God.1 broj 1 (2026) ISSN ---

Univerzitet u Zenici
Institut "Kemal Kapetanović" u Zenici

University of Zenica
Institute "Kemal Kapetanović" in Zenica

ZBORNIK RADOVA

sa 1. Međunarodne naučno-stručne konferencije

"Savremeni materijali i tehnologije u poslovanju kompanija na području Zapadnog Balkana"

Scientific-Professional Conference

"Modern Materials and Technologies in the Business Operations of Companies in the Western Balkans"

BOOK OF PROCEEDINGS

Zenica, Bosna i Hercegovina, 02-03. oktobar 2025. godine

Zenica, Bosnia and Herzegovina, 02–03 October 2025

God.1 broj 1 (2026) ISSN ---

Univerzitet u Zenici
Institut "Kemal Kapetanović" u Zenici

University of Zenica
Institute "Kemal Kapetanović" in Zenica

ZBORNIK RADOVA

sa 1. Međunarodne naučno-stručne konferencije

"Savremeni materijali i tehnologije u poslovanju kompanija na području Zapadnog Balkana"

Scientific-Professional Conference

"Modern Materials and Technologies in the Business Operations of Companies in the Western Balkans"

BOOK OF PROCEEDINGS

Zenica, Bosna i Hercegovina, 02-03. oktobar 2025. godine

Zenica, Bosnia and Herzegovina, 02–03 October 2025

ZBORNIK RADOVA
UNIVERZITET U ZENICI
INSTITUT "KEMAL KAPETANOVIĆ" u Zenici
sa 1. Međunarodne naučno-stručne konferencije
“Savremeni materijali i tehnologije u poslovanju kompanija na području Zapadnog Balkana”
God.1 broj 1 (2026)
ISSN ---

UREDNIK / EDITOR

Dr. Alaudin Brkić

IZDAVAČ / PUBLISHER

Univerzitet u Zenici

Institut “Kemal Kapetanović” u Zenici

University of Zenica

Institute “Kemal Kapetanović” in Zenica

Travnička cesta 7, Zenica, Bosna i Hercegovina

Tel: +387 32 247 999

Email: institut@unze.ba

Web: ikk.unze.ba

TIRAŽ / ISSUE: 100 kopija / copies

ORGANIZACIONI ODBOR / ORGANIZING COMMITTEE

Dr. Alaudin Brkić, predsjednik

Dr. Belma Fakić

Dr. Omer Beganović

Dr. Derviš Mujagić

Dr. Mustafa Hadžalić

Mr. Branka Muminović

Mr. Amel Zahirović

Mr. Mirnes Duraković

Mr. Sanela Beganović

Mr. Suvad Kesić

Adisa Burić, mag.met.mat., sekretar

Kenan Mulahasanović, bach.ecc.

Amila Smajić

NAUČNI ODBOR / RESEARCH COMMITTEE

Mirsada Oruč, predsjednik (BiH)

Dr. Alaudin Brkić (BiH)

Dr. Zdenka Zovko Brodarac (HR)

Dr. Franjo Kozina (HR)

Dr. Branislav Marković (SR)

Dr. Radoje Pantović (SR)

Dr. Borut Kosec (SLO)

Dr. Hasan Avdušinović (BiH)

Dr. Aida Imamović (BiH)

Dr. Derviš Mujagić (BiH)

Dr. Ivica Veža (HR)

Dr. Darko Petković (BiH)

Dr. Belma Fakić (BiH)

Dr. Vaso Manojlović (SR)

Dr. Raza Sunulapašić (BiH)

Dr. Fuad Hadžikadunić (BiH)

Dr. Nadira Bušatlić (BiH)

Dr. Omer Beganović (BiH)

Dr. Mustafa Hadžalić (BiH)

SADRŽAJ

LAKI STRUKTURNI MATERIJALI ZA AUTOMOBILSKU I SVEMIRSKU INDUSTRIJU - DIZAJN, SVOJSTVA I ODRŽIVOST
LIGHTWEIGHT STRUCTRURAL MATERIALS FOR AUTOMOTIVE AND AEROSPACE INDURSTRY - DESIGN, PROPERTIES AND SUSTAINABILITY

Zdenka Zovko Brodarac, Franjo Kozina 7

TREMOMEHANIČKA OBRADA ČELIKA
THERMOMECHANICAL TREATMENT OF STEELS

Omer Beganović 27

MODEL "FABRIKA ZA UČENJE – LEARNING FACTORY" KAO REGIONALNI KONCEPT PRIPREME ZA OBRAZOVNI PROCES NA PREMISAMA INDUSTRIJE 4.0?
THE MODEL OF "LEARNING FACTORY" AS A REGIONAL CONCEPT OF PREPARATION FOR THE EDUCATIONAL PROCESS ON THE PREMISES OF INDUSTRY 4.0?

Darko Petković, Ivica Veža, Džafer Dautbegović, Alaudin Brkić, Mustafa Hadžalić, Emir Đulić..... 60

NOVI MATERIJALI U MEDICINI UZ PRIMJENU 3D ADITIVNIH TEHNOLOGIJA
NEW MATERIALS IN MEDICINE USING 3D ADDITIVE TECHNOLOGIES

Aida Imamović, Mirsada Oruč, Amra Talić-Čikmiš, Šaban Žuna 76

PROIZVODNJA I MIKROLEGIRANJE AUSTENITNOG NEHRĐAJUĆEG ČELIKA X8CrNiS18-9
PRODUCTION AND MICROALLOYING OF AUSTENITE STAINLESS STEEL X8CrNiS18-9

Derviš Mujagić.....85

GEOPOLIMERI – DOBIJANJE, KARAKTERISTIKE I PRIMJENA
GEOPOLYMERS – OBTAINING, CHARACTERISTICS AND APPLICATION

Nadira Bušatlić, Ilhan Bušatlić, Adnan Mujkanović, Marina Jovanović, Amel Zahirović 97

KOLIKO JE „ZELEN" VAŠ BIZNIS? ULOGA KONCEPTA OZELENJAVANJA BIZNISA U FUNKCIJI IZGRADNJE (ODRŽIVE) KONKURETNSKE PREDNOSTI
HOW „GREEN" IS YOUR BUSINESS? THE ROLE OF THE GREENING BUSINESS CONCEPT IN BUILDING COMPETITIVE ADVANTAGE

Dženan Kulović, Kasim Tatić 104

ZNAČAJ I POTREBA METALOGRAFSKIH ISPITIVANJA KVALITETA MATERIJALA U CILJU OSIGURANJA KVALITETA PROIZVODA
AND NECESSITY OF METALLOGRAPHIC TESTING OF MATERIAL QUALITY IN ORDER TO ENSURE PRODUCT QUALITY

Belma Fakić, Adisa Burić, Edib Horoz *118*

ISTRAŽIVANJE MOGUĆNOSTI ZA PROIZVODNJU WPC KOMPOZITA NA BAZI OTPADNIH SIROVINA
INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY FOR PRODUCTION OF WPC COMPOSITE BASED ON WASTE RAW MATERIALS

Raza Sulunahpašić, Marina Jovanović, Džafer Dautbegović, Darko Petković *130*

PROCJENA VIJEKA TRAJANJA STRUKTURNIH ELEMENATA RUDARSKIH POSTROJENJA KORIŠTENJEM PROŠIRENE METODE KONAČNIH ELEMENATA
ESTIMATION OF THE LIFE OF STRUCTURAL ELEMENTS OF MINING HOISTING EQUIPMENTS USING THE EXTENDED FINITE ELEMENT METHOD

Mustafa Hadžalić *144*

RADNO PRAVO U DOBA DIGITALNE TRANSFORMACIJE – IZAZOVI I PRILIKE
LABOR LAW IN THE AGE OF DIGITAL TRANSFORMATION - CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

Venan Hadžiselimović, Smajo Šabić, Amir Omerbašić *157*

POLITIKE I CILJEVI RADA I DJELOVANJA MEHANIČKOG KALIBRACIONOG LABORATORIJA INSTITUTA „KEMAL KAPETANOVIĆ“ U ZENICI
POLICIES AND OBJECTIVES OF THE WORK AND ACTIVITIES OF THE MECHANICAL CALIBRATION LABORATORY OF THE "KEMAL KAPETANOVIĆ" INSTITUTE IN ZENICA

Branka Muminović, Sinha Korlat, Almir Kadrić, Sejad Avdić *175*

LAKI STRUKTURNI MATERIJALI ZA AUTOMOBILSKU I SVEMIRSKU INDUSTRIJU - DIZAJN, SVOJSTVA I ODRŽIVOST

LIGHTWEIGHT STRUCTURAL MATERIALS FOR AUTOMOTIVE AND AEROSPACE INDUSTRY - DESIGN, PROPERTIES AND SUSTAINABILITY

PROF. DR. SC. ZDENKA ZOVKO BRODARAC

Dr. sc. Franjo Kozina

Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet,

Aleja narodnih heroja 3, Sisak, Hrvatska

REZIME

Razvoj aluminijskih legura s dodatkom litija i magnezija (Al-Mg-Li) privlači pažnju zbog njihove niske gustoće, povećane krutosti i specifične čvrstoće, što ih čini pogodnima za primjenu u automobilskoj, zrakoplovnoj i svemirskoj industriji. Cilj ovog istraživanja bio je ispitati utjecaj uvjeta sinteze taline te omjera Li/Mg na razvoj mikrostrukture, mehanička svojstva i ponašanje legura u degradacijskom okruženju. Sinteza je provedena u različitim zaštitnim atmosferama (argon, argon s djelomičnim ili potpunim pokrovom lonca te vakuum), pri čemu su dobivene legure s različitim sadržajem Li i Mg te dodatkom mikrolegirajućih elemenata (npr. Zr, AlTi5B1). Analizirani su kemijski sastav, mikrostruktura, tlačna čvrstoća te degradacijska otpornost ispitana elektrokemijskom i uranjajućom metodom u uvjetima koji simuliraju radne uvjete u transportnoj industrije. Rezultati pokazuju da je najveća gustoća od 2,49 g/cm³ postignuta pri taljenju u zaštitnoj atmosferi argona s djelomičnim pokrovom, dok je najniža gustoća (2,27 g/cm³) zabilježena pri vakuumskom taljenju. Najniža vrijednost može se povezati s prisutnošću vakuumske

poroznosti. Legure s uravnoteženim omjerom Li/Mg pokazale su najveće vrijednosti tlačne čvrstoće i dobru stabilnost nakon toplinske obrade, dok su legure s visokim udjelom litija imale nižu gustoću, ali i smanjenu duktilnost. Elektrokemijska degradacija u lijevanom stanju iznosila je 17,01 mm/god, dok je nakon toplinske obrade otapajućim žarenjem značajno porasla na 51,24 mm/god, što ukazuje na osjetljivost mikrostrukture na toplinsku obradu. Sveukupno, rezultati jasno pokazuju da zaštitna atmosfera argona omogućuje gušće i homogenije legure, dok uravnotežen Li/Mg omjer osigurava optimalnu kombinaciju čvrstoće, krutosti i otpornosti na degradaciju. Dobiveni rezultati potvrđuju veliki potencijal Al-Mg-Li legura za primjenu u nosivim i sekundarnim konstrukcijama zrakoplova, satelita i automobila, uz mogućnost daljnje optimizacije termomehaničkom obradom i mikrolegiranjem.

Ključne riječi: Al-Mg-Li legure, procesni parametri, sinteza taline, Li/Mg omjer, mikrostruktura, tlačna čvrstoća, zaštitna atmosfera, degradacijska otpornost

SUMMARY

The development of aluminum alloys with the addition of lithium and magnesium (Al-Mg-Li) has attracted considerable attention due to their low density, increased stiffness, and specific strength, making them suitable for applications in the automotive and aerospace industries. The aim of this research was to examine the influence of melt synthesis conditions and the Li/Mg ratio on the evolution of microstructure, mechanical properties, and alloy behaviour in a degradation environment. Synthesis was performed under a different protective atmospheres (argon, argon with partial or full crucible cover, and vacuum), resulting in alloys with varying Li and Mg contents and with the addition of microalloying elements (e.g., Zr, AlTi5B1). The chemical composition, microstructure, compressive strength and degradation resistance were analysed. The degradation resistance was tested by electrochemical and immersion methods under conditions simulating the working environment of the transport industry. The results show that the highest density of

2.49 g/cm³ was achieved during melting in an argon protective atmosphere with a partial cover, while the lowest density (2.27 g/cm³) was recorded during vacuum melting. The lowest value can be attributed to the presence of vacuum porosity. Alloys with a Li/Mg ratio close to 1 exhibited the highest compressive strength values and good stability after heat treatment, while alloys with a high lithium content had lower density but reduced ductility. Electrochemical degradation in the as-cast condition amounted to 17.01 mm/year, whereas after solution heat treatment it significantly increased to 51.24 mm/year, indicating the sensitivity of the alloy to heat treatment. Overall, the results clearly demonstrate that an argon protective atmosphere produces denser and more homogeneous alloys, while a Li/Mg ratio close to 1 ensures an optimal combination of strength, stiffness, and degradation resistance. The findings confirm the great potential of Al-Mg-Li alloys for application in primary and secondary structures of aircraft, satellites, and automobiles, with the possibility of further optimization through thermomechanical processing and microalloying.

Keywords: Al-Mg-Li alloys, process parameters, alloy synthesis, Li/Mg ratio, microstructure, compressive strength, synthesis conditions, degradation resistance

1. INTRODUCTION

The demand for lightweight and efficient structural materials remains one of the key challenges in modern transport systems. In the automotive, aviation, and aerospace industries, reducing vehicle mass improves energy efficiency, lowers emissions, and enhances overall performance [1,2].

Aluminium (Al) alloys are widely used as structural materials due to their low density, good mechanical properties, and corrosion resistance. They are utilized in automotive, aerospace, and space structures where lightweight design is essential for achieving improved performance and reliability [3,4].

The development of aluminium–lithium (Al–Li) alloys was driven by the need for further reduction in density and improvement in specific properties. The addition of

lithium reduces density and increases stiffness and specific strength. However, early generations of Al–Li alloys showed sensitivity to processing conditions, resulting in anisotropy of microstructure and mechanical properties, reduced fracture toughness, and increased sensitivity to stress corrosion cracking [5,6]. To overcome these limitations, alloy systems were further modified by the addition of elements such as copper (Cu), magnesium (Mg), silver (Ag), and zirconium (Zr), along with the development of advanced thermo-mechanical processing [7,8]. These developments highlight the importance of chemical composition and processing conditions, which define microstructure and the resulting functional properties of the alloy.

In this context, Al–Mg–Li alloys represent a simplified and practical alloy system, where the combined addition of Li and Mg enables density reduction and the formation of a suitable microstructure. Lithium primarily reduces density and contributes to stiffness through the formation of strengthening phases, while magnesium provides solid solution strengthening and influences the formation and distribution of Li-based intermetallic phases. The resulting microstructure, formed during solidification and subsequent processing, directly determines the functional behaviour of the alloy [2,3].

This work presents a practical approach to the design and development of Al–Mg–Li alloys by linking chemical composition, processing, microstructure, and functional properties for lightweight engineering applications.

2. APPROACH TO Al–Mg–Li ALLOY DESIGN AND DEVELOPMENT

The primary objective of this work is to reduce alloy density while maintaining the functional properties required for structural applications. This aim is driven by the increasing demand for lightweight materials in the transportation industry.

The approach assumes that chemical composition and processing conditions determine microstructure, which in turn defines the functional properties of the alloy. Figure 1 illustrates this relationship and shows how changes in alloy design and processing are reflected in the resulting material behaviour.

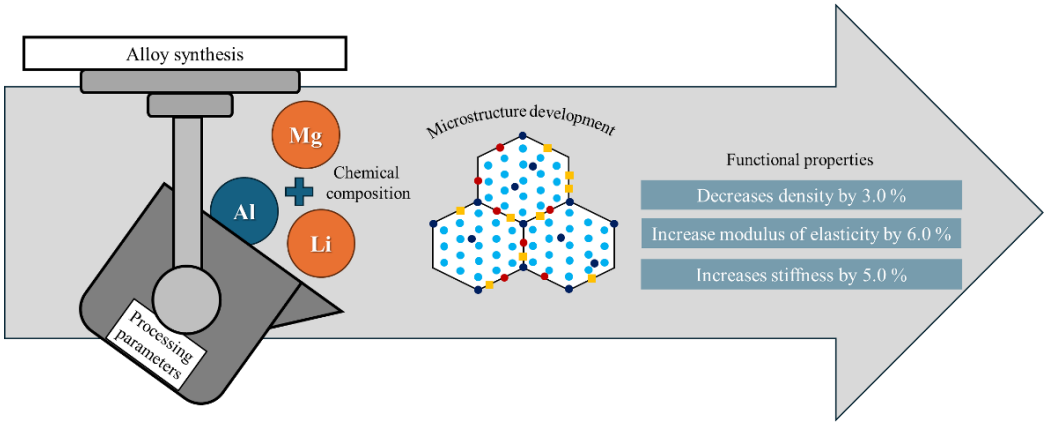


Figure 1. The alloy design approach

In this context, lithium primarily contributes to density reduction and increased stiffness through the formation of strengthening phases. Magnesium is added to provide solid solution strengthening and to influence the formation and distribution of Li-based intermetallic phases. The Li/Mg ratio plays a key role in defining the resulting microstructure [2,3]. The combined addition of Li and Mg enables the development of alloys with a suitable balance of density and functional properties. Figure 2 presents the development route from initial alloy design to final property evaluation and highlights the influence of processing conditions on solidification sequence and microstructure formation.

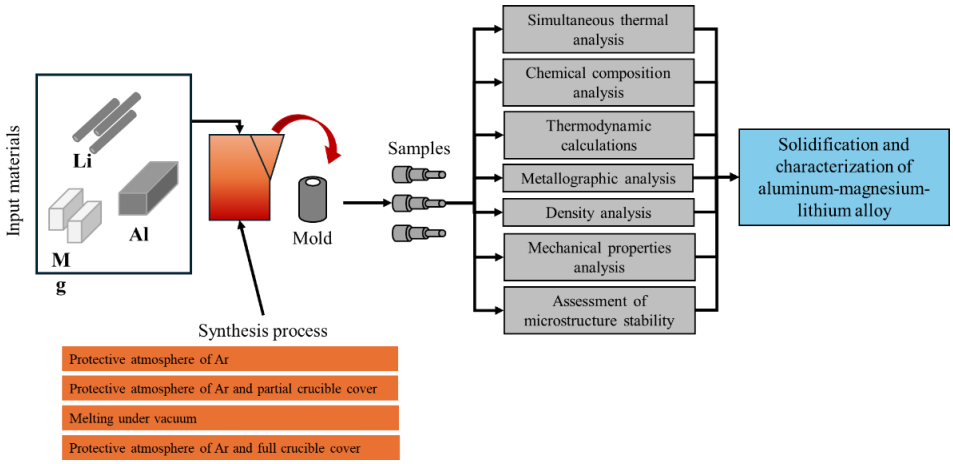


Figure 2. The alloy development

For traceability and reproducibility, the development of Al–Mg–Li alloys follow a clearly defined sequence of steps. The process includes:

- chemical composition redesign,
- alloy synthesis under controlled processing conditions,
- chemical composition analysis,
- microstructural characterisation,
- evaluation of functional properties.

The key advantage of this approach is its applicability, as it enables systematic alloy development through a clear and reproducible procedure.

3. CHEMICAL COMPOSITION REDESIGN

The redesign of the chemical composition is based on current trends in the development and use of aluminium alloys in the transportation industry, as well as advancements in aluminium–lithium (Al–Li) systems. Conventional aluminium alloys used in vehicle production include both cast and wrought systems (figure 3).

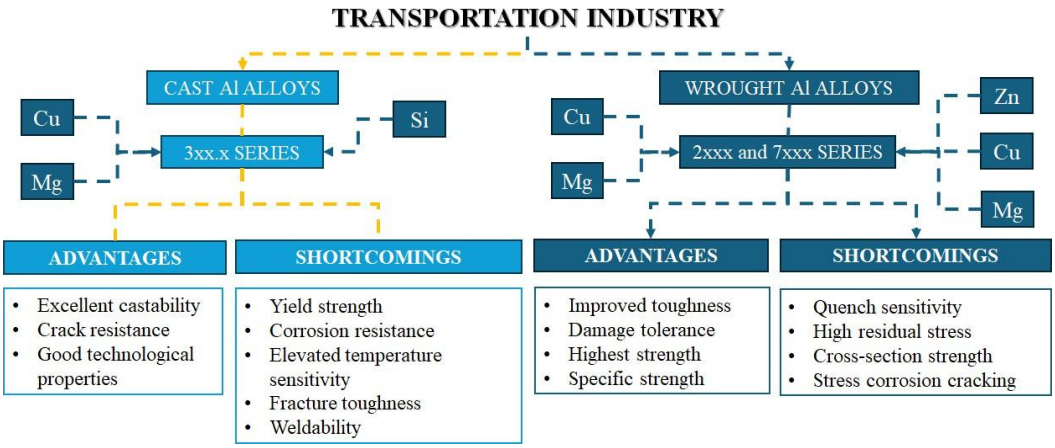


Figure 3. The cast and wrought aluminum alloys used in transportation industry

Cast Al–Si-based alloys (3xx.x series) are widely used for engine components, transmission housings, suspension parts, and wheels due to their excellent castability and resistance to hot cracking. However, their microstructure, formed during solidification, contains a combination of eutectic and intermetallic phases that can limit mechanical properties and stability at elevated temperatures. Wrought aluminium alloys, particularly Al–Cu (2xxx) and Al–Zn–Mg (7xxx) systems, are used for structural components in aerospace and transportation applications due to their high strength and good tensile properties. However, their microstructure development involves complex sequences of precipitation reactions with multiple stable and metastable phases, which can reduce fracture toughness, increase sensitivity to corrosion and heat treatment, and limit weldability and dimensional stability. Despite their widespread use in structural applications, the limitations of these alloys drive the development of new aluminium alloy systems with improved performance [9-11].

The introduction of lithium marks a significant advancement in aluminium alloy development, enabling further weight reduction and improvement in specific properties. The development of Al–Li alloys has progressed through several generations, with chemical composition and processing conditions as the key factors controlling their performance. Early alloy designs used higher lithium additions (typically 2.0–3.0 wt.% Li) to maximise density reduction and stiffness, but this resulted in increased anisotropy and reduced ductility. Subsequent development focused on lowering lithium content (generally below 2.0 wt.% Li and often close to 1.3 wt.% Li) and introducing additional alloying elements such as Cu, Mg, Ag, and Zr to improve mechanical properties, fracture toughness, and processing stability. Based on these developments, the effect of lithium content on density and mechanical properties can be quantitatively described [12]. Each addition of 1.0 wt.% Li reduces density by approximately 3.0%, increases the modulus of elasticity by about 6.0%, and improves stiffness for additions up to 4.2 wt.% Li. However, increasing the lithium content above about 1.3 wt.% results in a decrease in yield and tensile strength, indicating that lithium additions close to this value are more suitable for achieving a favourable combination of properties [13].

The Al–Mg–Li alloy system is recognised as a suitable basis for alloy redesign and development due to its potential to reduce density while maintaining favourable functional properties. Magnesium contributes to solid solution strengthening and further reduces alloy density, while also influencing the formation and distribution of lithium-based intermetallic phases. The combined addition of Li and Mg modifies the solidification sequence and resulting microstructure.

A key parameter in this system is the Li/Mg ratio, which determines the type and distribution of phases formed during solidification. The microstructure development based on Li/Mg ratio can be expressed by equations 1 and 2 [14]:

For high Li/Mg ratio $$\alpha_{Al} \rightarrow Al_3Li\ (\delta') \rightarrow AlLi\ (\delta) \quad (1)$$

For low Li/Mg ratio $$\alpha_{Al} \rightarrow Al_3Li\ (\delta') \rightarrow Al_2LiMg\ (T) \quad (2)$$

For Li/Mg > 1, the formation of Li-rich phases such as Al_3Li (δ') is promoted, while for Li/Mg < 1, the formation of mixed Li–Mg phases such as Al_2LiMg becomes more pronounced. These differences in phase formation influence microstructure morphology and the distribution of strengthening constituents. Li/Mg ratios close to 1, corresponding to similar additions of Li and Mg, are commonly associated with more uniform microstructure development and a more stable material response [2,4,14].

The present alloy design focuses on the Al-rich corner of the Al–Mg–Li ternary system. This approach limits the total addition of alloying elements and allows better control of solidification behaviour and the resulting microstructure. Lithium and magnesium are highly reactive elements, making alloy preparation sensitive to melt processing conditions. High reactivity can cause element loss, compositional deviations, and microstructure variations if process parameters are not properly controlled.

The redesign of chemical composition is therefore a compromise between the desired microstructure, targeted functional properties, and melt synthesis conditions. By combining controlled Li and Mg additions with an appropriate Li/Mg ratio, the alloy

design remains suitable for practical implementation while enabling reproducible microstructure development.

This approach provides a basis for further evaluation of microstructure and functional properties presented in the following sections.

4. ALLOY SYNTHESIS

The Al–Mg–Li alloys were prepared using various melt synthesis methods to minimise the loss of alloying elements, prevent melt contamination, and produce a chemically homogeneous melt. Due to the high reactivity of Li and Mg, particular attention was paid to the protective atmosphere, alloying temperature, and the type of refractory materials and coatings used [15].

The alloys were synthesised under various conditions, including melting in an argon protective atmosphere, an argon atmosphere with a partial or full crucible cover, and under vacuum. These conditions were chosen to limit oxidation due to the high reactivity of the alloying elements and to compare the effectiveness of different levels of melt protection. Melt contamination was further minimised by applying a protective coating to the crucible and tools used during alloy preparation. Lithium and magnesium were added simultaneously, wrapped in aluminium foil, and introduced into the melt using a steel bell to improve dissolution and reduce oxidation losses. Grain refinement was applied in selected cases using an AlTi5B1 master alloy to improve microstructure uniformity and reduce grain size [15]. Different approaches to alloy synthesis are shown in Figure 4.

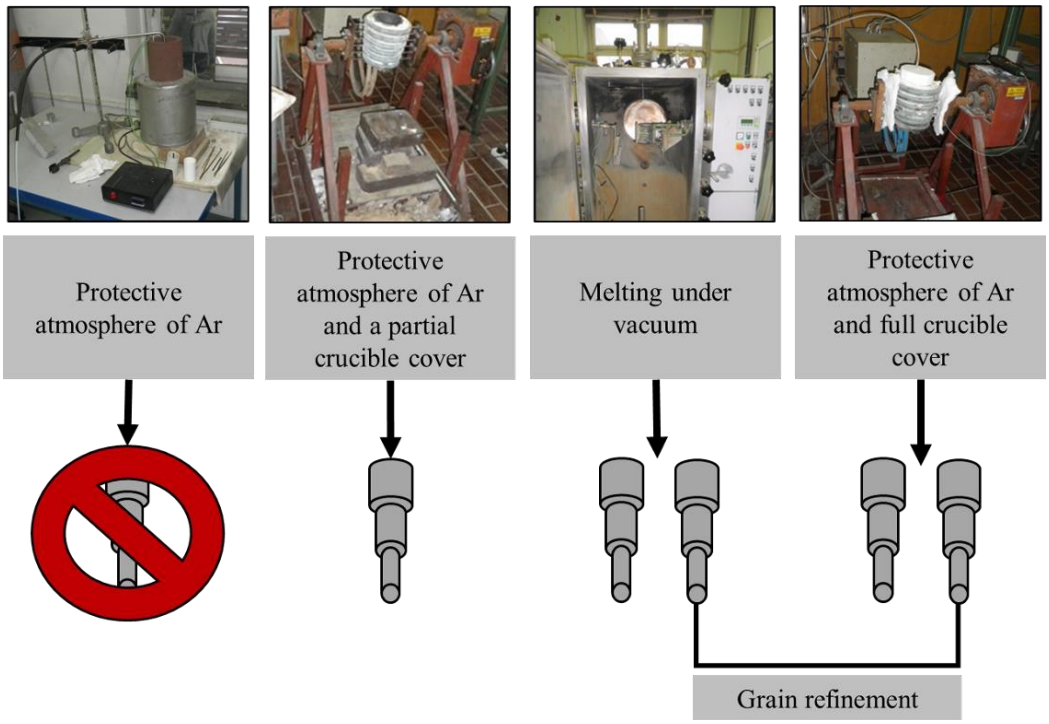


Figure 4. Different approaches to alloy synthesis with indicated samples [15]

In total, five alloys were synthesised: one sample prepared under argon atmosphere with partial crucible cover, two samples under vacuum, and two samples under argon atmosphere with full crucible cover. The attempt to synthesise the alloy under an argon atmosphere without a crucible cover was unsuccessful, and no sample was obtained (figure 4).

The obtained alloys showed a clear dependence of element loss on processing conditions. Average losses of lithium and magnesium were of similar magnitude (approximately 18% for Li and approximately 13% for Mg), indicating comparable sensitivity of both elements to melt processing conditions. The highest losses were observed under vacuum conditions, while improved melt protection in an argon atmosphere reduced element loss and enabled better compositional control. These trends confirm that melt protection is essential for maintaining the target composition [15].

5. CHARACTERIZATION OF SYNTHESIZED ALLOYS

The characterization of synthesized Al–Mg–Li alloys was performed to estimate the effects of chemical composition and melt processing conditions on the produced alloy. Attention was given to the achieved composition, microstructure development, and the corresponding functional properties. In addition, the aim of the characterisation was to assess the suitability of the developed alloys for use in the transportation industry.

5.1. Chemical composition

The chemical composition of the synthesised alloys was designed within the Al-rich corner of the Al–Mg–Li ternary system. The target compositions were generally achieved, although deviations in lithium and magnesium content were observed. A broad range of Li/Mg ratios was obtained, from approximately 0.88 in alloys synthesised under argon atmosphere with a fully covered crucible to 5.68 in the sample prepared under argon atmosphere with a partially covered crucible. These differences in chemical composition and Li/Mg ratio are a direct consequence of the melt synthesis method. Based on the achieved Li/Mg ratios, differences in phase formation during solidification are expected. For high Li/Mg ratios, the solidification sequence will involve the formation of Li-containing phases (equation 1), while for low Li/Mg ratios, the sequence shifts towards the formation of Li–Mg phases (equation 2) [15].

5.2. Density measurements

The measured density of the synthesised alloys ranged from approximately 2.37 g/cm³ to 2.84 g/cm³, depending on the achieved chemical composition. The lowest density was observed in alloys with higher Li/Mg ratios, while higher densities corresponded to lower Li/Mg ratios, reflecting the opposing contributions of lithium and magnesium to the overall density [15].

Figure 5 compares the average density of the synthesised alloys with that of commercially used alloys.

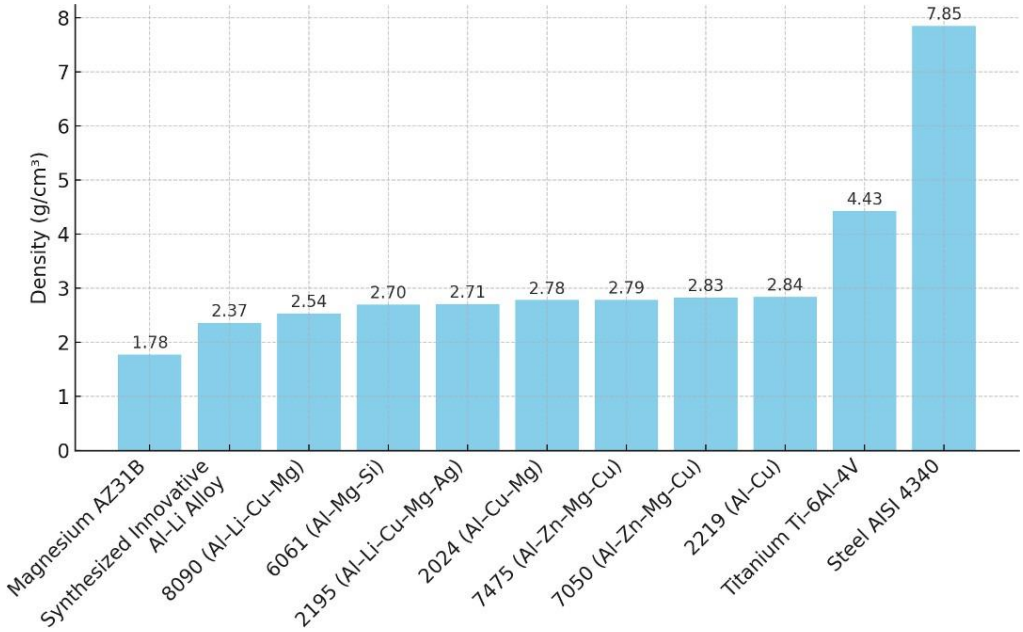


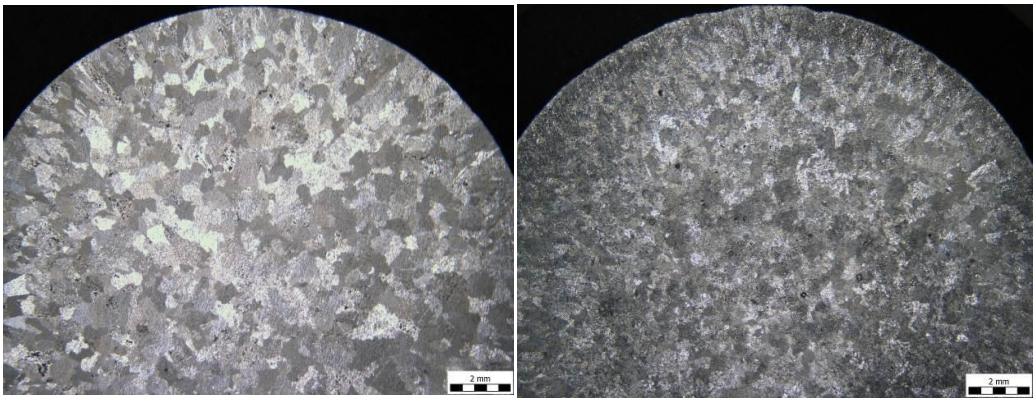
Figure 5. Comparison of the average density of the synthesised alloys with commercially used alloys

The average density of the synthesised alloys was approximately 2.37 g/cm³, which is lower than that of conventional wrought aluminium alloys such as the 2xxx and 7xxx series (≈2.7–2.8 g/cm³). The average density also remains well below that of other materials used in the transportation industry, such as titanium alloys (≈4.43 g/cm³) and steels (≈7.85 g/cm³).

5.3. Microstructure characterization

The microstructure of the synthesised alloys was characterised using various methods to enable qualitative and quantitative analysis of macrostructural and microstructural constituents.

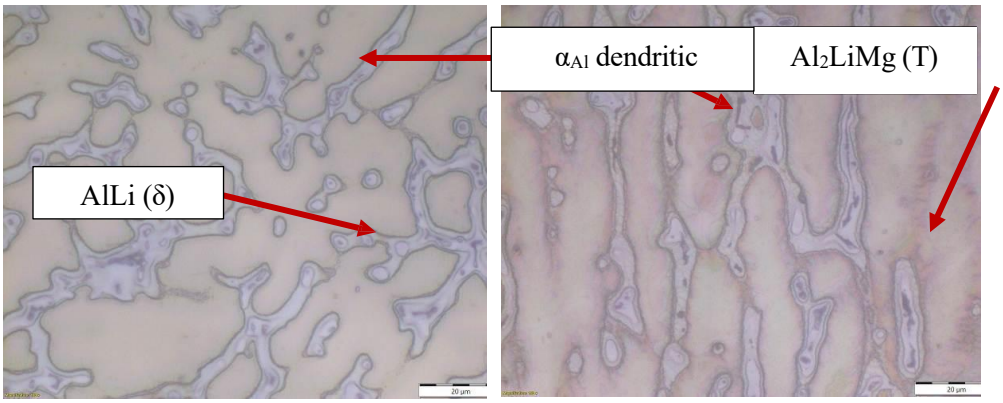
The samples display a macrostructure typical of alloy solidification in a permanent mould, with visible chill, columnar, and equiaxed crystal zones (figure 6 a). Grain refinement resulted in a uniform grain size and morphology across the cross-section (figure 6 b).



a) *b)*

Figure 6. Macrostructure of the alloy with Li/Mg = 0.9: (a) without grain refinement; (b) with grain refinement using AlTi5B1 [15]

The microstructure of the synthesised alloys consists of an α_{Al} matrix with intermetallic phases distributed in the interdendritic regions. The type and distribution of these phases are strongly influenced by the Li/Mg ratio. Alloys with higher Li/Mg ratios are characterised by the presence of Li-rich phases, primarily Al_3Li (δ′) and AlLi (δ) (figure 7 a), while lower ratios promote the formation of Li–Mg phases such as Al_2LiMg (T), along with Mg-rich phases such as Al_8Mg_5 (β) (figure 7 b).



a) *b)*

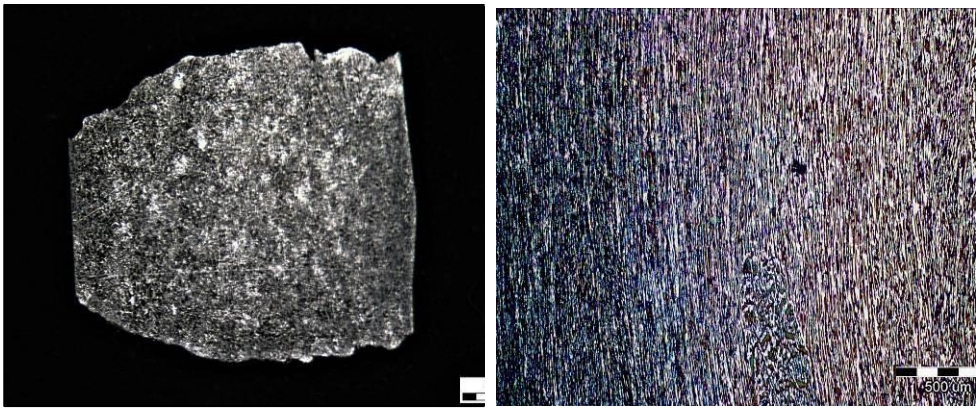
Figure 7. Microstructure of the synthesized alloys with: a) Li/Mg = 5.6, b) Li/Mg=0.9

From the standpoint of mechanical performance, a finer and more uniformly distributed δ′ phase is considered favourable, while the presence of coarse and continuous Li–Mg and Mg-rich phases may lead to reduced ductility and lower fracture toughness. Accordingly, variations in the Li/Mg ratio result in different microstructures and expected mechanical behaviour of the synthesised alloys [15].

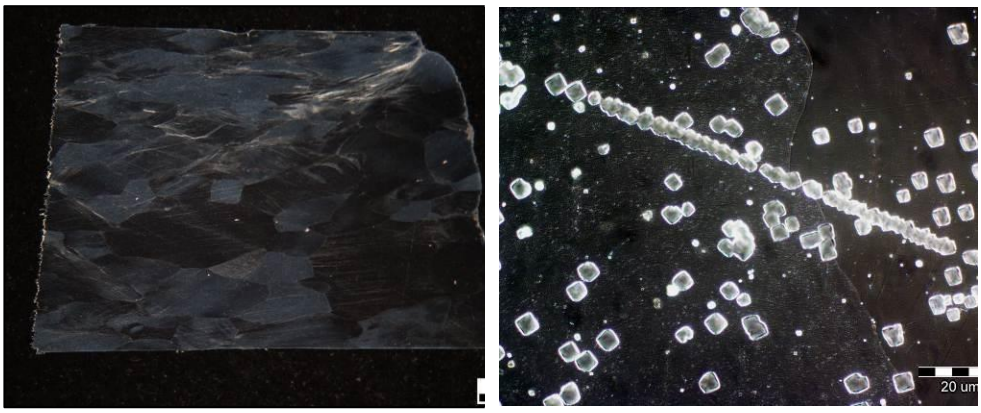
5.4. Mechanical properties

The mechanical properties of the synthesised alloys were evaluated using compression testing, hardness and microhardness measurements, and determination of the elastic modulus. These methods were used to assess the influence of chemical composition and microstructure on the strength, local mechanical properties, and elastic behaviour of the alloys.

The compression results show that the deformation behaviour of the alloys is closely linked to the observed microstructure. Metallographic analysis after compression revealed that alloys with a more uniform phase distribution exhibit more homogeneous deformation, while alloys with pronounced phase heterogeneity display localised deformation and strain concentration in interdendritic regions. In alloys with Li/Mg ratios close to 1, deformation is more evenly distributed across the α_{Al} matrix, whereas the presence of coarse and continuous Li–Mg and Mg-rich phases promote crack initiation and propagation during compression (figure 8). These findings confirm that microstructure morphology and phase distribution are key factors in determining the compressive behaviour of the synthesised alloys [15,16].



a)



b)

Figure 8. The cross-sectional microstructure of typical deformation behaviours: a) unequal deformation and barrelling effect (sample 21 as-cast condition), b) materials' flow line formation and free movement of dislocations (sample 1 solutionized condition)

Hardness and microhardness measurements reflect the influence of phase composition and distribution on the mechanical response of the synthesised alloys. The highest hardness and microhardness values were recorded in alloys with Li/Mg ratios close to 1, where a more uniform distribution of strengthening phases is expected. In these alloys, the presence of finely dispersed δ′ (Al_3Li) phase contributes to increased resistance to plastic deformation.

In contrast, alloys with higher or lower Li/Mg ratios exhibit lower hardness values, which can be attributed to a more heterogeneous phase distribution and the presence of coarser Li–Mg and Mg-rich phases. Microhardness measurements also reveal local variations in phase distribution, particularly in interdendritic regions, confirming the influence of microstructural heterogeneity on the local mechanical response [15].

The elastic modulus exhibits relatively little variation compared to strength-related properties. The highest values were observed in alloys with higher Li/Mg ratios, reflecting the contribution of lithium to increased stiffness. In alloys with lower Li/Mg ratios, slightly lower values were recorded due to the reduced influence of lithium.

Overall, the results indicate that the elastic modulus is primarily determined by lithium content, with microstructure having a less pronounced influence.

5.5. Degradation resistance

The degradation behaviour was evaluated on a selected alloy using immersion testing in EXCO solution (pH ≈ 0.4) for exposure times of 5, 24, 48, and 72 hours. This environment represents aggressive service conditions relevant to transportation applications and enables assessment of material stability under acidic chloride conditions [15,17,18].

The results show that mass loss increases with exposure time, while the degradation rate decreases, indicating that the process is most pronounced at the initial stage. The highest degradation rate was observed after 5 hours of exposure, followed by a gradual decrease over time. This behaviour is consistent with the observed increase in solution pH, which remains acidic but rises significantly during exposure, leading to reduced degradation intensity.

Metallographic analysis revealed that degradation initiates along grain boundaries and propagates through interdendritic regions. In the as-cast condition, preferential dissolution of Al_8Mg_5 (β) and Al_2LiMg (T) phases was observed, resulting in cavity formation and localised degradation. With increasing exposure time, degradation extends to surrounding intermetallic regions [17,18].

These observations indicate that degradation is strongly influenced by microstructure, with Li–Mg and Mg-rich phases exhibiting higher susceptibility.

6. CONCLUSIONS

This study confirms that the design and development of Al–Mg–Li alloys can be effectively guided by the relationship between chemical composition, processing conditions, microstructure, and functional properties.

- Melt synthesis conditions significantly affect the chemical composition of Al–Mg–Li alloys. Improved melt protection in an argon atmosphere reduces element loss and allows better control of the Li/Mg ratio.
- The Li/Mg ratio governs phase formation during solidification and determines the resulting microstructure. Higher ratios promote Li-rich phases, while lower ratios favour the formation of Li–Mg and Mg-rich phases.
- Microstructure directly influences mechanical behaviour. Alloys with Li/Mg ratios close to 1 show the most favourable combination of compressive strength and hardness, while heterogeneous phase distribution leads to localised deformation and reduced performance.
- The synthesised alloys have lower density than conventional aluminium alloys, confirming their suitability for lightweight applications.
- Degradation behaviour is controlled by microstructure, with preferential dissolution of Li–Mg and Mg-rich phases and a decrease in degradation rate over time.
- The results indicate that controlled melt synthesis and an appropriate Li/Mg ratio enable the development of Al–Mg–Li alloys with a balanced combination of properties, making them suitable for lightweight structural applications in the automotive and aerospace industries.

7. REFERENCE

[1] Miller, W.S.; Zhuang, L.; Bottema, J.; Wittebrood, A.J.; Smet, P.; Haszler, A.; Vieregge, A.: Recent development in aluminium alloys for the automotive industry, Materials Science and Engineering A, 2000, Vol. 280, No. 1, pp. 37–49

[2] El -Aty, A.A.; Xu, Y.; Guo, X.; Zhang, S.H.; Ma, Y.; Chen, D.: Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al–Li alloys: A review, Journal of Advanced Research, 2018, Vol. 10, pp. 49–67

[3] Elagin, V.I.; Zakharov, V.V.: Modern Al–Li alloys and prospects of their development, Metal Science and Heat Treatment, 2013, Vol. 55, No. 3–4, pp. 184–190

[4] Starke, E.A.: Historical Development and Present Status of Aluminum–Lithium Alloys, in: Prasad, N.E.; Gokhale, A.A.; Wanhill, R.J.H. (Eds.), Aluminum–Lithium Alloys: Processing, Properties, and Applications, Elsevier, 2013, pp. 3–26

[5] Lavernia, E.J.; Srivatsan, T.S.; Mohamed, F.A.: Strength, deformation, fracture behaviour and ductility of aluminium–lithium alloys, Journal of Materials Science, 1990, Vol. 25, No. 2, pp. 1137–1158

[6] Starke, E.A.; Lin, F.S.: Influence of grain structure on the ductility of Al–Cu–Li alloys, Metallurgical and Materials Transactions A, 1982, Vol. 13A, No. 12, pp. 2259–2269

[7] Gilmore, D.L.; Starke, E.A.: Trace element effects on precipitation processes and mechanical properties in an Al–Cu–Li alloy, Metallurgical and Materials Transactions A, 1997, Vol. 28, No. 7, pp. 1399–1415

[8] Heard, D.W.; Boselli, J.; Rioja, R.; Marquis, E.A.; Gauvin, R.; Brochu, M.: Interfacial morphology development and solute trapping behavior during rapid solidification of an Al–Li–Cu alloy, Acta Materialia, 2013, Vol. 61, No. 5, pp. 1571–1580

[9] Zhang, B.; Zhang, L.; Wang, Z.; Gao, A.: Achievement of High Strength and Ductility in Al-Si-Cu-Mg Alloys by Intermediate Phase Optimization in As-Cast and Heat Treatment Conditions, Materials, 2020, Vol. 13, No. 3, p. 647

[10] Hughes, A.E.; Parvizi, R.; Forsyth, M.: Microstructure and corrosion of AA2024, Corrosion Reviews, 2015, Vol. 33, No. 1–2, pp. 1–30

[11] Shu, W.X.; Hou, L.G.; Liu, J.C.; Zhang, C.; Zhang, F.; Liu, J.T.; Zhuang, L.Z.; Zhang, J.S.: Solidification Paths and Phase Components at High Temperatures of High-Zn Al-Zn-Mg-Cu Alloys with Different Mg and Cu Contents, Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, Vol. 46, No. 11, pp. 5375–5392

[12] Polmear, I.J.: Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals, 4th ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2006, pp. 255–260

[13] Augustyn-Pieniążek, J.; Adrian, H.; Rzadkosz, S.; Choroszyński, M.: Structure and Mechanical Properties of Al-Li Alloys as Cast, Archives of Foundry Engineering, 2013, Vol. 13, No. 2, pp. 5–10

[14] Goel, N.C.; Cahoon, J.R.: The Al-Li-Mg system (Aluminum-Lithium-Magnesium), Bulletin of Alloy Phase Diagrams, 1990, Vol. 11, No. 6, pp. 528–546

[15] Kozina, F.: Solidification and characterization of aluminum–magnesium–lithium alloys, PhD Thesis, University of Zagreb, Faculty of Metallurgy, Sisak, 2024

[16] Kozina, F.; Zovko Brodarac, Z.; Petrič, M.; Penko, A.: Influence of iron impurities on the compression behaviour of Al-2.24Mg-2.09Li alloy, Journal of Mining and Metallurgy Section B: Metallurgy, 2020, Vol. 56, No. 3, 425-433

[17] Kozina, F.; Zovko Brodarac, Z.; Petrič, M.; Šetina Batič, B.: Degradation susceptibility of Al-2.18Mg-1.92Li alloy in severe environmental conditions, Materials, 2025, Vol. 18, No. 9, 1938

[18] Kozina, F.; Zovko Brodarac, Z.; Brajčinović, S.; Petrič, M.: Determination of Al-2.18Mg-1.92Li alloy microstructure degradation in corrosive environment, Crystals, 2021, Vol. 11, No. 4, 338

8. ACKNOWLEDGMENT

The investigation was carried out as part of the Institutional Research Project the "Design and characterisation of innovative engineering alloys/products (KIIL)" financed by the EU – Next Generation EU. The views and opinions expressed are those of the author and do not necessarily reflect the official positions of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them. The investigation was performed on equipment within the infrastructural scientific projects: Center for Founding - SIMET (Code: KK.01.1.1.02.0020); and the VIRTULAB - Integrated Laboratory for Primary and Secondary Raw Materials (Code: KK.01.1.1.02.0022).

TERMOMEHANIČKA OBRADA ČELIKA

THERMOMECHANICAL TREATMENT OF STEEL

V. prof. dr. sc. Omer Beganović, viši naučni saradnik
Univerzitet u Zenici, Institut "Kemal Kapetanović" Zenica
Travniča cesta br. 7, Zenica

REZIME

Termomehanička obrada čelika u širem smislu predstavlja bilo kakav kombinovani mehanički (plastična deformacija) i termički uticaj na radni komad. Provođenje bilo kojeg postupka vruće prerade (valjanje, kovanje, istiskivanje) predstavlja primjere takvog tipa termomehaničke obrade. Tokom vruće prerade, odnosno deformisanja čelika na dovoljno visokim temperaturama radni komad se bez većih poteškoća preoblikuje iz polaznog u finalni (zahtijevani) oblik, uz poboljšanje njegovih svojstava, posebno otpornosti na udar i dinamička opterećenja. Dodatno unapređenje ovih svojstava moguće je postići sniženjem temperature na kojoj se izvodi završna deformacija, kontrolom iznosa deformacije i ubrzanim hlađenjem. Postupci koji uključuju kontrolu nekih od navedenih procesa spadaju u grupu termomehanički kontrolisanih postupaka prerade. Termomehanički kontrolisanim postupcima prerade, osim postizanja optimalnog odnosa između strukture i svojstava čelika, odnosno poboljšanja kvaliteta proizvoda, moguće je značajno skratiti proizvodne linija, smanjiti troškove proizvodnje, te povećati produktivnosti. U ovom radu izvršena je podjela termomehanički kontrolisanih postupaka prerade prema efektima koje se njome žele postići, te su opisani neki od tih postupaka.

.

Ključne riječi: Ubrzano hlađenje, direktno kaljenje, usitnjenje zrna

SUMMARY

Thermomechanical processing of steel in a broader sense represents any combined mechanical (plastic deformation) and thermal impact on a workpiece. Carrying out any hot working process (rolling, forging, extrusion) is an example of this type of thermomechanical processing. During hot processing, i.e. deformation of steel at sufficiently high temperatures, the workpiece is transformed from the initial to the final (required) shape without significant difficulties, while improving its properties, especially resistance to impact and dynamic loads. Additional improvement of these properties can be achieved by lowering the temperature at which the final deformations are performed, controlling the amount of deformation and accelerated cooling. Processes that include the control of some of the mentioned processes belong to the group of thermo-mechanical controlled processes. Thermo-mechanical controlled processes, in addition to achieving the optimal relationship between the structure and properties of steel and improving product quality, can significantly shorten production lines, reduce production costs, and increase productivity. This paper divides thermo-mechanical controlled processes according to the effects they aim to achieve, and describes some of these processes.

.

Keywords: Accelerated cooling, direct quenching, grain refinement

1. UVOD

Termomehanička obrada čelika u širem smislu predstavlja bilo kakav kombinovani mehanički (plastična deformacija) i termički uticaj na radni komad. Provođenje bilo kojeg postupka vruće prerade (valjanje, kovanje, istiskivanje) predstavlja primjere takvog tipa termomehaničke obrade. Tokom vruće prerade, odnosno deformisanja čelika na dovoljno visokim temperaturama radni komad se bez većih poteškoća preoblikuje iz polaznog u finalni (zahtijevani) oblik, uz poboljšanje njegovih mehaničkih svojstava, posebno otpornosti na udar i dinamička opterećenja.

Poboljšanje vrijednosti navedenih mehaničkih svojstava rezultat je smanjenja ili potpune eliminacije negativnog uticaja određenih nesavršenosti ili grešaka koje karakterišu lijevanu strukturu polufabrikata, odnosno ingota ili kontinuirano lijevani polufabrikata. Lijevani polufabrikati karakterišu se hemijskom i strukturnom nehomogenošću, te prisustvom drugih grešaka, kao što su nemetalni uključci, plinski mjehurovi i različiti drugi tipovi poroznosti (mikropukotine i eventualno lunkeri). Hemijska nehomogenost je posljedica neujednačene raspodjele pojedinih primjesnih i legirajućih elemenata u različitim dijelovima polufabrikata, dok se strukturna nehomogenost ogleda kroz neujednačenost oblika i veličine pojedinih kristalita (zrna) u očvrslom polufabrikatu. Poroznosti nastaju na mjestima gdje usljed nemogućnosti dotoka tečnog metala ne dolazi do popunjavanja praznina nastalih kao posljedica skupljanja metala tokom prelaska iz tečnog u čvrsto stanje i njegovog kasnijeg hlađenja. Plinski mjehurovi nastaju kao posljedica nemogućnosti isplivavanja plinskih produkata koji nastaju pri hemijskim reakcijama u tečnom, neočvrslom dijelu polufabrikata.

Tokom vruće plastične prerade, u fazi zagrijavanja pred deformaciju, fazi dogrijavanja između dvije sekvence procesa deformisanja i tokom samog procesa defirmisanja, odnosno sve vrijeme dok je radni komad zagrijan na dovoljno visoke temerature, dolazi do difuzije atoma pojedinih elemenata iz zona povišene koncentracije u zone snižene koncentracije čime se sadržaj pojedinih elemenata postupno ujednačava po presjeku radnog komada. Također, tokom plastične deformacije kristali se postupno plastično deformišu, lome i usmjeravaju u pravcu najveće deformacije. Tokom same plastične deformacije i/ili prilikom dogrijavanja komada u pećima dolazi do rekristalizacije i postupne zamjene heterogene strukture (zrna različite veličine od kojih su neka izuzetno krupna - nekoliko milimetra ili desetina milimetara, u zavisnosti od dimenzija polufabrikata) finom strukturom sa zrnima ujednačene veličine s promjerima od nekoliko desetina do nekoliko stotina mikrona. Isto tako, tokom vruće plastične prerade lijevanih polufabrikata dolazi do postupne eliminacije plinskih mjehurova i poroznih mjesta usljed zavarivanja njihovih unutrašnjih, međusobno suprotnih, površina koje se pri smanjenju presjeka

radnog komada dovode u direktni kontakt. Nemetalni uključci prisutni u lijevanim polufabrikatima se tokom vruće plastične prerade lome, usitnjavaju i usmjeravaju u pravcu najveće deformacije. Na ovaj način se smanjuje njihov negativan uticaj na vrijednosti mehaničkih svojstava iako, u većoj ili manjoj mjeri, dovode do anizotropije svojstava deformisanog komada u uzdužnom i poprečnom pravcu.

Osnovni cilj vruće plastične prerade je preoblikovanje polaznog komada u odgovarajući proizvod traženog oblika i dimenzija, te postizanje odgovarajućih mehaničkih svojstava, sa ili bez primjene naknadne termičke obrade. Ovaj koncept prerade metalnih materijala na povišenim temperaturama primjenjivan je stotinama, pa i hiljadama godina. Uvođenje zavarivačkih procesa i produbljivanjem znanja o različitom ponašanju istog čelika na različitim temperaturama u pogledu otpornosti na udar, odnosno postojanju temperaturnog intervala u kojem žilavi materijal može da pređe u krto stanje, doveo je razvoja koncepta ojačavanja čelika usitnjenjem zrna prema jednačini Hall-Petcha:

$$\sigma_y = \sigma_o + \frac{k_y}{\sqrt{d^2}} \qquad (1)$$

gdje je σ_y napon tečenja, σ_o otpor rešetke prema pomjeranju (klizanju) dislokacija, a k_y je konstanta.

Zbog potrebe ostvarivanja potpune rekristalizacije, odnosno izbjegavanja pojave deformacionog ojačavanja tokom provođenja nekih od postupaka vruće plastične prerade ti postupci se, u slučaju prerade čelika, završavani na temperaturama iznad 900 ^{o}C do 950 ^{o}C, pa i višim. Ovako visoke temperature završetka vruće prerade nisu omogućavale značajnije usitnjenje zrna. Značajnije usitnjenje moguće je ostvariti samo provođenjm plastične deformacije radnog komada na nižim temperaturama, odnosno kontrolom odvijanja rekristalizacionih procesa. Navedeno uz kontrolu hlađenja, a time i faznih transformacija, dovelo je do razvoja različitih termomehanički kontrolisanih postipaka prerade (TMCP - thermomechanical controlled processes). Vremenom ovi postupci su postali optimizirani postupci plastične prerade, jer su osigurali dostizanje poboljšanih svojstava čelika uz

minimiziranje troškove proizvodnje. Razvoj i unapređenje TMPC postupaka, osim iskoraka postignutih u oblasti mehaničke metalurgije (plastične prerade), posljedica je produbljivanja saznanja do kojih je doprla Nauka o materijalima (Fizika metala), u pogledu utvrđivanja međuzavisnosti između mikroskopske građe (mikrostrukture) i makroskopskih svojstava. U tom pogledu cilj savremenih istraživanja u području metalnih materijala bazirao se iznalaženje mogućnosti dobivanja materijala povišenih čvrstoćnih osobina, bez dodavanja skupih legirajućih elemenata, ili svođenjem njihovog sadržaja na najmanju moguću mjeru, postizanjem optimalne mikrostrukture i svojstava uz minimalne troškove u svim etapama proizvodnje [1].

Prije 1960 godine finozrnati visokočvrsti čelici su dobiveni legiranjem i termičkom obradom. Šezdesetih godina prošlog vijeka razvijeni su HSLA (High Strenght Low Alloy) niskolegirani čelici visoke čvrstoće. Visoka čvrstoća ovih čelika rezultat je primjene mikreolegiranja (V, Nb, Ti) i postupaka termomehaničkog valjanja. Energetska kriza sedemdesetih godina prošlog vijeka uslovila je razvoj čelika sa povišenom granicom tečenja, poboljšanom žilavošću na sniženim temperaturama, te dobrom zavarivošću kako bi mogli biti upotrijebljeni za gradnju gasovoda na Aljasci i u Sibiru [2, 3]. Razvoj ovakvih čelika uslovio je dalji razvoj i unapređenje temperaturno kontrolisanih postupaka valjanja. Ovakvi postupci, ne samo što osiguravaju postizanje mehaničkih svojstava koja su bolja, ili u najmanju ruku jednako vrijedne onima koje se mogu postići klasičnim postupcima vruće plastične prerade, uz naknadnu termičku obradu, doprinose značajnom skraćenju proizvodne linije, te smanjenju troškova proizvodnje budući da se za njihovo odvijanje uglavnom koristi toplota koju vruće deformisani komad već posjeduje. Međutim, da bi se mogao primjeniti neki od postupaka temperaturno kontrolisanog valjanja, osim što je neophodno proizvesti čelik potrebne čistoće i željenog hemijskog sastava potrebno je raspolagati sa odgovarajućom opremom koja će omogućiti kontrolu temperature, odnosno stepena deformacije na različitim temperaturama.

2. OPTIMIZACIJA SVOJSTAVA ČELIKA

Kao rezultat dugogodišnjeg sistematskog izučavanja svojstava različitih vrsta čelika došlo se do saznanja koja omogućavaju da se sa zadovoljavajućom tačnošću predvide mehanička svojstva određenog čelika na osnovu poznavanja njegove mikrostrukture. Također, utvrđeno je da mikrostrukturu nekog čelika određuje veći broj faktora kojima se može upravljati tokom proizvodnje, prerade i eventualne završne termičke obrade određenog čelika. Najvažniji od tih faktora su:

a) hemijski sastav od kojeg zavisi mogućnost formiranja neke faze,

b) stepen i brzina plastične deformacije, te temperatura na kojoj se odvija plastična deformacija,

c) način hlađenja tokom odvijanja nekog od temperaturno kontrolisanih postupaka valjanja ili termičke obrade čelika.

Pri razvoju novog čelika ili optimiranju svojstava i postupaka proizvodnje poznatih čelika potrebno je uzeti u obzir sve navedene faktore, odnosno parametre kojima se osigurava njihova efikasna kontrola kako bi se dostigle optimalna svojstva čelika, sa stanovišta njegove namjene, uz minimalne troškove u svim etapama proizvodnje i prerade. Pod optimalnim svojstvima čelika, iz kojeg se izrađuje neki konstruktivni element, podrazumjeva se optimalni odnos čvrstoćnih i duktilnih svojstava pri zadovoljavajućem nivou udarne žilavosti. Naravno, teži se da čvrstoćne osobine budu što više kako bi se smanjila težina čelične konstrukcije, što je opet povezano sa manjim utroškom materijala, a time i manjim troškovima energije za njegovu proizvodnju. Dodatne uštede se mogu ostvariti primjenom jeftinijih čelika, sa manjim sadržajem skupih legirajućih elemenata povišenog nivoa čvrstoćnih svojstava, ili istih čelika kod kojih se traženi nivo optimalnih svojstava postiže primjenom unapređenih (optimalnih) postupaka plastične prerade, odnosno postupaka koji karakterišu niži troškovi. To su postupci koji koriste toplotu koju polufabrikat sadrži nakon završene prethodne faze prerade, a što je najčešće povezano i sa skraćivanjem proizvodnih linija. Iz svega navedenog jasno je da se optimiranje svojstava nekog čelika ne može

ostvariti bez istovremenog optimiranja postupaka njegove prerade, odnosno jedna optimizacija je uslovljena drugom.

2.1 Mehanizmi ojačavanja čelika

Čvrstoćna svojstva čelika određena su pokretljivošću dislokacija, stoga svi mehanizmi koji obezbjeđuju povećan otpor kretanju dislokacija u osnovnoj matrici čelika vode ka povećanju čvrstoće. Ojačavanje čelika se može postići na slijedeće načine:

1. Formiranjem supstitucijskog, a posebno intersticijskog čvrstog rastvora sa C ili N (tačkasti defekti kristalne rešetke) u kojem rastvoreni elementi izazivaju elastičnu deformaciju rešetke željeza, što predstavlja prepreku za kretanje dislokacija,

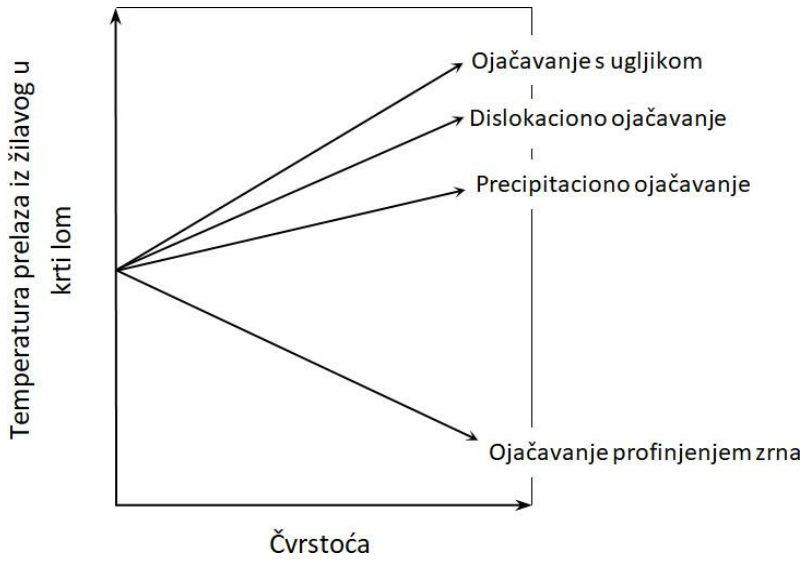
2. Povećanjem gustine dislokacija (linijski defekt kristalne rešetke). Budući da dislokacije međusobno reaguju povećanje gustine dislokacija ima za posljedicu smanjenje njihove pokretljivosti,

3. Smanjenjem veličine zrna, odnosno povećanjem gustine granica zrna (površinski defekt kristalne rešetke). Smanjenjem veličine zrna povećava se gustina granica zrna. Budući da granice zrna predstavljaju značajnu zapreku kretanju dislokacija profinjenje zrna predstavlja efikasan način blokiranja dislokacija.

4. Izdvajanjem (precipitacijom) čestica sekundarne faze (volumenski defekt kristalne rešetke) koje takođe predstavlja prepreku kretanju dislokacija. Efekat ojačanja ovim mehanizmom zavisi od veličine čestica, njihovog međusobnog rastojanja i volumnog učešća.

U određenom čeliku dostignuti nivo čvrstoće najčešće je rezultat djelovanja više navedenih mehanizama, odnosno ugrađenih grešaka kristalne rešetke, međutim sa stanovišta upotrebe veoma je značajno koji je od mehanizama opredjeljujući. Budući da jedino mehanizam ojačavanja profinjenjem zrna rezultira sniženjem prelazne temperature krtosti (slika 1.), dok drugi mehanizmi, uz određene izuzetke (npr. nikl

u supstitucijskom čvrstom rastvoru) izazivaju njeno povišenje, preferira se ojačavanje profinjenjem zrna. Ovaj mehanizam se u manjoj ili većoj mjeri kombinira sa drugim mehanizmima ojačavanja (precipitacija i dislokaciono/deformaciono ojačavanje).



Slika 1. Uticaj različitih mehanizama ojačavanja na prelaznu temperaturu krtosti

Ojačavanje sa C i nekim drugim legirajućim elementima se izbjegava, ne samo zbog izrazito negativnog uticaja na energiju udara, nego i zbog zahtjeva za dobrom zavarivošću savremenih tehničkih materijala. Negativni uticaj N u čeliku, koji se odražava kroz formiranje Fe-nitrida, koji povećavaju krtost, eliminiše se umirivanjem čelika sa Al [4, 5]. Al sa N formira AlN koji, osim što u znatno manjoj mjeri pogoršava žilavost čelika, sprječava porast austenitnog zrna tokom rekristalizacije (do temperatura 950^0C) što doprinosi postizanju ferita sa manjim zrnom, zbog čega se Al smatra blagim mikrolegirajućim elementom.

2.2 Uticaj temperature transformacije

Intenzitet ojačavanja, po svim navedenim mehanizmima, uveliko zavisi od temperature transformacije (preobražaja), odnosno temperature na kojoj se odvija fazna transformacija. Generalno se može reći da su efekti ojačavanja izražajniji što je temperatura preobražaja niža, budući da sa sniženjem ove temperature dolazi do profinjenja zrna produkata preobražaja, povećanja gustine dislokacija, profinjenja čestica izlučene sekundarne faze i njihove finije disperzije, a moguće je ostvariti i veće presićenje čvrstog rastvora, što sve ima odraza na povećanje čvrstoće. Navedeno ukazuje na mogućnost da se kontrolom temperature, na kojoj se odvija fazna transformacija, odnosno povećanjem brzine hlađenja odmah nakon završnog procesa plastične prerade, mogu dobiti čelični proizvodi sa različitim strukturnim karakteristikama, a time i svojstvima u dosta širokom opsegu. Dodatno unapređenje svojstava može se postići vođenjem procesa na način da se osim kontrole temperature ostvari određeni stepen plastične deformacije u definisanom području temperatura.

Dakle, da bi se dobio čelik optimalnih svojstava, pored upravljanja njegovim hemijskim sastavom u fazi proizvodnje, neophodno je osigurati dosta zahtjevno upravljanje procesom njegove plastične prerade, koja se najčešće treba obaviti pod strogo kontrolisanim uvjetima, unutar uskih granica kontrolisanih parametara kao što su temperatura, brzina i stepen deformacije, te brzina hlađenja.

3. VRSTE TERMOMEHANIČKIH KONTROLISANIH POSTUPAKA PRERADE

Vruća plastična deformacija se odvija na temperaturama koje su više od temperature rekristalizacije. Stoga je vruće deformisani čelik pogodan za provođenje jednog od termomehanički kontrolisanih postupka prerade. U zavisnosti od toga što se želi postići nekim od ovih postupaka [4-6] razlikuju se:

1. Postupci ubrzanog hlađenja iz austenitnog područja,
2. Kaljenje sa naknadnim samopopuštanjem ili napuštanjem,

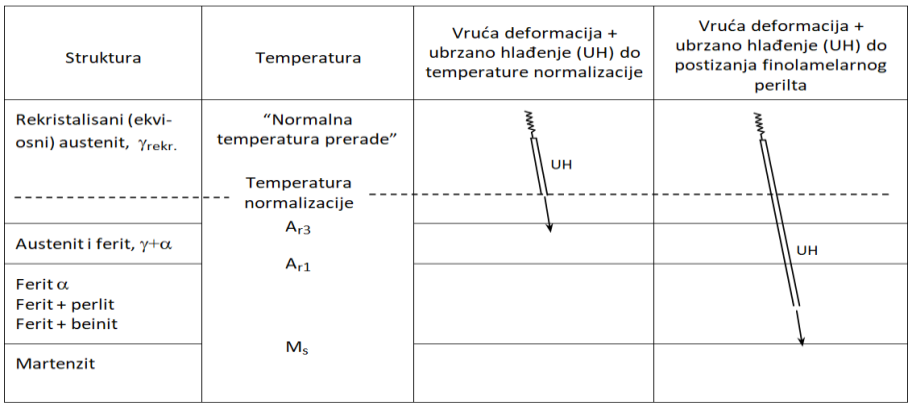
3. Termomehanički kontrolisani postupci koji uključuje kontrolisanu deformaciju ili kombinaciju kontrolisane deformacije sa naknadnim ubrzanim hlađenjem, odnosno direktnim kaljenjem sa popuštanjem.

U prva dva slučaja temperaturno kontrolisanim postupcima mogu se dobiti strukture i osobine čelika kao pri naknadnoj termičkoj obradi, međutim njihovom primjenom u praksi ostvaruju se znatne uštede u energiji, jer se za njihovo odvijanje koristi toplota koju materijal već posjeduje, a uz to značajno se skraćuju proizvodne linije. Za ove postupke od prvorazredne važnosti je kontrola temperature sa kojom se završava proces deformisanja i način naknadnog hađenja. Sa druge strane, u slučaju termomehanički kontrolisanih postupaka, pored kontrole temperature, na kojoj se ostvaruju završne deformacije, veoma je značajan stepen te deformacije. Budući da se ovakvom kontrolom procesa deformisanja ostvaruje polazna struktura za faznu transformaciju, koja se ne može postići bilo kakvim naknadnim zagrijavanjem, to se termomehanički kontrolisanim postupcima mogu postići strukture i svojstva, koje se za posmatrani materijal, ne mogu postići bilo kakvom naknadnom termičkom obradom.

3.1 Postupci ubrzanog hlađenja iz austenitnog područja

Ovi postupci osiguravaju postizanje feritno-perlitne strukture. U zavisnosti od toga do koje se temperature obavlja ubrzano hlađenje, sa temperature vrućeg valjanja, moguće je regulisati veličinu zrna i debljinu cementitnih lamela u perlitu.

Ukoliko se čelik sa temperature vrućeg valjanja/kovanja ubrzano hladi samo do temperature normalizacije, uz kasnije prirodno hlađenje, dobiva se struktura koja je bliska onoj koja se dobije nakon standardnog normalizacionog žarenja (normalizaciono valjanje ili normalizaciono kovanje), a ukoliko se ubrzano hlađenje produži do nižih temperatura dobivaju se strukture sa finijim cementitnim lamelama i malim međulamelarnim rastojanjem (slika 2.).

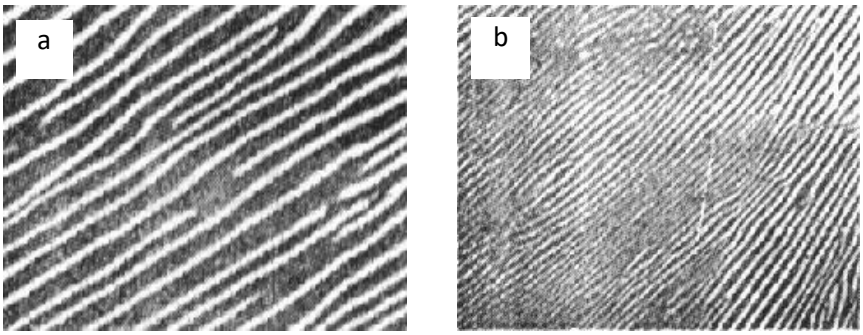


Slika 2. Postupci ubrzanog hlađenja iz austenitnog područja

Pod normalizacionim valjanjem/kovanjem podrazumjeva se takav tip vrućeg prerade nakon koje proizvod poprima strukturu kao da je bio podvrgnut normalizacionom žarenju [7-8]. Da bi se ovo postiglo posljednje deformacije u okviru vruće prerade u austenitnom području treba da se obave na temperaturi na kojoj deformisani austenit potpuno rekristalizira. Nakon toga se vrši ubrzano hlađenje do temperature normalizacije, kako bi se spriječila sekundarna rekistalizacija, odnosno povećanje promjera rekristaliasanih austenitnih zrna, a sve da bi se nakon naknadnog prirodnog hlađenja dobila normalizovana struktura sa što sitnijim feritnim zrnima. Normalizacionim valjanjem se dobivaju gotovi proizvodi kao što su nosači i limovi od konstrukcionih čelika, šine itd.

Zbog relativno male brzine hlađenja sa temperature normalizacije ugljik tokom fazne transformacije austenita u ferit i perlit u mogućnosti je da difundira na veća rastojanja zbog čega se formiraju deblje lamele, uz veće interlamelarno rastojanje.

Povećanjem brzine hlađenja fazna transformacija će biti potisnuta prema nižim temperaturama (ispod A_1), a to znači da će se odvijati u uslovima otežane difuzije ugljika, odnosno mogućnosti njegovog difundiranja samo na manja rastojanja što rezultira pojavom finolamelaranog perlita sa malim interlamelarnim rastojanjima (slika 3., tabela 1.).



Slika 3. Izgled perlita nakon sporog (a) i ubrzanog hlađenja (b)

Tabela 1. Modifikacije lamelarnog perlita

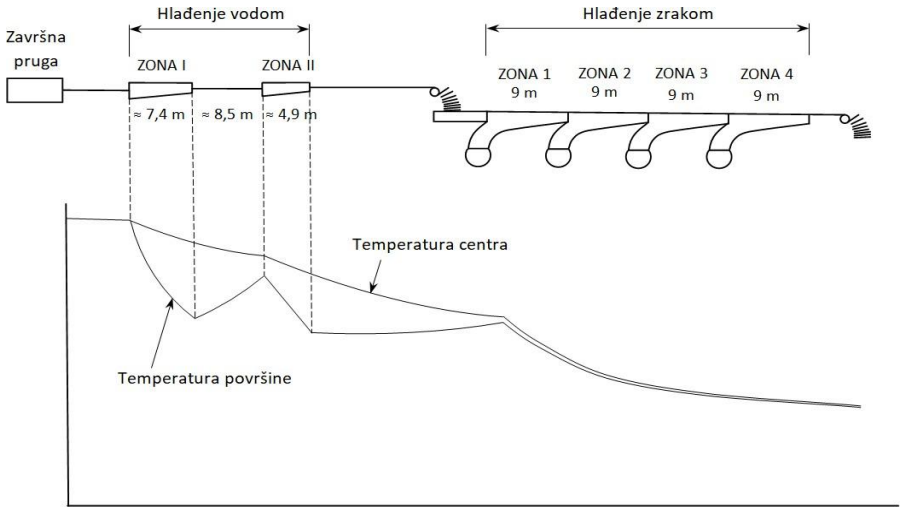
Modifikacija	Temperatura transformacije (°C)	Debljina jednog para feritne i cementitne lamele (μm)
Perlit	723	0,60 - 0,70
Sorbit	600 - 650	≈ 0,25
Trustit	500 - 600	≈ 0,10

Ubrzanim hlađenjem postiže se povoljna polazna mikrostruktura za hladnu preradu, kao što je slučaj sa žicom za hladno oblikovanje vučenjem, ili vruće valjanim trakama za hladno valjanje.

3.1.1 Ubrzano hlađenje žice

Postupak ubrzanog kontrolisanog hlađenja žice, nakon njenog izlaska iz završne pruge, sastoji se iz vodenog i zračnog hlađenja (slika 4.). Vodeno hlađenje se ostvaruje prskanjem vode pod pritiskom putem mlaznica koje su smještene u dvije vodene kutije. Vodene kutije se nalaze na određenom rastojanju da bi se obezbijedilo izjednačenje temperature po presjeku hlađene žice. Intenzitet vodenog hlađenja se podešava prema presjeku komada, vrsti čelika, odnosno temperaturi koju je potrebno ostvariti. Poslije vodenog hlađenja žica se preko glave za polaganje polaže na

pomični konvejer u vidu rastrešenih namotaja. Tokom ovog transporta žica se dodatno hladi putem zračnih komora duvanjem zraka pomoću ventilatora [9]. Zračno hlađenje se podešava tako da se transformacija austenita potpuno završi prije formiranja koturova.



Slika 4. Šema načina kontrolisanog hlađenja vruće valjane žice po Stelmor postupku

Brzina vodenog i zračnog hlađenja podešava se prema vrsti čelika i zahtjevanim osobinama valjane žice. Vodenim hlađenjem je potrebno spriječiti pojavu sekundarne rekristalizacije kako bi se nakon zračnog hlađenja obezbijedila finozrnasta struktura. U slučaju da je valjana žica namjenjena za hladno vučenje neophodno je postići finozrnastu sorbitnu strukturu [10-11] kako bi ona bila odmah spremna za hladnu preradu bez provođenja prethodnog olovnog patentiranja.

Osim toga ovim postupkom se postiže ravnomjerna struktura po cijeloj dužini žice, a time i ujednačene osobine.

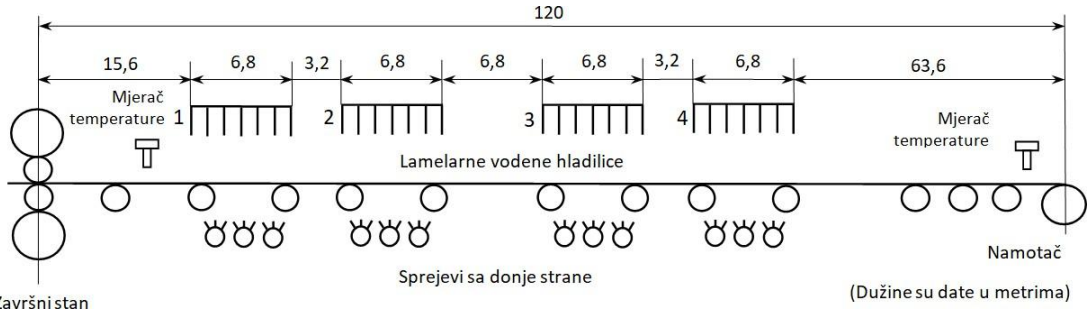
3.1.2 Ubrzano hlađenje limova i traka

Ubrzanim hlađenjem vruće valjanih limova i traka potrebno je ostvariti odgovarajuću feritno-perlitnu strukturu, u zavisnosti od hemijskog sastava valjanog čelika i naredne upotrebe valjanog lima ili trake. Osim toga, ubrzanim hlađenjem se spriječava pojava nekontrolisane transformacije i nehomogenosti strukture po dužini i širini lima odnosno trake. Kao rezultat navedenog vruće valjani limovi i trake mogu da se, bez dodatne termičke obrade, koriste kao finalni proizvodi u normalizovanom stanju ili kao poluproizvodi u slučaju narednog hladnog valjanja.

Ubrzano hlađenje se ostvaruje naprskavanjem vode sa gornje i donje strane vruće valjanog lima ili trake, dok se još uvijek nalaze na odvodnoj kotrljači koja je smještena iza zadnjeg valjačkog stana. Vruće valjani limovi se hlade do temperature 600-800^{0}C [10] prije nego što budu podvrgnuti vrućem ravnanju. Dalje hlađenje se može nastaviti na odvodnoj kotrljači, na rešetkastim ili diskovim hladnjacima.

U slučaju vruće valjanih traka hlađenje je potrebno provesti na način da se transformacija austenita završi prije nego što se traka počne namotavati u kotur. Dalje hlađenje trake se obavlja u koturu što osigurava povoljne uslove za izdvajanje precipitata ukoliko su u valjanoj traci prisutni odgovarajući elementi.

Sistem hlađenja vruće valjanih limova i traka je sličan. Na slici 5. šematski je prikazan sistem za kontrolisano hlađenje na jednoj savremenoj pruzi za valjanje traka.

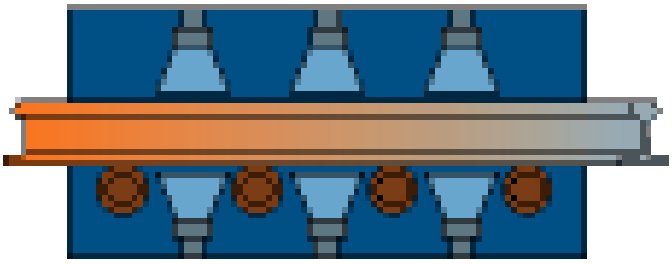


Slika 5. Šematski prikaz hlađenja na odvodnoj kotrljači u Rourkela Steel Plant, Rourkela [12]

3.1.3 Ubrzano hlađenje šina

Postupcima ubrzanog hlađenja šina, koje se rade od različitih C-Mn perlitnih čelika (čelici sa R_m<1000 MPa i sa 0,5-0,7% C, odnosno 1,0% Mn, odnosno čelici sa R_m>1000 MPa i sa 0,7-0,8% C, 1,1% Mn, 0,9% Cr i 0,10-0,15% V) postiže se finolamelarna perlitna struktura ili po cijelom presjeku (interlamelarno rastojanje oko 0,3µm) ili na površinskim slojevima glave šine (interlamelarno rastojanje od oko 0,1µm na dubini do 20 mm).

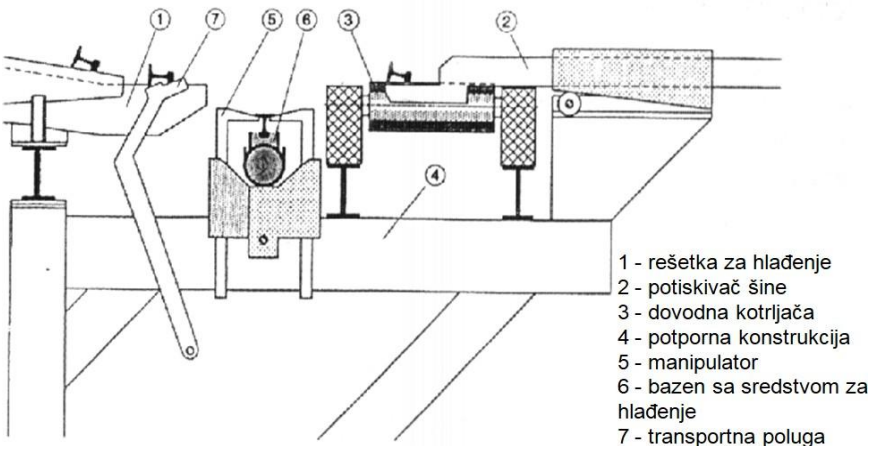
Na slici 6. prikazan je slučaj kontrolisanog hlađenja cijele šine. Šine se poslije izlaska iz završnog valjačkog stana hlade vodenim mlazovima do temperature koja će obezbjediti postizanje finolamelarnog perlita.



Slika 6. Ubrzano hlađenje cijele šine

Kako bi se dodatno povećala otpornost šina na habanje Voestalpine Schienen GmbH Donawitz-Austrija je 1990. godine uvela specijalni uređaj za ubrzano hlađenje glave šine. Šine koje proizvodi pomenuta kompanija su dužine 120 m i namjenjene su za pruge sa brzinama preko 160 km/h.

Navedene šine se valjaju iz konti odlivaka dimenzija 360x250mm. Nakon valjanja šine se okreću te se glava šine ubrzano hladi (slike 7.) u specijalnoj emulziji.



Slika 7. HSH uređaj za ubrzano hlađenje glave šine

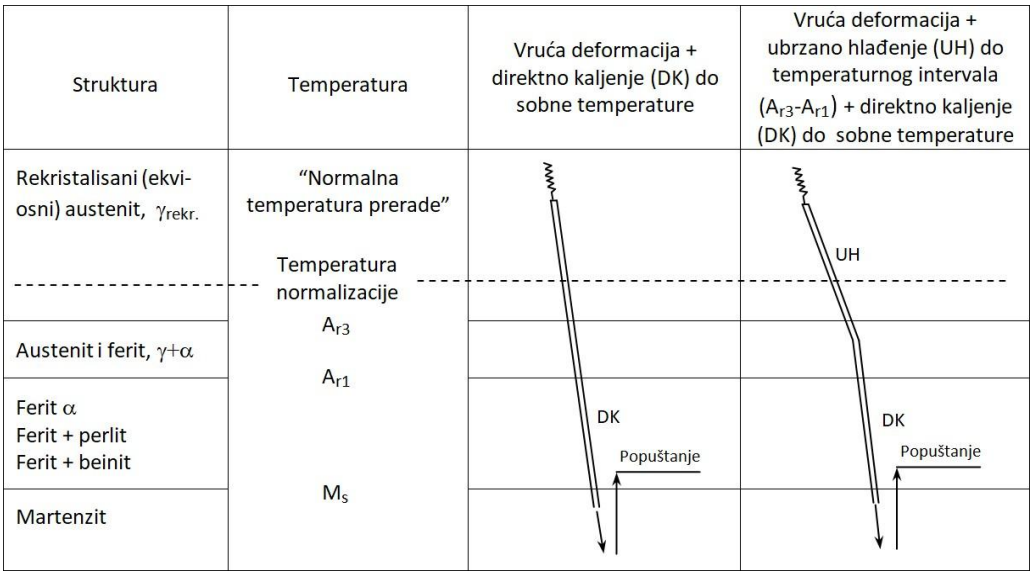
Nakon hlađenja u HSH (Head Special Hardened) uređaju glava šine poprima finolamelarnu perlitnu strukturu (interlamelarno rastojanje 0,1 μm) do dubine 20 mm, dok je ostali dio šine sa normalnim perlitom. Prelaz između ove dvije zone je postupan. Ovakve šine pokazuju duplo veću otpornost na habanje u odnosu na šine koje nisu tretirane HSH postupkom.

Dodatkom legirajućih elemenata i smanjenjem sadržaja ugljika u čeliku za šine (0,4% C; 1,44% Si; 0,84% Mn; 1,03% Cr; 0,69% Mo) te izborom odgovarajuće brzine hlađenja moguće je postići beinitnu strukturu koja osigurava veću čvrstoću šine (Rm>1300MPa) sa većom otpornošću na habanje. Takođe, žilavost ovakvih šina, kao i njihova otpornost prema pojavi loma znatno je veća od klasičnih perlitnih šina. Ubrzanim hlađenjem ovakvih šina treba se obezbijediti beinitna struktura zbog čega ovakve šine ne spadaju u grupu kontrolisano hlađenih, nego u grupu direktno kaljenih valjanih proizvoda.

3.2 Direktno kaljenje

Postupak direktnog kaljenja se izvodi nakon provedenog konvencijalnog procesa vrućeg valjanja kako bi se dobila poboljšana struktura. Poboljšanje, kao postupak termičke obrade sastoji se iz faze kaljenja i faze visokog napuštanja ili izotermalne transformacije presičenog austenita u beinit bez naknadnog napuštanja. U prvom

slučaju kaljenje se provodi brzim hlađenjem sa temperature iznad temperature A_3 do sobnih temperatura, kako bi se postigla martenzitna mikrostruktura ili brzim hlađenjem sa temperatura iz temperaturnog područja A_1 do A_3 kako bi se dobila dvofazna struktura (slika 8.). Dvofazna struktura je posljedica činjenice da se jedan dio austenita u temperaturnom području A_1 do A_3 transformiše u ferit, a preostali austenit se naknadnim brzim hlađenjem transformiše u beinit ili martenzit.



Slika 8. Postupci direktnog kaljenja

Budući da su komadi sa martenzitnom strukturom, dobivenom nakon kaljenja, praktično neupotrebljivi, vrši se njihovo zagrijavanje do temperatura puštanja kako bi se dobila poboljšana struktura (napušteni martenzit). Cilj puštanja martenzita je izdvajanje što sitnijih fino dispergovanih karbida koji će usporavati i ograničavati kretanje dislokacija u čeliku što rezultira očvršćavanjem. Slično se dešava tokom izotermnalne transformacije presičenog rastvora austenita u beinit (izotermalno poboljšanje) s tim što klasično poboljšanje (kaljenje i visoko napuštanje) ima prednost budući da je utvrđeno da pri istim vrijednostima tvrdoće u klasično poboljšanim čelicima oblik formiranih karbida je povoljniji nego u slučaju beinita.

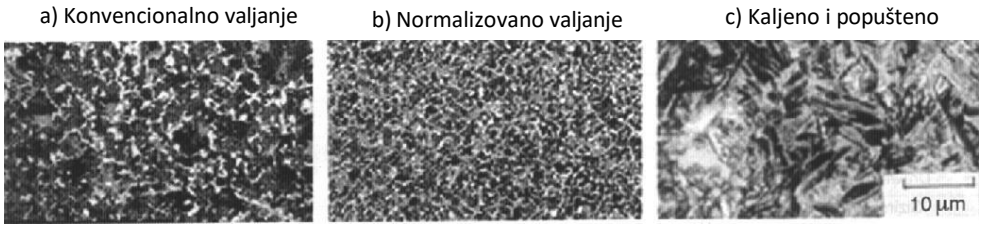
Poseban slučaj postoji kod provođenja kontrolisanog kaljenja koje je ograničeno samo na površinski dio valjanog komada. U tom slučaju nije potrebno vršiti naknadno napuštanje budući da se zakaljeni dio sam popušta toplotom koja se oslobađa iz središta tretiranog profila.

U odnosu na normalizovano valjanje, koje osigurava povoljniji odnos između karakterističnih mehaničkih svojstava (čvrstoćna svojstva - udarna žilavost) u odnosu na konvencionalno valjanje, poboljšanjem se postiže dodatno unapređenje tih svojstava (tabela 2.). Navedeno je rezultat izdvajanja karbida u vidu finih čestica, što za razliku od perlita, kod koga je željezni karbid - cementit (Fe_3C) izdvojen u obliku lamela, znatno povoljnije sa stanovišta udarne žilavosti.

Tabela 2. Unapređenje mehaničkih svojstava čelika kvaliteta 38MnSiVS5 [13]

Tehnologija	$Rp_{0,2}$ (MPa)	Rm (MPa)	A_5 (%)	Z (%)	Utrošena energija udara, V zarez (J)	Mikrostrukturni konstituenti
Konvencionalno valjanje	660	960	13	35	15	40% ferita; 60% perlita veličina austenitnog zrna 4-6
Normalizaciono valjanje	620	900	16	43	36	45% ferita; 55% perlita veličina austenitnog zrna 6-8
Kaljenje i napuštanje 870^0C, 20 min/voda 570^0C, 120 min/zrak	800	910	18	53	48	20% beinita; 80% martenzita
Hemijski sastav 0,35-0,40% C; 0,5-0,8% Si; 1,2-1,5% Mn; 0,08-0,13% V; promjer 50 mm						

Na slici 9. prikazane su mikrostrukture dobivene tehnologijama navedenim u tabeli 1.



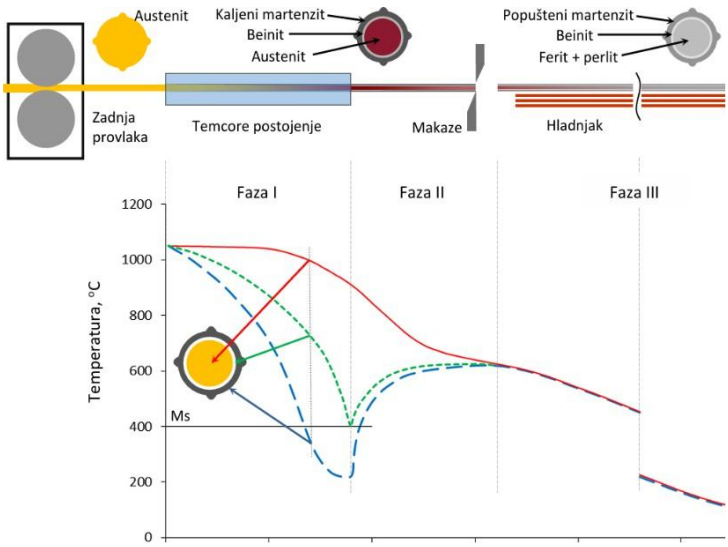
Slika 9. Mikrostruktura čelika kvaliteta 38MnSiVS5 za različite postupke valjanja i naknadnog termičkog tretmana [13]

3.2.1 Kaljenje i samopopuštanje betonskog čelika

Postupkom kaljenja i samopopuštanja moguće je dobiti betonski čelik povišenog napona tečenja i čvrstoće sa dobrom duktilnošću i zavarivošću uz smanjenje sadržaja legirajućih elemenata. Druga dva postupka, koji se mogu koristiti za povećanje napona tečenja (dodavanje legirajućih i mikrolegirajućih elemenata, te hladna deformacija – hladnim valjanjem, vučenjem ili torzijom) ne omogućavaju postizanje dobre zavarivosti i duktilnosti, posebno u slučaju primjene hladne deformacije, a osim toga troškovi koje iziskuju znatno su veći nego u slučaju primjene postupka kaljenja i samopopuštanja [6, 14].

Postupak kaljenja sa samopopuštanjem se može primjeniti kako na šipke tako i na žice koje se namotavaju u koturove. U oba slučaja kaljenje se ostvaruje brzim hlađenjem iz austenitnog područja korištenjem sistema sa vodenim sprejom, sistema sa vodenim kutijama ili nekog drugog sistema koji obezbjeđuje dovoljno veliku brzinu hlađenja [6] da bi se u površinskim slojevima šipki ili žice ostvarila martenzitna struktura.

Konačno hlađenje sa temperature izjednačenja do sobnih temperatura u slučaju šipki obavlja se na hladnjaku. Na slici 10. šematski su predstavljeni različiti koraci procesa kaljenja i samopopuštanja šipki kao i raspored postrojenja.



Slika 10. Šematski prikaz proizvodnje rebrastog betonskog čelika u šipkama

Nakon što šipka napusti završni stan valjačke pruge ona ulazi u instalaciju za izvođenje kaljenja i samopopuštanja. Pomenuto se ostvaruje u tri različita koraka. U prvom koraku dolazi do kaljenja valjane šipke do određene dubine. U dijelu šipke kod koje se hlađenjem dostigla temperatura ispod M_s formira se martenzit. Ova operacija se ostvaruje u vodenim kutijama. Dio šipke, kod kojeg temperatura nije pala ispod M_s, zadržao je austenitnu strukturu.

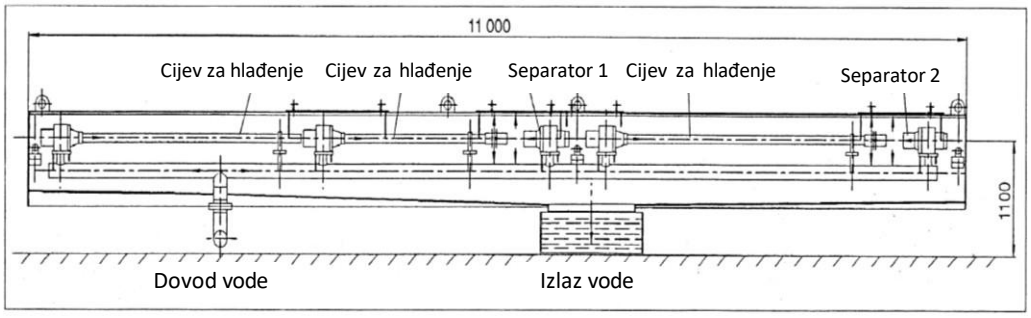
U drugom koraku šipka napušta područje drastičnog hlađenja i biva izložena hlađenju na zraku. Budući da je koeficijent prenosa toplote u okruženje mali, a gradijent temperature po presjeku šipke veliki dolazi do ponovnog zagrijavanja martenzitnog sloja toplotom iz unutrašnjosti šipke. Pošto se martenzitni sloj popušta preostalom toplotom iz centralnih dijelova šipke, to se ovakvo napuštanje naziva samopopuštanje. Ova faza se završava izjednačenjem temperature po cijelom presjeku. Treća faza se odvija tokom hlađenja šipki na hladnjaku.

U ovoj fazi preostali austenit se transformiriše u finozrnasti ferit i perlit, koji osigurava zadovoljavajuću istezljivost i žilavost tretirane čelične šipke.

3.2.2 Kaljenje i naknadno popuštanje

3.2.2.1 Kaljenje i naknadno popuštanje šipki

Jedan od načina direktnog kaljenja šipki prikazan je na slici 11. Temperatura se kontroliše linijom za hlađenje vodom. U svojstvu primjera ovdje će biti navedene prednosti primjene postupka direktnog kaljenja sa temperature valjanja sa naknadnim napuštanjem u odnosu na klasični postupak kaljenje – napuštanja u slučaju alatnog čelika X45NiCrMo4 (1.2767). Uobičajena je praksa da se ovaj čelik u obliku valjane šipke podvrgava klasičnom kaljenju i napuštanju u cilju dobivanja fine martenzitne strukture sa povećanom čvrstoćom i udarnom žilavošću. Ovako kaljeni čelik se deformisao (savijao) tokom izvođenja kaljenja što je zahtjevalo naknadno ispravljanje šipki.



Slika 11. Linija za vodeno hlađenje N.3 na pruzi za valjanje šipki (Krupp Edelstahlprofile) [13]

Zahvaljujući tehnologiji direktnog kaljenja slična fina martenzitna struktura se može dobiti kaljenjem odmah po okončanju procesa valjanja s tim što ova tehnologija osigurava dobijanje šipki koje su veoma ravne, budući da se kaljenje odvija postupno i kontinuirano preko cijele dužine šipki. Osim toga smanjuje se broj operacija u odnosu na klasični postupak termičke obrade.

3.2.2.2 Direktno kaljenje limova

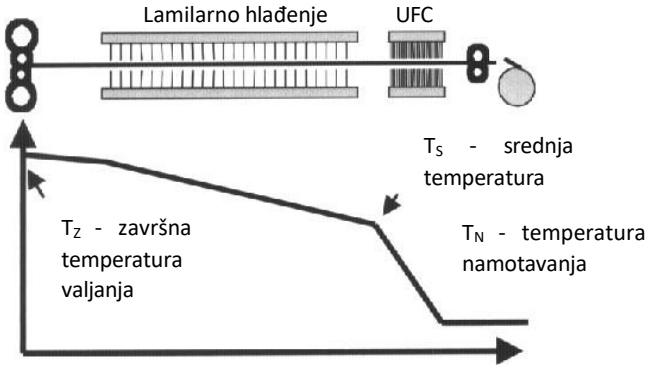
Direktno kaljenje limova može se ostvariti na postrojenjima koja su slična postrojenjima za ubrzano hlađenje, a koja se koriste u slučaju normalizacionog i termomehaničkog valjanja, s tim što je potrebno ostvariti veće brzine hlađenja. Dizajniranje univerzalnog sistema hlađenja, koje bi zadovoljilo sve zahtjeve različitih valjaonica limova je dosta teško ne samo zbog zahtjeva za različitim brzinama hlađenja, obzirom na tip primjenjenog postupka hlađenja, nego i zbog različitih debljina limova koji se valjaju.

3.2.3 Dobivanje višefaznih struktura

Visokočvrsti čelici (Rm>600MPa) sa višefaznom strukturom (feritno-beinitna i feritno-martenzitna) pokazuju bolju deformabilnost od mikrolegiranih čelika istog nivoa čvrstoće [16]. Postizanje višefaznih mikrostruktura je dosta teško kontrolisati sa klasičnom opremom, koja se zasniva na tehnologiji lamilarnog hlađenja, budući da se brzine hlađenja kreću između 30 i 80^0C/s. Otežavanju navedene kontrole doprinosi i kratko vrijeme koje stoji na raspolaganju za hlađenje (8 do 15 s), a koje zavisi od brzine valjanja. Za osiguranje pomenute kontrole bilo je potrebno dodavati legirajuće elemente (Mn, Cr, Mo) što je poskupljivalo proizvodnju.

Razvojem opreme za tzv. ultra brzo hlađenje (UFC - Ultra Fast Cooling) omogućilo je lakšu proizvodnju, odnosno bolju kontrolu transformacije tokom hlađenja. Kao rezultat toga višefazne čelike je moguće proizvoditi sa boljim osobinama i nižim cijenama. Postrojenje ne kojem se obavlja hlađenje izvaljanog komada sastoji se od klasičnog uređaja za lamilarno hlađenje i UFC – uređaja koji je smješten prije namotača (slika 12.).

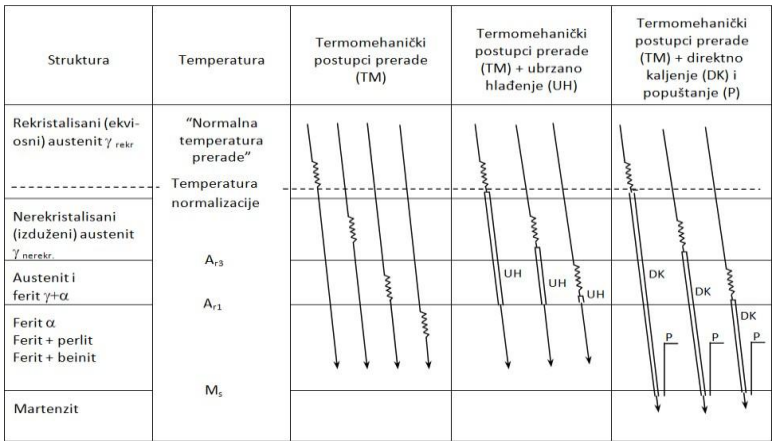
U principu postupak se sastoji od djelimične transformacije austenita u ferit, tokom lamilarnog hlađenja do srednje temperature T_s, iza čega slijedi kaljenje u UFC postrojenju, pri čemu se temperatura brzo obori do temperature namotavanja, zbog čega preostali austenit prelazi u beinit ili martenzit. Postizanje željene višefazne strukture se dosta jednostavno reguliše izborom srednje temperature T_s i temperature namotavanja T_N. Temperatura T_s određuje udio ferita u strukturi, dok temperatura T_N određuje udio beinita, odnosno martenzita.



Slika 12. Postrojenje za hlađenje višefaznih čelika [16]

3.3 Termomehanički kontrolisani postupci

Na slici 13. prikazane su vrste termomehaničkih kontrolisanih postupaka s obzirom na način hlađenja (na zraku, ubrzano, naglo) nakon posljednje kontrolisane deformacije, sa napomenom da prije ove završne deformacije, u odgovarajućem programu obrade, može biti predviđen veći broj kontrolisanih provlaka u različitim strukturnim oblastima.



Slika 13. Termomehanički kontrolisani postupci preade

Određeni čelik, koji se dobije primjenom nekog termomehanički kontrolisanog postupka, poprima mikrostrukturu sa izuzetno sitnim zrnima. Takva struktura osigurava povišene čvrstoćne osobine uz dobru žilavost i otpornost na zamor. Pored toga, ovakav čelik pokazuje izuzetno dobru zavarivost, što je između ostalog rezultat smanjenja sadržaja C i drugih legirajućih elemenata koji je inače pogoršavaju. Ojačavajuće dejstvo ovakvih elemenata efikasno se zamjenjuje ojačavanjem usljed usitnjenja zrna koje je osnovni mehanizam ojačavanja čelika obrađenih ovim postupcima. Pored navedenog mehanizma, u zavisnosti od hemijskog sastava (sadržaj mikrolegirajućih elemenata) i temperature na kojoj se odvija termomehaničko valjanje, precipitacioni i deformacioni mehanizmi, u manjoj ili većoj mjeri doprinose ojačavanjau. U svakom slučaju termomehaničkom kontrolom proizvedeni čelici karakterišu se poboljšanim mehaničkim svojstvima u odnosu na čelike koji se proizvode u normalizovanom stanju.

Plastična deformacija, koja je sastavni dio ovih postupaka obavlja se na temperaturama koje su niže od temperatura "normalnog ili nekontrolisanog valjanja". Hlađenje na temperature kontrolisanog valjanja može da bude postepeno (na zraku), ubrzano ili naglo. Kontrolisano valjanje može da se obavi u austenitnom području, na temperaturama na kojima je još uvijek moguća statička ili dinamička rekristalizacija ili nešto nižim temperaturama gdje je rekristalizacija austenita spriječena, u dvofaznom području u toku odvijanja fazne transformacije ili u čisto feritnom

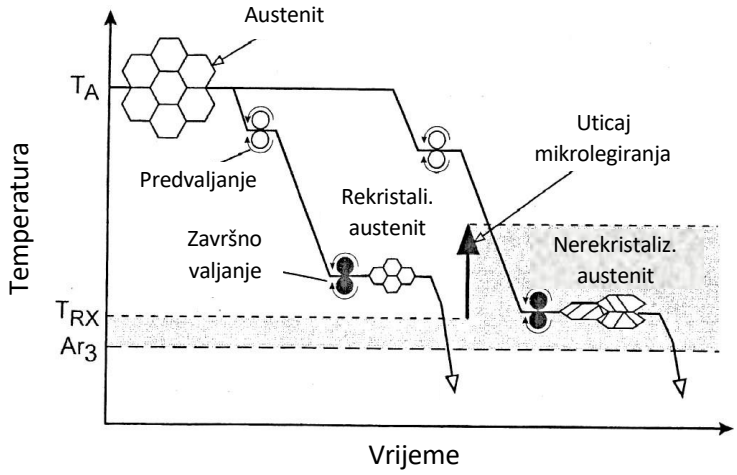
području. Postoji mogućnost provođenja kontrolisanog valjanja u više navedenih područja u istoj proizvodnoj liniji.

I pored svih prednosti koje posjeduju čelici dobiveni termomehanički kontrolisanim procesima, njihova zastupljenost od oko 10 % u ukupnoj količini valjanih proizvoda relativno je mala. Osim toga, ovi postupci se uglavnom primjenjuju na pljosnate proizvode za cjevovode dok je njihova primjena na dugačke proizvode, na koje otpada 50 % godišnje proizvodnje skoro beznačajna. Navedeno je posljedica činjenice da najveći broj do sada korištenih postupaka termomehaničkog valjanja zahtjeva izvođenje završnog valjanja (60 do 70 % deformacije) na temperaturama nižim od temperature rekristalizacije.

Ovo je direktno povezano sa povećanim opterećenjem valjačkih stanova, a time i značajnim padom produktivnosti zbog smanjene brzine valjanja, dok kod dugačkih proizvoda (npr. žice) brzine valjanja dostižu vrijednosti i do 100 m/s. Primjena kontrolisane deformacije na sniženim temperaturama, odnosno temperaturama ispod temperatura rekristalizacije, rezultat je mišljenja da se ekstremno sitno feritno zrno može dobiti samo iz deformisanog, nekristaliziranog ili ispeglanog austenitnog zrna.

Ovakav pristup usmjerio je istraživanja u pravcu razvoja čelika, koji će imati što višu temperaturu završetka rekristalizacije, kako bi se planirane završne provlake mogle izvesti na što višim temperaturama čime se ostvaruje bolja plastičnost valjanog materijala.

Ekstremno profinjenje austenitnog zrna može se ostvariti putem dinamičke rekristalizacije na temperaturi koja je nešto viša od granične temperature na kojoj je rekristalizacija još uvijek moguća. Postupak zahtjeva preciznu kontrolu kako temperature tako i stepena deformacije, uz napomenu da je u čeliku neophodno prisustvo mikrolegirajućih elemenata (Nb, V, Ti) koji će potiskivati statičku rekristalizaciju (slika 14.).



Slika 14. Principijelna šema programa valjanja u području rekristaliziranog i nerekristaliziranog austenita [*21*]

Princip se sastoji u tome da se deformacija na završnim provlakama obavi tako brzo, na dovoljno niskoj temperaturi, da ne postoji mogućnost pojave statičke rekristalizacije. Usljed značajnog akumuliranja deformacije dolazi do pojave dinamičke rekristalizacije koja osigurava postizanje sitnog austenitnog zrna koje će se nakon sporog, a naročito ubrzanog hlađenja transformisati u još sitnija zrna ferita (13 do 14 ASTM jedinica) [2, 21-23]. Smatra se da su sa tehnološkog stanovišta prednosti ove alternative naročito značajne u pogledu razvoja termomehaničkih kontroliranih postupaka valjanja dugačkih proizvoda zbog mogućnosti ostvarivanja deformacije na višim temperaturama.

Izvođenjem deformacije za vrijeme odvijanja fazne transformacije ostvaruju se uslovi za još veće usitnjenje feritnog zrna zbog povećanja broja potencijalnih mjesta za nukleaciju ferita u deformisanoj strukturi austenita. Naime, povećanjem stepena deformacije znatno se povećava broj grešaka kristalne rešetke koje su pogodne za nukleaciju ferita (vidi 3.3.3). Navedeni efekat izostaje ako nisu ostvareni termodinamički uslovi za transformaciju $\gamma \rightarrow \alpha$, u toku odvijanja deformacije, budući da se procesima oporavljanja (formiranje dislokacione substrukture) nastale greške djelomično, ali vrlo brzo eliminišu, tako da se smanjuje broj potencijalnih mjesta za nukleaciju ferita. Budući da se tokom izvođenja ovakvog postupka termodinamičkog valjanja ostvaruje manja ili veća deformacija ferita, prirast čvrstoćnih osobina

valjanog čelika, zbog deformacionog ojačanja, može biti podešavan stepenom ostvarene deformacije. Porast čvrstoćnih svojstava zbog deformacionog ojačanja redovno je praćen padom istezljivosti dok pad žilavosti može biti nadoknađen ostvarenim dodatnim profinjenjem feritnih zrna.

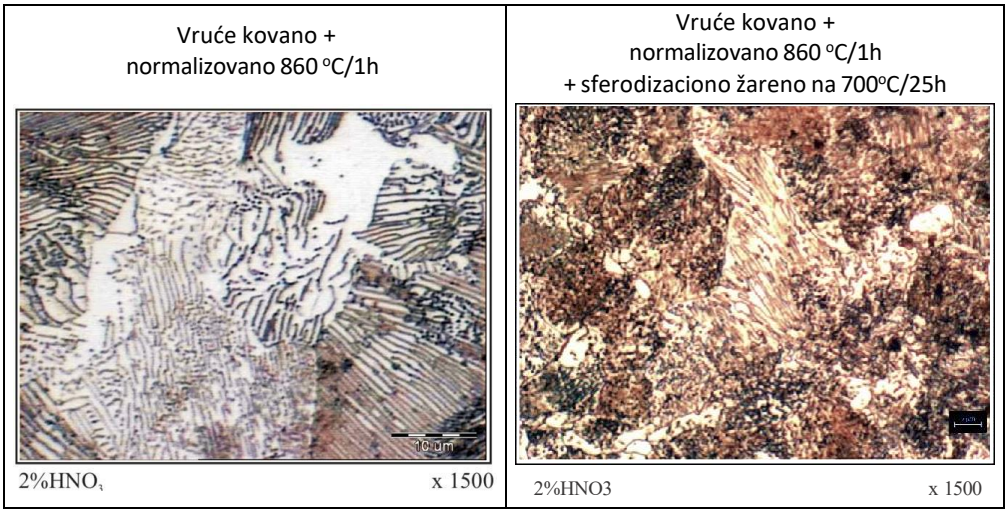
Izvođenjem termomehanički kontrolisanog valjanja u području ferita dolazi do dodatnog deformacionog ojačanja koje prati pad istezljivosti i žilavosti. Kod ostvarenih većih stepena deformacije javlja se i izražena anizotropija mehaničkih svojstava koja zavise od stepena razvoja deformacione teksture.

Osim usitnjenja zrna, kontrolisana deformacija u području austenita, dvofaznom austenit + ferit području i u feritnom području dovodi do ubrzane sferoidizacije cementita. U zavisnosti od temperature na kojoj s odvija kontrolisana deformacije, te kasnijeg hlađenja dolazi do mikrostrukturnih promjena koje su određene većim brojem metalurški uticajnih faktora, kao što su deformacija ferita i deformacija perlita. Ferit je duktilna faza koja se lako deformiše. Sa druge strane cementine lamele u perlitu su ekstremno tvrde i krte zbog čega se lome u manje dijelove tokom plastične deformacije [24-26]. Fragmentacijom cementitnih lamela tokom toplog valjanja ili kovanja ubrzava se proces sferoidizacije cementita tako da on značajno kraće traje [27] u odnosu na sferoidizaciju cementita tokom mekog žarenja nedeformiranog lamelarnog perlita. Proces sferoidizacije cementita je određen brzinom difuzije ugljika budući da se pojedini dijelovi cementitne lamele moraju rastvotiti pri čemu rastvoreni atomi ugljika difundiraju u drugi dio cementitne lamele koja postepeno poprima sferični oblik.

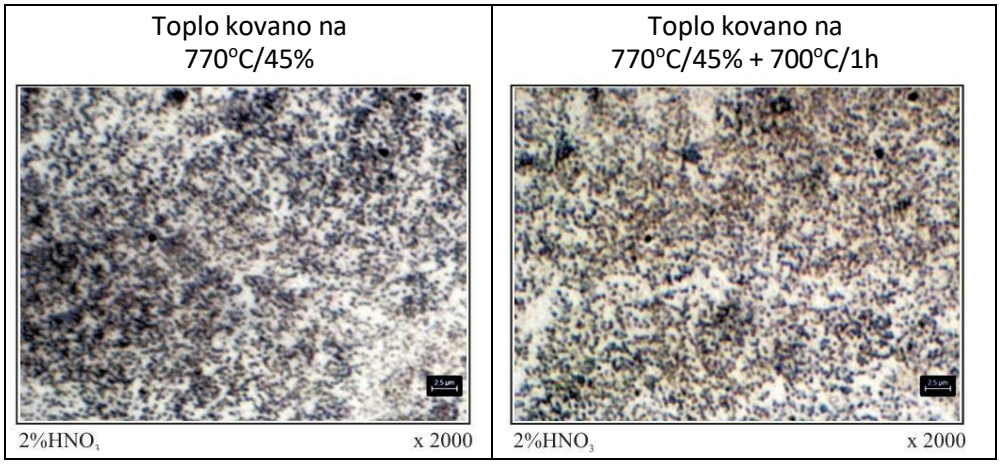
Ukoliko se cementitne lamele deformacijom izlome u male fragmente, difuzija rastvorenog ugljika se odvija na manjim rastojanjima pa će proces sferoidizacije cementita biti mnogo brži. Proces sferoidizacije lamela cementita traje više sati (oko 20 sati) u slučaju provođenja mekog žarenja nedeformiranih i nefragmentianih lamela cementita u perlitu, dok se u slučaju fragmentiranih cementitnih lamala ovaj proces završi znatno brže. Mehanizam mekog žarenja se bazira na sferidoizaciji i kagulaciji cementitnih čestica unutar feritnog matriksa, a uslovljen je težnjom sistema ka

smanjenju svoje unutrašnje energije jer globularni (zaokruženi, sferoidizirani) cementit obezjeđuje najniži energetski sadržaj u odnosu na sve strukture sistema željezo-ugljik [28]. U slučaju niskougleničnog čelika proces sferoidizacije se provodi u cilju poboljšanja njegove obradivosti u hladnom stanju [28-30].

Na slikama 15. i 16. prikazane su mikrostrukture vruće i toplo kovanog čelika 41Cr4. Vruće kovani uzorak je normalizaciono i sferodizaciono žaren, dok je toplo kvani uzorak samo sferiodizaciono žaren.



Slika 15. Mikrostruktura uzorka čelika 41Cr4 koji je vruće kovan i normalizaciono žarena na 860°C/1h prije i nakon provedenog sferodizacionog žarenja na temperaturi od 700 °C u trajanju od 25 sati (perlitno-feritna mikrostruktura sa lamelarnim cementitom nakon provedenog normalizacionog žarenja koji nije potuno koagulirao ni nakon 25 sati seforodizacionog žarenja na 700 °C)



Slika 16. Mikrostruktura uzorka čelika 41Cr4 koji je toplo kovan sa temperature 770°C sa iznosom deformacije od 45 % prije i nakon provedenog sferodizacionog žarenja na temperaturi od 700 °C u trajanju od jednog sata (perlitno-feritna mikrostruktura sa koaguliranim karbidima)

Toplo kovanje u dvofaznoma austenit + ferit području (770°C) osigurava dobivanje potpuno sferodiziranog cementita, koji se odatno profini sferodizacionim žarenjem na 700 °C u trajanju od jednog sata. S druge strane potpuna sferodizacija lamelarnog perlita nakon vrućeg kovanja i normalizacije na 860 °C/1h nije moguća ni nakon 25 sati žarenja na 700 °C.

4. ZAKLJUČAK

Uvođenje temperaturno kontrolisanih postupaka plastične prerade omogućilo je unapređenje upotrebnih karakteristika čelika uz istovremeno smanjenje troškova njihove proizvodnje. Generalno posmatrano, primjenom nekog od temperaturno kontrolisanih postupaka plastične prerade može se ostvariti najmanje jedno, a u većini slučajeva više dole navedenih poboljšanja:

- optimalan odnos čvrstoćnih i duktilnih svojstava uz zadovoljavajući nivo žilavosti, što je rezultat preferiranja ojačavanja profinjenjem zrna kao jedinim nekrtim mehanizmom ojačavanja,

- smanjen sadržaj skupih legirajućih elemenata u čeliku budući da se profinjenjem zrna mogu ostvariti veće čvrstoće bez opasnosti od smanjenja sigurnosti konstrukcije izrađene iz takvog čelika,

- poboljšana zavarivost čelika zbog smanjenog sadržaja legirajućih elemenata koji je pogoršavaju,

- homogena struktura po širini i dužini komada, ako se radi o jednofaznim strukturama, a u slučaju višefaznih struktura ujednačen raspored mikrostrukturnih konstituenata po dužini i širini komada, odnosno u smjeru njegovog radijusa ako se radi o šipci. Navedeno je rezultat kontinuirane obrade tretiranog komada od njegovog početka do kraja pod istim uslovima,

- smanjeni troškovi proizvodnje zbog korištenja toplote koju valjani komad posjeduje nakon završetka procesa platične prerade, smanjenog utroška materijala zbog njegove povišene čvrstoće, te skraćivanja proizvodnih linija zbog eliminisanja potrebe za naknadnom termičkom obradom,

- mogućnost auomatizacije procesa koja osigurava kontinuirano održavanje optimalnih uslova odvijanja procesa.

Prednosti temperaturno kontrolisanih postupaka, koji se zasnivaju samo na kontroli brzine hlađenja (ubrzano hlađenje i direktno kaljenje), uglavnom se ogledaju kroz eliminaciju potrebe za dodatnom termičkom obradom ili provođenjem nekih drugih naknadnih radnji kao što je slučaj sa ravnanjem. Također, ovim postupcima se ostvaruje ujednačena mikrostruktura. S druge strane termomehanički kontrolisani postupci omogućavaju dostizanje svih gore navedenih poboljšanja posebno u slučaju primjene mikrolegiranja. Međutim, glavni nedostatak ovih postupaka je u tome što se generalno ne mogu primjeniti na dugačke proizvode.

5. REFERENCE

[1] Tomašević, S.: Osnovi fizičke metalurgije – skripta, Metalurški fakultet u Zenici, Zenica, 1987.

[2] Tomašević, S.: Dizajniranje tehničkih materijala, Apex/izdanja nauka i industrija, Zenica, 1999.

[3] Bimal, K.P.; Vaidyanatha, R.; Suraj, B.: Effect of thermomechanical processing on structure and properties of low carbon steels, Steel res. 60 (1989), No.9, pages 407/411

[4] Acev, M.; Bajevski, V.; Jovanova, V.; Meškov, B.; Funke, P.: VIII savjetovanje valjaoničara, stranica 190/198, Opšte udruženje crne metalurgije Jugoslavije, Zenica, 1987.

[5] Nedeljković, Lj.: Uvod u mehaniku loma i konstruiranje sa sigurnošću do loma, stranice P16-1/P16-21, Institut GOŠA, Tehnološko-metalurški institut Beograd, Beograd,1980.

[6] Morales, R.D.; Toledo, M.; Lopez. A. G.; Tapia, A. C.; Petersen, C.: Mathematical model for on-line heat treatment of steel bars, Steel res. 62 (1991), No.10, pages 433/440

[7] Standard BAS EN 10025+A1/2003

[8] Begovac, F.: Osobine čelika, Univerzitet u Sarajevu – Fakultet za metalurgiju i materijale, Zenica, 2000.

[9] Mujezinović, A.; Bakić. B.: VIII savjetovanje valjaoničara, stranice 114/121, RMK-Željezara Zenica, 1987.

[10] Čaušević, M.: Obrada metala valjanjem, Veselin Masleša, Sarajevo, 1983.

[11] Pešić, M.; Milenković, V.: Hladno izvlačenje žica, šipki i cevi, Tehnička knjiga, Beograd, 1965.

[12] Prasaad, A.; Jha, S.; Mishra N.S.: Modelling of microstructural evolution during accelerated cooling of hot strip on the runout table, Steel res. 66 (1995), No.10, pages 416/423

[13] Kahlmann, R.; Kruse, M.; Meyer, M.; Plociennik, U.: Optimization of material properties for bars and wire rod, MPT International, 2/2000, pages 56/62

[14] Kulović, H.; Kapetanović, S.; Komlenović, M.; Klobodanović, A.: Studija mogućnosti proizvodnje betonskog čelika visoke čvrstoće TEMPCORE; THERMEX postupkom u Željezari Zenica – prethodna studija, Metalurški institut "Kemal Kapetanović", Zenica, 1995.

[15] Purić V.; Beganović O.: (2024). Effect of Cooling Parameters on Tensile Properties of Concrete Reinforcing Steel in Coils, Journal of Sustainable Technologies and Materials, 4(7), 9–16. https://doi.org/10.57131/jstm.2024.7.2

[16] Aurelie, L.; Pierre, S.; Guillaume. B.; Jean-Claude, H; Philipe, R.; Joeri. N.; Philipe, H.: Metallurgical Aspects of Ultra Fast Cooling in front of the Down-Coiler, Steel res.75 (2004) No2, pages 139/146

[17] ASTM A 841/A 841 M-95

[18] Wehage, H.; Skoda-Dopp, U.; Quitmann. U.; Sauer, W.: New trends in hot flat rolling technologies and pass schedule optimization, MPT International 4/1998, pages 60/71

[19] Hubo, R.; Hanus, F. E.; Streiβelberger.: Manufacturing and fabrication of thermomechanically rolled heavy plates, Steel res. 64 (1993) No.8/9, pages 391/395

[20] ASTM A 913/ A 913 M – 95a

[21] Kaspar, R.; Peters, A.: Efficient steel processing by disciplined hot forming and microalloying, Steel res. 69 (1998) No 4+5, pages 128/135

[22] Kaspar, R.; Distl, J. S.; Pawelski, O.: Extreme austenite grain refinement due to dynamic recrystallization, Steel res. 59 (1988), No 9, pages 421/425

[23] Tirnanić, S.; Čurčić, R.; Tirnanić, D.; Drobnjak, Đ.; Properties of thermomechanically rolled Nb/Ti microalloyed steel sheets, Steel res. 60 (1989) N_0. 12, pages 561/570

[24] Zheng, C.; Dierk R. D.: Interaction between recrystallization and phase transformation during intercritical annealing in a cold-rolled dual-phase steel: A cellular automaton model, Acta Materialia 61 (2013) 5504–5517

[25] Umemoto, M.; Todaka Y.; Tsuchiya K.: Mechanical Properties of Cementite and Fabrication of Artificial Pearlite, Materials Science Forum, Vol. 426-432 (2003) pp. 859-864

[26] Valberg, H.S.: Applied Metal Forming including FEM analysis, Cambridge University Press, 2010

[27] Song, R.; Ponge D.; Raabe D.; Kaspar R.: Microstructure and crystallographic texture of an ultrafine grained C–Mn steel and their evolution during warm deformation and annealing, Acta Materialia 53 (2005) 845–858

[28] Božidar, L.: Chapter 6: Steel Heat TreatmentSteel Heat Treatment (277-414), Steel Heat Treatment Handbook. Second editions, Edited by George E. Totten, CRC press Taylor & Francis Group, 2007

[29] Bruce, L.: Structure/Property Relationships in Irons and Steels, Metals Handbook Desk Edition, Second Edition, J.R. Davis, Editor, p 153-173, ASM International, 1998

[30] ASM Handbook, Volume 4: Heat Treating, ASM International, 1991

MODEL “FABRIKA ZA UČENJE – LEARNING FACTORY” KAO REGIONALNI KONCEPT PRIPREME ZA OBRAZOVNI PROCES NA PREMISAMA INDUSTRIJE 4.0?

THE MODEL OF “LEARNING FACTORY” AS A REGIONAL CONCEPT OF PREPARATION FOR THE EDUCATIONAL PROCESS ON THE PREMISES OF INDUSTRY 4.0?

prof. dr. Darko Petković;
Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici
Fakultetsaka 1, 72000 Zenica

prof.dr. Ivica Veža
FESB Sveučilišta u Splitu
Ul. Ruđera Boškovića 32, 21000, Split

v. prof. dr. Aludin Brkić
UNZE - Institut "Kemal Kapetanović"
Travnička cesta 7, 72000 Zenica

doc.dr. Mustafa Hadžalić
UNZE - Institut "Kemal Kapetanović"
Travnička cesta 7, 72000 Zenica

v. as. Emir Đulić
Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici
Fakultetsaka 1, 72000 Zenica

REZIME

O obrazovanju prilagođenom potrebama tržišta rada u srednjim školama i fakultetima u BIH i regiji Zapadnog Balkana se decenijama vode brojne polemike te isto tako radi na brojnim projektima. Ovaj rad posmatra značaj razvoja koncepta tzv. Fabrika za učenje – Learning factory kao polazne osnove za puni učinak saradnje „škola/fakultet – privredni sektor". Naime, ovim konceptom se đaci i studenti već u prvim godinama školovanja (npr. u prvom i drugom razredu respektivno prvih 2-3 semestra na fakultetima) pripremaju za adekvatan nastaavk školovanja ili radne karijere. Naime, u savremenim simulacijskim fabrikama (centrima) koji se razvijaju na fakultetima i školama stvaraju se podloge za kvalitetnu i efikasnu praksu koja ih poslije očekuje u realnom poslovnom sektoru. Cilj ovih fabrika za učenje je da đaci-studenti nauče osnove karakteristike materijala (crni i obojeni materijali, drvo, tekstil, plastike, i sl.), tehnoloških procesa (npr. obrade rezanjem, deformacijom, zavarivanjem i sl.), osnove praktičnog crtanja na računarima i konverzije na CNC mašine i sl. Cilj je da se nauče pravilima zaštite na radu, sigurnosti obavljanja procesa, upotrebi zaštitne i druge opreme i sl. kako bi spremno dočekali i učestvovali u radnoj praksi i daljem učenju. U današnjim uslovima kada čitav region trpi posljedice slabih izdvajanja za naučno-istraživački rad (R&D&I) a privreda je primorana da se razvija i radi u konceptu Industrije 4.0 jedini način pravilne edukacije đaka i studenata je mix fabrika za učenje i dualnog obrazovanja. Naglasimo, ove fabrike nisu RDI (Research Development Inovation) orjentisani centri nego prvenstveno centri edukacije. U tom smislu na bazi dugogodišnjeg iskustva Fabrike za učenje Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu te aktivnosti tehnološkog transfera koji čini Centar za inovativnost i preduzetništvo Univerziteta u Zenici, čine se efektivni napori da se dio Instituta Univerziteta u Zenici transformiše i opremi da bude dio buduće Fabrike za učenje Univerziteta u Zenici. U tim naporima tima koji već duže radi na pripremi ove projektne ideje priključio se i Njemačko-turski univerzitet u Istanbulu a postoje naznake sličnih incijativa i na prostoru Crne Gore, Srbije i Albanije. Da li će ovakav prilaz naići na razumijevanje svih aktera ovog složenog procesa pokazat će vrijeme u implementaciji ovog projekta.

Ključne riječi: fabrika za učenje - learning factory, dualni model obrazovanja, model organizacije, Industrija 4.0

SUMMARY:

For decades, there have been numerous debates about education adapted to the needs of the labor market in secondary schools and colleges in Bosnia and Herzegovina and the Western Balkan region, and numerous projects are also being worked on. This paper observes the significance of the development of the concept of the so-called Learning Factory as a starting point for the full effect of "school/faculty -

business sector" cooperation. Namely, with this concept, pupils and students already in the first years of schooling (eg in the first and second grade, respectively the first 2-3 semesters at the faculties) are prepared for an adequate continuation of their education or working career. Namely, in modern simulation factories (centers) that are being developed at colleges and schools, the foundations are created for high-quality and efficient practice that will later be expected in the real business sector. The goal of these learning factories is for students to learn the basics of material characteristics (black and colored materials, wood, textiles, plastics, etc.), technological processes (e.g. processing by cutting, deformation, welding, etc.), the basics of practical drawing on computers and conversion to CNC machines, etc. The goal is for them to learn the rules of occupational safety, process safety, use of protective and other equipment, etc., so that they can readily welcome and participate in work practice and further learning. In today's conditions, when the entire region suffers from the consequences of weak allocations for scientific and research work (R&D&I), and the economy is forced to develop and work in the concept of Industry 4.0, the only way to properly educate pupils and students is a mix factory for learning and dual education. Let's emphasize that these factories are not RDI (Research Development Innovation) oriented centers, but primarily education centers. In this sense, based on the long-term experience of the Learning Factory of the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical and Shipbuilding of the University of Split and the technology transfer activities of the Center for Innovation and Entrepreneurship of the University of Zenica, effective efforts are being made to transform and equip part of the Institute of the University of Zenica to be part of the future Learning Factory of the University of Zenica. The German-Turkish University in Istanbul joined the efforts of the team that has been working on the preparation of this project idea for a long time, and there are indications of similar initiatives in Montenegro, Serbia and Albania. Time will show whether this approach will meet the understanding of all actors of this complex process in the implementation of this project.

Keywords: learning factory, dual education model, organization model, Industry 4.0

1. UVOD

U procesima poslijeratne transformacije visokoškolskih (VŠO) i naučno-istraživačkih organizacija (NIO) u BIH, sa jedne strane imali smo fenomen rapidnog rasta broja VŠO a sa druge strane rapidan propast broja NIO. Šta je sa jedne strane „krenulo po dobru“ tako da je broj VŠO rapidno rastao a sa druge strane „krenulo po zlu“ da su NIO propadale. U principu i bez dubljeg elaboriranja procesa najjednostavije je reći: brojni kvazi „sručnjaci“ nastali u ratnom vihoru, trebali su diplome bilo kojeg ciklusa studija po novouspostavljenom Bolonjskom modelu a sa druge strane sektor novih malih i srednjih preduzeća (MSP) koji je postao matrica

svih strategija razvoja BiH, nije trebao nauku i razvoj, nego proizvodnju koja će zadovoljiti zapadne firme „finalne proizvodnje“. Jedna od institucija koja je uspjela preživjeti sve ove turbulencije a u naslovu je imala prefiks instituta, najprije Metalurškog Instituta pod nazivom Hasan Brkić a poslije pod imenom Institut "Kemal Kapetanović" (IKK). Danas je to organizacijska jedinica u sastavu Univerziteta u Zenici, čiji je Senat ovu organizacijsku jedinicu isključio iz svog članstva jer „nauka više ne stanuje na univerzitetima“ a sa druge strane pokušaji da se nauka i struka povežu kroz formiranje Naučno-tehnološkog ili samo Tehnološkog parka Univerziteta u Zenici u prethodnih 30 godina nisu dale rezultat. Tako je ovaj Institut ostao kao „zarobljena“ jedinica NIO u sastavu „moćne VŠO“ čiji je nastavni kadar zaboravio da su nastavnici na VŠO prvo istraživači i ljudi koji rade na tehnološkom transferu sa NIO u privredni sektor „a to dopunjeno sa teorijom predaju i studentima na svojim predavanjima.“ I takav Institut koji postoji više od 60 godina je bio mjesto razvoja tehničkih fakulteta, nekad Univerziteta u Sarajevu a danas Univerziteta u Zenici, je mjesto koje traži svoje mjesto kako u svijetlu NIO tako i u kontekstu VŠO sa svojim karakteristikama. Stavovi i strateške vizije prezentovane u ovom radu su pokušaj da se pomiri jaz između naučno-istraživačkog i stručnog rada koji karakteriše jednu naučno-istraživačku organizaciju (NIO) i sa druge strane nastavnog procesa, obuka i treninga koji su karakteristike jedne VŠO. Kako pomiriti ova dva koncepta i napraviti sinergiju od koristi za privredne sisteme ZDK, SBK i najposlije BIH sa jedne strane a sa druge strane biti i servis VŠO kakav je Univerzitet u Zenici, pokazano je kroz koncept razvoja Fabrike za učenje (Learning Factory) u sastavu IKK koji proklamujemo kao jednu od odrednica budućeg rada i razvoja IKK u Zenici.

2. DUALNI MODEL U VISOKOM OBRAZOVANJU U BIH I REGIONU

Dugi niz godina se u BiH u sektorima srednjeg i visokog obrazovanja vode diskusije i debatuje kako obrazovni proces koji realizuju visokoškolske organizacije ne daje potrebne kompetencije koje su potrebne tržištu rada. Dok je proces u srednjim školama po modelu VET (Vocational Education Training) već dao opipljive rezultate to nažalost proces u visokom obrazovanju, izuzev Srbije, uglavnom tapka u mjestu. Srbija je jedina u regionu, u oblasti visokog obrazovanja donijela punu zakonsku regulativu i donekle krenula. Sa druge strane godinama se od strane poslodavaca naglašava da su diplomanti fakulteta potkovani teorijom, ali da praktični dio znanja je vrlo upitan te da u kompanijama potroše isto toliko vremena koliko traje formalno obrazovanje na fakultetima da zaposlene akademce dovedu do „potrebne upotrebljivosti“ za rad u konkretnom poslovnom okruženju. Razvijene zemlje Zapada su davno shvatile da pored čisto akademskog školovanja i programa u visokom obrazovanju moraju postojati i strukovni orjentisani studiji, a među njima i oni još tiješnje povezani sa praksom iskazani kao modeli dualnog studija ili kooperativnog modela studija. Lideri u takvom pristupu zemlje kao što su Njemačka, Austrija, Švajcarska ili Danska ovakav koncept razvijen u tijesnoj saradnji sa poslovnim

okruženjem razvijaju već decenijama i on se stalno usavršava i modifikuje saglasno poslovnim trendovima (razvoj IT sektora, Koncept Industrija 4.0 i dr.). Naglasimo ovdje ponovo da svaka zemlja treba da razvija vlastiti model, jer poslovni, edukacijski ili državni nivo i regulativa nigdje nije isti i model copy-paste iz Njemačke ili Austrije je nemoguć. Drugo, model se gradi godinama i nikakvi izdvojeni i odlični projekti ne mogu biti cjelovito rješenje nego samo jedan korak u gradnji sistema. Statistički podaci iz zemalja Zapada koje imaju razvijene ove modele studija kazuju da 60-70% polaznika ovih studija idu direktno ka poslu nakon završetka studija koji im daje odličnu kombinaciju stručnih, transverzalnih i generičkih znanja i kompetencija koje poslodavci traže, [5]. Danas u BiH djeluje više od 40 visokoškolskih organizacija u rangu univerziteta sa više od 200 fakulteta i visokih škola te vjerovatno više od 1000 studijskih programa koji daju isto toliko izlaznih diploma. Broj studijskih odsjeka koji su strukovno orjentisani procjenjuje se da iznosi svega do 3%, a u tom broju su i oni koji barem formalno praktikuju dualno obrazovanje. Ni na jednom nivou vlasti (država, entiteti, kantoni) ne postoji neki od zakona ili drugih razrađenih akata koji regulišu dualni studij. Za očekivati je bilo da se sektor privatnih univerziteta u BiH po osnivanju okrene više ka poslovnom, dominantno privatnom sektoru, i dualnom obrazovanju. No i tu je BiH opravdala svoj epitet „originalnosti“ jer su se privatni univerziteti dominantno specijalizovali za školovanje javne administracije, a državni ostali na tradiciji tehničkih, društveno-humanističkih ili bio-medicinskih studija. Jasno je i na ovaj način pokazano da dualni model, uz brojna potcjenjivanja samo onih koji ga ne znaju, je mnogo teži i zahtjevniji za provođenje od klasičnih akademskih modela (predavanja + vježbe: ex.catedra i on-line).

3. ŠTA SU FABRIKE ZA UČENJE

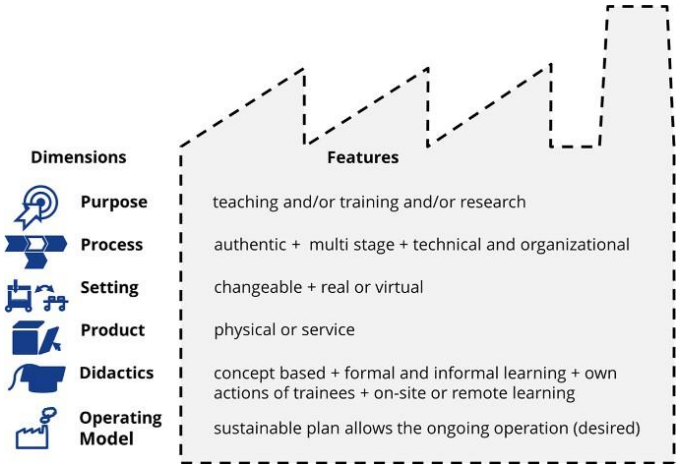
Fabrika za učenje je okruženje za učenje gdje se procesi i tehnologije temelje na stvarnoj industrijskoj lokaciji koja omogućuje direktan pristup procesu stvaranja proizvoda. Fabrike učenja temelje se na didaktičkom konceptu koji naglašava eksperimentalno i problemsko učenje. Filozofija stalnog poboljšanja potpomognuta je vlastitim djelovanjem i interaktivnim uključivanjem učesnika procesa, [2].

Međunarodno udruženje fabrika za učenje (IALF) je grupa istraživačkih institucija koje vode fabrike za učenje. IALF ima za cilj podsticanje saradnje između svojih članova kako bi se postigla izvrsnost u obrazovanju i istraživanju u području proizvodnog inženjerstva kroz fabrike učenja.

Članovi udruženja se zalažu za:

- razmjenu znanja i dobrih praksi,
- sinergije u fizičkoj uspostavi fabrika učenja, i
- vođstvo kroz inovativna poboljšanja.

Na slici 1. prikazan je opšti koncept fabrike za učenje.



Slika 1: Koncept fabrike za učenje

Tokom 2010. godine osnovan konzorcij mreža Fabrika za učenje u Darmštadu u Njemačkoj koju su tada činili:

- Institut za proizvodni menadžment, tehnologije i alatne mašine (PTW), TU Darmstadt;
- ESB Poslovna škola, Reutlingen-Univerzitet, Njemačka;
- Kraljevski tehnološki univerzitet, Stockholm, Švedska;
- Laboratorija za proizvodne sisteme i Odsjek automatizacije Mašinskog fakulteta i aeronautike, Univerzitet Patras, Grčka;
- Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje; Sveučilište u Splitu, Hrvatska;
- Institut za menadžment, TU Beč, Austrija;
- Institut za proizvodno inženjerstvo i laserske tehnologije, TU Beč, Austrija;
- Institut za alatne mašine i proizvodni menadžment; TU Minhen, Njemačka;
- Centar za integracije i prcesne inovacije i Institut za kompjuterske nauke i automatizaciju; Akademija nauka i umjetnosti Mađarske i Univerzitet tehničkih i ekonomskih nauka Budimpešta, Mađarska;

U međuvremenu se koncept Fabrike za učenje proširio diljem svijeta, tako da je danas veliki broj univerziteta uključen u globalnu mrežu, slika 2.

Slika 2: Koncept Fabrike za učenje diljem svijeta

4. KONCEPT FABRIKE ZA UČENJE NA SVEUČILIŠTU U SPLITU

4.1. Opšti cilj

Razvoj Lean Learning Factoryja u Laboratoriju za industrijsko inženjerstvo Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (FESB) započeo je nakon radionice i osnivanja Međunarodnog udruženja Learning Factoryja na PTW-u u Darmstadtu 2011. godine. Glavna ideja Lean Learning Factoryja na FESB-u bila je temeljiti ga na didaktičkom konceptu s naglaskom na eksperimentalno i problemski utemeljeno učenje korištenjem alata i metoda iz Lean menadžmenta. Učenje filozofije kontinuiranog poboljšanja olakšano je interaktivnim uključivanjem sudionika (studenata ili industrijskih zaposlenika). Od samog početka, Lean Learning Factory na FESB-u bio je dio „Mreže inovativnih Learning Factoryja“.

Vizija Lean Learning Factoryja na FESB-u je biti mjesto gdje se univerzitet, industrija i vlada susreću, dijele potrebe i očekivanja te rade na saradničkim projektima.

Misija Lean Learning Factoryja na FESB-u je pomoći u prenošenju stvarnog svijeta u učionicu pružajući praktično iskustvo studentima inženjerstva, pomoći u prenosu najnovijih naučnih istraživanja u industriju kroz saradničke projekte i cjeloživotno učenje te pomoći vladi u prepoznavanju potreba industrijskih preduzeća.

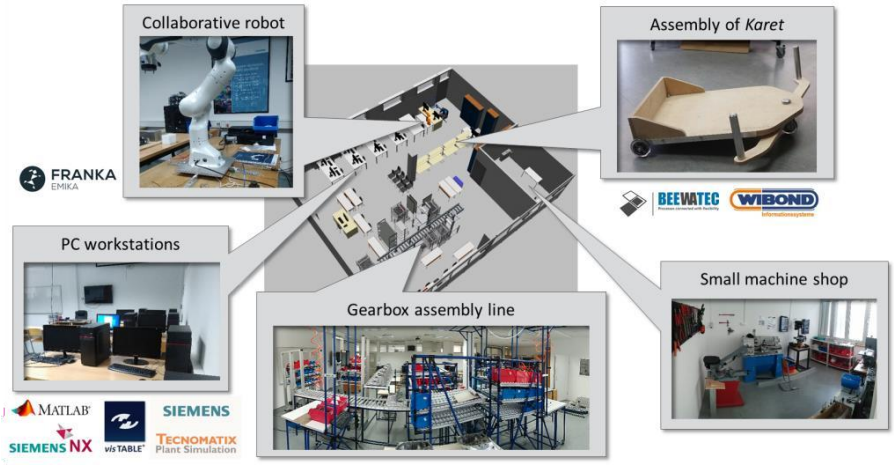
Lean Learning Factory na FESB-u osmišljen je kao „živi laboratorij“ za istraživanje, razvoj, demonstraciju i prenos znanja u hrvatsko gospodarstvo. Korišten je za razvoj hrvatskog modela Inovativnog pametnog poduzeća (HR-ISE model) tokom projekta

„Inovativno pametno preduzeće (INSENT)“ (grant CSF). Ipak, korišten je i kao istraživačka baza za druge projekte: „Izvrsnost logističkog osoblja kontinuiranom samoprocjenom (LOPEC)“ (grant EU-LdV), „Mreža inovativnih tvornica učenja (NIL)“ (grant DAAD), „Razmjena znanja o posljedicama i izazovima integracije ključnih tehnologija u europskoj proizvodnji za dunavsku regiju (DanKETwork)“ (grant Fraunhofer ISI) i „Razvoj integrativnog postupka za upravljanje procesom poboljšanja proizvodnje i usluga (DEPROCIM)“ (grant UKF/CSF).

Svrha Lean Learning Factory Splita je edukacija studenata, radionice za strane studentske grupe i profesore, implementacija Lean i zelenog koncepta u gospodarstvu kroz seminare i radionice, znanstveno-istraživačke aktivnosti i razvoj inovativnih proizvoda.

4.2. Oprema i proizvodi

Raspored Lean Learning Factory-a zajedno s pripadajućom opremom prikazan je na slici 3.



Slika 3: Raspored Lean Learning Factory na FESB-u, Univerzitet u Splitu

Instalirane su dvije paralelne montažne linije: jedna prema konvencionalnom organizacijskom rasporedu koji se nalazi na većini montažnih radnih mjesta u hrvatskim proizvođačima, a druga koja je poboljšana korištenjem Lean alata i metoda, zajedno s nekim pametnim komponentama. Ove dvije linije koriste se za demonstraciju glavnih razlika u efikasnosti montažnih sistema polazniku, s organizacijskog, tehničkog i ergonomskog gledišta. Dubljom analizom obje montažne linije mogu se dizajnirati hibridne montažne linije kako bi se uravnotežilo vrijeme montaže prema zahtjevima kupaca s jedne strane i ukupnim troškovima instalacije i rada s druge strane.

U nastojanju da se proces praktičnog učenja učini bliskijim mašinskim i industrijskim inženjerima te poslodavcima u industriji, razvijene su montažne stanice i transportna linija za montažu mjenjača (slika 4). Kompletni mjenjači, izvorno iz automobila FIAT 128 i njegovih sljedećih modela, koriste se kako bi se polaznicima pokazao učinak brojnih alata i metoda za poboljšanje i rješavanje problema montaže, skladištenja i ulazne logistike. Prave montažne stanice i alati za sastavljanje složenih proizvoda, zajedno sa stvarnim proizvodima za sastavljanje, pružaju učenicima priliku za daljnji razvoj uravnoteženih montažnih linija, dokumentacije i postupaka sastavljanja, transportnih sistema ili drugih transportnih sistema, alata za stezanje, postupaka mjerenja i ispitivanja osiguranja kvalitete.

Slika 4: Montažna linija za mjenjač u skladu s trendovima Industrije 4.0

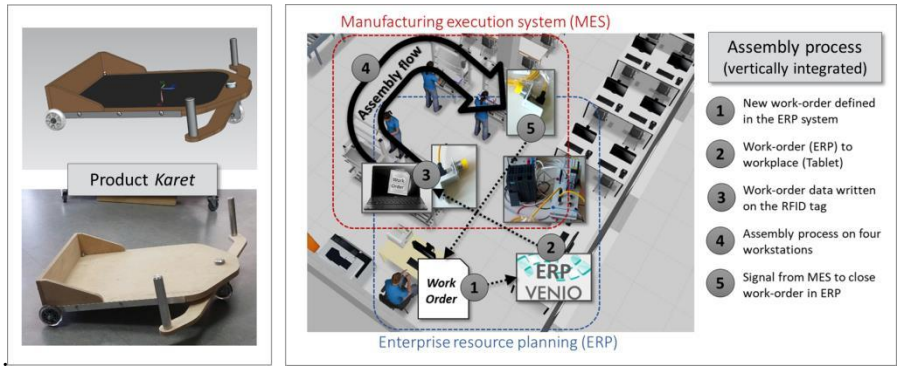
Budući da se integracija informacijske i komunikacijske tehnologije u proizvodne sisteme općenito smatra sljedećim korakom industrijske evolucije (Industrija 4.0), ova nova industrijska platforma uvedena je u Lean Learning Factory na FESB-u. Prvo, linija za montažu mjenjača opremljena je elementima Industrije 4.0. Drugo, razvijena je linija za montažu proizvoda pod nazivom Karet (tradicionalno dječje vozilo u Splitu, Hrvatska) s elementima Industrije 4.0. Ideja je bila implementirati sistem RFID senzora, stvoriti sistem izvršenja proizvodnje (MES) i povezati ga s planiranjem resursa preduzeća (ERP).

Proizvod Karet dizajniran je u softveru „Siemens NX“ s modularnom konstrukcijom, koja omogućuje odabir željenog modela putem softvera konfiguratora. Različiti moduli koji se mogu odabrati su:

- točkovi sa kugličnim ležajevima ili točkovi za role ili iz transportnih kutija na točkovima (kuglični ležajevi se koriste u tradicionalnoj konstrukciji),

- sistem kočenja ili bez kočnica,
- produživa šasija za podršku nogu ili fiksna šasija,
- dijelovi od različitih materijala za postizanje različite težine i ergonomije.

U montažnoj liniji preduzeća Karet, koja sadrži četiri radne jedinice s Lean montažnim stanicama, instalirani su sljedeći elementi Industrije 4.0: RFID čitači za praćenje proizvoda kroz montažnu liniju, međusobno povezana tablet računara na svakoj radnoj jedinici, sveukupno povezana na online poslužitelj s centralnom ERP i MES bazom podataka (slika 5).



Slika 5: Montažna linija za Karet d vertikalnom integracijom ERP-a i MES-a.

Kombinacija ovih elemenata stvara jedan jednostavan MES, koji omogućuje praćenje proizvodnje u stvarnom vremenu. Kompletan MES je povezan s ERP-om; tj. proizvodnja se pokreće radnim nalogom kreiranim u ERP-u.

4.3. Operativni koncept

Lean Learning Factory na FESB-u integriran je u obrazovanje studenata i zaposlenika na svim nivoima:

- dodiplomska predavanja.
- prvostepeni rad.
- diplomska predavanja.
- magistarski rad.
- poslijediplomska predavanja.
- doktorska disertacija.
- predavanja na stručnom studiju.
- teze na stručnom studiju.

Predavanja su dopunjena vježbama koje se održavaju u laboratoriju u kojem se nalazi Learning Factory. Studenti mogu iskusiti praktične efekte primjene različitih alata i

metoda u okruženju koje je simulirani i pojednostavljeni proizvodni pogon. Laboratorijska postavka, osim računara s PLM softverom, uključuje didaktičke igre posebno razvijene za simulaciju proizvodnih i logističkih sistema.

S druge strane, stvarni montažni stolovi i alati za montažu složenih proizvoda, zajedno sa stvarnim proizvodima za montažu, pružaju studentima priliku za daljnji razvoj uravnoteženih montažnih linija, dokumentacije i postupaka montaže, transportnih sistema ili drugih transportnih sistema, alata za stezanje, postupaka mjerenja i testova osiguranja kvalitete.

Nadalje, uspostavljanje novog magistarskog studijskog programa Upravljanje životnim ciklusom proizvoda, zajedno s uvođenjem novih studijskih kolegija (Upravljanje projektima Lean, Lean Management itd.), daje zainteresiranim studentima mogućnost da postignu određeni nivo specijalizacije u području novih metodologija operativnog upravljanja.

Lean i zeleni koncept implementiran je u velikim i malim i srednjim preduzećima u Hrvatskoj i Bosni i Hercegovini (prerađivačka industrija, usluge, banke itd.).

Implementacija započinje odabirom implementacijskog tima koji se sastoji od zaposlenika preduzeća i vanjskih stručnjaka sa univerziteta. Tim se sastoji od 15-30 zaposlenika, zavisno o veličini poduzeća, iz svih odjela (dizajn, administracija, proizvodnja itd.) i svih hijerarhijskih nivoa (od višeg menadžmenta do operatera uređaja).

Program implementacije podijeljen je u tri koraka. Sve počinje učenjem osnova Lean-a, tj. filozofije Toyota Production System-a kao prvog koraka. Drugi korak je učenje Lean alata i metoda (5S, Kaizen, VSM, itd.) koje zaposlenici pokušavaju primijeniti na svojim radnim mjestima i u svojim radnim zadacima. Kako bi se postigla održivost Lean implementacije, treći korak je pomoći višem menadžmentu da usvoji Lean razmišljanje. Na kraju obuke svaki zaposlenik dobiva svoj projektni zadatak za svoje radno mjesto i radne zadatke. Nakon konsultacija sa stručnjacima sa univerziteta, svaki zaposlenik predstavlja svoje rezultate.

Kao dio IALF mreže LF FESB ima za cilj podsticanje saradnje između svojih članova kako bi se postigla izvrsnost u obrazovanju i istraživanju u području proizvodnog inženjerstva kroz fabrike učenja.

5. RAZVOJ KONCEPTA FABRIKE ZA UČENJE NA UNIVERZITETU U ZENICI

Od svog osnivanja Univerzitet u Zenici težio je konceptu “preduzetničkog univerziteta”. Istorija početaka prvog visokoškolskog obrazovanja pedesetih godina

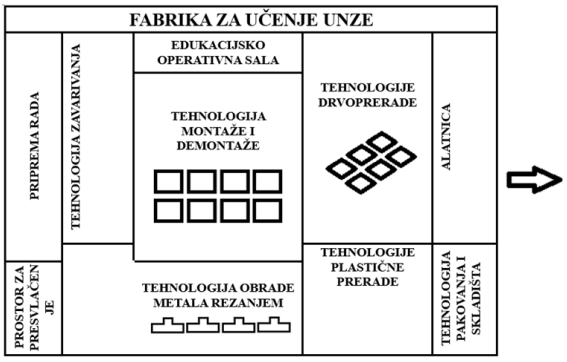
prošlog vijeka bazirana je na tijesnoj vezi privrede i akademije. Razvojem Metalurškog instituta sa zavodima-laboratorijama za prototipnu proizvodnju i poslije za realni proizvodni proces u Željezari Zenica te sistemu Rudarsko-metalurškog kombinata Zenica, stvorene su osnove za avangardni model "fabrike unutar fakulteta" što je bio jedan od rijetkih modela ove vrste i u Evropi. Taj koncept davao je odlične rezultate do 90-tih godina prošlog vijeka, kako u obrazovnom tako i u stručno-inovativnom. Veće industrijske krize devedesetih godina dovele su do istraživanja novog modela rada željezara ex-SFRJ što je studijski istraživano od strane British Steel Consulting-BSC za tadašnju vladu SFRJ koju je vodio Ante Marković. No, primjena rješenja i preporuka BSC-a nikada nisu primjenjena u fabrikama jer je došlo do disolucije nekadašnje države (SFRJ) te do novih vlasničkih odnosa u svim željezarama nekadašnje države (Jesenice, Sisak, Split, Zenica, Nikšić, Smederevo, Skopje) te njihovih institute ili razvojnih centara. Od Metalurškog instituta "Hasan Brkić" iz sedamdesetih godina prošlog vijeka je u Zenici oformljen Institut "Kemal Kapetanović" najprije registrovan kao posebno privredno društvo (doo) sa odrednicom "metalurški", a poslije kao organizacijska jedinica Univerziteta u Zenici bez odrednice naučne "pripadnosti". Poslovi sa novim vlasnicima Željezare u Zenici danas Arcelor Mittal Zenica su gotovo potpuno zamrli. Tokom perioda 2008-2012.godina Univerzitet u Zenici je značajno opremljen opremom iz državnog programa Vlade Austrije te brojnih projekata Tempus, IPA i drugih, no ta oprema je u najvećoj mjeri zaobilazila Institut "Kemal Kapetanović" (IKK). Projektni tim CIP UNZE je 2019-2020.godine zajedno sa timom Sveučilišta u Mostaru i Splitu te njemačkih univerziteta iz Damrštada i Oest-Westfalen Lippea radila na pripremi aplikacije za razvoj Fabrike za učenje na UNZE i SUM, a kroz program Erasmus+. Nažalost, epidemija virusa Corona je zaustavila rad na pripremi aplikacije koja nikada nije predala EU Komisiji u Briselu.

Na tragu ovog rada, kao i vizije razvoja dualnog obrazovanja na odsjeku DTD MF UNZE, 2022. godine je aktuelizovan ovaj koncept razvoja LF (Learning Factory) sa firmama u ZDK i SBK (InterProcess, Empress, Pero, Tamex, Tisal, FisAmbyenta i dr.) Nažalost, ni tada nije bilo sluha za ideju razvoja koncepta LF i edukacijskog renoviranja Instituta "Kemal Kapetanović" gdje bi jedna od "nekorištenih" hala bila renovirana i prilagođena konceptu fabričkog učenja studenata tehnologijama zavarivanja, obrade deformacijom, spajanjem, rezanjem, CNC-tehnologije, Aditivnih tehnologija i dr., a u sektorima drvoprerade i metaloprerade (slika 6. i slika 7.).

U prilagođenom prostoru studenti bi imali realne fabričke odjele za pripremu proizvodnje, razvoj tehnologija, mini-skladište, proizvodna ostrva, razvijen sistem unutrašnjeg transporta i pakovanja. Time bi studentima prve i druge godine studija bila omogućena stvarna priprema i upoznavanje sa tehnološkim procesima, pripremom rada, zaštitom na radu i drugim bitnim aktivnostima realnih poslovnih sistema koji bi ih čekali u trećoj i četvrtoj godini studija po dualnom modelu. Na ovaj

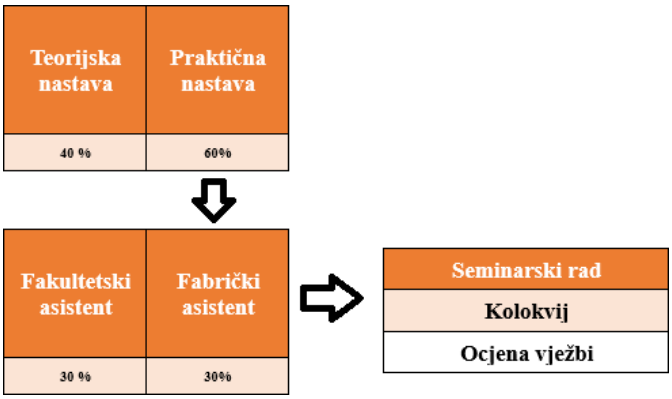
način studenti bi bili optimalno pripremljeni za stvarni dualni koncept u poslovnim sistemima u BiH i šire.

Slika 6. Fotografija sadašnjeg prostora Fabrike za učenje na IKK



Slika 7. Layout sistema LF koji je bio planiran na Institutu

Bitno je ovdje naglasiti da Fabrika za učenje nije istraživački prostor suprotstavljen postojećim laboratorijama Mašinskog, Politehničkog i Fakulteta prirodnih nauka i inženjerstva koje imaju prvenstveno naučno-istraživački karakter. Da li će nekad LF napraviti i nešto u smislu RDI nije svakako zabranjeno. Za potpuni uspjeh koncepta Fabrike za učenje, a poslije u nastavku i Dualnog modela studija projektni tim CIP Univerziteta u Zenici predlaže VŠU u BIH i šire model koji bi sadržavao 40% teorijske nastave koju izvodi profesor, a 60% praktične nastave (slika 8.). Ovih 60% praktične nastave bi se dijelilo na po 30% koliko bi izvodili fakultetski i fabrički asistent (stručnjak iz prakse). Ovo zahtijeva temeljitu reformu kurikuluma (nastavnih planova i programa), negdje i promjenu zakonodavno-pravnog okvira, temeljitu promjenu pristupa visokom obrazovanju za oblasti koje bi bile dio sistema dualnog obrazovanja te druge značajne promjene u sistemu visokog obrazovanja.



Slika 8: Predloženi koncept dualnog obrazovanja u VŠU u BiH (predlog DP)

Kako svaki LF koncept da bi postao dio Svjetske mreže mora imati svoj originalni koncept razvoja i rada to bi i LF na IKK trebalo razvijati u tom smislu kao centar koji bi se pretežno bavio:

- Održivim razvojem, cirkularnom privredom i ekološkim naporima da se procesna privreda regije transformiše ka održivim ciljevima i zelenoj agendi UN;
- Učenjem i istraživanjem svih baznih tehnologija na kojima su zasnovane tehničke nauke i privreda regije u kojoj UNZE radi;
- Bio specifičan servis i baza cjeloživotnog učenja za privrednike regije i tehnološkog transfera u domenama svoje izvrsnosti.

6. UMJESTO ZAKLJUČKA

Ovo je sadašnja vizija projektnog tima CIP UNZE koji zajedno sa istraživačima sa IKK radi na naporima stvaranja projektnih pretpostavki za opremanje i strukturali razvoj LF na IKK. Kako CIP UNZE nije pod-organizacijska jedinica koja se bavi nastavom, a ima bogato iskustvo u razvoju i primjeni projektnog menadžmenta to je CIP UNZE preuzeo na sebe ulogu ulaganja dodatnih napora koje CIP UNZE čini više od decenije je razvoj modela Fabrike za učenje u univerzitetskom kampusu UNZE. Ova LF trebala bi biti osnova pripreme za sadržajno osmišljeno dualno obrazovanje u sektoru tehničkih i ekonomskih nauka. Važan element u gradnji takvog kvalitetnog sistema obrazovanja obavezno čine i srednje škole čime bi se sinergijom svih aktera napredak značajno ubrzao i kvalitetno pospješio. Iako ne kao ključne aktere procesa, ali u procesu dualnog obrazovanja vidimo i učenike gimnazije (npr. koncept tehničke gimnazije), ekonomske škole, dizajna i umjetnosti i dr. Ostaje nada da će koncept i model LF prepoznati i oni koji danas kreiraju procese obrazovanja u BIH: menadžmenti visokoškolskih organizacija, privrednici, ministarstva i drugi ključni stakeholderi ovog značajnog procesa. Pretpostavke za ovaj razvoj su stvorene kroz saradnju sa FESB Split koji je jedan od osnivača LF koncepta u Svijetu te saradnju sa VŠO u regiji koji žele da na svojim organizacijama implementiraju ovakav koncept (Univerziteti u Istočnom Sarajevu, Mostaru, Podgorici, Skadru, Istanbulu i dr.).

7. REFERENCE

1. Đulić E., Petković D., Brkić A., Hadžalić M., Hodžić D.: ZNAČAJ RAZVOJA "FABRIKA ZA UČENJE – LEARNING FACTORY" KAO KONCEPTA PRIPREME ZA DUALNI OBRAZOVNI PROCES NA PREMISAMA INDUSTRIJE 4.0?; XV Scientific-Professional Conference with International Participation, Jahorina Business Days; ISSN 2303-6168. March, 2025.

2. Laperrière & Reinhart: CIRP Encyclopedia of Production Engineering, 2015.

3. Abele et.al.: Learning Factories for research, education and training, CIRP edition, 2015.

4. Veža I., Gjeldum N., Mladineo M. (Urednici): Inovativno pametno poduzeće; Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje;Sveučilište u Splitu, 2018. (http://bib.irb.hr/datoteka/951550.INSENT_Cijeli_izvještaj_28_08_2018.pdf)

5. Petković D., Dautbegović Dž., Hadžikadunić F., Djulić E., Neimarlija A.:ORGANIZING DUAL EDUCATION FOR HIGHER EDUCATION IN THE COUNTRIES OF THE SOUTHEAST EUROPE REGION – NEED OR FASHION? International Conference REPTIS 2023; „Reshaping Eco_Socila Paradigm towards Innovation and Sustainablity"; Faculty of Economy, November 7-8, 2023. Shkodra, Albania. Abstract Conference Proceedings, ISSN 2308-0825, Page 20-22.; Editor: Blerta Dragusha.

6. Petković D., IZAZOVI I POTENCIJALI ZA ORGANIZOVANJE DUALNOG OBRAZOVANJA U BOSNI I HERCEGOVINI; In-Tech Naučno-stručni časopis za promociju tehnike, inovativnosti i IT tehnologija, Godina 2, Broj 2, Sarajevo, ISSN broj 2637-3300, ISSN broj online 2637-3319. (Urednici Bašić H-Tufekčić Dž.), strane 22-30.

7. DUALSCI – STRENGTHENINGCAPACITIES FORIMPLEMENTATION OF DUAL EDUCATION IN BH HIGHER EDUCATION – JAČANJE KAPACITETA ZA IMPLEMENTACIJU DUALNOG OBRAZOVANJA U SEKTORU VISOKOG OBRAZOVANJA U BIH; Organizacijsko-razvojni

projekt; PROJEKTNO.610251-EPP-1-2019-RS-EPPKA2-CBHE-SP (STRUKTURALNI PROJEKT). EU PROGRAM ERASMUS+, 2019-2022

8. RECOMMENDATIONS- COUNCIL RECOMMENDATION of 15 March 2018 on a European Framework for Quality and Effective Apprenticeships (2018/C 153/01)
9. SERI:„Vocational and Professional Education and Training in Switzerland, Facts and Figures 2017“, 2017.
10. Wilfried Hesser: Implementation of a dual system of higher education within foreign universities and enterprises; ISBN 978-3-940385-42-0; Helmut Schmidt University, Hamburg, 2018.
11. Federal Act on Vocational and Professional Education and Training; (Vocational and Professional Education and Training Act, VPETA) of 13 December 2002 (Status as of 1 January 2019) *The Federal Assembly of the Swiss Confederation,* based on Art. 63 of the Federal Constitution1, having considered the Federal Council Dispatch of 6 September 2000.
12. www.ialf.net
13. www.psu.edu

NOVI MATERIJALI U MEDICINI UZ PRIMJENU 3D ADITIVNIH TEHNOLOGIJA

NEW MATERIALS IN MEDICINE USING 3D ADDITIVE TECHNOLOGIES

Aida Imamović[1], Mirsada Oruč[1], Amra Talić-Čikmiš[1],Žuna Šaban[2]

1) University of Zenica ,Fakultetska 1, 72000 Zenica, Bosnia and Herzegovina

2) JU „Centarzanaprednetehnologije u Sarajevu“Bosnia and Herzegovina

Sažetak

U novije vrijeme, 3D printanje se brzo razvilo kao moderna industrijska tehnologija. Za razliku od tradicionalne proizvodnje, ova aditivna metoda proizvodnje široko se koristi u vazduhoplovstvu, proizvodnji vozila, skladištenju energije, bioinženjeringu, medicinskim uređajima, stomatologiji itd. Među novim materijalima u medicini, titan i njegove legure prepoznati su kao nezamjenjivi implantacijski materijali zbog visoke biokompatibilnosti, pogodni za nosive ortopedske dijelove, instrumente I slične primjene.

U ovom radu prikazana je titanijeva legura TiAl6Nb7, značajna za tehnologiju proizvodnje praha. Ova legura poznata je po visokoj specifičnoj čvrstoći, otpornost na koroziju i izuzetnoj biokompatibilnosti, čineći je jednim od najprikladnijih materijala za medicinske primjene. U zadnje vrijeme intenzivirano je ne samo istraživanje proizvodnje dijelova od ove legure za medicinske svrhe putem 3D tehnologije, nego i mogućnosti recikliranja ove visoko vrijedne legure dobivenog simulacijom HDH tehnologije.

U radu su predstavljen i rezultati SEM/EDS analize uzorka hidriranog praha legure TiAl6Nb7, kao i ocjena na citotoksičnosti genotoksičnost ovog praha.

Ključneriječi: legura titanija, proizvodnja praha , 3D print, upotreba u medicini

Summary

In recent times, 3D printing has rapidly evolved as a modern industrial technology. Unlike traditional manufacturing, this additive manufacturing method is widely used in aerospace, automotive production, energy storage, bioengineering, medical devices, dentistry, and more. Among new materials in medicine, titanium and its alloys have been recognized as indispensable implant materials due to their high biocompatibility, making them suitable for load-bearing orthopedic components, instruments, and similar applications.

This paper presents the titanium alloy TiAl6Nb7, significant in powder production technology. This alloy is known for its high specific strength, corrosion resistance, and exceptional biocompatibility, making it one of the most suitable materials for

medical applications. Recently, research has intensified not only on the production of parts of this alloy for medical purposes using 3D technology, but also on the possibilities of recycling this high-value alloy obtained by simulating HDH technology.

The paper presents the results of SEM/EDS analysis of a sample of hydrated TiAl6Nb7 alloy powder, as well as an assessment of the cytotoxicity and genotoxicity of this powder.

Keywords: titanium alloy, powder production, 3D printing, medical application

1. UVOD

Razvoj naprednih materijala za 3Dprint (ispis) nastavlja zadovoljavati potrebe kliničke precizne medicine i prilagođavati najprikladniju protezu za svakog kako bi se produžio radni vijek i zadovoljstvo onoga kome je namijenjena.

Kako se tehnologija 3D printa počinje sve intenzivnije primjenjivati u području medicine, važno je razumjeti karakteristike odgovarajućih materijala za 3D print. Tako npr.u ortopediji se od materijala za 3D print mogu izraditi implantati, proteze i izraditi anatomski modeli u prirodnoj veličini. S daljnjim unapređenjem tehnologije 3D printa i smanjenjem troškova ispisa i vremena naknadne obrade, 3D print će u bliskoj budućnosti biti uključen u rutinsku kliničku dijagnozu[1].

Trodimenzionalni print (3D) i aditivna proizvodnja (AM-additive manufacturing) metalnih materijala bilježe značajan napredak. Usavršavanje opreme za 3D ispis istraživačke i komercijalne proizvodnje tokom posljednjih dvadesetak godina, zajedno s povećanom raznolikosti sirovina, potaknulo je značajne istraživačke aktivnosti diljem svijeta. Najistaknutiji oblici 3D ispisa metala uključuju, između ostalog, slojeve metalnog praha, lasere I elektronske zrake kao izvore energije I preciznu opremu za automatizaciju za digitalno usmjeravanje izvora energije, sirovine ili oboje,[2].

Jedan od materijala koji se istražuje u zadnje vrijeme za primjenu u medicini kroz 3D ispis je titanijeva legura TiAl6Nb7, koja ima visoku čvrstoću, otpornost na koroziju I odličnu biokompatibilnosti od posebnog značaja za medicinsku upotrebu. U sklopu toga istraživano je da se simulacijom HDH (Hidrid-dehidrid)postupka, hidratizira uzorak titanijeve legure, namijenjene za recikliranje. Obogaćivanje ovog materijala vodikom procesom hidratacije dovelo je do povećanja krtosti titanijeve legure, koja se zatim mogla mehanički drobiti do povoljne granulacije praha koji se dalje može koristiti kao potencijalna sirovinaz a3D metal print tehnologije, [3].

2. PRIMJENA METALIH MATERIJALA ZA 3D PRINT ISPIS

Različite vrste metalnih materijala obrađuju su 3D metal printanjem. To uključuje čiste metale (zlato, bakar, niobij, tantal, titan), legure u prahu (na bazi aluminija, na bazi kobalta, na bazi bakra, na bazi željeza, na bazi nikla i na bazi titanija) i mješavine praha (na bazi bakra, na bazi željeza i legure kao što su Ni-Al, Ti-Ni, Ti-Mo i Ti-V).

Titanijum legure imaju dobru žilavost, otpornost na zamor savijanjem, biokompatibilnost i izvrsna svojstva obrade i trenutno su najčešće korišteni materijali za nosive implantate. Metalni 3D ispis olakšava proizvodnju složenih geometrijskih i multifunkcionalnih dijelova i nastavlja ispunjavati kliničke potrebe poboljšane osteointegracije.

Titanij, kao važan implantacijski materijal za nosive dijelove ortopedskih bolesti, obično zahtijeva i dobru biokompatibilnost.Kako bi se dodatno poboljšala njegova učinkovitost, obično mu se dodaju tantal i niobij kao stabilni materijali.

Legura TiAl6V4 naširoko se koristi u ortopedskim implantatima, kao što su intramedularni vijci, zbog svoje dobre otpornosti na koroziju i visoke zatezne čvrstoće.

Također legura CoCrMo (Cr 26,5-30% ; Mo 4,5-7%) se naširoko koristi u implantaciji ortopedskih proteza zbog svoje dobre otpornosti na koroziju i visoke zatezne čvrstoće i napona tečenja.

Bakar je element koji može pospješiti metabolizam i ima antibakterijsko djelovanje, tako na primjerdodatak različitih sadržaj Cu u Ti-Si-Cu premaz *in situ* laserom je pokazala izuzetno dobre rezultate.

Za razliku od nerazgradivosti titanija i nikla, magnezij je privukao pažnju kao nova vrsta razgradivog metala za eventualnu upotrebu u ovom području.

Aluminijev oksid visoke čistoće ima biološku inertnost i visoku površinsku obradu te se često koristi u dijelovima pumpi srčanog stimulatora. Kombinacijom tehnologije 3D ispisa s infiltracijom tečnih prekursora, kroz kontrolu broja infiltracija i temperature sinterovanja, može se dobiti aluminijev kaljeni cirkonij (ATZ), s dobrom tvrdoćom i otpornošću na lom.

Primjenu u medicini sve više nalaze i kompozitni materijali izrađeni koji su od dvije ili više različitih vrsta materijala. Kombinacija keramike i metalnih materijala, kao i keramike i polimernih materijala, postao je novi iskorak u primjeni materijala za 3D ispis [1].

Neposredni učinci primjene 3D ispisa metalnih prahova uključuju značajno smanjenje troškova i vremena isporuke, mogućnost proizvodnje malih serija ili "jedinstvenih" komponenti na zahtjev te mogućnost izrade prototipa i proizvodnje naprednih, visokoučinkovitih i komponenti koje se ne mogu proizvesti

konvencionalnim metodama zbog inherentnih ograničenja na geometriju, materijal, mikrostrukturu i svojstva. Ove prednosti su prepoznate i metalni 3D ispis se danas koristi za ograničenu proizvodnju u industriji, institucijama za istraživanje i razvoj diljem svijeta.

Trodimenzionalni (3D) ispis metalnih materijala uključuje slojevitu konsolidaciju sirovinskih materijala u obliku praha, žice ili ploča korištenjem različitih izvora energije za formiranje složenih oblika. Protekla dva desetljeća došlo je do značajnog napretka na ovom području, kako u pogledu tehnologija tako i materijala za 3D metal ispis. To je dovelo do širokog istraživanja i usvajanja tehnologija u industriji, akademskoj zajednici i organizacijama za istraživanje i razvoj [2].

3. METODE 3D PRINTANJA METALA

Danas se koriste različite metode 3D ispisa metala koje koriste različite izvore energije i sirovine. Razlikuju se direktne metode izrade metala koje su ovdje značajnije iindirektne metode koje uključuju tiskanje oblika nakon čega slijedi naknadna termička obrada za sinterovanje ili infiltraciju.

Metode direktnog ispisa za metal općenito se mogu kategorizirati kao [2]:

- laserske,
- elektroničke zrake,
- lučne i ultrazvučne.

Metode 3D ispisa metala temeljene **na laseru** mogu se klasificiratina:

- lasersko sinterovanje (LS),
- lasersko topljenje (LM) i
- lasersko taloženje metala (LMD).

Lasersko sinterovanje (LS) je tehnika fuzije u sloju praha u kojoj se skenirajući laser koristi za konsolidaciju sekvencijalno nanesenih slojeva metalnog praha.

*Lasersko topljenje (LM)*je druga tehnika fuzije sloja praha koja uključuje konsolidaciju metalnog praha pomoću snažnih lasera. Dok su postavljanje i konfiguracija opreme te metodologija obrade slični u LS i LM, u laserskog topljenja se prah potpuno ili gotovo potpuno rastopi.

Primjenom LM tehnologijese proizvode metalni dijelovi s višom nivoom mikrostrukturne homogenosti u poređenju sa LS tehnologijom. LM je prevladavajuća metoda za 3D ispis metala na bazi fuzije praha i koristi se za obradu jednokomponentnog metalnog praha, kao i niza legura.

Lasersko taloženje metala (LMD) je tehnika usmjerenog taloženja. U LMD-u sirovina može biti prah ili žica. U LMD-u na bazi praha, prah se prenosi pod pritiskom kroz

mlaznicu ili više mlaznica u talinu koju stvara laserska zraka na podlozi. Laser i sistem za isporuku praha pomiču se duž programiranih putanja kako bi se proizvele naslage željene debljine na podlozi. LMD proces se može koristiti za popravak i izgradnju monolitnih objekata kao i za proizvodnju funkcionalnih struktura.

Metode 3D ispisa metala temeljene na **elektronskom snopu** (EBM- *electron-beam machining*) uključuju ili sloj praha ili dovod žice za opskrbu sirovinskim materijalom. U verziji sa slojem praha, elektronski snop se skenira preko sloja praha u više prolaza kako bi se prah prethodno zagrijao na oko 80% temperature tačke topljenja. Zraka se zatim skenira velikom snagom kako bi se prah otopio. Obrada se odvija pod vakuumom sa helijem koji se naknadno ispušta u blizini područja izrade kako bi se ohladila komponenta. Čisti metalni ili prethodno legirani prahovi se koriste i potpuno se rastope tokom obrade.

Metode metalnog 3D ispisa temeljene **na luku** primjeri su DED-a (usmjereno taloženje energije). U ovim procesima, električni luk se stvara između osnovnog materijala i potrošne šipke koja sadrži sirovinski materijal. Šipka biva potpuno otopljena kako bi se stvorio talog za zavarivanje.

Ultrazvučni AM (UAM- ultrasonic additive manufacturing) je inovativan proces koji koristi tanke metalne trake kao sirovinu za proizvodnju složenih struktura kombinovanjem ultrazvučnog zavarivanja šavova i mašinske obrade. 3D metalna tehnika štampanja koja koristi patentiran ultrazvučni aditiv za proizvodnju (UAM) koristi zvučne talase za spajanje slojeva metalne folije. Ova tehnologija može proizvoditi složene komponente sa karakteristikama i atributima koji nisu mogući putem tradicionalnih proizvodnih tehnika [3].

Najveće **dobrobiti i prednosti 3D printanjasu [4]:**

-Brzo vrijeme izrade i niski troškovi pri razvoju specifične ideje,
-Ispravljanje grešaka u ranim fazama razvoja proizvoda,
-Jednostavna provjera dimenzija, oblika, funkcionalnosti i ergonomije,
-Optimizacija proizvoda prije izrade alata.

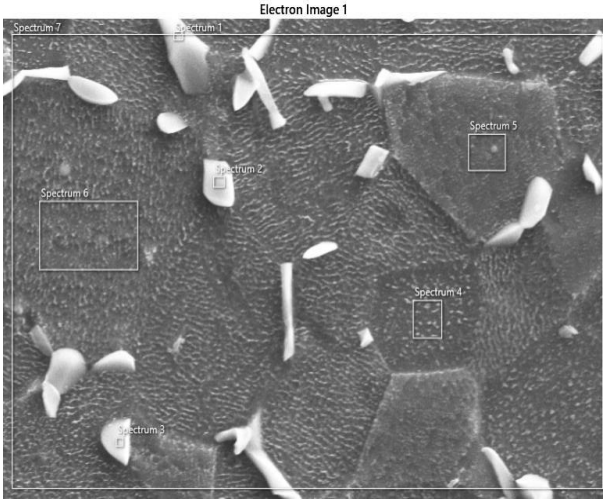
4. TITANIJEVA LEGURA TiAl6Nb7

Titanijeva legura s oznakom TiAl6Nb7 je od velikog značaja za tehnologiju proizvodnje praha, koji ima višestruke namjene.Legura TiAl6Nb7 je legura s visokom specifičnom čvrstoćom, otpornošću na koroziju i izuzetnom biokompatibilnošću.Proizvodnja praha na bazi titanijevih legura je vrlo skupa, pa je istraživanje tehnologije recikliranja titanijevih legura i dobijanja praha su od posebne važnosti. HDH (Hidrid-dehidrid) proces je ekonomičan proces za proizvodnju visokovrijednog praha na bazi titanijeve legure, koji se koristi za dobijanje praha

titanijeve legure sa nepromijenjenim hemijskim sastavom. Suština HDH postupka sastoji se u iniciranju stvaranja hidridne faze koja uzrokuje krtost ove legure.

Tretman hidratacije proveden prema definisanim parametrima, ovisno o veličini i karakteru titanovog otpada s ciljem povećanja krtosti, pokazao se uspješnim jer se hidratizirani uzorak mogao relativno lako mehanički usitniti do željene veličine praha[5].Rastvorljivost vodika u matrici titanove legure varira ovisno o količini i vrsti prisutnih faza [6].

Titanijeva legura TiAl6Nb7 ima visoku čvrstoću, otpornost na koroziju i odličnu biokompatibilnost te je od posebnog značaja za medicinsku upotrebu.Simulacijom HDH postupka, hidratiziran je uzorak titanijeve legure, namijenjene za recikliranje.Obogaćivanje ovog materijala vodikom procesom hidratacije dovelo je do povećanja krtosti titanijeve legure, koja se zatim mogla mehanički drobiti do povoljne granulacije praha. U ovom radu predstavljena su neka svojstva hidratiziranog titanijevog praha legure Ti6Al7Nb, s granulacijama ispod 60 μm, tj. njene primarne i sekundarne faze, istražene SEM/EDS analizom(JEOL JSM 5610),[5].Rezultati su pokazali da formiranja sekundarne faze kompleksnog intermetalnog spoja u matričnoj fazi, što na sobnoj temperaturi dovodi do povećanja krtosti legure Ti6Al7Nb, slika 1.Hidrirani uzorak se može mehanički samljeti na sobnoj temperaturi i tako dobiti prah legure titana nepromijenjenog hemijskog sastava, sa nepravilnim oblikom čestica. Istraživanje provedeno u ovom radu predstavlja dobru pretpostavku za dobijanje početnog materijala, tj. praha koji može biti potencijalna sirovina za proizvodnju gotovog praha za 3D metal print.



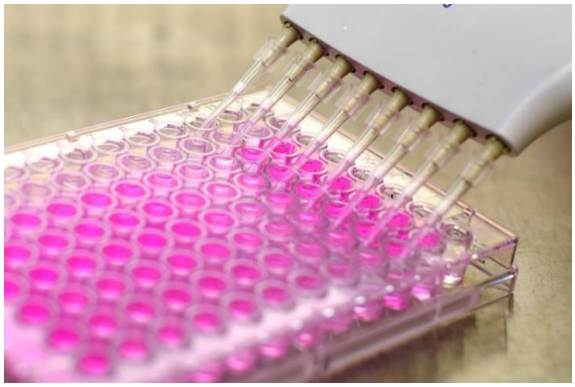
Slika 1. EDS prikazprimarne faze matrice i sekundarne faze hidratiziranog uzorka legure titanija TiAl6Nb7 (uvećanje5000x)

Tretman hidratacije proveden je prema definisanim parametrima, s ciljem povećanja krtosti.U procesu mljevenja u planetarnom mlinu dobiven je hidratizirani prah na bazi legure titanija TiAl6Nb7, slika 2a, s nepravilnim oblikom čestica, slika 2b, ali izuzetno povoljnom granulacijom, gdje značajan dio ima veličinu čestica ispod 60 µm, što je veoma bitno [5].

a) *b)*

Slika 2. Prah TiAl6Nb7 nakon mljevenja hidratiziranog uzorka (a),PrahTiAl6Nb7 nakon mljevenja hidratiziranog uzorka s nepravilnim oblikom čestica pri povećanju od 100x(b)

Proizvodnja praha je provedena u"Centru zanapredne tehnologije“ u Sarajevu, a dodatna ispitivanja su urađena i na Institutu za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju Univerziteta u Sarajevu.Reciklirani prah titanijum legure (TiAl6Nb7), dobijen HDH procesom, testiran je na citotoksičnost i genotoksičnost na liniji humanih embrionalnih bubrežnih ćelija (HEK-293T) slika 3, [7].



Slika 3. Humane embrionalne bubrežne ćelijske kulture (HEK-293T) za testiranje praha Ti-legura TiAl6Nb7 praha, dobijenog HDH procesom[7].

Parametri oštećenja DNK nisu bili značajno povećani ni pri jednoj od testiranih koncentracija Ti-legura što ukazuje da analizirani prah Ti legure ne inducira oštećenje DNK u testiranim koncentracijama u HEK ćelijama.

ZAKLJUČCI

Primjene 3D metalnog ispisa trenutno su koncentrirane u vazduhoplovnom i biomedicinskom sektoru. Na temelju kapitalne opreme i troškova sirovina, trenutni 3D print dijelovi skupi su u poređenju s proizvodnim dijelovima, osim kada se složene geometrije proizvode u kratkim proizvodnim serijama. Kako se prihvaćanje 3D metal ispisa povećava, očekuje se da će se troškovi proizvodnje smanjiti, što će otvoriti prostor za primjenu u mnogim sektorima.

Biokompatibilni materijaliako što su titanijum legure koriste za poboljšanje i promicanje regeneracije kostiju u ortopediji, kao jedno od veoma značajnih područja, pored izrade dijelova koji se ugrađuju i zamjenjuju oštećenu strukturu. Ukratko, 3D ispis metala pruža znatno šire mogućnosti za primjenu novih materijala u medicini.

S obzirom na visoke troškove proizvodnje titanijuma, HDH proces predstavlja obećavajuću metodu za dobijanje praha titanijumskih legura iz otpadnog materijala, kao što su i dijelove koji više nisu za medicinsku primjenu.Reciklirani prah Ti-legura dobijen HDH procesom, pozitivno je ocjenjen na citotoksičnost i genotoksičnost na liniji humanih embrionalnih bubrežnih ćelija.

Istraživanje predstavljeno u ovom radu predstavlja dobru pretpostavku za dobijanje početnog materijala, odnosno praha od legure TiAl6Nb7 koji može biti osnova za proizvodnju gotovog praha uz 3D metal print.

LITERATURA

[1] Binglong Li, MengZhang,Qunshan Lu, Baoqing Zhang, Zhuang Miao, Lei Li, Tong Zheng, Peilai Liu:Application and Development of Modern 3D Printing Technology in the Field of Orthopedics;Application and Development of Modern 3D Printing; National Institutes of Health https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov › 35211626, [pristup:juni 2025]

[2] Suman Das, David Bourell,Sudarsaman S Babu:Metallic materials for 3D printing Metallic materials for 3D printing | Request PDF ResearchGate, https://www.researchgate.net › publication › 30900100... , [pristup:juli 2025]

[3] Ultrasonic additive manufacturing [pristup: septembar 2025] https://ba.ultrasonicmachiningtool.com › ...

[4] Tehnologije 3D printanja - 3WAY
https://www.3way.hr › tehnologije... [pristup: septembar 2025]
[5] A.Imamović, M.Oruč, A.Talić-Čikmiš, Š.Žuna, Z. Alispahić: Recycled titanium alloy TiAl6Nb7 and 3D print Technology, Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, 2025
[6] A.Imamović, Š.Žuna, B.Kosec, A.Nagode, M.Oruč**:**QUALITY OF HYDRATED TITANIUM POWDER OBTAINED BY THE RECYCLING PROCESS, 14th Research/Expert Conference with International Participations, QUALITY 2025, Neum. BiH
[7] A. Haverić, I. Durmisević, Z. Ademović, Š. Žuna, T. Ćetković Pecar, M. Hadžic Omanović, F. Sipović, A. Imamović, S. Haverić: Ti-alloy (TiAl6Nb7) metal powder toxicity in human embryonic kidney (HEK-293T) cell line, 57th Congres of the Europian sociaties of toxicology EUROTOX 2023, Ljubljana – Slovenia, 10-13 September 2023.

PROIZVODNJA I MIKROLEGIRANJE AUSTENITNOG NEHRĐAJUĆEG ČELIKA X8CRNIS18-9

PRODUCTION AND MICROALLOYING OF AUSTENITE STAINLESS STEEL X8CRNIS18-9

Dr. sc. Derviš Mujagić, viši naučni saradnik

Institut "Kemal Kapetanović" Zenica

Travnička cesta 7, Zenica

SAŽETAK

U novije vrijeme sve se više primjenjuju modificirani nehrđajući čelici za izradu različitih konstrukcionih elemenata koji rade u složenim eksploatacionim uslovima. Čelik X8CrNiS18-9 (standard EN 10088-3:2005) je najčešće korišteni iz grupe austenitnih nehrđajućih čelika u pogledu mašinske obradivosti. Sadržaj sumpora koji je prisutan u ovom čeliku od 0,15 – 0,35% ima isključivi zadatak da poboljša mašinsku obradivost. Međutim, dok sumpor poboljšava mašinsku obradivost istovremeno smanjuje otpornost čelika prema koroziji, a utiče i na smanjenje mehaničkih osobina prije svega žilavosti čelika. Cilj ovog istraživanja je da se mikrolegiranjem borom, cirkonijem i telurom utvrdi mogućnost modifikacije nemetalnih uključaka. U ekperimentalnom dijelu istraživanja planirano je da se uradi osam talina. Prva talina će biti austenitni nehrđajući čelik X8CrNiS18-9 bez ikakvih modifikatora. Nakon toga u slijedećih sedam talina izvršit će se modificiranje sastava sa odgovarajućim sadržajima bora, cirkonija i telura. Od posebnog značaja je da se utvrdi ponašanje nemetalnih uključaka u procesu izrade konstrukcionog dijela i u kasnijoj eksploataciji. Iz tog razloga planirana je i simulacija prerade austenitnog nehrđajućeg čelika plastičnom preradom kovanjem i valjanjem sa dva različita stepena prerade. Nakon toga će biti uzeti uzorci i na njima urađena ispitivanja mikrostrukture.

Ključne riječi: austenitni nehrđajući čelik, nemetalni uključci, mašinska obradivost

SUMMARY

More recently a modified stainless steels has been used for production of various structural elements that work in complex operating conditions. Steel X8CrNiS18-9

(standard EN 10088-3: 2005) is the most commonly used from the group of austenitic stainless steel in terms of machinability. The content of sulphur present in the steel from 0,15 to 0,35% has the exclusive task to improve the machinability. However, while sulphur improves machinability it simultaneously reduces the resistance of steel to corrosion, but also affects the decrease in mechanical properties particularly steel toughness. The aim of this research is to determine the possibility of modifying non-metallic inclusions by microalloying with boron, zirconium and tellurium. In the experimental part of the research, it is planned to make eight melts. The first melt will be austenitic stainless steel X8CrNiS18-9 without any modifiers. After that, in the following seven melts, the composition will be modified with appropriate boron, zirconium and tellurium contents. It is of particular importance to determine the behavior of non-metallic inclusions in the process of making the structural part and in later exploitation. For this reason, a simulation of the processing of austenitic stainless steel by plastic processing by forging and rolling with two different stages of processing is also planned. After that, samples will be taken and microstructure tests will be performed on them.

Keywords: austenitic stainless steel, nonmetallic inclusions, machinability

1. UVOD

Austenitni nehrđajući čelik X8CrNiS18-9 je čelik sa poboljšanom mašinskom obradivosti koji se obrađuje na automatiziranim alatnim strojevima. Jedan od ključnih zahtjeva za dizajn je najveće uklanjanje materijala po jedinici vremena i lomljivost strugotine. Stoga ovaj čelik sadrži povećan sadržaj sumpora kako bi se dobila veća količina mangan sulfida. Pored količine mangan sulfida, njihov oblik i način raspodjele u čeličnoj matrici također su vrlo važni za mehanička svojstva čelika, kao i za otpornost na koroziju. Na oblik, veličinu i raspodjelu mangan sulfida može se utjecati dodavanjem elemenata s visokim afinitetom prema kisiku, kao što su titan, magnezij ili cirkonij, dodavanjem kalcija ili REM elemenata ili dodavanjem telura.

Bor u austenitnim nehrđajućim čelicima omogućava taložno očvršćavanje (povećanje konvencionalne granice tečenja i zatezne čvrstoće), ali smanjuje otpornost na opću koroziju [1]. Bor se koristi kao legirajući element u mnogim materijalima, a u čeliku se najčešće koristi kao legirajući element zbog svog utjecaja na povećanje prokaljivosti. Dodatak bora do 0,01% u austenitnim čelicima poboljšava njihovu čvrstoću na visokim temperaturama. Čelici koji sadrže bor koriste se kao visokokvalitetni konstrukcijski čelici namijenjeni za toplinsku obradu, čelici za kaljenje i čelici za hladnu obradu, poput čelika za vijke [2].

Funkcija cirkonijuma nije da ostane u rastopljenom čeliku, već da ukloni nečistoće kisika, sumpora i dušika ili modificira nemetalne uključke formiranjem kompleksnih sulfida i oksi-sulfida. Cirkonijum sulfid je znatno stabilniji od mangan sulfida u čeliku. Stoga, ako je dovoljno slobodnog cirkonijuma dostupno tokom ranih faza skrućivanja tekućeg čelika, cirkonijum sulfid će se formirati i spriječiti stvaranje mangan sulfida. Cirkonijum sulfid je mnogo vatrostalniji od mangan sulfida i praktično se ne deformira tokom toplog valjanja [3].

Utvrđeno je da dodatak cirkonijuma poboljšava tvrdoću i ne smanjuje udarnu žilavost. Dodatak cirkonijuma uzrokuje da sulfidni uključci budu kuglasti, a ne izduženi, što poboljšava čvrstoću i duktilnost mikrolegiranog čelika [4].

Dodavanje telura posljedica je sposobnosti podmazivanja mangan telurida. Telur se u čelicima javlja u uključcima u obliku mangan (sulfo) telurida (MnTexS(1-x)), ili kao bijeli omotač mangan sulfida, ili u obliku globularnih uključaka, koji se nalaze u bazi mangan sulfida ili mangan silikata [5].

Uključci mangan telurida (MnTe) očigledno su efikasniji od sumpora u pogledu mašinske obradivosti austenitnih nehrđajućih čelika. Kao i selen, on također potiče globularizaciju i širenje uključaka sulfida. Iako je telur sada prepoznat kao snažan modifikator sumpora, kao i aditiv za obradivost kada se koristi u kombinaciji s olovom i sumporom [6], on također ima nedostatak jer uzrokuje probleme s vrućom obradom austenitnih nehrđajućih čelika i nije korišten u komercijalne svrhe [7].

2. EKSPERIMENTALNI DIO

2.1. Metalografsko ispitivanje uzoraka u ljevanom stanju

Slika 1. Vakuumska indukcijska peć (VIP) 20 kg

Topljenje i livenje austenitnog nehrđajućeg čelika X8CrNiS18-9 vršeno je u vakuumskoj indukcijskoj peći kapaciteta 20 kg, maksimalne snage 40 kW (slika 1).

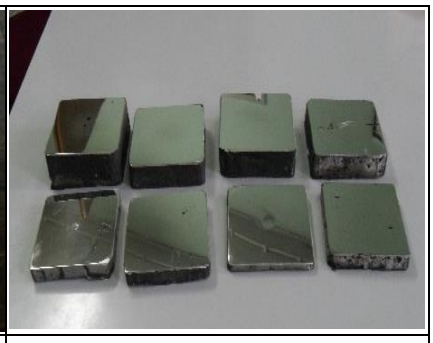
Peć je namijenjena za proizvodnju tečnog metala visoke čistoće, a nalazi se u Laboratoriju za preradu metala Instituta "Kemal Kapetanović".

Da bismo istražili mogućnost modifikacije nemetalnih uključaka mikrolegiranjem sa borom, cirkonijem i telurom planirano je da se uradi osam talina. Prva talina je austenitni nehrđajući čelik X8CrNiS18-9 bez ikakvih modifikatora. Nakon toga u slijedećih sedam talina izvršeno je modificiranje sastava sa odgovarajućim sadržajima bora, cirkonija i telura i to tako da svaki od navedenih elemenata bude dodat samostalno, a zatim u kombinacijama sa dva, te na kraju sa sva tri legirajuća elementa. Hemijske analize svih varijanti talina date su tabeli 1.

Tabela 1. Hemijske analize svih varijanti talina [8]

Oznaka taline	*Hemijski sastav (%)*									
	C	*Si*	*Mn*	*P*	*S*	*Cr*	*Ni*	*B*	*Zr*	*Te*
V 1759	0,03	0,42	0,61	0,021	0,18	18,3	9,4	–	–	–
V 1763	0,05	0,47	0,66	0,021	0,19	18,5	9,5	0,004	–	–
V 1764	0,04	0,35	0,75	0,021	0,17	18,8	9,4	–	0,016	–
V 1765	0,05	0,40	0,80	0,010	0,16	18,9	9,3	–	–	0,033
V 1769	0,04	0,49	0,69	0,012	0,17	18,5	9,1	0,004	0,009	–
V 1768	0,04	0,35	0,78	0,011	0,18	18,8	9,3	0,004	–	0,039
V 1770	0,03	0,47	0,72	0,012	0,18	18,5	8,9	–	0,007	0,040
V 1771	0,04	0,44	0,78	0,012	0,19	17,1	9,3	0,006	0,012	0,042

Slika 2. Ingot nakon rezanja ploče za metalografska ispitivanja [8]



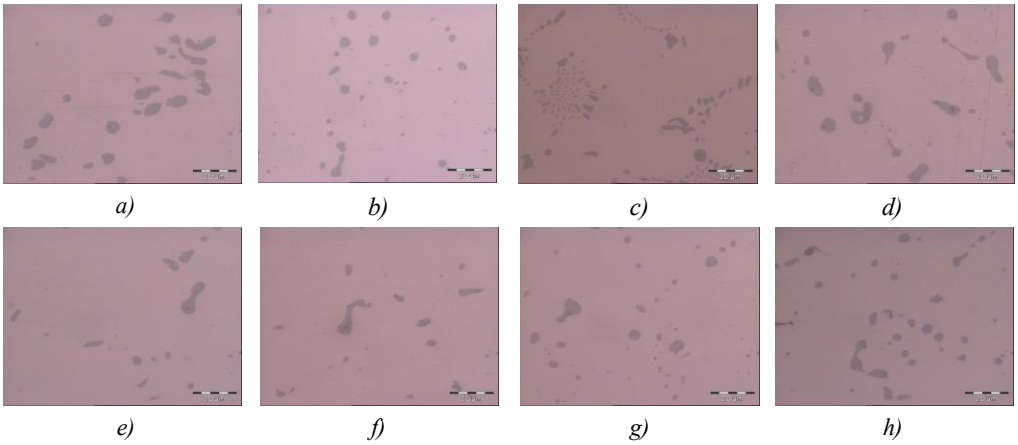
Slika 3. Uzorci za metalografska ispitivanja u ljevanom stanju [8]

Nakon očvršćavanja iz ingota su uzeti uzorci, neposredno uz glavu ingota, za metalografsko ispitivanje ljevanog stanja. Na slici 2. je predstavljen ingot V1759 nakon rezanja ploče za metalografska ispitivanja, dok su na slici 3. prikazani svi uzorci za metalografska ispitivanja u ljevanom stanju nakon završene pripreme (brušenja i poliranja). Nakon toga izvršena je analiza sadržaja, veličine i raspodjele nemetalnih uključaka u nenagriženom stanju, a rezultati ispitivanja dati su u tabeli 2. Na slikama su prikazani uključci prosječne veličine, dok su u tabeli 2 navedeni i pojedinačni uključci koji su znatno veći od prosječnih.

Tabela 2. Rezultati metalografskih ispitivanja uzoraka u ljevanom stanju [8]

Talina (Oznaka uzorka)	*Veličina uključaka sulfida (μm)*	*Napomena*	*Ukupan broj uključaka po zonama**		
			I	*II*	*III*
1 – ljevano	200,1; 150,0 90,0; 85,0 60,1; 55,5 40,8	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka; Poroznosti veličine 264 i 140μm	7	8	4
2 – ljevano	221,2; 125,7 92,8; 37,1	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka	7	5	6
3 – ljevano	115,3; 193,1 69,2	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka	3	3	6
4 – ljevano	162,1; 110,8 63,1	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka	1	5	7
5 – ljevano	64,0; 100,8 150,0; 104,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka	8	2	8
6 – ljevano	31,0; 25,0 120,0; 28,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka	3	1	2
7 – ljevano	54,0; 75,0 102,0; 168,0 184,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka	4	8	8
8 – ljevano	110,0; 90,0 80,0; 35,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka; Uočena poroznost	4	Sitni uključci	Sitni uključci

Snimanje uzoraka izvršeno je na optičkom mikroskopu tipa Olympus PMG3 (slike 4a – 4h).



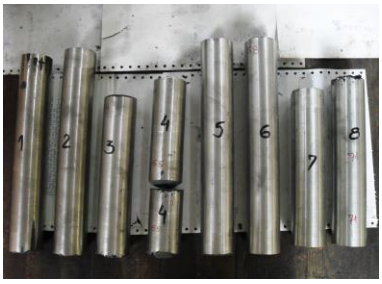
Slika 4. Uzorci u ljevanom stanju [8]

2.2. Metalografsko ispitivanje uzoraka u kovanom stanju

Prvi stepen deformacije, kovanje na presi i čekiću, se provodio do dimenzije cca ϕ 50 mm. Temperaturni interval kovanja je od 1149 – 1260 °C. Vrijeme dogrijavanja nakon zahlađenja ingota iznosi 10 min. Svi uzorci su prekovani na hidrauličnoj presi snage 44 kW (slika 5), dok je završno kovanje rađeno na zračnom čekiću snage 24 kW (slika 6) koji se nalaze u Laboratoriju preradu metala Instituta "Kemal Kapetanović". Uzorci nakon provedenog procesa kovanja i grube mašinske obrade prikazani su na slici 7.

Slika 5. Hidraulična presa

Slika 6. Zračni čekić

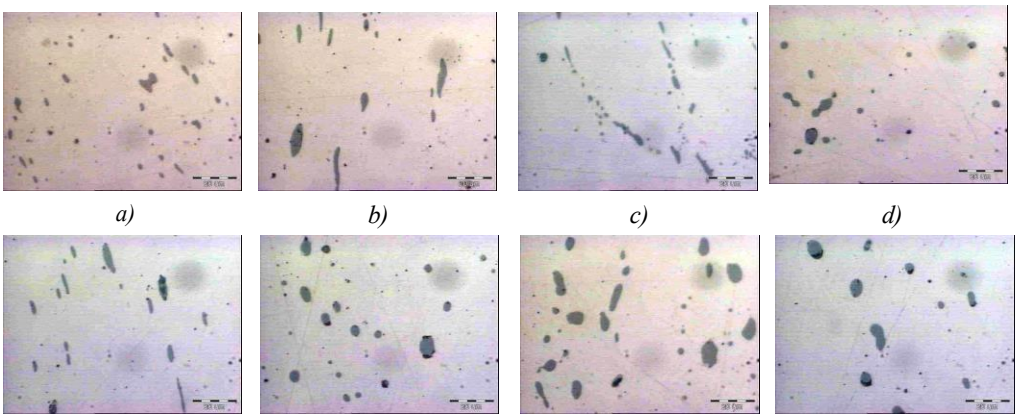


Slika 7. Uzorci nakon provedenog procesa kovanja i grube mašinske obrade [8]

Kao i kod ljevanih uzoraka izvršena je analiza sadržaja, veličine i raspodjele nemetalnih uključaka u nenagriženom stanju, a rezultati ispitivanja dati su u tabeli 3 i na slikama 8a do 8h.

Tabela 3. Rezultati metalografskih ispitivanja uzoraka u kovanom stanju [8]

Oznaka uzorka	*Veličina uključaka (μm)*	*Napomena*
1 – kovano	Kompleksni globularni uključci: 50,0; 90,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka
2 – kovano	Najduži sulfidni uključak: ~ 80,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka
3 – kovano	Kompleksni uključci: 50,0 x 20,0; 25,0 x 20,0 48,0 x 18,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka
4 – kovano	Globularni uključak: ~ 20,0 Kompleksni uključak: 139,0 x 30,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka
5 – kovano	Kompleksni uključak: 50,0 x 10,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka
6 – kovano	Kompleksni uključci: 63,0 x 18,0; 126,0 x 10,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka; Jedno gnijezdo kompleksnih uključaka
7 – kovano	Kompleksni uključci: 70,0 x 30,0; 150,0 x 30,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka
8 – kovano	Kompleksni uključci: 350,0 x 80,0; 50,0 x 20,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka



Slika 8. Uzorci u kovanom stanju [8]

2.3. Metalografsko ispitivanje uzoraka u valjanom stanju

Nakon kovanja, uzorci su podvrgnuti novom stepenu deformacije valjanjem. Do dimenzije koja je predviđena za polaznu dimenziju na valjaonici (22 x 46 mm) svi uzorci su prekovani na hidrauličnoj presi. Svi uzorci su nakon kovanja na presi vraćeni na dogrijavanje, te se, nakon dostizanja temperature neophodne za deformaciju, pristupilo valjanju.

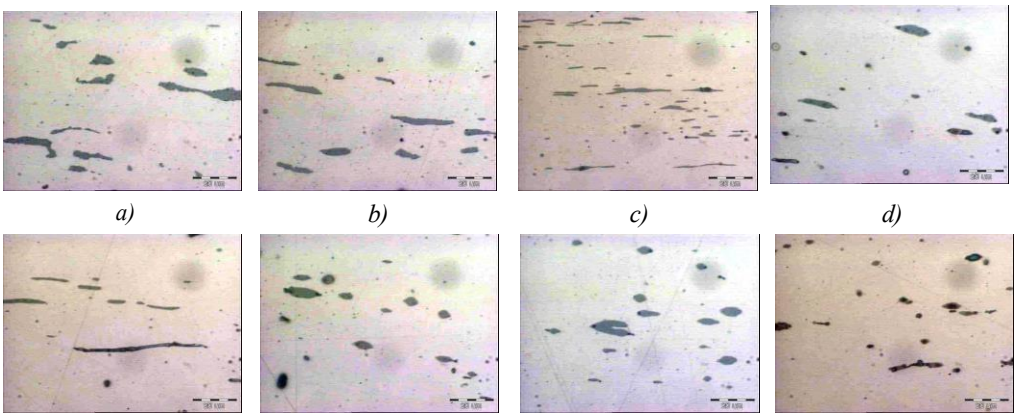
Slika 9. Valjanje uzoraka na SKET valjaonici

Slika 10. Uzorci nakon procesa valjanja [8]

Valjanje se vršilo na valjaonici SKET, pri čemu je prilikom prve provlake presjek uzoraka reduciran na 18 mm, dok je drugom provlakom postignuta konačna dimenzija uzoraka 14 x 50 mm. Brzina valjanja je iznosila 400 o/min. Nakon završetka valjanja svi uzorci su podvrgnuti gašenju u vodi, kako bi se izbjegao uticaj senzibilizacije. Svi uzorci su proizvoljne dužine zavisno o količini materijala po pojedinim varijantama. Na slici 9 prikazan je proces valjanja na navedenoj valjaonici, dok je na slici 10 prikazan izgled svih uzoraka nakon provedenog procesa valjanja.

Po završetku drugog stepena deformacije (valjanje na dimenzije 14 x 50 mm), uzeti su uzorci za provođenje metalografskih ispitivanja za valjano stanje. Izvršena je analiza sadržaja, veličine i raspodjele nemetalnih uključaka u nenagriženom stanju, a rezultati ispitivanja dati su u tabeli 4. Ispitivanje je izvršeno u skladu sa standardom ASTM E45-11 – Standardne ispitne metode za određivanje sadržaja uključaka u čeliku.

Ocjena sadržaja nemetalnih uključaka provedena je poređenjem sa skalom standarda ASTM E 45-11. Standard BAS EN 10088-1 ne propisuje granične vrijednosti za sadržaj nemetalnih uključaka. Snimanje uzoraka izvršeno je na optičkom mikroskopu tipa OLYMPUS PMG3 (slike 11a – 11h).



Slika 11. Uzorci u valjanom stanju [8]

Tabela 4. Rezultati metalografskih ispitivanja uzoraka u valjanom stanju (standard ASTM E45-11)[8]

Oznaka uzorka	Sulfidi		Napomena
	Tanki	Debeli	
1 – valjano	3	1,5	Uočeno mnogo sitnih sulfidnih uključaka čija je debljina manja od *2μm*. Uočen je i kompleksni uključak veličine *250 μm*.
2 – valjano	3	1	Uočeno mnogo sitnih sulfidnih uključaka čija je debljina manja od *2μm*.
3 – valjano	3	3	Uočeno mnogo sitnih sulfidnih uključaka čija je debljina manja od *2μm*. Uočen je i kompleksni oksisulfidni uključak veličine *500 μm*.
4 – valjano	3	3	Uočeno mnogo sitnih sulfidnih uključaka čija je debljina manja od *2μm*. Uočeni su i kompleksni uključci veličine: *600, 500, 300, 200 μm*.
5 – valjano	1,5	3	Uočeno mnogo sitnih sulfidnih uključaka čija je debljina manja od *2μm*. Uočeni su i kompleksni uključci veličine: *600, 300 μm*.
6 – valjano	1,5	1	Uočeno mnogo sitnih sulfidnih uključaka čija je debljina manja od *2μm*. Uočen je i kompleksni uključak veličine *150 μm*.
7 – valjano	1,5	3	Uočeno mnogo sitnih sulfidnih uključaka čija je debljina manja od *2μm*. Uočeni su i kompleksni uključci veličine: *600, 150, 60 μm*.
8 – valjano	1,5	3	Uočeno mnogo sitnih sulfidnih uključaka čija je debljina manja od *2μm*. Uočeni su i kompleksni uključci veličine: *500 μm*.

3. ZAKLJUČAK

Cilj istraživanja bio je analizirati sadržaj, veličinu i raspodjelu nemetalnih uključaka u nenagriženom stanju austenitnog nehrđajućeg čelika X8CrNiS18-9, sa i bez legiranja borom, cirkonijem i telurom. Pored toga, istraživan je i utjecaj gore

navedenih kemijskih elemenata na promjenu vrste i kemijskog sastava nemetalnih uključaka. Nakon provedenih ispitivanja, moguće je izvući sljedeće zaključke:

- Osnovne vrste uključaka u ovom čeliku su manganovi sulfidi.
- Utjecaj na oblik i veličinu nemetalnih uključaka posebno pokazuju cirkonij i telur.
- Dodavanje telura cirkoniju i boru poboljšava globularizaciju austenitnog nehrđajućeg čelika X8CrNiS18-9, u tom pogledu telur je posebno dominantan.
- Nemetalni uključci se mogu modificirati, posebno u kombinaciji sa telurom, čime se s jedne strane osigurava dobra mašinska obradivost, a s druge strane izbjegava negativan utjecaj na svojstva austenitnog nehrđajućeg čelika X8CrNiS18-9

4. REFERENCE:

[1] Stjepan Kožuh: "Special steels - script", University of Zagreb, Faculty of Metallurgy, Sisak, 2010

[2] N. Haračić: "Boron and low - alloy steels for cementation and direct hardening "- Mašinstvo4 (6), (2002), 215 – 226

[3] M. Taguchi, H. Sumitomo, R. Ishibashi, Y. Aono, Effect of Zirconium Oxide Addition on Mechanical Properties in Ultrafine Grained Ferritic Stainless Steels, *Materials Transactions*, Vol. 49, No. 6 (2008) pp. 1303 to 1310

[4] M. Makeshkumar, S.S. Mohamed Nazirudeen, P. Dhanapal, Investigation on micro-alloyed steels, International journal of advanced scientific research and technology, Issue 2, Volume 3, June 2012 Dostupno na: http://rspublication.com/ijst/june12/20.pdf [12.09.2025.]

[5] K. Hribar: Vpliv kovinskih in nekovinskih dodatkov na obliko vključkov in tehnološke lastnosti jekel, Magistrsko delo, Jesenice, 1981

[6] J. Grum: Quantitative analysis of sulphide inclusions in free cutting steels and their influence on machinability, *Acta Stereologica,* Volume 18, Number 3, p. 319-331

[7] D.Mujagić, A. Imamović, M. Oruč, S.Muhamedagić: Analysis of the type and chemical content of the inclusion on SEM of the stainless steel with and without the addition of Zr and Te: 4th International Conference „NEW TECHNOLOGIES NT-2018“ Development and Application, Sarajevo, 14-16. June 2018, 72-79

[8] D. Mujagić – "Contribution to research of influence microalloying with boron, zirconium and tellurium on properties of austenitic stainless steel with sulphur addition X8CrNiS18-9", PhD thesis, University of Zenica, Faculty of Metallurgy and Technology, Zenica, January 2017

GEOPOLIMERI – DOBIJANJE, KARAKTERISTIKE I PRIMJENA

GEOPOLYMERS – OBTAINING, CHARACTERISTICS AND APPLICATION

NADIRA BUŠATLIĆ, VANREDNI PROFESOR, ILHAN BUŠATLIĆ, REDOVNI PROFESOR, ADNAN MUJKANOVIĆ, REDOVNI PROFESOR, MARINA JOVANOVIĆ, REDOVNI PROFESOR

Fakultet inženjerstva i prirodnih nauka, Univerzitet u Zenici

Travnička cesta 1, Zenica

AMEL ZAHIROVIĆ, VIŠI ISTRAŽIVAČ SARADNIK

Institut „Kemal Kapetanović“, Univerzitet u Zenici

Travnička cesta 7, Zenica

REZIME

Vezivna sredstva su, danas, ključni materijali u građevinarstvu i građevinskoj industriji, a industrija portland cementa predstavlja industrijsku granu bez koje se ne može zamisliti razvoj ljudske civilizacije. Cement je jedan od najpopularnijih i široko primjenjivih građevinskih materijala.

U toku proizvodnje cementa, pečenje krečnjaka uzrokuje emisiju ugljen dioksida u atmosferu, što iznosi 5 % od ukupne emisije CO_2. Postoje dva izvora emisije ugljen dioksida uslijed proizvodnje cementa: sagorijevanje fosilnih goriva za pokretanje rotacione peći je najveći izvor, a drugi je hemijski proces pečenja krečnjaka. Prilikom proizvodnje 1 tone cementa, u atmosferu se emituje približno 1 tona CO_2. Ako uzmemo da je svjetska proizvodnja cementa oko 4,18 milijardi tona, onda se vidi da se prilikom proizvodnje cementa u atmosferu ispusti ista količina CO_2. Koncept "zelenog cementa" razvijen je kao zamjena za trenutne metode proizvodnje cementa. Zeleni cement koristi manje prirodnih sirovina, energije i vode i pojavljuje se kao zamjena za portland cement. Pod zelenim cementom se podrazumijeva cement koji se proizvodi uz što manju potrošnju prirodnih sirovina i fosilnih goriva, a uz maksimalno korištenje tehnogenih otpadnih materijala kao sirovine za proizvodnju cementa i alternativnih goriva umjesto fosilnih goriva. Kontinuirano se vrše

istraživanja za razvoj inovativnih metoda proizvodnje zelenog cementa u cilju smanjenja, i čak eliminisanja, emisije gasova koji pospješuju efekat staklene bašte i drugih toksičnih zagađujućih materija. U svakom sučaju, kako iz ekoloških tako i iz ekonomskih razloga, treba pribjegavati što je moguće većoj upotrebi ovih otpadnih materijala što za direktnu posljedicu ima manju eksploataciju prirodnih sirovina.

U ovom radu je dat pregled načina dobijanja, vrste, hemijskog mehanizma vezivanja i kvaliteta zelenog cementa, tzv. geopolimera. Primjena i razvoj geopolimera kao alternative klasičnim cementima sve je izglednija zbog niza problema vezanih za cementnu industriju. Osnovni problem je ekološkog karaktera zbog emisije CO_2, o kojoj je već naprijed rečeno. Nadalje, za proizvodnju cementa odnosno, sintezu klinker minerala (tzv. cementnog klinkera) koja se odvija pri temperaturi od oko 1450 °C, potrebna je velika količina energije, dok sinteza geopolimera „štedi energiju“ budući da se koriste otpadni materijali i prirodne sirovine koje ne zahtjevaju termičku obradu, a sam proces geopolimerizacije se odvija od 60 do 90 ^{0}C.

Ključne riječi: geopolimeri, zeleni cement, emisija CO_2, zaštita životne sredine

SUMMARY

Today, binders are key materials in the construction and building industry, and the Portland cement industry is an industry without which the development of human civilization cannot be imagined. Cement is one of the most popular and widely used construction materials.

During the production of cement, the burning of limestone causes the emission of carbon dioxide into the atmosphere, which amounts to 5% of the total CO2 emissions. There are two sources of carbon dioxide emissions from cement production: the combustion of fossil fuels to power the rotary kiln is the largest source, and the other is the chemical process of burning limestone. When producing 1 ton of cement, approximately 1 ton of CO2 is emitted into the atmosphere. If we assume that the world production of cement is about 4.18 billion tons, then it can be seen that the same amount of CO2 is released into the atmosphere during the production of cement. The concept of "green cement" was developed as an alternative to current cement production methods. Green cement uses less natural raw materials, energy and water and appears as a replacement for Portland cement. Green cement refers to cement that is produced with the lowest possible consumption of natural raw materials and fossil fuels, and with the maximum use of technogenic waste materials as raw materials for cement production and alternative fuels instead of fossil fuels. Research is continuously being conducted to develop innovative methods for the production of green cement in order to reduce, and even eliminate, emissions of gases that enhance the greenhouse effect and other toxic pollutants. In any case, for both environmental

and economic reasons, the use of these waste materials should be as large as possible, which directly results in less exploitation of natural raw materials.

This paper provides an overview of the method of production, type, chemical bonding mechanism and quality of green cement, so-called geopolymers. The application and development of geopolymers as an alternative to classic cements is increasingly likely due to a number of problems related to the cement industry. The main problem is of an environmental nature due to CO2 emissions, which has already been mentioned above. Furthermore, the production of cement, or rather the synthesis of clinker minerals (so-called cement clinker), which takes place at a temperature of around 1450 °C, requires a large amount of energy, while the synthesis of geopolymers "saves energy" since waste materials and natural raw materials that do not require thermal treatment are used, and the geopolymerization process itself takes place from 60 to 90 0C.

Keywords: geopolymers, green cement, CO2 emissions, environmental protectio

1. UVOD

Vezivna sredstva su, danas, ključni materijali u građevinarstvu i građevinskoj industriji, a industrija portland cementa predstavlja industrijsku granu bez koje se ne može zamisliti razvoj ljudske civilizacije.

Savremeno građevinarstvo u velikoj mjeri zavisi od upotrebe cementa kao osnovnog vezivnog materijala. Međutim, proizvodnja portland cementa je energetski intenzivan proces, pri kojem se oslobađaju velike količine ugljen-dioksida (CO_2), što direktno doprinosi globalnom zagrijavanju [8]. Tokom proizvodnje jedne tone cementa u atmosferu se emituje gotovo jednaka količina CO_2, što se, s obzirom na godišnju svjetsku proizvodnju od više milijardi tona, pretvara u ogroman ekološki problem [2]. Ako uzmemo da je svjetska proizvodnja cementa oko 4,18 milijardi tona, onda se vidi da se prilikom proizvodnje cementa u atmosferu ispusti ista količina CO_2 [5].

Razvoj ekološki prihvatljivih materijala, poznatih kao „zeleni cementi“, predstavlja jedno od ključnih rješenja za smanjenje zagađenja. U tom kontekstu, **geopolimeri** su se pokazali kao izuzetno obećavajuća alternativa portland cementu, jer se proizvode pri nižim temperaturama i koriste otpadne materijale kao sirovine (Zhang et al., 2022).

2. EKOLOŠKI IZAZOVI CEMENTNE INDUSTRIJE

Industrija cementa godišnje proizvede oko 4 milijarde tona cementa, uz prosječnu emisiju od oko 5 % ukupnih globalnih emisija CO_2 [4,5]. Najveći dio emisija potiče iz dva izvora:

1. **hemijska dekarbonizacija krečnjaka ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$)**, i
2. **sagorijevanje fosilnih goriva** za postizanje temperatura od oko 1450 °C u rotacionim pećima.

Osim emisije CO_2, proizvodnja cementa zahtijeva velike količine energije, vode i prirodnih sirovina, što dodatno opterećuje životnu sredinu. Zbog toga je intenzivno istraživanje održivih alternativa, poput geopolimera, postalo prioritet u građevinskoj industriji [3,5].

3. POJAM I ISTORIJAT GEOPOLIMERA

Termin **geopolimer** uveo je francuski naučnik Joseph Davidovits 1978. godine, opisujući materijale koji nastaju **alkalnom aktivacijom aluminijum-silikatnih komponenti** [2]. Za razliku od cementa, koji nastaje hidratacijom klinkera, geopolimeri se formiraju procesom polikondenzacije u alkalnoj sredini, obično na temperaturama od 60–90 °C.

Sirovine za sintezu geopolimera su prirodni i otpadni materijali bogati silicijem (Si) i aluminijem (Al), kao što su **leteći pepeo**, **visokopećna troska**, **metakaolin** i **vulkanski pepeo** [10]. Njihova upotreba omogućava smanjenje količine otpada i očuvanje prirodnih resursa.

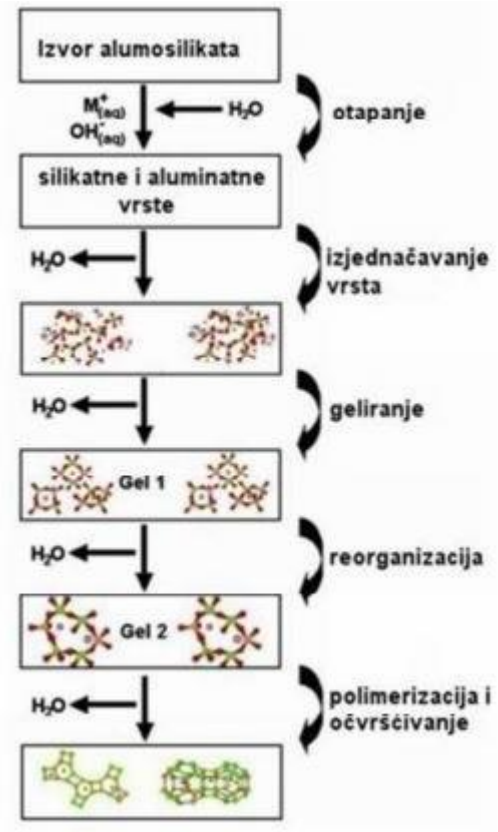
4. MEHANIZAM GEOPOLIMERIZACIJE

Proces formiranja geopolimera obuhvata tri glavna koraka:

1. **Rastvaranje** aluminijum-silikatnih struktura u alkalnom rastvoru (NaOH, KOH),
2. **Polikondenzaciju** nastalih monomera u trodimenzionalnu mrežu (Si–O–Al–O–Si),
3. **Očvršćavanje** pri umjerenim temperaturama (60–90 °C) [9].

Odnos između NaOH i natrijum-silikata (Na_2SiO_3) te molarni omjer Si/Al presudno utiču na krajnja svojstva materijala. Optimalni omjer Si/Al između 1,5 i 2,0 daje najveću mehaničku čvrstoću [1].

Jedan od modela geopolimerizacije, kojeg su predložili Duxson i saradnici, prikazan je na slici 1.



Slika 1. Duxsonov model geopolimerizacije [12]

Procesi koji su prikazani na slici, uglavnom se odvijajaju istovremeno. Aluminatni i silikatni produkti nastaju otapanjem čvrstog alumosilikatnog materijala proces alkalne hidrolize uz dodatak vode. Nakon otapanja, dolazi do stvaranja alumosilikatnih produkata, te se formira smjesa silikata, aluminata i alumosilikata. Pri visokom pH odvija se brzo otapanje alumosilikata i pri tom se stvara prezasićena alumosilikatna otopina, što dovodi do stvaranja geopolimernog gela. Pri ovom procesu oslobađa se voda. Nakon procesa geliranja, sistem se dalje preuređuje i reorganizuje uz nastanak alumosilikatnih struktura karakterističnih za geopolimere [12].

5. SVOJSTVA GEOPOLIMERA

Geopolimeri pokazuju **visoku pritisnu i savojnu čvrstoću**, odličnu **otpornost na hemijsku koroziju**, **vatrootpornost** i **dugotrajnu stabilnost**. U poređenju sa portland cementom, imaju veću otpornost na kiseline i sulfatne rastvore.

Njihova mikrostruktura je gušća, što smanjuje propusnost vode i povećava otpornost na smrzavanje i odmrzavanje. Osim toga, geopolimeri pokazuju izuzetnu **otpornost na visoke temperature** do 1000 °C, što ih čini pogodnim za primjenu u ekstremnim uslovima.

6. PRIMJENA GEOPOLIMERA

Zahvaljujući povoljnim svojstvima, geopolimeri nalaze široku primjenu:

- **U građevinarstvu**: kao betoni, malteri, blokovi i prefabrikovani elementi;
- **U zaštiti okoliša**: za imobilizaciju teških metala i radioaktivnog otpada [7];
- **U visokotehnološkim oblastima**: kao vatrostalni materijali i kompoziti za avionsku i automobilski industriju [11].

Primjena geopolimera direktno doprinosi smanjenju količine industrijskog otpada i zagađenja zraka, što ih čini značajnim elementom cirkularne ekonomije.

7. EKOLOŠKI I EKONOMSKI ASPEKTI

Prednost geopolimera ogleda se u nižim emisijama CO_2, manjoj potrošnji energije i većem iskorištenju otpada. Prema studijama, **proizvodnja geopolimera može smanjiti emisiju CO_2 i do 80 %** u odnosu na portland cement [3].

Iako je njihova komercijalna primjena još uvijek ograničena zbog troškova alkalnih aktivatora i standardizacije procesa, predviđa se značajan rast tržišta u narednim godinama [4].

8. ZAKLJUČAK

Geopolimeri predstavljaju izuzetno perspektivne materijale koji mogu značajno doprinijeti održivom razvoju građevinske industrije. Njihova proizvodnja koristi otpadne sirovine, zahtijeva manje energije i rezultira materijalima visoke čvrstoće i otpornosti. Dalji razvoj tehnologije, optimizacija receptura i uspostavljanje standarda omogućit će širu primjenu geopolimera kao **zelenog cementa budućnosti**.

9. REFERENCE

[1] Cheng, T., Zhang, H. & Wu, Z., *Effect of Si/Al ratio on mechanical properties of fly ash-based geopolymer*. Construction and Building Materials, 310, 125239, 2021.

[2]Davidovits, J., *Geopolymer Chemistry and Applications*. 6th ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2020.

[3]Habert, G., Miller, S.A. & Antoni, M., *Cement and Concrete Research for Sustainable Construction*. Journal of Cleaner Production, 2020, 263, 121–134.

[4]IEA, *Technology Roadmap – Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Paris: International Energy Agency, 2023

[5]Bušatlić, I., Bušatlić, N., Merdić, N, Haračić, N., Fundamentals of Chemistry and Technology of Portland Cement, Štamparija Fojnica d.d., Fojnica, 2020.

[6]Khater, H., *Fire and acid resistance of geopolymer materials*. Ceramics International,2020, 46(6), 7385–7394.

[7]Liew, Y.M., Heah, C.Y. & Kamarudin, H. *Immobilization of heavy metals in geopolymer matrices: A review*. Journal of Hazardous Materials, 2022, 427, 128074.

[8]Provis, J.L., *Green concrete or geopolymer concrete?*. Cement and Concrete Research, 2018, 114, 40–48.

[9]Provis, J.L. & Bernal, S.A., *Geopolymers and related alkali-activated materials*. Annual Review of Materials Research, 2019, 49, 305–329.

[10]Xu, H. & Van Deventer, J.S.J., *The geopolymerisation of alumino-silicate minerals*. International Journal of Mineral Processing, 2021, 203, 105–112.

[11]Zhang, Y. & Chen, W., *Advances in the development and application of geopolymer composites*. Construction and Building Materials, 2023, 370, 130682.

[12]Banožić I., (2016) Ravnoteža sorpcije bakrovih iona na geopolimeru, Diplomski rad, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split

KOLIKO JE „ZELEN“ VAŠ BIZNIS? ULOGA KONCEPTA OZELENJAVANJA BIZNISA U FUNKCIJI IZGRADNJE (ODRŽIVE) KONKURETNSKE PREDNOSTI

HOW „GREEN“ IS YOUR BUSINESS? THE ROLE OF THE GREENING BUSINESS CONCEPT IN BUILDING COMPETITIVE ADVANTAGE

Prof. dr. Dženan Kulović[1]

Prof. dr. Kasim Tatić[2]

Sažetak

Ova rad analizira koncept ozelenjavanja biznisa kao temelja sticanja održive konkurentske prednosti preduzeća. Uvodni dio rada ističe savremeno shvatanje poslovnog uspjeha pri čemu ostvarivanje profita nije primarni imperativ savremenog preduzeća. Kroz opis jedne posve nove uloge menadžera ovaj pristup nudi širu perspektivu u kojoj profit postaje sredstvo, a nikako jedini cilj poslovanja.Koncept ozelenjavanja biznisa razmatra se kroz njegov historijski razvoj, različite nijanse ekološke osviještenosti menadžmenta, te praktične mjere implementacije unutar savremenih organizacija. Posebna pažnja posvećena je standardu ISO 14001, koji predstavlja osnovu za izgradnju konkurentske prednosti preduzeća kroz eko-efikasnost, diferencijaciju proizvoda te razvoj eko-brandinga.Analizom najboljih praksi zaključujemo kako ozelenjavanje biznisa nije samo moralni ili regulatorni

[1] Ekonomski fakultet Univerziteta u Zenici, Fakultetska 3, 72.000 Zenica, Bosna i Hercegovina

[2]Ekonomski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Trg Oslobođenja-Alija Izetbegović1, 71.000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina.

zahtjev već strateški imperativ koji sve više postaje osnova izgradnje održive konkurentske prednosti preduzeća.

Ključne riječi: ozelenjavanje biznisa, konkurentska prednost, generičke strategije.

Summary

This paper analyzes the concept of greening business as the foundation for achieving sustainable competitive advantage in enterprises. The introductory section emphasizes the contemporary understanding of business success, where profit-making is no longer the primary imperative of modern companies. Through the description of an entirely new managerial role, this approach offers a broader perspective in which profit becomes a means rather than the sole purpose of business activity. The concept of greening business is examined through its historical development, different shades of managerial environmental awareness, and practical measures of implementation within modern organizations. Special attention is devoted to the ISO 14001 standard, which serves as the basis for building competitive advantage through eco-efficiency, product differentiation, and eco-branding. By analyzing best practices, we conclude that greening business is not merely a moral or regulatory requirement but a strategic imperative that increasingly underpins the development of sustainable competitive advantage in enterprises..

Keywords: *greening business, competitive advantage, generic strategies.*

1. UVOD

Posljednjih godina, ako ne već i više od pune decenije, definicija poslovnog uspjeha se polako, ali postojano mijenja, odnosno proširuje sa *koliko novca jedno preduzeće zarađuje*, na *na koji način preduzeće zarađuje taj novac*.Takva promjena u fokusu poslovanja posebno ističe ulogu menadžera zbog tog što upravo oni oblikuju načine na koje se poslovni ciljevi usklađuju s društvenim očekivanjima.Stoga je opravdano kazati kako nijedan posao nije od većeg značaja za naše društvo nego posao menadžera. On određuje hoće li nam naše društvene institucije biti od koristi ili će rasipati naše resurse (Mintzberg, 1990). Tako, od menadžera se zahtjevaproaktivan pristup rješavanju društvenih problema, tj. osim postojanja razloga „za“ i „protiv“ angažiranja preduzeća u društvu, postoje identični razlozi kod uključivanja menadžera u društvene akcije, odnosno socijalno okruženje. U sljedećoj tabeli navode se samo neki.

Tabela 1. Razlozi za i protiv angažiranje menadžera u društvu

Razlozi „za“ angažiranje menadžera u društvu
Preduzeća su: kreatori problema i treba da ih rješavaju, dio su društva, imaju novac za rješavanje problema, partneri u društvu i sa državom, moralni, preduzeća su odgovorna stakeholderima, dužna su razjasniti sopstveni interes, voditi razumnu investicionu politiku itd.
Razlozi „protiv“ angažiranje menadžera u društvu
Svrha poslovanja je: ostvarivanje profita, uključivanje u socijalne programe donosi moć i privilegije, moguć je konflikt interesa, nedostatak eksperata za socijalne programe, društveno angažovanje moglo bi smanjiti ekonomsku efikasnost, treba da imaju svoju autonomiju itd.

Dakle, kako je prikazano u tabeli 1, ova suprotstavljena gledišta jasno pokazuju kako se poslovanje više ne može posmatratiisključivo kroz prizmu profita. Mnoga preduzeća aktivno razdvajaju ekonomsku korist od društvene koristi vjerujući da će zbog toga biti na dobru glasu u lokalnoj zajednici. Iako je istina da sve

višepreduzećaželi svoje donacije učiniti strategijskim, mali ih je svoje donacije povezalo s područjima koja im povećavajuodrživu konkurentsku prednost. Nema sumnje kako takvi iskoraci uveliko otvaraju prilike za stjecanje konkurentske prednost nad kompanije koje nisu društveno osviještene (Pradeep, Kuckain, 2017). Međutim, veliki broj njihjoš uvijek nedovoljnoprimijenjuje svoje posebne prednosti kako bi maksimizirali ekonomsku korist i društvenu korist koju stvara njihovo dobrotvorstvo.Preduzeće treba biti društveno odgovorno u postizanju iznadprosječne profitabilnosti putem uvjerenja da je mogućepronaći konvergenciju (približavanje) između čisto ekonomske i čistodruštvene koristi (Porter, Kramer, 2002). Upravo iz tog konflikta interesa i očekivanja razvija se koncept „ozelenjivanja biznisa“, koji nastoji uskladiti ekonomske ciljeve s ekološkim i društvenim zahtjevima.

2. KONCEPT OZELENJAVANJA BIZNISA

Ozelenjivanje poslovanja (*greeningbusiness*) predstavlja proces u kojem preduzeća nastoje svoje poslovanje, proizvode i usluge uskladiti s principima održivog razvoja i zaštite okoliša. Ovaj koncept nastaje tek poktraj 20. stoljeća kada koncept održivog razvoja postaje sve izražajniji. Iako začetke savremenih „zelenih pokreta“ nalazimo već sredinom šezdesetih godina prošlog stoljeća, korporativnom sektoru je bilo potrebno gotovo dvije decenije da prihvati principe „ozelenjavanja“ i ugradi ih u vlastite poslovne modele i strategije, čime je nastao i termin „zeleni biznis“ (Čekanavičius, Bazytė, Dičmonaitė, 2014).Suština ovog koncepta ogleda se u prepoznavanju da dugoročna poslovna uspješnost ne može biti odvojena od odgovornog odnosa prema prirodnim resursima, društvu i budućim generacijama.Treba naglasiti da kupci sve više pokazuju zabrinutost zbog utjecaja koji proizvodi imaju na okoliš (Abanyam, Uwameiye, 2019). Stoga, koncept ozelenjavanja biznisa može se posmatrati kroz niz mjera koje smanjuju negativan utjecaj na okoliš i istovremeno donose ekonomsku korist kao što je model ponovne upotrebe resursa na kraju vrijednosnog lanca (Činjarević, Veselinović, Tatić, 2024). Mjere uključuju racionalno korištenje energije, vode i sirovina, optimizaciju procesa

proizvodnje, reciklažu i ponovnu upotrebu materijala, smanjenje emisije štetnih plinova i otpadnih voda ili ulaganje u obnovljive izvore energije.

Kako se preduzeća suočavaju sa složenošću svijeta koji se brzo mijenja, prihvatanje održivosti ne predstavlja samo usklađivanje s etičkim načelima, već i strateški imperativ za dugoročni uspjehodržive organizacije (Odeyemi, Usman, Mhlongo, Elufioye, Ike, 2024).Održiva organizacija je ona organizacija koja ima sposobnost zadovoljiti svoje sadašnje potrebe bez ugrožavanja sposobnosti budućih generacija da zadovolje svoje potrebe (Certo, Certo, 2025). Preduzeća koja usvoje ovaj koncept razvijaju i „zelene proizvode“ koji su energetski efikasniji, manje štetni po okoliš i zdravlje ljudi, te često imaju bolju tržišnu poziciju jer odgovaraju zahtjevima ekološki osviještenih kupaca i potrošača.Time održivost postaje važan element korporativnog imidža i brenda, povećavajući lojalnost kupaca i privlačnost kompanije kao poslodavca (Mangafić, Veselinović, Činjarević, 2025). Pojednostavljeno kazano, preduzeća koja svode na minumum negativan utjecaj svojih proizvoda na okoliš su zelena preduzeća(Viswanathan, Varghese, 2018). Međutim, uprkos ovom pojednostavljenom gledištu moramo priznati kako suština koncepta zelenog biznisa ostaje prilično nejasnašto potvrđuje i raznolikost njegovih definicija koje možemo pronaći u različitim izvorima. Razlogaima mnogo među kojima se ističe činjenica kako se ozelenjavanje biznisa i dalje u velikoj mjeri percipira kao dodatni teret kojipovećava troškove ili smanjuje prihoda dok druge razlogeuglavnompronalazimo u pogledu kulturnih, političkih i ekonomskih razlika koji su prisutni među državama (Čekanavičius, Bazytė, Dičmonaitė, 2014).

Kriterij „koliko je vaš biznis zelen“ postaje sve utjecajniji faktor kvaliteta proizvoda i procesa.Kada je riječ o utjecaju koji ima na okoliš, sve veći broj preduzeća usklađuje svoje sisteme upravljanja sa zahtjevima standarda ISO 14001, što predstavlja osnovni nivo razmišljanja. Stogapreduzeća sve više uviđaju da na toj osnovi mogu izgraditi konkurentsku prednost i na različite načine nastoje pridobiti pažnju i naklonost tržišta

(Ateljević, Kulović, Đoković, Bavčić, 2023). Time se konceptozelenjavanja biznisa uglavnom svodi na uvođenje EMS prema ISO 14001. „Zeleni biznis“ je termin koji se koristi za poduzetništvo i proizvodnju koji proizilaze iz principa održivog razvoja (Tatić, 2011). Shodno tome nastaju različiti nivoi „nijansi zelenog“ menadžmentakoji ukazuju na razlike u stepenu ekološke osviještenosti i spremnosti preduzeća da svoje poslovanje prilagodi zahtjevima održivog razvoja.

Analizirajući literaturu i najbolje prakse moguće jeprepoznati četiri osnovne nijanse koje se simbolično označavaju bojama– od svijetlozelene, koja predstavlja početne i minimalne oblike ekološkog angažmana – pa sve do tamnozelene, koja označava najviši nivo integrisane održivosti u poslovanju.Četiri osnovne nijanse su (Tatić, 2011):

(1) Zakonski pristup koji je najneosjetljiviji na ekološke probleme sa primarnim fokusom na poštivanje zakonskih propisa. Preduzeća koja se vode ovim pristupom imaju nizak nivo svijesti o važnosti održivog poslovanja;

(2) Tržišni pristup koji je fokusiran na ostvarivanje konkurentske prednosti preduzeća uzimaju u obzir zahtjeve potrošača. Pritisak tržišta u pogledu osviještenosti potrošača koji nameće izazove preduzećima današnjice;

(3) *Stakeholderski* pristup koji je fokusiran na različite interesne grupe nastojeći balansirati brojne interesne zahtjeve. Nastoje se zadovoljiti preferencije koje iskazuju ključnih *stakeholderi* putem svojih raznovrsnih interesa.

(4) Aktivistički pristup koji je fokusiran na uspostavljanje novih paradigmi poslovanja fundiranim na (disruptivnim) inovacijama.Kreiranje poslovne strategije temeljene na ekološki prihvatljivim ciljevima unutar kojih preduzećestvara dodatnu vrijednost.

Nivo nijanse zelene određuje nivo ekološke svijesti preduzeća pri čemu je cilj obavljati poslovne aktivnosti na način koji će smanjiti degradaciju okoliša i obezbijediti bolji okoliš za buduće generacije (Tatić, 2011).Poslije integracije koncepta ozelenjavanja biznisa unutar poslovnih procesa važno je postići integraciju svih funkcija unutar organizacijske strukture preduzeća. Krosfunkcionalna saradnja ima direktan utjecaj na smanjenje troškova i povećanje efikasnosti. Nakon uvođenja različitih okolinskih standarda raste potreba ozelenjavanja biznisa pri čemu je važno razlikovati štetne od korisnih odnosa (Müller, 2004).Dobra upravljačka praksa u preduzećima pokazuje kako se utjecaji na okoliš mogu kontrolisati, rizici smanjiti, a koristi ostvariti ako se uvedu odgovarajući upravljački sistemi i procesi. Dosadašnja praksa i iskustva preduzeća u vezi sa problematikom zaštite okoliša su različita. Neka preduzeća su u tom pogledu jako uznapredovala, a neka tek započinju razmišljati o tom aspektu svog poslovanja (Tatić, 2011).Zbog toga su navedene preporuke podijeljene u tri grupe, te sadrže sljedeće korake za uspostavljanje dobre prakse zaštite okoliša što je predstavljeno u sljedećoj tabeli.

Tabela 2.Preporuke za preduzeća u cilju uspostavljanje dobre prakse zaštite okoliša

1. Preduzeća koja tek počinju unapređivati uticaj na okoliš
Osigurati aktivnu potporu top-menadžmenta preduzeća koje treba upravljati utjecajem preduzeća na okoliš i društvo u kontekstu osnovnih proizvoda i usluga preduzeća. Izraditi početnu analizu stanja preduzeća u odnosu prema zaštiti okoliša. Pobrinuti se da top-menadžeri dobije zadatak da u ime uprave bude odgovoran za uvođenje unapređenja.
2. Preduzeća koja žele ostvariti više od osnovnih uslova
Izraditi politiku zaštite okoliša, te je iskomunicrati, posebno zaposlenicima. Odrediti prioritete i postaviti ciljeve koji će dovesti do poboljšanja.

Osigurati dovoljno sredstava koja će biti potrebna za postizanje navedenih ciljeva.
Pokrenuti program za zaposlenike radi postizanja potrebnog nivoa svijesti među njima, te im osigurati pomoć u provođenju takvog programa.
Komunicirati s drugim tijelima i organizacijama u društvu i zajednici, redovno ih izvještavati i uključiti ih u svoje programe.
3. Preduzeća kojima je cilj daljnje povećanja uspješnosti
Preuzeti obavezu stalnog unapređenja na ovom području.
U procesu razvoja novih proizvoda ili usluga, te pri donošenju strateških odluka uzimati u obzir njihov mogući uticaj na okoliš.
Formalizirati dokumentaciju sistema upravljanja okolišem, te izvršiti njenu verifikaciju od strane renomirane treće strane. Ako je moguće i formalno certificirati sistem upravljanja okolišem po normi ISO 14001 ili EMAS.
Razviti programe za dobavljače, kako bi se poboljšanja uvela u sva područja poslovnog procesa.
Razmjenjivati primjere najbolje prakse s drugima, te biti predvodnik u svom sektoru i zagovornik u angažovanju drugih preduzeća i sektora u ovom području.
Angažovati se u pregovorima s državnom upravom u stvaranju preduslova i infrastrukture na potpun prelazak na koncept održivog razvoja.

Izvor: Tatić, 2011, 172

Dakle, kako je prikazamo u tabeli 2, verificiranje potencijala preduzeća da zadovolji okolinske zahtjeve u pogledu ozelenjavanja biznisa važno je sačiniti dijagnostički pristup. Tržišne i netržišne procjene okoliša su danas jako važne i tražene (Goodstein, 2003). Važno je uključiti domete standarda kvaliteta koji sadrže vrijedne koncepte koje je važno upotrijebiti u poslovanju preduzeća.Sve razlike među preduzećima u pogledu troškova, ili cijena proističu iz stotina aktivnosti potrebnih da se osmisle, proizvedu, prodaju i isporuče njihovi proizvodi ili usluge, kao što su usluge kupcima, montaža finalnih proizvoda i obuka zaposlenih. Ekonomskom analizom menadžerskih odluka vezanih za okolišna pitanjima moguće je mjeriti troškove i

koristi EMS-a te utvrditi koliko oni utječu na rast ili pad dioničarske vrijednosti.Stvaranje vrijednosti uporedo sa dodatnim smanjenjem negativnog okolinskog uticaja može se smatrati održivim razvojem sa stanovišta preduzeća što je prikazano u sljedećoj tabeli.

Tabela 3. Menadžerske odluke i vrijednost preduzeća

Odluke	**Poslovanje**	**Investicije**	**Finansiranje**
Faktor vrijednosti	Rast prodaje Profitna marža Poreska stopa	Investicije u obrtni kapital Investicije u fiksni kapital	Trošak kapitala (pozajmljeni i osnivački kapital)
Stvaranje vrijednosti	Slobodni novčani tok		Diskontna stopa
Vrijednost preduzeća	∑ Diskontovani slobodni novčani tok		
Dioničarska vrijednost	Vrijednost preduzeća - Pozajmljeni kapital		

Izvor: Tatić, 2011: 163.

Dakle, kako je prikazano u tabeli 3, vrijednost preduzeća ne stvara se samo kroz prodaju i profit, nego kroz integrisano djelovanje poslovnih, investicionih i finansijskih odluka koje su značajne za dugoročno poslovanje preduzeća. Poslovanje generiše prihode i profit, investicije osiguravaju budući rast, dok finansiranje određuje koliko taj rast i stjecanje vrijednosti košta. Sve tri dimenzije zajedno određuju krajnju vrijednost koju dijele vlasnici kapitala ili investitori. Budući da očuvanje vrijednosti zavisi od sposobnosti preduzeća da upravlja ekološkim rizicima sve se više pažnje posvećuje standardima zaštite okoliša. Kada se govori o utjecaju na životnu sredinu, sve veći broj preduzeća sisteme menadžmenta životnom sredinom usaglašava sa zahtjevima standarda ISO 14001, što predstavlja bazični nivo razmišljanja. Što se tiče utjecaja na društvo u kome posluju (lokalno, regionalno, nacionalno, globalno), preduzeća sve višeshvataju da konkurentsku prednost mogu

veoma dobro graditi upravo na tom osnovu, te na različitenačineulažu napore za stjecanje tržišnepažnje i naklonosti (Hadžiahmetović, Kulović, Brdarević, 2009).[23]

3. IZGRADNJA (ODRŽIVE) KONKURENTSKE PREDNOSTI

Koncept izgradnje konkurentske prednosti je vrlo suptilan proces koji podrazumijeva kompleksnu ravnotežu između internih sposobnosti preduzeća te vanjskih zahtjeva tržišta. (Ateljević, Kulović, Đoković, Bavčić, 2023). Stoga konkuretska prednost postoji kada preduzeće ima troškovno povoljniju poziciju nego konkurenti, ili raspolaže nekom jedinstvenošću koji kupci traže (Tipurić, 2014).Stjecati konkurentsku prednost znači da preduzeće može proizvesti proizvod uz manje troškove od svojih konkurenata ili može ponuditi proizvod koji njegovi kupci vrednuju više od proizvoda konkurenata (Porter, 1996).Kroz koncept ozelenjavanja biznisa preduzeće razvija proizvode s dodanom ekološkom vrijednošću, što postaje izvor diferencijacije i konkurentske prednosti (Karagülle, 2012).Preduzeća koja implementiraju EMS ostvaruju tržišnu prednost nad konkurentima na dva bazična načina (Ateljević, Kulović, 2015):

(1) putem niskih troškova proizvoda uz prihvatljiv kvalitet što čini prednost pred ostalim konkurentima koji to ne mogu pružiti kupcima. Kupci će se prikloniti takvoj ponudi i kupovati više i time zauzvrat ostvariti veće profitabilnost proizvođaču.

(2) putem diferencijacije proizvoda koja se zasniva na izgradnji dodatnih vrijednosti proizvoda koje iako najčešće vode višoj cijeni, vode i višem kvalitetu, kojeg proizvođači najčešće zaštićuju markom. Razvijanje

diferencije kao izvora konkurentske prednosti dugoročan je proces koji zahtijeva velika izdvajanja u istraživačko-razvojnu aktivnost.

Kada ovaj model nadopunimo faktorom održivosti dolazimo do modifikovane matrice strategija koje preduzećima stoje na raspolaganju pri postizanju konkurentske prednosti što prikazuje sljedeća slika.

Slika 1. Porterova modifikovana matrica

Konkurentske prednosti		Procesi	Proizvodi i usluge
	Niski troškovi	Eko-efikasnost	Troškovno vođstvo
	Diferencijacija	Fokusirana diferencijacija	Eko-branding

Ključne kompetencije

Izvor: Tatić, 2011:168

Kombinacijom konkurentske prednosti i ključnih kompetencija nastaje modificirana matrica koja uključuje sljedeće strategije (Porter, van der Linde, 1995): Strategija eko-efikasnosti kompanije ima težnju zadovoljavanja proizvodnih potreba uz potrošnju manje okolinskihresursa, (2) Strategija eko-brandinga na temelju okolinskih karakteristika proizvoda postaje sve češća među potrošačima koji imaju razvijenu svijest, (3) Strategija fokusirane diferencijacije preduzeća umjerena je na preduzeća koja ne žele samo učiniti svoje proizvodne procese okolinski efikasnim, već o tome i obavjestiti javnost i (4) Strategija troškovnogvođstva fokus stavlja na smanjenje troškova putem identifikovanja i eliminisanjapokretačatroškova.Za preduzeće koje želi unaprijediti performanse u odnosu na konkurente nisu više dovoljni samo standardi. Ako preduzeće želi ocijeniti kvalitet okolinskog sistema, dovoljni kriteriji su ISO 14001, ali ako želi provjeriri efikasnost svog okolinskog sistema, tada mora analizirati i stanovišta *stakeholdera*. Veoma je bitno da je

okolinska strategija preduzeća jasna, da motivira kupce da kupuju proizvod preduzeća te da su kupci uvjereni u prednosti proizvoda. Preduzeće svojom održivom okolinskom strategijom dokazuje da je zaista jedno od „zelenih“ (Tatić, 2011).

4. ZAKLJUČAK

Koncept ozelenjavanja biznisa predstavlja nezaobilazan proces savremenog upravljanja i strateškog pozicioniranja preduzeća koji omogućava stvaranja održive konkurentske prednosti. Iako su mišljenja o razlozima uključivanja menadžera u društvene akcije podijeljena postaje jasno da održivost postaje temelj dugoročnog poslovnog uspjeha. Preduzeća koja uspijevaju da razviju zelene proizvode, uvode sisteme menadžmenta zaštite okoliša te ulažu u inovacije ne samo da smanjuju svoj negativan ekološki otisak, nego istovremeno stvaraju temelje za izgradnju održive konkurentske prednosti. Različite nijanse na kojima počiva zeleni menadžment ukazuju da postoji čitav spektar pristupa – od minimalnog poštivanja zakona do aktivističkog liderstva – koje se temelji na konceptu stalnih inovacija. Međutim, važno je naglasiti kako jedino integrisan pristup, koji povezuje ekonomske, društvene i ekološke dimenzije, može obezbijediti održiv rast i stvaranje vrijednosti za sve zainteresovane strane. Stoga je ozelenjavanje biznisa više od prolaznog trenda: ono je dugoročna poslovna i društvena nužnost.

LITERATURA

Abanyam, F. E., Uwameiye, R. (2019). Green businessbestpractices for enterprisessustainabilityinSouth-South, Nigeria. *International Journal of Business Marketing and Management, 4*(3), 17-25.

Ateljević, J., Kulović, Dž., Đoković, F., Bavčić, M., 2023. *Business strategyandcompetitiveadvantage: A reinterpretationof Michael Porter'swork.*New York-London: Routledge.

Ateljević, J., Kulović, Dž. (2015). *Razumijevanje Michaela Portera: Doprinos strategijskom menadžmentu*. Sarajevo: Perfecta.

Certo, S., Certo, S. P. (2025). *Moderni menadžment: koncepti i vještine*. Zagreb: MATE

Čekanavičius, L., Bazytė, R., Dičmonaitė, A. (2014). Green Business: ChallengesandPractices. *Ekonomika, 93*(1), 74-88.

Činjarević, M., Veselinović, L., Tatić, K. (2024). *Menadžerskaekonomomija: putovanje jednog menadžera svijetom menadžerske ekonomije*. Sarajevo: Ekonomski fakultet.

Goodstein, E. S. (2003). *Ekonomika okoliša*. Zagreb: Mate

Hadžiahmetović, Z., Kulović, Dž., Brdarević, F. (2009). *Savremeni korporativni menadžment*. Sarajevo: Centar za napredne studije

Karagülle, A. Ö. (2012). Green business for sustainable development andcompetitiveness: AnoverviewofTurkishlogisticsindustry. *Procedia:SocialandBehavioralSciences*, 41, 456-460.

Mangafić, J., Veselinović, Lj., Činjarević, M. (2025). *Cirkularni poslovni modeli*. Sarajevo: Ekonomski fakultet.

Mintzberg, H. (1990). Themanager'sjob: Folklore andfact. *Harvard Business Review*, 68(2), 163–176.

Müller, H. (2004). *Turizam i ekologija*. Zagreb: Masmedia

Odeyemi, O., Usman, F. O., Mhlongo, N. Z., Elufioye, O. A., Ike, C. U. (2024). Sustainableentrepreneurship: A reviewofgreenbusinesspracticesandenvironmentalimpact. *World Journal of Advanced Research andReviews*, 21(2), 346-358.

Porter, M. E. (1996). Whatisstrategy? *Harvard Business Review, 74*(6), 61–78.

Porter, M. E., & van der Linde, C. (1995). Green and competitive: Ending the stalemate. *Harvard Business Review, 73*(5), 120–134.

Porter, M. E., Kramer, M. R. (2002). Thecompetitiveadvantageofcorporatephilanthropy. *Harvard Business Review, 80*(12), 56–68.

Pradeep, M. D., Kuckian, A. S. A. (2017). Goinggreeninbusiness — A study on theeco-friendlyinitiativestowardssustainable development in India. *International Journal of Applied Engineeringand Management Letters*, 1(2), 40-50.

Tatić, K. (2008). *Menadžerska ekonomija*. Sarajevo: Ekonomski fakultet u Sarajevu.

Tipurić, D. (2014). *Iluzija strategije: Razotkrivanje socijalne zbilje poduzeća*. Zagreb: Sinergija.

Viswanathan, L., Varghese, G. (2018). Greeningofbusiness: A steptowardssustainability. *Journal ofPublicAffairs*, 18(2), 1-6.

ZNAČAJ I POTREBA METALOGRAFSKIH ISPITIVANJA KVALITETA MATERIJALA U CILJU OSIGURANJA KVALITETA PROIZVODA

SIGNIFICANCE AND NECESSITY OF METALLOGRAPHIC TESTING OF MATERIAL QUALITY IN ORDER TO ENSURE PRODUCT QUALITY

v.prof.dr. Belma Fakić, viši naučni saradnik

Univerzitet u Zenici

Institut „Kemal Kapetanović“ u Zenici, Travnička cesta 7, 72000 Zenica

Mr.met.mat. Adisa Burić, viši istraživač saradnik

Edib Horoz, dipl.inž.mat.

Univerzitet u Zenici

Institut „Kemal Kapetanović“ u Zenici, Travnička cesta 7, 72000 Zenica

REZIME

Poznavanje određenih svojstava materijala ima veoma veliki utjecaj na dizajniranje proizvoda i njegovu primjenu. Dizajniranje materijala i proizvoda u cilju zadovoljavanja određenih specifikacija ostvaruje se kroz ispitivanje hemijskih, tehnoloških, mehaničkih i fizikalnih svojstava. Kontrola kvaliteta proizvoda u toku eksploatacije i procjena preostalog životnog vijeka je od ogromnog značaja za rad postrojenja i konstrukcija. Poznavanje veze između načina proizvodnje, hemijskog sastava, procesa mehaničke obrade, mikrostrukture i mehaničkih svojstava kod izbora materijala je bitno za zadovoljenje tehničkih specifikacija dizajna proizvoda i konstrukcione komponente. U ovom radu su navedeni samo neki primjeri metalografskih ispitivanja i njihov značaj na kvalitet proizvoda.

Ključne riječi: uzorak, mikrostruktura, metalografska ispitivanja, čelik

SUMMARY

Knowledge of certain material properties has a great influence on product design and its application. Designing materials and products in order to meet certain specifications is achieved through testing of chemical, technological, mechanical and physical properties. Product quality control during exploitation and assessment of remaining life is of great importance for the operation of plants and constructions. Knowledge of the connection between the method of production, chemical composition, mechanical processing, microstructure and mechanical properties in the selection of materials is essential for meeting the technical specifications of product design and structural components. In this paper, only some examples of metallographic tests and their importance on product quality are listed.

Key words: sample, microstructure, metallographic tests, steel

1. UVOD

Metalografija je nauka o metalima koja izučava zavisnost između strukture i svojstava metala i legura. Obuhvata tehnike rezanja, brušenja i poliranja uzoraka za ispitivanje, ispitivanja pripremljene površine primjenom svjetlosnih i skenirajućih mikroskopa te interpretaciju uočenih stanja ispitne površine uzorka.

2. PRIPREMA UZORAKA

Važan korak u metalografskom ispitivanju je priprema uzoraka. Odgovarajućom pripremom ispitne površine se osigurava dobivanje korektnog rezultata ispitivanja. Priprema uzorka obuhvata uzorkovanje, rezanje, brušenje, poliranje i nagrizanje. Pravilan izbor uzorka iz dostavljenog ispitnog komada i odgovarajuća priprema površine uzorka osigurava statistički pouzdan opis kvaliteta materijala.

Pri izboru uzorka za ispitivanje treba se voditi računa o broju, lokaciji i orijentaciji površine za ispitivanje. Rezanje, brušenje i poliranje uzoraka su koraci pripreme ispitne površine sa ciljem dobivanja ogledalasto glatke i sjajne površine. Prilikom pripreme ne smiju se stvoriti defekti površine koji bi mogli uzrokovati pogrešno tumačenje stanja ispitne površine.

Rezanje uzoraka provodi se dijamantskom reznom pločom kojom se dobiva ispitna rezna površina bez grubih riseva. Brušenje ispitne površine provodi se na brusnom papiru na kom su nanešene čestice SiC, i to od papira veće do finije gradacije (180SiC, 240SiC, 400SiC, 600SiC do 1000SiC). Poliranje ispitne površine provodi se na odgovarajućim platnima uz nanošenje dijamantske suspenzije i lubrikanta.

Dijamantska suspenzija koja se koristi je najčešće gradacije 9 i 6 mikrona za grubo poliranje, te 3 i 1 mikron za fino, završno poliranje.

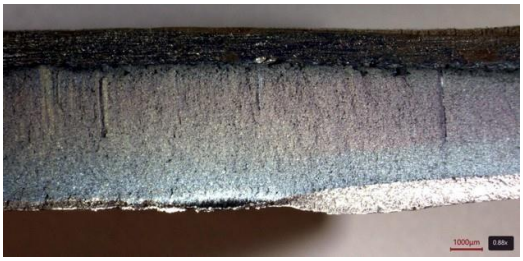
Poslije svakog koraka ispitna površina se pere pod mlazom vode, vatom i sa deterdžentom za suđe.

3. ISPITIVANJE ČISTOĆE

U poliranom, nenagriženom stanju ispituje se prisustvo poroznosti i nemetalnih uključaka. Prisustvo poroznosti i nemetalnih uključaka utječe na mehanička svojstva, jer njihovo prisustvo prekida metalnu vezu u materijalu.

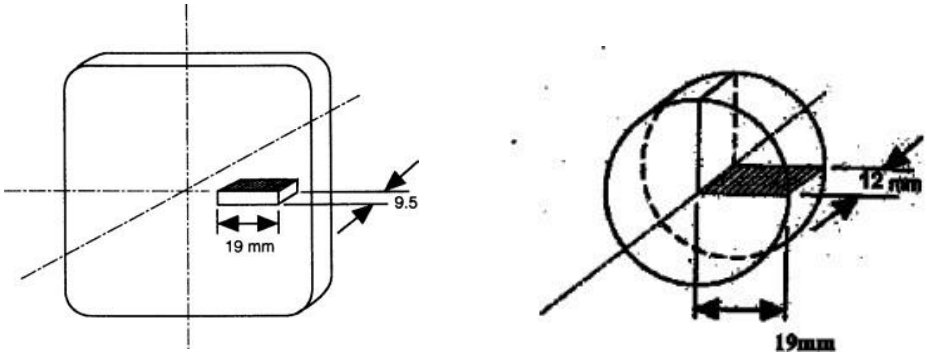
Za određivanje stepena čistoće metalnih legura, sačinjeni su različiti uporedni nizovi za poređenje uključaka troske, koji omogućavaju da se brojno odrede količina i raspodjela nemetalnih uključaka. Pri ocjeni sadržaja nemetalnih uključaka treba praviti razliku između uključaka koji se mogu plastično deformisati i krtih, zrnastih uključaka. U plastične uključke se ubrajaju sulfidi, ali i poneki silikati, dok krte uključke čine oksidi i većim delom kompleksni silikati [1].

Ocjena makro nemetalnih uključaka u čeliku provodi se pri povećanjima do 50 puta, primjenom stereo svjetlosnog mikroskopa. Izgled makro nemetalnih uključaka u čeliku dat je na slici 1. Ocjena stanja materijala vezano za prisustvo makro nemetalnih uključaka provodi se u skladu sa standardom BAS ISO 3763:1999. Makro nemetalni ukjučci negativno utječu na hladnu preradu metala jer mogu dovesti do pojave pukotina [2].



Slika 1. Plavi lom, makro nemetalni uključci [3]

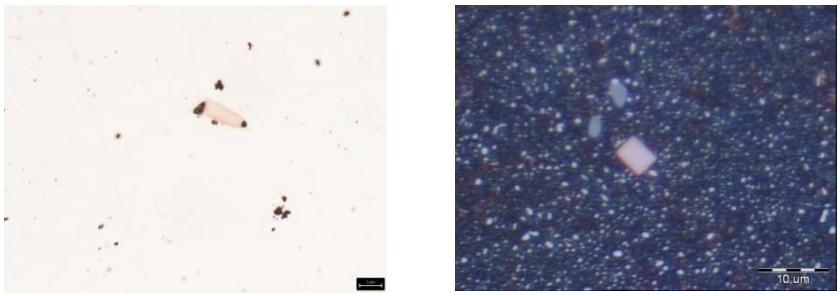
Lokacija uzimanja uzoraka za ispitivanje sadržaja mikro nemetalnih uključaka zavisi od dimenzija reprezentativnog uzorka, što je dato standardom za ispitivanje BAS EN ISO 4967. Ispitna površina koja se posmatra na svjetlosnom mikroskopu je uzdužna, odnosno paralelna sa smjerom plastične prerade. Na slici 2. je dat izgled lokacije uzorka za ispitivanje sadržaja nemetalnih uključaka.



Slika 2. Uzorkovanje za ispitivanje sadržaja nemetalnih uključaka [4,5].

Ocjena sadržaja nemetalnih uključaka provodi se poređenjem sa referentnim skalama datim u međunardnom standardu BAS ISO 4967:2014. Primjer izgleda mikro nemetalnih uključaka u čeliku dat je na slici 3.

Sulfidi	*Aluminati*	*Oksid*
Tip A	*Tip B*	*Tip D*



Titan karbonitrid

Slika 3. Izgled nemetalnih uključaka u čeliku [3]

Sulfidni nemetalni uključci se prilikom plastične deformacije izdužuju u nizove koji prate tok deformacije [6], dok su aluminatni nemetalni uključci krti i u toku mehaničke prerade se lome.

Uključci se mogu razlikovati po nivou sive boje i obliku primjenom svjetlosnog mikroskopa, a njihov tačan hemijski sastav i kristalografija mogu se detaljnije odrediti elektronskim mikroskopom.

Nemetalni uključci su prisutni u svim vrstama čelika i srodnih legura u većoj ili manjoj mjeri i mogu biti endogeni i egzogeni. Endogeni uključci nastaju u čelicima kao rezultat metalurških reakcija koje se odvijaju unutar tečne taline, kao i između hemijskih spojeva prisutnih u čeliku dok se hladi i stvrdnjava. Ove reakcije se mogu dogoditi s legirajućim elementima, plinovima ili s nečistoćama unesenim iz recikliranog materijala.

Egzogeni uključci u čelik dospijevaju spolja iz komada vatrostalnih obloga, troske i šljake s kojima rastopljeni čelik dolazi u kontakt. Ovi uključci su nepravilnog oblika i složene strukture [6,7,8].

Nemetalni uključci mogu biti oksidi, sulfidi, silikati, aluminati, nitridi ili brojni drugi nemetalni spojevi, a svaki uključak može sadržavati više različitih faza. Uprkos tome što nemetalni uključci čine mali dio ukupne zapremine čelika, oni imaju veliki utjecaj na mehanička svojstva. Uključci mogu imati pozitivne efekte (npr. poboljšanje obradivosti u čelicima za obradu na automatima koji su legirani sumporom u cilju olakšavanja mašinske obrade i lakšeg kidanja strugotine), ali mnogo češće imaju negativne efekte.

Štetni efekti koje uzrokuje prisustvo nemetalnih uključaka uključuje pogoršavanje mehaničkih svojstava i smanjenje dinamičke žilavosti loma, smanjenu apsorpciju utrošene energije udara i smanjenu lokalnu otpornost na koroziju, što određivanje vrste, sadržaja i distribucije uključaka čini ključnim za osiguranje dobrih performansi materijala i proizvoda u eksploataciji.

Nemetalni uključci pogoršavaju i zavarljivost, magnetnu permeabilnost, električnu provodljivost jer narušavaju kontinuitet metalne osnove i mogu biti inicijalna mjesta za nastanak pukotina.

4. ZNAČAJ STANJA MIKROSTRUKTURE LEGURA ŽELJEZA

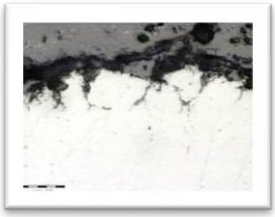
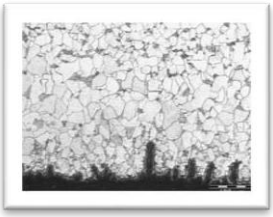
Najvažniji aspekt stanja materijala je mikrostruktura koja je posljedica hemijskog sastava, procesa proizvodnje, mehaničke prerade i termičke obrade. Stanje mikrostrukture materijala je odlučujuće za njegova upotrebna svojstva.

Posmatranje mikrostrukture provodi se nakon nagrizanja ispitne površine uzorka. Za otkrivanje mikrostrukturnih konstituenata biraju se različiti reagensi što zavisi od toga koji se materijal ispituje i šta je predmet ispitivanja.

Poznato je nagrizanje granica zrna, površinsko nagrizanje, termičko nagrizanje postupkom bojenja, elektrolitičko te doboko nagrizanje.

Promjene stanja materijala u eksploatacionim uslovima i utvrđivanje preostalog životnog vijeka komponente može se utvrditi kroz promjene stanja mikrostrukture.

Izgled mikrostrukturnih promjena na zidovima cijevi koje su bile u dugotrajnoj eksploataciji u termoenergetskim postrojenjima dat je na slici 4.

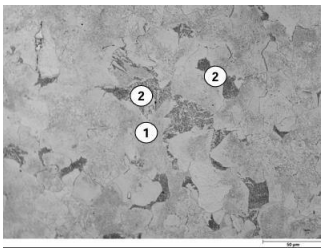
		
Prodor oksida na vanjskom zidu cijevi, do nekoliko desetina mikrona	*Prodor oksida na unutrašnjem zidu cijevi*	*Razugljeničenje na vanjskom zidu cijevi*

Slika 4. Izgled mikrostrukturnih promjena na zidovima cijevi [9]

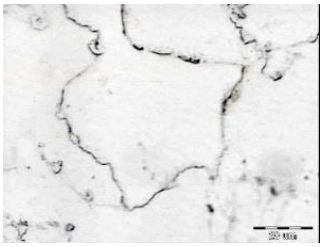
Značajan prodor oksida na zidovima cijevi smanjuje zdravi dio stijenke cijevi i time smanjuje preostali životni vijek komponente postrojenja. Prisutno razugljenjičenje na zidovima cijevi ukazuje da je komponenta bila izložena povišenim temperaturama, da ugljik u relativno kratkom vremenu pređe znatna rastojanja u čeliku i da dođe do pojave razugljeničenja. Cementit se razlaže, a ugljik iz cementita se oksidiše u CO ili CO_2 i odlazi u okolnu atmosferu *[6]*.

Promjena stanja mikrostrukture nakon dugotrajne eksploatacije u termoenergetskim postrojenjima dat je na slici 5.

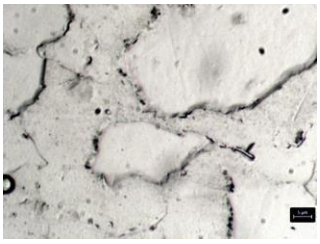
Promjena stanja mikrostrukture nastala kao posljedica dugotrajnog izlaganja povišenim temperaturama i pritisku, dovela je do razlaganja beinita i pojave naprednog oštećenja usljed puzanja, lanaca kavita (šupljina) i razdvajanja po granicama zrna.



Mikrostruktura ferit,karbidi (1) i beinit (2), stanje isporuke



Promjena stanja mikrostrukture nakon više od 70 000 radnih sati

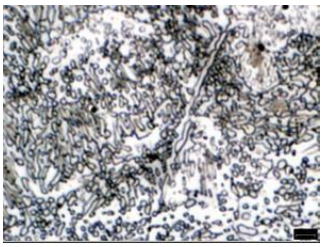


Promjena mikrostrukture nakon više od 150 000 radnih sati

Slika 5. Izgled mikrostrukturnih promjena čelika 14MoV63 [10, 11]

Značajno svojstvo čelika za kotrljajuće ležajeve koji je u svakodnevnoj upotrebi a otkriva se metalografskim ispitivanjem je veličina i raspored karbida koji se formiraju u ovom materijalu. Na slici 6. je dat izgled veličine i rasporeda karbida u čeliku 100Cr6 koji se najčešće koristi za kotrljajuće ležajeve. Ocjena stanja materijala za kotrljajuće ležajeve se provodi u skladu sa standardom BAS ISO 5949.

Pored čelika, značajno ispitivanje u metalografskom laboratoriju provodi se i na odlivcima u cilju otkrivanja stanja mikrostrukture liva, veličine, oblika i rasporeda grafita u sivom i nodularnom livu, prema standardu BAS EN ISO 945-1. Na slici 7. je dat izgled veličine, oblika i rasporeda grafita u nodularnom livu koji se koristi za izradu kočionih pločica u liftovima. Kočione pločice u sistemu kakav je lift, imaju veoma bitnu ulogu, a samim tim i materijal od koga su pločice izrađene [13].



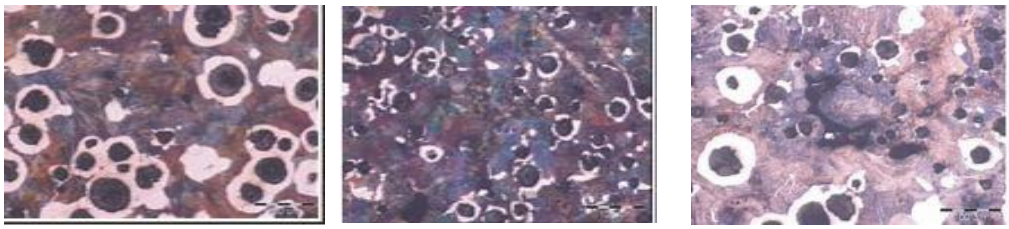
Veličina karbida, skala 2, nagriženo 2%HNO_3

Skala 5, nagriženo 10%HNO_3

Skala 6, nagriženo 10%HNO_3

Slika 6. Izgled veličine i rasporeda karbida za čelik 100Cr6 [12]

Razlika u procentualnom udjelu ferita i perlita u prikazanim uzorcima, kao i različit procenat nodulacije i pojava mikropora u odlivcima, ukazuju na različit kvalitet pločica i potrebu za svakodnevom kontrolom kvaliteta materijala.



Nodularni grafit, 10%V+90%VI, veličine 6, učešće ferita u strukturi 40%

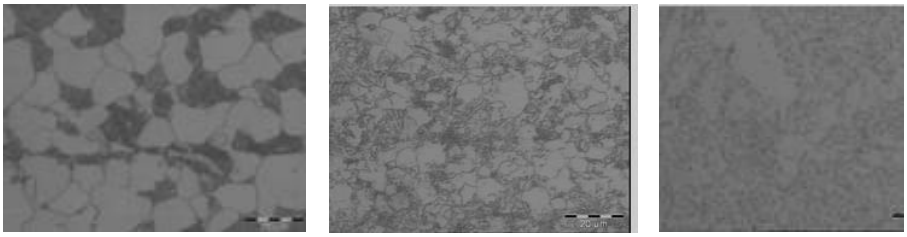
Nodularni grafit, 5%IV+10%V+85%VI, veličine 7, učešće ferita u strukturi 15%

Nodularni grafit, prisustvo mikropora u odlivku

Slika 7. Izgled veličine, oblika i rasporeda grafita za nodularni liv EN-GJS-600-3 (GGG-60) [13,14]

Ispitivanje zavarenih spojeva u cilju kvalifikacija postupaka zavarivanja prema BAS EN ISO 15614 i kvalifikacija radnih proba prema EN ISO 15613 provodi se metalografskim ispitivanjima makrostrukture i mikrostrukture zona zavarenog spoja. Na slici 8. je dat izgled makrostrukture jednog višeslojno zavarenog spoja čelika. Zone mikrostrukture zavarenog spoja izrađenog od materijala 13CrMo45 date su slici 9.

Slika 8. Makrostruktura zavarenog spoja S355J2G3[9]



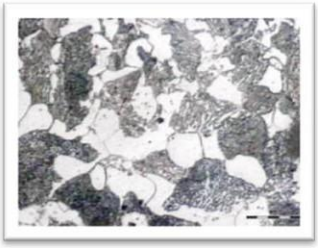
Osnovni materijal, ferit i perlit

Zona pod utjecajem toplote, rekristalizirana ferit, perlit i beinit

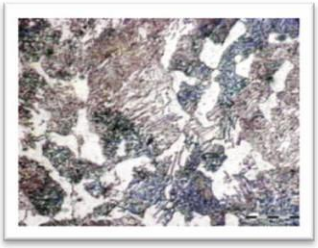
Metal šava, Livena stru ferit po granicama pri austenitnih zrna+ bainit

Slika 9. Makrostruktura zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5, po zonama [15]

Promjene nastale u mikrostrukturi postupcima termičke obrade čelika su vidljive na metalografskim uzorcima posmatranim pod svjetlosnim mikroskopom. Princip termičke obrade čelika zasniva se na faznoj transformaciji čelika tokom procesa grijanja i hlađenja, a metalografske tehnike ispitivanja su važna eksperimentalna metoda za istraživanje fazne transformacije. Mikrostruktura termički tretiranog ugljeničnog čelika za poboljšanje C60 zagrijanog na 850°C/30 minuta i hlađenog sa tri različite brzine hlađenja dat je na slici 10.



Hlađeno sa peći, ferit i perlit, 179HV10



Hlađeno na zraku, perlit, 203HV10

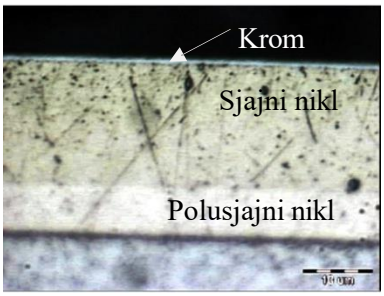
Hlađeno u ulju, martenzit, 52HRC

Slika 10. Makrostruktura termički tretiranog ugljeničnog čelika za poboljšanje C60[9]

Različitim brzinama hlađenja u materijalu istog hemijskog sastava moguće je postići različite mikrostrukture što utiče na različite vrijednosti tvrdoće, od 179 Vikersa do preko 500 Vikersa, čime se određuju mogućnosti primjene određenog materijala.

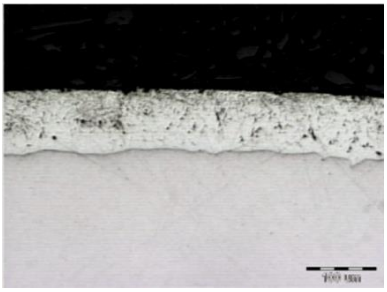
5. ZNAČAJ ODREĐIVANJE KVALITETA I DEBLJINE ZAŠTITNIH SLOJEVA

Veoma važno svojstvo materijala koji se koristi u auto-moto industriji je zaštita površine od korozije. Danas se koriste dvije vrste kromiranja pomoću šesterovalentnog i trovalentnog kroma na nehrđajućem čeliku. Trovalentni krom ima 300 puta manja štetna dejstva pri procesu proizvodnje od šesterovalentnog koji se do sada koristio kao nanos na plastici u unutrašnjosti vozila i nekim elementima koji dolaze u dodir sa ljudskim rukama. Izgled mikrosnimaka debljine nanosa slojeva dat je na slici 11. Debljina nanosa kroma je manja od 10 □m, dok je debljina nanosa sjajnog nikla 17 □m a polusjajnog 7 □m.

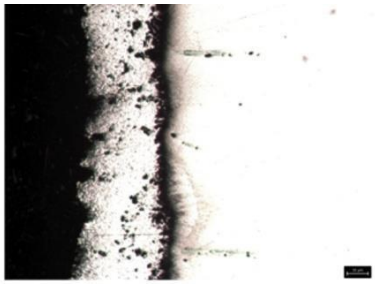


Slika 11. Debljina nanosa slojeva kroma i nikla [16]

Veliki broj komponenti u izgradnji autocesta zahtijeva ugradnju pocinčanih elemenata (ankeri, vijci, cijevi za saobraćajne znakove) koji zahtijevaju nanošenje određene količine cinka u cilju zaštite od atmosferske korozije. Primjer dobro nanešenog sloja cinka koji je dobro prionuo uz metalnu osnovu dat je na slici 12., a na slici 13. dat je prikaz loše nanešenog sloja cinka sa zazorom između metalne osnove i sloja.



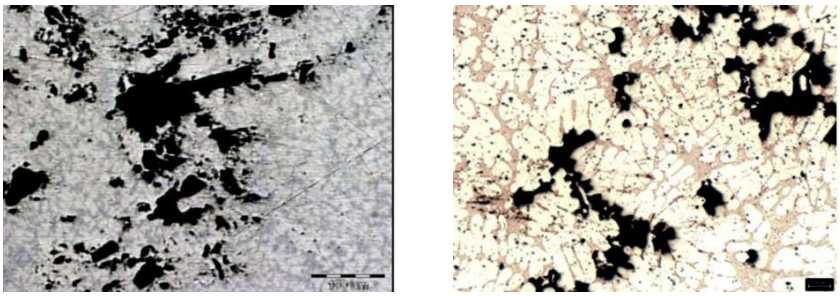
Slika 12. Dobro prionuo sloj cinka [17]



Slika 13. Loše prionuo sloj cinka [18]

6. MJERENJE POROZNOSTI U ODLIVCIMA

Prilikom izrade odlivaka, dolazi do pojave poroznosti u materijalu zbog čega slabe mehanička svojstva. Količina i oblik poroznosti u materijalu definiše se standardom proizvoda. Primjer poroznosti u odlivcima aluminijevih legura dat je na slici 14.



Slika 14. Poroznost, po granicama zrna, dendritima

7. ZAKLJUČAK

Potreba i značaj za primjenom metalografskih ispitivanja koja se svakodnevno provode u cilju otkrivanja stanja materijala, analizi oštećenja komponenti primjenom svjetlosnog mikroskopa predstavljena je u ovom radu. Metalografska ispitivanja se provode na poluproizvodima i gotovim proizvodima tokom procesa proizvodnje kako bi se osiguralo da mikrostruktura proizvoda ispunjava zahtjeve prerade.

Značaj metalografskih ispitivanja u svakodnevnom radu metalnih komponenti je neprocjenjiv, a sve u cilju obezbijeđenja osnove za pouzdanost i dugotrajni vijek trajanja komponenti u radu, te identifikacije uzroka loma i pojedinih kvarova, kao i identifikacija grešaka procesa i materijala.

8. REFERENCE

1. Desimir Marković: FIZIČKA METALURGIJA 1 , UNIVERZITET U BEOGRADU TEHNIČKI FAKULTET U BORU, Bor 2013.
2. Mirko Gojić: Metalurgija čelika, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak 2003.
3. Institut Kemal Kapetanović, Izvještaj o ispitivanju
4. Standard ASTM E 45-18a (R 2023): Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel
5. Belma Fakić, Branka Muminović, Adisa Burić: UZORKOVANJE KAO FAKTOR OBEZBJEĐENJA VALIDNOSTI REZULTATA ISPITIVANJA, 14. Naučno

6. Herman Šuman: Metalografija, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1981.
7. Andrew Roiko: Interaction of non-metallic inclusions, microstructure, and fatigue loading with small crack growth in high-strength steels, https://aaltodoc.aalto.fi/items/ed429332-c049-4844-9445-9908e3cab157 (dostupno 11.09.2025.)
8. Detection, Quantification and Advanced Characterization of Non-metallic Inclusions in Steels ZEISS ZEN core Non-metallic Inclusions, https://Non-metallic-Inclusions-Steels.pdf&ved (dostupno 10.09.2025.)
9. https://ikk.unze.ba/metalografski-laboratorij/ (dostupno 12.09.2025.)
10 Standard VGB Powertech, VGB-S-517- 00-2014. - Guidelines for rating the microstructural composition and creep rupture damage of creep-resistance steel for high pressure pipelines and boiler components and their weld connections, VGB PowerTech e.V.
11 Institut Kemal Kapetanović, Izvještaj o ispitivanju
12 Standard BAS ISO 5949: Alatni čelici i čelici za ležaje - Mikroskopska metoda određivanja rasporeda karbida korišćenjem referentnih mikrofotografija
13 Belma Fakić, Emina Kratina, Adisa Burić: UZAJAMNA ZAVISNOST HEMIJSKOG SASTAVA, MIKROSTRUKTURE I OSOBINA KOD NODULARNOG LIVA, *IX* naučno stručni simpozijum sa međunarodnim učešćem „METALNI I NEMETALNI MATERIJALI: proizvodnja-osobine-primjena“, Zenica, 23. -24.04.2012.
14 Standard BAS EN ISO 945-1: Mikrostruktura lijevanog željeza - Dio 1: Klasifikacija grafita vizualnom analizom
15 Belma Fakić: UTICAJ POSTUPAKA ZAVARIVANJA NA FIZIKO-METALURŠKE KARAKTERISTIKE ČELIKA: S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5 U ZONI UTICAJA TOPLOTE, Univerzitet u Zenici, Fakultet za metalurgiju i materijale, magistarski rad, 2010.
16 Institut Kemal Kapetanović, Izvještaj o ispitivanju

ISTRAŽIVANJE MOGUĆNOSTI ZA PROIZVODNJU WPC KOMPOZITA NA BAZI OTPADNIH SIROVINA

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY FOR PRODUCTION OF WPC COMPOSITE BASED ON WASTE RAW MATERIALS

RAZA SUNULAHPAŠIĆ, PROF. DR. SC., MARINA JOVANOVIĆ, PROF. DR. SC.

Univerzitet u Zenici, Fakultet inženjerstva i prirodnih nauka

Travnička cesta 1, Zenica

Džafer Dautbegović, prof. dr. sc., Darko Petković, prof. dr. sc.

Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet

Fakultetska 1, Zenica

REZIME

Savremene industrijske prakse u svijetu sve više prepoznaju otpad kao vrijednu sirovinu, posebno u sektorima proizvodnje namještaja i prerade plastike. U Srednjoj Bosni, gdje postoji razvijena industrija pločastog namještaja, svakodnevno nastaju značajne količine drvene prašine i sitnog ostatka od rezanja i obrade ploča (iverice, MDF-a i dr.). Istovremeno, otpadna plastika, kao rezultat potrošačkih i industrijskih tokova, predstavlja izazov, ali i potencijal u kontekstu cirkularne ekonomije. Potrebno je istražiti mogućnosti kombiniranja ove dvije vrste otpada za proizvodnju kompozita drvo-polimer (WPC – wood-polymer composite) – savremeni materijal široke primjene u građevinarstvu, uređenju enterijera i eksterijera i drugim industrijama. Za domaće proizvođače, ovakvi materijali predstavljaju priliku za proširenje asortimana, unapređenje održivosti poslovanja i ulazak na nova tržišta. Kako bi se ovaj potencijal realizirao, potrebna su ulaganja u tehnologije za obradu i spajanje sirovina, kao i poticajni regulatorni okviri koji podržavaju inovativnu upotrebu industrijskog otpada.

Ključne riječi: drvena prašina, otpadna plastika, WPC kompoziti, savremeni materijali, održivo poslovanje

SUMMARY

Modern industrial practices in the world increasingly recognize waste as a valuable raw material, especially in the sectors of furniture production and plastic processing. In Central Bosnia, where there is a developed panel furniture industry, significant amounts of wood dust and small residue from cutting and processing panels (chipboard, MDF, etc.) are produced daily. At the same time, waste plastic, as a result of consumer and industrial flows, represents a challenge, but also potential in the context of a circular economy. It is necessary to explore the possibilities of combining these two types of waste for the production of wood-polymer composites (WPC – wood-polymer composite) – a modern material widely used in construction, interior and exterior decoration and other industries. For domestic producers, such materials represent an opportunity to expand the assortment, improve business sustainability and enter new markets. In order to realize this potential, investments are needed in technologies for processing and combining raw materials, as well as incentive regulatory frameworks that support the innovative use of industrial waste.

Keywords: wood dust, waste plastic, WPC composites, modern materials, sustainable business

1. UVOD

Savremeni koncept cirkularne ekonomije usmjeren je na smanjenje otpada i efikasnije korištenje resursa kroz ponovnu upotrebu, reciklažu i produženje životnog ciklusa materijala [1-3]. Industrija prerade drveta i plastike generiše značajne količine otpada koji često ostaje neiskorišten, iako predstavlja potencijalnu sirovinu za sekundarnu upotrebu. U Bosni i Hercegovini, naročito u regijama s razvijenom industrijom pločastog namještaja, svakodnevno nastaju velike količine drvne prašine, piljevine i ostataka od rezanja i obrade ploča, kao i otpadne plastike, što otvara mogućnost razvoja drvno-polimernih kompozita (WPC – Wood Plastic Composites), za koje se u industrijskoj praksi često koristi naziv „drvno–plastični kompoziti“, kao proizvoda visoke dodane vrijednosti. Drvno-plastični kompoziti spajaju prednosti drveta – čvrstoću, krutost i estetsku privlačnost – i plastike – otpornost na vlagu, mikroorganizme i koroziju. Zbog tih svojstava, WPC materijali nalaze primjenu u građevinarstvu, vanjskim i unutrašnjim oblogama, podovima, ogradama, fasadnim panelima, elementima namještaja i specijaliziranim industrijskim dijelovima.

Njihov razvoj je globalno motiviran trendovima održivosti i potrebom za efikasnijim korištenjem sekundarnih sirovina [4-7]. Projekat Research, Technology and Innovation Transfer (RTIT), realiziran kroz Danube Region Programme, ima za cilj jačanje saradnje između istraživačkih institucija i industrije [8]. U okviru Centra za inovativnost i preduzetništvo Univerziteta u Zenici (CIP UNZE), aktivnosti projekta fokusirane su na razvoj inovativnih tehnologija za valorizaciju drvnog i plastičnog otpada, te implementaciju modela cirkularne ekonomije koji povezuje proizvođače, istraživačke institucije i krajnje korisnike [9]. Projektni tim CIP UNZE u saradnji s industrijskim partnerima – kompanijama Omorika Johovac, Tisal Busovača, FIS Ambyenta Vitez, Prograd Žepče, Interior Žepče i drugi – istražuje tehno-ekonomski isplativ način kombinovanja otpadne plastike i „vještačkih“ drvnih sortimenata (MDF, mediapan, OSB, šperploče i slični materijali), koji su zbog prisutnih aditiva i ljepila nepoželjni kao energenti, ali predstavljaju potencijalni resurs za proizvodnju WPC materijala.

Historijat WPC materijala je relativno kratak: prvi industrijski eksperiment izveden je 1983. godine u SAD-u za izradu enterijera automobila, dok su prve međunarodne konferencije i istraživanja na ovu temu počele početkom 1990-ih. Posljednjih decenija, WPC materijali bilježe značajan rast u upotrebi, prvenstveno zbog povećane svijesti o održivosti, smanjenju otpada i efikasnijoj upotrebi resursa. Danas, cilj projekta RTIT i CIP UNZE je razvoj WPC kompozita na bazi otpadnih materijala, čime se istovremeno doprinosi ekološkom zbrinjavanju otpada i stvaranju novih, održivih proizvoda.

2. NAJVAŽNIJE KARAKTERISTIKE PROIZVODNJE WPC

Drvo je jedna od najvažnijih sirovina na Zemlji i ima ključnu ulogu u svakodnevnom životu čovjeka. U mnogim zemljama u razvoju drvo je glavni izvor goriva, što dovodi do iscrpljivanja šuma, odnosno prirodnih bogatstava, i narušavanja ravnoteže u

okolišu. Pretpostavlja se da će se, u nadolazećim godinama, mnogi ljudi širom svijeta suočiti s nedostatkom ogrjevnog drveta zbog smanjenja šumskih površina.

Glavni razlozi široke upotrebe drveta su njegova povoljna svojstva – niska gustoća, dobra mehanička svojstva i netoksičnost. Međutim, niska vodootpornost predstavlja značajan nedostatak, uzrokovan prirodnom higroskopnošću drveta [4]. Kako bi se smanjila potrošnja drvne mase i potaknulo očuvanje šumskih površina, 1990-ih su razvijeni drvno-plastični kompoziti, koji kombiniraju plastične materijale i usitnjeno drvo te predstavljaju novu generaciju materijala s brojnim mogućnostima primjene [5].

Plastični materijali imaju široku primjenu u različitim područjima — u ambalažnoj industriji, graditeljstvu, tekstilnoj industriji i medicini — što rezultira stvaranjem velikih količina plastičnog otpada. Najveći nedostatak sintetskih polimera je njihova spora biodegradacija, zbog čega se ne smiju nekontrolirano odlagati u prirodu [6]. I drvni i plastični otpad pogodni su za recikliranje, a proizvodnja drvno-plastičnih kompozita predstavlja jedan od načina njihove ponovne upotrebe i doprinos razvoju cirkularne ekonomije.

Drvno-plastični kompoziti sastoje se od polimerne matrice i drvne mase kao punila. Kao i kod drugih kompozitnih materijala, sastavni materijali zadržavaju svoja osnovna svojstva, ali se kombiniranjem postiže novi materijal s povoljnom cijenom i mehaničkim i fizikalnim karakteristikama pogodnim za različite primjene [10]. Oblikuju se u daske ili grede koje se mogu koristiti za vanjske i unutrašnje podne obloge, ograde, klupe u parkovima, vanjski i unutrašnji namještaj (npr. stolice, naslone sjedala u automobilima) te okvire za vrata i prozore (tabela 1).

Tabela 1. Primjeri upotrebe drvno-plastičnih kompozita [11]

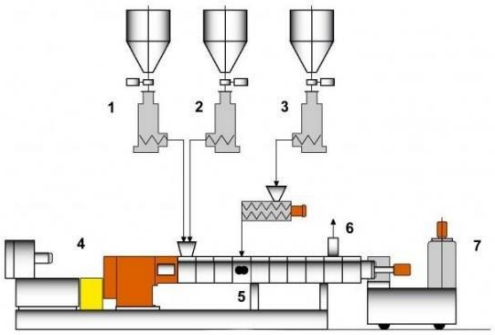
JAVNI PROSTORI		
Zvučni zidovi Ograde Pješački mostovi Urbani mobilijar Parkovne konstrukcije Dječja igrališta		
EKSTERIJERI		
Terase Fasade Vrtni elementi Ograde Aarhitektonski detalji Stepeništa		
ENTERIJERI		
Podne i zidne obloge Namještaj Kuhinjske površine Pokretna vrata Okviri za vrata i prozore Pregradni zidovi		
TRANSPORT		
Podovi i obloge u vozilima Tehničke ploče Dijelovi kabina i motora Oslonci sjedišta Brodski podovi Unutrašnje obloge vrata		

Većina polimernih materijala niske cijene, poput polipropilena (PP), polietilena visoke gustoće (HDPE), polietilena niske gustoće (LDPE), poli(etilen-tereftalata) (PET) i polistirena (PS), odlikuje se nižom čvrstoćom. Zbog toga se u procesima njihove prerade često dodaju mineralna punila, poput kalcijeva karbonata ($CaCO_3$), radi poboljšanja mehaničkih svojstava [12]. Međutim, porast cijene anorganskih punila potaknuo je istraživače na pronalaženje ekološki prihvatljivih alternativa. Vlakna drveta te različitih biljnih vrsta (pšenična, rižina, lanena i dr.) pokazala su se kao dobra zamjena za mineralna punila. Drvo se smatra izuzetnim punilom zbog svoje specifične strukture, niske gustoće i dobrih mehaničkih svojstava [5]. Drvno-plastični kompoziti stoga imaju niz prednosti u odnosu na plastiku ojačanu mineralnim punilima — nižu cijenu, manju gustoću, lakše oblikovanje i zadovoljavajuća mehanička i fizikalna svojstva.

U poređenju s prirodnim drvetom i klasičnim drvnim proizvodima, drvno-plastični kompoziti predstavljaju relativno nove materijale. U razvijenim zemljama njihova je primjena široko rasprostranjena, a proizvode se miješanjem reciklirane plastike i usitnjenog drveta različitih granulacija – od većih čestica do drvnog brašna [4,5]. Nažalost, ova tehnologija još uvijek nije razvijena na industrijskoj razini u zemljama Zapadnog Balkana. Dodavanje drvnih čestica u polimernu matricu poboljšava mehanička svojstva, dok plastika smanjuje upijanje vode i bubrenje drvnih komponenti [7]. Korištenjem različitih drvnih i poljoprivrednih ostataka kao punila ne samo da se stvaraju materijali dobrih fizikalno-mehaničkih svojstava, već se doprinosi i efikasnom zbrinjavanju otpada te smanjenju negativnog utjecaja na okoliš [13].

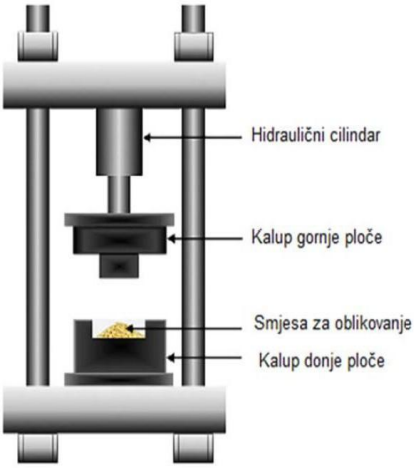
U posljednje vrijeme sve je izraženija potreba za razvojem tehnologija koje omogućavaju recikliranje otpadnih polimernih i celuloznih materijala. Jedan od najperspektivnijih načina njihove ponovne upotrebe upravo je proizvodnja drvno-plastičnih kompozita, koji objedinjuju održivost, funkcionalnost i ekonomski potencijal za lokalnu industriju [6,14]. Osim pravilnog izbora sirovina, ključan faktor u proizvodnji kompozita je i tehnologija izrade. Usporedba dostupnih podataka pokazuje da su komercijalne metode obrade polimera ekstruzijom vrlo prikladne za

proizvodnju drvno-plastičnih kompozita (slika 1), ali i da klasično presovanje (slika 2) ima značajan potencijal u ovom području [7]. S druge strane, u dostupnoj literaturi nedostaju podaci o proizvodnji WPC materijala koji koriste isključivo otpadne sirovine plastike i drveta, što predstavlja važan pravac budućih istraživanja.



1 - Doziranje polimera; 2 - Doziranje aditiva; 3 - Doziranje prirodnih vlakana; 4 - Korotirajući ekstruder MCM; 5 - Bočni dozator; 6 - Otplinjavanje; 7 - Glava za rezanje

Slika 1. Dobivanje drvno-plastičnog peleta ekstruzijom [15]



Slika 2. Prikaz kalupnog presovanja [16]

3. DRVNI I PLASTIČNI SEKTOR U BIH – POTENCIJAL ZA RAZVOJ WPC KOMPOZITA

Izvoz drvnog sektora Bosne i Hercegovine u 2024. godini iznosio je oko 1,8 milijardi KM, što predstavlja povećanje od 10,7 % u odnosu na 2023. godinu, dok je uvoz iznosio oko 587,15 miliona KM, što je 27,4 % više u odnosu na 2021. godinu. Najveći rast izvoza ostvaren je u segmentima šumarstva, ploča i furnira te građevinske stolarije, dok je zabilježen pad izvoza namještaja za 13,5 %, na vrijednost od oko 683,85 miliona KM. U prvoj polovini 202[illegible] BiH iznosio je 282,9 miliona KM, što predstavlja povećanje od 2,6 % u odnosu na isti period prethodne godine. Količinski, uvoz je iznosio 236.905 tona, što je rast od 14,6 %, čime se potvrđuje povećana potražnja za sirovinama i poluproizvodima u domaćoj preradi [17]. Upravo te količine uvoznih proizvoda ključne su za istraživanje tržišta

otpadnih materijala koji bi mogli poslužiti kao sirovina za proizvodnju drvno-plastičnih kompozita. Riječ je prvenstveno o vještačkim drvnim sortimentima poput mediapana, iverice, lijepljenih furnira i OSB ploča. Procjenjuje se da se na godišnjem nivou u BiH koristi oko pola miliona tona ovih materijala, pri čemu otpad nastao krojenjem pločastog namještaja iznosi 10 – 20 %, što daje 50.000 – 100.000 tona drvnog otpada godišnje [9].

Vizija drvne industrije BiH jeste održavanje liderske pozicije izvoznika proizvoda višeg stepena finalizacije u regiji. BiH ima dugogodišnje iskustvo u izvozu proizvoda viših faza prerade u zemlje EU, što potvrđuju izvozni rezultati, međunarodni certifikati i nagrade za dizajn i kvalitetu [17]. Drvna industrija BiH posebno je prepoznatljiva po izvozu masivnog bukovog namještaja, što je čini konkurentnom i manje zavisnom od uvoza [18]. Glavni ciljevi sektora su povećanje konkurentnosti, stabilnost lanca vrijednosti, te razvoj ljudskih resursa u skladu s potrebama tržišta. Jedan od strateških izazova ostaje uvođenje reciklažnih tehnologija u pločastom sektoru, dok su u sektoru masivnog drveta već gotovo u potpunosti implementirane (npr. proizvodnja peleta, briketa, sječke). Realizacijom ovih ciljeva moguće je povećati imidž drvne industrije BiH, povećati devizni priliv kroz izvoz proizvoda više dodane vrijednosti, te racionalnije koristiti sirovine uz veće zapošljavanje stručne radne snage [19].

Na globalnom nivou, proizvodnja plastike porasla je s 1,5 miliona tona 1950. na 359 miliona tona 2018. godine, a samim tim povećana je i količina plastičnog otpada [20]. Nakon pada proizvodnje 2020. godine usljed pandemije COVID-19, trend rasta se ponovno nastavio. Evropska unija provodi niz mjera za smanjenje plastičnog otpada, no značajan dio se i dalje energetski obrađuje ili odlaže na deponije, dok se oko 25 % i dalje trajno skladišti [21]. Zbog ograničenja uvoza plastičnog otpada u Kinu, EU se suočava s rizikom povećanog spaljivanja i odlaganja otpada, što dodatno naglašava potrebu za kružnim modelima upravljanja plastikom [3]. Procjenjuje se da se 95 % vrijednosti plastičnih materijala izgubi nakon jednokratne upotrebe, dok spaljivanje i proizvodnja plastike godišnje uzrokuju emisije od preko 850 miliona tona CO_2, koje bi do 2050. mogle dostići 2,8 milijardi tona [22]. U Bosni i Hercegovini se godišnje

proizvede oko 150.000 tona plastičnog otpada, od čega se reciklira samo 2 %, dok 98 % završava na deponijima [23]. Postoji više ovlaštenih operatera koji se bave selekcijom i reciklažom ambalažnog otpada, a sortirani materijali se relativno jednostavno mogu ponovo preraditi za novu ambalažu. Plastika zbog svoje velike kalorične vrijednosti može služiti i kao alternativno gorivo, ali primarni cilj ostaje reciklaža i ponovna upotreba [21].

Kombiniranjem otpadnog drvnog materijala i plastičnih polimera, moguće je proizvesti drvno-plastične kompozite (WPC), čime se postiže smanjenje otpada, povećanje ekološke efikasnosti i razvoj novih održivih materijala. Upravo je to temeljni cilj projekta INTERREG RTIT, koji implementira CIP UNZE u saradnji s industrijskim partnerima, usmjeren ka razvoju tehnologija cirkularne ekonomije i valorizaciji otpada [8].

4. POTENCIJALI ZA PROIZVODNJU WPC U SREDNJOJ BOSNI

Na osnovu prethodnih analiza, kao i detaljnog mapiranja potencijala u regiji Srednje Bosne koje tokom 2025. godine provodi tim CIP UNZE, s ciljem utvrđivanja količina i vrsta plastika i drvnog otpada, koji ostaju neiskorišteni za dalju preradu u pelet ili briket, uočeno je da značajan dio tih materijala ekološki nije pogodan za direktno sagorijevanje u postojećim kotlovskim postrojenjima pri radnim temperaturama koje oni dostižu. U tom kontekstu ostvarena je široka sinergija s kompanijama kao što su Omorika Johovac – jedan od lidera prerade otpadne plastike u Bosni i Hercegovini, TISAL Busovača – jedan od većih proizvođača plastičnih proizvoda, te brojnim firmama drvnog sektora koje se bave preradom pločastog namještaja, odakle potiču najveće količine drvnog otpada koji još nije uključen u sistem „kružne ekonomije“ i adekvatne reciklaže, npr. FIS Ambyenta (slika 3), PERO, Prograd, Interior, Contego (slika 4) i dr.

Slika 3. Deponija drvnog brašna AMBYENTA Vitez

Slika 4. Sakupljanje drvnog brašna u firmi CONTEGO

Saradnja s navedenim kompanijama omogućila je prikupljanje preciznih podataka o vrstama, količinama i karakteristikama otpadnih materijala, što predstavlja važnu osnovu za razvoj novih kompozitnih materijala poput drvno-plastičnih kompozita (WPC). Poseban akcenat stavljen je na identifikaciju tokova otpada koji se trenutno odlažu ili spaljuju bez prethodne valorizacije, iako posjeduju značajan tehnički i ekonomski potencijal. Analize su pokazale da bi se uz relativno male investicije u opremu i prilagodbu procesa moglo uspostaviti više lokalnih mikrocentara za prikupljanje i selekciju otpada, čime bi se omogućila njegova dalja upotreba u proizvodnji kompozitnih materijala, panela, građevinskih i dekorativnih elemenata. Ovi rezultati dodatno potvrđuju da regija Srednje Bosne raspolaže s dovoljno sirovinske osnove i poslovne infrastrukture za razvoj novih, ekonomski održivih i ekološki prihvatljivih lanaca vrijednosti, koji bi povezali sektor prerade drveta, plastike i istraživačku zajednicu u okviru koncepta cirkularne ekonomije.

5. ZAKLJUČAK

Analize provedene u okviru projekta Research, Technology and Innovation Transfer (RTIT) pokazale su da Bosna i Hercegovina, a naročito regija Srednje Bosne, raspolaže značajnim potencijalima za razvoj drvno-plastičnih kompozita (WPC) na bazi otpadnih sirovina iz drvne i plastične industrije. Kombinovanjem rezultata istraživanja tima CIP UNZE i podataka prikupljenih od industrijskih partnera potvrđeno je postojanje dovoljne količine sirovina koje trenutno ostaju neiskorištene ili se neadekvatno odlažu, iako posjeduju značajan tehnički i ekonomski potencijal. Uspostavljanjem lokalnih centara za prikupljanje, selekciju i preliminarnu obradu otpada, te implementacijom odgovarajućih tehnologija za preradu, moguće je formirati održiv lanac vrijednosti koji povezuje drvni i plastični sektor s istraživačkim institucijama. Time se stvaraju uslovi za razvoj inovativnih proizvoda visoke dodane vrijednosti, smanjenje količine otpada, očuvanje prirodnih resursa i jačanje konkurentnosti domaće industrije.

Razvoj WPC materijala u Bosni i Hercegovini predstavlja važan korak ka praktičnoj primjeni koncepta cirkularne ekonomije, jer omogućava reciklažu materijala koji se inače ne bi mogli ponovo koristiti u klasičnim procesima. Pored ekoloških koristi, ovaj pristup nudi i

ekonomske prednosti – smanjenje troškova sirovina, otvaranje novih tržišnih segmenata, te mogućnost izvoza inovativnih i održivih proizvoda.

Dalja istraživanja trebala bi biti usmjerena na optimizaciju udjela pojedinih komponenti u WPC smjesama, ispitivanje mehaničkih i termičkih svojstava kompozita izrađenih od lokalnih otpadnih materijala, te razvoj pilot postrojenja koja bi potvrdila tehno-ekonomsku isplativost procesa. Time bi se stvorila osnova za širu industrijsku primjenu, što bi Bosnu i Hercegovinu pozicioniralo kao regionalnog lidera u razvoju održivih kompozitnih materijala i inovativnih modela kružne ekonomije.

ZAHVALA

Ovo istraživanje financirano je pod pokroviteljstvom Europskog fonda za regionalni razvoj, Operativni program Knowhow Communities for Accelerating RTI Transfer in the Danube Region / RTIT>> 2024. – 2026.

6. REFERENCE

[31] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N.M.P., Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? Journal of Cleaner Production, 143, 757–768.

[32] Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resources, Conservation and Recycling, 127, 221–232.

[33] European Commission. (2020). A new Circular Economy Action Plan – For a cleaner and more competitive Europe. Brussels: European Commission.

[34] Clemons, C. (2002). Wood-plastic composites in the United States: The interfacing of two industries. Forest Products Journal, 52(6), 10–18.

[35] Bledzki, A.K., Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose-based fibres. Progress in Polymer Science, 24(2), 221–274.

[36] Ashori, A. (2008). Wood–plastic composites as promising green-composites for automotive industries. Bioresource Technology, 99(11), 4661–4667.

[37] Stark, N. M., Rowlands, R. E. (2003). Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. Wood and Fiber Science, 35(2), 167–174.

[38] Danube Region Programme. (2024). Research, Technology and Innovation Transfer (RTIT) – Project Overview. Dostupno na: https://www.interreg-danube.eu/

[39] CIP UNZE. (2024). Centar za inovativnost i preduzetništvo Univerziteta u Zenici – Aktivnosti i industrijski partneri u okviru RTIT projekta. Interni projektni dokument, Zenica.

[40] Fabiyi, J. S., McDonald, A. G., Wolcott, M. P., Griffiths, P. R. (2008). Wood plastic composites weathering: Visual appearance and chemical changes. Polymer Degradation and Stability, 93(8), 1405–1414.

[41] Bridić, Z., (2018). Mogućnost izrade slojevitih drvno plastičnih kompozita, diplomski rad, Univerzitet u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije Zagreb.

[42] Matuana, L.M., Balatinecz, J.J., Park, C.B. (1998). Effect of polymer melt rheology on the foaming of wood fiber–plastic composites. Polymer Engineering and Science, 38(11), 1862–1873.

[43] Migneault, S., Koubaa, A., Erchiqui, F., Riedl, B. (2009). Effects of processing method and fiber size on the structure and properties of wood–plastic composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 40(1), 80–85.

[44] UNEP (2023). Circular Economy and Waste Valorization in the Western Balkans. United Nations Environment Programme Report.

[45] https://www.icmasg.com/products/compounding-masterbatch-systems/wpc-nfccompounding/ - pristupljeno 29. 10. 2025.

[46] Jaafar, J., Siregar, P. J., Tezara, C., Hamdan, M. H. M., Rihayat, T., 2019: A review of important considerations in the compression molding process of short natural fiber composites. Int J Adv Manuf Technol 105: 3437–3450.

[47] Vanjskotrgovinska komora BiH. (2024, 2025). Analiza vanjskotrgovinske razmjene drvnog sektora BiH. Sarajevo.

[48] UNDP. (2023). Green Transition and Resource Efficiency in Bosnia and Herzegovina. Sarajevo.

[49] World Bank. (2023). Bosnia and Herzegovina: Country Economic Memorandum – Transitioning to Smart Growth. Washington, D.C.

[50] Geyer, R., Jambeck, J. R., Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances, 3(7), e1700782.

[51] European Environment Agency (EEA). (2022). Plastics, the circular economy and Europe′s environment – A priority for action. Copenhagen.

[52] Zheng, J., Suh, S. (2019). Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. Nature Climate Change, 9(5), 374–378.

[53] Federalno ministarstvo okoliša i turizma BiH. (2024). Izvještaj o upravljanju otpadom u Federaciji BiH. Sarajevo.

PROCJENA VIJEKA TRAJANJA STRUKTURNIH ELEMENATA IZVOZNOG POSTROJENJA KORIŠTENJEM PROŠIRENE METODE KONAČNIH ELEMENATA

ESTIMATION OF THE LIFE OF STRUCTURAL ELEMENTS OF MINING HOISTING EQUIPMENTS USING THE EXTENDED FINITE ELEMENT METHOD

dr.sc. Mustafa Hadžalić, viši naučni saradnik

Univerzitet u Zenici, Institut "Kemal Kapetanović"

Travnička cesta 7, 72000 Zenica

REZIME

Vrijednost naprezanja ili deformacija tokom vremena, na mjestu gdje se pojavi pukotina, ključni su faktori za određivanje zamornog vijeka, dok je njihova raspodjela duž cijele komponente od sekundarnog značaja. Pojava nove metode tzv. proširene metode konačnih elemenata - PMKE (XFEM-eXtended Finite Element Method), daje revolucionarne rezultate u rješavanju problema za 3D slučajeve strukturnih elemenata izvoznih postrojenja koji imaju kompleksniju strukturu, a opterećenja kojima su izložene uglavnom nisu ravanskog tipa. Proces simulacije rasta pukotine u strukturnom elementu je baziran na tzv. inkrementalnom postupku, odnosno, sastoji se iz niza koraka. U svakom koraku se proračunavaju tekući parametri za tekuću dužinu pukotine. U narednom koraku, korištenjem podataka iz prethodnog koraka generišu se nove vrijednosti parametara mehanike loma.

U ovom radu prikazano je određivanje zamornog vijeka strukturnih elemenata izvoznih postrojenja sa aksijalnom prolaznom pukotinom primjenom proširene metode konačnih elemenata, pod utjecajem cikličkog opterećenja. Prikazane su vrijednosti dobivenih koeficijent intenziteza naprezanja primjenom PMKE za novi material i materijal iz eksploatacije, pri različitim dubinama inicijalne pukotine i različitim rasponima djelujućih napona. Standardna Parisova formula za određivanje putanje pukotine, integrirana u Abaqusu, korištena je za dobivanje zamornog vijeka ovjesne poluge izvoznih postrojenja.

Ključne riječi: koeficijent intenziteta naprezanja, PMKE, ovjesna poluga izvoznog postrojenja, rast pukotine, zamorni vijek.

SUMMARY

The value of stress or strain over time, at the point where the crack appears, are key factors in determining fatigue life, while their distribution along the entire component is of secondary importance. The emergence of a new method, XFEM - eXtended Finite Element Method, provides revolutionary results in solving problems for 3D cases of structural elements of export facilities that have a more complex structure, and the loads to which they are exposed to complex dynamic loads. The process of simulating crack growth in a structural element is based on the so-called incremental procedure, i.e. it consists of a series of steps. In each step, the current parameters for the current crack length are calculated. In the next step, using the data from the previous step, new values of the fracture mechanics parameters are generated.

This paper presents the determination of the fatigue life of structural elements of export facilities with an axial passing crack using the extended finite element method, under the influence of cyclic loading. The values of the obtained stress intensity coefficient using XFEM for new material and material from exploitation, for different depths of the initial crack and ranges of applied stresses are shown. The standard Paris crack path formula, integrated in Abaqus, was used to obtain the fatigue life of the structural elements of the hoisting equipments.

Keywords: stress intensity factor, XFEM, suspension arm of the mine hoisting equipment, crack growth, fatigue life.

1. UVOD

Rudarska industrija u svijetu predstavlja izuzetnu razvojnu granu. Posljednjih godina proizvodnja svih metalnih, nemetalnih i energetskih sirovina ima uzlaznu putanju gdje i narednih decenija treba očekivati ubrzani tempo razvoja. Ovakva proizvodnja je ostvarena prevashodno zahvaljujući primijenjenoj opremi (rudarskim mašinama i uređajima), koja postaje sve raznovrsnija i mobilnija, visokosofisticirana i automatizovana. Prema tome, sve važniji postaju sigurnost fukcionisanja, bezbjednost, zdravlje zaposlenih, životna sredina, pouzdanost kompletne imovine, standardizacija sistema, ali i troškovi proizvodnje i održavanja. Sva rudarska oprema u principu mora da ostvari određeno, zacrtano vremensko i kapacitetno iskorištenje. Procjena sigurnosti strukturalnih elemenata ne može se u potpunosti bazirati na strogo definisanim zahtjevima tehničkih propisa i preporuka koji tretiraju tu problematiku i u upotrebi su preko 30 godina, jer može da dođe do naglih otkaza, a to dokazuju mnogi slučajevi u praksi, [1, 2].

Procjena stanja i ponašanja strukturalnih elemenata rudarskih postrojenja narušenog integriteta (utvrđeno prisustvo greške tipa pukotine) mora da se izvrši primjenom mehanike loma, koja predstavlja prihvatljivu osnovu za izuzetak od postojećih standarda, ako takva analiza daje ubjedljivu i sigurnu procjenu integriteta (konzervativnu) tretirane konstrukcije. Metodologija primjene mehanike loma pri procjeni integriteta konstrukcija zavisi od raspoloživih podataka, ponašanja materijala, uticaja okoline i opterećenja konstrukcije. Ovaj

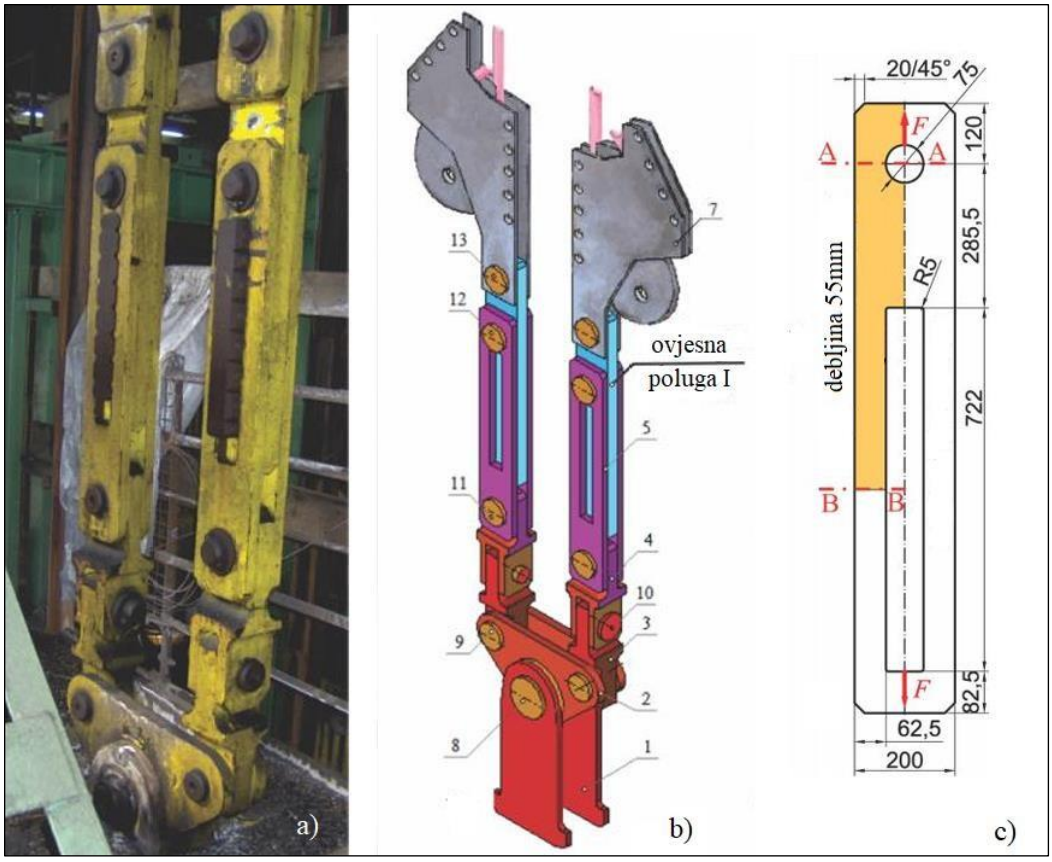
problem je naročito izražen kod strukturalnih elemenata izvoznih postrojenja izloženih dinamičkim opterećenjima zbog velike akumulacije energije, gdje je površinska struktura narušena i gdje se zahtijevaju najveći mogući nivoi sigurnosti.

Minimalni zahtjevi u procesu pregleda i održavanja izvoznih postrojenja u rudnicima definisani su Pravilnikom o tehničkim normativima pri prevozu ljudi i matrerijala oknima rudnika, [3], te je u svim rudnicima uglavnom zastupljena politika preventivnog održavanja u tačno određenom vremenskom periodu. Pojedini elementi i sklopovi se mijenjaju nakon isteka određenog vremena, bez obzira na njihovo stanje, uslove eksploatacije i troškove zamjene. Intenzivan razvoj rudnika i podzemne eksploatacije nameće mnoge tehničke zahtjeve prema opremi izvoznih postrojenja u pogledu brzine kretanja, visine dizanja, nosivosti, načina vođenja, itd. Za ispunjenje ovih zahtjeva, kao posljedica dugotrajnih i obimnih istraživanja primjenjuju se standardi koje strukturni elementi treba da zadovolje i isti su u osnovi definisani u vidu propisa i pravilnika, [3]. Ovdje se prvenstveno misli na izbor i definisanje osnovnog materijala strukturnih elemenata izvoznih postrojenja koji se zasniva na čvrstoći materijala i obuhvata proračun dimenzija i definisanje geometrije na osnovu dopuštenih naprezanja i stepena sigurnosti (*globalni pristup*). Međutim, radi dobijanja potpunije slike stanja strukturalnih elemenata i njihove eksploatacione sigurnosti potrebno je uzeti u obzir čitav niz dodatnih podataka vezanih za eksploatacione uslove, svojstva ugrađenih materijala, konstrukciona rješenja, a posebno prisustvo grešaka (*lokalni pristup*), [4, 5]. Prisustvo grešaka, a naročito greške tipa pukotina, posebno je značajno za ocjenu sigurnosti strukturalnih elemenata, jer svakom otkazu (lomu) prethodi pojava pukotine.

2. PROŠIRENA METODA KONAČNIH ELEMENATA U PROCJENI ZAMORNOG VIJEKA OVJESNE POLUGE SA AKSIJALNOM PROLAZNOM PUKOTINOM

Spojni pribor veze izvozna posuda-užad jedan je od najvažnijih sklopova strukture izvoznog postrojenja i lom uslijed zamora njegovih elemenata - koji bi sigurno doveo i do oštećenja izvozne posude - imao bi katastrofalne posljedice. Iz tog razloga, projektovanju spojnog pribora se posvećuje velika pažnja, a materijal od koga se izrađuje najčešće je konstrukcioni čelik velike duktilnosti i otpornosti na zamor. Najopterećeniji dio spojnog pribora su, ovjesne poluge, [6] i prilikom provjere njihove nosivosti moraju se poštovati preporuke definisane pravilnikom o tehničkim normativima pri prevozu ljudi i materijala u oknima rudnika, [3] i njemačkog standarda, [7].

Analiza otpornost prema zamornom lomu, upotrebom proširene metode konačnih elemenata provedena je na ovjesnim polugama spojnog pribora ugrađenom na Pogonu "Raspotočje" Rudnika uglja Zenica, slika 1, [6].



Slika 1. Izgled spojnog pribora za vezu izvozna posuda - uže: sklop (a); CAD model (b) i ovjesna polug (c), [6]

Sklop je projektovan prema Pravilniku, [3], sa potrebnim minimalnim faktorom sigurnosti deset za statičko opterećenje od 211 kN. Projektovano opterećenje je zbir težine svih konstrukcijskih dijelova, užeta i maksimalnog tereta, [3, 6]. Dijelovi spojnog pribora izrađeni su od standardnog konstrukcijskog čelika, S355JR prema EN 10027-1 [3, 6], sa relevantnim mehaničkim svojstvima. Eksperimentalnim ispitivanjem uzoraka novog i eksploatisanog materijala dobijena su mehanička svojstvima i dinamička čvrstoća konstrukcijskog čelika, S355JR, čije vrijednosti su prikazane u tabeli 1, [6].

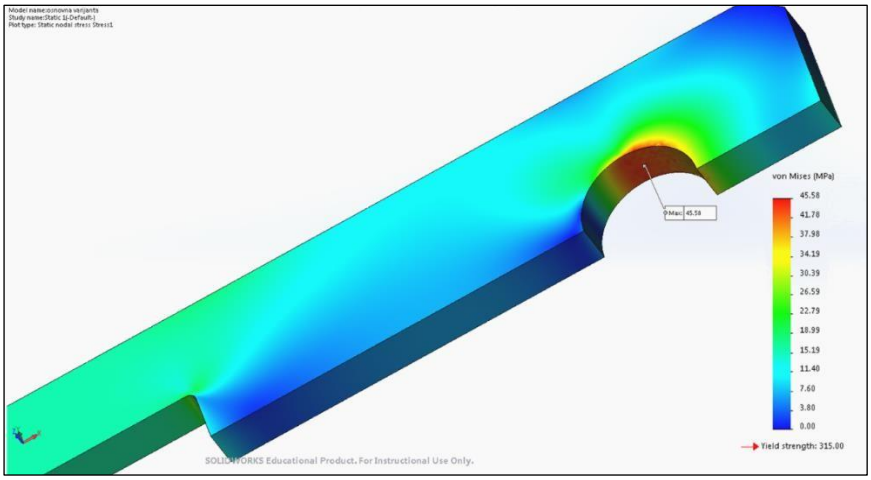
Tabela 1. Eksperimentalni rezultati mehaničkih svojstava i dinamičke čvrstoće konstrukcijskog čelika, S355JR, [6]

Materijal	Modul elastičnosti, E (GPa)	Poissonov koeficijent,	Napon tečenja, $R_{p0.2}$ (MPa)	Zatezna čvrstoća R_m (MPa)	Izduženje A, [%]	Dinamička. čvrstoća R_d (MPa)
novi materijala	210	0.3	404,0	550,6	30,5	316

eksploatisani materijala	210	0.3	363,7	537,7	29,2	266

U radu, [6] urađena je 3D simulacija zamornog loma pomoću proširene metode konačnih elemenata (PMKE) na standardnoj Sharpy epruveti od čelika S355JR, tj od istog materijala kao i ovjesne poluge. Poređenjem rezultata za epruvetu iz 3D simulacije sa onim iz eksperimenta, dobijeno je prilično dobro poklapanje vrijednosti, tako da je proračunski vijek epruvete analogan sa vijekom dobijenim 3D simulacijom.

Prethodna analiza opterećenja kojima su izvozne posude i spojni pribor izloženi tokom rada, pokazala je da je ukupna maksimalna aksijalna sila, koja se sa osovinice prenosi na ovjesnu polugu *I*, intenziteta $F_{aks.}$ =105 604,5 N. Otpornost na dejstvo spoljašnjih sila koje se javljaju tokom rada izvoznog postrojenja analizirana je metodom konačnih elemenata i omogućava uvid u vrijednosti *von Mises*-ovih napona u najopterećenijoj zoni otvora ovjesne poluge *I* (koji se kreću između 41,78 MPa i 45,58 MPa), pri čemu su ove vrijednosti dobijene u slučaju kada je spojni pribor opterećen maksimalno izmjerenim spoljašnjim silama, slika 2.



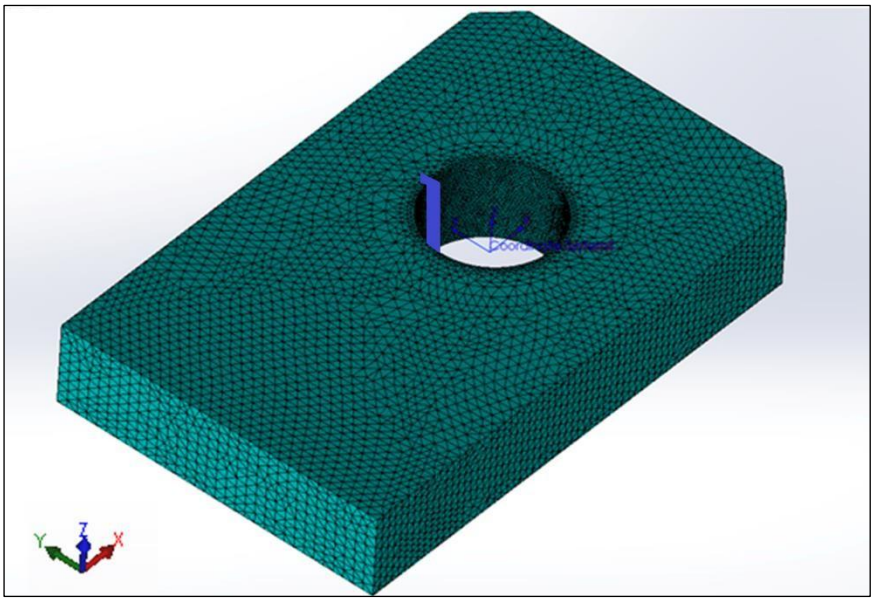
Slika 2. Naponsko stanje na ovjesnim polugama I spojnog pribora izvoznog postrojenja RMU Zenica – pogon "Raspotočje", [6]

2.1. Izbor modela za numeričku analizu

Naime, pretpostavljeno je da na otvoru ovjesne poluge može doći do pojave "dubinske" pukotine (tj. ona koja prolazi kroz cijelu debljinu materijala; eng. *through crack*). Kao i u ranijem primjeru, napravljena je mreža konačnih elemenata, sa tetraedrima (slika 3.), na koju je postavljena inicijalna pukotina oblika pravougaonika 2 mm. Mreža modela sa tetraedrima korištena u proračunu je imala 121 350 čvorova i 695 350 elementa.

Kao što se na slici 3. može vidjeti, u slučaju mreže sa tetraedarskim elementima oblasti u kojima je očekivano da će se pukotina širiti generisana je znatno gušća mreža, da bi se korištenjem većeg broja čvorova povećala tačnost vrijednosti dobijenih proračunom. Potrebno je napomenuti da je na slici 3. dat konačni izgled mreže do koje se došlo nakon nekoliko iteracija i koja je na kraju i dala najbolje rezultate.

Na mreži je postavljena inicijalna pukotina dužine 2 mm i širine jednake debljini ovjesne poluge koja se u *Abaqus*-u definiše kao poseban entitet bez svoje mreže elemenata (to je površina uvezena iz softvera *solidWorks*).

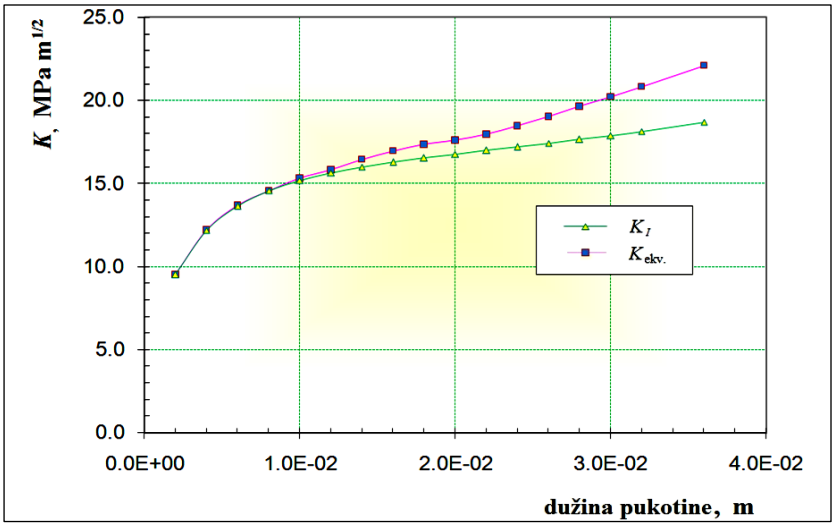


Slika 3. Mreža konačnih elemenata modela ovjesne poluge sa inicijalnom "dubinskom" pukotinom,

Prvi korak u 3D analizi širenja pukotine primjenom PMKE je "otvaranje" pukotine i izračunavanje vrijednosti napona na ovjesnoj polugi koji se, potom, koriste za određivanje faktora intenziteta napona u vrhu pukotine i ugla skretanja u odnosu na početni pravac širenja pukotine. Pukotina je zatim širena po 2 mm da bi se dostigla ukupna dužina od 36 mm. U slučaju modela sa tetraedarskim elementima pukotina je jednim dijelom fronta nastavila kretanje približno u horizontalnoj ravni, a drugim u ravni pod određenim uglom u odnosu na horizontalni pravac.

Poređenjem srednjih vrijednosti ekvivalentnih faktora intenziteta napona, $K_{ekv.}$, dobijenih tokom 18 koraka širenja pukotine na ovjesnoj ploči sa tetraedarskim elementima i srednjih vrijednosti faktora intenziteta napona Moda *I*, K_I, (slika 4.), uočava se da su vrijednosti K_I nešto niže od vrijednosti K_{ekv}, ali i da razlike vrijednosti faktora po koracima nisu pretjerano velike. Ovo upravo i ide u prilog da se rezultati predviđanja vrijednosti faktora $K_{ekv.}$, putem

PMKE za ovjesnu polugu, sa sigurnošću mogu uzeti kao relevantni i dovoljno pouzdani, jer predstavljaju strožije uslove nego što su realni.



Slika 4. Promjene srednje vrijednosti $K_{ekv.}$ i K_I sa dužinom pukotine na ovjesnoj polugi

2.2. Procjena preostalog vijeka trajanja ovjesne poluge sa pukotinom

Da bi se dobila procjena vijeka trajanja pri zamoru ovjesne poluge sa otvorom na kojem se pojavila pukotina, potrebno je, usvojiti određeni model brzine rasta pukotine u materijalu, koji će na osnovu izračunatih vrijednosti faktora intenziteta napona i spektra spoljašnjeg opterećenja dati predikciju broja ciklusa opterećenja koji pukotinu proširuju do određene dužine. Procjenu broja ciklusa moguće je dobiti i u okviru *Abaqus*-a, [8] koji, na osnovu izračunatih vrijednosti $K_{ekv.}$ po koracima i unijetih vrijednosti Parisovog koeficijenta (m_p), Parisovog eksponenta (C_p) i odnosa napona (R), izračunava broj ciklusa upotrebom modifikovanog Parisovog zakona širenja pukotine, [9] datog jednačinom (1):

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{C_p}{1-R}\right)\left(\frac{(\Delta K)^{m_p}}{K_c - K_{maks}}\right) \qquad (1)$$

Vrijednosti parametara Parisove jednačine, koeficijenta C i eksponenta m, praga zamora ΔK_{th}, i brzine rasta zamorne pukotine, da/dN, pri vrijednosti ΔK=10 MPa m$^{1/2}$, date su u tabeli 2. za epruvete sa zarezom u eksploatisanom i novom materijalu, [6].

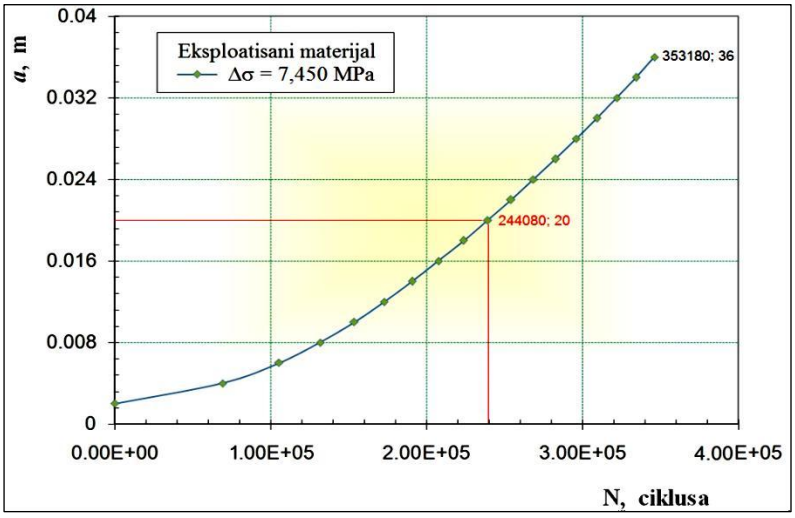
Tabela 2. Parametri rasta zamorne pukotine za epruvete sa zarezom u materijalu ovjesne poluge, pri temperaturi 20°C, [6]

	Prag zamora	Koeficijent	Eksponent	da/dN, [m/cikl.] pri ΔK=10 [MPa m$^{1/2}$]

	$_{tl}$, [MPa m$^{1/2}$]	C	m	
Eksploat. materijal	5,1	$7{,}84\cdot10^{-12}$	3,69	$7{,}85\cdot10^{-08}$
Novi materijal	5,7	$1{,}13\cdot10^{-11}$	3,53	$3{,}14\cdot10^{-08}$

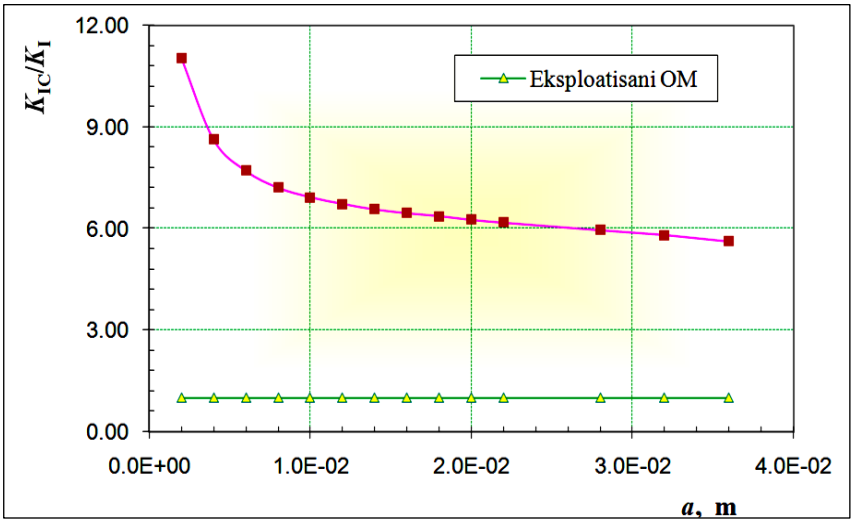
Kritična vrijednost faktora intenziteta napona iznosi K_{IC} = 3 323,55 MPa mm^{0,5} (odnosno 105,1 MPa m^{0,5}). Za odnos minimalnog i maksimalnog napona dobijenog tenzometrijskim mjerenjem u radnim uslovima, iz [6] usvojena je vrijednost $R = \sigma_{min.}/\sigma_{maks.} = 0{,}35$.

Dobijena kriva dužine pukotine u zavisnosti od broja ciklusa primijenjenog spektra opterećenja za materijal iz eksploatacije data je na slici 5.



Slika 5. Vrijednost dužine pukotine u funkciji broja ciklusa primijenjenog sinusoidnog opterećenja

Na slici 6. prikazana je promjena odnosa K_{IC}/K_I sa dužinom pukotine dobijene proračunom. Vrijednosti broja ciklusa dobijene primjenom modifikovanog Parisovog zakona pokazuju da će se pukotina početne dužine 2 mm proširiti na dužinu od 4 mm nakon približno 70 660 ciklusa spoljašnjeg opterećenja (u ovoj analizi simuliranog preko odgovarajućeg pomjeranja spojnog pribora izvozne posude), a da će dužinu od 6 mm dostići nakon sljedećih 36 900 ciklusa. Ukupan broj ciklusa potreban da pukotinu proširi sa početne dužine 2 mm do zadane dužine od 36 mm po modifikovanoj Parisovoj formuli iznosi 353 180 ciklusa.



Slika 6. Promjena odnosa K_{IC}/K_I sa porastom dužine pukotine za ovjesnu polugu

Slike 5. i 6. pokazuju da pukotina nije dostigla kritičnu vrijednost dužine, jer faktor intenziteta napona nije dostigao kritičnu vrijednost K_{IC}=105,1 MPa m^{0,5} (horizontalna zelena linija na slici 6. predstavlja odnos $K_{IC}=K_I = 1$). Dužina pukotine 36 mm dobijena simulacijom širenja u softveru *Abaqus* odgovara vrijednosti faktora intenziteta napona K_I=18,695 MPa mm^{0,5}, što je ispod kritične vrijednosti. Uz to, integracijom jednačine 1. dobijena je kriva zavisnosti dužine pukotine od broja ciklusa (slika 5.) čiji oblik jasno ukazuje da se pukotina dužine 36 mm još nije približila zoni ubrzanog (nestabilnog) rasta, odnosno da je brzina napredovanja oštećenja još uvijek umjerena (gradijent krive na slici 5. skoro je konstantan).

Dobijeni proračunski broj ciklusa sinusoidnog opterećenja koji će početnu pukotinu dužine 2 mm proširiti do ukupne dužine od 36 mm iznosi N = 353 180 ciklusa. Ovaj broj predstavlja proračunski vijek pukotine pod zamorom i u literaturi (na engleskom jeziku) se, obično, naziva samo *Life*. Na slici 5. se vidi da za proizvoljnu dužinu pukotine može da se procijeni i preostali vijek do dostizanja pune dužine od 36 mm.

Pri prosječnom godišnjem fondu rada izvoznog postrojenja, T_y = 7884 sati, [10], broj ciklusa promjene napona iznosi:

$$N_y = T_y \cdot n_{sp} = 7\,884 \cdot 42 = 3{,}311 \cdot 10^5 \text{ ciklusa/godišnje,}$$

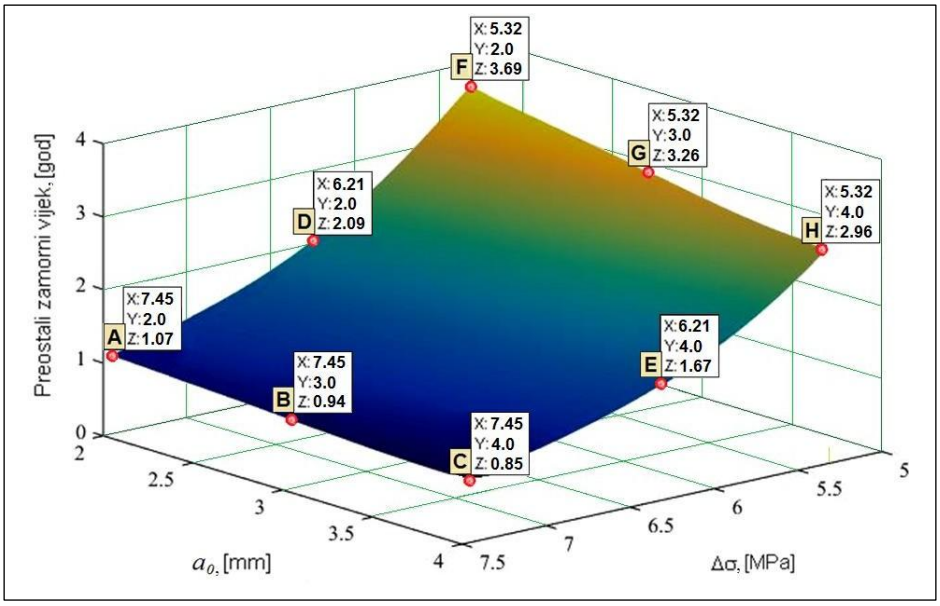
pri čemu je n_{sp} = 42 ciklusa/h, prosječan broj ciklusa izvozne posude sa spojnim priborom. U tom slučaju, preostali životni vijek uslijed zamora (*remaining fatigue life*) može da se iskaže u godinama eksploatacije:

$$n = \frac{N}{N_y} = \frac{3{,}532 \cdot 10^5}{3{,}311 \cdot 10^5} = 1{,}067 \text{ godina} \qquad (2)$$

Preostali vijek uslijed zamora je proračunat i za različite dubine pukotine i opsege primijenjenog napona. Dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 3. i na slici 7.

*Tabela 3. Preostali vijek uslijed zamora n (godina) za različite dubine inicijalne pukotine a_0 i opsege primijenjenih napona Δσ [MPa], eksploatisani materija*l

Dubina početne pukotine, a_0 [mm]	Preostali vijek uslijed zamora, n [god.]		
	$\Delta\sigma_1$ =7,450 [MPa]	$\Delta\sigma_2$ =6,208 [MPa]	$\Delta\sigma_3$ =5,320 [MPa]
2	1,067	2,091	3,695
2,5	0,997	1,954	3,453
3	0,942	1,846	3,255
4	0,853	1,672	2,956



Slika 7. Zavisnost preostalog vijeka uslijed zamora od opsega napona Δσ i referentnih veličina spoljašnjih oštećenja a_0, eksploatisani materijal

Dobijeni rezultati preostalog vijeka uslijed zamoraza za novi materijal prikazani su u tabeli 3.

Tabela 4. Preostali vijek uslijed zamora n (godine) za različite dubine inicijalne pukotine a_0 i opsege primjenjenih napona Δσ [MPa], novi materijal

Dubina početne pukotine, a_0 [mm]	Preostali zamorni vijek, n [god.]		
	$\Delta\sigma_1$ =7,450 [MPa]	$\Delta\sigma_2$ =6,208 [MPa]	$\Delta\sigma_3$ =5,320 [MPa]

2	1,648	3,137	5,409
2,5	1,546	2,943	5,076
3	1,466	2,79	4,811
4	1,334	2,539	4,378

2.3. Analiza rezultata

Dubina pukotine na ovjesnoj polugi podvrgnutoj promjenljivom opterećenju ima značajan uticaj na vijek tog elementa. Međutim, analizom slike 7, evidentno je da je preostali vijek uslijed zamora osjetljiviji na promjene opsega napona $\Delta\sigma$, nego referentne vrijednosti dubine spoljašnjeg oštećenja. Ako se, na primjer, pri fiksnoj vrijednosti dubine pukotine od 2 mm poveća opseg naprezanja sa 5,32 MPa na 7,45 MPa (što je povećanje za 40%) preostali vijek uslijed zamora smanjiće se sa 5,409 godina na 3,137 godine, što je smanjenje za 42,0%.

Slično je i za neku drugu vrijednost dubine inicijalne pukotine. Tako za dubinu inicijalne pukotine od 3 mm, povećanje opsega naprezanja sa 5,32 MPa na 7,45 MPa, skraćuje vijek uslijed zamora za 69,53%. Sa druge strane, povećanje dubine pukotine sa 2 mm na 3 mm (povećanje od 50%), pri istom opsegu naprezanja $\Delta\sigma$ = 5,32 MPa, skraćuje vijek uslijed zamora sa 5,409 godina na 4,811 godinu, a to je smanjenje za 11%. Takođe u slučaju povećanja dubine početne pukotine sa 2 mm na 4 mm (povećanje od čak 100%) pri istom opsegu naprezanja $\Delta\sigma$ = 5,32 MPa, skraćuje vijek za 19,1%.

Očigledan je dominantniji uticaj opsega naprezanja od same dubine oštećenja. Imajući ovo u vidu, može se izvesti zaključak da je za ovakvu vrstu problema, u slučajevima da postoji pukotina određene dubine u elementu konstrukcije, značajnije praćenje opsega opterećenja nego praćenje do koje je dubine bilo oštećenje tipa pukotine napredovalo.

3. ZAKLJUČAK

Prikazani rezultati pokazuju mogućnost primjene Proširene metode konačnih elemenata – PMKE (*Extended Finite Element Metxod - XFEM*), kao jedne relativno nove metode, u trodimenzionalnoj simulaciji rasta zamorne pukotine na geometriji tipa ovjesne poluge. Kako je prikazano u ovom radu, problem procjene integriteta i otpornosti prema lomu uslijed zamora elemenata spojnog pribora izrađenih od konstrukcionog čelika može da bude uspješno razmatran upotrebom PMKE. Naravno, metoda je novija i još uvjek traži da se potvrđuje kroz praksu, a ovdje prikazani rezultati su doprinos ideji da se obimna, dugotrajna, skupa, a veoma često i teško izvodljiva eksperimentalna ispitivanja, mogu efikasno zamijeniti numeričkim simulacijama. Na osnovu istraživanja koje je provedeno u ovom radu može se zaključiti:

- Predložene metode za procjenu preostalog vijeka trajanja strukturnih elemenata izvoznih postrojenja su realne i doprinose racionalizaciji primjene procedure u praćenju stanja i održavanja, kako sa aspekta tehničkih performansi, tako i na planu optimizacije, preventivnog održavanja i redukcije troškova uopšte.
- Primjenom predložene procedure dobijeni su kvalitetni parametri koji se mogu uspješno primijeniti na optimiziranje, projektovanje, rekonstrukciju, sanaciju, revitalizaciju ili produženje životnog vijeka strukturnih elemenata izvoznih postrojenja;
- Ovaj rad je pokazo da se prednosti korištenja *software*-a u procjeni integriteta konstrukcija ogledaju u sljedećem: ušteda vremena, sredstava i resursa, što je našlo opravdanost sa ekonomskog aspekta. Dakle, skupa laboratorijska mjerenja su zamijenjena korisničkim *software*-om, u okviru kog se vrši: modeliranje konstrukcije uvođenjem inicijalne pukotine u strukturu, a potom proračun napona i deformacije, kao i simulacija širenja pukotine sa svim relevantnim parametrima mehanike loma.

4. REFERENCE

[1] Hansel, J.: Development of the Mine Hoist Safety Management System, *Journal of AGH-KTL*, Part 1, Vol. 27, (95 pages), Kraków 2002, Part 2, Vol. 32, (241 pages), Kraków, 2003.

[2] Petković, D., Jašarević, S. i Brdarević, S.: Ispitivanje i analiza pogonskog stanja pogona dizanja u strojarnici izvoznog okna Stara Jama RMU Zenica, MF Zenica, 1998.

[3] Pravilnik o tehničkim normativima pri prevozu ljudi i materijala oknima rudnika – *Tehnički propisi*, Rudarstvo, Beograd, 1986, str.490-526

[4] Hertzberg, R.W.: Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, John Wiley and Sons, 1996.

[5] Tada, H., Paris, P.C., & Irwin, G.: The Stress Analysis of Cracks Handbook, Del Research Corp. Hellertown, Pa., 1973.

[6] Hadžalić, M.: Razvoj algoritama za određivanje integriteta i vijeka trajanja strukturnih elemenata izvoznih postrojenja, doktorski rad, Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet, Zenica, BiH, 2018.

[7] Technische Anforderungen an Schacht – und Schrägförderanlagen, Verlag Hermann Bellmann, Dortmund, 2005, blat 7/17÷7/22.

[8] Cenaero. Morfeo/crack for Abaqus, https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/fr/object/boreal%3A134972/ datastream/PDF_01/view

[9] Forman, R.G., Kearney, V.F., Engle, R.M.: Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic Loaded Structures, *Journal of Basic Engineering*, *ASME Transactions Series D*, 1967, pp.459.

[10] Sehitoglu, H.: Fatigue of Low Carbon Steels as Influenced by Repeated Strain Aging, *Fracture Control Program*, Report No. 40, University of Illinois at Urbana Champaign, June 1981.

RADNO PRAVO U DOBA DIGITALNE TRANSFORMACIJE IZAZOVI I PRILIKE

LABOR LAW IN THE AGE OF DIGITAL TRANSFORMATION – CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

Venan Hadžiselimović[1]
Smajo Šabić[2]
Amir Omerbašić[1]
[1]HIFA-OIL d.o.o. Tešanj
[2]The cantonal court in Sarajevo

Sažetak

U današnjem periodu, digitalizacija odnosno digitalna transformacija, digitalni način komunikacije i obavljanja različitih poslova u poslovnom svijetu je neizbježna pojava, koja nije samo ograničena na privredu, već je prisutna u svim drugim sferama društvno-socijalnog karaktera. Digitalna transformacija nosi sa sobom brojne izazove i prilike u različitim segmentima. Može se konstatirati, da je u Bosni i Hercegovini a vjerovatno i šire, digitalnu transformaciju u određenom smislu ubrzala pandemija COVID 19. Jer, Bosna i Hercegovina je do trenutka pojave pandemije korona virusa bila čvrsto oslonjena na tradicionalne običaje i standard, kada je u pitanju organizacija rada u privrednim subjektima. Međutim, pojavom pandemije menadžeri i uprave mnogobrojnih privrednih subjekata izvršili su internu reorganizaciju sistema rada i poslovanja, usljed čega su pojedini radnici uz pomoć telefona, računara, interneta, raznih programa ili platformi, obavljali svoje poslove od kuće. Ta iskustva su dragocjena i poslužila su kao jedan prijelazni period, tako da danas postoji standardna praksa pojedinih privrednih društava, koja uključuju mogućnost rada od kuće uz pomoć gore navedenih sredstava. Ovaj rad se bavi radnim zakonodavstvom u doba digitalne transformacije (što je ovaj trenutni period), te pratećim izazovima i prilikama. Cilj rada je utvrditi trenutno stanje radnog prava (izazove i prilike) u Bosni i Hercegovini, koje se odnosi na radnike koji svoje poslove u okviru privrednog društva digitalnim sredstvima obavljaju putem modernih digitalnih sredstava rada. Pravni okvir za utvrđivanje radno-pravnog statusa radnika u BiH nalazimo prije svega u postojećim propisima dva entiteta i distrikta Brčko. U okviru teme radno pravo u doba digitalne transformacije, posebno su važna pitanja mjesta rada, radnog vremena, zaštite zdravlja i sigurnosti radnika, nadzora nad radnicima. Detaljnija analiza radnog zakonodavstva u našoj zemlji pokazuje, da je neophodno izvršiti

izmjene i dopune istog, kako bi rad uz pomoć digitalnih sredstava i softvera bila adekvatno zakonski uređena i u skladu sa postojećim trendovima.

Ključne riječi: *Umjetna inteligencija, Digitalna transformacija, COVID 19, radno zakonodavstvo, privredni subjekti, mjesto rada, radno vrijeme, zaštita zdravlja i sigurnost radnika, nadzor nad radnicima.*

Summary

In today's period, digitalisation i.e. digital transformation, digital way of communication and performing various tasks in the business world is an inevitable phenomenon, which is not only limited to the economy, but is present in all other spheres of social character. Digital transformation brings with it numerous challenges and opportunities in different segments. It can be stated that in Bosnia and Herzegovina and probably beyond, the digital transformation was accelerated in a certain sense by the COVID 19 pandemic. Because, until the time of the corona virus pandemic, Bosnia and Herzegovina was firmly based on traditional customs and standards when it comes to the organization of work in business entities. However, with the onset of the pandemic, managers and administrations of numerous business entities carried out an internal reorganization of the work and business system, as a result of which some workers performed their work from home with the help of telephones, computers, the Internet, various programs or platforms. Those experiences are valuable and served as a transitional period, so that today there is a standard practice of certain companies, which include the possibility of working from home with the help of the above-mentioned means. This paper deals with labor legislation in the era of digital transformation (which is this current period), and the accompanying challenges and opportunities. The aim of the paper is to determine the current state of labor law (challenges and opportunities) in Bosnia and Herzegovina, which refers to workers who perform their work within the company using digital means through modern digital means of work. The legal framework for determining the labor-legal status of workers in BiH is primarily found in the existing regulations of the two entities and the Brčko district. Within the topic of labor law in the age of digital transformation, the issues of workplace, working hours, protection of health and safety of workers, supervision of workers are particularly important. A more detailed analysis of the labor legislation in our country shows that it is necessary to make changes and additions to it, so that work with the help of digital tools and software is adequately regulated by law and in accordance with existing trends.

Keywords: *Artificial intelligence, Digital transformation, COVID 19, labor legislation, business entities, place of work, working hours, health and safety protection of workers, supervision of workers.*

1. UVOD

Vladavina prava kao pretpostavka uređenog pravnog sistema nalaže da sva tijela javne vlasti djeluju u skladu s vrijednostima demokratije i temeljnih prava, a sve pod nadzorom neovisnih i nepristranih sudova. Vladavina prava je jedna od temeljnih vrijednosti EU-e, kojom se garantuju demokratija te prava i slobode građana.[1] Pojam vladavina prava označava sistem političke vlasti utemeljen na poštivanju ustava, zakona i drugih propisa, kako od strane građana (adresata pravnih normi), tako i od samih nosilaca državne vlasti (adresanata pravnih normi). Svi zakoni, drugi propisi, kao i postupci nosilaca vlasti moraju biti utemeljeni na zakonu, odnosno na zakonu utemeljenom propisu. To izražava ustavno načelo ustavnosti i zakonitosti.[2] U društveno pravnim sistemima u kojim vladavina prava predstavlja temelj ustrojstva pravnog poretka, pojedinci i institucije, uključujući vladu, podložni su zakonu koji se dosljedno primjenjuje i štiti osnovna prava i slobode građana. Dio tih osnovnih prava i sloboda građana, su prava kojim su uređeni radno pravni odnosi koji uređuju pravni položaj, te prava i obaveze zaposlenika u odnosu na pravni položaj i prava i obaveze poslodavaca. Radno pravo je grana prava, koja uređujemeđusobne odnose između poslodavaca i radnika. Cilj radnog prava je zaštita prava radnika kroz uređenje pitanja kao što su: radno vrijeme, uslovi rada, plaća i naknada plaće, zabrana takmičenja, naknada štete, odmor i odsustva, prekovremeni rad, noćni rad, zaštita radnika, prestanak važenja ugovora o radu, otkaz ugovora o radu i drugo. Radno pravo definiše pravila i standarde kojima se obezbjeđuje pravičan i jednak tretman radnika, a istovremeno pruža odgovarajuća sigurnost kako za radnike tako i za poslodavce. Najznačajniji izvori radnog prava u Bosni i Hercegovini su Zakon o radu FBiH,[3]Zakon o radu Repulike Srpske,[4] te Zakon o radu Brčko distrikta BiH,[5]kao i Kolektivni

---

[1]*https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/policies/justice-and-fundamental-rights/upholding-rule-law/rule-law/what-rule-law_hr*

[2] *B. Smerdel, Ustavno uređenje Europske Hrvatske, Narodne novine d. d., Zagreb, 2013 god, str. 8*

[3]*Zakon o radu Federacije Bosne iHercegovine ("Službene novine Federacije BiH", br. 26/2016, 89/2018, 23/2020 - odluka Ustavnog Suda, 49/2021, 44/2022 i 39/2024)*

[4]*Zakon o radu Republike Srpske (Službeni glasnik Republike Srpske broj: br. 1/2016, 66/2018 i 91/2021 - Odluka Ustavnog suda Republike Srpske broj: U-66/20 od 29.septembra.2021g. 119/2021, 112/2023 i 39/2024)*

[5]*Zakon o radu Brčko Distrikta Bosne I Hercegovine ("Službeni glasnik Brčko distrikta Bosne i Hercegovine", br. 19/2006 - prečišćen tekst, 19/2007, 25/2008, 20/2013, 31/2014, 1/2015 i 12/25)*

ugovori kojim predstavnici poslodavaca i radnika na bazi prethodnog dogovora uređuju međusobne odnose u pogledu vrste i obima prava i obaveza koje proističu iz radno pravnog statusa radnika.

2. UMJETNA INTELIGENCIJA I DIGITALNA TRANSFORMACIJA

2.1. Umjetna inteligencija u privrednom poslovanju

Umjetna inteligencija predstavlja sposobnost nekog uređaja da oponaša ljudske aktivnosti poput zaključivanja, učenja, planiranja i kreativnosti.[6] U suštini, AI (umjetna inteligencija) se odnosi na sposobnost mašine ili računarskog sistema da obavlja zadatke, koji obično zahtijevaju intervenciju čovjeka odnosno ljudske inteligencije. Ova tehnologija se oslanja na sisteme programiranja za analizu podataka, učenje iz iskustva i donošenje inteligentnih odluka, a sve na osnovu informacija dobijenih od ljudi.[7] U suštini, umjetna inteligencija predstavlja napredne računarske sisteme, na način da računari dobijaju funkciju da zamijene ulogu i aktivnosti ljudi u poslovnim i drugim procesima i aktivnostima. Umjetna inteligencija je prisutna već neko vrijeme, kao jedno izuzetno korisno pomagalo u mnogim aktivnostima, s tim da je u posljednjih nekoliko godina kulminirala upotreba umjetne inteligencije širom svijeta. Pored prevodilačkih usluga, **umjetna inteligencija se koristi u privredi, bankarstvu, obrazovanju, sportu i drugim oblastima. Korištenjem umjetne inteligencije može se u vrlo kratkom periodu dobiti neophodne informacije.**Interesantno je da se umjetna inteligencija koristi u segmentu radnog prava, u svrhu obrade različitih informacija, kreiranja evidencija, nadzora i usmjeravanja rada radnika, pa čak i mjerenja učinkovitosti radnika na poslu. Uzimajući u obzir sve navedeno postavlja se logično pitanje i dilema koliko i u kom obimu umjetna inteligencija može zamjeniti ulogu radnika u pogledu poslova koje obavlja na svom radnom mjestu. Odgovor na to pitanje će biti mnogo jasniji kroz skoriju budućnost uzimajući u obzir revolucionaran razvoj informacionih tehnologija. Razvoj umjetne inteligencije počinje još u tridesetim godinama prošlog stoljeća. Pedesetih godina

---

[6] *https://www.europarl.europa.eu/topics/hr/article/20200827STO85804/sto-je-umjetna-inteligencija-i-kako-se-upotrebljava.*

[7] *https://www.isbih.gov.ba/p/vijesti/vjestacka-inteligencija-razumijevanje-osnova-i-njenog-znacaja.*

počinje ozbiljnije vrijeme za umjetnu inteligenciju i tada se počinju stvarati akademije koje su se uhvatile u koštac sa određivanjem pravaca istraživanja. Od tih godina pa sve do danas razvile su se mnoge škole i teorije o umjetnoj inteligenciji, ali tri su značajne za istaknuti: kognitivistiĉka škola, logička škola i bihevioristička škola. [8]U Bosni i Hercegovini pitanje umjetne inteligencije nije uređeno bilo kakvim propisima, pa uređenje tog segmenta predstavlja izazov budućnosti.

2.2. Digitalna transformacija kao osnova organizacije privrednog poslovanja

Digitalna transformacija predstavlja određen proces intenzivnih promjena na polju digitalne tehnologije i resursa kako bi se ti resursi pretvorili u nove načine poslovanja koji bi doveli do novih poslovnih vrijednosti. Digitalna transformacija povezuje se s područjima produktivnosti, inovacijama,rastom, tržištem rada i posljedično s praksom upravljanja ljudskim potencijalima.[9]Transformacija nastaje kada preduzeće odluči u relativno kratkom vremenskom razoblju iz temelja mijenjati svoje poslovne procese, strategije, aktivnosti, hijerarhijsku i organizacijsku strukturu, sve kako bi se ti procesi i strategije bolje povezali i na kraju krajeva omogućili bolju konkurentsku prednost poduzeću na tržištu.[10] Digitalna transformacija potrazumijeva određen proces promjene, odnosno unapređenje poslovnih procesa pomoću raspoloživih digitalnih tehnologija.[11]Razvoj novih tehnologija, softvera i aplikacija to i omogućuje, tako se onda organizacijemogu povezati s korisnicima na različitim razinama – od informiranja o stanju u pojedinim sektorima, kupnji, pomoći pri odlučivanjui do razmjene informacija o zadovoljstvu i mogućim prijedlozima opromjeni. Stoga digitalna

---

[8]*Više o tome P. Sović Umjetna inteligencija, Visoka škola „CEPS – Centar za poslovne studije" Kiseljak. str 252.*

[S]*D. Perkov Izazovi i provedbe digitalne transformacije funkcije upravljanja ljudskim potencijalima u mikropreduzećima te malim I srednjim preduzećima Republike HrvatskeZbornik radova Sveučilišta Libertas broj 8 str.86.*

[10] *M Spremić, Digitalna transformacija poslovanja, Zagreb, Ekonomski fakultet str 53.*

[11]*Digitalne tehnologije obuhvataju širok spektar alata, sistema i procesa, koji koriste digitalne (računarske) podatke za pohranu, obradu i prijenos informacija, a uključuju računarsku opremu, softver, internet, mobilne tehnologije, sisteme umjetne inteligencije, napredne komunikacijske mreže (5G).*

transformacija znači i promjenu svih oblikaposlovanja i procesa u kojima su zaposlenici organizacije u interakcijisa svojim korisnicima.[12]Ona prije svega obuhvata četiri stvari i to: Novu tehnologiju koja daje novu snagu organizaciji, što tradicionalne firme ne posjeduju, zatim nove korisnike koje zanima nova usluga i novi proizvod, novo ponašanje postojećih korisnika, te novi biznis model poslovanja.“[13]

2.3. Digitalna transformacija u privrednom poslovanju Bosnei Hercegovine

Digitalna transformacija u privredi u Bosni i Hercegovini se posebno aktuelizirala u periodu COVID-a 19. U tom periodu, okolnosti su prinudile privredne subjekte da izvrše reorganizaciju svog rada i naprave disperziju rizika kod svojih radnika kako bi umanjili mogućnost zaraze od korona virusa. Ta iskustva su se kasnije u velikom broju slučajeva pokazala uspješnim i korisnim u primjeni digitalnih tehnologija u poslovnim aktivnostima.Digitalizacija smanjuje transakcijske troškove poslovanja tvrtki, povećava trgovinu i olakšava usklađivanje ponude i potražnje. Osim toga, mijenja tvrtke iznutra utječući na promjene njihovih organizacijskih strukturai menadžerskih strategija, te izvana u odnosima s kupcima, partnerima i konkurentima (EGSO, 2017). Tehnološke promjene omogućuju veću fleksibilnost, pa tako rad postaje puno manje vremenski, prostorno, funkcionalno i organizacijski ograničen. Istovremeno se digitalizacijom uspostavljaju novi modeli nadziranja radnih procesa i rezultata rada.[14] I pored svega određen otpor postoji kod uvođenja i primjene digitalne transformacije, a dešava se zbog privrženosti tradicionalnom načinu organizacije rada u privrednim subjektima, kao i zbog nedovoljnog povjerenja prema novim savremenim trendovima. Kada se govori o digitalnoj transformaciji, svakako neizbježna je tema procesa robotizacije u privredi, jer je i uvođenje robota sastavni dio digitalne transformacije. Istraživanja pokazuju da, iako je nesumnjivo da robotizacija utiče na

---

[12]*S.Kučina Softić/M Odak/J. Lasić Lazić. Digitalna transformacija novi pristupi I izazovi u obrazovanju Koprivnica 2021. godina str.20.*

[13] *https://www.poslovni.hr/sci-tech/ovo-su-uspjesni-primjeri-digitalne-transformacije-kod-nas-ili-u-regiji-4253938*

[14]*H Butković/ V. Samardžija Digitalna transformacija tržišta rada u Hrvatskoj Zagreb 2019 str 17.*

smanjenje postojanja poslova i radnih mjesta, to ne znači da je došlo do smanjenja potrebe za radom čovjeka.[15]

3. ORGANIZACIJA RADA POMOĆU DIGITALNIH TEHNOLOGIJA

Digitalizacija sa sobom donosi rastuću fleksibilnost u pogledu određenih elemenata koji čine sadržaj pojedinačnogradnog odnosa. Navedena fleksibilnost dolazi do izražaja u pogledu odstupanja od tradicionalnog poimanja mjesta rada i radnog vremena.Naime fleksibilna organizacija rada u digitalnom okruženju dovodi do znatnog smanjenjavažnosti fizičkog mjesta rada. Zaposlenicima se omogućavaobavljanje posla korištenjem digitalnih alata, kako u vlastitom domu, tako i sa različitih drugihmjesta po njihovom izboru (hoteli, privremeni smještaji, vanjski objekti i sl.), a moguće je obavljatiposlove i izvan mjesta rada poslodavca u drugim gradovima i inozemstvu.[16]Digitalne tehnologije omogućuju efikasno obavljanje radnihzadataka, koje više nije vezano za određenu lokaciju. Eurofound[17] se koristi pojmom mobilnog rada temeljenog na ICT-tehnologijama (engl. *ICTbased mobile work*) kako bi opisao način organizacije rada u kojem radnici mogu obavljatisvoj posao s bilo kojega mjesta u bilo kojem trenutku uz potporu modernih tehnologija.[18] Eurofound napominje da se zapravo

---

[15] *Gregory Terry, Anna Salomons, Ulrich Zierahn, "Racing with or against the Machine? Evidence from Europe." ZEW Discussion Paper 16-053, Center for European Economic Research, Mannheim, Germany 2016.*

[16] *H. Špadina/ M.Ljubić Pravo na digitalnu nedostupnost radnika Zbornik radova Izazovi I perspective razvoja pravnih Sistema u XXI vijeku 2020 godina str 400.*

[17]*Eurofond - Evropska fondacija za poboljšanje radnih i životnih uvjeta sa sjedištem u Dublinu.Temeljem Eurofoundove studije može se zaključiti da se ovdje ne radi o novoj vrsti ugovora o radu, nego o novom načinu izvršenja radnih zadataka. Naime Eurofound ističe da se ICT mobilni rad većinom obavlja putem standardnih ugovora o radu, često ugovora na neodređeno sklopljenih na puno radno vrijeme. Nadalje, rezultati studije pokazuju da se poslodavci koriste tim oblikom rada u želji da povećaju produktivnost i učinkovitost pokušavajući maksimalno iskoristiti raspoloživo radno vrijeme radnika. Također, taj oblik organizacije rada omogućuje poslodavcima da lakše privuku kvalificiranu radnu snagu, jer istraživanja pokazuju da je ICT mobilni rad osobito popularan među visoko obrazovanim radnicima, stručnjacima te rukovodećim osobljem. Takvi radnici od poslodavca očekuju izvjesnu fleksibilnost u organizaciji rada. Detaljnije vidi u: Eurofound, op. cit. u bilj. 44, str. 73-77.*

[18]*U literaturi se taj tip rada često svrstava pod pojam „pametnog načina rada"(engl. smart work), odnosno „agilnog načina rada" (engl. agile work).*

radi o varijanti *teleworka* (odnosno rada naizdvojenom mjestu rada), pri čemu se od tradicionalnog *teleworka* razlikuje po tome što radnici ne rade na drugom fiksnom mjestu rada, nego su puno fleksibilniji – rade na raznim lokacijama ili čak „na cesti".[19] Događa se zapravo svojevrsna 'dematerijalizacija'mjesta rada.[20] Treba primijetiti da 'dematerijalizacija' mjesta rada direktno utiče na intenzitet podređenosti radnika poslodavcu kao jednog od bitnih elemenata radnog odnosa. Naime u opisanim uvjetima fizičke odvojenosti radnika i poslodavca autonomija radnika povećana je u odnosu na tradicionalnu organizaciju rada, a poslodavac sada više ne može lično i u kontinuitetu nadzirati kvalitetu i kvantitetu izvršenog rada.[21]Udigitalnom načinu rada fizička odvojenost radnika od poslodavca može imati određene posljedice, što znači da se poslodavac može odlučiti za veći ili manji stepen kontrole nad radom radnika u odnosu na tradicionalnu organizaciju rada. Koristeći digitalnu tehnologiju, odnosno uređaje za daljinski nadzor, poslodavac može pojačati nadzor nad radom radnika, prije svega u pogledu rada na daljinu koji se odvija *online*. S druge strane poslodavac može odlučiti u manjoj mjeri oblikovati i organizirati izvršavanje rada, dakle smanjiti intenzitet svog nadzora, a rad radnika vrednovati u skladu sa rezultatima.[22]

U suštinskom smislu, postoje dva načina na koja rad pomoću digitalne ili IT tehnologije dolazi do izražaja u privredi. Prvi slučaj je kada u jednom privrednom subjektu radnik ili više njih radi sa određene dislocirane lokacije, dakle, ne radi u prostorijama privrednog lica, već sa nekog drugog mjesta, ali za potrebe i po nalogu svog poslodavca. Drugi slučaj jeste rad preko digitalnih platformi po principu ponude i potražnje, pri čemu

---

[19]*Eurofound, op. cit. u bilj. 44, str. 73.*

[20]*Tako npr. Ales, E., Protecting work in the digital transformation: Rethinking the typological approach in the intrinsically triangular relationship perspective, u: Ales, E. et al. (ur.), Working in digital and smart organizations, Cham: Palgrave Macmillan, 2018, bilj. 54, str. 13-17.*

[21]*Eurofound navodi da kompanije koje su uvele ICT mobilni rad češće plaćaju svoje radnike u skladu sa rezultatima rada, a ne prema radnom vremenu. Neki poslodavci pak koriste tehnički napredne sustave nadzora, primjerice programe koji omogućuju evidentiranje je li radnik spojen na računalni sustav firme te koliko je vremena proveo radeći na određenom radnom zadatku. V. Eurofound, op. cit. u bilj. 44, str. 77.*

[22] *I. Bjelinski Radić, Izvori radnog i socijalnog prava u svjetlu digitalizacije rada ZPR 8 (3) 2018; 309-331*

određeno lice nudi svoju uslugu da izvrši određene poslove, a druga lica ga angažuju i daju mu povjerenje da obavi posao. U prvom slučaju situacija je jasna u vezi radno-pravnog statusa radnika. On je u radnom odnosu kod svog poslodavca, samo posao obavlja izvan sjedišta poslodavca. U drugom slučaju postoji dosta nejasnoća i takvi slučajevi otvaraju veći broj pitanja.

Digitalne tehnologije mjenjaju način na koji ljudi rade.[23]Usljed sve veće primjene digitalnih tehnologija i umjetne inteligencije u privrednim poslovima otvara se određeni broj novih radnih mjesta, koja do sada nisu bila tretirana standardnom klasifikacijom zanimanja, koja se javljaju kao posljedica uticaja novih tehnologija.[24] Novi poslovi, novi privredni sektori, novi proizvodi i usluge nastali zbog uticaja digitalizacije logično kreiraju i drugačiji radno pravni ambijent u kojem nastaje potražnja za nekim novim sposobnostima, znanjima i vještinama radnika na berzi rada. Evidentno je da će takav proces u privredi zahtijevati određeni oblik osposobljavanja radnika za trenutnu digitalnu evoluciju. Pored toga što olakšava rad, upotreba digitalnih tehnologija sa sobom nosi i rizik od ugrožavanja nekih osnovnih ljudskih prava.[25] Tu se posebno misli na pravo na rad odnosno pravo na posao. U tom smislu neophodno je hitno zakosnko uređenja pitanja rada na daljinu posebno rada uz pomoć digitalnih tehnologija. Navedenim zakonom je potrebno urediti odnos iozmeđu poslodavca i zaposlenika prava i obaveze te pravni položaj zaposlenika kako u materijalno pravnom pogledu tako I u pogledu zaštite na radu,

4. ORGANIZACIJA RADA PETEM DIGITALNIH TEHNOLOGIJA U BIH

Razvojem digitalnih tehnologija dolazi do ubrzanog razvoja ukupnih ekonomskih i privrednih odnosa u društvu. Obzirom da se na privredne odnose direktno naslanja radno zakonodavstvo, od iznimnog značaja je način uređenja radno pravnog položaja poslodavaca i

---

[23] *World Development Report, The Changing Nature of Work, World Bank Group 2019, 23*
[24]*Više o navedenoj klasifikaciji može se vidjeti na stranici: https://fzs.ba/index.php/2016/06/14/klasifikacija-zanimanja-u-fbih-abecedni-spisak*
[25] *Senad P. Jašarević, Darko Božičić, Radno pravo pred digitalne ekonomije, Zbornik radova Pravnog fakulteta Novi Sad, 2021, 1046.*

radnika u pogledu radno pravnog angažmana radnika na daljinu odnosno radnog angažmana radnika putem digitalni platformi, kao jednog od načina obavljanja poslova i radnih zadataka. Korištenje digitalnih tehnologija u toku rada uglavnom dolazi do izražaja kada radnik radi izvan prostorija poslodavca ili kada radi putem digitalnih platformi na daljinu.Nažalost radno zakonodavstvo u Bosni i Hercegovini ne prati razvoje informacionih tehnologija kaoni stvarne potrebe u privrednom poslovanju, tako da postojeće odredbe Zakona o radu uopće se ne bave pitanjem radnog radnopravnog statusa i angažmana radnika na daljinu, putem informacionih tehnologija odnosno digitalni platformi.

4.1. Rad na daljinu u Federaciji Bosne i Hercegovine

Postojeća pravna podloga za radni angažman radnika na daljinu u zakonu o radu FBiH temelji se na odredbi člana 26. Zakona o radu.[26]Navedena odredba Zakona o radu propisuje mogućnost zaključenjaugovora o radu, radi obavljanja poslova i izvan prostorija poslodavca, kod kuće radnika ili u drugom prostoru koji osigura radnik, u skladu sa kolektivnim ugovorom i pravilnikom o radu. Istom odredbom zakona uređeno je pitanje sadržine i podataka o trajanju radnog vremena, vrsti poslova i načinu organiziranja rada, uvjetima rada i načinu vršenja nadzora nad radom, visini plaće za obavljeni rad, rokovima isplate, te upotrebi vlastitih sredstava za rad i naknadi troškova za njihovu upotrebu kao i naknadi drugih troškova vezanih za obavljanje poslova i način njihovog utvrđivanja. Iz navedene zakonske odredbe može se zaključiti da je intencija zakonodavca bila da uredi radno pravni status radnika zaposlenih i radon angažovanih na određenim poslovima proizvodnje i stvaranja nove vrijednosti u pogledu proizvoda, a koje poslove mogu obavljati van sjedišta

[26] *Član 26. Zakona o radu - Ugovor o radu može se zaključiti radi obavljanja poslova i izvan prostorija poslodavca (kod kuće radnika ili u drugom prostoru koji osigura radnik), u skladu sa kolektivnim ugovorom i pravilnikom o radu. (2) Ugovor o radu zaključen u smislu stava 1. ovog člana, pored podataka iz člana 24. ovog zakona, sadrži i podatke o: a. trajanju radnog vremena; b. vrsti poslova i načinu organiziranja rada; c. uvjetima rada i načinu vršenja nadzora nad radom; d. visini plaće za obavljeni rad; i rokovima isplate; e. upotrebi vlastitih sredstava za rad i naknadi troškova za njihovu upotrebu; f. naknadi drugih troškova vezanih za obavljanje poslova i način njihovog utvrđivanja; g. drugim pravima i obavezama.(3) Ugovor iz stava 1. ovog člana može se zaključiti samo za poslove koji nisu opasni ili štetni po zdravlje radnika ili drugih lica i ne ugrožavaju radnu okolinu, u skladu sa zakonom.“*

poslodvaca od kuće, najčešće u vlastitim prostorijama stavljajući na raspolaganje poslodavcu svoj raspoloživi prostor i druga sredstva za rad. Za razliku od rada od kuće radnika ili rada u drugom prostoru koji osigura radnik, rad na daljinu je rad koji se uvijek obavlja putem informacijsko komunikacijske tehnologije, na način da radnik samostalno određuje gdje će taj rad obavljati, što može biti promjenjivo i ovisiti o volji radnika.

Kada je u pitanju Federacija Bosne i Hercegovine, pravni osnov za rad radnika van prostorija poslodavca nalazimo u određenim Granskim kolektivnim ugovorima o radu, kao što je slučaj sa Granskim ugovorom za trgovinu.[27] Navedeni kolektivni ugovor ostavlja mogućnost poslodavcu da može radnika sa kojim ima zaključen ugovor o radu uputiti na rad izvan prostorija poslodavca (kod kuće radnika ili u drugom prostoru koji osigura radnik,) ukoliko to okolnosti zahtijevaju a kao npr. za vrijeme proglašenog stanja prirodne ili druge nesreće, kao i za vrijeme vanrednog stanja u Federaciji, proglašenog od strane nadležnih institucija, ekonomske situacije i drugih okolnosti koje se nisu mogle predvidjeti niti spriječiti, te ukoliko postoji mogućnost obavljanja tih poslova od kuće. Pretpostavka za donošenje takve odluke jeste obaveza poslodavca da donese Odluku o radu izvan prostorija poslodavca, kojom se obavezno definišu izvršioci, radna mjesta na kojima će se poslovi obavljati izvan prostorija poslodavca, način obavljanja poslova, trajanju radnog vremena, trajanju ugovora o radu, uslovima rada i načina vršenja nadzora nad radom, pravo i visinu plaće i naknade plaća za obavljeni rad, vrijeme dostupnosti radnika poslodavcu, način izvještavanja, upotrebi vlastitih sredstava za rad i naknadi troškova, vrijeme trajanja odluke i druga pitanja od značaja za provođenje navedene odluke.[28]

---

[27]*Član 10. Kolektivnog ugovora za trgovinu FBiH (Sl. Novine FBiH br. 85/21). Poslodavac ima pravo radnika sa kojim ima zaključen ugovor o radu uputiti na rad izvan prostorija poslodavca (kod kuće radnika ili u drugom prostoru koji osigura radnik, a sa čim je poslodavac saglasan) u sljedećim slučajevima: - ukoliko to okolnosti zahtijevaju a kao npr. za vrijeme proglašenog stanja prirodne ili druge nesreće, kao i za vrijeme vanrednog stanja u Federaciji, proglašenog od strane nadležnih institucija, ekonomske situacije i drugih okolnosti koje se nisu mogle predvidjeti niti spriječiti, te ukoliko postoji mogućnost obavljanja tih poslova od kuće u skladu sa Odlukom iz člana 11. ovog ugovora. U slučajevima iz prethodnog stava poslodavac je dužan uz otkaz ugovora o radu istovremeno ponuditi radniku zaključivanje ugovora o radu sa izmijenjenim uslovima kojim se reguliše obavljanje poslova izvan prostorija poslodavca (kod kuće radnika ili u drugom prostoru koji osigura radnik). O ponudi za zaključivanje ugovora o radu iz stava 2. ovog člana radnik se mora izjasniti*

[28]*Član 11. Kolektivnog ugovora za trgovinu FBiH (Sl. Novine FBiH br. 85/21)*

4.2. Rad na daljinu u Republici Srpskoj

Pitanje rada na daljinu odnosno rada uz korištenje digitalnih tehnologija u Republici Srpskoj uređeno je članom 44. Zakona o radu Republike Srpske.[29]Za razliku od Zakona o radu Federacije Bosne i Hercegovine Zakon o radu Republike Srpske propisuje da radni odnos može da se zasnuje za obavljanje poslova van prostorija poslodavca, te da tako zasnovan radni odnos obuhvata rad na daljinu i rad od kuće. Istom zakonskom odredbom uređeno je pitanje trajanja radnog vremena, vrste poslova i načina organizovanja rada, uslova rada i način vršenja nadzora nad radom radnika, pitanje visine plate za obavljeni rad i rokova isplate, korišćenje i upotreba sredstava za rad radnika i naknada za njihovu upotrebu, pitanje naknade drugih troškova rada i načina njihovog utvrđivanja. Kao što se može zaključiti navedena zakonska odredba propisuje da poslodavac može organizovati rad od kuće, što podrazumijeva fizički rad ali ne u sjedištu poslodavca nego rad od kuće na način, da radnik pored svoje radne snage stavlja na raspolaganje i svoju imovinu radi obavljanja rada od kuće i stvaranja novog proizvoda iz asortimana djelatnosti poslodavca. Navedena zakonska odredba ostavlja mogućnost i rad na daljinu a što bi podrazumijevalo intelektualni rad koji se pruža putem digitalnih informacionih tehnologija.

4.3. Rad na daljinu u Brčko Distriktu BiH

Radni angažman radnika putem korištenja digitalnih tehnologija i alata prilkom rada u Brčko Distriktu BiH uglavnom dolazi do izražaja kada radnik radi izvan prostorija poslodavca ili kada radnik radi na daljinu putem digitalnih platformi, a pravna podloga za

---

[29] *Član 44 stav 1 Zakona o radu Republike Srpske - Radni odnos može da se zasnuje za obavljanje poslova van prostorija poslodavca. (2) Radni odnos za obavljanje poslova van prostorija poslodavca iz stava 1. ovog člana* ***obuhvata rad na daljinu i rad od kuće.*** *(3) Ugovor o radu koji se zaključuje u smislu stava 1. ovog člana, pored podataka iz člana 35. ovog zakona, sadrži i: 1) trajanje radnog vremena, 2) vrstu poslova i način organizovanja rada, 3) uslove rada i način vršenja nadzora nad radom radnika, 4) visinu plate za obavljeni rad i rokove isplate, 5) korišćenje i upotrebu sredstava za rad radnika i naknadu za njihovu upotrebu, 6) naknadu drugih troškova rada i način njihovog utvrđivanja i 7) druga prava i obaveze. (4) Poslodavac može da ugovori poslove van svojih prostorija koji nisu opasni ili štetni po zdravlje radnika i drugih lica i ne ugrožavaju radnu sredinu.*

takav rad je u Članu 35 Zakonu o radu Brčko Distrikta BiH.[30] Navedenom odredbom zakona propisano je da radni odnos može se zasnovati za obavljanje poslova van prostorija poslodavca i to kao rad na daljinu i rad od kuće, u skladu s općim aktom. Kao što se može primjetiti i navedena zakonska odredba ostavlja mogućnost rada na daljinu a što bi podrazumijevalo intelektualni rad koji se pruža putem digitalnih informacionih tehnologija.

Država Bosna i Hercegovina zbog svog specifičnog ustavnog ustrojstva imarascjepkano i unutrašnje pravno uređenje. To uređenje se reflektira i na segment radnog prava. Bosna i Hercegovina zbog iste monete, pdv politike, carina, putarina i slično, privredno posmatrana predstavlja jedinstveno tržište, bez obzira na složeno društveno političko uređenje. Postojanje tri zakona o radu, te više Granskih kolektivnih ugovora, koji određene pojave i institute različito pravno uređuju, takav pravni pristup predstavlja jednu otežavajuću okolnost za poslodavce i radnike. Ta činjenica je sigurno otežavajuća i za radno-pravna pitanja u doba digitalne transformacije u Bosni i Hercegovini. Iz svega navedenog može se zaključiti da radno zakonodavstvo u Bosni i Hercegovini ne prati digitalnu transformaciju u praksi. Postojeća zakonska rješenja samo kroz jedan ili dva člana u zakonima o radu entiteta i distrikta vrlo površno dotiču se rada izvan prostorija poslodavca. Izvršna i zakonodavna vlast bi svaka na svoj način trebale pristupiti proceduri izmjena i dopuna postojećih propisa iz radnog prava, kako bi adekvatno u skladu sa iskustvima zapadnih država prilagodila radno pravo savremenim izazovima, posebno onim koje implicira digitalna transformacija. Rad na daljinu nakon pandemije COVID-19. posebno u oblasti informacionih tehnologija postao je

[30]*Član 35 Zakona o radu Brčko Distrikta Bosne i Hercegovine - (1) Radni odnos može se zasnovati za obavljanje poslova van prostorija poslodavca i to kao rad na daljinu i rad od kuće, u skladu s općim aktom.(2) Rad van prostorija poslodavaca, radnik obavlja sam ili s članovima svoje uže porodice, u ime i za račun poslodavca.(3) Ugovor o radu koji se zaključuje u skladu sa stavom 1 ovog člana, pored podataka iz člana 24 stava 1 ovog zakona, sadrži i:a) vrstu poslova i način organizovanja rada,b) uslove rada i način vršenja nadzora nad radom radnika,c) korištenje i upotrebu sredstava za rad radnika i naknadu za njihovu upotrebu,d) naknadu drugih troškova rada i način njihovog utvrđivanja ie) druga prava i obaveze.(4) Radnik koji obavlja poslove van prostorija poslodavca ima ista prava kao i radnik koji radi u prostorijama poslodavca, osim prava i obaveza koje proističu iz prirode rada van prostorija poslodavca, utvrđenih ugovorom o radu.(5) Poslodavac može ugovoriti poslove van svojih prostorija samo u slučaju da ti poslovi nisu opasni ili štetni po zdravlje radnika i drugih lica, u skladu s posebnim zakonom i drugim propisima.*

uobičajena praksa. IT stručnjaci širom Bosne i Hercegovine sve češće rade iz svojih domova, coworking prostora.

Iako rad na daljinu pruža značajne prednosti u pogledu veće fleksibilnosti, smanjenja troškova i pristup širem tržištu rada, ovakav vid radnog angažmana otvara i niz pravnih pitanja koja se odnose na radnopravne odnose, zaštitu podataka i informacionu bezbjednost. U pravilu poslodavci su obavezni da radnicima na daljinu osigurati jednaka prava kao i onima koji rade u prostorijama kompanije, uključujući pravo na odmor, plaćeno odsustvo i zaštitu zdravlja i bezbjednosti na radu. U konačnom rad na daljinu u IT sektoru, iako pruža značajne prednosti u pogledu fleksibilnosti, bolje optimizacije troškova i pristupa širem spektru kadrovskih resursa, istovremeno generiše određene rizike, naročito u domenu zaštite ličnih podataka. Stoga je neophodno da politike rada na daljinu budu precizno normirane i u potpunosti usklađene sa relevantnim odredbama Zakona o radu, dok mjere zaštite podataka moraju ispunjavati standarde i obaveze propisane Zakonom o zaštiti ličnih podataka.

5. IZAZOVI U POGLEDU ZAKONSKOG UREĐENJA RADA NA DALJINU

Radno pravo u Bosni i Hercegovini se još uvijek zasniva na tradicionalnom pristupuorganizacije rada i obavljanja poslova. Taj tradicionalni pristup u dobroj mjeri opterećuje privredno poslovanje pa samim time I konkurentnost na tržištu. U trenutnim okolnosima, kada digitalna transformacija u svim društvenim oblastima postaje stvarnost, a najveći izazov sa kojim treba da se suoči naše radno zakonodavstvo, kako na najbolji način prepoznati nove socijalno-društvene pojave i interakcije, koje je potrebno adekvatno urediti zakonskim ili drugim propisima. Posebno se to odnosi u segmentu privrednog djelovanja, stavljajući akcenat na pitanje statusa zaposlenika i organizaciju rada. Ukoliko to odgovara poslodavcu i radniku, radnik može obavljati posao sa različitih destinacija, koje su adekvatne za najproduktivniji i ekonomičniji način rada. Budući izazov je kako usaglasiti i urediti pravni položaj radnika na način da se istom omogući rad koji i za radnika i poslodavca predstavlja najprihvatljiviji način organizovanja poslovanja kao što je između ostalog i rad na daljinu. Obzirom da digitalne tehnologije sa sobom donose jedan nivo fleksibilnosti u pogledu

ukupnog načina organizovanja poslovanja, pa samim time i organizovanja načina rada, kao bitnog segmenta poslovanja, ta fleksibilnost u uslovima upotrebe digitalnih tehnologija implicira smanjenje značaja i potrebe fizičkog prisustvaradi obavljanja određenih poslova. U tom pogledu digitalna transformacija omogućava efikasno izvršavanje radnih zadatatka od strane radnika i radom na daljinu, pod uslovom da se radi o poslovima koji nisu vezani za konkretnu lokaciju posla. Međutim u uslovima obavljanja poslova na drugim mjestima izvan prostorija poslodavca, poslodavac nije više u mogućnosti da lično na tradicionalan način kontroliše i nadzire kvalitet rada i obavljenog posla, međutim postoje drugi načini i pristupi koji omogućuju poslodavcu kontrolu rada i vrednovanja poslova koje obavljaju radnici prilikom rada na daljinu.Radnici koji u svom radu koriste digitalne tehnologije i rade izvan prostorija poslodavca često u okviru svog četrdesetsatnog sedmičnog vremena rade navečer i vikendima. Međutim, može se desiti da takvi radnici rade i duže od sedmičnog radnog vremena. U tom slučaju radi se o prekovremenom radnom vremenu, koje zahtijeva obračun prekovremenog radnog vremena i plaćanje za to radno vrijeme u skladu sa zakonskim propisima i internim aktima poslodavca. Imajući u vidu sve navedeno, postavlja se i pitanje primjene propisa o zaštiti i sigurnosti na radu u uslovima u kojima se rad odvija izvan prostorija Poslodavca, pa je samim tim posebno neophodno obratiti pažnju na pitanja zdravlja i sigurnost radnika. Dakle, jasno je da digitalne tehnologije sa sobom nose i negativne implikacije. Na prvom mjestu tu se izdvaja opasnost od narušavanja privatnosti do koje može dovesti upotreba digitalnih tehnologija.

5.1. Izazovi u pogledu organizovanja rada putem digitalnih platformi

Osim slučajeva u kojima radnik obavlja posao u privrednim društvima putem digitalnih tehnologija u prostorijama poslodavca ili izvan istih, sve češća je pojava radnika koji putem tzv. digitalnih platformi obavljaju ododređene poslove ili pružaju svoje usluge.[31]Postoje različite definicije digitalnih radnih platformi, a u nedostatku zvanične definicije ove platforme u Bosanskohercegovačkim propisima iz oblasti radnog prava, kao prihvatljivu i vrlo decidnu definiciju nalazimo u zakonu o radu Republike Hrvatske. „Digitalna radna

[31] *Svakako jedna od najpoznatijih digitalnih platformi u svijetu je platforma za trgovinu Amazon.*

platforma je, u smislu ovoga zakona, fizička ili pravna osoba koja pruža usluge koje se na zahtjev primatelja usluge pružaju korištenjem digitalne tehnologije, a u okviru organizacije rada u kojem fizičke osobe posao obavljaju na daljinu pomoću elektroničkog sredstva (internetska stranica, mobilna aplikacija i sl.) ili izravno na određenoj lokaciji."[32]

U pogledu radnog prava, kod radnika koji rade putem digitalnih platformi[33] javlja se veći broj radno-pravnih problema i izazova, nego kod radnika koji su zaposleni u privrednim društvima u kojim rade uz upotrebu digitalnih sredstava. Među tim problemima posebno se nameću problemi i izazovi statusa radnika, da li su osigurani i samim tim da li uživaju sva prava koja radnicima pružaju propisi. U tom pogledu može se desiti da radnici sami registruju neki vid pravnog subjekta ili dodatne djelatnosti, ali vjerovatno ima i onih koji kao fizička lica ili obavljaju određene poslove ili pružaju usluge putem digitalnih platformi a da pri tome nisu osigurani. Osim toga, kao otvorena pitanja nameću se i pitanja zaštite na radu, mjesta obavljanja posla, kao i pitanje radnog vremena. Kada je u pitanju radno vrijeme, tu nema pravila, tako da radnici koji rade preko digitalnih radnih platformi imaju potpunu fleksibilnost u svom radu, ali istovremeno ta fleksibilnost može odvesti u pravcu prekovremenog rada, noćnog rada i rada praznicima i blagdanima.

Poseban izazov će biti regulisanje otvorenih pitanja za radnike koji rade preko digitalnih platformi. Među važnim pitanjima koja se nameću, a koje bi trebalo regulisati zakonom ili kolektivnim ugovorom jeste pitanje cjeloživotnog učenja, jer samo takvim učenjem radnici mogu pratiti savremene trendove.[34] Nažalost, brojne studije pokazuju da više od polovine radon aktivnog stanovništva nije učinilo ništa po pitanju svog usavršavanja nakon okončanja školovanja.[35] Sindikalne organizacije bi trebale u svoj rad uključivati i rješavanje izazova i pitanja radnika koji rade pomoću digitalnih tehnologija i alata, te digitalnih platformi, kako bi navedeni radnici našli svoje mjesto u radnom zakonodavstvu.

---

[32] *Članak 221.c Zakona o radu Republike Hrvatske. Navedeni zakona se može pogledati na stranici: https://www.zakon.hr/z/307/zakon-o-radu.*

[33] *O različitim vrstama digitalnih platformi vidi Darko Božičić, "Digitalne platforme i njihov uticaj na odnose povodom digitalnog rada, "Zbornik radova Pravnog fakulteta u Novom Sadu 1/2020, 455-458.*

[34] *Velika Britanija je npr. još 2017. godine usvojila plan za realizaciju koncepta cjeloživotnog učenja i u svom budžetu za navedenu godinu odvojila određena sredstva.*

[35] *Johnny Rich, Employability: Degrees of Value, HEPI, Oxford 2015.*

ZAKLJUČAK

Upotreba digitalnih tehnologija i umjetne ili vještačke inteligencije u današnjem vremenu u privrednom poslovanju privrednih društava i pojedinaca je istovremeno stvarnost u Bosni i Hercegovini. Jer, naša država u tom segmentu samo slijedi evropske i svjetske trendove, koji su u pogledu korištenja digitalnih tehnologija i umjetne inteligencije daleko izraženiji nego u BiH. Razloge upotrebe digitalnih tehnologija i umjetne inteligencije treba tražiti u racionalizaciji upotrebe radne snage i ukupnom privrednom i tehnološkom razvoju. Upotreba digitalnih tehnologija i alata, kao i umjetne inteligencije, otvara mnogobrojna pitanja iz oblasti radno-pravnih odnosa i to kod radnika koji rade u privrednim društvima izvan prostorija poslodavca uz pomoć digitalnih alata i tehnologija i osoba koje obavljaju poslove i pružaju usluge za naknadu preko digitalnih platformi. Status prve navedene grupe je dijelom uređen postojećim radno-pravnim zakonodavstvom u Bosni i Hercegovini kroz institut obavljanja posla van prostorija poslodavca, što je spomenutu kroz ovaj rad, ali to ipak nije dovoljno i ne prati potrebe cjelokupnog uređenja radon pravnog statusa te vrste radnika. Sa druge strane, radno-pravna pitanja osoba koje obavljaju poslove na tržištu preko digitalnih platformi, nije uređen važećim propisima u našoj zemlji. Zato je pitanje takvih radnika trenutno veći problem. Uglavnom, u segmentu rada radnika pomoću digitalnih alata i tehnologija, kao i rada preko digitalnih platformi te korištenja umjetne inteligencije u radu, veliki je broj izazova koje treba sistemski riješiti kroz buduće izmjene radnog zakonodavstva. Tu su otvorena pitanja dužine radnog vremena, odmora, noćnog rada, načina vršenja nadzora nad radom, načina izvještavanja poslodavca, upotrebi vlastitih sredstava za rad i naknadi troškova, socijalnog osiguranja onih koji rade preko digitalnih platformi i slično. Trendove upotrebe digitalnih alata i tehnologija te korištenje umjetne inteligencije ne možemo zaustaviti, ali je zato važno svim radnicima koji spadaju u neku od dvije spomenute grupe radnika koje obavljaju svoje poslovne aktivnosti isključivo primjenom tih tehnologija, pružiti radno-pravnu sigurnost i obezbijediti im mogućnost da ostvaruju osnovna svoja radna prava. Stoga, najveći izazov zakonodavcima u našoj zemlji će biti transformacija radnog zakonodavstva sa postojećih na nove postavke koje će odgovoriti svim zahtjevima digitalne transformacije u privredi. Takvo usklađivanje propisa trebalo bi biti sinhronizirano u entitetima FBiH, RS i Brčko distriktu Bosne i Hercegovine, kako bi se pravna sigurnost. Na kraju, vrlo važno je

naglasiti da zakonska legislativa mora pratiti dešavanja u privredi, kako bi se tsna taj način stvorio što bolji ambijent za privredno poslovanje, pa samim time obezbijedila i konkurentnost na tržištu.

POLITIKE I CILJEVI RADA I DJELOVANJA MEHANIČKOG KALIBRACIONOG LABORATORIJA INSTITUTA „KEMAL KAPETANOVIĆ“ U ZENICI

POLICIES AND OBJECTIVES OF THE WORK AND ACTIVITIES OF THE MECHANICAL CALIBRATION LABORATORY OF THE "KEMAL KAPETANOVIĆ" INSTITUTE IN ZENICA

BRANKA MUMINOVIĆ/ISTRAŽIVAČ SAVJETNIK

Sinha Korlat

Almir Kadrić

Sejad Avdić

Univerzitet u Zenici, Institut „Kemal Kapetanovič“ u Zenici

Travnička cesta 7, Zenica

REZIME

Mehanički kalibracioni laboratorij djeluje u okviru Centra za metalne materijale i tehnologije Instituta „Kemal Kapetanović“ u Zenici.

Laboratorij je 1998. godine akreditovan za kalibraciju uređaja za mjerenje sile, tvrdoće i momenta sile od strane bosanskohercegovačkog tijela za akreditaciju, koje je djelovalo pri Zavodu za standardizaciju, mjeriteljstvo i patente Bosne i Hercegovine (sada Institut za akreditiranje Bosne i Hercegovine) u skladu sa standardom EN 45001:1989.

Laboratorij je, u aprilu 2003. godine, reakreditovan po standardu BAS EN ISO/IEC 17025 od strane Instituta za akreditiranje BiH i nalazi se u šestom ciklusu važenja akreditacije LK-02-01 za period 2023.- 2027.

U ovom radu je dat pregled područja djelovanja laboratorija i pilagođavanja područja akreditacije sa aspekta zahtjeva korisnika usluga i zahtjeva tržišta Bosne i Hercegovine. Takođe, navedene su politike djelovanja laboratorija za naredni period a koje se odnose na uvođenje i akreditaciju novih mjerenih veličina koje nisu osvojene u Bosni i Hercegovini a za kojima je izražena potreba tokom istraživanja tržišta i saradnje sa korisnicima usluga.

Ključne riječi: Standard BAS EN ISO/IEC17025:2018, akreditacija, kalibracija, sila, tvrdoća, dužina, etalon

SUMMARY

The Mechanical calibration laboratory operates within the Center for Metal Materials and Technologies of the "Kemal Kapetanović" Institute in Zenica.

The laboratory was accredited in 1998 for the calibration of testing machines for measuring force, hardness, and torque by the Bosnian-Herzegovinian accreditation body, which operated under the Institute for Standardization, Metrology and Patents of Bosnia and Herzegovina (now the Institute for Accreditation of Bosnia and Herzegovina) in accordance with the standard EN 45001:1989.

The laboratory was reaccredited in April 2003 according to the standard BAS EN ISO/IEC 17025 by the Institute for Accreditation of Bosnia and Herzegovina and is in the fifth cycle of the validity of accreditation LK-02-01 for the period 2023-2027.

This paper provides an overview of the operating areas of the laboratory and the adjustment of the accreditation scope in terms of the requirements of customer and the research of the market in Bosnia and Herzegovina.

Additionally, the policies for the laboratory's actions for the upcoming period are outlined, which relate to the introduction and accreditation of new measured quantities that have not been established in Bosnia and Herzegovina, but for which there has been a recognized need during market research and cooperation with customer.

Keywords: Standard BAS EN ISO/IEC17025:2018, accreditation, calibration, force, hardness, length, etalon

1. UVOD I AKREDITACIJE

Mehanički laboratorij je formiran odmah po osnivanju Instituta i ima tradiciju više od 60 godina rada. Djelovao je u okviru Zavoda za fizičku metalurgiji Metalurškog instituta „Hasan Brkić". Danas, Mehanički kalibracioni laboratorij, je dio Centra za metalne materijale i tehnologije Instituta „Kemal Kapetanović" u Zenici.

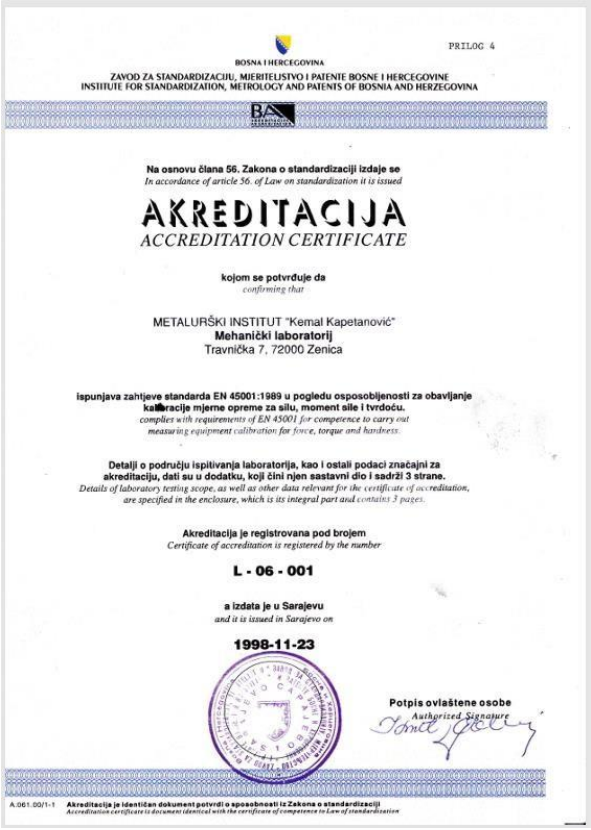
Prvo područje rada laboratorija je:

- kalibracija uređaja za mjerenje sile - kidalice i dinamometri prema standardu BAS EN 10002-2,

- kalibracija aparata za ispitivanje tvrdoće indirektnom metodom sa certificiranim referentnim pločicama za tvrdoću, metodom Brinel prema standardu BAS EN ISO 6506-2, metodom

Vikers prema standardu BAS EN ISO 6507-2 i metodom Rokvel prema standardu BAS EN ISO 6508-2,

- kalibracija moment ključeva prema standardu BAS EN ISO 6789.



PRILOG 4

BOSNA I HERCEGOVINA

ZAVOD ZA STANDARDIZACIJU, MJERITELJSTVO I PATENTE BOSNE I HERCEGOVINE
INSTITUTE FOR STANDARDIZATION, METROLOGY AND PATENTS OF BOSNIA AND HERZEGOVINA

Na osnovu člana 56. Zakona o standardizaciji izdaje se
In accordance of article 56. of Law on standardization it is issued

AKREDITACIJA
ACCREDITATION CERTIFICATE

kojom se potvrđuje da
confirming that

METALURŠKI INSTITUT "Kemal Kapetanović"
Mehanički laboratorij
Travničkа 7, 72000 Zenica

ispunjava zahtjeve standarda EN 45001:1989 u pogledu osposobljenosti za obavljanje kalibracije mjerne opreme za silu, moment sile i tvrdoću.
complies with requirements of EN 45001 for competence to carry out measuring equipment calibration for force, torque and hardness.

Detalji o području ispitivanja laboratorija, kao i ostali podaci značajni za akreditaciju, dati su u dodatku, koji čini njen sastavni dio i sadrži 3 strane.
Details of laboratory testing scope, as well as other data relevant for the certificate of accreditation, are specified in the enclosure, which is its integral part and contains 3 pages.

Akreditacija je registrovana pod brojem
Certificate of accreditation is registered by the number

L - 06 - 001

a izdata je u Sarajevu
and it is issued in Sarajevo on

1998-11-23

Potpis ovlaštene osobe
Authorized Signature

A.061.00/1-1 Akreditacija je identičan dokument potvrdi o sposobnosti iz Zakona o standardizaciji
Accreditation certificate is document identical with the certificate of competence to Law of standardization

Slika 1. Certifikat o akreditaciji L-06-001

Laboratorija je, 1998. godine akreditovana od strane Zavoda za standardizaciju, mjeriteljstvo i patente Bosne i Hercegovine u skladu sa standardom EN 45001:1989 sa znakom akreditacije L-06-001, slika 1., u pogledu osposobljenosti za obavljanje kalibracije mjerne opreme za silu, moment sile i tvrdoću.

To je bila prva akreditovana kalibraciona laboratorija u Bosni i Hercegovini a akreditaciju je uručio tadašnji ministar za vanjsku trgovinu i ekonomske poslove u vijeću ministara Bosne i Hercegovine.

Dobijanje prvih akreditacije u Bosni i Hercegovini, koje su se odnosile na kompetentnost ispitnih i kalibracionih laboratorija, bile su epohalni uspjeh i medijski su zabilježene.

Zahtjev koji se odnosi na najbolju mjeriteljsku sposobnost laboratorije nije bio sadržan u EN 45001:1989.

Posjedovanje akreditacije značilo je i nove izazove za laboratorij i ulaganje dosta energije u komunikaciji sa korisnicima usluga u smislu edukacije korisnika o značaju kalibracije ispitne opreme sa aspekta pouzdanosti dobijenih rezultata, osiguranja kvaliteta rezultata ispitivanja i praćenja kvaliteta od ulazne sirovine do gotovog proizvoda.

Održavanje akreditacije zahtjevalo je ulaganje u opremu, praćenje savremenih trendova razvoja kalibracione i ispitne opreme, kontinuirano obučavanje osoblja, praćenje zahtjeva novih izdanja standarda i zahtjeva tržišta Bosne i Hercegovine.

Tokom 2002. godine, laboratorija je uradila izmjene svih dokumenata sistema upravljanja kvalitetom i sve priprema za akreditaciju prema zahtjevima standarda BAS EN ISO/IEC 17025, koji se odnosi na generalne zahtjeve za kompetentnost ispitnih i kalibracionih laboratorija [1].

Nakon isteka akreditacije u trajanu od 5 godina, prema standardu EN 45001:1989, Mehanički kalibracioni laboratorij ispunjava zahtjeve standarda BAS EN ISO/IEC 17025:2000 i dobija prvu akreditaciju sa znakom LK-02-01, slika 2., u pogledu osposobljenosti za obavljanje kalibracije mjerne opreme za silu, momet sile i tvrdoću od Instituta za akreditiranje Bosne i Hercegovine za period 2003. do 2007. godina.

Ovo je bila prva izdata akreditacija za kalibracionu laboratoriju u Bosni i Hercegovini i nalazi se na prvom mjestu popisa akreditovanih kalibracionih laboratorija za ocjenjivanje usklađenosti izdata od Instituta za akreditiranje Bosne i Hercegovine. Područje akreditacije sadržavalo je, pored ostalih elemenata, informacije o najboljoj mjernoj mogućnosti vezano za mjerenu veličinu i opseg mjerenja.

Uz redovna nadzorna ocjenjivanja. akreditacija je dobijena na period od 4 godine, što je bio i prvi ciklus akreditacije laboratorija prema standardu BAS EN ISO/IEC 17025:2000. Akreditacija po standardu BAS EN ISO/IEC 17025 značila je i osvajanje novih metoda i procedura, ispunjavanje svih zahtjeva standarda BAS EN ISO/IEC 17025 koji su bili dosta kompleksniji u odnosu na zahtjeve standarda EN 45001.

Prilog A-EA

INSTITUT ZA AKREDITIRANJE BOSNE I HERCEGOVINE
INSTITUTE FOR ACCREDITATION OF BOSNIA AND HERZEGOVINA

Na osnovu člana 9. Zakona o akreditiranju Bosne i Hercegovine Institut se
According to the article 9. of Law on Accreditation of Bosnia and Herzegovina it is issued

AKREDITACIJA
ACCREDITATION CERTIFICATE

kojom se potvrđuje da
confirming that

METALURŠKI INSTITUT "KEMAL KAPETANOVIĆ"
Mehanički kalibracioni laboratorij
Travnička cesta 7, 72000 Zenica

Ispunjava zahtjeve standarda BAS EN ISO/IEC 17025 u pogledu osposobljenosti za obavljanje kalibracije mjerne opreme za silu, moment sile i tvrdoću.
complies with requirements of BAS EN ISO/IEC 17025 for competence to carry out measuring equipment calibration for force, torque and hardness.

Detalji o području kalibracije, kao i ostali podaci značajni za akreditaciju, dati su u dodatku, koji čini njen sastavni dio.
Details of calibration scope, as well as other data relevant for the accreditation certificate, are specified in the enclosure, that is its integral part.

Akreditacija je registrovana pod brojem
Accreditation Certificate is registered by the number

LK - 02 - 01

a izdata je u Sarajevu
and it is issued at Sarajevo on

2003-01-08

Potpis ovlaštene osobe
Authorized Signature

NORSK AKKREDITERING

AKKREDITERINGSBEVIS
ACCREDITATION CERTIFICATE
University of Zenica, Institute of metallurgy

er første gang akkreditert den 05.01.2011 av Norsk Akkreditering
is accredited on 05.01.2011 by the Norwegian Accreditation
og tilfredsstiller kravene i NS-EN ISO/IEC 17025
and complies with the requirements of NS-EN ISO/IEC 17025
Akkrediteringens omfang og vilkår fremgår av gjeldende akkrediteringsdokument, og akkrediteringen forutsetter vedlikehold og oppfølging.
The scope and conditions of the accreditation are specified in the accreditation document and the accreditation requires regular surveillance.

Akkrediteringsnummer: CAL 035
Accreditation number

NORSK AKKREDITERING
NORWEGIAN ACCREDITATION

Direktør/Director

Slika 2. Certifikat o akreditaciji LK-02-01 *Slika 3. Certifikat o akreditacij CAL 035*

Najveći izazov i zahtjev standarda BAS EN ISO/IEC 17025 bio je procijeniti najbolju mjernu mogućnost za svaku veličinu i mjerni opseg iz područja akreditacije. Najbolja mjerna mogućnost je izražena preko najbolje mjerne mogućnosti u datom području i data kao standardna nesigurnost pomnožena sa faktorom prekrivanja dva, k=2 [2]. Najbolja mjerna mogućnost je potvrđena učešćem u provjeri osposobljenosti ili učešćem u interkomparaciji.

U januaru 2011. godine, u toku pripreme Instituta za akreditiranje Bosne i Hercegovine za članstvo u EA/MLA, jedan od zahtjeva bio je da se neke od akreditovanih laboratorija od strane Instituta za akreditiranje Bosne i Hercegovine akredituju i od strane nekog evropskog akreditacionog tijela. Mehanički kalibracioni laboratorij radi sve pripreme, ispunjava uslove i dobija akreditaciju od strane Norveškog akreditacionog organa prema standardu BAS EN ISO/IEC 17025:2006 sa znakom akreditacije CAL 035 i periodom važenja od 5 godina, slika 3. U području akreditacije potvrđena je najbolja mjerna mogućnost Mehaničkog kalibracionog laboratorija za svaku mjerenu veličinu i svaki opseg mjerenja.

U periodu važenja akreditacije CAL 035, Institut za akreditiranje Bosne i Hercegovine, kao državno akreditaciono tijelo, postaje potpisnik Multilateralnog sporazuma sa Evropskom akreditacijom (EA/MLA) u akreditacionoj šemi EN ISO/IEC 17025. Kao potpisnik EA/MLA Institut za akreditiranje prihvata sisteme akreditiranja drugih EA/MLA i ILAC/MRA potpisnika i smatra ih jednakim vlastitom sistemu akreditiranja. Prihvata certifikate/ izvještaje koje izdaju tijela akreditirana od strane drugih EA/MLA i ILAC/MRA potpisnika i smatra ih jednako pouzdanim certifikatima/izvještajima koje izdaju tijela akreditirana od strane Instituta za akreditiranje Bosne i Hercegovine. EA/MLA pruža okvir za ostvarenje cilja

„Akreditiran jednom, prihvaćen svugdje“. Iz tih razloga nije više bilo potrebe za reakreditaciju i ulazak u drugi ciklus akreditacije CAL 035.

U četvrtom ciklusu akreditacije, za period važenja certifikata o akreditaciji 2015. do 2019., laboratorij prelazi na izdanje standarda BAS EN ISO/IEC 17025 od 2018. godine. U ovom periodu laboratorija je prepoznala rizike u svakoj oblasti djelovanja, uradila njihovu identifikaciju i procijenila nivo rizika. Svako novo izdanje standarda značilo je i uvođenje i ispunjavanje novih zahtjeva koji su bili kompleksniji od prethodnog izdanja standarda.

BOSNA I HERCEGOVINA
BOSNIA AND HERZEGOVINA
INSTITUT ZA AKREDITIRANJE BOSNE I HERCEGOVINE
INSTITUTE FOR ACCREDITATION OF BOSNIA AND HERZEGOVINA

BATA ACCREDITATION
EA MLA potpisnik
EA MLA signatory

Na osnovu člana 9. Zakona o akreditiranju Bosne i Hercegovine izdaje se
In accordance of article 9. of Law on Accreditation of Bosnia and Herzegovina it is issued

CERTIFIKAT O AKREDITACIJI
ACCREDITATION CERTIFICATE

kojim se potvrđuje da
confirming that

JU Univerzitet u Zenici, Institut "Kemal Kapetanović"
Mehanički kalibracioni laboratorij
Travnička cesta 7
72000 Zenica

Ispunjava zahtjeve standarda BAS EN ISO/IEC 17025:2018 u pogledu osposobljenosti za izvođenje kalibracija.
Complies with requirements of BAS EN ISO/IEC 17025:2018 for competence to carry out calibrations.

Detalji o području akreditacije, kao i ostali podaci značajni za akreditaciju, dati su u dodatku, koji čini njen sastavni dio.
Details of accreditation scope, as well as other data relevant for the accreditation, are specified in the Annex, that is its integral part.

Broj akreditacije
Accreditation number
LK – 02 – 01
(Prva akreditacija / Initial accreditation: 2003-01-08)

Akreditacija važi do
Accreditation is valid until
2027-01-07

Sarajevo, 2023-01-06

Direktor / Director
mr.sc. Dražan Primorac

Slika 4. Aktuelni certifikat LK-02-01

Kroz nadzorna ocjenjivanja i reakreditacije, laboratorij se reakrediruje i nalazi se u šestom ciklusu akreditacije za period važenja certifikata o akreditaciji 2023. do 2027. godina, slika 4.

Proširena mjerna nesigurnost data u dodatku akreditacije predstavlja kalibracionu mjernu mogućnost (CMC) izraženu preko budžeta nesigurnosti u datom području kao proširena nesigurnost, odnosno standardna mjerna nesigurnost pomnožena faktorom prekrivanja k=2, uz vjerovatnoću prekrivanja od približno 95%, prema GUM vodiču i EA 4/02 [2, 3]. Za mjernu nesigurnost izraženu opsegom kontinuiranih vrijednosti, korištena je odgovarajuća linearna interpolacija.

U ovom ciklusu akreditacije laboratorija je procijenila kalibracionu mjernu mogućnost uzimajući

u obzir zahtjeve dokumenta ILAC P14 za područje kalibracije sile na način da je uzela u obzir i doprinos mjerne nesigurnosti od greške interpoloacije za procjenu CMC [4].

U području kalibracije aparata za ispitivanje tvrdoće revidirana je mjeriteljska mogućnost za svaku metodu i mjerno područje na način da je kalibracionu mjernu mogućnost data u zavisnosti od proširene mjerne nesigurnosti certificiranih referentnih pločica za tvrdoću.

Mehannički kalibracioni laboratoroj prati važeća izdanja metoda kalibracije prelazi na nova izdanja metoda, osvaja nove metode i nove mjerene veličine i vrši usklađivanje područja akreditacije sa aspekta potreba tržišta Bosne i Hercegovine i zahtjeva korisnika usluga.

2. POLITIKE I CILJEVI RADA I DJELOVANJA MEHANIČKOG KALIBRACIONOG LABORATORIJA

Politike i ciljevi Mehaničkog kalibracionog laboratorija usklađene su sa politikama direktora Instituta koje su date u Izjavi o politici kvaliteta i definisane u Poslovniku o kvalitetu Mehaničkog kalibracionog laboratorija.

Ciljevi se preispituju na preispitivanju od rukovodstva laboratorija i definišu novi krajem tekuće godine za narednu godinu. Ciljevi djelovanja Mehaničkog kalibracionog laboratorija odnose se na:

- održavanje kvaliteta usluga,
- prilagođavanje ili proširivanje područja akreditacije,
- nabavku nove opreme ili dijela opreme sa aspekta uvođenja novih metoda ili proširivanja područja akreditacije,
- obučavanje osoblja,
- praćenje zahtjeva i potreba tržišta,
- učešće u provjeri osposobljenosti ili interkomparaciji,
- kontinuirano osiguranje pouzdanih rezultata kalibracije,
- profesionalan i korektan odnos sa korisnicima usluga,
- sve laboratorijske aktivnosti obavljati nepristrasno i sa njima upravljati na način da se štiti nepristrasnost,
- osiguranje i zaštita povjerljivih informacija i sprječavanje aktivnosti koje bi dovele do slabljenja povjerenja u kompetentnost, nepristrasnost ili poslovnost,
- identifikovanje rizika po nepristrasnost i djelovanje u slučaju pojave rizika na način da se eliminiše ili svede na najmanju moguću mjeru,
- čuvanje kao povjerljive sve informacije dobijene od korisnika usluga ili nastale tokom laboratorijskih aktivnosti osim ako to drugačije nije propisano zakonom,
- osiguranje kontinuirane edukacije osoblja.

Izjava o politici i ciljevima kvaliteta data je od voditelja Mehaničkog kalibracionog laboratorija i sastavni je dio Poslovnika o kvalitetu laboratorija.

Osoblje laboratorija ima odgovornost da:

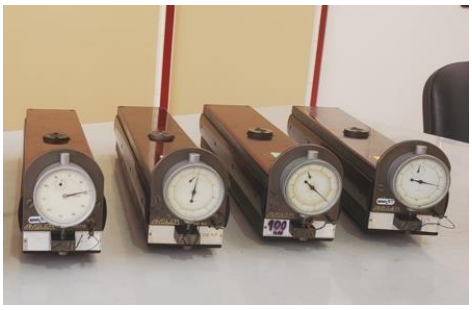
- implementira dokumente sistema upravljanja kvalitetom,
- u svakodnevnom radu provodi postavljene ciljeve kvaliteta,
- iznalazi mogućnosti za poboljšanja u skladu sa zahtjevima standarda, korisnika usluga i zahtjeva Instituta za akreditiranje BiH,
- sve laboratorijske aktivnosti obavlja nepristrasno,
- čuva kao povjerljive sve informacije nastale tokom izvođenja laboratorijskih aktivnosti.

Cilj politike kvaliteta Mehaničkog kalibracionog laboratorija je dostizanje visokog nivoa opremljenosti laboratorija, obučenosti osoblja, potpuna implementacija dokumentata sistema upravljanja kvalitetom u cilju osiguranja dugoročne vjernosti stalnih korisnika usluga i pridobijanja povjerenja novih korisnika usluga.

2.1 Pregled područja djelovanja Mehaničkog kalibracionog laboratorija i pilagođavanja područja akreditacije

Područje djelovanja Mehaničkog kalibracionog laboratorija dato je u Poslovniku o kvalitetu i važećem dodatku akreditacije LK-02-01. Tokom godina rada, laboratorij je mijenjao i prilagođavao područje rada sa aspekta zahtjeva korisnika i tržišta Bosne i Hercegovine a dajući prednost metodama koje nisu akreditovane u Bosni i Hercegovini. Osnovno područje rada zadržano je od osnivanja laboratorija. Usvajana su nova izdanja metoda kalibracije, koje je Institut za standardizaciju Bosne i Hercegovine preuzeo od međunarodne organizacije za standardizaciju ISO. Usvajanje novih metoda, koje su postavljale zahtjeve i za tehničke karakteristike opreme, značilo je i nabavku nove opreme koja bi mogla ispoštovati zahtjeve novih standarda i metoda.

Prvi etaloni za mjerenje sile nabavljeni su sedemdesetih godina. To su bile mjerne opruge u mjernom području od 500 N do 100 kN, slika 5. i mjerne doze u mjernom području od 40 kN do 5000 kN, slika 6. sa analognim pokazivanjem, od proizvođača Alfred J. Amsler.



Slika 5. Mjerne opruge za silu

Slika 6. Mjerne doze za silu

Prelaskom sa analognog na digitalni signal mjerenja, devedesetih godina, nabavljene su mjerne ćelije za silu u opsegu od 50 N do 5 MN, slika 7. i pojačalo signala MGCplus, slika 8. od vodećeg proizvođača kalibracione opreme Hottinger Baldwin Messtechnik Njemačka. Mjerne ćelije se redovno rekalibrišu i zadržale su klasu od proizvođača i danas se koriste kao dio kalibracione opreme odnosno etalona kod kalibracije uređaja za mjerenje sile.

Slika 7. Mjerne ćelije za silu

Slika 8. MGCplus pojačalo siignala

U četvrtom ciklusu akreditacije laboratorija proširuje područje akreditacije uvođenjem nove metode BAS EN ISO 12390-4, koja se odnosi na kalibraciju presa za ispitivanje očvrslog betona, slika 9. i BAS EN ISO 16859-2, koja se odnosi na kalibraciju prenosnih uređaja za mjerenje tvrdoće. Akreditacija ovih metoda zahtjevala je nabavku nove opreme, osvajanje novih mjerenih veličina, dodatno obučavanje osoblja i bila je odgovor na potrebe i zahtjeve kompanija i laboratorija na tržištu Bosne i Hercegovine koje su se bavile proizvodnjom i kontrolom kvaliteta betona. Uvođenjem ovih metoda u područje akreditacije laboratorija, najmanje 50 kompanija i laboratorija u Bosni i Hercegovini dobilo je uslugu kalibracije presa za ispitivanje očvrslog betona od akreditovane laboratorije u Bosni i Hercegovini. Do tada, ove kompanije su morale tražiti uslugu kalibracije presa za ispitivanje očvrslog betona izvan granica Bosne i Hercegovine.

Slika 9. Kalibracija prese za ispitivanje očvrslog betona

Dalje aktivnosti djelovanja laboratorija, u području kalibracije sile, odnosile su se na osvajanje procedure za kalibraciju presa za prednaprezanje sa pištoljima za užadi različitog promjera i različite sile naprezanja. Ova procedura zahtjevala je izradu potrebnih alata i pristroja, koji su napravljeni u Institutu, kako bi se mogla realizovati kalibracija ovako kompleksnih mašina, slika 10.

Slika 10. Kalibracija prese za prednaprezanje užadi sa pištoljima

U području kalibracije aparata za ispitivanje tvrdoće, kontinuitet akreditacije se održao od 1998. godine do danas. Redovno su se nabavljale certificirane referentne pločice za tvrdoću, slika 11. Sljedivost se osigurava preko certifikata o kalibraciji od MPA NRW Njemačka ili UKAS Velika Britanija. Mjerna područja metoda prilagođavala su se i mijenjala sa aspekta potreba ispitnih laboratorija Instituta i zahtjeva tržišta Bosne i Hercegovine.

U četvrtom ciklusu akreditacije proširenu je područje akreditacije za kalibraciju mjernih područja koja se odnose na ispitivanje mikrotvrdoće metodom Vikersa prema standardu BAS EN ISO 6507-2.

Slika 11. Referentne pločice za indirektnu kalibraciju aparata za ispitivanje tvrdoće

U četvrtom ciklusu akreditacije nabavljeni su certificirani referentni blokovi sa certifikatom od UKAS Velika Britanija i periodom važenja od 5 godine, realizovana obuka osoblja, određena najbolja mjeriteljska mogućnost laboratorije i ostvareno učešće u interkomparaciji čime su bili ispunjeni svi uslovi za proširenje područja akreditacije za metodu BAS EN ISO 16859-2, mjerno područje HLD, koja se odnosi na kalibraciju prenosnih aparata za ispitivanje tvrdoće.

U području momenta sile, kao etaloni se koriste mjerne ćelije za silu u lancu sa MGCplus ili MX440B pojačalom i polugom za kalibraciju moment ključeva.

Slika 12. Etalon za kalibraciju moment ključeva

Konstrukcija samog sistema napravljena je u Institutu „Kemal Kapetanović“ u Zenici, slika 12. Ovakav sistem je osigurao mogućnost kalibracije moment ključeva u mjernom području od 10 Nm do 500 Nm. Procijenjena najbolja mjeriteljska mogućnost laboratorija potvrđena je u BILC sa akreditovanim provajderom u skladu sa BAS EN 17043 i učešćem u interkomparaciji sa laboratorijama u zemlji i okruženju.

3. POLITIKE I CILJEVI RADA I DJELOVANJA MEHANIČKOG KALIBRACIONOG LABORATORIJA ZA NAREDNI PERIOD

Kako je tržište Bosne i Hercegovine relativno malo, osnovna politika Mehaničkog kalibracionog laboratorija je akreditovati metode koje nisu akreditovane u Bosni i Hercegovini od strane druge kalibracione laboratorije a za koje postoji potreba i zahtjevi od kompanija u Bosni i Hercegovini.

- Jednoosne ispitne mašine, koje se koriste za mehanička ispitivanja različitih vrsta materijala zahtijevaju kalibraciju sistema za mjerenje sile i kalibraciju sistema za mjerenje pomjeranja, odnosno izduženja. Kalibracija sile već je u području akreditacije sa metodom BAS EN ISO 7500-1. U cilju kompletiranja kalibracije svih mjernih sistema jednoosnih ispitnih mašina, za naredni period cilj je akreditovati metodu BAS EN ISO 9513 koja se odnosi na kalibraciju ekstenzometara, koji su obavezan dio jednoosnih ispitnih mašina na kojima se pored sile kidanja i zatezne čvrstoće materijala, zahtjeva i mjerenje malih deformacija za određivanje granice tečenja materijala i mjerenje izduženja. Ovaj standard se odnosi i na kalibraciju pomjeranja traverzne kod ispitivanja zatezanjem materijala sa izraženim velikim procentom izduženja. Za realizaciju ovog cilja potrebno je nabaviti etalon za kalibraciju pomjeranja traverzne u mjernom području od 2000 mm i rezolucijom 0,01 mm. Za kalibraciju ekstenzometara, koji se koriste za mjerenje malih deformacija za određivanje granice tečenja kod ispitivanja zatezanjem, potrebno je nabaviti etalon mjernog opsega 25 mm i rezolucijom od 0.0005 mm. Ovi etaloni predstavljaju dio opreme koji će se u mjernom lancu sa pojačalom MX440B i softverom Catman koristiti kao sistem za kalibraciju.

- Proširenje mjernog opsega u području momenta sile za moment ključeve mjernog pdručja većeg od 500 Nm do 2000 Nm za metodu BAS EN ISO 6789-1 i BAS EN ISO 6789-2. Ovaj cilj moguće je realizovati nabavkom etalona u mjernom području od 2000 Nm i dodatnom obukom osoblja. Cilj je proizašao iz zahtjeva kompanija za koje već Mehanički kalibracioni laboratorij realizuje kalibraciju moment ključeva mjernog područja do 500 Nm.

- Proširenje područja akreditacije za metodu DIN 51308 koja se odnosi na kalibraciju presa za prednaprezanje u mjernom opsegu do 500 kN. Cilj je proizašao kao rezultat istraživanja i potreba tržišta Bosne i Hercegovine.

- Svaka laboratorija koja posjeduje prese za ispitivanje očvrslog betona ima zahtjev i za kalibraciju dinamičkih ploča. Uslugu kalibracije traže van granica Bosne i Hercegovine. Procedura privremenog uvoza i izvoza zahtjeva vrijeme i ulaganje dodatnih finansijskih sredstava od ovih laboraotrija kao i odsustvo dinamičkih ploča na duži vremenski period što

uzrokuje prekid kontrole i rada u laboratorijama. Cilj Mehaničkog kalibracionog laboratorija je akreditovati metodu za kalibraciju dinamičkih ploča i na taj način podržati i olakšati rad kompanijama i skratiti vrijeme odsustva sredstava za rad. Za realizaciju ovoga cilja neophodna je nabavka etalona za kalibraciju dinamičkih ploča koji se sastoji od mjerne ćelije za silu od 50 kN i 4 komparatera za mjerenje deformacije, obučavanje osoblja za rad sa opremom, obučavanje za servis dinamičkih ploča i provođenje interkomparacije sa akreditovanom laboratorijom izvan granica BiH u cilju potvrđivanja najbolje mjeriteljske mogućnosti laboratorija.

- Pored navedenih ciljeva, neophodno je pratiti važeća izdanja već akreditovanih metoda, vršiti njihovu analizu sa aspekta raspoložive opreme, obučavanja osoblja i poduzeti sve aktivnosti na usvajanje i akreditovanje važećih izdanja standarda.

4. ZAKLJUČAK

Sve aktivnosti kalibracija Mehanički kalibracioni laboratorij obavlja u prostorijama laboratorija i na lokacijama korisnika usluga.

Politike i ciljevi laboratorija bazirane su na održavanju postojećeg područja akreditacije, prelazak na važeća izdanja standarda, nabavku savremene kalibracione opreme, prilagođavanje i proširivanje područja akreditacije u cilju pomoći kompanijama u Bosni i Hercegovini za obezbjeđenje sljedivosti ispitne opreme u granicama Bosne i Hercegovine.

5. REFERENCE

[1] BAS EN ISO/IEC 17025:2018 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories

[2] EA-4/02 M:2022 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration

[3] JCGM Guide to Uncertainty in Measurement (GUM-6):2023

[4] ILAC-P14:09/2020 ILAC Policy for Measurement Uncertainty in Calibration