiko Hrvaško, druga vozila pa so oskrbovala industrijo, trg in prebivalstvo v širši regiji in jih pri njihovi vrnitvi nismo popisovali. Za vozila, ki so ostala v Novem mestu, nismo sledili kam in v katero od tovarn so vozila, vendar je iz vrste vozila (pokrita, ne pokrita, vozila za prevoz razsutega tovora, vozila za prevoz motornih vozil ipd.) in napisu na vozilu bilo mogoče sklepati, da so v Novo mesto vstopili točno z določenim namenom. Ob torkih je v Novo mesto vstopilo v povprečju 540 in izstopilo 540 tovornih vozil, ob sredah je vstopilo 470 in izstopilo 440, ob četrkih je vstopilo 540 in izstopilo 540 tovornih vozil in ob petkih je vstopilo 460 in izstopilo 430 tovornih vozil. Vidi se neenako število, glede na dneve prihoda in odhoda. Zanimiv je torek in pa četrtek, kjer je vidno, da vstopi in izstopi enako število tovornih vozil, v sredo in petek je teh vozil bilo nekoliko manj. Podatki, ki smo jih preverjali v novomeški industriji so nam pokazali, da približno 120 tovornih vozil vsak dan pride v tovarno motornih vozil Revoz d.d. in pripeljejo dele vozil ter odpeljejo končne izdelke oziroma izdelana vozila za trg (to je bil čas, ko je Revoz deloval v treh ali celo štirih izmenah in na trg dnevno pošiljal med 650 in 900 motornih vozil). Druga vozila so oskrbovala tovarno posebnih vozil TPV d.d., tovarno avto-prikolic in mobilnih hišic Adria d.d., tovarno zdravil Krka d.d., drugo industrijo, trg in prebivalstvo v Novem mestu. Še en podatek kaže, da so v nekaterih tovarnah procesi nakladanja in prekladanja ter izvedbe drugih logističnih procesov potekali v istem dnevu, drugje pa je ta proces trajal en dan ali več, vendar je v zaporedju dobave materialov in odvoza končnih izdelkov, na videz bil enak in navzven neopazen. Prav tako je opazen podatek, da je več vozil prihajalo in odhajalo iz smeri Ljubljane, kar pojasnjuje popolno povezanost avtomobilske industrije z zahodnimi državami. V smeri Zagreba so prihajala in odhajala predvsem vozila, ki so za potrebe širšega trga prihajali po končne izdelke novomeške industrije za vzhodne trge. Videla se je precejšnja povezanost novomeške industrije in gospodarstva s sosednjimi državami in državami jugovzhodne Evrope.

Pregled vozil, ki po avtocesti in z njo povezanimi regionalnimi cestami potuje (tranzit) čez ozemlje Republike Slovenije, je po popisu DARSA, v povprečju bil med 9000 in 10.000 tovornih vozil dnevno. Avtocestni križ med Ljubljano in Zagrebom je bolj obremenjen, vsaj povezuje celoten osrednji in jugovzhodni del Evrope ter Bližnji vzhod. Med popisom podatkov, so popisovalci ob avtocesti zapisali, da je ob ponedeljkih v poprečju iz smeri Zagreba proti Ljubljani vozilo 3100 in v nasprotni strani 2800 tovornih vozil. Ob torkih je v smeri Ljubljane vozilo 3300 in nasprotno stran 3500 tovornih vozil, ob sredah 3000 v smeri Ljubljane in 2850 v smeri Zagreba, ob četrkih 3300 v smeri Ljubljane in 3650 v Zagreba ter ob petkih 2800 v smeri Ljubljane in 4100 v smeri Zagreba. Glede na vrsto in obliko ter namen tovornih vozil v potuje je sklepati, da gre za tovarna vozila vseh držav osrednje in jugovzhodne Evrope ter Bližnjega vzhoda. Danes je ta številka v porastu in se še dviguje v obe smeri.

Če pogledamo različno število vozil v smeri in po dnevih ugotovimo, da je v ponedeljek, torek in četrtek več vozil, ki prihajajo iz smeri Zagreba in obratno v torek, četrtek in petek je več tovornih vozil, ki vozijo v smeri Zagreba. To je mogoče obrazložiti s tranzitom za namene oskrbe zahodnega trga z izdelki z osrednje in jugovzhodne Evrope in obratno oskrba teh delov z artikli z zahoda (predvsem z oskrbo z motornimi vozili, tehnično opremo ipd.). Pridobljeni podatki so tako nazorni in pregledni, da jih ravno zaradi razumevanja bralcu nismo prikazali v procentih ali v matematičnih izračunih, kot jih prikaže programski paket SPSS19.0.

4 Vpliv MMLC v prostoru (makro in mikro vplivi)

Vpliv na marko ekonomijo v Slovenije ali gospodarsko regijo Novo mesto z okolico se kaže v globalnem vprašanju razvoja industrije in gospodarstva, razvoju infrastrukture in zaposlitvi ljudi in razvoju trga v samem prostoru. Gre za del Slovenije in tudi del Evrope, kjer več desetletij deluje avtomobilska industrija (Industrija motornih vozil Revoz), predelava lesa in proizvodnja lesnih izdelkov (prej Novoles s svojimi obrati), kar je s pogleda makro ekonomije mogoče oceniti kot ustaljeno obliko industrije, ki se v znanstvenem in ekonomskem pogledu vertikalno razvija, posodablja in spremlja potrebe na trgu, spremlja kupce in potrošnike. Ker je na evropskem in tudi svetovnem trgu konkurenca huda (ponudba je večja od povpraševanja), je na mikro ravni zaznati potrebo po zmanjševanju stroškov proizvodnje in storitev, stroškov logistike in logističnih procesov ter drugih stroškov, ki neposredno vplivajo na industrijski in gospodarski razvoj. V skupnem medorganizacijskem obvladovanju logistike in logističnih procesov ter v povezovanju proizvodnje in storitev, je mogoče v organizirani obliki vplivati na stroške, na razvoj in na konkurenco. Če trdimo, da so znanje, inovacije in izobraževanje glavni vzvod za rast produktivnosti v industriji in gospodarstvu, po tem je treba na mikro ravni sklepati, da je Novo mesto z okolico, ob upoštevanju tehnologije obstoječe industrije, ob robotizaciji proizvodnih procesov, elektronskem poslovanju, digitalizaciji notranjih postopkov in ob upoštevanju, da v območju delujejo trije srednješolski centri in da v območju deluje osem fakultet, ki pokrivajo v industriji in gospodarstvu potrebne izobraževalne procese je sklepati, da so na mikroravni podani vsi pogoji, ki vplivajo na rast in razvoj gospodarstva jugovzhodne regije in celotne Slovenije. Vlaganja v industrijo, vlaganja države v infrastrukturne povezave, boljši pogoji dela, mednarodno povezovanje in medorganizacijsko obvladovanje logistike ter logističnih procesov močno vplivajo na makroravni gospodarske regije ter izboljšujejo mednarodno konkurenco, odpirajo trg in mednarodno industrijo povezujejo na skupnih točkah. Če upoštevamo definicijo makroekonomije regije v fokusu gospodarstva Slovenije vidimo, da ta povečuje zaposlenost, kar je v regiji pozitivno (Novo mesto ima več delovnih mest kot prebivalcev), cene so primerljive evropskim, bruto družbeni produkt je višji od povprečja in dviguje skupni na nivoju države. Smiselno temu je primerna kupna moč in potrošnja prebivalstva v regiji in mnogo širše. V novjšem času so mednarodni trendi gospodarskega razvoja prepoznali bistvo potrebe po kakovostnih izdelkih (poseben poudarek je na kakovosti motornih vozil), kar je industrija sprejela in je iz svoje osnovne dejavnosti izločila postopke logistike in logističnih procesov za pripravo proizvodnje in oskrbo trga in te storitvene dejavnosti prepustila zunanjemu izvajalcu. To so kazalniki, ki v praksi kažejo potrebo po umeščanju MMLC v prostor, ki bo omogočil širšo izvedbo logistike in vseh tistih logističnih procesov, ki bodo omogočili nemoteno industrijsko proizvodnjo, gospodarsko rast in razvoj regije in države. Opisani vplivi na makro in mikro ravni gospodarstva v jugovzhodni Sloveniji nam na znanstven in praktičen način potrdi našo idejo o umeščanju MMLC v Novem mestu z okolico, v katerem vidimo idealne pogoje za izvedbo storitvenih dejavnosti za osrednjo in jugovzhodno Evropo.

S pravnega pogleda umeščanje MMLC v prostor Novega mesta z okolico vidimo skozi določila Ustave Republike Slovenije, ki v svojem tretjem poglavju podaja temeljne podlage za gospodarsko in socialno delovanje, v svojih 67., 68., 71., 74., in 79. členu pa ureja osnovne postopke delovanja gospodarskih družb in nenehnega delovanja in razvoja gospodarskih in korporacijskih združenj. Zakon o gospodarskih družbah pa določa temeljna statusna korporacijska pravila ustanovitve in poslovanja gospodarskih družb, samostojnih podjetnikov, povezanih oseb in gospodarskih interesnih združenj za uspešno delovanje na ozemlju Republike Slovenije. Slovenija je z vstopom v Evropsko Unijo v svojo zakonodajo vnesla številne Direktive, ki dopolnjujejo zakon in ki omogočajo razvoj gospodarstva in gospodarskih dejavnosti. Zakon o obligacijskih razmerjih pa določa oblike poslovanja, medsebojnega povezovanja in pravno varstvo opravljenih poslov.

Na umeščanje MMLC v prostor Mestne občine Novo mesto vpliva tudi Občinski prostorski načrt, ki ga je Mestna občina Novo mesto s sklepom občinskega sveta sprejela in potrdila leta 2009. V Občinskem prostorskem načrtu so že zajeta določena gospodarska območja in logistične cone, ki že delujejo kot del MMLC in jih je treba z enotnim pravnim aktom povezati in združiti v enoten MMLC, ki bo omogočil nadaljevanje gospodarskega razvoja v Novem mestu.

Iz predstavljene pravne podlage je razumeti, da obstajajo vse pravne relevantne možnosti (Pavliha, 2007) za umestitev MMLC v območje Novega mesta in obstaja pravna podlaga za regijsko gospodarsko delovanje in vključitev MMLC v logistično platformo za osrednjo in jugovzhodno Evropo.

5 Zaključek

Pregled problematike na področju obvladovanja logističnih procesov v prostoru Republike Slovenije, nam z znanstvenega in strokovnega pogleda poda jasne podatke, da je Slovenija skozi svoje razvojno obdobje (povzeli smo obstoječe stanje po osamosvojitvi, s kratkim zgodovinskim pregledom) zamujala z razvojem in umeščanjem MMLC v prostor, kar so upravičeno izkoristile sosednje države, ki so prepoznale potencialne razvojne možnosti in ki so ob meji z Republiko Slovenijo zgradile sodobne MMLC ter tako Sloveniji in slovenskim gospodarskim družbam omejile gospodarsko delovanje. Ali je to razlog za kritiziranje oblasti, ali je to razlog za okrcanje gospodarstva, ali za iskanje odgovornih oseb, je v danem trenutku nepotrebno ocenjevati. Dejstvo je, da je Slovenija še vedno geografsko in prostorsko umeščena v tržno in transportno zanimiv prostor, skozi katerega dnevno (razvidno podatke zgoraj) vozi veliko število tovornih vozil, kapitala in ljudi in ravno to dejstvo pove, da bi Slovenija še vedno lahko v svojem okolju, po vzoru Luke Koper, v regije umestila obvladljive MMLC in temu pretoku blaga, kapitalu in ljudem ponudila logistiko in logistične storitve. Pri tem je treba upoštevati, da morajo te storitve, pogoji in postopki ponudbe in izvedbe posameznih logističnih procesov, biti bolj odprti, bolj kakovostni in cenejši od obstoječe konkurence v sosednjih državah (Murtič, Smodej, 2016).

Pregled zbranih podatkov tako znanstveno, kot strokovno izkazuje, da je Novo mesto z okolico (beri jugovzhodna Slovenija), glede na vrsto industrije, vrsto gospodarskih dejavnosti, glede na območje in drobno gospodarstvo, glede na mednarodne povezave, infrastrukturne povezave, glede na število tovornih vozil, ki prihajajo in odhajajo v njen prostor, glede na število ljudi, ki so zaposleni v industriji in gospodarstvu ter ljudi, ki se giblje skozi Slovenijo in glede na številne druge dejavnike, primerno za umeščanje sodobnih MMLC. Mestna občina Novo mesto je z Občinskim prostorskim načrtom (OPN Novo mesto 2009) določila območja industrijskega razvoja in logističnih centrov, ki jih je mogoče povezati z infrastrukturo (cesto, železnico in letališčem), vendar ti ne zadoščajo za logistično oskrbo vseh vozil, ki prihajajo v Novo mesto (logistiko in logistične procese zanje opravljajo delno znotraj

posamezne tovarne, večino drugih procesov pa opravljajo različne gospodarske družbe izven Novega mesta z okolico ali v tujini). Umestitev sodobnega MMLC v Novem mestu z okolico bi pomenilo, da bi ta center lahko skrbel za vsa tovorna vozila, ki prihajajo v prostor Novega mesta z okolico in za precejšen del vozil, ki po avtocesti potujejo (tranzit) v smeri Ljubljane ali v smeri Zagreba. Novo mesto razpolaga s širokim gospodarskim območjem, ima močno gospodarsko zaledje z naravnimi viri, ima odlično povezavo z regijo in osrednjim delom države in ima gospodarski potencial za povezovanje osrednje in jugovzhodne Evrope. Kakovost železnice in železniških storitev omogoča klasično in kontejnersko obliko transporta in je povezana s cestnim in avtocestnim križem. Tako bi MMLC imel možnosti izvajati storitvene procese, kot so oskrba s pogonskimi gorivi, popravila vozil in oskrba z rezervnimi deli za tovorna vozila, nakladanje in razkladanje tovora, embaliranje, pakiranje in transport. Nuditi vse možnosti predelave, obdelave, dodelave, sortiranja in drugih procesov, ki so potrebni za oskrbo trga in prebivalstva. MMLC bi lahko ponudil široko paleto logističnih in storitvenih dejavnosti in bi lahko bil v pomoč vsem, ki tovor, kapital in ljudi prevaža v tem delu osrednje Evrope.

Zbrani in preverjeni podatki kažejo, da v enem tednu v Novo mesto vstopu in izstopi 24.900 tovornih vozil, katerim bi lahko MMLC ponudil različne logistične storitve, poleg tega števila vozil, mimo Novega mesta v enem tednu potuje (tranzit) 32.400 tovornih vozil, ki bi jih bilo mogoče, z ustreznim obvestilom, z ustrežno ponudbo pripeljati v MMLC Novo mesto z okolico kar nam pove, da je umeščanje MMLC v prostor Novega mesta popolnoma upravičen, za kar obstajajo relevantni ekonomski, pravni, gospodarski upravičeni razlogi in upravičeni argumenti. Analiza makro in mikro vplivov na gospodarstvo, na regijo in državo nam pove, da so izpolnjeni kriteriji varstva konkurence, razvoj industrije, zaposlovanje, izobraževanja in inovacij. Zato menimo, da smo potrdili postavljeno hipotezo, da je Slovenija v jugovzhodnem delu, v območju Novega mesta z okolico potrebuje sodoben MMLC, ki bo v prihodnje povezoval Slovenijo in slovensko gospodarstvo z osrednjo in jugovzhodno Evropo.

Viri

1. Ustava Republike Slovenije, Uradni list RS, št. 33/1991 z dopolnitvami.
2. Zakon o gospodarskih družbah, Uradni list RS, št. 65/2009 z dopolnitvami.
3. Obligacijski zakonik, Uradni list RS, št. 83/2001 z dopolnitvami.
4. Strategija razvoja prometa v Sloveniji -Vlada Republike Slovenije je na svoji 48. redni seji dne 29. 7. 2015 sprejela Strategijo razvoja prometa v Republiki Sloveniji in Okoljsko poročilo za celovito presojo vplivov na okolje za Strategijo razvoja prometa v Republiki Sloveniji (sklep št.: 37000-3/2015/8).
5. Nacionalni program razvoja Slovenske železniške infrastrukture (Uradni list RS, št. 13/96).
6. Davidović, Branko (2000): Suvremena tehnologija kombinovanog transporta. Beograd: Ekonomski fakultet Beograd.
7. Čižman, A., Urh, M., 2008, izboljšanje konkurenčnosti podjetij z optimizacijo logističnih procesov, 5. mednarodna logistična konferenca, Celje.
8. Ferligoj, A., Leskovšek, K., Kogovšek, T. 1995, Zanesljivost in veljavnost merjenja, Metodološki zvezki, Fakulteta za družbene vede, Ljubljana.
9. Gajšek, B., 2007, Osnove transportne tehnologije, Fakulteta za logistiko, Celje, e-gradivo.
10. Igor, J., (2009), Slovenija logistična platforma za Srednjo in Jugovzhodno Evropo. 21. okt. 2009... Za organizacijo individualnih poslovnih srečanj v okviru obiska slovenske...
11. Jakomin, L., Zelenika, R., Medeot, M., 2002, Tehnologija prometa in transportni sistemi, Fakulteta za pomorstvo, Portorož.

12. Logistična platforma – muha enodnevnica ali koncept, ki obeta - EOL 64-65 ... Slovenija: logistična platforma za osrednjo in jugovzhodno Evropo. Dostopno 22.
13. Logožar, Klaudij, 2002, Organiziranje logističnih procesov, Ekonomsko poslovna fakulteta Maribor, str. 13.
14. Logožar, Klaudij (2004): Poslovna logistika– elementi in podsystemi. Ljubljana: GV Ljubljana, učbenik.
15. Murtič, S., 2012, Sodobna paradigma medorganizacijskega obvladovanja logističnih procesov, Doktorska disertacija, Fakulteta za uporabne družbene študije v Novi Gorici,
16. FUDŠ Nova Gorica.
17. Murtič, S., Janžovnik, A., Blatnik, D., (2016), Koridorske proge – gospodarski umik ali železniški uklon, Urbani izzivi, DUPPS, 27. Sedlarjevo srečanje, ISSN: 2232-481X, str. 12, posebna izdaja.
18. Murtič, S., Smodej, V., (2016) Fakulteta za industrijski inženiring Novo mesto, Tehnologija v dobi trajnostnega razvoja, Znanstvena monografija, članek »Infrastrukturni premiki in mednarodne povezave«, stran 99.
19. Ogorelec, A., 2004, Mednarodni transport in logistika, Ekonomsko poslovna fakulteta
20. Maribor, Maribor.
21. Obe plati globalizacije, Aljoša Damijan, Nedeljski dnevnik, 13.1.2001
22. Pavliha, M., Vlačič, P., 2007, Prevozno pravo, GV založba, Ljubljana.
23. Pavliha, M., Simoniti, S., 2007, Zavarovalno pravo, GV založba, Ljubljana
24. Stiglitz, J. E. (2002) *Globalization and its discontents*, Allen Lane, Penguin Books, London.
25. Zelenika, R., Pupovac, D., Suvremeno promišljanje osnovnih fenomena logističnih sustava, Ekon. pregl., 2001, god. 52, br. ¾, str. 354-378.
26. DPN za hitro železniško progo Ljubljana Jesenice z navezavo na letališče Jožeta Pučnika Ljubljana, 2016 (<http://www.dpa.mop.gov.si/?izbira=dpa&opt=priprava>)

RAZPOKE ZARADI TERMOMEHANSKEGA UTRUJANJA NA ORODJIH ZA TLAČNO LITJE ALUMINIJEVIH ZLITIN

THERMAL FATIGUE CRACKS ON ALUMINUM ALLOYS DIE CASTING DIES

Mitja Muhič

Višja strokovna šola, Šolski center Novo mesto, Slovenia

muhic_mitja@yahoo.com

POVZETEK

Orodja za tlačno litje lahkih kovin kot so aluminijeve in magnezijeve zlitine so izpostavljena visokim cikličnim temperaturnim in visokim mehanskim obremenitvam. Toplotne in mehanske obremenitve povzročajo visoke napetosti v materialu, ki posledično povzročijo lokalno porušitev materiala oziroma razpoke v materialu na površini orodja. V prispevku je predstavljano posredno opazovanje razpok na orodjih za tlačno litje z merjenjem napak na odlitkih iz aluminijeve zlitine, ki so posledica toplotnih razpok na površinah orodij. Razpoke zaradi termomehanskega utrujanja se najprej pojavijo in so večje na in v bližini dolivka zaradi višjega pretoka vroče taline aluminijeve zlitine in na geometrijskih prehodih z majhnimi radiji, kjer so prisotne visoke koncentracije napetosti. Razpoke so večje – globlje v materialih z nižjo trdoto. Prve razpoke se na površinah orodij lahko pojavijo že pred 2000 cikli tlačnega litja in rastejo z nadaljnjimi cikli.

Ključne besede: Tlačno litje, Termomehansko utrujanje, Koncentracije napetosti, Termomehanske razpoke, Napake na odlitkih

ABSTRACT

Die casting dies for aluminum and magnesium alloys are exposed to high cyclic temperature and high mechanical loading. Thermal and mechanical loads cause high strain and stress in material and consequently local material fracture resulting in material cracking on die surface. This paper presents indirectly observation of cracks on die casting dies by means of measuring defects on aluminum alloy castings which are consequence of thermal cracks on die surfaces. Cracks due to thermomechanical fatigue occurred sooner and were bigger at the entrance of melt flow and in the areas of geometrical changes with small radiuses in which high stress concentrations are presented. Cracks were bigger – deeper in materials with lower hardness. First cracks on the die casting die surfaces appeared before 2000 die casting cycles and were growing in size with further cycles.

Keywords: Die casting, Thermomechanical fatigue, Stress concentration, Thermomechanical cracks, Casting defects

1 Uvod

Tlačno litje je proces potiskanja staljene kovine v votline kalupov pod visokim tlakom. Velja za enega od najbolj produktivnih procesov v kovinskopredelovalni industriji in stroškovno učinkovita metoda za proizvodnjo tankostenskih izdelkov kompleksnih oblik iz lahkih kovin. Večina tlačno litih izdelkov je narejena na osnovi neželeznih kovinskih zlitin kot so aluminij, magnezij, baker, svinec, cink in kositer. Tlačno litje je zelo primeren postopek za velike serije manjših ali srednje velikih izdelkov z dobro kvaliteto površin in majhnimi dimenzijskimi odstopanji [1 – 3].

Temperatura taline aluminijeve zlitine je okoli 700°C, tlak taline je med 10 – 175 MPa in hitrost 20 – 60 m/s. Kalupi orodja so predhodno segreti na temperaturo med 250 – 300 °C. Kalupi so izpostavljeni visokim mehanskim, toplotnim kemijskim obremenitvam, ki povzročajo različne površinske poškodbe. Poškodbe so toplotne razpoke zaradi utrujanja, erozija zaradi toka taline, korozija, spajanje taline na površinah kalupov, deformacije kontaktnih površin kalupov in lom materiala kalupov [1 – 7].

Toplotne razpoke zaradi utrujanja so najpogostejše napake na površinah kalupov za tlačno litje. Mreža razpok se pojavi na površinah, ki so izpostavljene visokim temperaturnim ciklom. Mreža razpok raste in se širi z nadaljnjimi cikli, kar povzroča degradacijo površin kalupov in posledično degradacijo površin odlitkov [5 – 14].

Mehanizmi nastanka razpok zaradi toplotnega utrujanja so relativno dobro raziskani. Znano je, da se površinske razpoke pojavijo na površinah kalupov zaradi mehanskih in toplotnih obremenitev, mi povzročajo razpokanje zaradi toplotnega utrujanja in erozijo kontaktnih površin. Površine kalupov so izpostavljene visokim temperaturnim ciklom in visokim tlakom zaradi stika z vročo talino, ki degradirajo mehanske lastnosti materiala. Temperaturni cikli povzročajo popuščanje materiala, kar povzroča padec trdote ter meje plastičnosti in porušne trdnosti materiala [5 – 14]. Toplotni cikli (segrevanje in ohlajanje) povzročajo toplotne dilatacije (širjenje in krčenje) in posledično kritično termomehansko napetostno – deformacijsko stanje. Akumulacija lokalnih plastičnih deformacij povzroča lokalno porušitev materiala – razpoke, ki nastajajo in se širijo z nadaljnjimi cikli [8 – 10].

Parametre, ki vplivajo na pojav razpok na orodjih za tlačno litje zaradi toplotnega utrujanja lahko preiskujemo eksperimentalno s testi na materialnih vzorcih v laboratorijskih pogojih. Temperaturne cikle lahko dosežemo z različnimi metodami segrevanja in ohlajanja [8, 9, 15 - 19], ki se izbirajo glede na obliko in velikost materialnih vzorcev. Namen teh testov je preučevanje samo izoliranega efekta temperaturnega utrujanja z namenom razumevanja in izboljšave odpornosti materialov proti razpokanju zaradi toplotnega utrujanja. V dejanskem procesu tlačnega litja pa so prisotni tudi ostali vplivi poškodb površin orodij. Znano je da ima na pojav razpok znaten negativen vpliv oksidacija [20 – 24]. Poleg tega pa ima imajo dodaten negativen vpliv tudi tok, tlak in tlačni udari taline zlitine.

Zaradi ostrih pogojev znotraj kalupov orodij za tlačno litje so praktično neizbežne površinske poškodbe v obliki razpok zaradi toplotnega utrujanja, erozija in korozija. Zaradi tega je smiselno iskanje in razvijanje metod za napoved poškodb orodij za tlačno litje. Zanesljiva napoved poškodb na orodjih omogoča boljše planiranje proizvodnje in nižanje stroškov.

Dobra napoved poškodb na orodjih z numeričnimi simulacijami je težko izvedljiva zaradi kompleksnih mehanizmov poškodb, ki jih ne moremo ustrezno upoštevati. Zaradi tega je smiselno eksperimentalno z meritvami analizirati poškodbe površin na orodjih oziroma odlitkih med dejanskim procesom tlačnega

litja. Neposredno opazovanje in merjenje poškodb na površinah orodij ni možno, ker bi to zahtevalo zaustavitev kontinuiranega procesa tlačnega litja. Zaradi tega sem se odločil za opazovanje in merjenje poškodb – srhov na orodjem pripadajočih odlitkih saj je tako možno posredno oceniti lokacijo velikost in obliko poškodb na površinah samih orodij za tlačno litje. Poškodbe na odlitkih so neposredna posledica poškodb na orodjih za tlačno litje. Proces zagotavljanja kakovosti v serijski proizvodnji že vključuje preiskavo odlitkov, zato smo samo dodali natančnejše meritve poškodb – srhov na odlitkih brez prekinjanja in motenj kontinuiranega procesa proizvodnje.

V prispevku so predstavljene meritve na dejanskih odlitkih med kontinuiranim serijskim procesom tlačnega litja. Najprej so predstavljena v raziskavi opazovana orodja, materiali in metoda merjenja. Nato so predstavljeni rezultati meritev: velikost in rast razpok v odvisnosti od števila ciklov tlačnega litja.

2 Eksperimentalno delo

Objekt preiskave so bili nepremični deli orodij in njihovi ulitki (slika 1). Opazovana orodja so bila izdelana iz Cr-Mo-V jekla za delo v vročem SIST EN X37CrMoV5-1. Kemična sestava materialov je prikazana v tabeli 1.

Orodje za tlačno litje je bilo sestavljeno iz štirih identičnih kalupov, ki so bili izdelani iz dveh različnih materialov in bili različno toplotno obdelani (tabela 1 in 2). Kalupi so bili pozicionirani simetrično v orodju in so bili uporabljeni istočasno pod enakimi delovnimi pogoji v realnem procesu tlačnega litja. Kalupi so bili različno toplotno obdelani, zato so posledično imeli različne površinske trdote, in sicer od 43 HRc do 46 HRc oziroma 410 HV – 450 HV. Površine kalupov so bile nitridirane zaradi večje odpornosti proti obrabi, kar podaljša obratovalno dobo orodij.

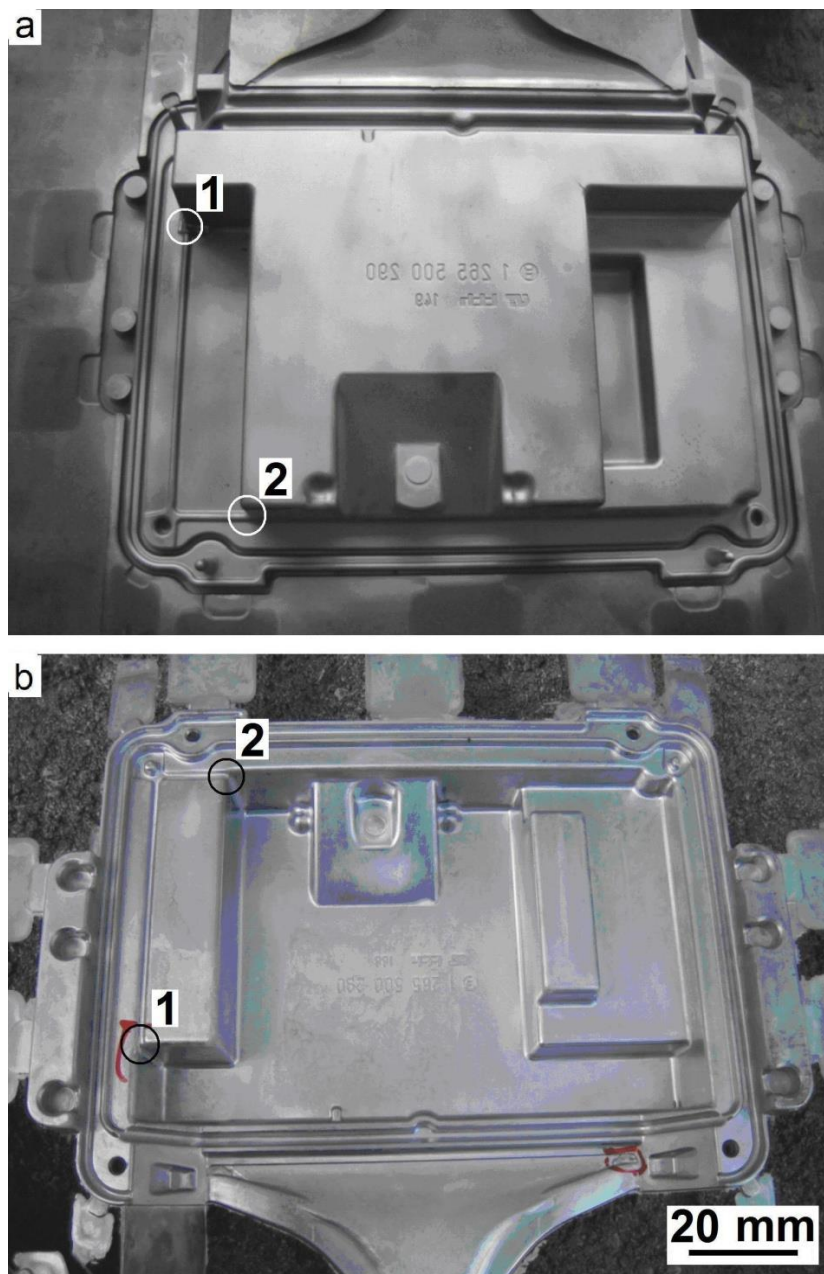
Tabela 1. Kemična sestava materialov orodij [25, 26]

Oznaka orodja - kalupa	Standardna oznaka	Proizvajalec/ Oznaka	Žilavost [J]*	Kemična sestava / mas. %					
				C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1, 3, 4	SIST EN X37CrMoV5-1	Bohler W400VMR	22	0.37	0.20	0.30	5.00	1.30	0.50
2	/	Toolox 44/	18	0.32	0.61	0.88	1.34	0.80	0.15

* Podatek proizvajalca materiala.

Tabela 2. Trdota in toplotna obdelava materiala orodij

Orodje - kalup	Trdota [HRc]	Temperatura kaljenja	Število ciklov popuščenja	Temperatura zadnjega popuščenja
1	43	990 °C	3	605 °C
2	45	Tovarniško toplotno obdelano		
3	45,5	990 °C	3	590 °C
4	46	990 °C	3	590 °C



Slika 1. a) Preiskovano orodje za tlačno litje in b) njegov ulitek iz aluminijeve zlitine

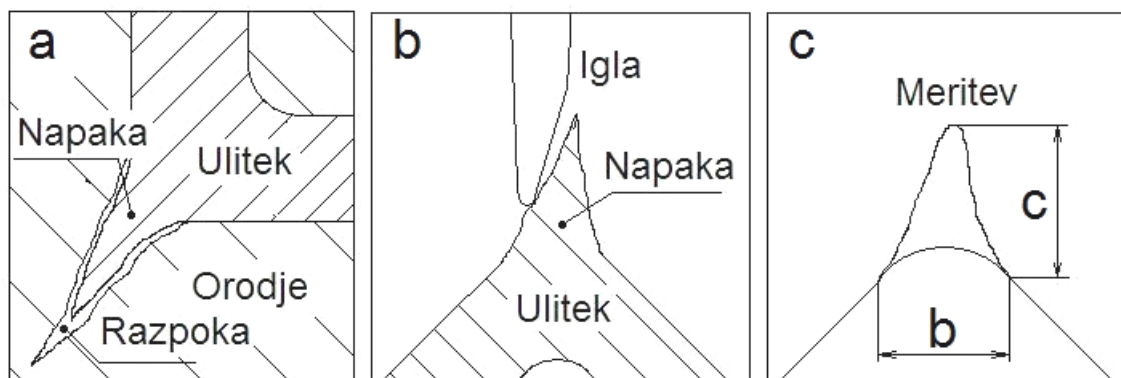
Talina, uporabljena v raziskavi, je bila aluminijeva zlitina EN AC- AlSi9Cu3 (tabela 3). Eksperiment se je izvajal na 3 MN hladno komornem stroju za tlačno litje v realni proizvodnji. Temperatura taline aluminijeve zlitine je bila $670\text{ }^{\circ}\text{C}$, čas trajanja celotnega cikla pa je bil 58 s. Orodje je bilo zaprto 25 s, odprto pa 33 s. Orodje je bilo temperirano s pretakanjem fluida po temperirnih kanalih z namenom predgrevanja in nato ohranjanja temperature orodja na okoli $220\text{ }^{\circ}\text{C}$. Površine orodja so bile premazane pred vsakim produkcijskim ciklom. Masa vsakega ulitka je bila 332 g, tlak litja 50 Mpa, čas polnjenja 23 ms in vhodna hitrost taline okoli 52 m/s.

Tabela 3. Kemična sestava (mas. %) aluminijeve zlitine EN AC- AlSi9Cu3 , uporabljene v eksperimentu

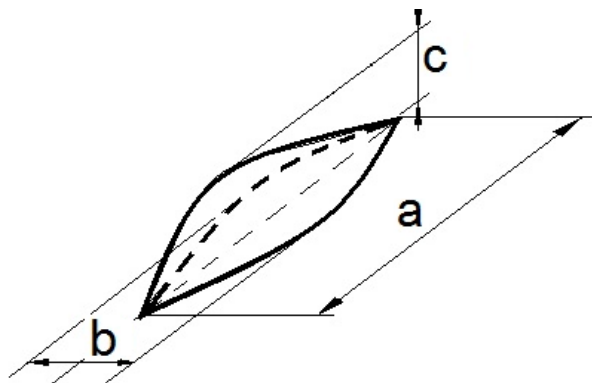
Zlitina/Standard	Kemična sestava / mas. %							
	Si	Cu	Mn	Mg	Fe	Zn	Ni	Al
EN AC- AlSi9Cu3	8-11	2-4	0.55	0.05-0.55	1.3	1.2	0.55	Ostalo

Merjenje razpok zaradi temperaturnega utrujanja na površinah orodij med dejanskim procesom proizvodnje tlačnega litja praktično ni izvedljivo. Eden od razlogov za to je v tem, da lahko natančno opazovanje razpok na orodjih izvedemo le z rezanjem orodij in pripravo makroobrusov. V dosednjih raziskavah so razpoke običajno opazovali v laboratorijih na vzorcih za preizkušanje razpokanja zaradi temperaturnega utrujanja, vendar pa ni znanih raziskav o doslednih sistematičnih meritvah na realnih orodjih v dejanski proizvodnji tlačnega litja. Zato sem prišel na idejo opazovanja napak - poškodb na ulitkih. Napake - poškodbe na ulitkih so v bistvu odtisi - negativni razpok in drugih nepravilnosti površin na orodjih. Osnova za to zamisel je bila, da se orodje umakne iz procesa proizvodnje ulitkov, ko je napak - poškodb na ulitkih preveč ali pa so poškodbe na ulitkih prevelike, da bi se z istim orodjem nadaljevalo procese tlačnega litja. Skratka, kriterij za poškodbe - razpoke na orodjih so pripadajoče napake - poškodbe na ulitkih. Pri nekaterih ulitkih so kritične že zelo majhne napake – poškodbe (cca. 0,01mm), pri drugih pa kritičnost nastopi šele pri relativno velikih napakah – poškodbah (0,1mm – 1mm). Katere napake - poškodbe so kritične in katere niso, je odvisno predvsem od vrste ulitkov in njihovega namena uporabe. Velikost poškodb - razpok na orodjih se nekoliko razlikuje od pripadajočih napak - poškodb na ulitkih, slednje so nekoliko manjše (slika 5).

To pomeni, da lahko v dejanskem procesu tlačnega litja s spremljanjem in z merjenjem napak – poškodb na ulitkih iz aluminijeve zlitine spremljamo in ocenimo velikost in rast poškodb – razpok, ki nastanejo zaradi temperaturnega utrujanja na orodjih. Posledično lahko ocenimo obratovalno dobo orodij oziroma lahko napovemo, kdaj naj bi nastopil čas za spremembo, popravilo ali zamenjavo orodij. Ker je proces proizvodnje tlačnega litja potrebno skrbno načrtovati vnaprej, so nam ocene napovedi kritičnih poškodb - razpok na orodjih in posledično napovedi obratovalne dobe oziroma časa do popravila orodij zelo koristne. Torej se lahko ta nov pristop opazovanja in merjenja napak - poškodb na ulitkih uporablja posredno za napoved nastanka in rasti poškodb - razpok na orodjih. Raziskave, ki so bile izvedene, predstavljajo osnovo za razvoj posrednih napovedi nastanka in rasti velikosti poškodb - razpok na orodjih in s tem ocene obratovalne dobe oziroma oceno časa do popravila oziroma zamenjave orodij. Dejanske velikosti poškodb - razpok na orodjih lahko odstopajo od izmerjenih vrednosti napak - poškodb na ulitkih. Odstopanja se lahko pojavijo predvsem pri odkrivanju tanjših poškodb - razpok na orodjih, ki med procesom tlačnega litja ostanejo nezapolnjene s talino in zato niso prisotne na ulitkih. Napake - poškodbe na ulitkih so bile izmerjene z uporabo profilometra Mitutoyo Contracer CV - 2000. Merjenje se je izvajalo z vlečenjem merilne igle preko površin ulitkov in zapisom oblik in velikosti preseka napak - poškodb (slika 2). Zabeležene so bile maksimalne glavne dimenzije napak - poškodb: dolžina – a, širina – b in globina (višina) – c (slika 3).



Slika 2. (a) Orodje za tlačno litje in njegov ulitek iz aluminijeve zlitine, (b) merilna igla drsi preko površine ulitka in (c) oblika in velikost napake na ulitku v prerezu



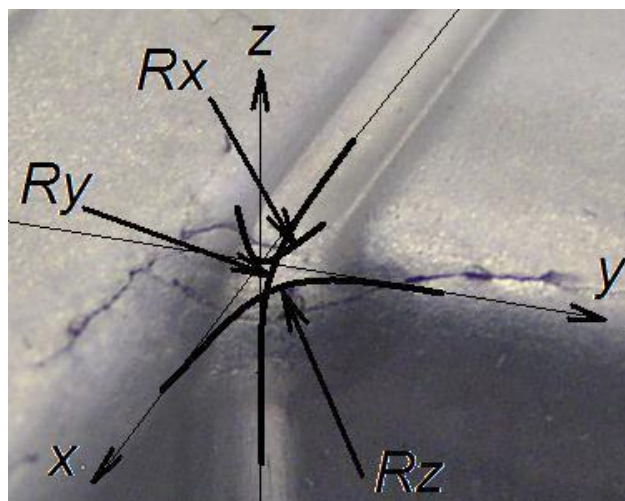
Slika 3. Shematična predstavitev napake na ulitku in njegove dimenzije; dolžina – a, širina – b in globina (višina) – c

Različne razpoke na orodjih se lahko med procesom tlačnega litja združujejo v večje razpoke. Ta pojav se zazna kot povečana izmerjena širina napak – poškodb na ulitkih. Da bi potrdili naša opažanja, smo analizirali mikrostrukture in razpoke v prerezu na podobnem izrabljenem orodju.

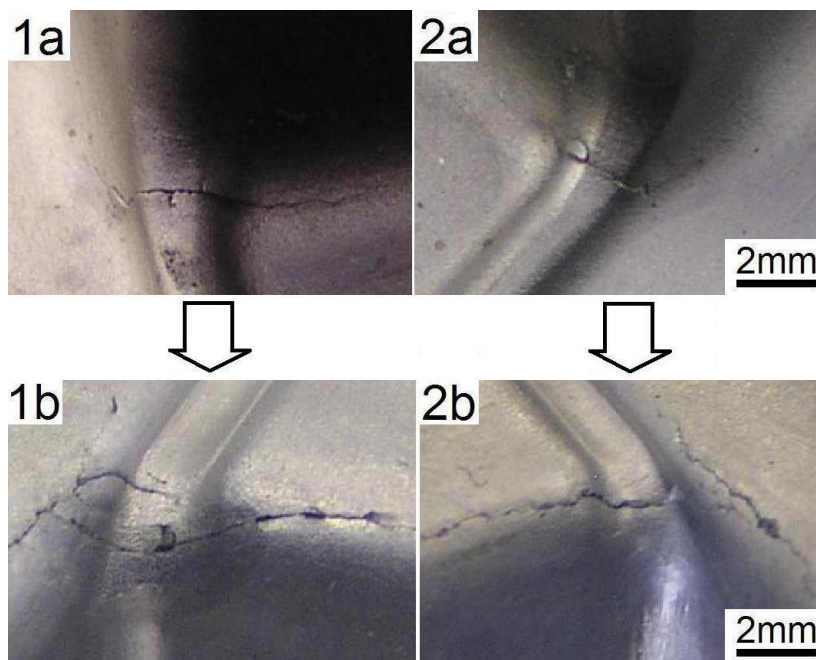
3 Rezultati in diskusija

Večina razpok zaradi temperaturnega utrujanja na površinah orodij se pojavi na robovih in vogalih z majhnimi radiji – polmeri, kjer se oblika in geometrija orodja spremeni in so prisotne velike koncentracije napetosti. Poleg tega so lahko na mestih spremembe oblike in geometrije prisotne zaostale napetosti, ki nastanejo pri procesu izdelave orodij. Na teh mestih se pojavljajo tudi tlačni udari, ki povzročajo dodatno skrajševanje obratovalne dobe orodij. V vogalih orodij se hitrost in kinetična energija taline zmanjša in se zato posledično poveča tlak in tlačna energija (Bernoulli-jev zakon) [27]. Tlak še dodatno poveča mehanske obremenitve in napetosti na površinah orodij. Višje termomehanske obremenitve in napetosti so prisotne tudi na površinah, ki so bližje dolivku orodij, ker so izpostavljene višjim temperaturam in višjim pretokom taline.

Razpoke se razlikujejo po velikosti, obliki in gostoti, odvisno od njihovih lokacij na površinah orodij, in od vrste materialov orodij ter njihovih mehanskih lastnosti. Razpoke so večje na površinah, ki so bližje dolivku, kjer so temperature najvišje in pretok taline med procesom tlačnega litja največji. Zelo globoke razpoke se pojavljajo na lokacijah z višjimi koncentracijami napetosti (robovi in vogali z majhnimi radiji - polmeri). Nekatere razpoke postanejo širše na površini zaradi erozije delcev taline. Druga možnost za širjenje razpok je združevanje dveh ali več razpok v eno. Pri tem pojavu pride do izpadanja materiala orodij, ki je na površini med (sosednjimi) razpokami, in s tem združitve razpok v širše razpoke. Širitev razpok v globini je možna tudi zaradi korozije (oksidacije) [20-24]. V industrijski praksi so kritične velikosti napak - poškodb na ulitkih približno reda velikosti 0,1 mm. Ulitki z večjimi napakami - poškodbami niso sprejemljivi in jih je potrebno popraviti, ali pa popraviti ali zamenjati orodja.



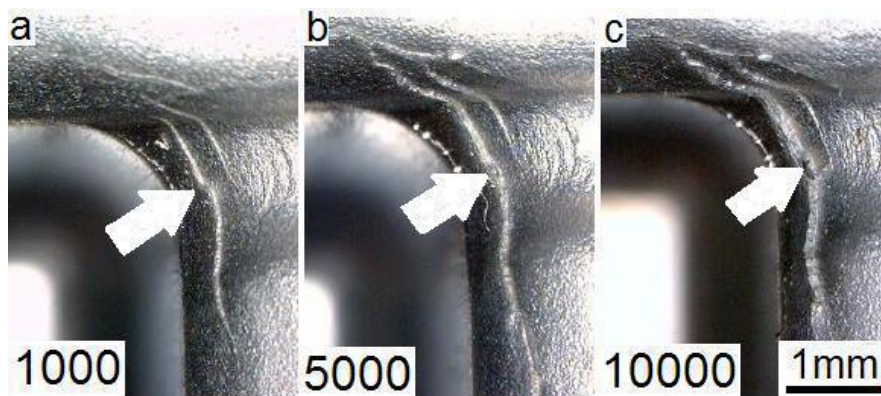
Slika 4. Geometrijski popis opazovanih lokacij 1 in 2 na obravnavanih ulitkih iz aluminijeve zlitine. Velikosti radijev znašajo $R_x = 1\text{ mm}$, $R_y = 2\text{ mm}$ in $R_z = 2\text{ mm}$



Slika 5. Razpoke zaradi temperaturnega utrujanja v vogalih orodij (1a and 2a) po 10 000 ciklih in odtisi - negativni razpoki na opazovanih ulitkih iz aluminijeve zlitine (1b in 2b). Opazovane lokacije 1 in 2 so prikazane na sliki 1

Da bi ocenili nastanek, velikost in rast napak - poškodb na ulitkih, so bili ulitki dosledno sistematično preiskani in izmerjeni od prvega do 10 000 cikla na vsakih 100 ciklov. Slika 7 prikazuje rast globine (višine) napak - poškodb, slika 8 rast širine napak - poškodb in slika 9 rast dolžine napak - poškodb na najbolj kritičnih lokacijah orodij (lokacija 1 na sliki 1). Predstavljene so izmerjene vrednosti za dva različna materiala orodij z različnimi trdotami od 43 HRc do 46 HRc (tabela 6 in 7). Prva napaka - poškodba se je pri orodju z najnižjo trdoto pojavila po okoli 500 ciklih, najkasneje pa se je pojavila prva napaka - poškodba na orodju z najvišjo trdoto, in sicer po 1 500 ciklih. Po 10 000 ciklih so znašale največje izmerjene globine (višine) napak - poškodb od 0,16 mm do 0,37 mm, največje širine so znašale od 0,19 mm do 0,76 mm, največje dolžine pa od 5,7 mm do 9,6 mm.

Globine poškodb – razpok na orodjih in posledično napak - poškodb na ulitkih med opazovanimi cikli rastejo s kvadratno funkcijo. Globina poškodb - razpok na orodjih na opazovani lokaciji raste progresivno z večjim številom ciklov (slika 7). Rast globine razpok je progresivnejša pri orodjih z nižjo trdoto kot pri orodjih z višjo trdoto. Na orodjih z nižjo trdoto se razpoke pojavijo prej kot na orodjih z višjo trdoto. To potrjuje prednost uporabe orodij z višjo trdoto. Iz regresijskih enačb in krivulj je razvidno, da imajo orodja, izdelana iz trših materialov, manj strmo rast globin razpok v primerjavi z orodji, izdelanimi iz mehkejših materialov, ki imajo znatno bolj strmo rast globine razpok.

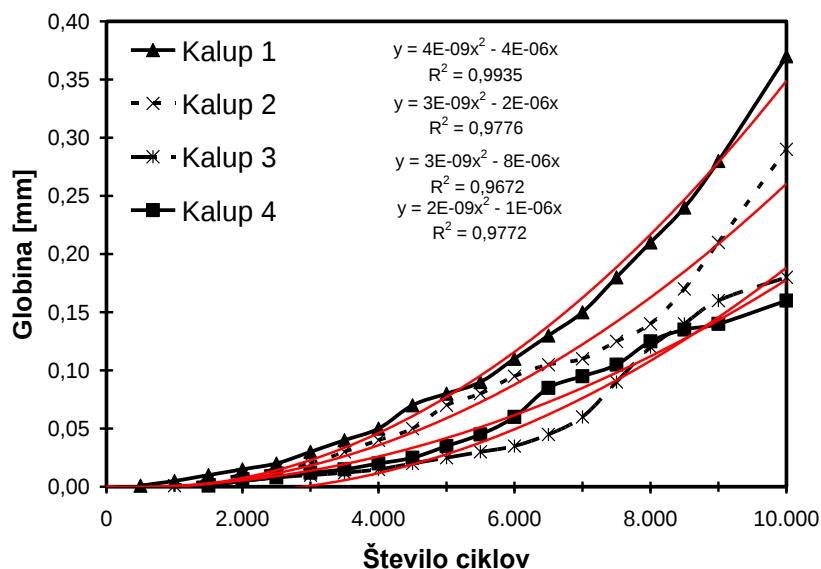


Slika 6. Napake – poškodbe na ulitkih iz aluminijeve zlitine, ki so posledica razpok zaradi temperaturnega utrujanja na orodjih po (a) 1 000 ciklih, (b) 5 000 ciklih in (c) 10 000 ciklih

Širine napak – poškodb, izmerjenih na ulitkih, ki so posledica širin poškodb - razpok na orodjih, rastejo približno linearno z naraščajočim številom ciklov (slika 8). Širine razpok rastejo hitreje na orodjih z nižjo trdoto kot na orodjih z višjo trdoto. Iz regresijske enačbe je razvidno, da imajo orodja, izdelana iz trših materialov manj strm naklon rasti širine razpok, medtem ko je naklon rasti širine razpok pri mehkejših orodjih bolj strm.

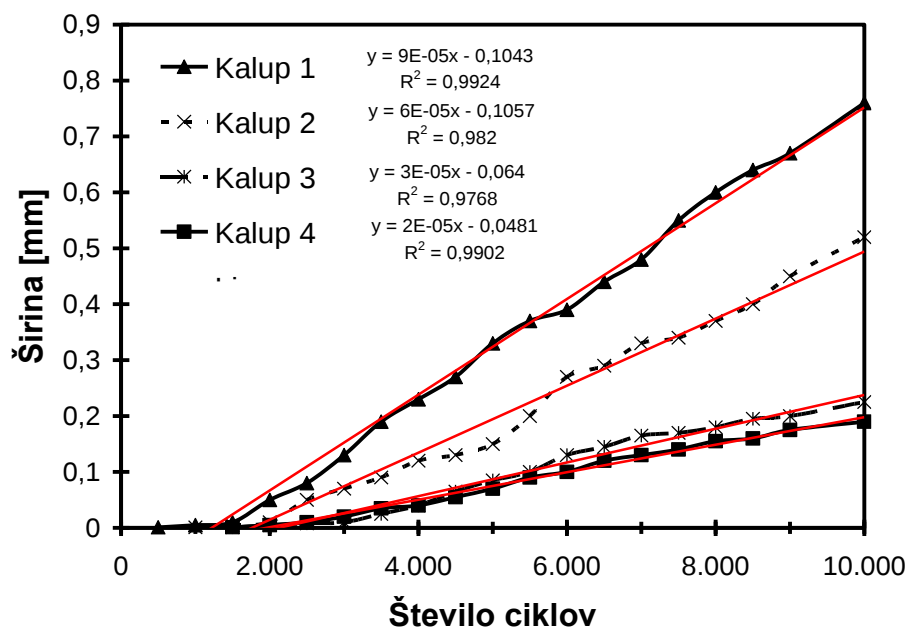
Slika 9 prikazuje dolžine napak - poškodb in njihove rasti v odvisnosti od števila ciklov. Razvidno je, da dolžine razpok rastejo hitreje na začetku pri majhnem številu ciklov in počasneje pri večjem številu ciklov. Regresijska analiza je pokazala, da dolžine razpok rastejo v skladu z logaritemsko funkcijo. Iz regresijskih enačb za dolžine napak - poškodb je razvidno, da imajo orodja izdelana iz trših materialov manjše dolžine napak - poškodb, mehkejša orodja pa večje dolžine napak - poškodb.

Iz grafov na slikah 7 do 9 lahko sklepamo, da je trdota materiala orodij najvplivnejša lastnost proti razpokanju zaradi temperaturnega utrujanja. Pri orodjih z nižjo trdoto so se razpoke pojavile prej kot pri orodjih z višjo trdoto in tudi rast velikosti razpok je bila večja pri orodjih z nižjo trdoto kot pri tistih z višjo trdoto. Če primerjamo velikost in rast napak - poškodb - razpok na orodju z oznako 2 s trdoto 45 HRC z velikostjo in rastjo napak - poškodb - razpok na orodju z oznako 3 s trdoto 45,5 HRC, lahko vidimo, da je slednje (orodje z večjo trdoto) odpornejše proti nastanku in širjenju razpok zaradi temperaturnega utrujanja, saj se razpoke pojavijo kasneje, so manjše in rastejo počasneje. Razlika med obema materialoma je v kemični sestavi in v proizvodni tehnologiji. Orodja z oznakami 1, 3 in 4 so bila izdelana iz jekla, ki je bilo pretaljeno v vakuumu. Ta tehnologija omogoča, da je jeklo zelo homogeno in zelo čisto na mikro nivoju, kar izboljša odpornost proti razpokanju zaradi temperaturnega utrujanja. Prav tako ima material orodja z oznako 3 pri delovni trdoti veliko žilavost - 22 J, kar je precej višje v primerjavi z žilavostjo materiala, iz katerega je izdelano orodje z oznako 2, katerega žilavost znaša 18 J.



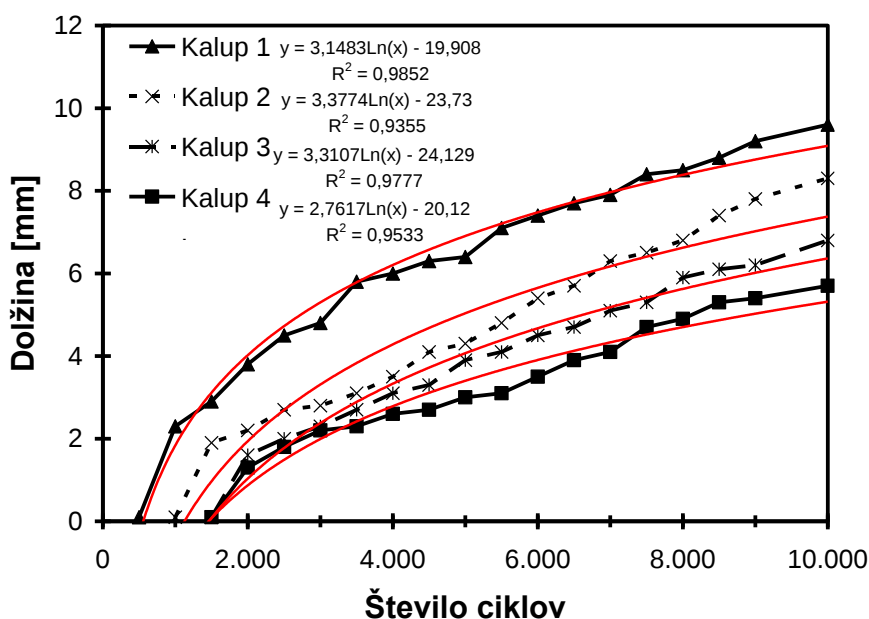
Slika 7. Velikost in rast globine – višine napak – poškodb na ulitkih v odvisnosti od števila ciklov z regresijskimi enačbami

Globine napak – poškodb na ulitkih, izdelanih z orodjema 1 in 2, rastejo progresivno vseh 10 000 ciklov, medtem ko rast napak - poškodb na ulitkih, izdelanih z orodjema 3 in 4 preide v degresivno (slika 7). Sprememba rasti globin napak - poškodb na ulitkih, izdelanih z orodjema 3 in 4 iz progresivne v degresivno se pri orodju 3 zgodi pri 8 000 ciklih, pri orodju 4 pa pri 6 500 ciklih. Rast globin napak - poškodb na ulitkih, izdelanih z orodjema 1 in 2 bi se po 10 000 ciklih zagotovo ustavila in prešla v degresivno, vendar pa opazovanje po 10 000 ciklih ni bilo izvedeno, ker je bilo potrebno te razpoke zaradi kritičnih velikosti sanirati. Povzamemo lahko, da se pri materialih z boljšimi mehanskimi lastnostmi (trdota, trdnost) ter boljšo odpornostjo proti popuščanju in temperaturnemu utrujanju razpoke pojavijo kasneje, so manj pogoste, manjše velikosti in rastejo počasneje kot pri materialih s slabšimi mehanskimi lastnostmi (trdota, trdnost) in manjšo odpornostjo proti popuščanju in temperaturnemu utrujanju.

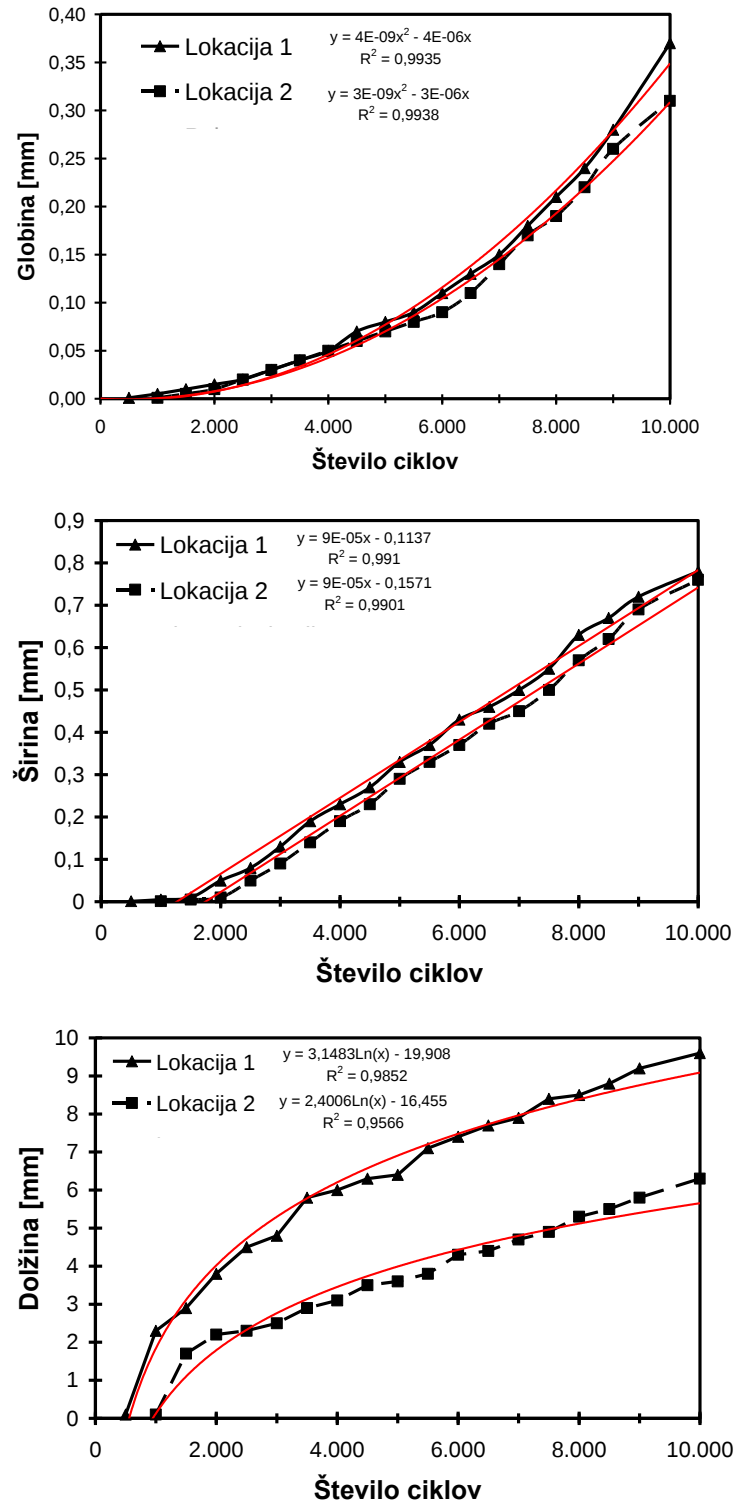


Slika 8. Velikost in rast širine napak – poškodb na ulitkih v odvisnosti od števila ciklov z regresijskimi enačbami

Slika 10 prikazuje največje izmerjene vrednosti globin, širin in dolžin napak - poškodb na ulitkih, ki so posledica poškodb - razpok na orodjih na dveh geometrijsko identičnih delih orodij na lokacijah 1 in 2, opazovanih na ulitkih, izdelanih z orodjem z oznako 1. Velikost in rast napak - poškodb na ulitkih zaradi poškodb - razpok na orodjih je bila dosledno sistematično opazovana 10 000 ciklov med dejanskim procesom tlačnega litja. Razlika med lokacijo 1 in lokacijo 2 je v oddaljenosti od dolivka ter pretoka in temperature taline aluminijeve zlitine na posamezni lokaciji. Lokacija 1 je bila od dolivka oddaljena 114 mm, lokacija 2 pa 175 mm. Temperature in pretoki taline aluminijeve zlitine so bili na lokaciji 1 višji kot na lokaciji 2. Temperaturna polja na površinah orodij so bila ocenjena z uporabo numeričnih simulacij s programskim paketom Magmasoft. Z numeričnimi simulacijami izračunane temperature na površinah orodij so znašale 346 °C na lokaciji 1 in 341 °C na lokaciji 2, kar je relativno majhna razlika. Večja razlika je v času trajanja izpostavljenosti na tej visoki temperaturi. Površina orodij na lokaciji 1 je visokim temperaturam nad 340 °C izpostavljena znatno daljši čas kot površina orodij na lokaciji 2. Razlika med lokacijama je v tem, da se napaka - poškodba na lokaciji 1 pojavi prej kot na lokaciji 2. Znatno večja razlika med lokacijo 1 in lokacijo 2 je med dolžinami napak - poškodb na ulitkih zaradi poškodb - razpok na orodjih. Razlog za to je v tem, da je material na lokaciji 1, ki je izpostavljen višjim termomehanskim obremenitvam, popuščen intenzivneje kot material na lokaciji 2, zato ima posledično nižjo trdoto ter odpornost proti razpokanju zaradi temperaturnega utrujanja. V skladu z rezultati lahko zaključimo, da ima popuščanje pomembno vlogo zlasti na dolžine napak - poškodb na ulitkih zaradi poškodb - razpok na orodjih. Če bi v prihodnje ta pristop opazovanja napak - poškodb na ulitkih namesto na orodjih postal standard za ocenjevanje poškodb - razpok na orodjih, bi bilo verjetno smiselno preiskovati in meriti velikosti napak - poškodb, ker je njen napredek bolj različen in selektiven.



Slika 9. Velikost in rast dolžine napak - poškodb na ulitkih v odvisnosti od števila ciklov z regresijskimi enačbami



Slika 10. Velikost in rast napak – poškodb na ulitkih kalupa 1 v odvisnosti od števila ciklov na lokacijah 1 in 2 (Slika 1) z regresijskimi enačbami

4 Zaključki

Razpoke zaradi temperaturnega utrujanja so najpogostejše in najbolj kritične napake - poškodbe na orodjih za tlačno litje. Raziskava in njeni rezultati kažejo, da je nastanek ter velikost in rast poškodb -

razpok na orodjih odvisna od lokalne oblike in geometrije površin orodij, oddaljenosti od dolivka, kjer vstopa talina v orodje, temperature in pretoka taline ter mehanskih in toplotnih lastnosti materiala orodij (trdota, trdnost, meja plastičnosti, žilavost, odpornost proti popuščanju in temperaturnemu utrujanju – pri delovnih temperaturah orodij).

Razpoke najprej nastanejo ter so največje in najpogostejše na mestih spremembe oblike in geometrije na orodjih, to so vogali in robovi z majhnimi radiji, kjer so prisotne velike koncentracije lokalnih napetosti, ki presegajo mejo plastičnosti in povzročajo akumulacijo plastičnih deformacij, ki posledično povzročijo nastanek in širjenje razpok. Prav tako so razpoke večje in pogostejše bližje dolivku taline v orodje in so z večjo oddaljenostjo od dolivka manjše in manj pogoste. To je posledica tega, da so ob dolivku temperature najvišje in pretoki taline največji in zato tudi temperatura na površini orodja. Materiali z nižjo trdoto, manjšo homogenostjo in manjšo mikro čistočo imajo tudi nižjo trdnost in mejo plastičnosti, nižjo odpornost proti temperaturnemu popuščanju in posledično nižjo odpornost proti razpokam zaradi temperaturnega utrujanja.

Raziskava je pokazala, da so se razpoke pojavile prej ter so bile pogostejše in večje pri materialih z nižjo trdoto in zato s slabšimi mehanskimi lastnostmi. Prve poškodbe - razpoke na orodjih se pojavijo pri okoli 500 ciklih. Globine poškodb - razpok na orodjih naraščajo progresivno (kvadratna funkcija) z naraščanjem števila ciklov, širine poškodb - razpok naraščajo linearno in dolžine poškodb - razpok naraščajo logaritemsko z naraščanjem števila ciklov.

Viri

1. L.J.D. Sully, Metals handbook., Vol. 15 (ASM International, Metals Park OH, 1988).
2. J.R. Davis, ASM Speciality Handbook., Tool Materials (ASM International, Materials Park OH, 1995).
3. D.F. Allsop, D. Kennedy, Pressure Die casting, Part 2: The Technology of the Casting and the Die (Pergamon Press, Oxford, 1983).
4. W. Young, Why die casting dies fail, 10th SDCE International Die Casting Exposition and Congress, p. 1-7 (North American Die Casting Association, St. Louis MO, 1979).
5. F. Kosel, L. Kosec, Heat checking of hot work tool steel, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering vol. 29 no. 7/8, p. 151-158 (1983).
6. J.F. Wallace, D. Schwam, Development studies on selection and processing of die materials to extend die life, Die casting engineering, p. 50-58 (2000).
7. Kosec, L. Kosec, J. Kopač, Analysis of casting die failures, Engineering Failure Analysis vol. 8, p. 355-359 (2001).
8. A. Persson, S. Hogmark, J. Bergstrom, Simulation and evaluation of thermal fatigue cracking of hot work tool steels, International Journal of Fatigue vol. 26, p. 1095-1107, (2004).
9. Persson, S. Hogmark, J. Bergstrom, Thermal fatigue cracking of surface engineered hot work tool steels, Surface & Coatings Technology vol. 191, p. 216-227 (2005).
10. Persson, J. Bergstrom, S. Hogmark, Failure modes in field-tested brass die casting dies, Journal of Materials Processing Technology vol. 148, p. 108-118 (2004).
11. Klobčar, Tušek, J., Taljat, B., Thermal fatigue of materials for die-casting tooling, Materials Science and Engineering: A vol. 472 no. 1-2, p. 198-207, (2008).
12. Klobčar, J. Tušek, B. Taljat, L. Kosec, M. Muhič, Suitability of maraging steel weld cladding for repair of die casting tooling, International Journal of Materials Research vol. 99 no. 9, p. 1006-1014 (2008).

- 13.D. Klobčar, J. Tušek, M. Pleterski, L. Kosec, M. Muhič, Analysis of thermal cracks on die casting dies, *Materials and technology* vol. 42 no. 5, p. 203–210 (2008).
- 14.D. Klobčar, J. Tušek, L. Kosec, Analysis of thermal cracks on die casting dies, *Materials and technology* vol. 42 no. 5, p. 203–210 (2008).
- 15.A. Persson, J. Bergström, C. Burman, Evaluation of heat checking damage in die casting, F. Jeglitsch, R. Ebner, H. Leitner (Eds.) *Proceedings of the ITC-V*, Leoben (1999).
- 16.Siller, Waldhauser, W. Ebner, T. Antretter, Investigation and simulation of the thermal fatigue behaviour of a hot-working tool steel employing pulsed laser radiation, A.F. Blom (Ed.), *Proceedings of the IFC-VIII*, Stockholm (2002).
- 17.Y. Wang, A study of PVD coatings and die materials for extended die-casting die life, *Surf. and Coat. Techn.* 94-95, 60-63 (1997).
- 18.H. Sehitoglu, *ASM Handbook*, vol. 19 (ASM International, Metals Park OH, 1996).
- 19.M. Pellizzari, A. Molinari, G. Straffelini, Thermal fatigue resistance of plasma duplex, *Surface and Coatings Technology Vol 142-144*, 1109 (2001).
- 20.R. Danzer, F. Sturm, A. Schindler, W. Zleppnig, Thermal fatigue cracks in pressure die casting dies, *Gisserei-Praxis* 19/20, 287 (1983)
- 21.V. Kovrigin, B. Starokozhev, S. Yurasov, Effect of oxidizing processes on crazing of die-casting molds, *Met Sci Heat Treat* 22, 688 (1980).
- 22.A.E. Nehrenberg, Metallurgical aspects of heat checking in brass die casting dies, *Die Cast.* October/November, 30 (1949).
- 23.W. Zleppnig, R. Danzer, F. Fischer, K. Maurer, Influence of the structure and the temperature field on the formation and propagation of thermal fatigue cracks, *Proceedings of the 6th Biennial European Conference on Fracture*, Amsterdam (1986).
- 24.A. Schindler, R. Danzer, Advanced materials for die casting and extrusion application – die life in die casting, *Proceedings of the International Conference Step into the 90's 3*, Queensland (1986).
- 25.BÖHLER-UDDEHOLM AG Modecenterstraße 14/A/3 A-1030 Vienna, Austria; www.bohler-uddeholm.com
- 26.SSAB Oxelösund AB, SE-613, 80 Oxelösund, Sweden; Toolox; www.ssab.com/Brands/Toolox
- 27."Hydrodynamica." *Encyclopædia Britannica*. 2010. *Encyclopædia Britannica Online*. 25 Dec. 2010 <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/658890/Hydrodynamica>.

BRITTLE FRACTURE AND CRACK PATH DEVIATION AT HETEROGENEOUS STEEL WELDS OF STORAGE TANKS

Zdravko Praunseis

University of Maribor, Faculty of Energy Technology, Hocevarjev trg 1, 8270 Krsko, Slovenia
zdravko.praunseis@um.si

ABSTRACT

Welding of a high-strength low-alloyed (HSLA) steel with the aim to produce an undermatched weld joint presents a technological challenge for modern welded structure production. One should pay attention to the level of strength mismatching which should provide sufficient toughness of the weld metal by using an appropriate welding consumable (wire, electrode) and welding procedure. High toughness of weld metal is necessary to enable local plastic deformation and to prevent brittle fracture. It is of utmost importance to exclude the possibility of plane faults (hydrogen cracking, lack of fusion, etc.) and local-brittle-zone (LBZ) appearance in HSLA steel undermatched welded joints, which can cause failure.

The aim of this research was to estimate the weld metal Crack Tip Opening Displacement (CTOD) fracture toughness using standard procedures for three differently undermatched welded joints.

Keywords: brittle fracture, crack deviation, storage tanks, crack-tip opening displacement (CTOD), CTOD fracture toughness testing, CTOD-R resistance curve, welded joints

1 Introduction

Welding of a high-strength low-alloyed (HSLA) steel with the aim to produce an undermatched weld joint presents a technological challenge for modern welded structure production. When the yield strength is lower in weld metal than in base metal, the welded joint is undermatched. The strength mismatch factor (M) is defined as the ratio of weld-metal to base-metal yield strengths, so that $M < 1$ defines an undermatched welded joint. Undermatched welded joints are used for repair welding of joints damaged during hard hydrogen cracking without pre-heating, especially, for welded joints made of HSLA steels operation conditions or by short period overloading. They are also recommended to prevent with yield strength above 700 MPa. Namely, the HSLA steels usually require pre-heating if matching or overmatching welding consumable is used, which is not only expensive, but also needs a carefully designed and strictly followed welding procedure, Praunseis et al. (2015, p. 15). Finally, there is a frequent need for additional thermal or mechanical treatment afterwards.

One should pay attention to the level of strength mismatching which should provide sufficient toughness of the weld metal by using an appropriate welding consumable (wire, electrode) and welding procedure. High toughness of weld metal is necessary to enable local plastic deformation and to prevent brittle fracture. It is of utmost importance to exclude the possibility of plane faults (hydrogen cracking, lack of fusion, etc.) and local-brittle-zone (LBZ) appearance in HSLA steel undermatched welded joints, which can cause failure, Praunseis et al. (2013, p. 55).

The aim of this research was to estimate the weld metal CTOD fracture toughness for three differently undermatched welded joints.

2 Materials and mechanical properties

High-strength low-alloyed (HSLA) steel in a quenched and tempered condition, corresponding to the grade HT 80, was used. The Fluxo Cored Arc Welding process (FCAW) was used and two different tubular wires were selected. Three different types of global undermatched welded joint were produced, one homogeneous and two heterogeneous. Homogeneous welded joint was made with pre-heating and post-heating of the base material, entirely with the same consumable (wire WELTEC B 575). Two different types of heterogeneous welded joints were made using a softer consumable (wire WELTEC B 370) for the soft root layer, one with two and the other with four passes, in order to avoid pre-heating of the base material and to prevent cold cracking. The filler passes were made with the wire WELTEC B 575 as well as the cap passes. Chemical composition of the base metal and all-weld metals is given in Table 2.1.

Weld metal mechanical properties were determined by round tensile specimens extracted from the root and the filler region of X-groove welds in the weld direction. The expected mechanical properties of homogeneous and heterogeneous undermatched welded joints have been reached neither in the filler region nor in the root region, as shown in Tables 2.2. and 3.1. The reason was weld metal alloying with elements from the diluted base metal.

The alloying effect was more pronounced in the root region than in the filler region, and it was also the main reason for local strength mismatch appearing in thickness direction of homogeneous and heterogeneous welds (see chemical analysis given in Tables 2.1. and 3.1.).

Table 2.1. Chemical composition of base material and all-weld metals

Chemical composition [%]	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
HT 80	0.16	0.68	0.75	0.020	0.003	0.79	0.09	0.032	0.24	0.037
WELTEC B 575	0.05	0.04	1.52	0.011	0.008	0.08	1.45	0.66	-	-
WELTEC B 370 soft root	0.05	0.25	0.61	0.011	0.008	0.06	0.07	0.03	-	-

Table 2.2. Mechanical properties of base material and all-weld metals

Designation	Rp [MPa]	Rm [MPa]	Elongation [%]	Charpy toughness [J]	Expected M
HT 80	710	810	15.5	85, 91, 100 at 0 °C	-
WELTEC B 575	542	591	23	47, 70, 71 at -40 °C	0.76
WELTEC B 370 soft root	403	466	32	100, 215, 145 at -40 °C	0.56

Having in mind the values of strength mismatch factors M in Table 3.1, one can see that the root in homogeneous weld metal is actually overmatched ($M = 1.05 \Rightarrow 5\%$ overmatching), which leads to strongly increased cold cracking susceptibility, whereas the filler region has practically the same strength as the base material ($M = 0.99$). This effect approves the concept of heterogeneous weld in an

undermatched joint with two-pass ($M = 0.81 \Rightarrow 19\%$ undermatching) or four-pass ($M = 0.91 \Rightarrow 9\%$ undermatching) soft root layer in order to prevent cold cracking without pre-heating of the base material.

3 Experimental procedure

The set of $B \times B$ specimens was taken from undermatched homogeneous and heterogeneous welds to obtain fracture behaviour of welded joints with defects like cold cracks and lack of fusion, which often exist in real welded joints. By CTOD testing of welded joints, they are treated as planar (plane) faults. Thus, in the CTOD specimen the surface cracks with different depths were positioned in weld metal with the aim to locate the fatigue-crack-tip front in different microstructure regions of mismatched welded joint and to analyse the material behaviour at the crack tip in regard to the nearby microstructure influence.

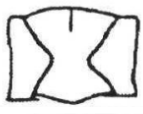
Fracture toughness of homogeneous and heterogeneous undermatched welded joints was evaluated using the standard static CTOD test at GKSS Research Center Geesthacht in Germany, Schwalbe (2001, p. 10). Specimen loading was carried out with constant crosshead speed $v = 0.5$ mm/min. The test temperature was -10°C according to the recommendation of the OMAE (Offshore Mechanics and Arctic Engineering) association. For CTOD testing the single specimen method was used by BS 7448 (1997, p. 45). To evaluate fracture toughness of undermatched welded joints, standard single-edge notched-bend (SENB) specimens ($B \times B$, $B = 36$ mm) with surface notch in the weld metal were used, as shown in Table 3.2. (Praunseis (2013, p. 12).

The $B \times B$ specimens were fatigue pre-cracked from the surface to a distinct welded joint microstructure.

Table 3.1. Mechanical properties and chemical composition of homogeneous and heterogeneous undermatched weld joints

Designation	Rp [MPa]		Rm [MPa]	Elongation [%]	Charpy V [J] at -10 °C		Expected <i>M</i>		Achieved <i>M</i>	
Base material										
HT 80	693		830	19.6	79, 78, 64		-		-	
Heterogeneous weld joint – filler material WELTEC B 575										
WM – cap	687		804	22.3	110, 104, 102		0.76		0.99	
WM – root	730		803	21.8	72, 38, 50		0.76		1.05	
Heterogeneous weld joint – filler material WELTEC B 370 in the root (the rest WELTEC B 575)										
WM – 2 x soft root passes	567		625	19.7	-		0.56 at the root		0.81 at the root	
WM – 4 x soft root passes	631		673	21.9	35, 17, 34		0.56 at the root		0.91 at the root	
Composition [%]										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al, Ti, Nb
WM hom. – cap	0.04	0.44	1.48	0.009	0.003	0.12	1.63	0.49	0.12	-
WM hom. – root	0.10	0.33	0.89	0.011	0.008	0.73	1.11	0.42	0.13	-
WM – 2 x soft passes	0.12	0.41	0.78	0.011	0.006	0.40	0.10	0.17	0.16	-
WM – 4 x soft passes	0.10	0.33	0.78	0.012	0.007	0.24	0.13	0.11	0.13	-

Table 3.2. Fatigue crack positioning in SENB specimens ($B \times B$) at undermatched weld joints

Weld groove width $2H$ (at the crack tip)	Fatigue crack position	Crack depth $[a/W]$
$2H = 14.1 \text{ mm}$	↓ CAP 	~ 0.25
$2H = 13.9 \text{ mm}$	↓ + 2 mm above soft root 	~ 0.25
$2H = 6.8 \text{ mm}$	↓ in the soft root 	~ 0.48
$2H = 7.4 \text{ mm}$	↓ in the soft root 	~ 0.43

For all specimens the fatigue pre-cracking was carried out with the GKSS Step-Wise High R ratio method (SHR) procedure. During the CTOD tests, the DC potential drop technique was used for stable crack-growth monitoring. The load line displacement – LLD was also measured with a reference bar to minimize the effects of possible indentations of the rollers. The CTOD values were directly measured by specially developed δ_5 clip gauge (Figure 3.1.) on the specimen side surfaces at the fatigue crack tip over a gauge length of 5 mm.

3.1 Fractographic and metallographic examinations

In order to determine the influence of crack-tip microstructure on fracture behaviour, the metallographic and fractographic examinations were performed. For fractographic examinations the Scanning Electronic Microscope (SEM) was used, while the metallographic investigations were performed by the Optical Light Microscope. After fractographic examinations the specimens were cut in crack-growth direction and polished and etched by 3 % Nital.

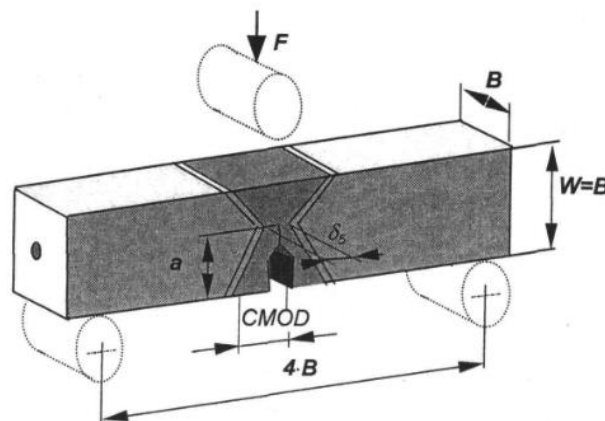


Figure 3.1. Three point specimen ($B \times B$) and measuring points (CMOD, δ_5)

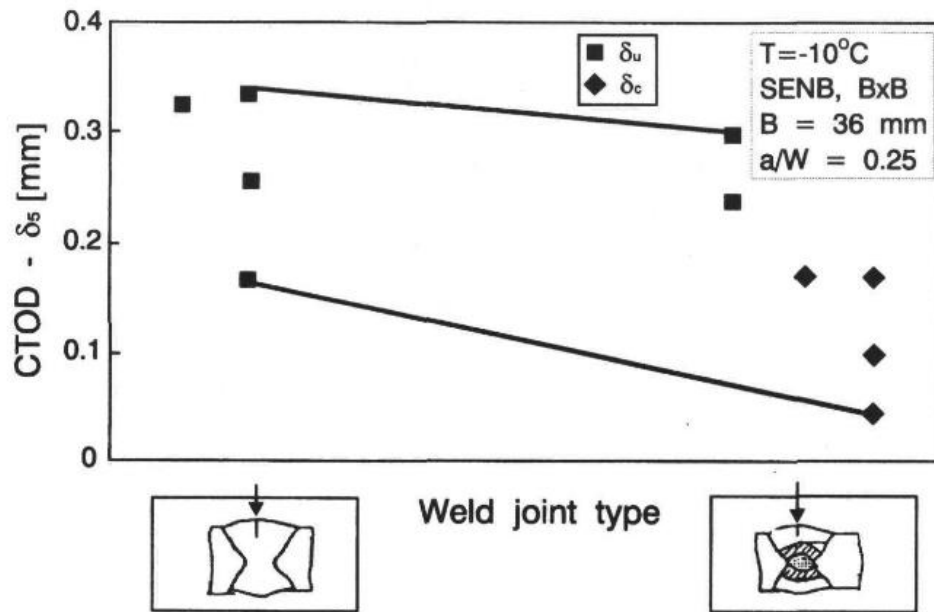


Figure 3.2. Weld metal CTOD fracture toughness of homogeneous and heterogeneous undermatched weld joint

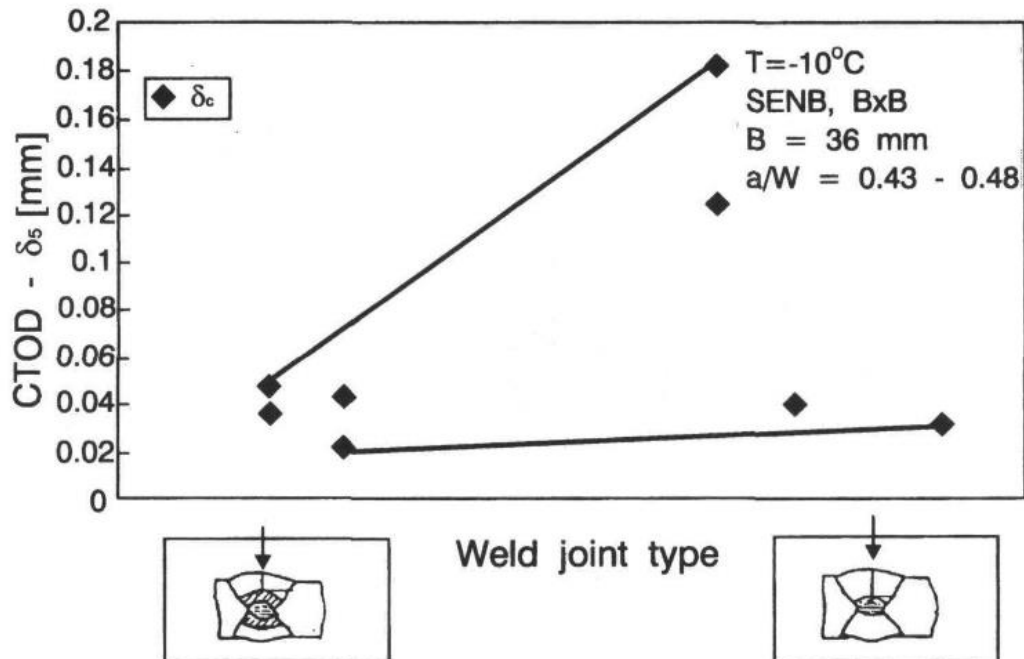


Figure 3.3. Soft root layer CTOD fracture toughness of heterogeneous undermatched weld joints

At low magnification, the fracture surfaces of each type of specimen exhibited different fracture surfaces, strongly affected by the type of the welded joint region.

4 Analysis of results

The results of CTOD fracture toughness of $B \times B$ specimens with surface crack in undermatched homogeneous and heterogeneous welds are shown in Figures. 3.2. and 3.3. As a consequence of different crack depths (a/W) different constraints act at the crack tip, significantly influencing the CTOD fracture toughness values. Therefore, only the comparison of CTOD values obtained using specimens with the same crack depth is reasonable. Average crack depths a/W are given in Table 3.2. for a set of specimens.

The influence of soft root layer on fracture toughness of filler passes (WELTEC B 575) in heterogeneous weld metal is noticeable from the comparison of CTOD values obtained using specimens with surface crack ($a/W = 0.25$) positioned in filler passes of homogeneous and heterogeneous weld (Figure 3.2). The fracture toughness was higher for specimens with surface crack in filler passes of the homogeneous weld than for specimens with surface crack in filler passes of the heterogeneous weld.

After initial stable crack growth (δ_u – Figure 3.2. and Figure 4.1. - fracture and cross-section M-M), in all CTOD specimens from homogeneous weld, brittle fracture has occurred when crack tip (Figure 4.1. - cross-section M-M and detail A) reached LBZ, i.e. low toughness bainitic microstructure (Figure 4.1. - detail B) with precipitated Fe_3C at boundaries of M-A phases (Figure 4.2.), as was proven with the appearance of significant pop-in and arrested brittle fracture (Figure 4.1. - fracture and cross-section M-M).

Hardness increase ($\sim 340 \text{ HV1}$) at the crack tip was noticeable (Figure 4.1. - detail B), being a consequence of material strengthening just before brittle fracture occurred.

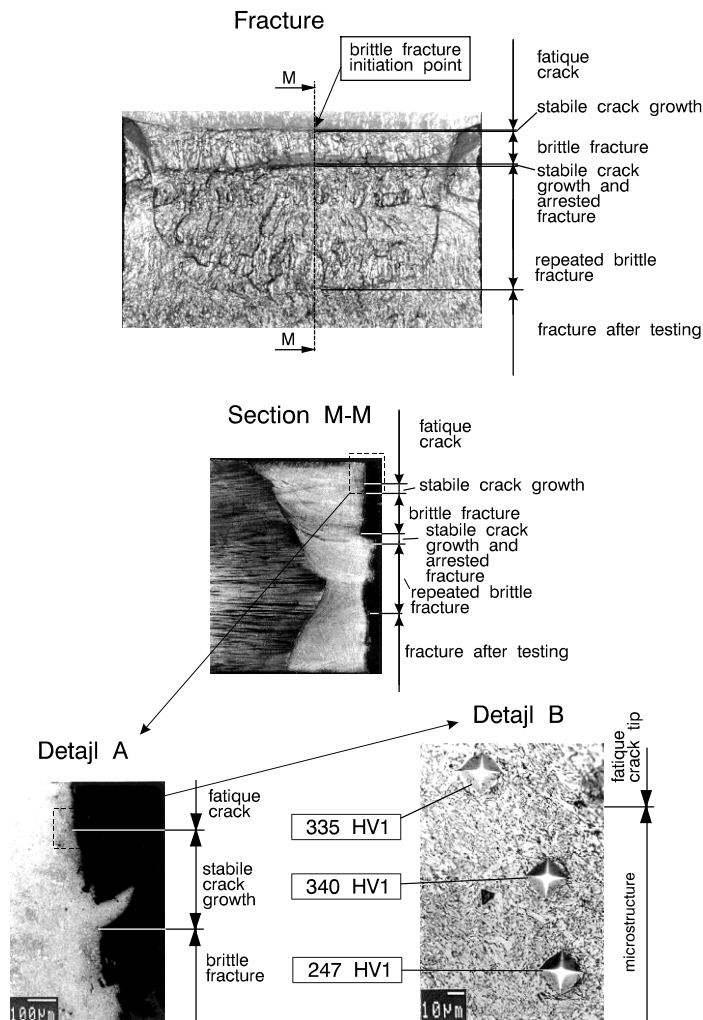


Figure 4.1. Fracture and microstructure in the vicinity of brittle fracture initiation point of specimen $B \times B$ with surface crack ($a/W = 0.25$) in filler region of homogeneous weld. At the vicinity of brittle fracture initiation point a bainitic microstructure (Detail ~ A) is visible and at higher magnification (Detail - B) contours of primary ferrite (PF) can be seen, formed at primary γ grains.

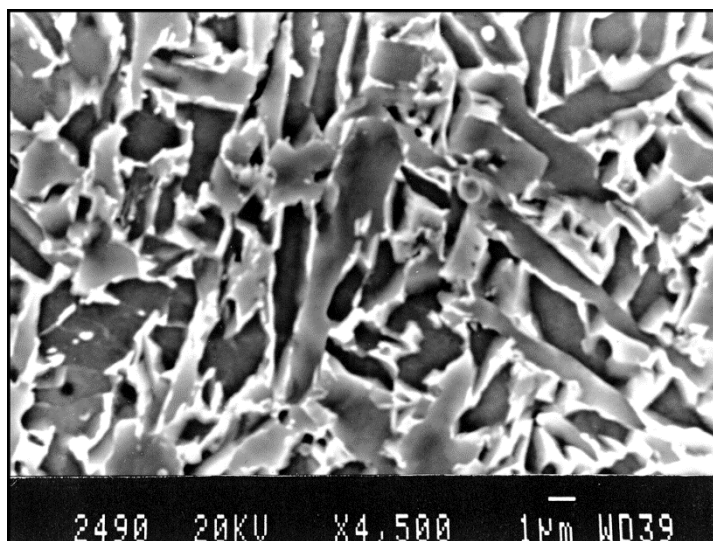


Figure 4.2. Bainitic microstructure with precipitated Fe_3C at M-A phase boundary in the weld metal of the homogeneous welded joint

In order to analyse the effect of soft root layers on fracture toughness of filler passes and also of heterogeneous welds as a whole, it was necessary to locate the fatigue crack so that it gradually approaches the soft root layer (Table 3.2.). From the comparison of CTOD results (Figures. 3.2. and 3.3.) the effect of crack depth a/W and weld width $2H$ (Table 3.2.) on CTOD fracture toughness is clear, being the lowest for the specimens with deep crack ($a/W \sim 0.5$) in soft root layer, where the weld width $2H$ is the smallest. The effect of constraint on fracture toughness is also noticeable from the comparison of the curves F-CTOD, where it is clear that the final instabilities and higher CTOD values have appeared at higher forces and for specimens with a shorter crack, where the crack tip was located approximately 2 mm above the soft root layer (Figure 4.3. - cross-section N-N and detail A). This was not only a consequence of the remaining ligament $W - a$ and the effect of weld groove width, $2H$, on the CTOD values, but also a consequence of the beneficial effect of bainitic microstructure at the fatigue crack tip, which directly reflects the fracture toughness values. Because of that, the final fracture of specimens with the crack positioned close to the soft root layer appeared after prior stable crack growth (Figure 4.3. - detail A) through tougher bainitic microstructure (Figure 4.3. - detail B) of filler passes, when the crack tip reached the soft root layer.

The soft-root-layer low toughness was determined by Charpy impact V testing (Table 3.1.). The main cause for low soft-root-layer toughness was a change of microstructure of all-weld metal obtained by wire WELTEC B 370, which was exposed to different alloying mechanisms during welding in the root region. Namely, the all-weld metal microstructure of soft root weld metal was bainitic, having high toughness, but because of the above-mentioned reasons its microstructure was changed to harmful ferritic microstructure (Figure 4.4. - detail B), causing low toughness of soft root layer.

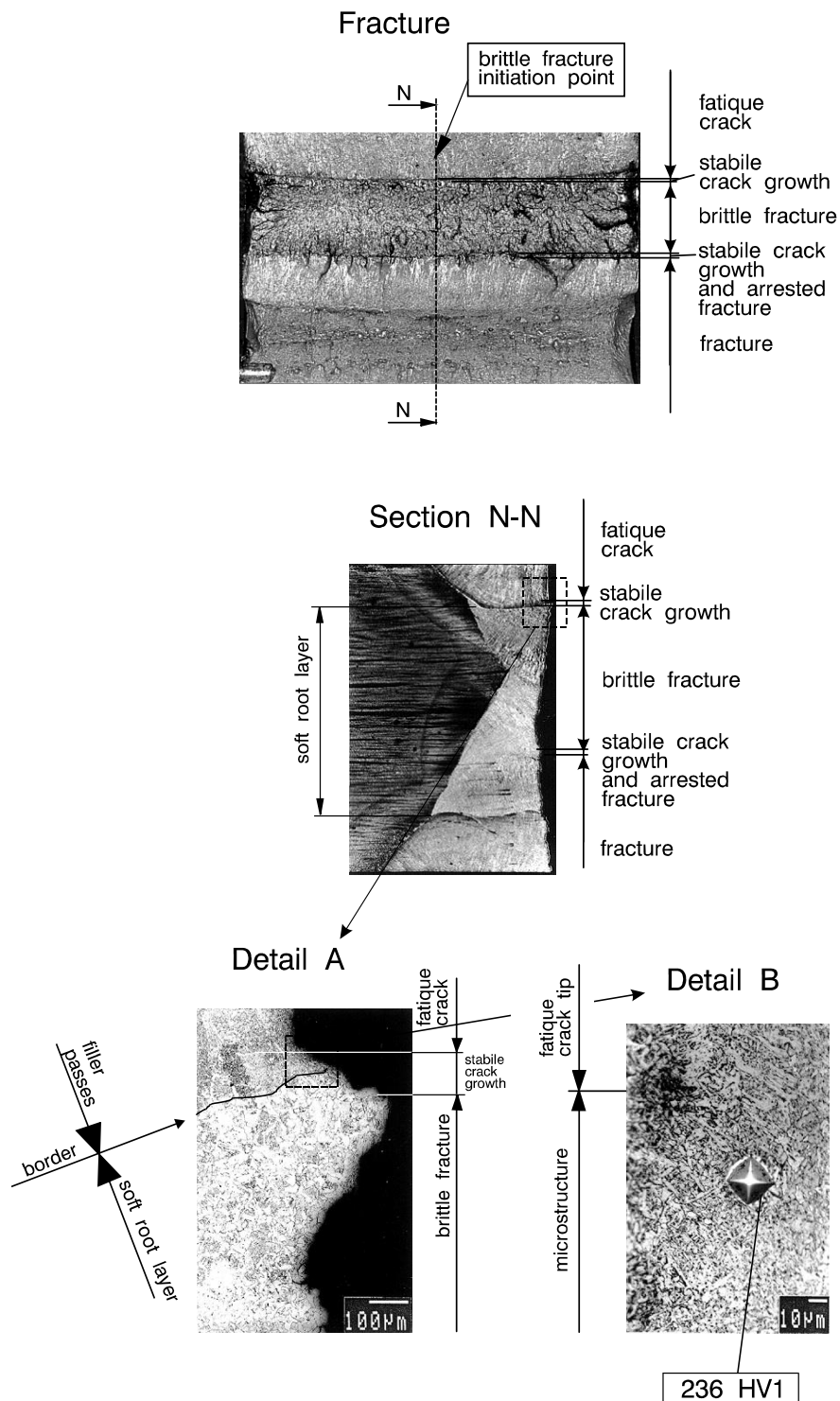


Figure 4.3. Appearance of fracture surface and evaluation of microstructure at fatigue crack tip in specimen $B \times B$ with surface crack ($a / W = 0.43$) close to the boundary of soft root region. Bainitic microstructure at fatigue crack tip can be seen (Detail - A). At higher magnification (Detail - B) contours of primary ferrite (PF) are visible, formed on primary γ grains.

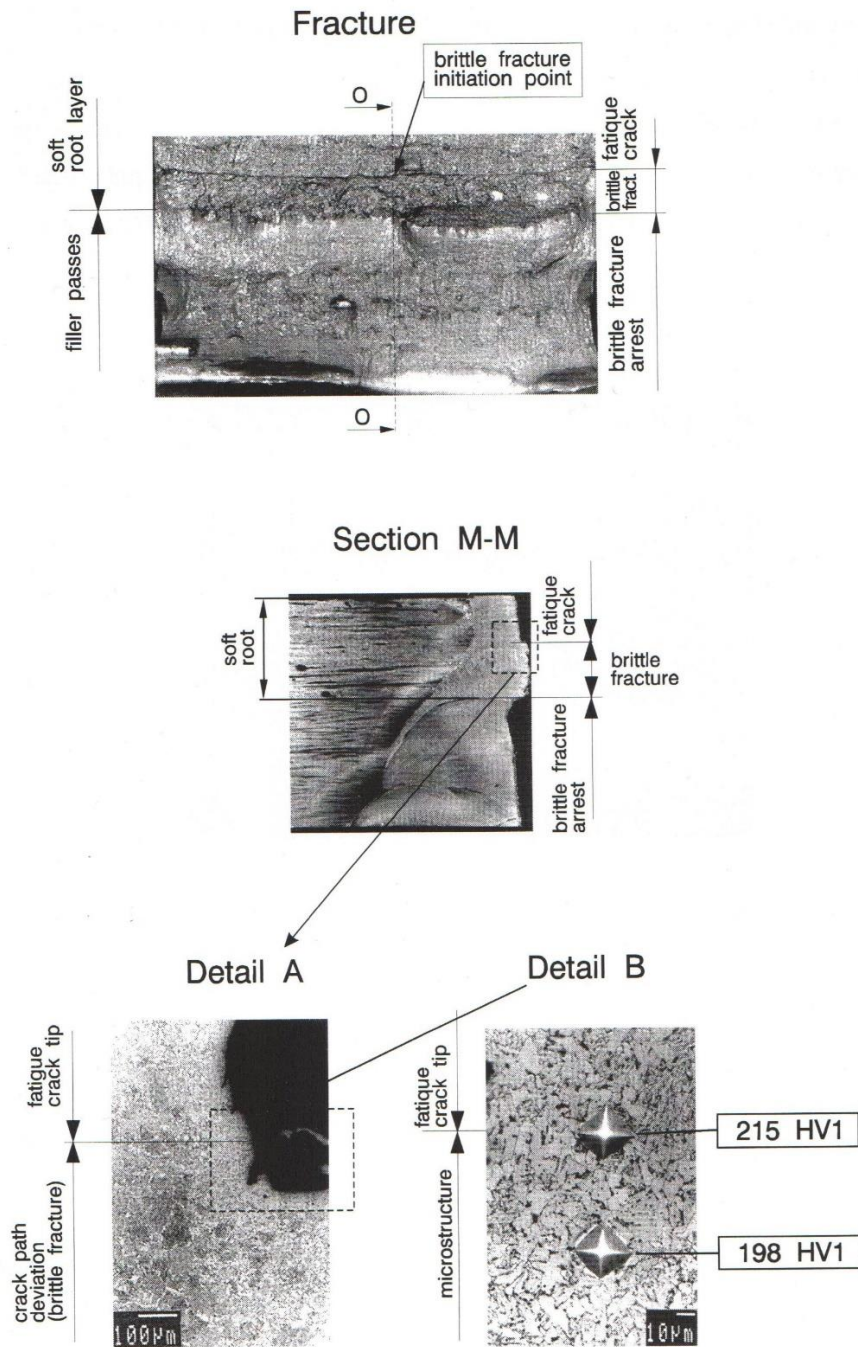


Figure 4.4. Fracture and microstructure in the vicinity of brittle fracture initiation point of specimen $B \times B$ with fatigue crack ($a / W = 0.48$) positioned in soft root region. Ferritic-bainitic microstructure of soft root weld metal (Detail - A) is visible with distributed brittle M-A constituents along ferrite grain boundaries (Detail - B).

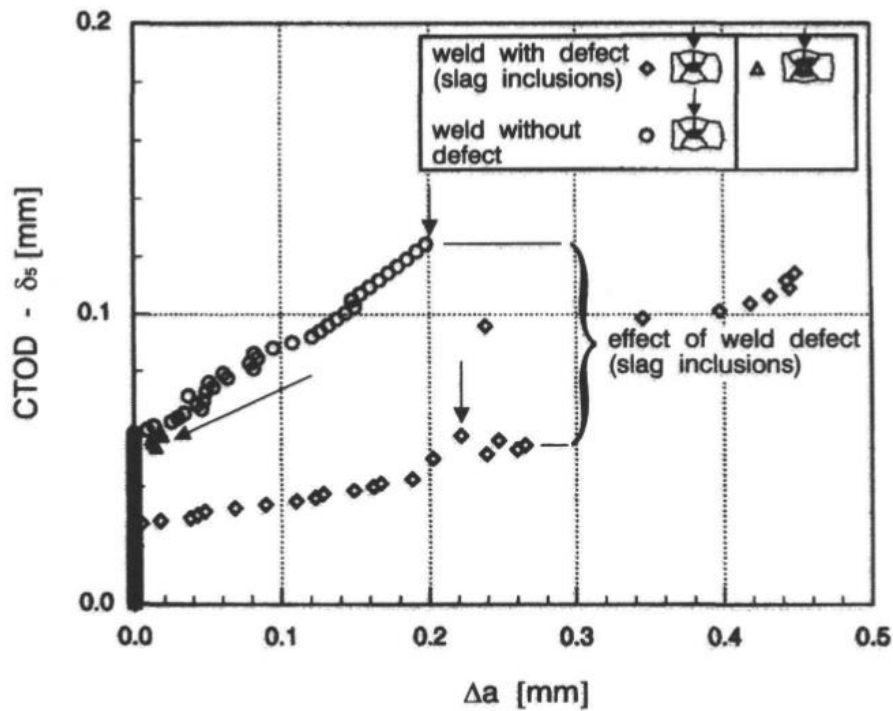


Figure 4.5. Resistance (R) curves for specimens (B × B) with surface crack ($a/W = 0.43$) in soft root layer.

The brittle fracture has appeared due to low fracture toughness of the soft root layer, being specially emphasized for specimens with the fatigue crack directly positioned in the soft root layer (Figure 4.4. - cross-section O-O and detail A), where such brittle fracture appeared (without prior stable crack growth) and finally arrested in the tougher filler region with beneficial bainitic microstructure (Figure 4.3. - cross-section N-N and detail B). The CTOD values of the soft root layer were additionally reduced because of constraint, being largest in the soft root layer of these specimens, because the crack depth (a/W was the largest, weld groove shape coefficient $2H/W - a$ the smallest, and heterogeneity the most prominent. Comparison of CTOD fracture toughness results (Figure 3.2.) shows a significant influence of the soft root layer on fracture toughness of filler region (WELTEC B 575) in heterogeneous welds, causing weld metal fracture toughness to be much higher for the specimens with a surface crack ($a/W = 0.25$) in the homogeneous weld than in a heterogeneous one. The results of CTOD fracture toughness (Figure 3.3.) for specimens with surface crack ($a/W = 0.43-0.48$) in two-passes and four-passes soft root layer indicate somewhat higher toughness of the former one.

From Figure 4.5. one can notice the influence of defects (slag inclusion) on fracture toughness of two-pass soft root layer, because the fatigue crack tip was positioned in it, causing premature specimen fracture and thus low fracture toughness of soft root layer.

The most frequent brittle-fracture initiation points of specimens with crack-tip position in the soft root layer were Al-Si-Mn inclusions (Figure 4.6.) and TiCN carbides. The reason for low fracture toughness of soft root layer is already mentioned microstructure modification due to alloying effect of base metal.

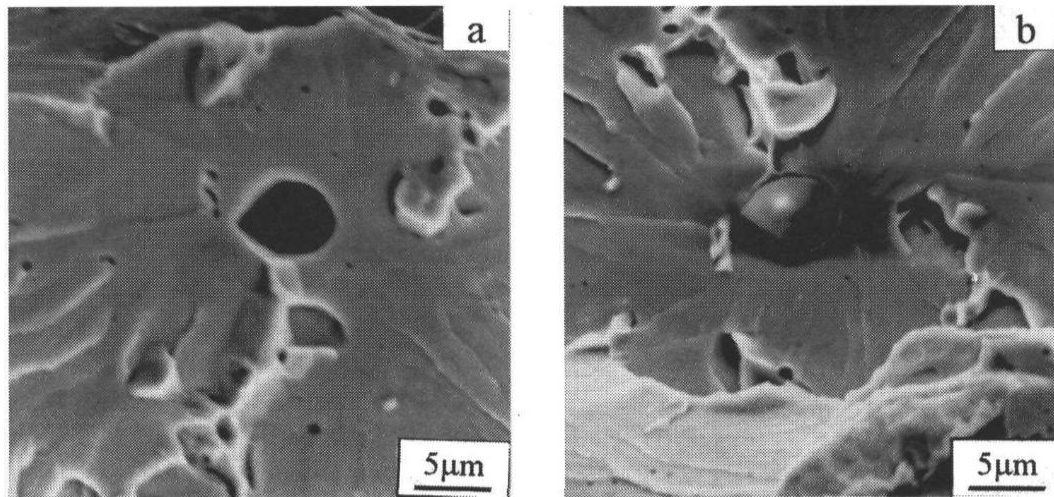


Figure 4.6. Appearance of brittle fracture initiation point (Al-Si-Mn inclusion) on left a) and right b) fracture surface of specimen $B \times B$ with surface crack in the heterogeneous weld, indicated by EDX analysis.

5 Conclusions

1. Selection of soft tough weld consumable (wire) does not guarantee tough root layer in the undermatched weld. Improper selection of weld consumable and thermal effects of subsequent passes on soft root layer can cause modification of the microstructure and reduction of its toughness.
2. Weld metal CTOD fracture toughness, measured by surface notched $B \times B$ specimens with homogeneous and heterogeneous weld metal, is higher for the homogeneous weld. Weld metal CTOD fracture toughness for the heterogeneous weld decreases as the soft root volume increases.
3. Fracture behaviour of CTOD specimens with surface cracks depends on the following three parameters: geometrical constraint due to the different crack depth a/W , groove shape coefficient $2H/(W - a)$, and local plastic constraint in the root region of the weld joint, due to strength mismatching.
4. For the CTOD testing of heterogeneous welded joints, specimens with surface cracks starting from the surface and directed toward weld thickness should be used.

6 Acknowledgements

The author wishes to acknowledge the financial support of the JSPS of Japan and of Aga Gas d.o.o Slovenia.

References

1. Praunseis, Z., Mlakar, M., & Novak, S. (2015). Determination of local brittle zones at the crack front in the HAZ of welded joint. *Journal of energy technology*, 8 (4), 11-22.
2. Praunseis, Z. (2013). Fracture evaluation of energy components with local brittle zones. *Journal of energy technology*, 6 (1), 51-60.
3. Praunseis, Z., Avsec, J., & Marčič, S. (2013). Fractographic examination of welds strength mismatching. *Journal of energy technology*, 6 (2), 11-16.
4. Schwalbe, K.H. (2001). The GKSS test procedure for determining the fracture behaviour of materials. Patent efam GTP, 1-32.

5. Praunseis, Z. (2012). Fracture toughness of heterogeneous energy components. *Journal of energy technology*, 5 (3), 39-45.
6. BS 7448 (1997). Fracture mechanic toughness test, Part 2. Method for determination of K_{IC}, critical CTOD and critical J Values of welds in metallic materials, TV-VI Abingdon Hall Cambridge.

COMPARISON OF A SINGLE-STAGE CYCLE HEAT-PUMP AND A SINGLE-STAGE CYCLE HEAT PUMP WITH INTERNAL EXCHANGERS

Róbert Sánta*

University of Dunaújváros, Táncsics M. 1, 2400, Dunaújváros, Hungary
Subotica Tech - College of Applied Science, Marka O.16, 2400, Subotica, Serbia
santa.robert@uniduna.hu

Igor Fürstner

Óbuda University, Bécsi út 96/b, 1034, Budapest, Hungary
Subotica Tech -College of Applied Science, Marka O.16, 2400, Subotica, Serbia
furstner.igor@bgk.obuda-uni.hu

ABSTRACT

The presented research focuses on the comparison of a single-stage cycle heat-pump and a single-stage cycle heat pump with internal exchangers, investigating the thermodynamic and heat transfer processes of the heat-pumps' cycles. The investigation is performed by establishing the mathematical models using algebraic equations. The numerical investigation takes into consideration the influence of the evaporation and condensation temperatures on the heat-pumps' coefficients of performance, as well as on the compression powers, the mass flow rates of the cooling medium, and the heating capacities of both heat-pump systems. The simulation program is based on steady state mathematical models of the refrigeration circuits, including the compressors, heat exchangers and thermostatic expansion valves. The numerical investigation is performed by using commercial software.

Keywords: heat pump, internal heat exchanger, mathematical model, simulation.

1 Introduction

Nowadays, the energy efficiency is one of the main aspects, which is taken into consideration. There is a high energy demand, both in developed, but also in developing societies, while the classic energy sources are draining. Also, classic energy sources produce huge waste levels.

Increasing the efficiency of energetic processes has been in the focus of attention in almost all countries worldwide as modern economies and societies require and use more and more energy. At the same time, problems are accumulating with the use of traditional energy resources, including, primarily, expanding detrimental impacts on the environment. The highly significant role fossil fuels are supposed to play in climate change has been made explicit in the course of the past decade.

The highest levels of energy saving can be obtained by reasonable energy production and use. The buildings should be insulated, and the heating facilities should be chosen and used carefully. The optimization of the coefficient of performance (COP) of the heat pump requires the exact definition of

* Corresponding author

the appliance, regarding its structure and operation, having in mind the physical and the mathematical modeling and optimization [1,2].

Some researchers theoretically and experimentally investigate the performance of the use of the IHX technology in single-stage refrigeration systems.

For instance, Lorentzen and Pettersen [3] were the first researchers who proposed the use of an IHX in the basic transcritical cycle. Aprea et al. [4] experimentally evaluated the energy performance of the transcritical CO₂ system using an IHX. Results showed that the cycle COP was improved by up to 10.5% with use of IHX as the air temperature at gas-cooler inlet decreased from 40 to 25 °C. Through the experimental study, Aprea and Maiorino [5] discovered that the use of IHE can increase COP by 10% in the residential application.

Cavallini et al. [6] experimentally and theoretically studied the performance of a two-stage compression cycle with an IHX. The experimental analysis indicated that IHX increased the specific cooling capacity and reduced the optimum high pressure. Hence the use of the IHX could improve the cycle COP up to approximately 10%. Torrella et al. [7] experimentally found that the IHE addition in transcritical CO₂ refrigeration system provides a maximum increase in cooling capacity of 12%, an increase of the cycle COP of up to 12% and a maximum increase of the discharge temperature of 10 °C at -15 °C evaporating temperature. Ituna-Yudonago et al. [8] The study is focused on the impact of the variation in temperature and mass flow at the inlet boundary of both hot and cold streams, on the CO₂ thermophysical properties, the heat transfer rate and thermal effectiveness of an internal heat exchanger, and therefore the overall coefficient of performance of a transcritical refrigeration system. Cho et al. [9] found that the cooling capacity and COP can be improved by 6.2%–11.9% and 7.1%–9.1% respectively owing to the IHE addition in the transcritical CO₂ cycle. Domanski et al. [10] studied experimentally the system performance and the thermodynamic benefits of IHX using CO₂ and R-134A. Park et al. [11] analyzed the thermal performance on IHX with a circular coil type. Boewe et al. [12] indicated up to 25% improvement in the COP, as compared to the cycle without IHX. Rozhentsev and Wang [13] reported that the COP may decrease when the size of the internal heat exchanger is high. Mu et al. [14] showed that IHX with a wide capacity can lower the optimum high-side pressure. Yamasaki et al. [15] proved through an experimental study that the IHX improves the efficiency of the refrigeration cycle. Sarkar et al. [16] showed that the use of an IHX may be profitable at higher refrigerant temperatures at the gas cooler exit. Zhang et al. [17] found that the COP is slightly decreased by an IHE in a CO₂ subcritical refrigeration cycle. Through experimental and theoretical studies, Rigola et al. [18] found that the IHE addition increases cycle COP by about 20% at a gas cooler outlet temperature of 35 °C.

The aim of the paper is to compare the thermodynamic processes of a single-stage cycle heat-pump and a single-stage cycle heat pump with internal exchangers, investigating the thermodynamic and heat transfer processes of the heat-pumps' cycles. The used refrigerant is R134a.

2 Development of the mathematical model

The mathematical model enables to obtain the optimal system characteristics, life-cycle parameters and cost determination [19]. The physical model of the major elements of the heat pump system is shown in Fig. 1 and 2. The heat-pump without an internal exchanger is presented in Fig. 1, while the heat pump with internal exchanger is presented in Fig. 2.

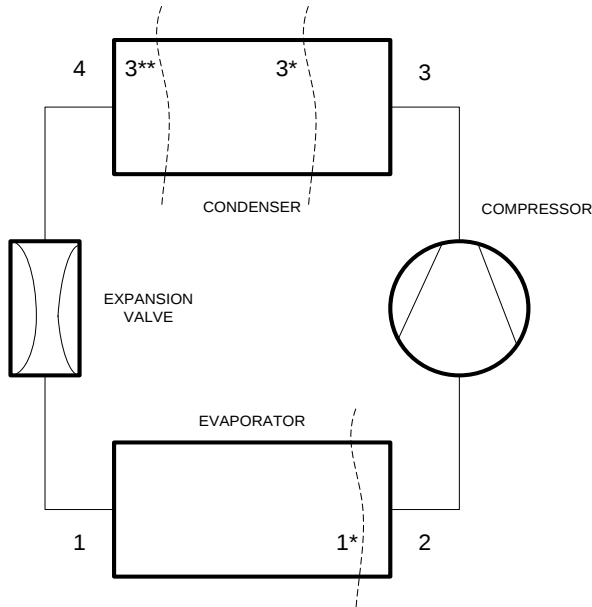


Figure 1. Heat pump without IHX

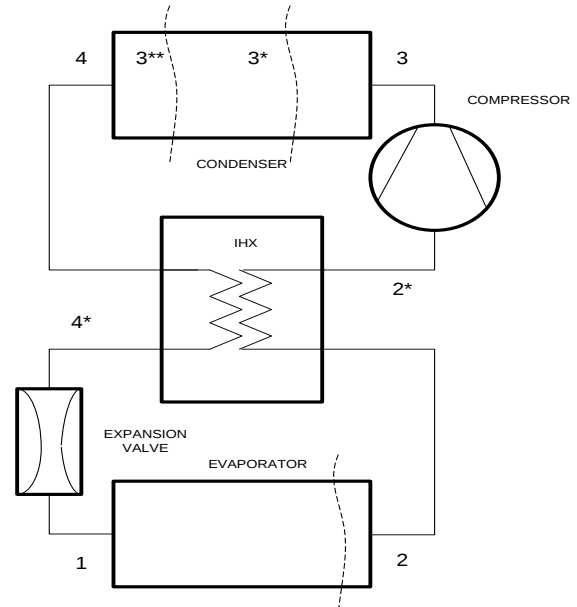


Figure 2. Heat pump with IHX

2.1 Heat exchangers

The mathematical definition of the heat exchangers is performed by using models with concentrated parameters, because the processes' variables, and their interaction are not a function of the position, i.e. the coordinates. This mathematical model is widely used because it is relatively simple, and determined.

A simple analysis of standard vapor compression heat pump system can be carried out by assuming:

- steady-state operation mode,
- lumped parameters,
- pressure drop in exchangers is small therefore are neglected,
- the wall thermal resistance is too small so it has been neglected.

The steady flow energy equation is applied to each of the five components.

2.1.1 Evaporator

Heat transfer rate in evaporator $\dot{Q}_o$ is given by:

$$\dot{Q}_o = \dot{m}_{ref} \cdot (h_1 - h_2). \quad (1)$$

The evaporator has been modeled by dividing it the two zones (Eq.2) associated with the state of the refrigerant: evaporation (Eq.3) and superheating (Eq.4).

$$\dot{Q}_o = \dot{Q}_{eva} + \dot{Q}_{sh}. \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{eva} = \dot{m}_{ref} \cdot (h_1 - h_{1*}). \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{sh} = \dot{m}_{ref} \cdot c_{p,vapor} \cdot (T_{1*} - T_2). \quad (4)$$

The required evaporator area is given by the equation:

$$\dot{Q}_o = U \cdot A \cdot \Delta T_{ln}. \quad (5)$$

The heat received by the cooling water:

$$\dot{Q}_o = \dot{m}_{hw} \cdot c_{p,water} \cdot (T_2 - T_1). \quad (6)$$

2.1.2 Condenser

The total heat rejected in the condenser, Q_c is given by:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{ref} \cdot (h_3 - h_4). \quad (7)$$

The equations which determine the model are based on energy balance. The condenser is divided into three zones (Eq.8); the superheated section (Eq.9), the condensation (Eq.10), and the sub-cooling section (Eq.11).

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_{sh} + \dot{Q}_{con} + \dot{Q}_{sc}. \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{sh} = \dot{m}_{ref} \cdot c_{p,vapor} \cdot (T_3 - T_{3*}). \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{con} = \dot{m}_{ref} \cdot (h_{3*} - h_{3**}). \quad (10)$$

$$\dot{Q}_{sc} = \dot{m}_{ref} \cdot c_{p,liquid} \cdot (T_{3**} - T_4). \quad (11)$$

The required condenser area is given by the equation:

$$\dot{Q}_c = U \cdot A \cdot \Delta T_{ln}. \quad (12)$$

The heat received by the heating water:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{hw} \cdot c_{p,water} \cdot (T_3 - T_4). \quad (13)$$

2.1.3 Internal heat exchanger

At the heat exchanger, the high temperature liquid cooling working fluid transfers heat to the low temperature vapor cooling working fluid. At the inner heat exchanger, the flow rates of both fluids are the same, but the flows are counter flows. The heat exchanger is insulated regarding the surroundings. The energy conservation equation can be defined as:

$$\dot{Q}_{IHx} = \dot{m}_{ref} \cdot c_{p,liquid} \cdot (T_4 - T_{4*}) = \dot{m}_{ref} \cdot c_{p,vapor} \cdot (T_{2*} - T_2). \quad (14)$$

The required heat exchanger area is given by the equation:

$$\dot{Q}_{IHx} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ln}. \quad (15)$$

2.2 Compressor

The compressor as a system component can be described by the enthalpy change specified by the compression ratio and the internal efficiency of the compressor. Power input to the compressor, P is given by:

$$P = \dot{m}_{ref} \cdot (h_3 - h_{2(2*)}) \cdot \frac{1}{\eta}. \quad (16)$$

2.3 Expansion valve

The expansion valve (proportioning valve) is intended to supply appropriate quantities of refrigerant to the evaporator in function of overheating. Isenthalpic throttling is assumed in operation. The mass flux of the refrigerant flowing through the expansion valve is:

$$G = C \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho_f}. \quad (17)$$

3 Results and discussion

The experimental investigation of any heat pumps system is usually very complicated, mainly due to the financial costs and the large number of variables involved. The use of numerical models can reduce the costs and also facilitate understanding the phenomena related to the problem [20]. In the presented research, the status indicators and their change of two compared heat-exchangers were determined. The investigation is performed by using different evaporation and condensation temperatures, and by changing the cooling capacity of the heat pumps.

The parameters used during the simulation are the following:

- Refrigeration: $R134a$
- Evaporation temperature:
 $t_o = -10, -5, 0, 5, 10, 15$ [°C].
- Condensation temperature:
 $t_c = 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70$ [°C].
- Cooling capacity:
 $Q_o = 1, 3, 5, 7, 9$ [kW].
- Efficiency of the compressor: $\eta = 0.763$
- Min.temperature in the internal heat exchanger: $T = 5$ [K]

The simulation results are presented graphically in the following figures (from Fig.3 to Fig.6). Additionally to each figure, a short discussion is given regarding the obtained results.

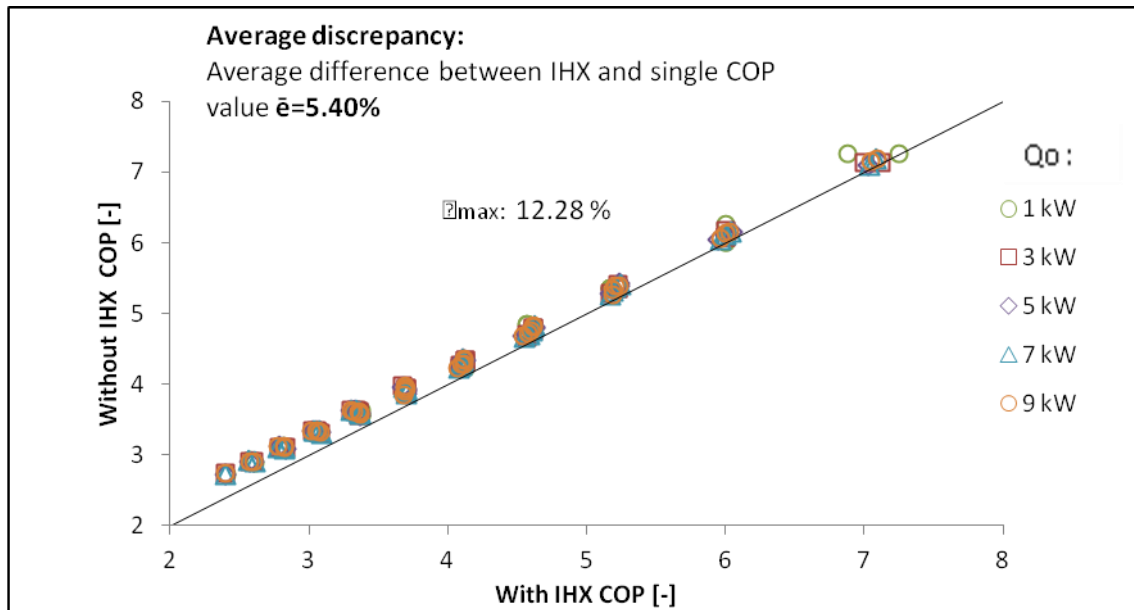


Figure 3. Comparison of COP values with and without internal exchanger.

In Fig. 3, COP values in the case of a heat pump with and a heat pump without internal heat exchangers are presented. The average value of COP in the case of a heat pump with internal heat exchanger is higher by 5.4%. The highest discrepancy is 12.28% for $t_o = -10$ [°C], $t_c = 70$ [°C], and $Q_o = 9$ [kW]. For $t_o = 10$ [°C], $t_c = 35$ [°C], and $Q_o = 1$ [kW], the COP values are similar.

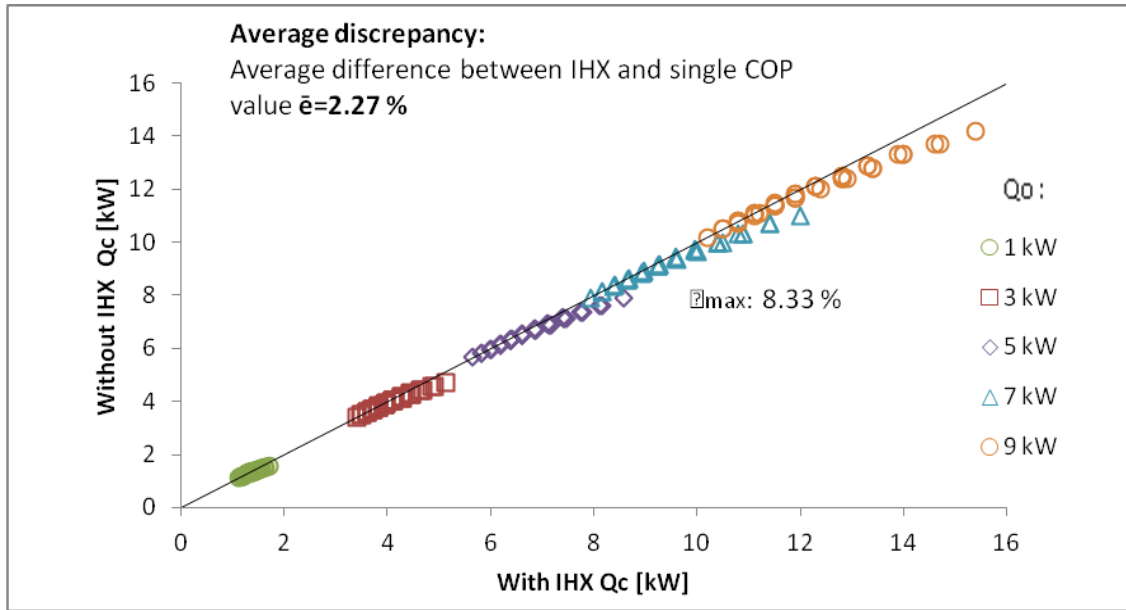


Figure 4. Comparison of heating capacities with and without internal exchanger.

In Fig. 4, the heating capacities are presented, both with and without internal exchangers. The average value of heat capacity in the case of a heat pump with internal heat exchangers is 2.27% lower than in the case of a heat pump without internal heat exchangers. The highest Q_c discrepancy is 8,33% for $t_o = -10$ [°C], $t_c = 70$ [°C], $Q_o = 7$ [kW]. For $t_o = 10$ [°C], $t_c = 35$ [°C] the Q_c values are similar.

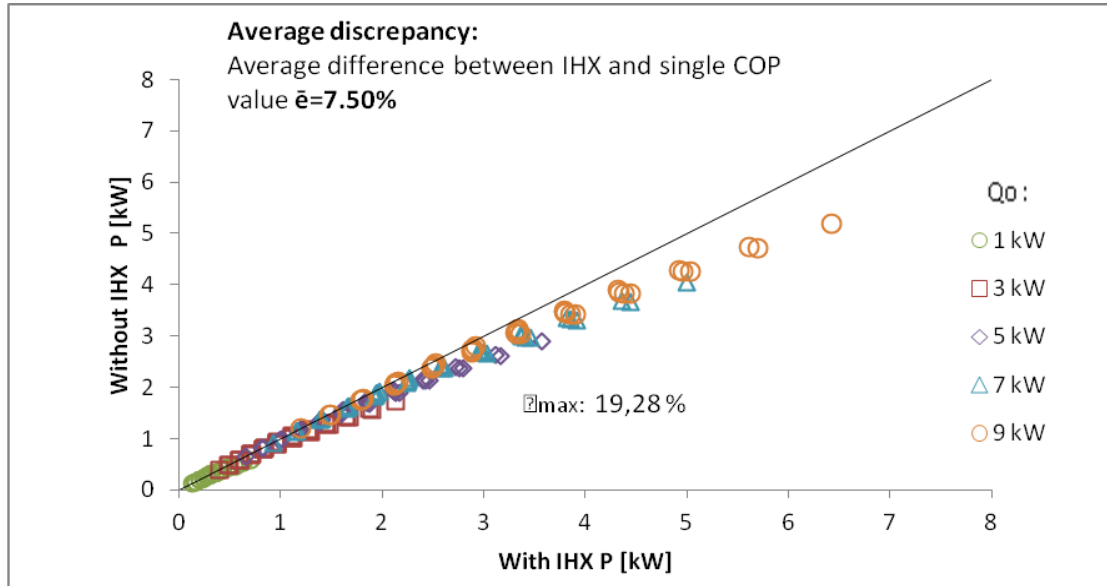


Figure 5. Comparison of power demand with and without internal exchanger.

In Fig. 5, the power demands are presented, both with and without internal exchangers. The average value of power demand in the case of a heat pump with internal heat exchangers is 7.5% lower than in the case of a heat pump without internal heat exchangers. The highest discrepancy is 19.28% for $t_o = -10$ [°C], $t_c = 70$ [°C], $Q_o = 7$ [kW]. For $t_o = 10$ [°C], $t_c = 35$ [°C], and $Q_o = 1 - 5$ [kW], the values are similar.

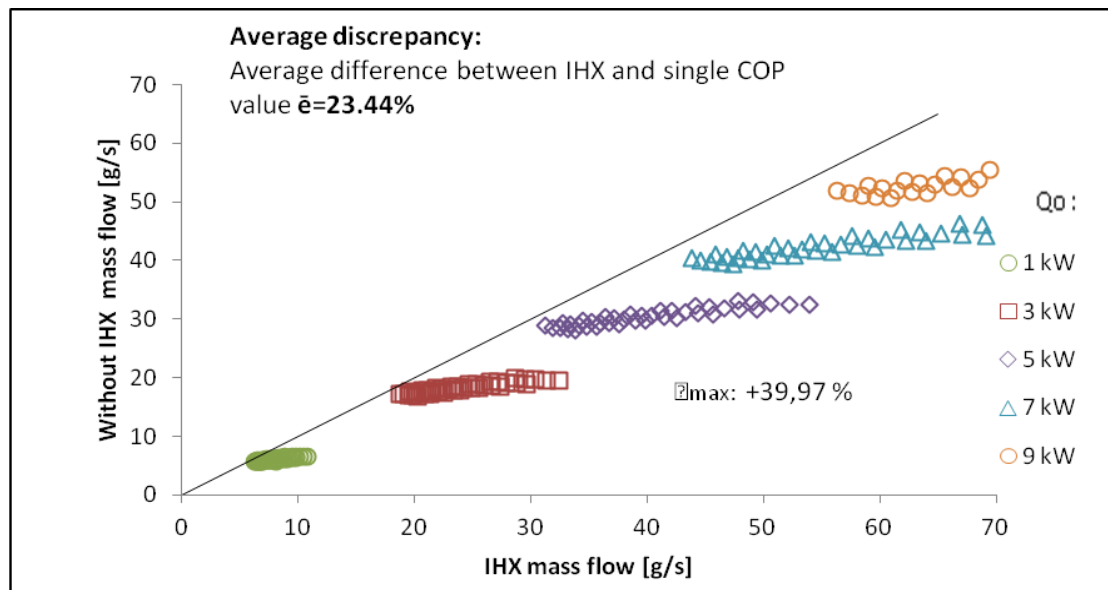


Figure 6. Comparison of mass flow with and without internal exchanger.

In Fig. 6, the mass flows are presented, both with and without internal exchangers. The average value of mass flow in the case of a heat pump with internal heat exchangers is 7.5% lower than in the case of a heat pump without internal heat exchangers. The highest discrepancy is 39.97% for $t_o = -10$ [°C], $t_c = 70$ [°C], $Q_o = 1, 3, 5, 7, 9$ [kW]. For $t_o = 10$ [°C], $t_c = 35$ [°C], and $Q_o = 1 - 9$ [kW], the lowest discrepancy is 8%.

4 Conclusions

The simulation results in the case of the heat-pump with internal heat exchangers and the heat-pump without heat exchangers made it possible to determine the processes inside them. In Fig. 3 to Fig. 6, the changing values of the thermodynamic properties of the two heat-pumps were compared. The results of the comparison made it clear that the heat-pump with the internal heat exchangers has higher COP values for the given conditions (Fig. 3). This result could be explained by lower heat capacities of the compressor, due to the fact that the inlet cooling medium is preheated with the outlet heating medium from the condenser. The simulation also presented that the power demand (Fig. 5) in the case of the heat-pump with internal exchanger is lower, but the value is not significantly lower than in the case of the heat pump without internal heat exchanger.

Higher values of COP is an advantage, but the heat pump without internal heat exchangers also has some disadvantages, because of higher investments, and the pressure loss of the working fluid in the heat exchanger has to be covered by additional mechanical work.

References

1. R. Santa, L. Garbai, I. Firstner, Optimization of heat pump system. Energy 2015;89:45-54.
2. B.D. Mónika, M. Horváth, Á. D. Kiss. Experimental Design and Study of Shear Technology for Biomass Comminuting, Applied Mechanics and Materials 2014, 564, pp 555-559, (2014)
3. G.Lorentzen, J. Pettersen, A new efficient and environmentally benign system for car air-conditioning, Int. J. Refrig. 16 (1993) 4–12.

4. C. Aprea, A. Greco, A. Maiorino, The substitution of R134a with R744: an exergetic analysis based on experimental data, *Int. J. Refrig.* 36 (2013) 2148–2159.
5. C. Aprea, A. Maiorino, An experimental evaluation of the transcritical CO₂ refrigerator performances using an internal heat exchanger, *Int. J. Refrig.* 31 (2008) 1006–1011.
6. A. Cavallini, L. Cecchinato, M. Corradi, E. Fornasieri, C. Zilio, Two-stage transcritical carbon dioxide cycle optimisation: a theoretical and experimental analysis, *Int. J. Refrig.* 28 (2005) 1274–1283.
7. E. Torrella, D. Sánchez, R. Llopis, R. Cabello, Energetic evaluation of an internal heat exchanger in a CO₂ transcritical refrigeration plant using experimental data. *Int. J. Refrig.* 2011, 34, 40–49.
8. Ituna-Yudonago, J.M. Belman-Flores, F. Elizalde-Blancas, O. García-Valladares, Numerical investigation of CO₂ behavior in the internal heat exchanger under variable boundary conditions of the transcritical refrigeration system, *Applied Thermal Engineering* 115 (2017) 1063–1078.
9. H. Cho, C. Ryu, Y. Kim, Cooling performance of a variable speed CO₂ cycle with an electronic expansion valve and internal heat exchanger, *Int. J. Refrig.* 30 (2007) 664–671.
10. P. A. Domanski, D. A. Didon and J. P. Doyle, Evaluation of suction-line/liquid-line heat exchanger in the refrigeration cycle, *International Journal of Refrigeration*, 17 (1994) 478–493.
11. B. K. Park, G. O. Kim and M. G. Kim, Thermal performance analysis of circular coil type Internal Heat Exchanger for transcritical CO₂ system, *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering*, 14(7) (2002) 531–542.
12. D.E. Boewe, C.W. Bullard, J.M. Yin, P.S. Hrnjak, Contribution of internal heat exchanger to transcritical R-744 cycle performance, *HVAC Res.* 7 (2001) 155–168.
13. A. Rozhentsev, C.C. Wang, Some design features of a CO₂ air conditioner, *Appl. Therm. Eng.* 21 (2001) 871–880.
14. J.Y. Mu, J.P. Chen, Z.J. Chen, System design and analysis of the transcritical carbon dioxide automotive air-conditioning system, *J. Zhejiang Univ. Sci. A* 4 (2003) 305–308.
15. H. Yamasaki, M. Yamanaka, K. Matsumoto, G. Shimada, Introduction of transcritical refrigeration cycle utilizing CO₂ as working fluid. *International Compressor Engineering Conference*, 2004, paper 1632.
16. J. Sarkar, S. Bhattacharyya, M. Ramgopal, Optimization of a transcritical CO₂ heat pump cycle for simultaneous cooling and heating applications, *Int. J. Refrig.* 27 (2004) 830–838.
17. F.Z. Zhang, P.X. Jiang, Y.S. Lin, Y.W. Zhang, Efficiencies of subcritical and transcritical CO₂ inverse cycles with and without an internal heat exchanger. *Appl. Therm. Eng.* 2011, 31, 432–438.
18. J. Rigola, N. Ablanque, C.D. Pérez-Segarra, A. Oliva, Numerical simulation and experimental validation of internal heat exchanger influence on CO₂ trans-critical cycle performance. *Int. J. Refrig.* 2010, 33, 664–674.
19. F. Szlivka, Different Mathematical Solutions on Gas Oscillation. *Acta Polytechnica Hungarica* 2014, 11:(02) pp. 101–115.
20. F. Bencze, I. Keszthelyi, G. Pekáry, F. Szlivka, Die Wirkung der Schaufelzahländerung auf die Kennzahlen von Axialventilatoren. *Heizung/Lüftung/Haustechnik* 1990, 8(8) pp. 700–706.

NAVIDEZNA RESNIČNOST IN HITRA IZDELAVA PROTOTIPOV V PEDAGOŠKO RAZISKOVALNEM PROCESU NA FAKULTETI ZA ENERGETIKO

VR AND RP IN ENGINEERING EDUCATION AND RESEARCH PROCESS AT FACULTY OF ENERGY TECHNOLOGY

Gorazd Hren*, Marko Pezdevšek, Matej Fike

University of Maribor, Faculty of Energy Technology, Hočevarjev trg 1, 8270 Krško, Slovenia
gorazd.hren@um.si, marko.pezdevsek@um.si, matej.fike@um.si

POVZETEK

Sistemi navidezna resničnosti in tehnologije 3D tiskanja so dosegle zadostno stopnjo razvoja, da jih je potrebno upoštevati in vpeljati kot inovativne aplikacije na področju izobraževanja in raziskovanja v visokem šolstvu. Enega večjih izzivov te visoke tehnologije predstavljajo stroški nabave in vzdrževanja, ki so izredno visoki za izobraževalne ustanove. Vendar pa je v zadnjih letih razvoj teh tehnologij in s tem nižanje stroškov dosegel nivo, ko jih je mogoče vključiti v prihodnje strategije poučevanja in raziskovalnega dela. Iz raziskovalnega vidika, je čas, da podjetja za evalvacijo inovacij vključujejo nove tehnologije, še posebej tiste, ki omogočajo razvoj izdelkov z višjo dodano vrednostjo in omogočajo večje spremljanje, učenje in odpravljanje težav izdelkov, med obratovanjem v njihovem navideznem delovnem okolju. V prispevku je opisan pristop k virtualnemu inženiringu v raziskovalnem in izobraževalnem okolju, ki se implementira na Fakulteti za energetiko.

Ključne besede: izobraževanje, inženiring, navidezna resničnost, 3D printanje

ABSTRACT

Virtual reality systems and 3D printing have achieved an adequate level of development to be considered in innovative applications in education and research in higher education. One of the challenges of high technology is the costs associated which have been unaffordable for educational institutes. However, in recent years, computer hardware, software and printing technology development has made it more feasible to incorporate into future teaching strategies. From research point of view, it is the time for companies to innovate by incorporating new technologies, particularly those that inject products with greater intelligence and the ability to monitor, learn, and fix problems while functioning in their operational environment. This paper explains virtual engineering principle for interactive research and educational environment implemented at Faculty of energy technology.

Keywords: Education, Engineering, Virtual Reality, 3D printing

* Corresponding author

1 Introduction

In education the new technologies are very influential factor much more as it has ever been. A new generation of engineering students is entering higher education with significant computing knowledge, and with higher expectations that academic institutes will introduce them to appropriate technologies for their successful transformation into industry. Research in virtual reality and education is novel and has potential for expansion in the coming years (Abdul-Hadi et al, 2019). In the research by IEEE Transmitter over 150000 attendees of Consumer Electronics Show produce the 8 top technological trends in 2016 (IEEE, 2015) that should be track in 2016. Virtual reality and 3D printing are on 4th and 7th place. In the last years, Virtual Reality Systems has much attention of the researchers and industry. It is the recent advances in hardware and software that brought this technology within the reach of ordinary users and researchers. Virtual reality, as a concept has been around for over forty years and is characterized by high degrees of immersion and interaction. Its main goal is to make user believe, that user is actually in the computer operated environment. Virtual Reality system has the potential to create systematic human testing, training and treatment environments which allow control of complex, immersive, dynamic 3D stimulus presentations. This in turn makes interaction sophisticated, tracking of behaviour and recording of performance possible. Virtual reality can be identified with the following concepts: simulation, interaction, artificiality, immersion and network communication. Virtual Reality implementations make use of high speed and high quality 3D graphics and audio with a combination of interactive devices to achieve realism and believability.

The use of high-tech technology is spread across the industry giving the ability to virtually explore a complete product before conception, to improve techniques in the process of product development using CAD software and validate a design before committing to making a physical prototype (Fig. 1).

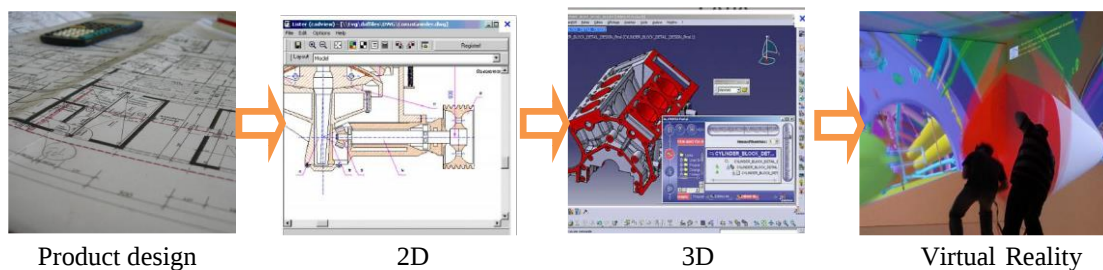


Figure 1. Development from rom product design to VR

3D Printing is a very powerful tool for design and manufacturing industry. With the rapid development of 3D Printing technologies in recent years, the equipment has become more affordable and accessible for general public. For higher education, 3D Printing is one of the most popular technologies adopted. Known as “Rapid Prototyping”, 3D Printing has been used in engineering education to enhance design related courses. Over the years, it gradually became an important component of the design and manufacturing curricula from start-year design and drafting courses to final-year projects. The main reason that 3D Printing has become so popular in engineering education is the simplicity of its operation, compared to traditional machining processes, and the spontaneous delivery of results which provides a significant impact on learning experience. From the literature as Sinha (2009), it has been observed that 3D Printing is helpful in visualization, presenting real-world applications, and closing the gap between theories and practices. These designs involve complex geometric structures that are difficult to fabricate using traditional machining processes. With 3D Printing, the prototypes can be fabricated easily, and the

student projects can be completed within reasonable timeframe and budget range. In addition to ease of use, the freeform capability and recently available multi-material processes open a new window for engineering practices and some other areas.

2 New equipment in CADER laboratory

We recently equipped two laboratories, CADER 3DVisualisation and CADER 3DPrint for virtual and rapid prototyping and 3D printing, respectively.

The Corner Cave Vario 90/180 is a flexible 3D Projection System. There are two options to use it. In the first case, it is a doubled sized big Powerwall and in the second case it is like a two sided cave, as could be seen from Fig. 2.

There are two individual Powerwalls to make this possible. Each of them had a size of 320cmx200cm with a resolution of WQXGA and 5000 lumen brightness. Each Powerwall is mounted to their own chassis. The chassis are mounted behind the projection surface and stand on rolls to make it moveable.

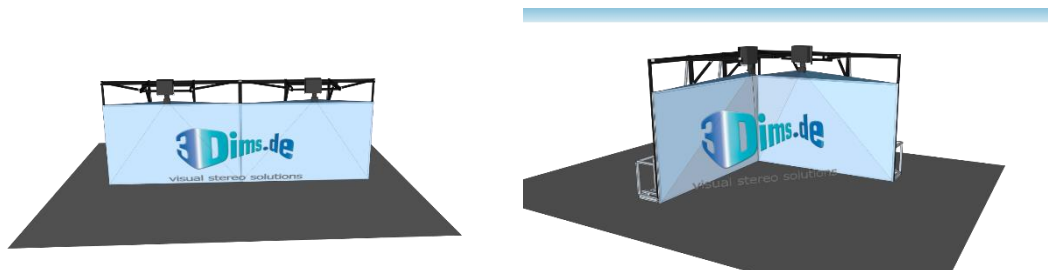


Figure 2. Double Sided Big Powerwall or Two Sided Cave (3Dims, 2016)

The projectors are mounted to an overhang in front of the projection surface. Projector BARCO F50 WQXGA enables high quality projections on small distance from the screen (Fig. 3).

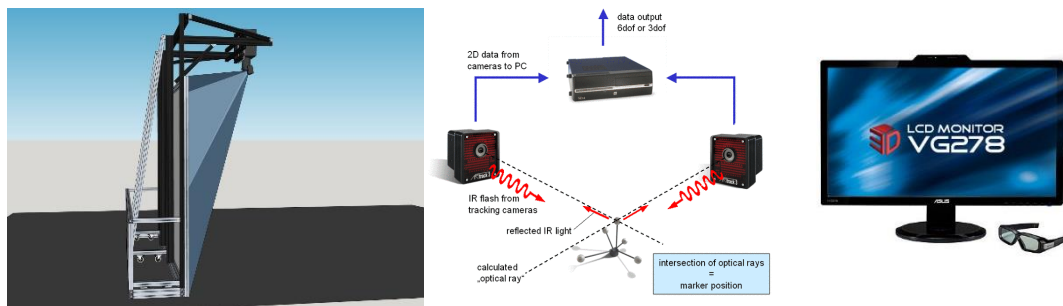


Figure 3. Small projection distance, motion tracking system and 3DVision equipment (VRLogic; nvidia.com)

The CADER laboratory is equipped with three 4K resolution monitors enabling to work stereo 3D on computer monitor with NVIDIA 3DVision equipment on 200Hz (Fig. 3).

Such a powerful computer graphics is supported by two workstations, with following main performances:

- Intel Dual Socket Motherboard
- 2xIntel® Xeon E5_2699v3, 18 cores 2,3GHz (Haswell) main CPUs on-board

- 128 GB DDR4 RAM
- 400GB SSD, 2TB HDD
- Nvidia Quadro M6000, Nvidia Tesla K40 12GB 2880 CUDA Cores,
- and Intel X450 Dual 10GBase.

Other equipment is needed for work interactively in 3D. We use ART Trackpac4 System with 4 cameras as tracking system (Fig. 3) of movement in working area with ART controller, targeting shutter glasses and wand (Fig. 4).



Figure 4. Interaction devices: Wand, Master Shutter glasses and 3D SpaceMouse Pro

P3D Virtual Sight (VRLogic, 2016) is a virtual reality software solution designed for the visualization of Digital Aspect Mock-up on a 1:1 scale on multi-screen immersive systems. Visualization on a 1:1 scale makes it possible to assess objects with regard to their actual size and complements the photorealistic rendering quality of the Lumiscaphe (2016) rendering engine with an extra dimension of realism. P3D Virtual Sight conforms to a wide range of configurations. Its use is suited to various visualisation profiles and modes, such as multi-screen devices, image walls based on juxtaposed projections, immersive systems of the CAVE type or Head Mounted Displays.

P3D Virtual Sight also supports multiple stereoscopic display modes and can be interfaced with various tracking systems to enhance sensorial experimentation during project review.



Figure 5. VR pilot software on monitor and in corner cave.

For modelling and geometry creation the laboratory is equipped with CATIA, SolidWorks and Ansys software.

The laboratory for 3D printing is equipped with two small devices and one large format top-off the class 3D printing device.

3DSYSTEMS CubePro Trio; (Fig. 6)

build size: 20x23x27cm; three materials in one print; accuracy: 0,1mm; material: PLA, ABS, nylon; software; WiFi; iSense scanner: scan volume 0,2-3m³; VGA resolution (640x480), accuracy: 1mm.

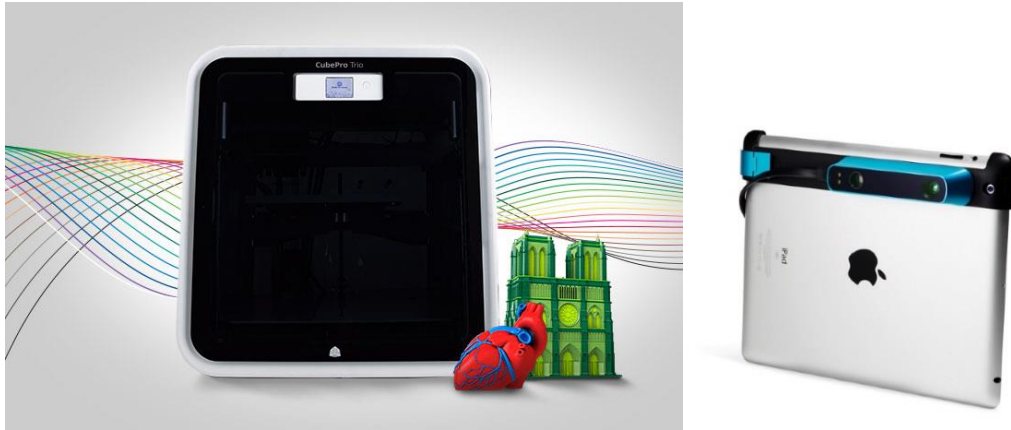


Figure 6. 3DSYSTEMS CubePro Trio and iSense scanner

TYPE A MACHINES Series 1 (Fig. 6)

build size: 30x30x30cm; accuracy: 0,2mm; material: PLA, ABS, nylon; software; WiFi

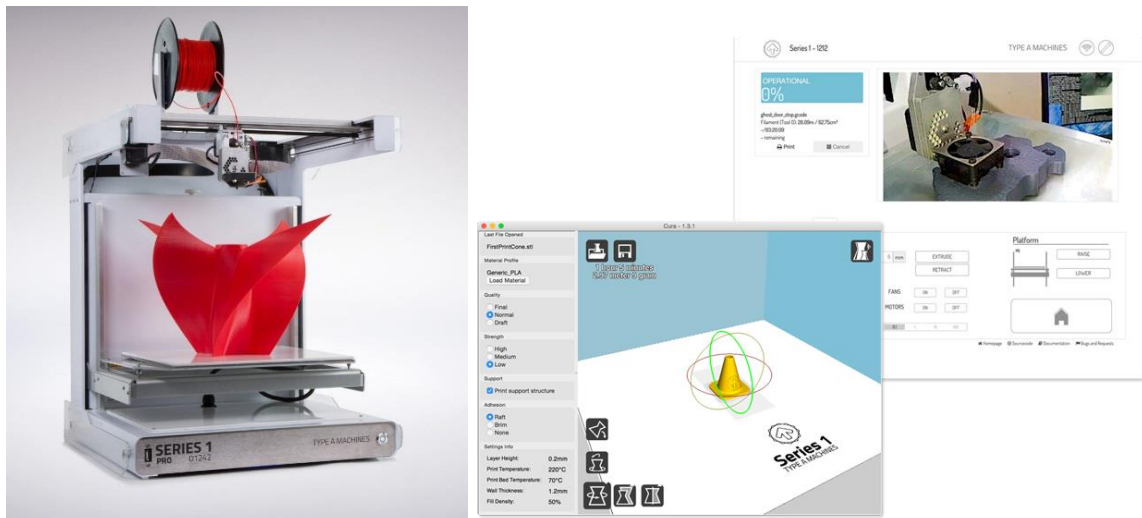


Figure 7. Type A Machines Series 1 and corresponding software.

EnvisionTec XEDE (Fig.7)

build size: 46x46x46cm; accuracy: 0.05mm; material: 3SP photopolymers; software; WiFi, on-board computer

EnvisionTEC's Xede 3SP large format 3D printer allows for the production of exceptionally large 3D parts, built at fast build speeds without sacrificing surface quality and part accuracy. The Xede 3SP uses EnvisionTEC's 3SP (Scan, Spin, and Selectively Photocure) technology to quickly 3D print highly accurate parts from STL files regardless of geometric complexity. 3D printer is delivered and installed with all the relevant software to enable automatic generation of supports and perfect model production.

The reliability of the light source and the high speed productivity of the Xede 3SP makes it one of the most competitive 3D printers on the market.



Figure 8. EnvisionTEC XEDE and UV light post curing polymerization chamber

3 Conclusion

Interactive and immersive 3D visualisation virtual reality technology is a promising technology for the engineering education. It represents a tool that can create a pipeline for cooperation and research with industry to prepare the next generation of graduate engineering with the required skills. Although cost is recognised as a key challenge, leading educational institutes have already implemented the technology for research and education purposes. However, the more the technology advances, the more affordable it becomes. Thus, it is expected that institutes will implement the necessary hardware and software level for virtual reality to be strategically adopted in the future of engineering education.

3D Printing is certainly a new component that should be included in engineering education curriculum. When the current students graduate, they will be facing a new era of design and manufacturing. While there is much educational value and there are many solid pedagogical reasons to be using 3D printing, it is worth remembering the fun side of creation.

References

1. IEEE Transmitter (2015) 8 Tech trends that should be track in 2016, [http://transmitter.ieee.org/8-tech-trends-track-2016/] April 7, 2016
2. Sinha, A. (2009), New Frontiers in Manufacturing Education: Rapid Prototyping, 3D Scanning and Reverse Engineering, Proceedings of 2009 ASEE Southeast Section Conference.
3. Abdul-Hadi G. Abulrub, Alex N. Attridge and Mark A. Williams (2010), Virtual Reality in Engineering Education, The Future of Creative Learning, 2011 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Jordan
4. 3Dims.de (2016), www.3dims.de/news, April 7, 2016
5. VRLOGIC (2016), www.vrlogic.com, April 7, 2016
6. envisionTEC (2016), http://envisiontec.com/3d-printers/large-frame-family/xede-3sp/, April 7, 2016
7. 3DSYSTEMS (2016), CubePro, http://www.3dsystems.com/shop/cubepro, April 7, 2016
8. Type A Machines (2016), series-1, http://www.typeamachines.com/series-1, April 7, 2016
9. LUMISCAPHE (2016) real-time 3D solutions, http://www.lumiscaphe.com/en/, April 7, 2016

Dr. Gorazd Hren is a lecturer at the Faculty of Energy Technology, University of Maribor, Slovenia. He obtained his BSc in 1986 from University of Maribor, MSc and DIC from Imperial College of Science, Technology and Medicine, London in 1990 and PhD degree in 2003 from the University of Maribor, all in mechanical engineering. Since 1986 he was employed at University of Maribor, at Faculty of Mechanical Engineering and from 2008 at Faculty of Energy Technology. He was doing one year research work at Fraunhofer IGD in Darmstadt, Germany. His research is focusing on CAD, parametric technology and data exchange, numerical analysis, virtual prototyping, rapid prototyping, collaborative design and Web-based technologies.

Marko Pezdevšek is an assistant at the Faculty of Energy Technology, University of Maribor, Slovenia. He completed the 1. Bologna level in 2012 and 2. Bologna level in 2015 both at the Faculty of Energy Technology, University of Maribor. His research is focusing on computational fluid dynamics and rapid prototyping.

Dr. Matej Fike was born in 1981 in Maribor. After graduating at II Gymnasium high school in Maribor he studied industrial engineering, course mechanical engineering, at the Faculty of Mechanical engineering University of Maribor. After graduation he was in employment by AJM Ltd from Kozjak nad Pesnico. In 2007 he applied and was chosen for a young researcher at the Faculty of mechanical engineering University of Maribor, where he was also employed at the Laboratory for heat machines and technical measurements at Institute for Energy, Process and Environmental engineering. In 2009 he was elected assistant at the main domain of Energy, Process and Environmental Engineering. During the period from September to October 2010, he studied abroad at the Norwegian Institute of IFE (Institute of Energy Technology) in Oslo (Kjeller). A part of the research on the topic of the doctoral thesis was made there. From 2013 he is employed at the Faculty of Energy University of Maribor as an assistant. His research is focusing on computational fluid dynamics, computational data acquisition and measurements.

PRIMERJAVA TLAČNIH IZGUB V KOTLOVSKIH DELILNIKIH

COMPARISON OF PRESSURE LOSSES IN BOILER MANIFOLDS

Matej Fike*

Fakulteta za energetiko, Hočevarjev trg 1, 8270 Krško, Slovenija
matej.fike@um.si

Marko Pezdevšek

Fakulteta za energetiko, Hočevarjev trg 1, 8270 Krško, Slovenija
marko.pezdevsek@um.si

POVZETEK

Energetska učinkovitost ima za zagotavljanje ciljev energetske politike in širših razvojnih ciljev države, zlasti zaradi potenciala za izboljšanje konkurenčnosti družbe, zelene rasti in zaposlitvenega potenciala, izjemen pomen. Z namenom povečanja energetske učinkovitosti ogrevalnih sistemov smo analizirali tlačne izgube v kotlovskih delilnikih. Izvedene so bile meritve tlačnih padcev v odvisnosti od pretoka za tri oblikovno različne vendar funkcionalno enake delilnike. Da se pri iskanju optimalne oblike delilnika izognemo dragim laboratorijskim meritvam, za katere je potrebno predhodno izdelati prototipe, smo izvedli tudi numerične simulacije in rezultate simulacij primerjali z meritvami.

Ključne besede: energetska učinkovitost, kotlovski delilniki, tlačni padec, meritve, numerične simulacije

ABSTRACT

Energy efficiency is very important in order to ensure the objectives of energy policy and broader development goals of the country, especially due to the potential for improving competitiveness, green growth and employment potential. In order to increase the energy efficiency of heating systems, the pressure losses in the boiler's manifolds were analysed. Experimental measurements of pressure drop as a function of flow rate for three-dimensionally different but functionally the same manifolds were carried out. To find the optimal shape of manifold and to avoid expensive laboratory measurements, which require manufacturing of prototypes, numerical simulations were performed, and results were compared with measurements.

Key words: energy efficiency, boiler manifolds, pressure drop, measurements, numerical simulation

* Corresponding author

1 Uvod

Stavbe se običajno ogrevajo s kotli na različne energente. Ogrevanje stavb se običajno vrši s kotli na različne energente. Funkcija kotlov je zagotavljanje tople ogrevalne vode za ogrevanje. Običajno imajo stavbe več ogrevalnih krogov, recimo ločen ogrevalni krog za radiatorsko ogrevanje, talno ogrevanje, akumulacijo toplote v hranilniku toplote itd. Ogrevalni krogi morajo biti med seboj ločeni, saj imajo lahko različno temperaturo ogrevalne vode in različne pretoke. Za delitev ogrevalne vode iz kotla na več ogrevalnih krogov se uporabljajo kotlovski delilniki, katerih namen je tudi združitev ohlajene povratne vode iz ogrevalnih krogov na povratku v kotel. Delilniki se med seboj ločijo po velikosti oziroma po nazivnem maksimalnem pretoku in po številu priključnih mest za posamezne ogrevalne kroge oziroma vej.

Na temo delilnikov je opravljeno že veliko eksperimentalnih, analitičnih in numeričnih študij, kjer je glavni poudarek na raziskovanju zagotavljanja enakomernega pretoka skozi posamezne priključke oziroma veje. Bajura in Jones [1] sta dopolnila predhodno razvit model za napovedovanje pretokov in tlakov v delilnikih za različne konfiguracije. Ugotovila sta, da je enakomerna porazdelitev tokov skozi veje možna samo, kadar je glavna delitvena komora primerljiva z neskončnim rezervoarjem. Določila sta tudi vplivne parametre, ki vplivajo na enakomernost porazdelitve posameznih tokov. Shen [2] je razvil analitični model ocenjevanja vpliva trenja na tokovno porazdelitev v delilniku. Choi [3] je numerično raziskoval vpliv razmerja širine in višine preseka glavne komore delilnika in vpliv Reynoldsovega števila na tokovno porazdelitev. Pretorius [4] je demonstriral uporabo programa, ki ga je razvil za računanje hidravlike v delilnikih. Hassan [5,6,7] je skupaj s sodelavci prav tako eksperimentalno in numerično preučeval tokovno porazdelitev v delilnikih.

Energetska učinkovitost ima za zagotavljanje ciljev energetske politike in širših razvojnih ciljev države, zlasti zaradi potenciala za izboljšanje konkurenčnosti družbe, zelene rasti in zaposlitvenega potenciala, izjemen pomen. Danes je veliko pozornosti posvečene zmanjšanju energije, potrebne za ogrevanje stavb. Za dobavo in pravilno distribucijo ogrevalne vode od kotla do različnih potrošnikov se v ogrevalni sistem vgrajujejo kotlovski delilniki, ki pa povzročajo dodaten tlačni upor v ogrevalnih krogih. Večji kot je tlačni upor oziroma tlačne izgube, večja mora biti moč obtočne črpalke in posledično večja je poraba električne energije. Z namenom povečanja energetske učinkovitosti ogrevalnih sistemov oziroma zmanjšanja izgub v ogrevalnih sistemih smo analizirali tlačne izgube v kotlovskih delilnikih. Izvedene so bile meritve tlačnih padcev v odvisnosti od pretoka za tri oblikovno različne, vendar funkcionalno enake delilnike. Da se pri iskanju optimalne oblike delilnika izognemo dragim laboratorijskim meritvam, za katere je potrebno predhodno izdelati prototipe, smo izvedli tudi numerične simulacije in rezultate primerjali z meritvami.

2 Kotlovski delilniki

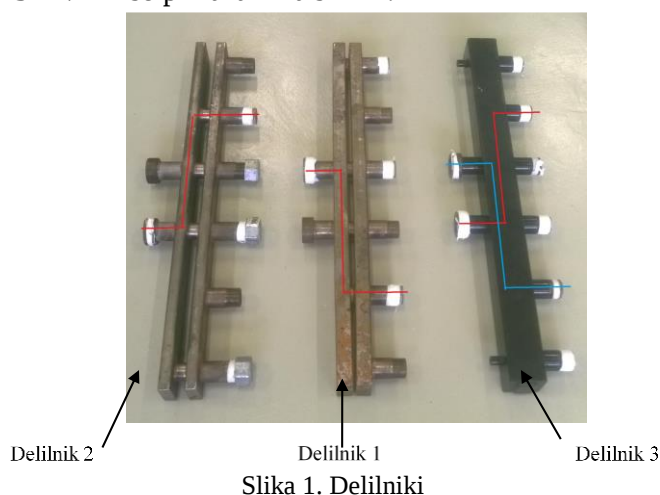
V tabeli 1 so navedeni obravnavani delilniki.

Tabela 1. Seznam delilnikov

Delilnik	Predviden max pretok	Število vej	Priključek na strani kotla	Priključek na strani odvzema
delilnik 1	3	3	6/4"AG	1"AG
delilnik 2	3	3	6/4"AG	1"AG
delilnik 3	3	3	6/4"AG	1"AG

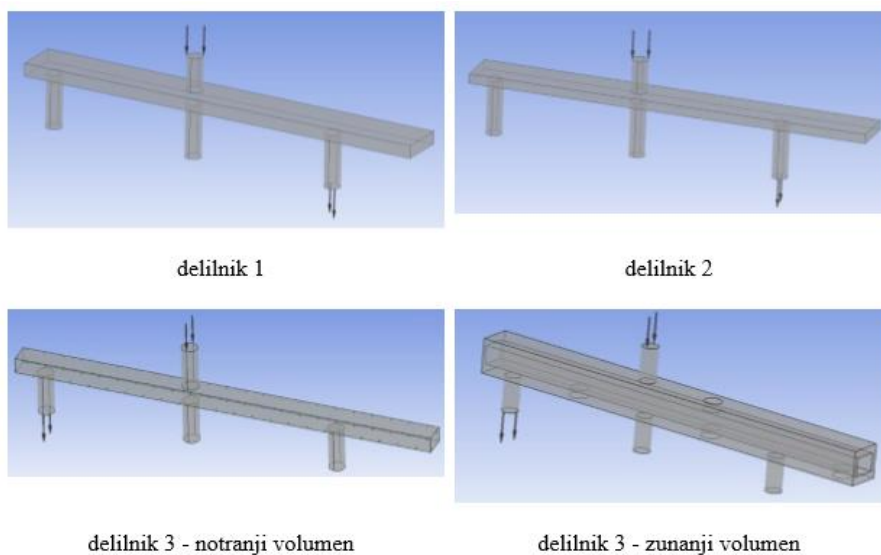
Opomba. AG-zunanji navoj

Obravnavani delilniki imajo na kotlovski strani dva priključka z zunanjim navojem velikosti 6/4", za dovod in povratek ogrevalne vode. Vsi trije so 3-vejni, kar pomeni, da imajo na delilni strani 6 priključkov, 3 priključke za napajalno toplo vodo in 3 priključke za povratno vodo, z nazivnim maksimalnim pretokom 3 m³/h in so prikazani na sliki 1.



Slika 1. Delilniki

Delilnika 1 in 2 sta zgrajena iz dveh enakih vzporednih cevi pravokotnega preseka, na katero so pritrjene priključne cevi okroglega preseka. Vsaka cev ima na eni strani eno priključno cev, ki se zaključi z zunanjim cevnim navojem 6/4", na drugi strani pa tri priključne cevi, ki se zaključijo z zunanjim cevnim navojem 1". V prvi cevi se pretaka ogrevalna voda, ki se v delilniku deli na tri ogrevalne kroge, v drugi cevi pa se združi povratna ohlajena voda iz ogrevalnih krogov in se vrača v kotel. Ogrevalna in povratna voda se v delilniku ne meša. Razlika v geometrijskih volumnih delilnika je, da ima pravokotna cev z ogrevalno vodo glede na pravokotno cev z povratno vodo krajšo dovodno in daljše odvodne priključne cevi. Delilnika 1 in 2 se med seboj razlikujeta samo v debelini (višini) pravokotne cevi oziroma volumna, v prvem primeru le-ta znaša 21 mm, v drugem pa 16 mm. Dolžini in širini teh delilnikov sta enaki (dolžina 693 mm in širina 76 mm). Delilnik 3 se od prvih dveh razlikuje, sestavljen je iz dveh cevi pravokotnega preseka in to tako, da je manjša vstavljena v večjo cev, vsaka izmed obeh pravokotnih cevi pa ima eno dovodno cev in tri odvodne cevi. Notranji volumen ima presek 36 mm x 26 mm, zunanji volumen pa 56 mm x 56 mm. Dolžina notranjega volumna je 715 mm in zunanjega pa 705 mm. Priključne cevi, premera 27 mm, in navoji so enaki kot pri delilnikih 1 in 2. Na sliki 2 so prikazani štirje volumni, in sicer volumen ogrevalne vode v delilnikih 1 in 2, ki sta skoraj povsem enak volumnu povratne vode, ter oba volumna v delilniku 3.



Slika 2. Geometrije delilnikov

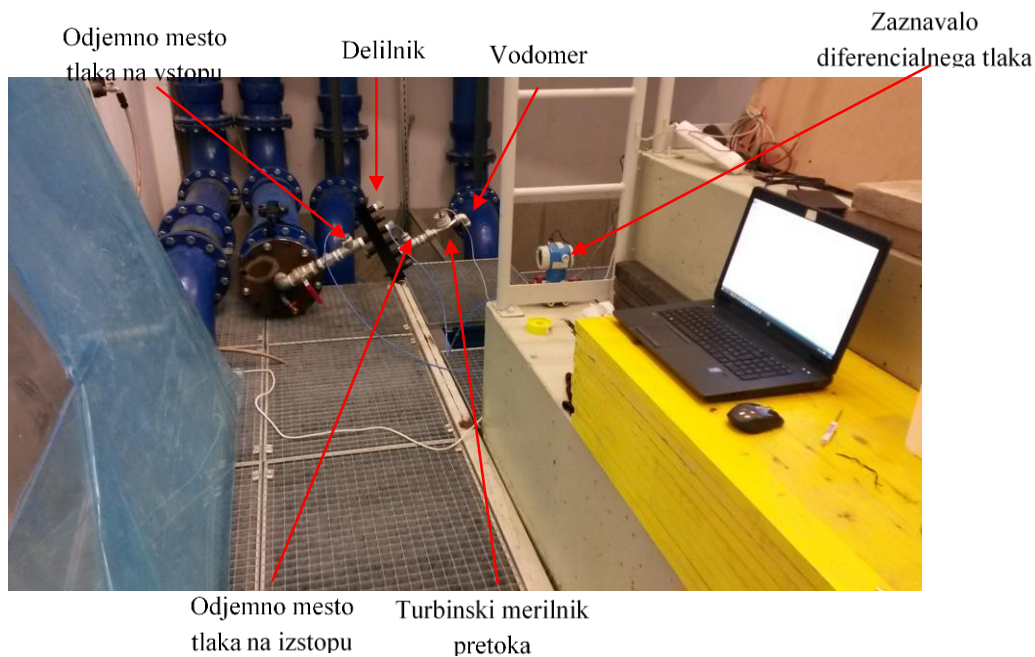
3 Eksperiment

Za določitev krivulje tlačnega padca v odvisnosti od pretoka sta bila izvedena merilni in numerični eksperiment.

3.1 Merilni eksperiment

Merilni eksperiment je bil opravljen v laboratoriju za alternativne aero in hidro energetske tehnologije Inštituta za energetiko v Vrbini.

Na sliki 3 je prikazan merilni del merilne proge.

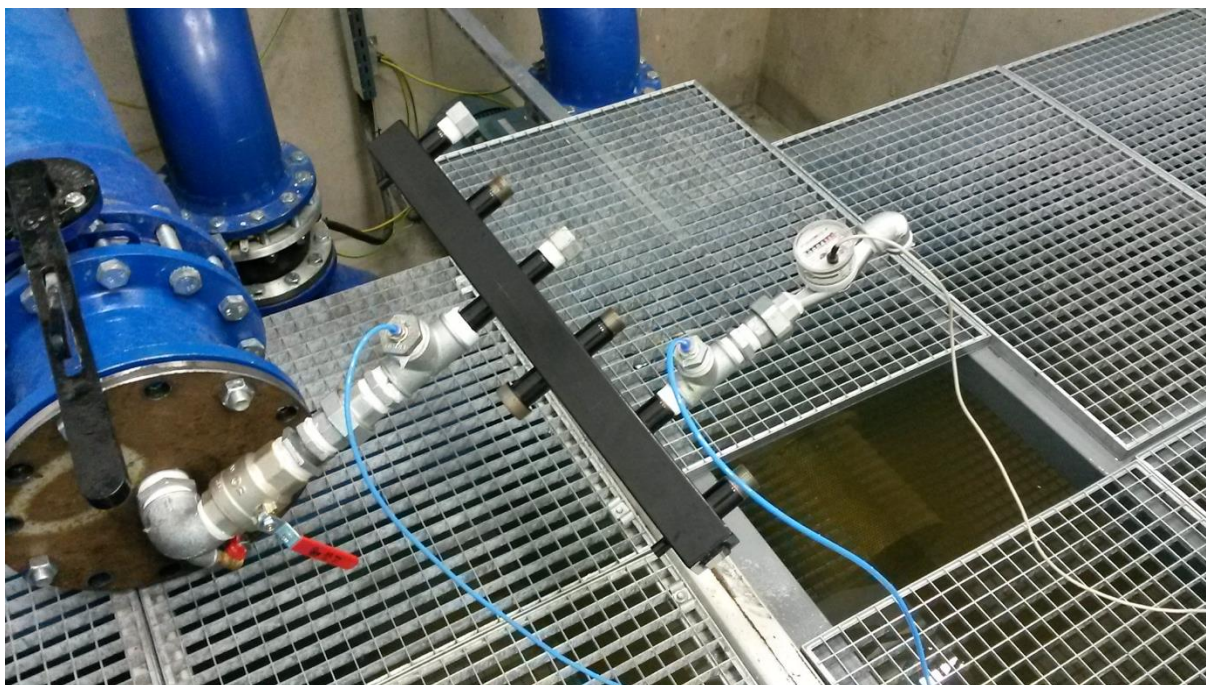


Slika 3. Merilni del merilne proge

Merilni del ima dve odjemni mesti za statični tlak, in sicer tik pred in tik za merjencem. Odjemni mesti sta preko gibljivih plastičnih cevi povezani z zaznavalom diferencialnega tlaka Deltabar PMD 75

proizvajalca Endress+Hauser. Merilno območje zaznavala je od -100 mbar do 100 mbar. Natančnost zaznavala je 0,05 %. Za odjemnim mestom tlaka na izstopu je nameščen vodomer in turbinski merilnik pretoka. Le-ta je nato preko napetostnega modula NI 9215 povezan s sistemom za zajemanje podatkov NI cDAQ-9178 proizvajalca National Instruments. Turbinski merilnik pretoka deluje na podlagi Hallovega efekta. Merilno območje znaša od 0,5 do 50 l/min, merilna natančnost znaša $\pm 3\%$ izmerjene vrednosti.

Merilni eksperiment je zajemal meritev tlačnega padca oziroma razlike statičnih tlakov med priključkoma na dovodni in odvodni strani (slika 4). V primeru delilnika se je meritev izvedla tako, da se je izmerila razlika statičnih tlakov med dovodnim priključkom in glede na dovodni priključek najbolj oddaljenim odvodnim priključkom, pri čemer je pretok skozi ostale odvodne priključke ničeln. Meritev se je izvedla pri različnih pretokih oziroma obratovalnih točkah, ki so enakomerno porazdeljene med ničelnim in maksimalnim predvidenim pretokom. Rezultati meritev so podani v obliki diagrama tlačnega padca v odvisnosti od pretoka za vsak testiran delilnik.



Slika 4. Delilnik 3 na merilni progi

3.2 Numerični eksperiment

Za testirane tri delilnike so bile opravljene numerične simulacije s programskim paketom Ansys CFX 17.1, geometrija je bila zmodelirana v programu SolidWorks 2015, numerična mreža pa je bila narejena v programu Mesh 17.1. Ob stenah je bila mreža sestavljena in ustrezno zgoščena iz prizem, notranjost pa je bila zgrajena iz tetraedrov. Skupno število elementov je bilo v vseh štirih primerih približno 800.000.

Robni pogoji so bili definirani v skladu z izvedenim merilnim eksperimentom. To pomeni, da je bil na vstopu definiran masni pretok. Za vsak delilnik je bilo izvedenih 6 numeričnih simulacij, pri čemer se je spreminjal samo pretok, in sicer od 0 do 3 m³/h, s korakom 0,5 m³/h. Trivejni delilnik ima načeloma 3 izhode, vendar sta bila dva izhoda, enako kot pri merilnem eksperimentu, zaprta s predpisanim robnim pogojem stena, na najbolj oddaljenem izhodu glede na dovodni priključek, pa je bil predpisan robni pogoj izstopa s predpisanim relativnim statičnim tlakom 0 Pa. Na vseh ostalih površinah je bil predpisan

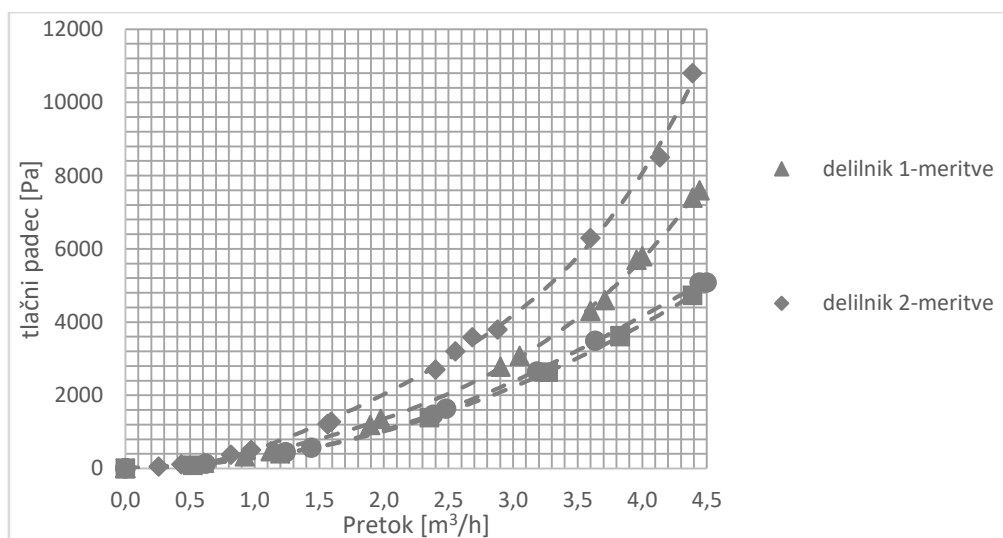
robni pogoj gladke stene brez zdrsa. V simulacijah nas ni zanimal prehod toplote, zato le-tega nismo vključili v simulacijo. Kot konvergenčni kriterij je bilo definirano, da morajo biti srednji RMS ostanki manjši od 10^{-5} , za model turbulence je bil uporabljen $k-\varepsilon$ model.

4 Rezultati

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati merilnega in numeričnega eksperimenta.

4.1 Rezultati merilnega eksperimenta

Slika 5 prikazuje primerjavo štirih potekov tlačnih padcev v odvisnosti od pretoka. Z različnimi oznakami (trikotnik, romb, krog in pravokotnik) so prikazane izmerjene vrednosti za tri različne delilnike oziroma 4 različne volumne. Na podlagi izmerjenih vrednostih so v grafikon dodane tudi trendne črte, ki z minimalnim odstopanjem opisujejo potek tlačnega padca v odvisnosti od pretoka.

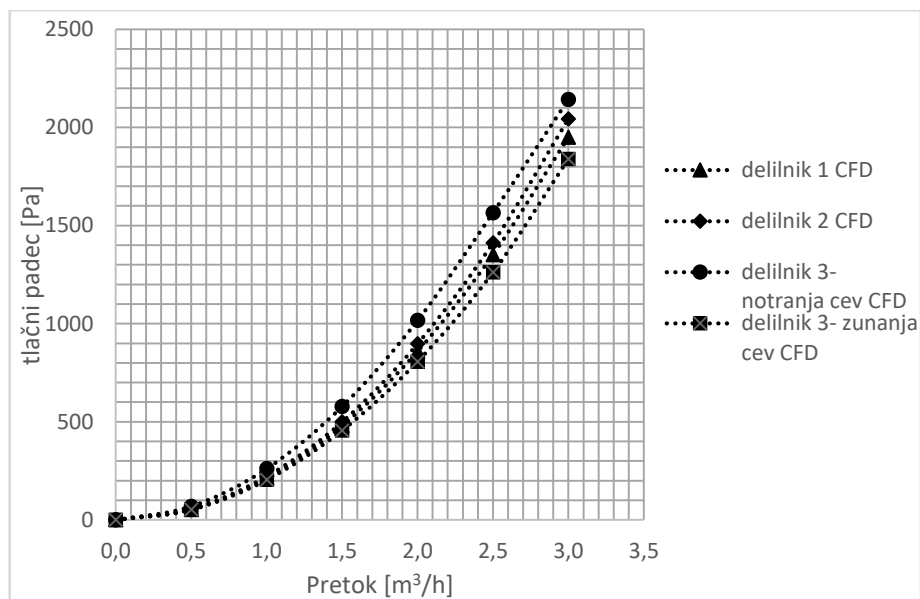


Slika 5. Izmerjeni tlačni padci v delilnikih

Največji upor pri pretoku vode je v delilniku 2, ki je na diagramu prikazan s krivuljo z rombi. Ugodnejše tlačne razmere so v delilniku 1, na diagramu prikazano s črtkano krivuljo s trikotniki, saj je tlačni padec v primerjavi z delilnikom 2 nižji. Najnižji tlačni padec zagotavlja delilnik 3. Za ta delilnik sta bili opravljeni dve meritvi, in sicer meritev tlačnega padca pri toku skozi notranjo cev (črtkana krivulja s krogi) in pri toku skozi zunanjo cev (krivulja s kvadrati). Najnižji tlačni padec v odvisnosti od pretoka je torej v delilniku 3, pri toku vode skozi zunanjo cev, pri čemer je razlika v tlačnem padcu med tokom skozi notranjo cev in tokom skozi zunanjo cev, majhna.

4.2 Rezultati numeričnega eksperimenta

Na sliki 6 so prikazani rezultati numeričnih simulacij. Iz diagrama je razvidno, so razlike v tlačnih padcih med volumni delilnikov relativni majhni, saj znaša maksimalna razlika pri nazivnem pretoku $3 \text{ m}^3/\text{h}$ približno 200 Pa. Najmanjši tlačni padec v odvisnosti od pretoka je v delilniku 3 v zunanji cevi, največji tlačni padec pa prav tako v delilniku 3, vendar v notranjem cevi oziroma volumnu. Razlika v tlačnih padcih med delilnikoma 1 in 2 je manjša kot razlika med zunanjim in notranjim volumnom delilnika 3, pri čemer so tlačne izgube v delilniku 1 manjše od izgub v delilniku 2.

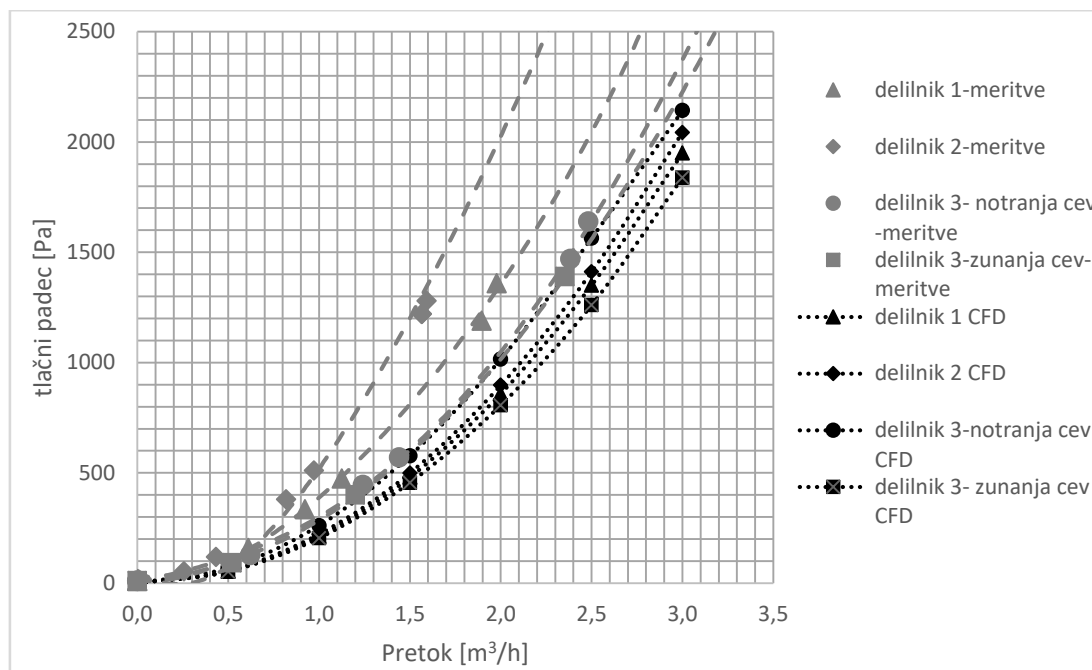


Slika 6. Numerično določeni tlačni padci v delilnikih

5 Diskusija

Na sliki 7 so prikazani rezultati merilnega in numeričnega eksperimenta. Numerične simulacije za vse tri delilnike oziroma za vse štiri obravnavane volumne napovejo nižje tlačne padce od izmerjenih. Razlog je v slabem definiranju hrapavosti sten, saj smo pri numeričnih simulacijah definirali gladke stene, kar se je posledično odražalo v nižji numerični napovedi tlačnih izgub v delilniku. Dodaten razlog za večje izmerjene tlačne izgube je, da pri meritvah nismo posebej ovrednotili vpliv obeh T kosov, ki sta bila pritrjena na delilnik za meritev statičnega tlaka na vstopu in izstopu. V okviru merilnega eksperimenta je bilo izmerjeno, da so tokovne izgube najmanjše pri toku skozi delilnik 3, pri čemer so izgube pri toku skozi zunanji volumen manjše od izgub v notranjem volumnu delilnika. Tudi numerične simulacije napovedujejo najnižje tlačne izgube v notranjem volumnu delilnika 3. Za razliko od merilnega eksperimenta, kjer so bile izmerjene podobne izgube v notranjem in zunanjem volumnu delilnika 3, pa numerične simulacije napovejo večji razkorak v poteku krivulj tlačnih izgub v omenjenem delilniku. Nadalje meritve kažejo, da so izgube v delilnikih 1 in 2, ne glede na tokovno pot skozi delilnik 3, skozi notranji ali zunanji volumen, večje od izgub v delilniku 3. Simulacije pa napovejo, da so tlačne izgube v delilnikih 1 in 2 po velikosti večje od izgub skozi zunanjo cev in nižje od izgub skozi notranjo cev delilnika 3.

Tlačne izgube pri toku tekočine skozi cev so odvisne od pretočnega preseka in se z večanjem preseka zmanjšujejo, in obratno. Glede na geometrijo delilnikov znaša pretočni presek delilnika 1 1596 mm^2 (76 mm x 21 mm), delilnika 2 1216 mm^2 (76 mm x 16 mm), notranjega volumna delilnika 3 936 mm^2 (36 mm x 26 mm) in zunanjega volumna delilnika 3 1936 mm^2 (56 mm x 56 mm-40 mm x 30 mm). Glede na velikost pretočnih presekov menimo, da so rezultati numeričnih simulacij smiselni in pričakovani. Merilni eksperiment kaže, da so v delilniku 1 in 2 pomembno večje tokovne izgube v primerjavi z delilnikom 3 in so nesorazmerne z razliko velikosti pretočnih presekov. Tokovne izgube skozi notranjo cev delilnika 3, ki ima najmanjši pretočni presek, so nižje od tokovnih izgub skozi delilnik 1 in 2, kar ni v skladu z našimi pričakovanji. Menimo, da je to posledica kvalitete izdelave, za kar je potrebno podrobno analizirati tokovno in tlačno polje znotraj delilnika.



Slika 7: Primerjava rezultatov merilnega in numeričnega eksperimenta

6 Zaključek

Glavni namen naše raziskave je določitev energetsko najučinkovitejšega trivejnega delilnika z najmanjšim tlačnim padcem v odvisnosti od pretoka izmed treh funkcionalno enakovrednih, vendar oblikovno različnih koteljskih delilnikov. Predmet raziskav so torej bili trije delilniki, pri čemer smo raziskovali tlačne izgube v štirih volumnih. Vsak delilnik ima dva volumna, enega za razdelitev ogrevalne vode in drugega za zbiranje povratne vode iz ogrevalnega sistema. Pri delilnikih 1 in 2 sta oba volumna skoraj identična, zato smo se osredotočili samo na enega izmed obeh. Pri delilniku 3 pa se volumna bistveno razlikujeta, zato je bil merilni in numerični eksperiment opravljen na obeh volumnih. Pri določevanju tlačnih izgub smo se omejili samo na tlačne izgube pri pretoku skozi najbolj oddaljeno vejo glede na dovodni priključek, pri čemer sta bili preostali veji zaprti. Za vsak obravnavan volumen delilnikov smo z meritvami in numeričnimi simulacijami določili krivuljo poteka tlačnega padca v odvisnosti od pretoka. Za vse obravnavane volumne delilnikov so numerične simulacije napovedale nižje tlačne padce od izmerjenih. Merilni in numerični eksperiment sta pokazala, da so najmanjše izgube v zunanji cevi oziroma zunanjem volumnu delilnika 3. Prav tako sta oba eksperimenta pokazala, da so tlačne izgube v delilnikih 1 in 2 večje od izgub v zunanjem volumnu delilnika 3 ter, da so v delilniku 1 manjše tlačne izgube v primerjavi z delilnikom 2. Do razkoraka med meritvami in simulacijami prihaja pri določitvi krivulje tlačnega padca zunanjega volumna delilnika 3, kar je tema naših nadaljnjih raziskav.

Viri

1. Bajura, R. A. and E. H. Jones, , "Flow distribution manifolds," Journal of Fluids Engineering-Transactions ASME, 1976, Vol. 98, No. 4, pp. 654-666.
2. Shen P. I., "The Effect of Friction on Flow Distribution in Dividing and Combining Flow Manifold" Transaction of the ASME, J. of Fluids Engineering, vol. 114, 1992
3. Choi, S. H., Shin, S. and Cho, Y. I., "The effect of area ratio on the flow distribution in liquid cooling module manifolds for electronic packaging," Int. Comm. Heat Mass Transfer, 20, (1993) 221-234.

4. Pertorius W.A., "Dividing- flow Manifold Calculations with a Spreadsheet", water science, vol. 23, No. 2, 1997.
5. Hassan, J.M., Mohamed, T.A., Mohammed, W.S., & Alawee W.H. (2014). CFD Simulation for Manifold with Taperedlongitudinal Section. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(2).
6. Hassan, J.M., Mohamed, T.A., Mohammed, W.S., & Alawee W.H. (2014). Review on Single-Phase Fluid Flow Distribution in Manifold. *International Journal of Science and Research*, 3(1), 29–37.
7. Hassan, J.M., Mohamed, T.A., Mohammed, W.S., & Alawee W.H. (2015). Experimental and numerical study of the improvement of uniformity flow for three-lateral dividing manifold. *International Journal of Engineering and Technology*, 12(1), 29–37.

Dr. Matej Fike se je rodil leta 1981 v Mariboru. Po končani gimnaziji se je vpisal na univerzitetni študijski program Gospodarsko inženirstvo na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru, smer strojništvo. Po diplomi se je zaposlil v podjetju AJM d.o.o iz Kozjaka nad Pesnico. Leta 2007 je bil izbran za mladega raziskovalca na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru, kjer se je tudi zaposlil v Laboratoriju za toplotne stroje in tehniške meritve Inštituta za energetsko, procesno in okoljsko inženirstvo. Leta 2009 je bil na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru izvoljen v naziv asistenta za krovno področje Energetsko, procesno in okoljsko inženirstvo. V letu 2010 se je izobraževal na norveškem inštitutu IFE (Institut for Energy Technology) v Oslu (Kjeller), kjer je tudi opravil del raziskav na temo doktorske disertacije. Od leta 2013 je zaposlen kot asistent na Fakulteti za energetiko Univerze v Mariboru.

Njegovo znanstveno-raziskovalno delo je na področju računalniške dinamike tekočin in računalniško podprtega zajemanja podatkov ter meritev.

Marko Pezdevšek je asistent na Fakulteti za energetiko Univerze v Mariboru, Slovenija, kjer je diplomiral leta 2012 ter magistriral leta 2015. Njegovo raziskovalno delo je osredotočeno na področje računalniške dinamike tekočin in hitre izdelave prototipov.

VPLIV POLNILA PRI 3D TISKANJU NA UPOGIBNO TRDNOST

EFFECT OF INFILL DENSITY AT 3D PRINTING ON FLEXURAL STRENGTH

Marko Pezdevšek*

Fakulteta za energetiko, Hočevarjev trg 1, 8270 Krško, Slovenija
marko.pezdevsek@um.si

Matej Fike

Fakulteta za energetiko, Hočevarjev trg 1, 8270 Krško, Slovenija
matej.fike@um.si

Gorazd Hren

Fakulteta za energetiko, Hočevarjev trg 1, 8270 Krško, Slovenija
gorazd.hren@um.si

POVZETEK

Tehnologija 3D tiskanja hitro napreduje, cena tiskalnikov se je z leti znižala na dostopno raven in 3D tiskalniki počasi a vztrajno prodirajo v naš vsakdan. Za namen tega prispevka smo za tiskanje uporabili tiskalnik Type A Machines Series 1. Tiskalnik deluje na tehnologiji ciljnega nalaganja in omogoča tiskanje različnih polimerov. Naredili smo primerjalno analizo med polnim modelom in modeli z različno gostoto polnil. Izvedli smo numerične simulacije in rezultate primerjali z rezultati standardnega upogibnega testa ter preverili vpliv gostote polnila na upogibno trdnost, saj z manjšo gostoto prihranimo tako pri materialu, kar posledično pomeni manjši strošek, kot pri času tiskanja.

Ključne besede: 3D tiskanje, upogibni preizkus, primerjalna analiza, FDM, numerične simulacije

ABSTRACT

3D printing is advancing at a high pace, over the years the price has dropped down to a relatively accessible level and 3D printers are steadily becoming a part of our educational and manufactural process. For the purpose of this paper Type A Machines Series 1 3D printer was used. The aforementioned 3D printer utilises fused deposition modelling technology to manufacture a 3D model. In this paper, we investigated the effects of different infill densities on flexural strength. Models with different infill densities were printed and subjected to a standardised bending test. The results were compared with numerical simulations done in SolidWorks Simulation.

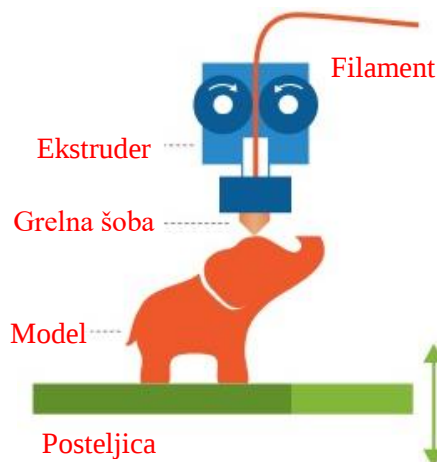
Keywords: 3D printing, bending test, comparative analysis, FDM, numerical simulations

* Corresponding author

1 Uvod

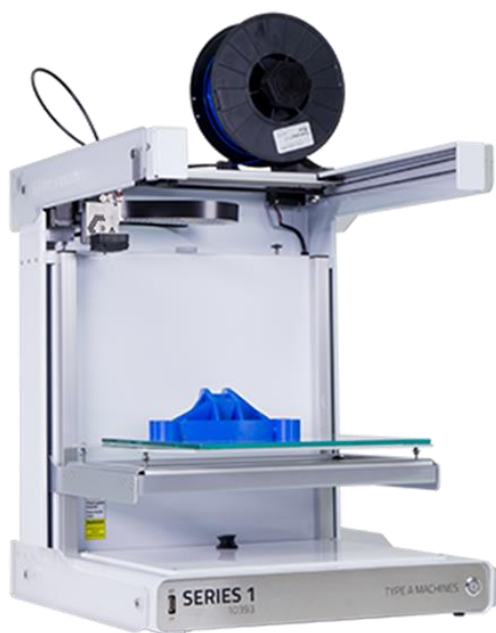
Področje 3D tiskanja se v zadnjih razvija z veliko hitrostjo. Tehnologije 3D tiskanja se med seboj razlikujejo glede na postopek izdelave in jih v grobem delimo na selektivno lasersko sintranje, stereolitografijo in tehnologijo ciljnega nalaganja. Osredotočili se bomo na najbolj razširjeno tehnologijo 3D tiskanja in sicer tehnologijo ciljnega nalaganja (FDM). Tehnologijo ciljnega nalaganja je izumil S. Scott Crump že v 80tih letih prejšnjega stoletja, komercialno je postala dostopna v 90ih preko podjetja Stratasys. FDM tehnologija je množično zares zaživela šele s potekom patentov leta 2009. Po poteku patentov je cena 3D tiskalnikom močno padla in je sedaj na nivoju, ko je dosegljiva praktično vsem [1].

Osnovni sestavni deli tiskalnikov, ki delujejo na FDM tehnologijo so ekstruder, grelna šoba in posteljica. Ekstruder potiska filament do grelne šobe, kjer se filament segreje na primerno temperaturo, ta je odvisna od vrste materiala načeloma je od 190 °C do 250 °C. Ekstruder in grelna šoba se pomikata po x in y osi s pomočjo električnih motorjev in jermenov. Ko se nanese sloj filameta se posteljica po z osi pomakne navzdol za višino enega sloja. Filament se tako sloj za slojem nanaša na posteljico, kjer se ohladi in strdi. Kvaliteta in natančnost končnega modela je odvisna od več parametrov kot so hitrost tiskanja, višina slojev, temperatura itd.. Na sliki 1 je prikazana osnovna sestava FDM tiskalnika [2].



Slika 1. Sestavni deli FDM tiskalnika [2]

Za potrebe tega članka smo za tiskanje 3D modelov uporabili tiskalnik Type A Machines Series 1. Tiskalnik deluje na zgoraj omenjeni tehnologiji ciljnega nalaganja in omogoča tiskanje objektov velikosti 305x305x305 mm. Premer filameta znaša 1,75 mm in ni omejen na vir, kar v osnovi pomeni, da lahko kupimo filament katerega koli proizvajalca. Na kakovost končnega modela pa vpliva tudi premer grelne šobe, ki v našem primeru znaša 0,4 mm [3].

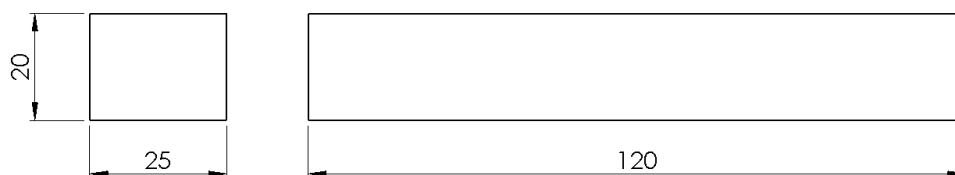


Slika 2. 3D tiskalnik Type A Machines Series 1 [3]

FDM tiskalniki v osnovi lahko tiskajo zelo širok spekter materialov od PLA, ABS, TPU, PETG, Naylon itd. Najbolj pogosto uporabljena materiala sta PLA in ABS. Poliaktid (PLA) je material na osnovi obnovljivih virov, kot sta koruzni škrob in sladkorni trs. PLA se načeloma uporablja za tiskanje modelov, kjer je estetika bolj pomembna od mehanskih lastnosti. Akrilonitril butadien stiren (ABS) je material na naftni osnovi. ABS tiskamo pri temperaturah med 230°C in 250°C. Odlikujejo ga predvsem dobre karakteristike udarne žilavosti. Na področju 3D tiskanja se material ABS uporablja pri modelih, kjer je potrebna višja trdnost in termična stabilnost. V našem primeru bomo uporabili ABS za tiskanje modelov.

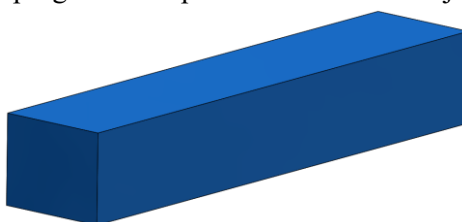
2 Postopek izdelave 3D modela

Glede na standard ISO 1209-1:2004 smo določili mere preizkušanca in sicer dolžine 120 mm, širine 25 mm in debeline 20 mm. Mere preizkušanca so prikazane na sliki 3.



Slika 3. Mere preizkušanca glede na standard ISO 1209-1

Preizkušanec smo zmodelirali v programskem paketu SolidWorks in je prikazan na sliki 4.



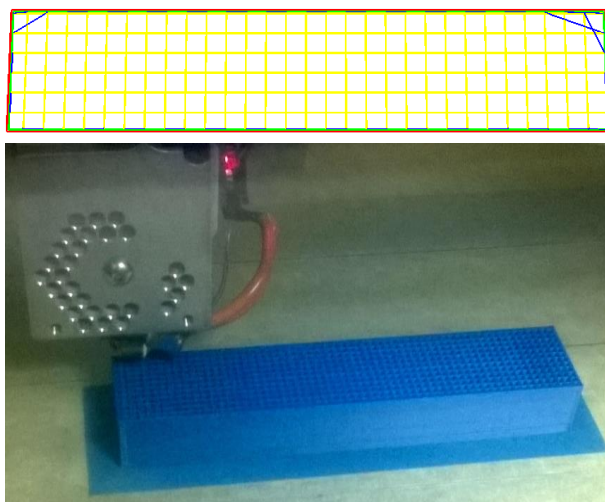
Slika 4. Prikaz modela v SolidWorksu

Model smo shranili v STL(Stereo lithography) format, ki je primeren za uvoz v rezalnik (ang. slicer). Funkcija rezalnika je, da glede na vhodne parametre, ki jih vnese uporabnik model »razreže« na končno število slojev in zapiše G-kodo. Uporabljen je bil rezalnik Cura Type A 1.5.0, kjer smo nastavili parametre tiskanja. Temperaturo tiskanja smo nastavili na 240 °C, kar je priporočljiva temperatura za tiskanje ABS materiala. Če je temperatura prenizka lahko pride do zamašitve ekstruderja v primeru previsoke temperature pa se lahko ob praznih gibih preko večje razdalje pojavljajo izcedki. Z manjšo hitrostjo tiskanja načeloma dosežemo boljšo kvaliteto končnega modela ampak tudi podaljšamo čas tiskanja, ker je bil naš model enostaven smo izbrali hitrost tiskanja 60 mm/s. Z manjšo višino slojev lahko dosežemo boljšo kakovost ampak se nam s tem poveča tudi čas tiskanja. Izbrali smo standardno višino 0,2 mm, tiskalnik sicer omogoča tiskanje slojev do 0,05 mm. Debelina zunanjih sten je bila nastavljena na 0,8 mm, priporočljivo je, da je debelina zunanjih sten večkratnih premera grelna šobe. Število polnih plasti spodaj in zgoraj smo nastavili na pet kar znese 1 mm. Če model ni poln je priporočljivo imeti vsaj tri zgornje sloje v nasprotnem primeru lahko pride do slabše kvalitete zgornje površine. Osnovne nastavitve v rezalniku Cura so prikazane v spodnji tabeli.

Tabela 1. Osnovne nastavitve v programu Cura

Nastavitev	Vrednost
Višina slojev	0,2 mm
Debelina zunanjih sten	0,8 mm
Debelina polnih slojev spodaj in zgoraj	1 mm
Temperatura	240 °C
Hitrost tiskanja	60 mm/s

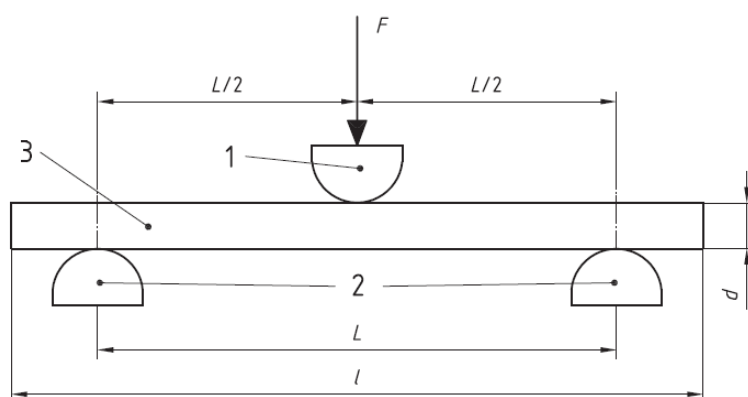
Ko nastavimo vse željene parametre izvozimo datoteko z G-kodo, ki jo prenesemo v uporabniški vmesnik tiskalnika, kjer lahko med tiskanjem spremljamo tudi temperaturo in pot glave tiskalnika. Med tiskanjem je potrebno biti pozoren na ukrivljanje (ang. warping), ki se pojavlja najprej na robovih v kočni fazi pa lahko privede celo tako daleč, da se celoten model odlepi od posteljice. Ukrivljanje je bolj izrazito pri tiskanju ABS kot pri tiskanju PLA materiala. Do pojava pride predvsem zaradi razlike v temperaturi med posteljico in modelom in tudi zaradi temperaturne razlike med posameznimi sloji [4]. Pojav lahko omejimo z gretjem posteljice in z zaprto grelna komoro. Natisnili smo več modelov z različno gostoto polnila od 20 % do 100 %, vzorec polnila je bil nastavljen na mrežastega. Na sliki 5 se zgoraj vidi vzorec tiskanja polnila medtem ko je spodaj prikazano tiskanje preizkušanca.



Slika 5. Prikaz vzorca polnila in preizkušanca med tiskanjem

3 Upogibni test

Tritočkovni upogibni test je bil izveden na univerzalnem hidravličnem preizkuševalnem stroju ZWICK/ROELL Z010 kapacitete 10 kN, s hitrostjo pomikanja glave preizkuševalnega stroja 10 mm/min. Preizkušance smo podprli na razdalji 100 mm in silo aplicirali na sredino razpona.

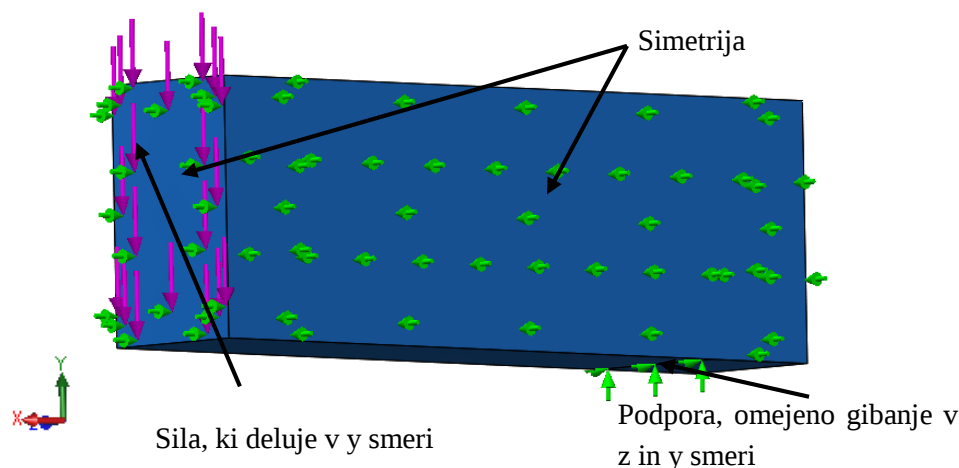


- 1 – obremenitveni rob,
- 2 – podporni rob,
- 3 – preizkušanec,
- L – razdalja med podporami (100 mm),
- l – dolžina preizkušanca (120 mm),
- d – debelina preizkušanca (20 mm),
- F – sila.

Slika 6. Standardni tritočkovni upogibni test

4 Numerične simulacije

Numerične simulacije so bile izvedene v programskem orodju SolidWorks Simulation 2016. Izvedene so bile stacionarne simulacije z uporabo metode končnih elementov. Predpostavljena je bila dvojna simetrija zato smo simulirali le četrtino modela. Sila je bila aplicirana v y smeri na površini vidni na spodnji sliki. Na mestu podpor smo gibanje omejili v y in z smeri.



Slika 7. Prikaz podpor in obremenitev

Lastnosti materiala, ki smo jih predpisali v simulacijah so prikazane v tabeli 2. Youngov modul smo dobili z nateznim preizkusom in je znašal približno 1100 MPa.

Tabela 2. Lastnosti materiala

Nastavitev	Vrednost
Youngov modul	1100 MPa
Poissonovo število	0,394
Gostota	1020 kg/m ³

Izvedli smo simulacije za gostoto polnila 10 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % in 100 %. Za vsa polnila sta bili izvedeni dve simulaciji, ostale vrednosti smo linearno interpolirali.

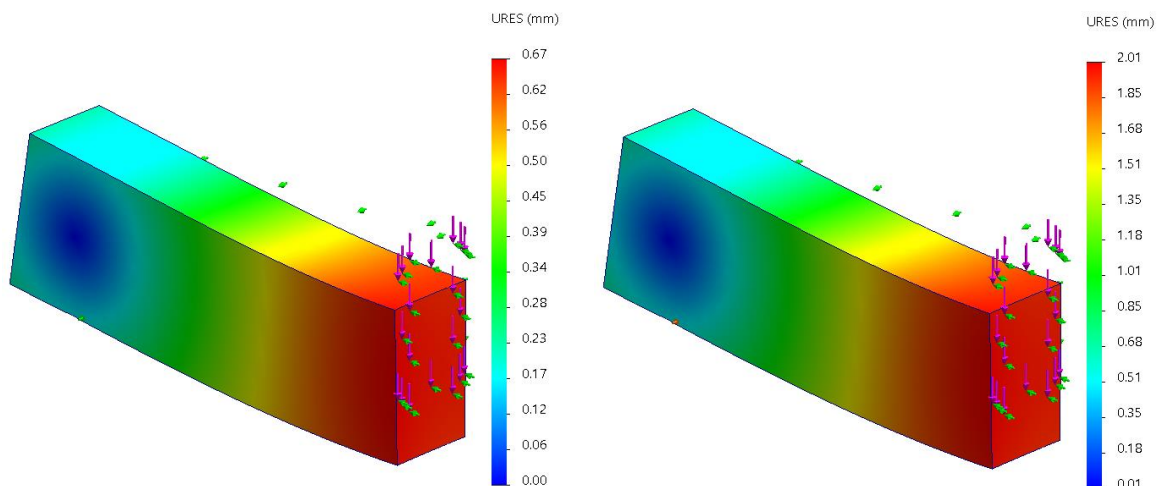
5 Rezultati

Masa in čas tiskanja sta v veliki meri odvisna od parametrov, ki jih nastavimo v rezalniku. Ker smo v našem primeru za vse modele izbrali enake parametre, razlika je bila le v gostoti polnila lahko čase tiskanja in maso direktno primerjamo med seboj. Glede na spodnjo tabelo vidimo, da se polni model tiska skoraj 2,5 ur dlje kot model z 20 % gostoto polnila. Razlika je seveda pričakovana kot tudi razlika v masi med obema, ki znaša 50 g. Z daljšim časom tiskanja in večjo gostoto tiskanja se poveča tudi možnost ukrivljanja.

Tabela 3. Masa in čas tiskanja v odvisnosti od gostote polnila

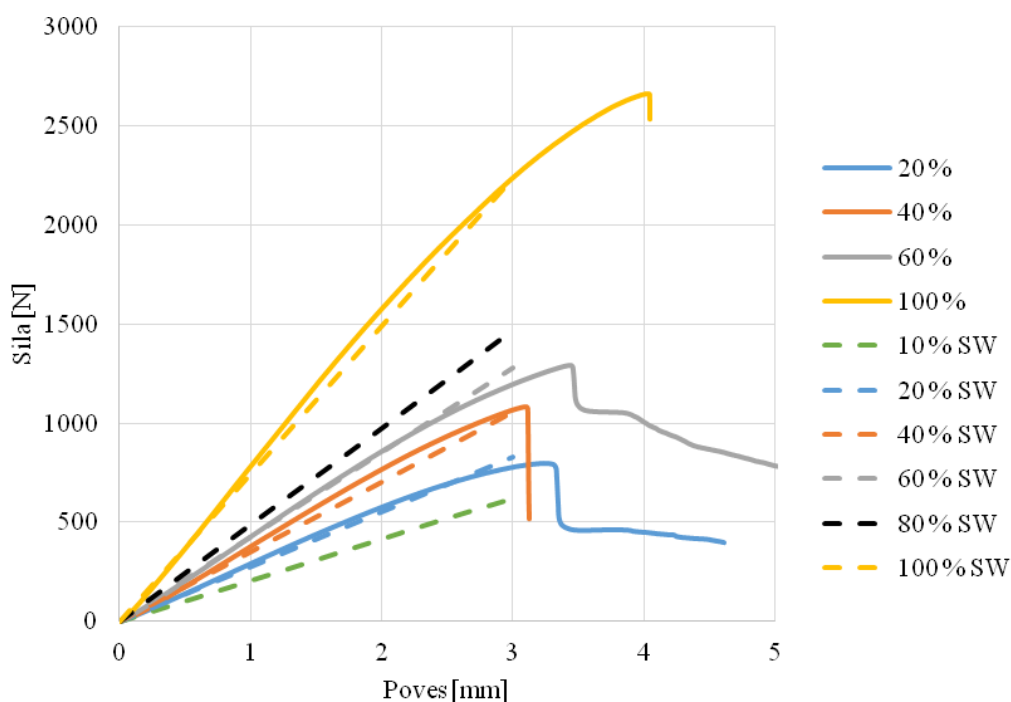
Gostota polnila [%]	Čas tiskanja [h:min:s]	Masa [g]
20 %	1:33:53	26
40 %	2:15:35	38
60 %	2:45:32	50
100 %	4:01:12	76

Na sliki 8 so prikazani rezultati numeričnih simulacij za polni model pri sili 500 N levo in 1500 N desno. Ostali rezultati numeričnih simulacij so prikazani na sliki 9.



Slika 8. Prikaz rezultata numerične simulacije za polni model levo pri sili 500 N in desno pri sili 1500 N

Na sliki 9 je prikazan rezultat povesa v odvisnosti od sile. Iz grafa vidimo, da je razlika v sili, ki je potrebna, da se preizkušaneč povesi za 3mm med polnim modelom in modelom z 60 % gostoto polnila skoraj 1000 N. Razlika do ostalih polnil je le še večja. Rezultati numeričnih simulacij so se dobro ujemali z rezultati upogibnega testa.



Slika 9. Prikaz povesa v odvisnosti od sile

6 Zaključek

Naredili smo primerjalno analizo med polnim modelom in modeli z različno gostoto polnil. Izvedli smo numerične simulacije in rezultate primerjali z rezultati standardnega tritočkovnega upogibnega testa ter preverili vpliv polnila na upogibno trdnost. Primerjali smo tudi čase in mase različnih gostot polnil med seboj. Ugotovili smo, da je čas tiskanja polnega modela 2,5 ur daljši od modela z 20 % gostoto polnila. Do večjih razlik prihaja tudi pri sili, kjer je razlika v sili, ki je potrebna, da se preizkušaneč povesi za

3mm med polnim modelom in modelom z 60 % gostoto polnila skoraj 1000 N. Glede na zgoraj omenjene rezultate bi v primeru, da je končni izdelek podvržen večjim obremenitvam izbrali tiskanje polnega modela, kljub daljšemu času tiskanja in povečano možnostjo ukrivljanja. Za nadaljnje delo bi bilo smiselno preveriti še vpliv različnih vzorcev tiskanja polnila.

Viri

1. Dostopno na: <https://techcrunch.com/2016/05/15/how-expiring-patents-are-ushering-in-the-next-generation-of-3d-printing/> [6.4.2017]
2. Dostopno na: <http://3devo.eu/guide-fdm-printable-plastics-3d-printing-filament> [6.4.2017]
3. Dostopno na: <https://www.typeamachines.com> [6.4.2017]
4. T.M. Wang, J.T. Xi, Y. Jin: A model research for prototype warp deformation in the FDM process, International Journal of Advanced Manufacturign Technology, Vol. 33, p.p. 1087–1096, (2007)

Marko Pezdevšek je asistent na Fakulteti za energetiko, Univerza v Mariboru, Slovenija. Diplomiral je leta 2012, magistriral leta 2015 na Fakulteti za energetiko, Univerza v Mariboru. Njegovo raziskovalno delo je osredotočeno na področje računalniške dinamike tekočin in hitre izdelave prototipov.

Dr. Matej Fike se je rodil leta 1981 v Mariboru. Po končani gimnaziji se je vpisal na univerzitetni študijski program Gospodarsko inženirstvo na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru, smer strojništvo. Po diplomi se je zaposlil v podjetju AJM d.o.o iz Kozjaka nad Pesnico. Leta 2007 je kandidiral in bil izbran za mladega raziskovalca na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru, kjer se je tudi zaposlil v Laboratoriju za toplotne stroje in tehniške meritve Inštituta za energetsko, procesno in okoljsko inženirstvo. Leta 2009 je bil na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru izvoljen v naziv asistenta za krovno področje Energetsko, procesno in okoljsko inženirstvo. V času od septembra do oktobra 2010 se je izobraževal v tujini na norveškem inštitutu IFE (Institut for Energy Technology) v Oslu (Kjeller), kjer je tudi opravil del raziskav na temo doktorske disertacije. Od leta 2013 je zaposlen kot asistent na Fakulteti za energetiko Univerze v Mariboru.

Njegovo znanstveno-raziskovalno delo je na področju računalniške dinamike tekočin in računalniško podprtega zajemanja podatkov ter meritev.

Dr. Gorazd Hren je predavatelj na Fakulteti za energetiko, Univerza v Mariboru, Slovenija. Diplomiral je leta 1986 na Univerzi v Mariboru, Magistriral leta 1990 na Imperial College od Science, Techonolgy and Medicine, London in doktoriral leta 2003 na Univerzi v Mariboru, oboje na fakulteti za strojništvo. Od leta 1986 je zaposlen na Fakulteti za strojništvo, od leta 2008 pa na Fakulteti za energetiko Univerze v Mariboru. V tem času je opravil enoletno raziskovalno delo na Fraunhofer IGD v Darmstadtu v Nemčiji. Njegovo raziskovalno delo je osredotočeno na CAD, numerične analize, virtualizacijo, hitre izdelave prototipov, itd.

PREUČEVANJE STABILNOSTI STRUKTURE POLISAHARIDOV Z REOLOŠKIMI METODAMI

RHEOLOGICAL EXAMINATION OF POLYSACCHARIDE STRUCTURE STABILITY

Valentina Rebec, Igor Plazl

Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Univerza v Ljubljani, Večna pot 113, 1000, Ljubljana,
Slovenija

valentina.rebec6@gmail.com, igor.plazl@fkkt.uni-lj.si

Urška Florjančič in Anatolij Nikonov*

Fakulteta za industrijski inženiring Novo mesto, Šegova ulica 112, 8000, Novo mesto, Slovenija
urska.florjancic@telemach.net, *anatolij.nikonov@fini-unm.si

Avtorji članek posvečamo leta 2015 umrli slovenski raziskovalki dr. Andreji Zupančič Valant, ki je večji del svojega strokovnega dela posvetila reologiji. Pričujoče delo se je začelo pod njenim mentorskim vodstvom, nadaljevalo pa žal brez nje.

Authors dedicate this paper to Slovenian researcher Dr. Andreja Zupančič Valant, who passed away in 2015. Her main research interest was rheology and she significantly contributed to development of rheological studies in Slovenia. The present work started under her supervision, but unfortunately continued without her.

POVZETEK

Polisaharidi se pogosto uporabljajo v industrijskih panogah kot so prehrabna, kemična, farmacevtska, kozmetična, tekstilna industrija, industrija premazov in nafte, v medicini in drugje. Na vseh omenjenih področjih je bistvenega pomena struktura samega izdelka, ki je v veliki meri vezana na mehanske oz. reološke lastnosti samega materiala. V praksi je pogosto pomembno vprašanje, kako staranje materiala vpliva na njegove lastnosti in posledično na končno funkcionalnost izdelka. V raziskavi smo se osredotočili na preučevanje gelov, in sicer gellana, welana in ksantana, ter polimernih raztopin: hidroksipropilmetilceluloze in natrijeve karboksimetilceluloze. Meritve lezenja in obnove so pokazale, da imata polimerni raztopini hidroksipropilmetilceluloza in natrijeva karboksimetilceluloza bolj viskozen značaj v primerjavi z gellanom, welanom in ksantanom, ki izkazujejo bolj izrazite elastične lastnosti. Analiza staranja v primeru welana, ksantana, hidroksipropilmetilceluloze in natrijeve karboksimetilceluloze je pokazala, da se rezultati meritev po 20-ih, 60-ih in 140-ih dneh ne razlikujejo od začetnih meritev. Ravno nasprotno velja za vzorec gellana, kjer so eksperimentalni podatki pokazali, da struktura gellana s časom postaja vedno bolj elastična.

Ključne besede: reologija, polisaharidi, polimerna raztopina, gel, lezenje, staranje.

* Corresponding author

ABSTRACT

Polysaccharides have many industrial applications, for example in food, chemical, pharmaceutical, cosmetic, textile, paint, oil industry, medicine and much more. For all of these applications the key parameter to manipulate is the product structure which mainly influences the mechanical and rheological properties of the material. In practice a very important question is how the aging of material influences its properties and consequently the functionality of the final product. We focused our research in investigation of five biopolymers dissolved in water, forming gels, i.e., gellan, welan and xanthan, and polymer solutions such as hydroxymethylcellulose and sodium carboxymethylcellulose. The measurements of periodic creep and recovery showed that polymer solutions of hydroxymethylcellulose and sodium carboxymethylcellulose exhibit more viscous behavior than gellan, welan and xanthan water solutions, showing elastic properties. The aging testing revealed that the results of measurements for welan, xanthan, hydroxymethylcellulose and sodium carboxymethylcellulose after 20, 40 and 140 days don't differentiate from the results of initial measurements. On the contrary, the experimental results for gellan showed that its structure becomes gradually more elastic while time progresses.

Keywords: rheology, polysaccharide, polymer solution, gel, creep, aging.

1 Uvod

Polisaharidi so naravni polimeri in imajo širok spekter različnih funkcij. Najbolj poznani primeri so škrob, glikogen in semena nekaterih rastlin, kot sta rožičevcec in guar. Polisaharidi so bistveni za mehansko trdnost rastlinskih vlaken, saj tvorijo prepleteno tridimenzionalno mrežo. Primeri teh so agar, alginat in pektin. Tudi celuloza in hitin omogočata tvorbo trdnih vlaken in s tem močno, trdno strukturo. Polisaharidi so široko uporabni zaradi sposobnosti spremembe lastnosti polimernih raztopin z zgoščevanjem, želiranjem, emulgiranjem, stabilizacijo, enkapsulacijo, flokulacijo, nabrekanjem in nastankom gelov. Glede na koncentracijo polimera in njihovo strukturo so lahko v obliki razredčenih ali koncentriranih raztopin, disperzij, šibkih in močnih gelov ali mikrogelov [5].

Gele, narejene na osnovi polisaharidov, se uporablja v prehrabni, kemični, farmacevtski, kozmetični, tekstilni industriji, industriji premazov in nafte, v medicini in drugje [5]. Geli nastanejo s povezovanjem polimernih verig v tridimenzionalno strukturo zaradi delovanja medmolekulskih sil. Gelska struktura se pojavi že pri zelo nizki koncentraciji polimera, ko sistem z visokim deležem topila oziroma tekočega medija izkazuje lastnost elastične snovi. Fizikalne interakcije med posameznimi deli verig, ki povezujejo oddaljene makromolekule v mrežno strukturo, so bistvene za nastanek fizikalnih gelov, ki so značilni za polisaharide. Heterogen značaj strukture fizikalnih gelov izvira iz raznolikosti v načinu povezovanja polimernih verig in je odvisen od porazdelitve vozlišč v mrežni strukturi. Pod vplivom majhnih deformacij se močni geli obnašajo kot viskoelastične trdne snovi in se jim pri višjih deformacijah struktura poruši. Pri šibkih gelih pa viskoznost zaradi zmožnosti porušitve notranje strukture in urejanja molekul v smeri toka z naraščanjem strižnih napetosti močno upada. Pri majhnih deformacijah tako šibki kot močni geli izkazujejo lastnosti elastičnih trdnih snovi. Pri šibkih gelih je prispevek k viskoelastičnemu odzivu manj izrazit kot pri močnih gelskih strukturah.

Polimerne raztopine so neurejene, naključno zvite strukture polimerov, katerih oblika se pod vplivom Brownovega gibanja nenehno spreminja. Ko so polimerne verige daleč narazen in se lahko prosto

gibljejo, prevladujejo interakcije znotraj posamezne polimerne verige in interakcije z molekulami topila. Taka struktura je značilna za razredčene polimerne raztopine. Pri koncentriranih polimernih raztopinah pa je vsaka polimerna veriga v tesnem stiku z drugo polimerno verigo. Struktura tako prepletenih in premreženih polimernih verig je gosta in neurejena. V takšnem sistemu prevladujejo medmolekulske interakcije, kot so vodikova vez, Columbove sile, Van der Waalsove sile, prenos naboja ter hidrofobne interakcije, ki se spreminjajo s časom, temperaturo in okoljem, v katerem so. Reološko obnašanje polimernih raztopin je odvisno od fizikalno-kemijskih lastnosti, kot so koncentracija polimera, struktura molekul, temperature in drugih fizikalnih veličin. Polimerne raztopine izkazujejo pod vplivom strižnega toka strižno odvisno zniževanje viskoznosti zaradi urejanja polimernih verig v smeri strižnega toka [5]. Za namen preučevanja stabilnosti strukture polisaharidov smo se osredotočili na dve skupini polisaharidov. Iz skupine gelov smo preučevali reološke lastnosti gellana, ksantana in welana, iz skupine polisaharidnih raztopin pa smo raziskovali natrijevo karboksimetilcelulozo (CMC) in hidroksipropil metilcelulozo (HPMC). Ishwar [4] opisuje, da se gellan uporablja v številnih aplikacijah, npr. v slaščičarstvu in pekarskih izdelkih za zagotavljanje strukture in teksture izdelkov. Z uporabo gellana so skrajšali proces želiranja iz 24–48 ur na 10–12 ur. Uporaben je pri izdelavi marmelad, saj izboljša mazljivost izdelka. V farmaciji se ga lahko uporablja kot sredstvo za nadzorovano sproščanje zdravilnih učinkovin in adsorpcijo le-teh v želodcu. Pri tem so ugotovili, da zadostno sprošča metroindazol in paracetamol, ustvari zmerno trdnost tablete, nizko krhkost, dobro razpada in se raztaplja [4]. Rottava [9] navaja, da je tudi ksantan zaradi svojega delovanja široko uporaben kot zgoščevalno sredstvo, stabilizator in emulgator, v kombinaciji z drugimi polisaharidi pa lahko deluje tudi kot želirno sredstvo. Za welan Hongxia [3] navaja, da ima edinstveno strukturo, saj je vodna raztopina visoko viskozna v širokem razponu pH in temperature (do 150 °C). Prav zaradi teh lastnosti je uporaben v širokem naboru industrijskih aplikacij, zlasti pri tistih, ki se uporabljajo v proizvodnji hrane, betona, nafte, črnila in v procesu za izboljšanje črpanja nafte [3]. Natrijevo karboksimetilcelulozo in hidroksipropilmetilcelulozo (HPMC) se uporablja na številnih področjih, zlasti na področju farmacije, prehrane, pri kemikalijah, naftni in tekstilni industriji, pravi Musfiroh [7]. V farmaciji se uporablja kot stabilizator, emulgator, zgoščevalno sredstvo in želirno sredstvo [8].

Pri vseh aplikacijah, v katerih se uporabljajo omenjeni materiali, je bistvenega pomena struktura oziroma mehanske lastnosti samega izdelka, narejenega iz polisaharida, zato smo raziskali reološke lastnosti materialov in preverili, kako staranje materiala vpliva na njegove lastnosti.

Namen raziskave je preučiti, ali se s časom zaradi staranja struktura polisaharidov spremeni, saj spremembe strukture materialov vodijo do sprememb funkcionalnosti samih izdelkov. Iz meritev, izvedenih z reološkimi metodami, smo iz podatkov o viskoelastičnih moduli lahko sklepali na strukturne značilnosti preiskovanih materialov. Na osnovi dinamičnih testov smo lahko določili kritično amplitudo strižne deformacije in tako dobili območje linearnosti meritev za vse preiskovane vzorce. Z rezultati testa lezenja in obnove pa smo z ustreznimi matematičnimi modeli opisali viskoelastično obnašanje vseh izbranih materialov. Ustreznost izbranih matematičnih modelov za popis viskoelastičnega obnašanja materialov smo dokazali s pomočjo rezultatov meritev testa lezenja in obnove ter z rezultati meritev ponavljajočega testa lezenja in obnove. Obenem smo z reološkimi testi preverili stabilnost materialov.

2 Materiali in priprava vzorcev

Pri raziskavi smo uporabljali surovine, ki so navedene v spodnji tabeli.

Tabela 1. Seznam uporabljenih surovin

Material	Tip	Lot	Proizvajalec
Gellan	Kelcogel	8I0043A	Monsanto
Welan	K1A96	24046K	Monsanto
Ksantan	FNCS	2503647	Jungbunzlaver
HPMC	K4M	UF3052	Methocel
CMC	/	C-5013	Sigma

Vzorci so bili pripravljeni tako, da smo material na začetku zatehtali v stekleno čašo, vanjo dodali ustrezno količino destilirane vode, nato pa smo raztopino dobro premešali s stekleno palčko. Čašo smo pokrili z nepropustno folijo za preprečevanje morebitnega izhlapevanja vode. Tako pripravljene vzorce smo pustili v hladilniku dva dni, da bi dosegli maksimalno omočenost oz. hidratacijo izbranega polimera. Za vse našete vzorce so bile pripravljene 1 ut. % raztopine, ki smo jih hranili v hladilniku pri temperaturi 5 °C, da bi ostale uporabne; na vzorcih, ki bi bili dlje časa izpostavljeni sobni temperaturi, bi se lahko razvili mikroorganizmi. Pred meritvami so bili vzorci vedno izpostavljeni sobni temperaturi za 10 min, da so se temperirali na sobno temperaturo, pri čemer smo raztopino med temperiranjem premešali do homogene zmesi.

Izjema pri pripravi je bil le vzorec iz materiala gellan, ki smo ga po dveh dneh, ko se je polimer popolnoma omočil, segreli na 90–100 °C za 10 min. Tako pripravljen vzorec se s segrevanjem zamreži in dobi končno strukturo. Med gretjem je bil vedno pokrit z urnim steklom, da ne bi voda iz vzorca izhlapela. Nato smo vzorec postopno hladili tako, da smo ga čez noč shranili v hladilniku na 5 °C, meritve pa smo izvedli šele naslednji dan.

3 Metodologija testiranja in analize podatkov

Stabilnost strukture polisaharidov smo preučevali z reološkimi metodami [2]. Način določanja reoloških lastnosti preiskovanih vzorcev je merjenje odziva vzorca v obliki deformacije pri delovanju konstantne napetosti. Konstantno napetost v vzorcu dobimo preko obremenjevanj vzorca s konstantnim torzijskim momentom. Za merjenje reoloških lastnosti smo uporabili reometer Anton Parr, različica Physical MCR 301. Za vzorce iz materialov gellan, welan, ksantan in HPMC smo uporabili senzorski sistem dveh vzporednih plošč premera 50 mm in z razdaljo med njima 1 mm. Le za vzorec CMC smo uporabili senzorski sistem stožca in plošče premera 59,970 mm in kota stožca 0,494 °, ker meritve s sistemom dveh vzporednih plošč za vzorec CMC niso bile več relevantne.

Meritve smo izvajali pri temperaturi 20 °C. Po nanosu vzorca na merilni sistem smo pred meritvami počakali nekaj minut, da se je vzorec po celotnem merilnem sistemu enakomerno temperiral na nastavljenih 20 °C. Enakomerno temperaturo med celotno meritvijo smo zagotavljali s steklenim pokrovom. Steklen pokrov je preprečil tudi morebitne zunanje vplive (premikanje zraka), prisotne v okolici merilnega sistema. Ustalitev temperature smo spremljali in odčitavali neposredno iz senzorskega sistema reometra na 0,1 °C natančno. Tako smo zagotovili konstantno temperaturo po celotnem vzorcu

in enake začetne pogoje za vse preiskovane vzorce. Meritve posameznega vzorca smo večkrat ponovili z namenom doseganja ponovljivosti eksperimentov.

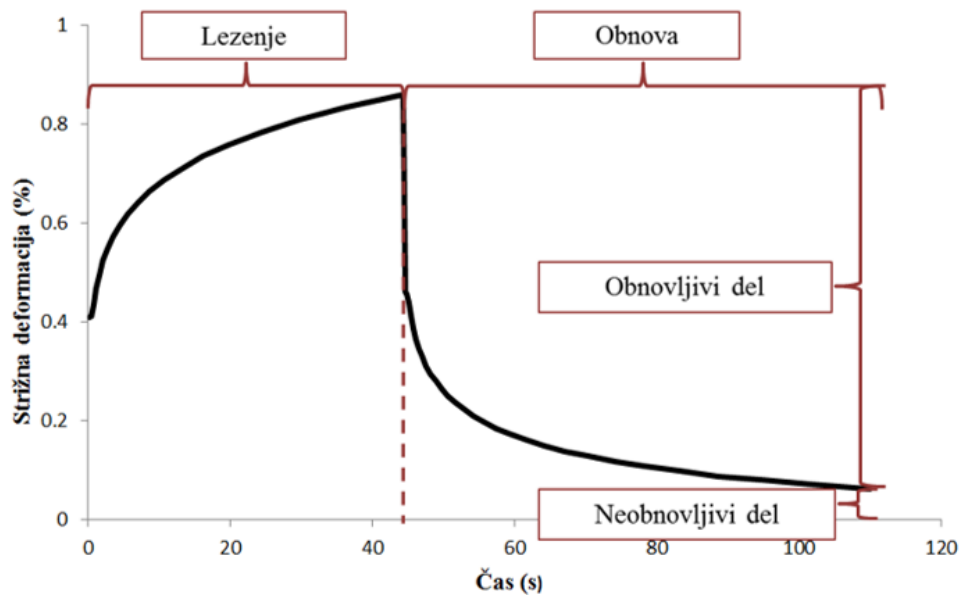
V prvem delu raziskav smo izvajali amplitudne oz. dinamične teste, na osnovi katerih smo določili kritično amplitudo strižne deformacije in tako dobili območje linearnega vedenja preiskovanih materialov. Pri amplitudnem testu spremljamo spreminjanje elastičnega strižnega modula G' in strižnega modula izgub G'' v odvisnosti od amplitude strižne napetosti τ_a oz. amplitude strižne deformacije γ_a pri konstantni frekvenci oscilacije ω . Bistvo testa je določiti območje linearnega viskoelastičnega odziva (LVO), kjer sta elastični strižni modul in strižni modul izgub neodvisna od amplitude strižne deformacije oziroma amplitude strižne napetosti [1]. Nad območjem LVO se z naraščajočo amplitudo strižne deformacije vrednosti elastičnega strižnega modula G' , strižnega modula izgub G'' in kompleksnega modula G^* značilno zmanjšujejo, fazni zamik δ pa prične naraščati. Prehod iz linearnega v nelinearno viskoelastično območje določata kritična amplituda strižne deformacije γ_{kr} in kritična strižna napetost τ_{kr} , ki sta odvisni od mehanskih lastnosti preiskovanega vzorca [10]. Kritična amplituda strižne deformacije je tista deformacija, kjer smo še v linearnem viskoelastičnem območju. Prav tako nam kritična strižna napetost zagotavlja maksimalno strižno napetost, kjer smo še v območju linearnega viskoelastičnega odziva materiala. Za preiskovane vzorce smo oscilatorni test izvajali pri konstantni frekvenci 10 rad/s. Izračunane kritične strižne deformacije na osnovi eksperimentalno dobljenih vrednosti reoloških lastnosti v odvisnosti od velikosti strižne deformacije so številčno prikazane v Tabeli 2.

Tabela 2. Empirično določene vrednosti kritičnih strižnih deformacij

Material	γ_{kr} [%]	γ_{kr} [%]
	na osnovi meritev G^*	na osnovi meritev δ
Gellan	12,62	4,10
Welan	15,32	4,93
Ksantan	26,05	20,62
HPMC	25,73	16,44
CMC	51,70	10,94

V drugem delu raziskav smo na osnovi pridobljenih informacij o kritični amplitudi strižnih deformacij nadaljevali z meritvami reoloških lastnosti preiskovanih materialov. Pri frekvenčnem testu merimo odvisnost dinamičnih količin elastičnega strižnega modula G' in strižnega modula izgub G'' od frekvence oscilacije ω v območju od 0,1 do 100 rad/s. Gre za nedestruktivno metodo, kjer z zmanjševanjem frekvence oscilacije določimo frekvenčno odvisnost dinamičnih količin v pogojih, ko se notranja struktura vzorca ne podira. Meritve se izvajajo pri konstantni amplitudi strižne deformacije oziroma konstantni amplitudi strižne napetosti.

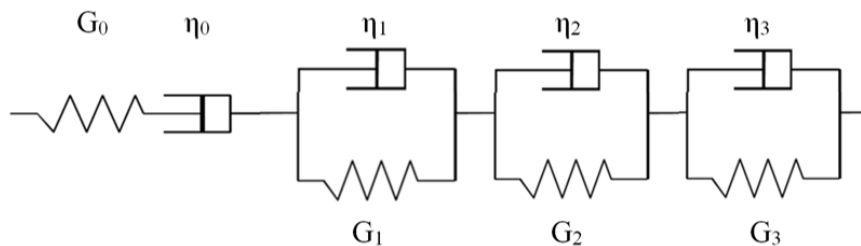
Pri testih lezenja merimo nastalo strižno deformacijo, medtem ko je vzorec podvržen konstantni strižni napetosti. Vrednost strižne deformacije se s časom povečuje. V drugi fazi merimo časovni potek spreminjanja strižne deformacije ob odvzemu strižne napetosti, kar imenujemo faza obnove. Faza lezenja in obnove je shematično prikazana na sliki 1.



Slika 1. Shematični prikaz faze lezenja in faze obnove

Pri meritvah lezenja in obnove (v nadaljevanju CR) smo za vzorca iz materialov gellan in welan nastavili strižno napetost na 0,3 Pa, pri ksantanu na 0,1 Pa, pri CMC na 0,025 Pa in pri HPMC na 0,01 Pa. S podatki tega testa lahko ugotovimo tudi, kolikšen je elastičen in viskozni doprinos. Elastični doprinos predstavlja obnovljivi del deformacije, viskozni doprinos pa predstavlja neobnovljivi del deformacije, to je trajna deformacija.

Za popis viskoelastičnega vedenja polimernih materialov se uporabljajo standardizirani matematični modeli. V literaturi obstaja več matematičnih modelov za popis viskoelastičnosti gelskih struktur; tako Moreira in drugi v svojih člankih navajajo, naj bi za opis gelskih sistemov uporabili matematični model, ki je prikazan na Sliki 2, kjer je v modelu na začetku najprej vezana dušilka in vzmeti in nato trije elementi, kjer sta vzmet in dušilka vezani vzporedno [6].



Slika 2. 8-parametrični model, kjer so za Maxwellovim elementom zaporedno vezani še trije Kelvin-Voigtovi elementi

Z uporabo matematičnega modela, predstavljenega na Sliki 2, lahko na osnovi meritev lezenja izrazimo funkcijo voljnosti, ki podaja razmerje med časovno odvisno strižno deformacijo in konstantno podano strižno napetostjo [1]:

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\tau} = J_0 + \frac{t}{\eta_0} + J_1 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{ret_1}}\right)\right) + J_2 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{ret_2}}\right)\right) + J_3 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{ret_3}}\right)\right), \quad (1)$$

kjer so $J(t)$ strižna voljnost, $\gamma(t)$ strižna deformacija, τ konstantna strižna napetost, η_0 viskoznost začetne dušilke v 8-parametričnem modelu, (J_i, τ_{ret_i}) , $i=1,2,3$ množica parametrov, ki predstavlja mehanski spekter za preučevani materiali. Parametri $\tau_{ret_i} = \eta_i/G_i$ predstavljajo retardacijske čase. Za izračun

parametrov predstavljenega modela je bil uporabljen program MatLab z vgrajeno metodo Levenberg-Marquardt. Na osnovi izračunanih parametrov matematičnega modela bomo sklepali o razlikah v strukturi preučevanih materialov.

4 Rezultati

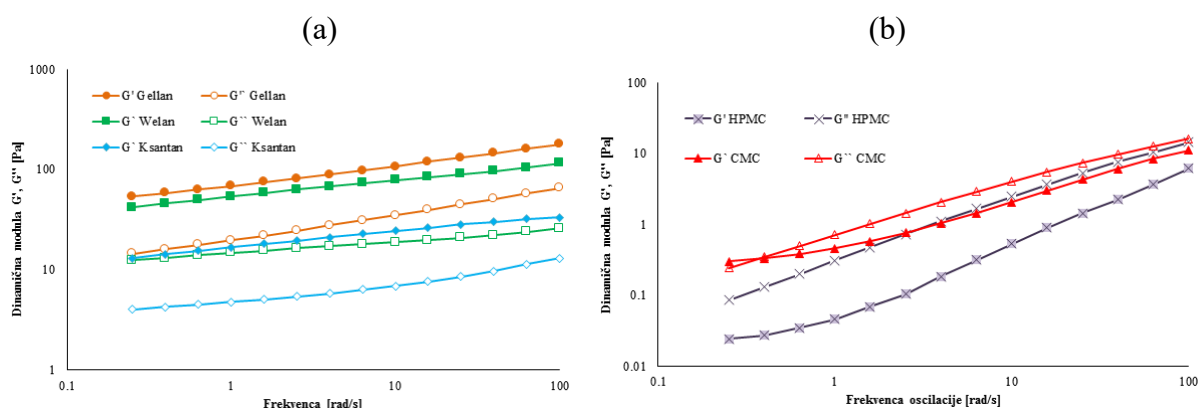
V tem poglavju predstavljamo rezultate meritev, ki so bile izvedene na osnovi nedestruktivnih strižnih pogojev. Pri teh meritvah so strižne deformacije in strižne napetosti relativno majhni, da ne povzročijo spremembe v sami strukturi vzorca med meritvami. Strižna deformacija mora biti dovolj majhna tudi zato, da zagotovimo meritve znotraj linearnega viskoelastičnega odziva materiala. Reološke lastnosti preiskovanih vzorcev določamo pri nedestruktivnih strižnih pogojih z dvema različnima merilnima tehnikama: (a) dinamične oziroma oscilatorne meritve, kamor uvrščamo frekvenčni test in (b) (kvazi)statične meritve, kamor uvrščamo test lezenja in obnove.

Meritve frekvenčnega testa potekajo pri konstantni amplitudi strižne deformacije oz. konstantni amplitudi strižne napetosti. Rezultati prikazujejo spreminjanje elastičnega strižnega modula in strižnega modula izgub s frekvenco oscilacije. Pri (kvazi)statičnih meritvah, kamor sodi test lezenja in obnove, pa gre za spremljanje nastale strižne deformacije v območju, kjer vsilimo konstantno strižno napetost, in v območju, ko strižno napetost v trenutku odvezamo. Rezultati testov so pokazali razlike v mehanski stabilnosti preiskovanih vzorcev.

4.1 Frekvenčni testi

Na osnovi frekvenčnih testov je s poznavanjem frekvenčne odvisnosti dinamičnih modulov v pogojih linearnega viskoelastičnega območja mogoče sklepati na strukturne značilnosti raziskovanih materialov. Dinamični moduli prikazujejo spreminjanje elastičnega strižnega modula G' in strižnega modula izgub G'' s frekvenco oscilacije ω pri oscilatornih tokovnih pogojih.

Na Sliki 3a je prikazano frekvenčno odvisno obnašanje dinamičnih modulov za polimerne raztopine gellana, welana in ksantana, na Sliki 3b pa za raztopini HPMC in CMC. Pri raztopinah CMC in HPMC prevladuje strižni modul izgub G'' nad elastičnim strižnim modulom G' v preučevanem frekvenčnem območju, zato lahko sklepamo na močnejše izražen viskozni značaj. Z naraščanjem frekvence vztrajno naraščata tudi oba modula, kjer G'' narašča počasneje kot G' , in pri višjih frekvencah se približata isti vrednosti. Podoben odziv je zaslediti pri koncentriranih polimernih raztopinah [1, 5].



Slika 3. Odvisnost elastičnega strižnega modula G' in strižnega modula izgub G'' od frekvence oscilacije ω za polisaharidne raztopine: (a) gellana, welana in ksantana in (b) HPMC in CMC.

Pri vodnih raztopinah gellana, welana in ksantana lahko vidimo, da se G' in G'' bistveno manj spreminjata s frekvenco. Tu so elastične lastnosti močnejše izražene, saj elastični strižni modul G' v vseh vzorcih prevladuje nad strižnim modulom izgub G'' . Takšna karakteristika obnašanja velja za šibke gele [5]. Predvsem pri nižjih frekvencah imata oba modula višje vrednosti v primerjavi z vzorcema CMC in HPMC. Vrednosti dinamičnih modulov so pri gellanu in welanu skoraj za dekadno višje v primerjavi s ksantanom.

4.2 Testi lezenja in obnove

S testom lezenja in obnove lahko pridobimo podatke o stopnji mehanske stabilnosti materiala. Gre za test, kjer vzorec za določen čas v trenutku izpostavimo konstantni strižni napetosti in v naslednjem koraku v trenutku odvzamemo strižno napetost. Med meritvijo spremljamo nastalo strižno deformacijo v vzorcu, ki se s časom spremeni.

V prvi fazi (glej Sliko 1) je bil vzorec 160 s izpostavljen konstantni strižni napetosti, pri čemer smo spremljali nastalo strižno deformacijo materiala v odvisnosti od časa. V drugem delu smo strižno napetost v trenutku odvzeli in na Sliki 4 je izrazito viden postopen padec strižne deformacije za nadaljnjih 320 s. Skupno je meritev trajala 480 s.

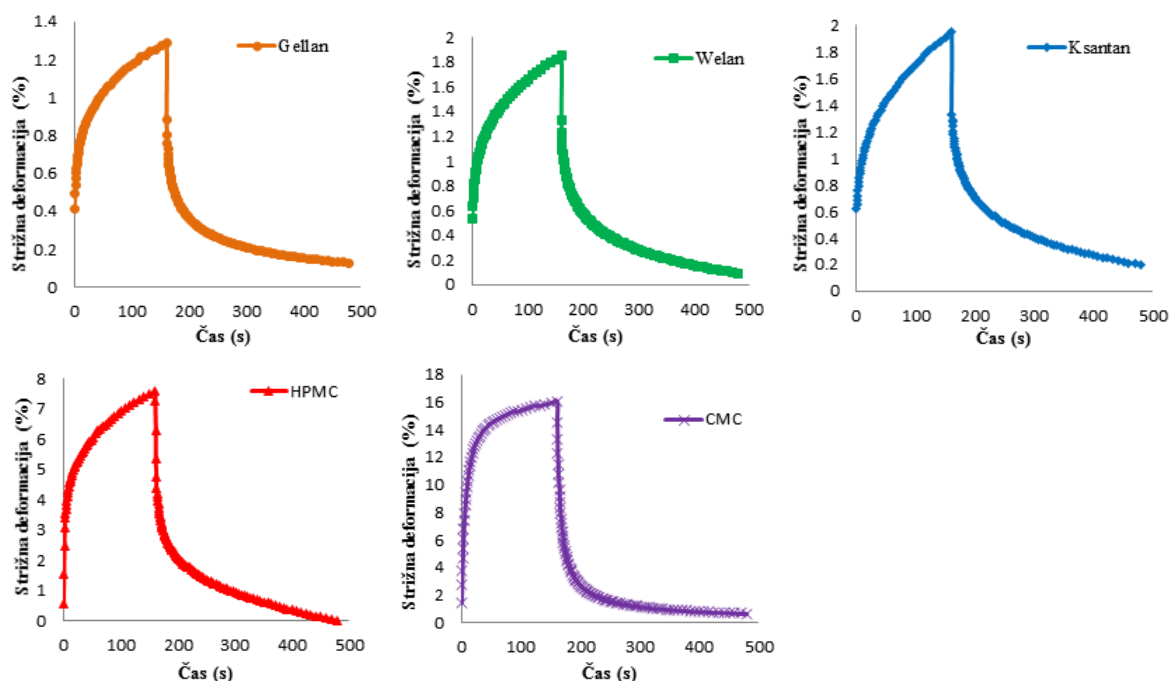
Pri izvajanju meritev na reometru Anton Parr, Physical MCR 301 nikoli ne moremo izmeriti začetne točke pri času 0 s. Sama naprava tega ne omogoča zaradi prehodnega pojava instrumenta na začetku meritev, ko je vzorec v enem trenutku izpostavljen konstantni strižni napetosti. Prva izmerjena točka oziroma velikost strižne deformacij pri času 0 s pa je pomembna, ker velikost parametra J_0 določa stopnjo elastičnosti materiala. Ker tega parametra ne moremo določiti, ga bomo v nadaljevanju izračunali z ustreznim matematičnim modelom.

Z ustrezno matematično obdelavo eksperimentalnih podatkov smo izračunali viskoznost η_0 , katere vrednosti za različne materiale so predstavljene v Tabeli 3.

Tabela 3. Velikosti viskoznosti η_0

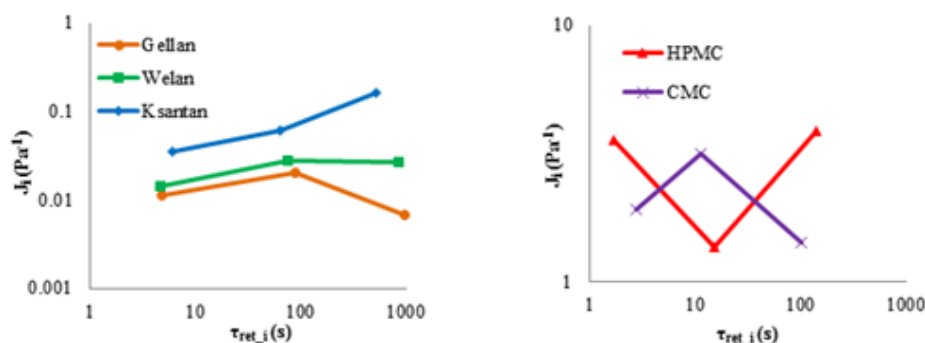
Material	η_0 [Pa s]	Material	η_0 [Pa s]
Gellan	19690	CMC	905
Ksantan	19910	HPMC	611
Welan	13020		

Vrednosti η_0 so za gele gellan, welan in ksantan skoraj 15 do 30-krat višje od vrednosti za CMC in HPMC. To pomeni, da bi mogel biti neobnovljivi del strižnih deformacij v fazi obnove bistveno večji za materiale gellan, welan in ksantan v primerjavi z dvema ostalima materialoma CMC in HPMC, ker v modelu, predstavljenem na Sliki 2, dušilka z viskoznostjo prispeva k večji nepovrnjeni deformaciji materiala po razbremenitvi. Ta fenomen lahko opazujemo iz diagramov strižnih deformacij v odvisnosti od časa, predstavljenih na Sliki 4 za vse izbrane materiale.

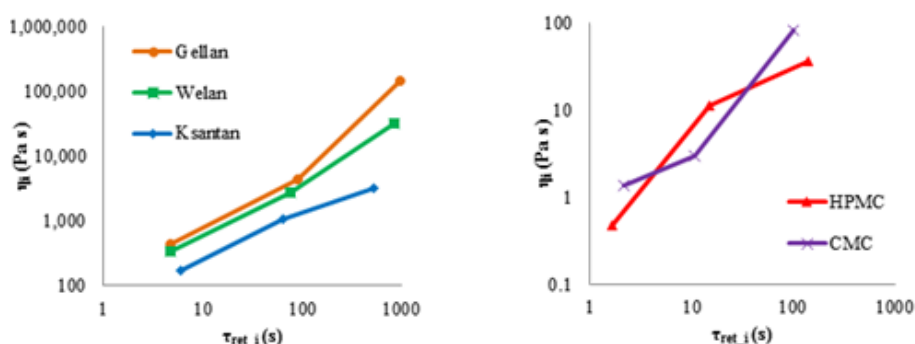


Slika 4. Prikaz meritev testa lezenja in obnove za vse preiskovane vzorce

Obenem smo na osnovi meritev lezenja z Levenberg-Marquardtovo metodo izračunali parametre viskoelastičnega modela, ki ga popisujemo z Enačbo 1. Iz dobljenih parametrov so na Sliki 5 prikazane odvisnosti diskretnih vrednosti voljnosti J_i od diskretnih vrednosti retardacijskih časov τ_i . Iz prikazanih diagramov je razvidno, da so vrednosti diskretnih mehanskih spektrov za gellan, welan in ksantan bistveno večje od vrednosti za polimerne raztopine HPMC in CMC. Na podlagi prikazanih parametrov lahko izračunamo še diskretne vrednosti viskoznosti in jih prikažemo v odvisnosti od diskretnih vrednosti retardacijskih časov (glej Sliko 6).



Slika 5. Prikaz diskretnih vrednosti voljnosti od diskretnih vrednosti retardacijskih časov



Slika 6. Prikaz diskretnih vrednosti viskoznosti od diskretnih vrednosti retardacijskih časov.

Iz Slike 6 je razvidno, da je viskoznost gelov manjša pri krajših retardacijskih časih in večja pri daljših. Viskoznost je najmanjša pri ksantanu, večja pri welanu in največja pri gellanu. Pri CMC in HPMC na to ne moremo sklepati, saj izkazujejo izmenično obnašanje.

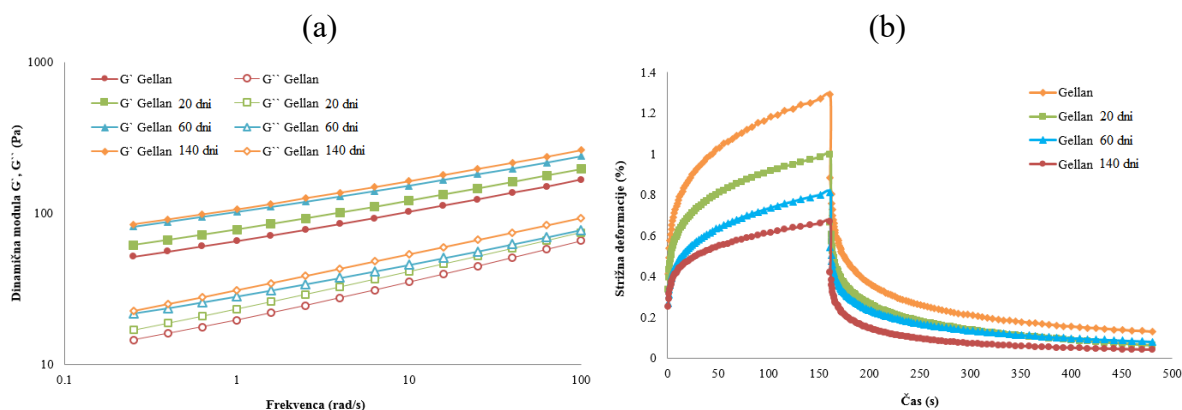
S primerjavo Slik 5 in 6 ugotovimo, da geli gellan, welan in ksantan izkazujejo večjo viskoznost in hkrati večjo elastičnost, polimerni raztopini HPMC in CMC pa manjšo viskoznost in manjšo elastičnost oziroma togost.

4.3 Vpliv staranja na viskoelastične lastnosti gelov in polimernih raztopin

Pri preučevanju vpliva staranja na viskoelastično vedenje vseh petih materialov na osnovi izmerjenih reoloških lastnosti so bile izvedene meritve po 20-ih dneh, nato po 60-ih dneh in nazadnje še po 140-ih dneh. Ves čas so bili vzorci shranjeni na hladnem v hladilniku in pokriti s parafilmom, da bi preprečili izhlapevanje. Rezultati reoloških meritev na vzorcih welana, ksantana, HPMC in CMC so bili ponovljivi. Na osnovi tega lahko sklepamo, da se jim reološke lastnosti po 140-ih dneh niso spremenile. Popolnoma drugače se je izkazalo za vzorec gellan, kjer je že pri meritvah po 20-tih dneh prišlo do razlik reoloških lastnosti. Meritve so se po 60-ih in kasneje po 140-ih dneh še bolj razlikovale. Ugotovili smo, da vzorec po končanem kuhanju ni razvil končne strukture, najverjetneje se ni dokončno zamrežil.

Na Sliki 7a so prikazani rezultati frekvenčnih testov za material gellan. Iz diagrama je razvidno, da pri vzorcu gellan prevladuje elastični značaj pred viskoznim. Tako viskozna kot tudi elastična komponenta se z vsakim naslednjim izmerjenim, staranim vzorcem gellana, povečuje. Večja razlika je med vzorci, merjenimi pri času 0 in pri času 20 ter 60 dni. Po 60-ih dneh oziroma pri meritvi po 140-ih dneh sicer še naraste, vendar za manjši delež.

Pri testu lezenja in obnove se je za vzorec gellana test vedno izvajal tako, da je bil vzorec za 160 s izpostavljen nastavljeni strižni napetosti 0,3 Pa, nato pa je bila v trenutku napetost odvzeta in odziv materiala smo spremljali nadaljnjih 320 s. Meritve strižne deformacije v odvisnosti od časa merjenja so prikazane na Sliki 7b. Zaradi spremembe v strukturi vzorca gellan so vidne razlike pri meritvah strižne deformacije v odvisnosti od časa. Ker vzorec postaja vedno bolj elastičen, je strižna deformacija najnižja pri vzorcu, ki je bil merjen nazadnje, in sicer po 140-ih dneh staranja vzorca.



Slika 7. (a) Odvisnost elastičnega strižnega modula G' in strižnega modula izgub G'' od frekvence oscilacije ω za starane vzorce gellana, (b) Prikaz meritev testa lezenja in obnove za vzorce gellan, ki so bili starani 140 dni

5 Zaključki

V raziskavi smo preučevali reološke lastnosti vodnih raztopin polisaharidov z reološkimi metodami. Eksperimente smo izvajali na gelih gellanu, welanu in ksantanu in na dveh polimernih raztopinah, HPMC in CMC. Meritve so pokazale razliko med geli in polimernimi raztopinami.

Iz meritev amplitudnih testov smo določili linearno viskoelastično območje. Pri gellanu, welanu in ksantanu je prehod iz linearne v nelinearno viskoelastično območje izrazito viden. Z amplitudnimi testi smo določili še kritično amplitudo strižne deformacije. Izračunane vrednosti so pokazale, da imata polimerni raztopini HPMC in CMC višje kritične amplitude strižne deformacije kot gellan, welan in ksantan.

Frekvenčni testi so potrdili, da so pri gellanu, welanu in ksantanu močnejše izražene elastične lastnosti v primerjavi s HPMC in CMC. Takšna karakteristika obnašanja velja za šibke gele. Pri raztopini CMC in HPMC pa prevladuje strižni modul izgub G'' nad elastičnim strižnim modulom G' v preučevanem frekvenčnem območju, zato lahko sklepamo na močnejše izražen viskozni značaj.

S podatki iz testov lezenja in obnove smo dobili podatke o stopnji stabilnosti strukture preučenih materialov. Rezultati meritev lezenja in obnove so pokazali, da geli gellan, welan in ksantan izkazujejo večjo viskoznost in hkrati večjo elastičnost. Polimerni raztopini HPMC in CMC pa manjšo viskoznost in manjšo elastičnost oziroma togost.

Kot zadnje smo preverjali še vpliv staranja na viskoelastične lastnosti gelov in polimernih raztopin. Za preučevanje staranja materiala smo meritve na vseh preiskovanih vzorcih ponovili po 20-ih, 60-ih in 140-ih dneh. Meritve so pokazale, da se welanu, ksantanu, HPMC in CMC lastnosti ne spremenijo. Ravno nasprotno pa velja za gellan, kjer se razlike pojavijo že po 20-ih dneh. Tako viskozna kot tudi elastična komponenta se z vsakim naslednjim izmerjenim, staranim vzorcem gellana, povečujeta. Večja razlika je med vzorci, merjenimi pri času 0 in pri času 20 dni ter 60 dni. Po 60-ih dneh oziroma pri meritvi po 140-ih dneh sicer še naraste, vendar le za manjši delež.

Viri

1. Barnes, H. A. (2000). A handbook of elementary rheology. Wales: The University of Wales, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics.
2. Florjančič, U., Zupančič Valant, A., Žumer, M. (2002). Rheological Characterization of Aqueous Polysaccharide Mixtures Undergoing Shear. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 16 (3), 105-118.
3. Hongxia, A., Min, L., Pingru, Y., Shaozhi, Z., Yukai, S., Ping, L., Shuang, L., Jufang, W. (2014). Improved welan gum production by *Alcaligenes* sp. ATCC31555 from pretreated cane molasses. *Carbohydrate Polymers*, 129, 35-43.
4. Ishwar, B. B., Shrikant, A. S., Parag, S. S., Rekha, S. S. (2007). Gellan Gum: Fermentative Production, Downstream Processing and Applications. *Food Technol. Biotechnol.*, 45 (4), 341-345.
5. Lapasin, R., Prich, S. (1995). Rheology of Industrial Polysaccharides: Theory and Applications. Glasgow: Blackie Academic and Professional, An Imprint of Chapman & Hall.
6. Moreira, R. H., Munarin, F., Gentilini, R., Visai, L., Granja, L. P., Tanzi, M. C., Perini, P. (2014). Injectable pectin hydrogels produced by internal gelation: pH dependance of gelling and rheological properties, *Carbohydrate Polymers*, 103, 339-347.

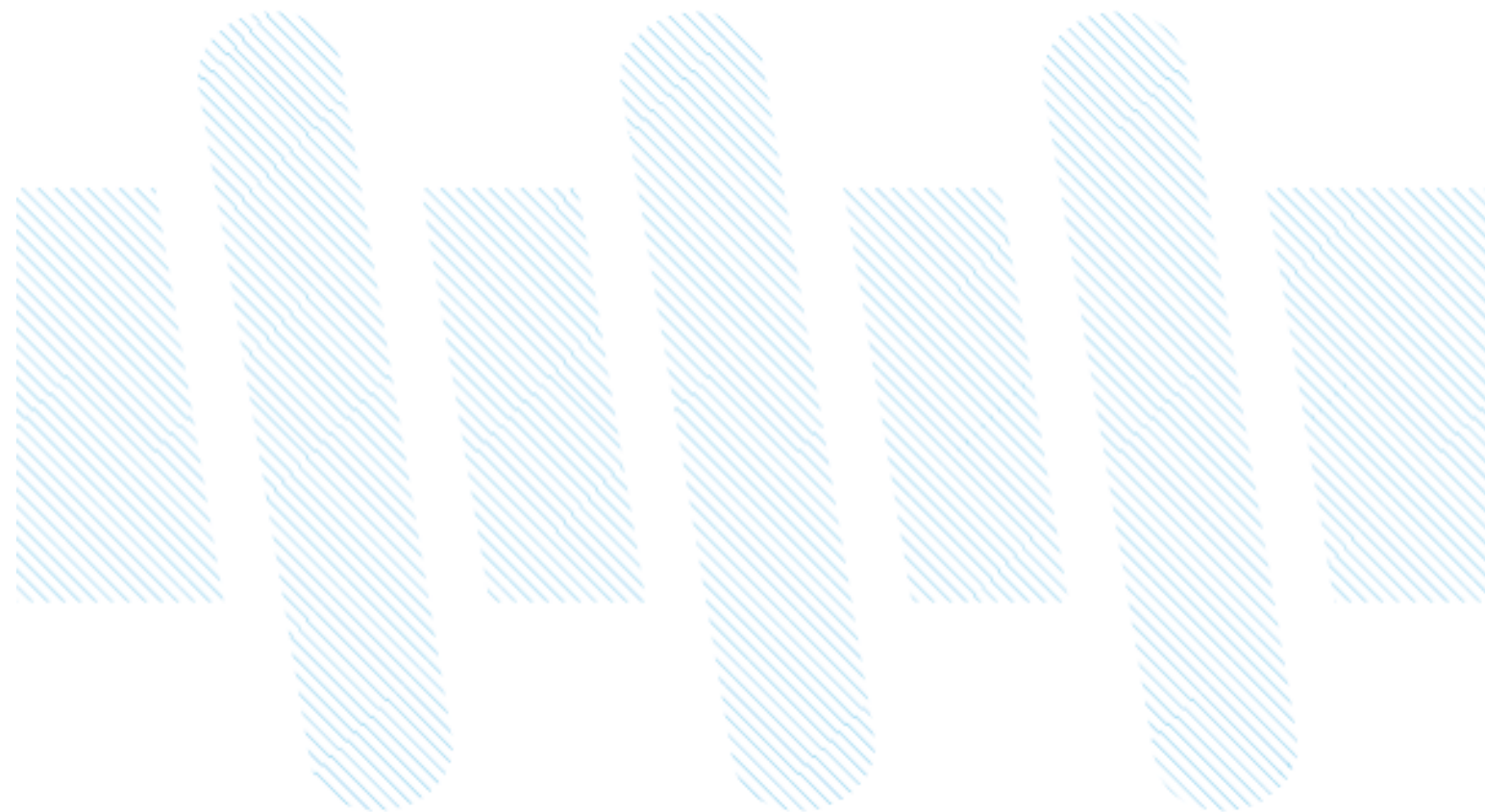
7. Musfiroh, I., Budiman, A. N. H. I. (2013). The Optimisation of Sodium Carboxymethyl Cellulose (NA-CMC) Synthesized from Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solm) Cellulose. *RJPBCS*, 4, 0975-8585.
8. Reese, E. T., Siu, R. G. H., Levinson, H. S. (1950). The biological degradation of soluble cellulose derivatives and its relationship to the mechanism of cellulose hydrolysis. *Journal of Biotechnology*, 59, 485-497.
9. Rottava, I., Betesini, G., Silva, M. F., Lerin, L., de Oliveira, D., Padilha, F. F., Toniazzi, G., Mossi, A., Canisan, R. L., DiLuccio, M., Treichel, H. (2009). Xanthan gum production and rheological behaviour using different strains of *Xanthomonas* sp. *Carbohydrate Polymers*, 77 (1), 65-71.
10. Zupančič Valant, A. (2007). Uvod v reologijo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo.

Mag. Valentina Rebec je magistrirala na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo Univerze v Ljubljani, na katedri za kemijsko procesno, okoljsko in biokemijsko inženirstvo iz področja reologije polisaharidov. Zaposlena je v podjetju Lek d.d. Njena področja znanja so reologija, karakterizacija morfoloških in termičnih lastnosti ter viskoelastičnega vedenja polimernih materialov

Dr. Igor Plazl je leta 1978 diplomiral iz kemijskega inženirstva na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo Univerze v Ljubljani. Doktoriral je leta 1993 in v letu 2010 postal redni profesor za kemijsko tehnologijo. Leta 2004 je izdal univerzitetni učbenik z naslovom "Uvod za modeliranje procesov". V letu 1989 je bil zaposlen v Bayer AG, Leverkusen, in v študijskem letu 2003/04 na Oregon State University, ZDA, kot gostujoči profesor (Fulbright Grant). V obdobju 2010-2014 je bil involjen kot prodekan Fakultete za kemijo in kemijsko tehnologijo Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna področja so aplikacije mikrovalov v kemijski industriji, matematično modeliranje (bio) kemijskih procesov, in mikroreaktorske tehnologije. Imel je veliko vabljenih in plenarnih predavanj in je objavil več člankov v svetovno priznanih revijah na področju mikrofluidov. Sourednik revije Chemical and Biochemical Engineering Journal.

Dr. Urška Florjančič je doktorirala s področja kemijskega inženirstva na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo Univerze v Ljubljani. Po več letih pedagoškega in raziskovalnega dela na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo in Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani ter izkušenj z razvojnim delom v podjetjih Julon in Donit Tesnit je od leta 2016 zaposlena na Fakulteti za industrijski inženiring Novo mesto kot docentka za področje materialov. Znanstvena in strokovna področja njenega dela in zanimanja so reologija, karakterizacija morfoloških in termičnih lastnosti ter viskoelastičnega vedenja polimernih materialov, polimerno procesiranje, interdisciplinarni projekti, sodelovanje z industrijo, vključevanje študentov v projektno delo.

Dr. Anatolij Nikonov je doktoriral s področja mehanike na Saratovski državni univerzi v Rusiji. Zaposlen je na Fakulteti za industrijski inženiring Novo mesto, od leta 2017 je predstojnik Katedre za mehaniko, konstruiranje in računalniški inženiring. Njegova področja znanja so mehanika, dinamika konstrukcij, fenomeni prehodnega pojava in valovanja v trdnih telesih, asimptotične metode v mehaniki, reologija in karakterizacija viskoelastičnih lastnosti polimernih materialov, eksperimentalne metode.



www.fini-unm.si