



Hrvatsko Društvo
za strojarske tehnologije
Croatian Society
for Mechanical Technologies

In association with:



University of Split
Faculty of Electrical Engineering,
Mechanical Engineering and
Naval Architecture



Croatian Society for
Materials and Tribology



Dublin Institute
of Technology



Slovak Academy of Science
Institute of Materials and
Machine Mechanics

ISSN 1847-7917

1st International Conference

MTSM 2010

In memoriam prof. emeritus Romeo Deželić

CONFERENCE PROCEEDINGS

General sponsors:
City of Split
Split - Dalmatia County
Ministry of Science, Education and Sports Republic of Croatia



October, 21st - 22nd, 2010.
Split - Republic of Croatia

ZBORNIK RADOVA

CONFERENCE PROCEEDINGS

STROJARSKE TEHNOLOGIJE I KONSTRUKCIJSKI MATERIJALI

MECHANICAL TECHNOLOGIES AND STRUCTURAL MATERIALS

Split

Hrvatska / Croatia

22. listopad / October 2010.

ORGANIZATOR / ORGANIZED BY:

HRVATSKO DRUŠTVO ZA STROJARSKE TEHNOLOGIJE, Hrvatska

CROATIAN SOCIETY FOR MECHANICAL TECHNOLOGIES, Croatia

SUORGANIZATORI / CO-ORGANIZERS:

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

HRVATSKO DRUŠTVO ZA MATERIJALE I TRIBOLOGIJU

DUBLIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

SLOVAK ACADEMY OF SCIENCE INSTITUTE OF MATERIALS AND MACHINE
MECHANICS

SPONZORI / SPONSORS:

GRAD SPLIT

SPLITSKO-DALMATINSKA ŽUPANIJA

MINISTARSTVO ZNANOSTI, OBRAZOVANJA I ŠPORTA

IZDAVAČ / PUBLISHER:

HRVATSKO DRUŠTVO ZA STROJARSKE TEHNOLOGIJE, Hrvatska

CROATIAN SOCIETY FOR MECHANICAL TECHNOLOGIES, Croatia

c/o FESB, Ruđera Boškovića 32, 21000 SPLIT

tel.: +385 21 305 910; fax.: +385 21 463 877

e-mail: info@stojarska-tehnologija.hr

<http://www.stojarska-tehnologija.hr>

UREDNIK / EDITOR:

dr.sc. Dražen Živković

ISSN 1847-7917

UDK: 621(063)

NAKLADA / ISSUE: 60

ORGANIZACIJSKI ODBOR

ORGANIZING COMMITTEE:

- Zvonko MRDULJAŠ (Split) - Predsjednik
- Igor GABRIĆ (Split) - Dopredsjednik

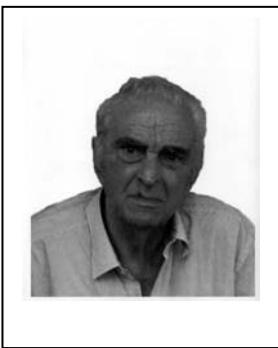
- Ante ALUJEVIĆ (Split)
- Ante BAROVIĆ (Split)
- Dražen DELIĆ (Split)
- Nikola GJELDUM (Split)
- Krešimir GRILEC (Zagreb)
- Dario ILJKIĆ (Rijeka)
- Sonja JOZIĆ (Split)
- Neven KUZMANIĆ (Split)
- Branimir LELA (Split)
- Petar LJUMOVIĆ (Split)
- Gojko MARIĆ (Zagreb)
- Slaven ŠITIĆ (Split)

PROGRAMSKI I RECENZENTSKI ODBOR

PROGRAMME AND REVIEW COMMITEE:

- Dražen ŽIVKOVIĆ (Split) - Predsjednik
- Dražen BAJIĆ (Split) - Dopredsjednik

- Boris ANZULOVICIĆ (Split)
- Goran CUKOR (Rijeka)
- Vinko IVUŠIĆ (Zagreb)
- Jaroslav JERZ (Bratislava)
- David KENNEDY (Dublin)
- John LAWLOR (Dublin)
- Kai MERTINS (Berlin)
- Zoran PANDILOV (Skopje)
- Mladen PERINIĆ (Rijeka)
- Massimo ROGANTE (CM – It.)
- Zdravko SCHAUPERL (Zagreb)
- Wilfried SIHN (Wien)
- František SIMANČIK (Bratislava)
- Božo SMOLJAN (Rijeka)
- Ivica VEŽA (Split)



Profesor emeritus Romeo Deželić (1922.-2008.)

Zašto pisati o jednom profesoru? Mislimo da je vrijedno pokazati i ono što nije vidljivo u referatima za izbor u zvanje profesora.

Profesor Deželić je jedan od osnivača Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, koji je bio i temelj osnivanju splitskog sveučilišta, uz Pravni i Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu. Kasnije se pretvorbom raznih viših škola u fakultete sveučilište ojačalo (Viša ekonomska škola, Pedagoška akademija, Viša pomorska škola, razni instituti, građevinska škola, itd.).

Kao mladić Romeo Deželić je završio gimnaziju u Splitu. Rastao je u poduzetničkoj obitelji koja se doselila iz Pule nakon aneksije Istre od strane kraljevine Italije, po završetku prvog svjetskog rata, ili kako se tada zvalo Velikog rata. U Split su se doselila braća Deželić, Romeov otac je bio mehaničar, a brat nastavnik strojarstva u austrijskom arsenalu u Puli (uveo u Splitu autogeno zavarivanje). Svoje znanje primijenili su u Splitu osnivanjem mehaničke radionice odmah iza željezničkog kolodvora i kasnije dodatno ljevaonice sivog ljeva u Spinutu. To je bilo razdoblje burnog razvitka poduzetništva, bilo je nekoliko manjih brodogradilišta, izrađivali su se motori za trabakule, koji su pomalo počeli prelaziti na motorni pogon. Deželićevi su lijevali djelove od sivog ljeva (kućišta, klipove, zamašnjake, kupovali koljenaste osovine, pumpe goriva, to montirali, prodavali). Obrađivali su propelerne osovine i tokarili, glodali, blanjali metalne djelove. Uz klasično gimnazijsko obrazovanje Romeo je savladao vještini rukovanja svim tada korištenim alatnim strojevima, upoznao razne materijale, njihova svojstva i primjene.

Ovaj prikaz je važan da se razumije kasniji rad na fakultetu profesora Romeoa Deželića, njegovu stalnu povezanost s praksom i istraživačku značajku koja je uvijek imala razuman cilj.

Studij strojarstva započeo je u Bologni, počeo je drugi svjetski rat. Profesor mi je kazao da nisu ništa učili-naime računali su da ako poginu, onda nije imalo smisla ni učiti. Ako pak prezive, lako će kasnije naučiti što treba. Nakon pada Italije radi u Splitu u mehaničkoj

radionici svoga oca kao tokar za potrebe pobjedničke vojske, što mu je vjerojatno spasilo život, jer nije išao na Knin gdje su živote ostavili mnogi mobilizirani mladići.

Nakon završetka rata studij nastavlja u Ljubljani, na dobro uhodanom strojarskom fakultetu. Koristi francuski i njemački jezik, što je tada bilo važno, jer literature na hrvatskom jeziku iz područja strojarstva gotovo i nije bilo.

U jednom verbalnom duelu na FESB-u profesor matematike mu je prigovorio da je zadnji ispit na fakultetu kojeg je položio bila matematika. Profesor mu je u svom stilu kazao da se vidi koliko mu nije trebala matematika u studiju! Uistinu je profesor Deželić prihvaćao matematiku kao sredstvo, a ne kao cilj rada.

Po završenom studiju počeo je raditi u velikom brodogradilištu, koje se tada zvalo „Vicko Krstulović“, kasnije „Brodogradilište Split“.

Pričao mi je kako su odmah po završetku rata konfiscirana velika poduzeća u Splitu, pa su mali, siromašni poduzetnici uzivali da se velikima uzima. Ali nakon kratkog vremena su i oni došli na red, pa su im oduzeta njihova poduzeća! Očeva radionica i ljevaonica su već bile oduzete od strane novih vlasti koji su suočili svaku poduzetnost. Tako je od ljevonice „Deželić i drug“ postao drug Deželić, ali bez ljevaonice (kako se znao našaliti!).

Kao primjer neefikasnosti komunizma ljevaonica je umjesto oca Deželića i „druga“ ljevača i nekoliko manovala (fizičkih radnika) imala gotovo četrdeset radnika, od kojih su mnogi bili administrativci. Ljevaonica je nakon nekoliko godina propala, kupolnu peć su rasjekli i bacili, a u veliku halu se uselio „Otpad“, poduzeće za prikupljanje otpadnih materijala! Profesoru je uvijek bilo teško kada se spominjao kupolne peći, koja je očito bila ponos poduzeća. Ljevaonica mu je vraćena nekoliko godina nakon pada komunizma, puna smeća i sjećanja na četrdeset godina tude vlasti.

Počeo je raditi relativno kasno, u tridesetim godinama, u alatnici brodogradilišta koja se tek zasnivala. Tu je s velikim oduševljenjem i uspjehom osnovao modernu toplinsku obradu čelika, koja je ostala njegov prioritet u cijelom kasnjem radu. Stvorio je modernu alatnicu i uz nju niz vrsnih stručnjaka. Inžinjera je tada bilo malo i svi su se čudili zašto radi u pogonu, a ne u upravi. Tada se, a nažalost i danas, rad smatrao nižom vrstom ljudske djelatnosti, „uci sine da ne moraš raditi kao otac“ ili „ori vole kad nemaš škole“ bile su pouke kojima su roditelji poticali djecu na učenje u takvim društvenim „naprednim, okolnostima.“

Koncem pedesetih godina prošlog stoljeća došlo je do velikih nemira u komunističkom svijetu, pa tako i do pobune studenata u Zagrebu. Režim je brzo reagirao otvaranjem fakulteta u Splitu, Rijeci, kasnije i u Osijeku. Time se smanjila kritična masa studenata u Zagrebu, što je režimu odgovaralo, ali je ujedno postignuto i nešto jako dobro-mnogi mladi ljudi koji nisu mogli ići na studije u Zagrebu tako su mogli studirati bliže kući. Stvaran je novi nastavni kadar. Izabrani su vrsni inžinjeri iz prakse, koji su dobili dozvolu u svojim poduzećima da odu na nove studije i fakultete. Jedan od tih bio je i inžinjer Deželić, koji je suglasnost dobio od tadašnjeg direktora brodogradilišta Ante Jurjevića Baje. U Splitu je osnovan Pravni studij, izvanredni studij strojarstva i Elektrotehnički fakultet. Politički je Rijeci pripalo strojarstvo, a Splitu elektrotehnika. Profesor Deželić je uspio povezati studij strojarstva i elektrotehnike. Te je tako osnovan fakultet elektrotehnike i strojarstva, koji sada slavi pedesetu godinu postojanja. Nastojanjima profesora Otokara Kohouta i Ive Petkovića, obojice iz brodogradilišta Split, osnovan je i dvogodišnji studij brodogradnje, pridodan elektrotehnici i

strojarstvu. Nikada nije formiran u cjeloviti studij, najviše zbog otpora rukovodstava brodogradilišta Split u osamdesetim godinama prošlog stoljeća.

Predavao je na Višoj pomorskoj školi, tehnološkom odjelu, koji je Šuvarovom reformom 2+2, (pretečom Bolonjske reforme 3+2) priključen Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje početkom osamdesetih godina; zatim na mornaričkoj akademiji u Splitu, kolegije o materijalima i tehnologiji.

Uvijek je nastojao biti u praksi i s praksom. Kada su nabavljeni alatni strojevi za nebulozni projekt linearnog akceleratora šezdesetih godina, „oteo“ je strojeve i započeo s radom mehaničke radionice u atriju biskupove palače gdje je tada bio smješten fakultet. Palača je u neposrednoj blizini kuće u kojoj je bila mehanička radionica njegovog oca! Još su se čuli zviždaci lokomotiva i ispuštanje pare u želježničkoj ložionici iza biskupove palače, gdje su se održavale lokomotive i vagoni na vrlo visokom tehničkom nivou. Kasnije je sve to srušeno i danas tu usred grada raste korov. Profesor se jako angažirao da su tu napravi aktivni tehnički muzej u kojem bi se održavale i vježbe za studente. Ali jao, mladi naraštaj partijskih rukovodilaca, obuzet modernizmom, nije mario za muzeje. Sve je srušeno, u jednom jutru u naletu urbanizma koji je osakatio grad osamdesetih godina prošlog stoljeća.

Od mehaničke radionice nastala je Katedra za mehaničku tehnologiju, kasnije Zavod za mehaničku tehnologiju koji i danas postoji. Od profesora Deželića i asistenta Pave Aljinovića, prvih nastavnika, te meštra Ante Škabara, Danila Šuška, Andrije Jurišića Zavod za strojarsku tehnologiju je narastao na desetak redovitih i izvanrednih profesora te desetak asistenata i suradnika. Pristup znanosti i obrazovanju profesora Deželića bio je značajan i u osnivanju Veleučilišta u Splitu koje je u pet godina postojanja naraslo na 20.000 studenata u brojnim stručnim dvogodišnjim i trogodišnjim studijima diljem Hrvatske. Nakon pet godina Veleučilište je ugašeno od idejnih nasljednika gasitelja ljevaonice „Deželić i drug“.

Nažalost, vrijeme nije bilo pogodno za poduzetne i sposobne ljude poput profesora Deželića. Veliki projekt izrade alata za tada gigantsku „Jugoplastiku“ nije prošao jer je bilo pogodnije kupovati alate u Italiji. Velika kopirna glodalica koja je kupljena za tu svrhu ostala je samo kao eksponat za vježbe. Slično se dogodilo i s skupocjenom brusilicom. Prijedlog željezari da se izrađuju potrošni rezervni dijelovi također nije išao, zbog sličnih razloga. Radionica je ipak dosta radila, svakovrsne poslove, za razne naručitelje iz cijele Dalmacije. Radili su se dijelovi i za podmornice koje su se gradile u Specijalnoj proizvodnji brodogradilišta Split. Profesor je zinuo kada su ga iz vojne sigurnosti pitali u kojem sefу drži nacrte. Nije bilo čak ni ladice stola s ključem. Bio je jako neformalan, posvećen sadržaju a ne ambalaži. Veliki je bio uspjeh izrada dviju bušaćih platformi za bušenje podmorja za dubine mora do 15 metara. To je bio prototip kasnijih velikih tronožnih bušaćih platformi za naftu. Profesor nije o tome vodio računa, radio je nove stvari. Jedva sam ga nagovorio da nekom simpoziju to prikaže. Stalno se skupljao novac za kupnju kvalitetnih uređaja za toplinsku površinsku obradu. Nažalost inflacija je pojela novac, toplinska obrada ostala je neispunjeni san profesora Deželića. Svi oni koji su radili uz njega također su prošli šaroliku industrijsku praksu i upoznali gotovo cjelokupnu aktivnost regije, bilo da se nešto proizvodilo ili popravljalo.

Došlo je doba da se moralo imati doktorat znanosti da bi se mogla opravdati profesura. Profesoru se nije dalo raditi doktorat, jedva smo ga nagovorili. Na kraju se odlučio, napravio odličan koncept i uz eksperimente dokazao tezu. Tada je već imao blizu šezdeset godina.

Napunio je šezdeset pet godina. Pojavio se na Zavodu prilično neraspoložen, u ruci je držao list papira. Pružio mi ga je. Na njemu je bilo napisano rješenje da s tim danom odlazi u mirovinu. Tada sam bio predstojnik Zavoda, odgovoran za provođenje odluka Uprave. Uzeo sam papir, rasparao ga. Profesor je nastavio raditi, a predavanja je držao sve do osamdeset pete godine života, već sa slabijim glasom i vidom, ali uvijek kvalitetno i životno. Stalno je pratio literaturu, posebno iz toplinske obrade, praktički do pred smrt, u 87.oj godini života.

Na prijedlog Zavoda izabran je za prvog profesora emeritusa na FESB-u. Odbio je kandidaturu za nagradu grada Splita. Nije nikada bio dekan fakulteta. Iako ga je praktički osnovao, bio je podoban za rad, ali „društveno političke snage“ nisu htjele da njime rukovodi, bojeći se razvoja fakulteta izvan njihove kontrole. Tako je jedan izuzetno sposoban čovjek onemogućen da pokrene fakultet na višu razinu rada.

Odgojio je tisuće studenata, bio je strog ali kvalitetan. Sreli smo jednog uspješnog poslovnog čovjeka. U razgovoru je kazao da je zbog Profesora napustio studij. Profesor se nasmiješio i kazao da je učinio dobro jer je sada uspio u životu! Poslovni čovjek se također potvrdno nasmijao. Mnogi drugi sjećali su se dijagrama željezo-ugljik, ali i brojnih praktičnih primjera, ne iz literature, nego prakse samog Profesora.

U svom dugom i stručno bogatom životu bilo je još na stotine primjera koji bi potvrdili životni pristup profesora Deželića, a to je korisno znanje, praktična primjena i racionalna analiza.

Akademска средина se danas nažalost jako udaljila od tog pristupa što je i uzrok današnjoj krizi obrazovanja i sveukupne ekonomije zapadnog svijeta- sve više doktorata znanosti i istraživanja, a sve veći pad industrijske proizvodnje i ukupne poduzetnosti.

Možemo se jedino nadati da će sadašnja kriza izmijeniti tekući trend obrazovanja, a to je da je obrazovanje sve dulje, sve skuplje i da su s rezultatima sve manje zadovoljni korisnici obrazovanja.

Boris Anzulović

U Splitu, 4. listopada 2010.

SADRŽAJ

David M. Kennedy

“ENGINEERING DESIGN AND DEVELOPMENT” 1

Mladen Perinić, Sven Maričić, Elvis Gržinić

„PRIMJENA SMED METODE KAO JEDNOG OD BITNIH ALATA ZA
UNAPRIJEĐIVANJE PROIZVODNJE“

„SMED METHOD APPLICATION AS IMPORTANT TOOL FOR PRODUCTION
IMPROVEMENT“ 11

Katica Šimunović, Tomislav Draganjac, Roberto Lajić

„IZBOR DOBAVLJAČA PRIMJENOM METODE VIŠEKRITERIJSKOG
ODLUČIVANJA“

“SUPPLIER SELECTION USING A MULTIPLE CRITERIA DECISION MAKING
METHOD” 20

Goran Šimunović, Tomislav Šarić, Roberto Lajić, Ilija Svalina

„UNAPRJEĐENJE TEHNOLOŠKOG MODULA ERP SUSTAVA PRIMJENOM
UMJETNE INTELIGENCIJE“

“IMPROVEMENT OF TECHNOLOGICAL MODULE OF ERP SYSTEM USING
ARTIFICIAL INTELLIGENCE” 31

Dražen Živković, Igor Gabrić, Slaven Štić

„POPRAVAK ZAVARIVANJEM KONSTRUKCIJA IZ TITANOVIH SLITINA“

„REPAIR WELDING OF TITANIUM ALLOY CONSTRUCTION“ 40

Dražen Bajić, Sonja Jozić, Luka Celent

“CUTTING FORCE ANALYSIS IN FACE MILLING USING ROTATABLE CENTRAL
COMPOSITE DESIGN OF EXPERIMENTS AND TAGUCHI METHOD” 52

Jaroslav Jerz

“MODERN ENGINEERING MATERIALS FOR DESIGN OF SUSTAINABLE
PRODUCTS” 60

Massimo Rogante, László Rosta

“FORGED COMPONENTS AND POSSIBILITIES OF THEIR INVESTIGATION BY
NEUTRON TECHNIQUES” 69

Ratko Mimica, Jagoda Radošević, Sanja-Slavica Matešić

“ELEKTROKEMIJSKA SVOJSTVA ALUMINIJSKE SLITINE EN AW-6060”

“ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM ALLOY EN AW-6060” 82

Nikola Vitulić, Zoran Jurković, Mladen Perinić

“IMPLEMENTACIJA CAD/CAM SUSTAVA U VIRTUALNOJ SIMULACIJI
AUTOMATIZIRANOG TOKARSKOG OBRADNOG CENTRA”

“IMPLEMENTATION OF CAD/CAM SYSTEM IN VIRTUAL SIMULATION OF
AUTOMATED TURNING CENTER” 89

Krešimir Grilec, Ivan Hrabrić, Gojko Marić

“APSORPCIJA ENERGIJE OJAČANIH ALUMINIJSKIH PJENA”

“ENERGY ABSORPTION OF REINFORCED ALUMINIUM FOAMS” 96

Mario Krajinović, Gojko Marić

“IZRADA POLIMERNOG KOMPOZITA OJAČANOG PRIRODNIM VLAKNIMA”

“CONSTRUCTION OF NATURAL FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITE” 104

Božo Smoljan, Dario Ilkić, Neven Tomašić, Furio Traven

„PRIJELOM POLUGE KLIJEŠTA OD ČELIČNOG LIJEVA GS-42CrMo4”

“FRACTURE OF JAW ARM MADE OF CAST STEEL GS-42CrMo4” 113

Marija Šiško Kuliš, Dragana Grubišić

„KRITIČNI FAKTORI USPJEHA U SUSTAVIMA UPRAVLJANJA KVALitetom ”

“CRITICAL SUCCESS FACTORS IN QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS” 121

Engineering Design and Development

David M. Kennedy
Mechanical Engineering
Dublin Institute of Technology
Ireland

Abstract

Combining Industrial and Functional Design methodologies for the development of new products and systems requires a broad understanding of human behaviour and industrial activities. The requirements of international standards, protection of the environment and the ability to make a profit on sales requires a sound attitude and approach to succeed, especially in current economic conditions. This highlights the importance of good business and management strategy that must be dynamic to meet the changing needs of the market. Competitiveness depends largely upon advances in the fields of design and Innovation, cutting edge research and new advances over a broad range of topics dealing with innovative design and manufacturing technologies.

This paper encompasses traditional and new areas of design methodologies including Reverse Engineering, Value Analysis (VA) and Value Engineering (VE), Concurrent engineering Value Added, R&D, Modelling and attitude to the environment and customer. Linking marketing, manufacturing and innovation to maximise the design process work is discussed and solutions for SME's to explore methods of expanding their product portfolio are proposed.

Keywords: Industrial Design, Functional Design, Value Engineering, Modelling, Marketing

1 Introduction:

In the past, design in a manufacturing organisation was undertaken by personnel who produced drawings for new components and products. These were then given to production that happened to be located in a different part of the organisation. These people ironed out any problems to assist the manufacturing process and as a result, a product that began with certain vital functional and Industrial design attributes ended up as a totally different design. This resulted in long lead times and high numbers of engineering changes, resulting in manufacturing complexity and high costs if customer requirements were to be met. The initial challenge was to combine manufacturing with design so that design now involved the experts from both disciplines working as teams to develop better products and reduce introduction times. The success of future designs and product introduction to the market requires effective integration of personnel, resulting in almost zero distinction between researchers, designers, marketing and engineers, forming a multi-disciplinary team. The multi-disciplinary team can solve conflict early in a design process and quality can be designed into the product. A combination of disciplines in an organisation should expand to all departments to improve a company's overall ability: to be competitive and generate profits.

A product must be designed and be value engineered. This calls for cost effective industrial design. When a new product is introduced or an existing product improved, the most important factors influencing the development are costs, quality, customer satisfaction and the duration of the development programme. The reasons a product may not be designed to the optimum can be due to lack of ideas, lack of information, lack of time, wrong beliefs, habits and attitudes, poor resources and lack of communication. Design changes can be costly, time consuming, and have repercussions for marketing and sales. Problems that arise in modifications include change of suppliers and a need to reduce manufacturing costs. On the other hand, if a product is well received by the market, it will be capable of making an industry profitable. Early to market with the correct product results in increased benefits and profits to an organisation. Many companies however still focus their cost management effort on building products when we already know that costs are built into the product at the design stage.

2.1 Human requirements for products

From a design point of view, human hierarchy of needs usually arise in the following ascending order: Functionality, Usability, and Pleasure. A product will be useless if it does not contain the functions needed to perform the tasks for which it is intended. Also users want products that are easy to use (ergonomic aspects). From a pleasure point of view, these provide emotional and hedonic benefits (values, tastes, hopes and fears) along with physiological, social, psychological, and ideological pleasures.

2.2 Design Investment

Product design and development begins with research in the market place and with meeting customer requirements. On completion the product is assessed not just by the company but also by the customer on the basis of Quality of design and Quality of conformance. Ireland, along with other European Countries still produce some low-value added products, attempting to compete with low wage economies and therefore exposing ones business to severe competition. This arises in food Production, clothing, metal components, foot ware and packaging. In some areas of the economy, low investment in equipment and limited research is a major contribution to this. In recent times, government support has been very encouraging for innovation and design and recovery may be built around the following factors as outlined in a recent article [1]. Competing with low cost economies is fine if we can do it better and effectively. Ones interpretation of a low cost-low technology product may differ and some products that we class as high-technology based may not be accurate. The solution to successful collaborations on a national basis may take the following format:

- Extended co-operation between funding agencies, academia, IP agents and industry in a productive way.
- Innovation from 1. above.
- Integrate and accelerate design and manufacturing processes.
- Achieve and maintain an adequate level of basic research.

A high investment in design at the start cannot be replaced by introducing design at the end of a process. Funding agencies, Industry, IP experts and Education collaboration can successfully develop the fundamental and basic research structure needed to develop new products, leading to successful patent applications and greater revenues for organisations through royalties and tax incentives. However this also requires the most important variable; the market place and those that will use and operate the products under being developed. Almost all added value in products is determined by the design process [2].

Therefore would an extra hour or euro spent on design or reliability analysis have added more to a companies profits? This question is addressed by the headlines each year regarding product withdrawal and part modifications of vehicles such as Toyota (2009/2010), and child buggy's (2009). Doubling the design effort may mean doubling a products quality, increasing revenue, reducing costs or increasing sales. There should be a move towards increasing the rate of early spending on design.

A company's approach to design and development is dictated largely by the nature of the product and the customer it serves and the objective of any company is to make products which will be sold at a profit. However many companies still concentrate their efforts on selling what they produce rather than producing what the market requires.

2.3 Design Control

Design control allows companies to achieve design objectives such as reliability, safety, functionality industrial and aesthetics while developing a trouble-free product. It optimises the design elements and ensures the designed product can perform. It ensures the product is easy to manufacture and insensitive to variability on the factory floor, enhancing quality, decreasing costs and improving productivity. This is done by controlling quality in product design before the product goes into full production. A three step approach is normally used which includes System design, Parameter design and Tolerance design. System design includes basic design and testing of parts. Parameter design is the determination of the level of each component that will infuse the least variation into product performance. Tolerance design determines how much we can deviate from the target specification.

3.1 Product Design

Early practices emphasised the following general steps for a design process;

- **Feasibility study:** This validates the need, defines the problem and appraises possible solutions which culminate in design concepts and profitability estimates.
- **Preliminary design:** Resulting in model making, prototypes etc to allow analysis of the technical economic and financial feasibility of a number of possible solutions.
- **Detailed design:** This stage takes the best possible solutions and brings it to production and utilisation.
- **Review and revision:** This might be desirable to redesign to meet the changing needs of customers.

3.2 Case study for design process for a mechanical component

A typical design development process may take the following routes;

- Material selection: Based on strength analysis
- Component design: (able to fill the functions requested)

These merge to produce a basic design acceptable to the market. If the material can carry the loads, then the design can proceed, otherwise the first iteration takes place (either a new material is chosen or the design is modified with customer approval). Detailed specifications are produced to meet ergonomic, environment (Health and Safety and legal aspects) and stress requirements. Considerations of the appearance and feel (aesthetics) should take place concurrently. The design is viable if it can be produced economically and competitively. The choice of manufacturing can be determined by the materials chosen. The production routes will be influenced by the size of production runs, and how the component will be finished, and joined to other parts or packaged. If the production process determined by the materials chosen show that costs are too high, then a new material or component design resulting in an alternative production path may have to be chosen. Prototype development and market performance can be assessed concurrently throughout the project. Full scale production can then follow. This process is now integrated as a concurrent engineering approach, where all the activities take place together, with the use of a multi-disciplinary team.

3.3 Concurrent Engineering

Concurrent engineering is applied to the solving of problems through the use of multi-disciplinary teams. This relates to merging the expertise of designers, engineers, assemblers, marketing, metallurgists, finance, quality, and purchasing personnel etc. as an integrated team to minimise design errors at an early stage and avoid serious problems in terms of manufacturing, quality and costs at a later stage. A typical structure is shown in Figure 1. Some of the main problems that can be solved efficiently with this process include:

- Manufacturing process restrictions are considered and overcome.
- Product development cycles are reduced
- Quality can be improved
- Optimum materials are selected for the product
- Ease for assembly and manufacture are built in to the design
- Minimum waste at manufacturing and assembly stages
- High chances of success by addressing Marketing needs.
- Satisfying needs of the customer as well as resources of the organisation

- Better and faster design solutions in the future with a dynamic team approach.
- Designing products for automation/ assembly
- Design for manufacture, quality, Health and Safety and hygiene

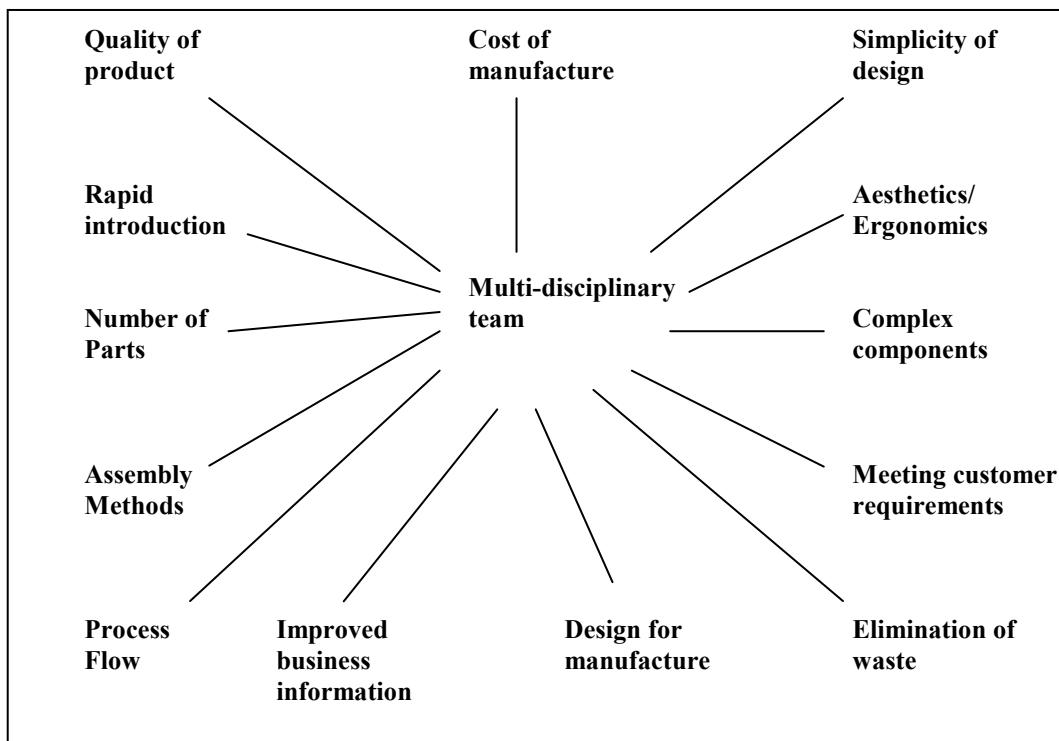


Figure 1. Example of Multi Disciplinary structure

3.4 Multi disciplinary teams

The multi-disciplinary team can solve conflict early in a design process where quality is not inspected but designed into the product. Ideally, staff who have relevant knowledge and who are part of the supply chain process should be consulted and their views considered when decisions are made. As a result all the main departments associated with the organisation and value chain make a positive input at an early stage ensuring:

As each department will play a role in the development of a product, they must also be involved in the generation of the product design specification. This provides a focused goal for the organisation and consist of a written document, formally agreed, dated and with an issue number to avoid confusion later on. It is important at the start of this process to properly consider the problem, as problem definition leading to product design specification is more important than problem solving. Figure 2. shows the main elements of a product design specification.

Functional and environmental requirements				
Operation	Life	Society	Customer	Producer
Performance	Product life	Codes of practice	Needs	Quality
Environment	Service life	Regulations	Perception	Costs
Corrosion	Shelf life	Safety	Competition	Company
Size	Reliability	Liability	Pleasure	limitations
Weight	Testing	Environmental effects	Ergonomics	Investment
Ergonomics	Maintenance		Aesthetics	Facilities
Aesthetics	Operating costs			Process
				Marketing

Figure 2. Product design specification.

3.5 Marketing and design

Marketing skills are involved in design in terms of market research, opportunity identification and downstream activities such as packaging, pricing, distribution, advertising and promotion [3]. The co-ordinated interface between marketing and design are therefore necessary for product success through market penetration. Understanding of each others role is essential and in some cases marketing and design people get the opportunity to use and maintain their own equipment and products in real situations. This provides good market research, can help improve product design and hopefully generate superior products in the future [4]. Direct communication with the consumer can cut down on interpretations and the number of iterations a design may have to undertake. Closeness to retailers and distributors can also provide practical knowledge on what sells and in what quantities.

3.6 Design for manufacture and assembly

Proper manufacture, assembly, material and process design to improve product quality, reduce costs and time to market. Almost 80% of the product quality and cost are determined at the design stage yet only 5% or less of a project cost are invested in design. Resources given to manufacturing, automation and productivity improvements will have less effect on quality, customer satisfaction, and costs than design.

At the design stage, changes are easier to make and therefore quality and manufacturing costs can be optimised at this stage. If a product needs to be re-designed due to problems later on in the process, waste will be excessive. Simplicity of design and reduced parts will in most cases simplify manufacturing and enhance quality as well as reducing costs. The aim is to minimise the number of variants and use standard parts and features which incorporates common technology, common assembly, and common parts and modules. Ease of assembly can normally be facilitated by reducing the number of parts. The following simple analysis can be made to decide if a part can be made in one or more pieces [6]:

- Does it have to move relative to the other parts present.
- Does it have to be made of a different material to other parts.
- Does it have to be separate to allow for assembly of other parts.

3.7 Value Analysis/Value Engineering

Value Analysis is a functional approach which has for its purpose the efficient identification and elimination of unnecessary costs. That is cost which provides neither quality, nor use, nor life, nor appearance, nor customer features. Waste can be as simple as reducing the number of bolts in a component to radically introducing different technology such as electronics to replace mechanical components. If you consider a part for a product, you may identify 3 suppliers of materials, 5 different materials, 6 manufacturing methods, 5 ways of machining it, and 3 ways of assembling it. This gives a maximum of 1,350 possible combinations of solutions to completing a part. The first solution picked may not be the most suitable. Value Analysis is aimed at investigating the functions of each product, part by part, in order to produce a product at the lowest cost without effecting quality, performance, safety, reliability, and maintainability requirements. Value Engineering is applied at the design stage. Requirements of the customer can be provided by a set of functions which when combined will satisfy needs. Needs analysis consists of identifying, clarifying and naming the function design has to accomplish [5]. The process, normally undertaken by a team, involves an examination of each component, purchased parts, design, materials, manufacturing, purchasing, quality, packaging and servicing. Following a step by step analysis of all component parts, the process seeks ways of performing the same function at a reduced cost. A badly designed product can be totally overhauled by Value Analysis techniques in terms of cost and function. Group brainstorming sessions are ideal for producing a list of alternatives where individuals generate ideas from each other without criticism or logic analysis. The 7 basic elements of Value Engineering consist of:

- Product selection (What are we going to analyse)
- Definition of function (Specific functions that must be performed by a product)
- Information phase (Gathering of facts such as costs, quantities, requirements)
- Researching alternatives (How functions can be performed by other means)
- Evaluation of alternatives (Cost and feasibility of alternatives)
- Verification of alternatives (proof that alternatives will meet the needs)
- Presentation of alternatives (formal change proposals)

The types of value in a product are use, esteem, exchange and cost and methods of analysing the need for parts can be considered under the following headings:

-Does its use add value	-Is its cost proportional to its usefulness
-Are all features necessary	-Can a standard part be used
-Can a supplier provide it for less	-Are competitors buying it cheaper
-Is there something better	-Can a part be obtained at a lower cost
-Can it be manufactured cheaper, or in larger quantities	

Typical questions requiring answers at the design stage using VA/VE are;

- Can the specification be changed to effect a cost reduction
- Can unnecessary functions and costs be eliminated
- Are there any special material requirements and why
- Has similar problems been solved before
- Can cost targets be met for the quantities and production rates
- Are there new materials or components (family of components) as well as manufacturing tools which will offer cost advantage over other types.
- Can the design be changed to simplify parts or use standard parts
- Can the number of specified parts be reduced or combined

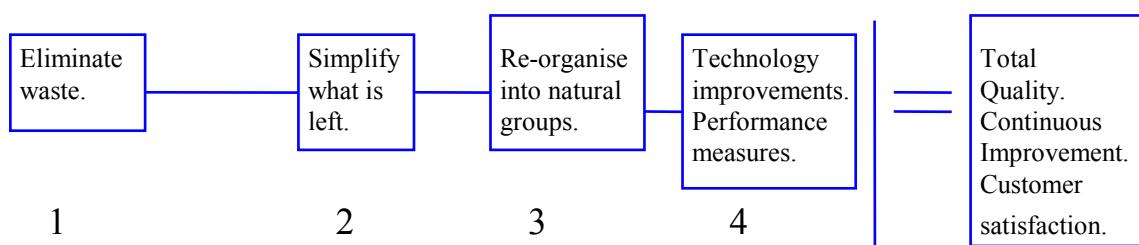
- Can parts be eliminated
- Can parts be assembled easily in a fool proof way and simply
- Can standard inspection equipment be used with ease
- Will the design ensure easy maintenance
- Will all parts result in reliability
- Can the product be packaged easily, and transported safely
- Can a less expensive material be used
- Is material available with the relevant tolerances and surface finish
- Does the design permit the use of standard machine tools

The above approach specifically highlights the importance of knowledge management within an organisation. Based on this analysis, the outcome of a design process should identify the method of manufacture, the number of parts, method of assembly, materials employed, functionality of the product, aesthetics and ergonomics, skills and equipment required to produce the product. These inputs should dictate the quality of the product, the final costs and how the product is packaged and transported to the customer.

Material selection is an integral part of design as new materials appear regularly resulting in innovation in design. Materials offer new opportunities to the designer who can frequently redesign an established product, making use of the properties of new materials, to reduce its costs or its size and improve its performance and appearance.

4. Non Value added activities and their elimination

Non value added activity seeks to eliminate waste and includes the principle of continually attacking and eliminating wasteful activities and unnecessary complexity of processes. Non value added is any activity costing money that is not a direct requirement of the customer and is usually a consequence of poor process and system design, typically transport, storage, unnecessary features in a product or excessive quality checking. Non value added can be as high as 50% in some organisations. To become more competitive, costs must be reduced and some areas of attack consist of overhead labour costs, manufacturing, re-design and quality inspection. The four-step approach to the elimination of Non-Value-Added are as follows:



4.1 Eliminate waste: Data collection and analysis stage. The following techniques are used at this stage;

- Process flow charts.
- Input/output analysis to find unnecessary outputs from each department.
- From/to analysis department to department.
- Cascade I/O for complete business to ensure an integrated design

Based on this analysis, priority areas for attack can be determined along with a detailed plan to reduce NVA by say 50% and eliminate it in design work.

4.1.1 Simplify what is left: Only simplify what cannot be eliminated.

4.1.2 Re-organise into natural groups: A group of people arranged around a significant information flow process to give:

- Total ownership and clear responsibilities for complete flows and business processes.
- Practically no Non-Value-Added activities.
- Communications based on people talking directly to each other, not complex paperwork.

Natural groups should only be formed after NVA elimination and simplification has occurred.

4.1.3 Technology improvements: After waste elimination, simplification of what is left and re-organisation into Natural Groups, is it then appropriate to apply simple cost effective technology improvements similar to cell control systems, making effective use of less technology.

5 Customer Focus

In respect to customer focus, we instantly think of quality. However a successful quality system requires a culture that understands and accepts quality as an integrated part of the manufacturing process, which involves design as its main building block. Everyone in a quality organisation recognises the need to satisfy the customer. For most consumers, good design is probably taken for granted and we are more inclined to complain about bad product design. Defining quality as ‘conformance to specification in order to achieve customer satisfaction’ indicates precisely what a company has to do.

6 Conclusions

Identifying and solving potential problems must not be left to the designer alone. New product design will create some uncertain conditions which a multi-skilled team is better able to cope with. Meeting and including the market is essential for successful product acceptance. Providing rapid feedback at minimum cost is central to planning for the economical development of new products. A combination of good design practices, correctly specified materials coupled with an optimised controllable manufacturing process can reduce or eliminate waste and contribute to achieving higher levels of quality. Design can be used to create a unique identity that will help establish market niches and positioning, leading to exploitation of other markets by displaying the message that your products deliver the attributes that customers require. Design is one of the few areas where there can be real competition and usability is becoming recognised by manufacturers and consumers alike as a prerequisite of good design. Any successful product is likely to be ‘copied’ and development must be continuous. Design holds the key for attaining significant reductions in manufacturing costs and increasing productivity for the manufacturer and quality for the customer. Ploughing funds into the design stage is a recipe for success and good design holds the key to improving the value added. Like quality and marketing, design is a strategy capable of giving a leading edge to organisations that take it seriously. A company needs to be organised for parallel activities by redesigning the product development process through performing activities simultaneously rather than sequentially, reducing the number of stages in the development process and by performing individual activities as fast as possible. Redesigning using tools such as value analysis have their place but the pace of new product introduction means companies have to get it right first time.

References

- [1] Department of Trade & industry, UK technology foresight programme 1994/95.
- [2] Sorrell, J. contribution to discussions meeting on wealth creation from design, IEE, 25th April, 1995
- [3] B. Lindsey, Marketing/ Design Link, Product development, Professional Engineer, October, 1989
- [4] T. Peters, R. Waterman, In search of Excellence, Harper & Row
- [5] T. Page & B. Parkinson, Functional Design, Division of Manufacturing Systems Eng., University of Hertfordshire, College Lane, Hatfield, AL10 9AB
- [6] G. Boothroyd & P. Dewhurst, Less is more, more or less, Manufacturing Engineer, November 1989.

PRIMJENA SMED METODE KAO JEDNOG OD BITNIH ALATA ZA UNAPRIJEĐIVANJE PROIZVODNJE

Autori: Mladen Perinić*, Sven Maričić*, Elvis Gržinić**

Ključne riječi: SMED metoda, optimizacija proizvodnje, tehnološki procesi

Sažetak: Paralelno s konstantnim razvojem tržišta zahtjevi kupaca postali su opsežniji. Da bi se proizvodilo direktno prema potrebi kupca moraju se protočna vremena drastično smanjiti. Kako bi ovo bilo moguće mora se organizirati proizvodnja u malim serijama. Dalje se zahtijeva uravnoteženje, sinhronizacija operacija i jednopredmetni tok. Pri tome značajnu ulogu ima fleksibilnost proizvodnih kapaciteta. Proizvesti brzo, s čim manjim zalihamama je trend koji je prisutan već neko vrijeme. Kako bi ovo bilo moguće realizirati, potrebno je već u ranom stadiju primijeniti SMED metodu kao jednog od temeljnih alata Toyota proizvodne filozofije. SMED metoda omogućava izmjenu alata unutar kratkog perioda vremena. Time se postiže minimum utroška vremena izrade, oslobađa proizvodni kapacitet, te se omogućava proizvodnja šireg assortimenta unutar kratkog perioda, odnosno, povećava fleksibilnost i produktivnost. To se postiže detaljnim snimanjem postupka zamjene alata, prepoznavanju unutarnjih i vanjskih aktivnosti, pretvaranju što većeg broja unutarnjih u vanjske, uz istovremenu minimalizaciju unutarnjih.

SMED METHOD APPLICATION AS IMPORTANT TOOL FOR PRODUCTION IMPROVEMENT

Key words: Lean production, SMED method, manufacturing optimization, technological processes

Abstract: Parallel with constant market development, the customers' demands have become more extensive. Production flow time has to be significantly reduced in order to satisfy customer's demands. To make this possible, the production has to be in small series. Furthermore, the requirements are focused on balancing and synchronization of operations, and on a single part process. The flexibility of production capacity has important role as well. To produce fast, with small quantities is a trend that has been present for some time. In order to make this possible, it is necessary to apply SMED method at an early stage of production planning. SMED method is one of the basic tools in Toyota production philosophy, which allows quick tool changes within a short period. This results with minimum time consumption, frees up production capacity and allows production of a wider range of products. This is achieved by recording the detailed procedures of the tool, identifying internal and external activities, and then converting as many of the internal to external, while minimizing internal activities.

* Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Vukovarska 58, 51000 Rijeka, Hrvatska

* University of Rijeka, Faculty of Engineering, Vukovarska 58, 51000 Rijeka, Croatia

** CIMOS d.d., Most 24, 52420 Buzet, Hrvatska

** CIMOS d.d., Most 24, 52420 Buzet, Croatia

1. UVOD

Razvojem društva i porastom društvenog standarda stvorili su se preduvjeti za masovni proboj sve kompleksnijih proizvoda na tržište. U ovom segmentu, automobilska industrija je oduvijek u mnogočemu prednjacija, pod time se prvenstveno misli na tehnološki i organizacijski razvoj. Masovna proizvodnja je započela standardizacijom pojedinih dijelova automobila. Situacija na današnjem modernom dinamičkom tržištu je takva da kupac igra aktivnu ulogu u oblikovanju proizvodnog procesa i njegovo se mišljenje uvažava. Sustav praćenja konačnog kupca je uspostavljen na način da se sve njegove želje i sugestije analiziraju, te se one kasnije koriste za poboljšanja. Proizvodni sustav je prilagođen zahtjevima kupaca čime je postignuta visoka fleksibilnost u zadovoljavanju njihovih zahtjeva. Fleksibilnost se može definirati prema nekim izvorima [1] kao: *sposobnost* proizvodne i transportne opreme da u datim uvjetima, uz manji, veći ili nikakav utrošak pripremno-rasprenog vremena, vrši sukcesivnu obradu, rukovanje ili transport različitih obradaka ili različitih operacija na istom izratku. Iz ovoga slijedi da se smanjivanjem pripremno-završnog vremena (t_{pz}) povećava fleksibilnost.

2. SMED METODA

Kako bi se osigurala provedba unaprijeđenja proizvodnje, potrebno je osigurati optimalno odvijanje svih postupaka u proizvodnom procesu. Brza izmjena alata važna je iz razloga jer omogućava proizvodnju šireg assortimenta proizvoda u relativno kratkom vremenskom periodu. Jedna od bitnih metoda za brzu izmjenu alata naziva se SMED (engl. Single digit Minute Exchange of Die) i označava izmjenu alata u jednoznamenkastom broju minuta. Također, brza izmjena alata preduvjet je optimizaciji vremena izrade, a posebno je važna kod proizvodnje miksa dijelova i u slučajevima kada je potrebno proizvoditi u manjim serijama s čestim izmjenama alata. Osnovna ideja koja stoji iza SMED-a jest smanjivanje potrebnog vremena zamjene alata i kasnijeg naknadnog podešavanja. Sve do pojave ove metode prilikom planiranja alata nije se dovoljno uzimalo u obzir vrijeme pripreme i raspreme radnog mjesta (t_{pz}). Razvijanjem tehnike izmjene alata, te pripremom alata za takve izmjene postalo je puno jednostavnije izmjeniti alat, pa su to mogli raditi sami proizvodni radnici. U članku je dan prikaz dijela aktivnosti prilikom primjene SMED metode u ljevaonici CIMOS u Buzetu.

Primjenom SMED metode u pogonu ljevaonice primjenom moguće je postići slijedeće uštede na način da:

- u proizvodnom procesu nema više specijalista za izmjene alata,
- ušteđeno vrijeme se može iskoristiti u planiranju o daljnjim poboljšanjima,
- zalihe proizvoda su smanjene jer se može znatno brže reagirati na svaku potrebu,
- nekvaliteta proizvoda se odmah uočava na slijedećoj operaciji jer se smanjivanjem zaliha ubrzava tok materijala.

2.1. Uzroci gubitka vremena

Kako bi se napravila analiza na osnovi koje se mogu detektirati koji su najčešći uzroci gubitka vremena, potrebno je izvršiti snimanje od nekoliko izmjena alata. Snimanje se bilježi u snimačke liste. Na osnovi toga kreira se prateća dokumentacija iz koje se analizom

utvrđuju koje aktivnosti odnosno koje se pogreške javljaju tijekom izvođenja pojedine operacije. Najčešće se radi o slijedećim aktivnostima:

- krivi redoslijed zahvata pri izmjeni alata,
- pogreške pri spajanju konektora na alate za lijevanje i obrezivanje (oznake ne postoje ili nisu ispravno postavljene),
- nespremno mjesto izmjene alata tj. događaju se nepredviđeni zastoji pri samoj izmjeni (dodatni alat, tlačni klip, kliješta za robota, motke za komunikaciju stroj-alat itd.),
- često su transportna sredstva zauzeta, pa se time i vrijeme izmjene nepotrebno produžava (viljuškar za neke druge aktivnosti, te mostna dizalica za neki popravak alata),
- izmjeni alata pristupa samo jedan operator,
- alat je nepripremljen pa se tek pri startu uočavaju nepravilnosti.

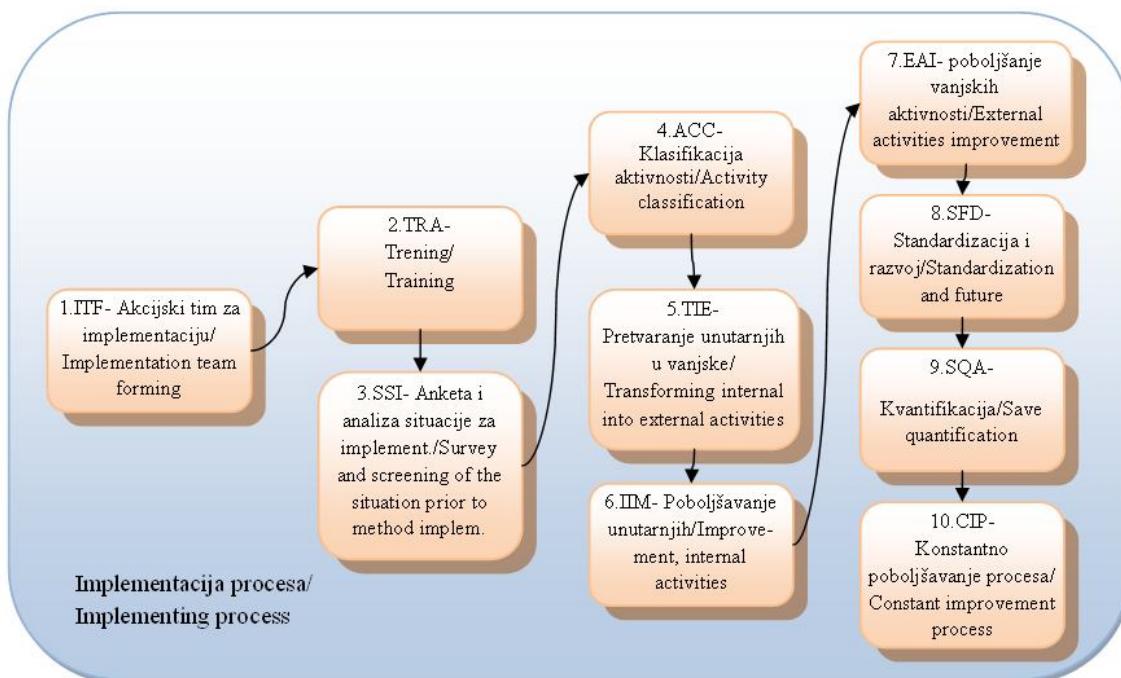
Kako bi se izbjeglo nepotrebno gubljenje vremena, potrebno je osigurati da svi alati koji dolaze na zamjenu budu pregledani i označeni s pravilnom oznakom. Ova oznaka se sastoji od naziva odnosno šifre alata, datuma pregleda, napomena i natpisa „Pregledano“ kako je prikazano na slici 1.



Slika 1: Pripremljeni alat s istaknutim statusom "pregledano"
Figure 1: Prepared tool, marked with the "examined" status

3. IMPLEMENTACIJA SMED-a U PRAKSI

Kako bi SMED metodu bilo moguće čim jednostavnije implementirati, na slici 2 dan je prikaz implementacije u deset koraka.



Slika 2: Prikaz koraka implementacije SMED metode
Figure 2: A SMED method implementation process

U prvoj fazi formira se akcijski tim za primjenu SMED metode. Druga i treća faza pripadaju analitičkim fazama – u njima se odvijaju procesi analize problema i treninga kako bi se otklonili svi mogući nesporazumi i odgovorilo na pitanja vezana uz primjenu metode. Ovo je posebno važan korak jer se time omogućuje brža i jednostavnija primjena metode nakon što su svi članovi tima detaljno upoznati. U četvrtoj fazi vrši se klasifikacija na vanjske i unutarnje aktivnosti. Iduća, peta faza nastoji čim više unutarnjih aktivnosti pretvoriti u vanjske. Pri tome se pod vanjske aktivnosti podrazumijevaju sve one aktivnosti koje se mogu obaviti dok stroj radi. Unutarnje aktivnosti mogu se izvoditi isključivo kada stroj ne radi. Faze šesta i sedma obuhvaćaju aktivnosti vezane uz poboljšavanje vanjskih i unutarnjih aktivnosti iz prethodnih faza. Standardizacija predstavlja osmu fazu. Deveta faza obuhvaća kvantifikaciju, i konačno deseta faza obuhvaća proces konstantnog poboljšanja procesa na osnovi podataka prikupljenih kroz sve prethodne faze. Kako bi se osigurala kvalitetna provedba SMED-a, kreirane su tablice koje se ispunjavaju prije, te nakon izmjene alata. Primjeri dijela ispunjenih lista dati su u tablicama 1 i 2.

*Tabela 1: Dio kontrolne lista prije izmjene alata
 Table 1: Sample part of check list before tool exchange*

Stroj/ Machine	Komada/ Pieces	Jedinica/ Unit	Veličina/ Size	Potvrda/ Attestation	Komentar/ Comments
Klip/Piston	1	mm	80	✓	
Motka/Plunger rod	1	mm	800		
Komora/Chamber	1	mm	100	✓	
Stezaljke/Clamps	—	32	—	✓	
Valjak/Stationary platen	4	Pieces	A		
Izbacivač/Ejector	4	Pieces	B	✓	
Crijevo hladna voda/ Gut cold water	2	Pieces	—		

*Tabela 2:Dio kontrolne liste nakon izmjene alata
 Table 2: Sample part of check list after tool exchange*

Operacija/ Operation	TJEDAN				
	1	2	3	4	5
Provjera dušika/ Nitrogen pressure check	—	—	—	—	—
Zamjena ili postavljanje datumara/Date code set up	—	—	—	—	—
Protok vode:/ Water flow	—	—	—	—	—
Klip / Piston	—	—	—	—	—
Razbijач/Bruiser	—	—	—	—	—
Alat/ Stationary tool	—	—	—	—	—

4. POSEBNI ZAHTJEVI NA IZVEDBU ALATA I OPREME PRILIKOM IMPLEMENTACIJE

Pored općih ciljeva navedenih u koracima implementacije, u cilju postizanja navedenih zahtjeva SMED-a [3 - 7] definirane su smjernice koje sadrže slijedeće zahtjeve na proizvodnu opremu:

- **standardiziranost alata i strojeva** kod kojih je potrebno uskladiti sve spojne priključke na svim strojevima i alatima kako bi se izbjegla nepotrebna dodatna podešavanja i prilagođavanja zbog postojanja različitih standarda. Ovdje se prvenstveno radi o hidrauličnim i pneumatskim priključcima, stegama za alate, električnim priključcima za signale pravilnog funkciranja alata, te isto tako električnim priključcima za kontrolu prisutnosti i pravilnog pozicioniranja alata u cilju spriječavanja moguće havarije. Prije standardizacije, alati se moraju pripremiti kako bi se stvorili preuvjeti za ugradnju drugih priključaka. Potrebno je napraviti identične utore kako bi i nakon provedene standardizacije bilo moguće koristiti iste stezne naprave, odnosno hidrauličke priključke poput onih prikazanih na slici 3.



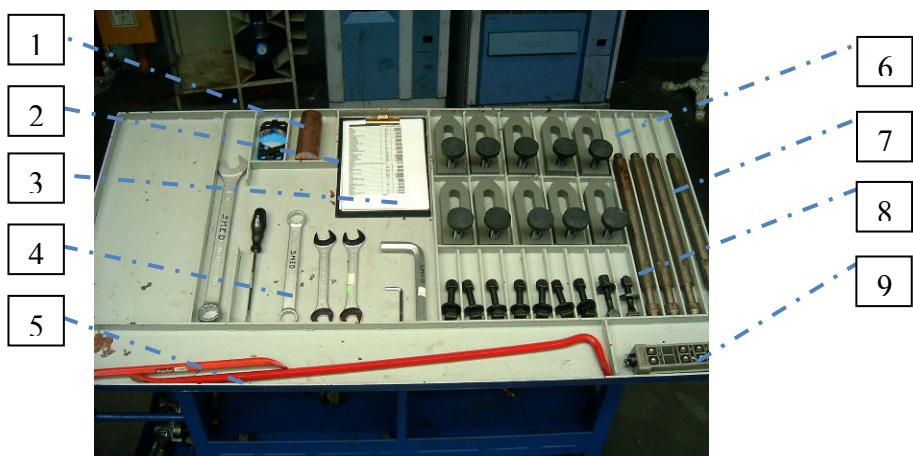
*Slika 3: Prikaz standardiziranih označavanja priključaka
 Figure 3: Representation of standardized labeling connections*

- **preduvjeti koji osiguravaju brzu montažu i demontažu.** Potrebno je na sve alate postaviti pozicionere kako bi samo postavljanje alata na točno mjesto bilo brzo i bez dodatnog finog podešavanja. Jednom kada se alat postavi na predviđeno mjesto na stroju, tada to mora biti konačna pozicija. Uz sve to potrebno je i maksimalno ubrzati stezanje alata na stroj prikladnim načinom.

Ostale primarne aktivnosti kod uvođenja ove metode su *organizacija radnog stola* sa svom potrebnom opremom, *pravovremeni transport*, te *standardizacija energetskih spojeva* koji ostvaruju komunikaciju stroja s alatom.

4.1. SMED radna stanica

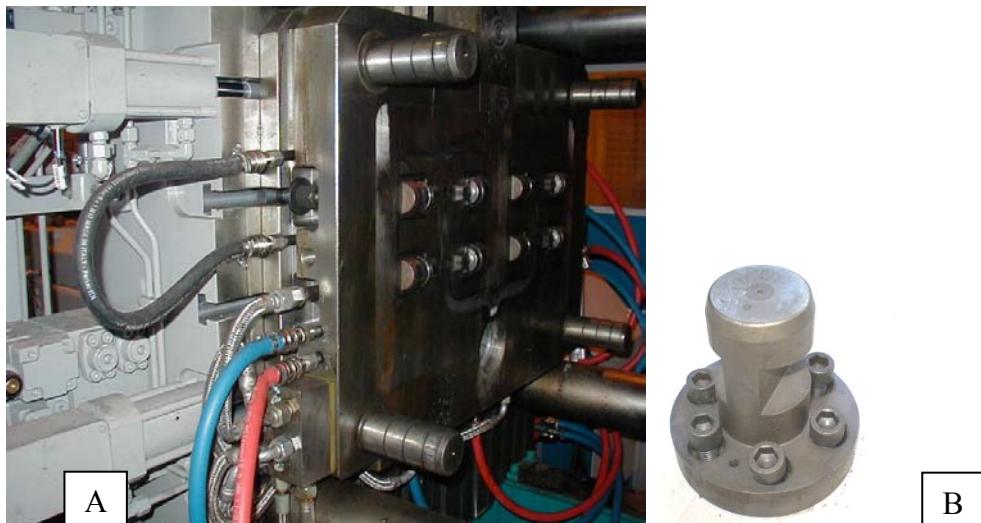
Opisani proces poboljšanja odvija se na SMED stanici koja se sastoji od: *police* na kojoj se nalazi alat, *užadi* za podizanje težih dijelova, robotskih stezaljki i alata za izbacivanje igle. U sklopu stanice nalazi se i *SMED stol* koji je prikazan na slici 4. Na njemu se nalaze potrebni alati i dijelovi koji su nužni za nesmetano odvijanje rada: *kliješta* (1), *klip* (2), *upute za rukovanje* (3), *stega za lijevanje* (6), *motke* (7), *pajseri* (5), *ključevi i alati* (4), *stege za obrez* (8) te *daljinski upravljač za dizalicu* (9).



*Slika 4: SMED stol
 Figure 4: SMED table*

Dobro organizirani SMED stol osigurava brzu i neometanu promjenu alata. Važno je naglasiti da se kod montaže alata koriste hidraulički cilindri kako bi se postiglo pravilno pozicioniranje alata pomoću brzog stezanja. Na taj način alat je stegnut bez potrebe za dodatnim stezanjem pojedinačno uz svaku stranu alata. Prema podacima dobivenim

analizom u pogonu [2, 3, 7], ovim načinom stezanja vrijeme zamjene alata smanjuje se prosječno za 40 min. Da bi se omogućilo brzo stezanje alata navedenim hidrauličkim cilindrima (slika 5A) potrebno je na alate postaviti segmente [3] poput prikazanih na slici 5B. Oni su sastavni dio alata preko kojih se hidrauličkim cilindrima stežu alati.



*Slika 5: A) Pomična ploča alata za lijevanje prihvaćena uz pomoć brzog stezanja tj. hidrauličkih cilindara
na stroju B) Dio za alate koji omogućava brzo stezanje*

*Figure 5: A) Sliding panel tools for casting, fixed with the hydraulic cylinders on the machine
B) Rapid clamping part*

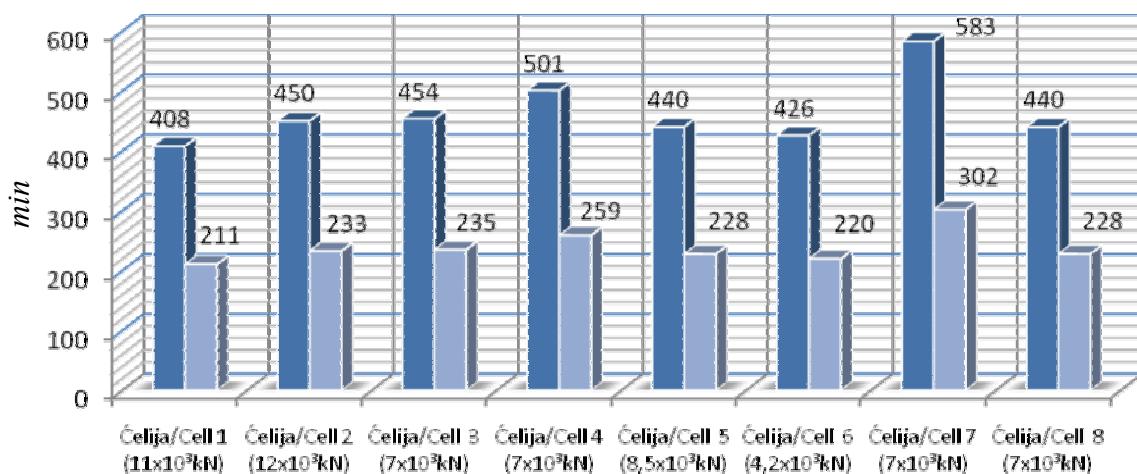
Hidraulički cilindri su velika pomoć kod montaže alata jer se alat pravilno mora pozicionirati na stroj, a onda je potrebno samo uključiti brzo stezanje i alat je stegnut bez potrebe za dodatnim stezanjem. Naknadno ugrađivanje navedene opcije je izrazito skupo te se zato i ne primjenjuje u praksi. Kod nabave novih strojeva u novije se vrijeme ova opcija podrazumijeva jer se kasnije uštede mogu lako prikazati. Ovim načinom stezanja se vrijeme zamjene alata može značajno smanjiti.

5. IMPLEMENTACIJA SMED METODE U LJEVAONICI CIMOS

Primjenom SMED metode na način opisan u prethodnom poglavlju u Ijevaonici tlačnog ljeva u PC3 postignuta [2] su slijedeća unaprijeđenja:

- Skratilo se prosječno vrijeme izmjene alata sa 463 minute na 240 minuta;
- Povećana je fleksibilnost strojeva na način da se u jednom tjednu do sada radilo uz samo jednu izmjenu alata – od sada se može planirati dvije izmjene alata i naravno dva različita proizvoda;
- Povećala se produktivnost strojeva jer se u vremenu uštede od 223 minute može normalno proizvoditi;
- Radno mjesto i okolina je čišće i organizirano

Detaljniji prikaz ostvarenih ušteda vremena prilikom izmjena alata u usporedbi s prosječnim vremenima prije i nakon primjene SMED metode dan je na slici 7. Vremena su dana u minutama.



Slika 6: Prikaz rezultata dobivenih nakon primjene SMED-a

Figure 6: Results overview after SMED implementation

Vidljivo je da su vremenski najveće uštede postignute na čelijama 7 i 4 s najdužim vremenima izmjene, gdje su prosječna vremena izmjene alata smanjena s 583 min na 302 min, odnosno s 501 min na 259 min. Iz detaljnog prikaza, prema [2], u tablici 3 vidljivo je da je ukupno prosječno vrijeme zamjene prije primjene SMED-a iznosilo 463 minute, dok je nakon primjene ove metode prosječno vrijeme zamjene alata smanjeno na 239,5 minuta.

Tabela 3: Vremena prije i nakon implementacije SMED metode

Table 3: Time before and after implementation of SMED method

Aktivnosti	Trajanje aktivnosti prije SMED-a	Poboljšanja	Trajanje aktivnosti nakon SMED-a	Vremenska ušteda
Transport	35	Uputstva za rad	15	20
Grijanje	90	Predgrijanje	0	90
Pomoćni alati	49	SMED stol	9	40
Demontaža alata za odsjecanje	37	Uputstva	27	10
Montaža alata	64	Standardizacija	49	15
Demontaža alata za lijevanje	58	Uputstva	44	14
Montaža alata za lijevanje	115	Standardizacija	89	26
Pokretanje procesa	15	Uputstva	7	8
Ukupno	463		240	223

6. ZAKLJUČAK

Kako bi se osigurala provedba unaprijeđenja proizvodnje, potrebno je osigurati optimalno odvijanje svih postupaka u proizvodnom procesu. Brza izmjena alata važna je iz razloga jer omogućava proizvodnju šireg assortimenta proizvoda u relativno kratkom vremenskom periodu. Jedna od bitnih metoda za brzu izmjenu alata naziva se SMED (engl. Single digit Minute Exchange of Die) i označava izmjenu alata u jednoznamenkastom broju minuta. Osnovna ideja koja stoji iza SMED metode jest smanjivanje potrebnog vremena zamjene alata i kasnijeg naknadnog podešavanja. Implementacija ove metode opisana je kroz deset koraka, te je dana prateća dokumentacija u vidu kontrolnih lista prije te nakon izmjene alata. Pored općih ciljeva navedenih u koracima implementacije, u cilju postizanja navedenih zahtjeva SMED-a navode se i zahtjevi na izvedbu alata i opreme. Njih je moguće podijeliti na *zahtjeve za standardiziranosti alata i strojeva* te na *zahtjeve za preduvjete koji osiguravaju brzu montažu i demontažu*. U članku je dan primjer iz proizvodne prakse ljevaonice gdje se primjenom SMED metode došlo do značajnih ušteda. Na konkretnom primjeru pokazano je skraćenje prosječnih vremena izmjene alata sa 463 minute na 240 minuta. Na taj način otvorila se mogućnost povećanja produktivnosti strojeva jer se dobivena pozitivna vremenska razlika može iskoristiti za proizvodnju drugih dijelova ili neku drugu aktivnost vezanu uz proizvodni proces.

LITERATURA:

- [1] Mikac T., Projektiranje proizvodnih sustava, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka 2004.
- [2] Perinić M., Ikonić M., Maričić S.: *Die casting process assessment using SMED method*, Metalurgija, 48/3 (2009), 199 – 202.
- [3] Shingo, S.: A Revolution in Manufacturing: The Smed System, Productivity Press, Portland Oregon USA, 1985.
- [4] Galinac T.: *Analysis of Quality Management in Modern European Software Development*, Engineering Review 28/2 (2008), 65 – 76.
- [5] Goubergen D. V., Landeghem H. V.: *Rules for integrating fast changeover capabilities*, Robotics and Computer Integrated Manufacturing 18 (2002), 205 – 214.
- [6] Mileham A. R. et. al.: *The impact of run-up in ensuring Rapid Changeover*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 53/1 (2004), 407 – 410.
- [7] Goubergen D. V., Landeghem H. V.: *Rules for integrating fast changeover capabilities into new equipment design*, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 18 (2002), 205 – 214.

IZBOR DOBAVLJAČA PRIMJENOM METODE VIŠEKRITERIJSKOG ODLUČIVANJA

SUPPLIER SELECTION USING A MULTIPLE CRITERIA DECISION MAKING METHOD

Katica Šimunović, Tomislav Draganjac*, Roberto Lujić

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu
Trg I. Brlić-Mažuranić 2, HR-35000 Slavonski Brod, Croatia
*Same Deutz Fahr – Žetelice d.o.o.
Industrijska 5, HR-32270 Županja, Croatia

SAŽETAK

U današnjim uvjetima globalizacije tržišta, te time i povećanja tržišnog natjecanja, služba nabave i upravljačke strukture u poduzeću, pored odgovora na pitanja što, koliko i kada nabaviti, te po kojoj cijeni, moraju znati i odgovor na pitanje od koga nabaviti. Izbor dobavljača, uz učinkovito upravljanje zalihamama, može donijeti značajne uštede poduzeću. S ciljem sustavnog i objektivnog vrednovanja dobavljača, u radu su predloženi kriteriji i višekriterijski AHP model (analitički hijerarhijski proces) za izbor najpovoljnijeg dobavljača. Model je ilustriran na primjeru izbora najpovoljnijeg dobavljača dijelova za montažu poljoprivrednog stroja. Višekriterijskim i sustavnim kvantitativnim pristupom problemu, olakšano je donošenje objektivne odluke.

Ključne riječi: izbor dobavljača, analitički hijerarhijski proces

ABSTRACT

In the present conditions of market globalization and thereby increasing market competition, purchasing department and management structure of the company, in addition to answer the questions what, how many and when to buy at what price, also must answer the question about appropriate supplier. Supplier selection as well as the efficient inventory control can bring significant savings to company. For the purpose of systematic evaluation of suppliers, criteria and multiple criteria AHP model (analytic hierarchy process) for selecting the best supplier, have been proposed in the paper. The model is illustrated by the example of supplier selection to purchase parts for assembly of the agricultural machine. Multiple criteria and systematic quantitative approach to the supplier selection problem, significantly improve decision making process.

Keywords: supplier selection, analytic hierarchy process

1 UVOD

Izboru dobavljača posvećuje se sve više pažnje u poduzećima, jer se suradnjom s pouzdanim dobavljačem može utjecati na smanjenje izravnih i neizravnih troškova, te opstati u uvjetima globalnog tržišnog natjecanja. U poduzećima u kojima sirovina za proizvodnju i dijelovi koji se nabavljaju, imaju veliki udjel u ukupnim troškovima, jasno je da i odjel nabave može značajno utjecati na smanjenje troškova, izborom odgovarajućeg dobavljača.

Pri izboru najpovoljnijeg dobavljača, potrebno je uzeti u obzir više različitih kriterija, od kojih su se s novim tržišnim uvjetima, neki potpuno izgubili, a pojavili neki novi. U današnjim uvjetima globalnog tržišta, poduzeće nije prisiljeno poslovati samo s najbližim dobavljačima, te na primjer udaljenost, kao jedan od kriterija koji je prije bio jako značajan, sada možda i nema veliku važnost, dok na primjer, korištenje informatičkih i komunikacijskih tehnologija, može imati veliki značaj.

Na osnovi iskustva i pregleda dosadašnjih istraživanja (poglavlje 2), korištenjem metodologije analitički hijerarhijski proces (poglavlje 3), u radu su predloženi kriteriji, te definiran AHP model za izbor najpovoljnijeg dobavljača (poglavlje 4). Model je ilustriran na primjeru izbora dobavljača dijelova za montažu poljoprivrednog stroja (poglavlje 5). U posljednjem dijelu prikazani su zaključci, te prijedlog daljnjih istraživanja.

2 PREGLED ISTRAŽIVANJA

Iz preglednih radova [1-3], od kojih rad [2] daje pregled čak 177 literaturnih referenci, jasno je da izbor najpovoljnijeg dobavljača predstavlja izazov znanstvenicima i djelatnicima u odjelima nabave, ali i cijelom poduzeću. U radu [1] naglašeno je da se izboru dobavljača treba sustavno pristupiti kroz faze definiranja problema, formulaciju kriterija, predizbor prihvatljivih dobavljača iz veće skupine, ocjenjivanje dobavljača, te konačni izbor dobavljača iz uže skupine. Rad [2], koji se u više navrata osvrće na rad [1], upućuje na šest važnih koraka donošenja odluke u procesu nabave: napraviti ili kupiti, izbor dobavljača, oblikovanje ugovora (kratkoročni ili dugoročni), suradnja s dobavljačima u dizajnu proizvoda ili usluge, nabava, te analiza ukupne učinkovitosti procesa nabave. U tom radu prikazan je i podatak da je na osnovi ankete 273 djelatnika u nabavi (SAD i Kanada) zaključeno da su se koristila čak 23 različita objektivna (brojčana) i subjektivna kriterija pri izboru dobavljača, od kojih su među najvažnijima: cijena, rok isporuke, kvaliteta, mogućnost ispunjenja zahtjeva kvaliteti, isporuka na vrijeme, kapacitet i geografski položaj dobavljača.

U radu [3] spominje se kao važan, osim ranije navedenih kriterija, i kriterij fleksibilnosti dobavljača, odnosno mogućnost promjene narudžbe. Autori u radovima [4, 5, 7-9] koriste dobro poznatu i često korištenu metodologiju višekriterijskog odlučivanja - AHP metodologiju (analitički hijerarhijski proces, engl. *analytic hierarchy process*) ili njene varijante. U radu [4], autori su ovu metodologiju kombinirali s nelinearnim cjelobrojnim programiranjem s jednom i s više funkcija cilja, uz sljedeća ograničenja: popust u cijeni ovisno o veličini narudžbe, potrebna količina, kapacitet dobavljača, te novčana sredstva s kojima se raspolaže. Jedan od zanimljivih kriterija izbora dobavljača je, osim ranije navedenih, i novopredloženi kriterij suradnja s dobavljačima, koji uključuje: otvorenost i spremnost za komunikaciju, mogućnost posjete uprave poduzeća dobavljaču, financijska pozadina, te razvojne mogućnosti.

Rad [5], prikazuje integrirani pristup problemu izbora najpovoljnijeg dobavljača,

primjenom AHP metodologije i sive relacijske analize (engl. *grey relational analysis*). Teorija sivog sustava (engl. *grey system theory*) potječe od Denga i koristi se za rješavanje neodređenih problema u kojima se raspolaze s nepotpunim ili nesigurnim informacijama. Pomoću AHP metodologije, kao i u prethodnom radu, dobivene su težine izabralih kriterija, koje su zatim korištene kao koeficijenti u relacijskom modelu. Razmatraju se četiri kvantitativna kriterija (cijena, isporuka, udaljenost, promet) i šest kvalitativnih kriterija (kvaliteta, finansijska pozadina, kvaliteta usluge, kapacitet, tehničke i razvojne mogućnosti, te korištenje informatičkih tehnologija, kao noviji predloženi kriterij).

Generalizacija metodologije analitički hijerarhijski proces je analitički mrežni proces (engl. *analytic network process ANP*), te se i ova metoda (koju je kao i AHP metodu, predložio Saaty [6]), vrlo često koristi kao metoda višekriterijskog odlučivanja. Autor u radu [7], koristi ovu metodu za donošenje odluka pri izboru najboljeg od tri moguća dobavljača. Od kriterija koji nisu ranije spomenuti, može se izdvojiti i sposobnost osoblja dobavljača, a značajno je da se mogu promatrati i interakcije među pojedinim kriterijima.

Linearno programiranje kao jedna od metoda operacijskih istraživanja, korišteno je u radovima [8-11], integrirano s drugim metodama. U radu [8] linearno programiranje je integrirano, s naprijed spomenutim, analitičkim hijerarhijskim procesom. Kao i u radu [4], metodologija analitički hijerarhijski proces je korištena za određivanje težina kriterija i prioriteta alternativa.

Analitički hijerarhijski proces i linearno programiranje su korišteni i u radu [9]. Ovi autori razmatraju, osim ranije spomenutih, kriterij usluge dobavljača nakon prodaje. AHP metodologija je korištena za dobivanje težina kriterija i dobavljača, a zatim su dobivene težine korištene u linearном matematičkom modelu s tri funkcije cilja (minimalni ukupni troškovi nabave, kvaliteta – minimalni ukupni broj loših i vraćenih proizvoda i pouzdanost isporuke – minimalna odstupanja od roka isporuke). Kriteriji po kojima su se vrednovale alternative (dobavljači), su bili: troškovi nabave, kvaliteta proizvoda, pouzdanost isporuke, usluge dobavljača kupcu, suradnja i partnerstvo, finansijski status.

Autori u radu [10] predlažu izbor najpovoljnijih dobavljača i proračun optimalne količine naručivanja korištenjem linearog programiranja i metode funkcije korisnosti, ali u uvjetima grupnog odlučivanja. Od kriterija koji se ranije nisu pojavljivali, zanimljiv je kriterij koji uzima u obzir prosječno vrijeme za uspješno rješavanje reklamacija.

Još jedan od radova iz skupine koja koristi linearno programiranje za izbor najpovoljnijeg dobavljača je rad [11]. Predlaže težinski linearni optimizacijski model.

U radovima [12-17] korištene su tehnike umjetne inteligencije: neuronske mreže, genetički algoritmi, ekspertni sustavi i neizrazita logika.

U radu [12] korištena je neuronska mreža širenja unazad. Za četiri različita glavna kriterija: troškovi, kvaliteta, isporuka i usluga, učene su četiri različite mreže koristeći podatke iz različitih odjela poduzeća, za 86 starih dobavljača. Ulazni sloj svake mreže se sastojao od onoliko neurona koliko je bilo podkriterija za svaki glavni kriterij, a postojao je samo jedan neuron u izlaznom sloju, a to je ukupni rezultat za zadani kriterij. Nakon faze učenja i testiranja, provedeno je vrednovanje 20 novih dobavljača.

Neuronske mreže i genetički algoritmi su korišteni u radu [13] za planiranje i upravljanje zalihamu u dobavljačkom lancu i izbor najpovoljnijeg dobavljača. Fuzzy neuronske mreže (hibrid neizrazite logike i umjetne neuronske mreže) su primijenjene za predviđanje potražnje, a zatim su se ti rezultati koristili kao ulaz u genetički algoritam pomoću kojega su optimirani modeli za upravljanje zalihamu, odnosno određene potrebne količine zaliha. Autori u radu [14] predlažu primjenu genetičkih algoritama za traženje optimalne kombinacije dobavljača i pripadajuće količine dijelova za naručiti, uz ograničenja

kapaciteta dobavljača.

Neizraziti model s tri funkcije cilja za izbor najpovoljnijeg dobavljača i potrebne količine naručivanja, razvijen je u radu [15], s mogućnošću dodjeljivanja različitih težina za različite ciljeve. Posljednja dva rada iz skupine radova s primijenjenim metodama umjetne inteligencije su radovi [16, 17], u kojima je predloženo korištenje zaključivanja temeljenog na sličnim slučajevima (engl. *case based reasoning*) i ekspertnih sustava za prikupljanje, pohranjivanje, dijeljenje i obradu podataka o dobavljačima. Podaci, odnosno znanje o dobavljačima potrebni su djelatnicima u službi nabave, te se ističe potreba za pravilnim, odnosno intelligentnim upravljanjem velikom količinom podataka o dobavljačima (engl. *management of supplier intelligence*). U radu [16], predstavljen je novi sustav za izbor i vrednovanje dobavljača prilikom razvoja novoga proizvoda, temeljen na sličnim slučajevima. U radu [17] predloženi su neki novi kriteriji, na primjer odgoda plaćanja i mogućnost isporuke zamjenskog materijala.

Iz pregleda literature koja se bavi izborom dobavljača, može se zaključiti da je to višekriterijski problem, s cijenom, rokom isporuke i kvalitetom, kao najvažnijim kriterijima. Međutim, ne smiju se zanemariti i sve važniji kriteriji koji se odnose na suradnju s dobavljačima, jer danas, u dosta slučajeva, dobavljač je i partner, čak i pri razvoju novih proizvoda. Uz izbor najpovoljnijeg dobavljača, vrlo često se rješavaju i problemi optimalne količine naručivanja od pojedinog dobavljača.

3 AHP METODOLOGIJA

Metodologiju analitički hijerarhijski proces (AHP) razvio je Thomas Saaty [18, 19]. Ubraja se u poznate, a u posljednje vrijeme i često korištene metode za višekriterijsko odlučivanje. Ova metoda može se objasniti u četiri sljedeća koraka [18-20]:

1. Razvija se hijerarhijski model problema odlučivanja
2. Pomoću Saatyeve skale (tablica 3.1), u svakom čvoru hijerarhijske strukture međusobno se uspoređuju elementi tog čvora u parovima, te se izračunavaju njihove lokalne težine. To znači da se uspoređuju kriteriji po parovima u odnosu na to koliko je jedan važniji od drugog. Zatim se po svakom kriteriju međusobno uspoređuju alternative u parovima, procjenjujući kojoj se po odabranom kriteriju daje prednost u odnosu na drugu.
3. Iz procjene relativne važnosti elemenata izračunavaju se težine kriterija i podkriterija, a u posljednjoj razini i prioriteti alternativa na osnovi lokalnih prioriteta. Izračunavanje težine kriterija računa se tako da se formira matrica omjera težina kriterija, u kojoj se u svakom stupcu i svakom redu nalaze vrijednosti procjena omjera između kriterija. Zatim se izračunaju sume stupaca, te se pomoću njih računa nova, normalizirana matrica, tako da se svaki element prethodne matrice podijeli sa sumom stupca kojem pripada. Težine se zatim izračunavaju kao prosječne vrijednosti pojedinih redova. Ukupni prioritet alternative se računa tako da se zbroje umnošci lokalnih prioriteta alternativa za pojedini kriterij i težina kriterija. Primjer izračuna prioriteta jedne alternative s tri kriterija, prikazan je pomoću izraza 3.1:

$$p = a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z \quad (3.1)$$

gdje je:

- p – ukupni prioritet alternative
 a – lokalni prioritet alternative za prvi kriterij
 b – lokalni prioritet alternative za drugi kriterij

c – lokalni prioritet alternative za treći kriterij

x – težina prvog kriterija

y – težina drugog kriterija

z – težina trećeg kriterija

4. Analiza osjetljivosti provodi se s ciljem da se vidi u kojoj mjeri se promjene ulaznih podataka odražavaju na ukupne prioritete alternativa.

Saatyeva skala se koristi da bi se mogao procijeniti omjer važnosti dvaju kriterija kada su njihove vrijednosti izražene kvalitativno, kvantitativno i u različitim mjernim jedinicama. Saatyeva skala ima pet stupnjeva intenziteta i četiri međustupnja. Ista skala se može koristiti i kod uspoređivanja alternativa, ali se interpretira na malo drugačiji način. Iz tablice 3.1 vidi se da su vrijednosti u rasponu od 1 do 9. Da bi se mogla ispravno koristiti Saatyeva skala, mora se poznavati problematika na koju se odnosi problem odlučivanja.

Tablica 3.1 Saatyeva skala [18-20]

Intenzitet važnosti	Definicija	Objašnjenje
1	Jednako važno	Dva kriterija ili alternative jednakoprinosne cilju
3	Umjereno važno	Na temelju iskustva i procjena daje se umjerena prednost jednom kriteriju ili alternativi u odnosu na drugu
5	Strogo važno	Na temelju iskustva i procjena strogo se favorizira jedan kriterij ili alternativa u odnosu na drugi
7	Vrlo stroga, dokazana važnost	Jedan kriterij ili alternativa izrazito se favorizira u odnosu na drugi; njegova dominacija dokazuje se u praksi
9	Ekstremna važnost	Dokazi na temelju kojih se favorizira jedan kriterij ili alternativa u odnosu na drugi potvrđeni su s najvećom uvjerenjivošću
2,4,6,8	Međuvrijednosti	

AHP metodologija omogućuje praćenje konzistentnosti procjena u svakom trenutku postupka uspoređivanja u parovima [18-21]. Uz pomoć indeksa konzistencije:

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n-1) \quad (3.2)$$

izračunava se omjer konzistencije:

$$CR=CI/RI \quad (3.3)$$

gdje je:

λ_{max} – najveća svojstvena vrijednost matrice A

n – broj kriterija (ili alternativa)

RI – slučajni indeks, tablica 3.2 (indeks konzistencije za matrice reda *n* slučajno generiranih usporedbi u parovima)

Tablica 3.2 Vrijednosti RI slučajnih indeksa [18-21]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Ako za matricu A (matrica relativnih važnosti) vrijedi $CR \leq 0,10$, procjene relativnih važnosti kriterija (ili prioriteta alternativa) smatraju se prihvatljivima. U suprotnom treba istražiti razloge zbog kojih je nekonzistentnost procjena neprihvatljivo visoka. AHP metodologija se široko primjenjuje u gotovo svim područjima ljudskih aktivnosti, na primjer u ekonomiji [22], prometu [23], klasifikaciji zaliha [24, 25], izboru polaznog materijala [26], poljoprivredi [27], informatičkoj tehnologiji [28] i mnogim drugim.

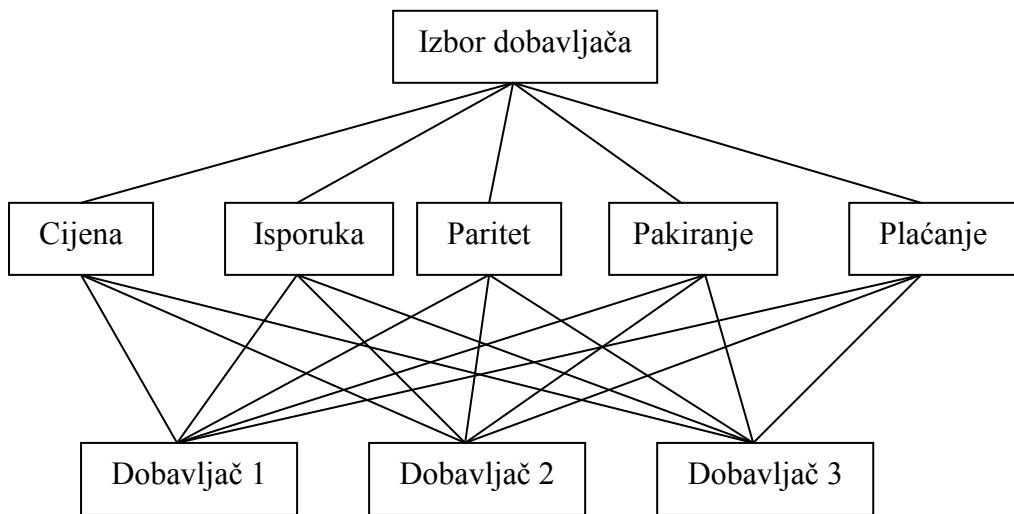
4 PRIJEDLOG KRITERIJA I AHP MODEL

Izbor dobavljača je višekriterijski problem. U obzir je potrebno uzeti različite kriterije, jer ako bi se promatrao samo jedan kriterij, sigurno bi to bila cijena, te bi se birao dobavljač s nižom ponuđenom cijenom. Međutim, postoje i ostali važni kriteriji, koji će vrlo često ovisiti i o vrsti djelatnosti pojedinog poduzeća. Za promatrano poduzeće koje se bavi montažom poljoprivrednih strojeva, za usporedbu i izbor dobavljača koji se već nalaze na listi dobavljača (prema sposobnosti, općim karakteristikama, sustavu upravljanja kvalitetom, kvaliteti proizvoda i kvaliteti prethodnih isporuka), predlažu se, osim kriterija *cijena* i sljedeći kriteriji: *isporuka, plaćanje, paritet i pakiranje*.

Isporuka je jedan od važnijih kriterija. U današnje vrijeme izbjegavaju se velika skladišta, te kako se proizvodnja prilagođava potrebama tržišta – zahtjevu kupca, važno je istaknuti mogućnost vrlo kratkog i sigurnog roka isporuke. Teži se da vrijeme proizvodnje bude kraće, te iz istih razloga postoji potreba za kratkim rokovima isporuke.

Prilikom dogovaranja poslova, jedan od zahtjeva koji se teško dogovara je *plaćanje* prema dobavljačima; kupcu odgovara uvijek što kasnije plaćanje, odnosno što dulja odgoda i bez kamata, dok je za dobavljača obrnuta situacija. Njima odgovara što brža naplata, odnosno najbolje bi bilo unaprijed platiti kako bi ulaganja bila što manja. U promatranom poduzeću je najdulja odgoda iznosila 120 dana, a najkraća, plaćanje unaprijed - avans. Kriterij *pakiranje* je važan zbog sigurne isporuke, bez škarta. Obzirom da tržište diktira brzu proizvodnju, kupac ne može računati na škartne pozicije, jer samim time ima zastoj u proizvodnji i stoga pakiranje mora biti kvalitetno. Osobito je to značajno kod zahtjevnih pozicija kao npr. staklo, te postoje i pozicije ili proizvodi koji su dodatno ojačani posebnim paletama ili se transport odvija u sanducima ili košarama ili kontejnerima kako bi roba došla očuvana do cilja i spremna za ugradnju. Razlika od dobavljača do dobavljača postoji kod zaračunavanja cijene pakiranja što je katkada upitno. Naime, obično se za jeftine proizvode ne uzima naknada za pakiranje, najčešće su to euro palete koje se izmjenjuju s dobavljačima, ali kod skupih komponenti koje zahtijevaju posebno pakiranje moraju se snositi dodatni troškovi koji mogu biti fiksni ili jednokratni. Fiksni su takvi da se svaki puta naplaćuje pakiranje s isporukom pozicije dok se u jednokratne ubraja jednokratno ulaganje u posebne palete ili pomagala koja služe trajnoj svrsi. *Paritet* je važna funkcija u poslovanju, jer uspoređujući razne vrste pariteta najbolje je da roba dolazi kupcu, a postoje i druge varijante, a to je da se po robu odlazi. Tada je kupac dužan sam organizirati transport i odgovarajuću prateću dokumentaciju o svom trošku, a dobavljač priprema robu i izlaznu dokumentaciju. Postoji i varijanta zbirnog skladišta koja može biti ekonomična. Posao se odvija tako da dobavljači isporuče robu do zbirnog skladišta, te kupac ovisno o planu proizvodnje i potrebama ili količini prijema robe na zbirnom skladištu, organizira transport jednom ili dva puta tjedno, te kupi više različitih proizvoda odjednom ili samo ono što je u tom trenutku hitno.

Na osnovi ovih pet kriterija, oblikovan je AHP model, s ciljem (izbor najpovoljnijeg dobavljača), kriterijima i alternativama (tri dobavljača), te je prikazan na slici 4.1.



Slika 4.1 AHP model za izbor najpovoljnijeg dobavljača

Nakon definiranog AHP modela, potrebno je odrediti težine svakoga od pet kriterija, usporedbom u parovima, koristeći Saaty-evu skalu (tablica 3.1), te lokalne i ukupne prioritete svake alternative (dobavljača). Lokalni prioriteti dobavljača određuju se usporedbom u parovima, koristeći također Saaty-evu skalu, ali obzirom na svaki kriterij. Ukupni se prioritet za svaku alternativu izračunava primjenom izraza 3.1. U sljedećem poglavlju članka ilustrirana je primjena ovoga modela na primjeru nabave dijelova za montažu poljoprivrednog stroja.

5 PRIMJENA AHP MODELA

U nastavku je ilustrirana primjena AHP modela (slika 4.1) na primjeru nabave dijelova za montažu poljoprivrednog stroja. U tablici 5.1 su za poziciju koja se koristi pri montaži zadnje osovine poljoprivrednog stroja, a koja se prema višekriterijskoj ABC klasifikaciji [24] nalazi u skupini A, prikazani podaci o kriterijima za tri potencijalna dobavljača. Cilj je odrediti najpovoljnijeg dobavljača, odnosno alternativu s najvećim ukupnim prioritetom.

Tablica 5.1 Kriteriji i vrijednosti kriterija za alternative (dobavljače)

	Isporuka, radni dani	Odgoda plaćanja, dani	Paritet*	Pakiranje**	Cijena, euro/kom
Dobavljač 1	15	120	3	3	56
Dobavljač 2	5	90	1	3	45
Dobavljač 3	15	90	5	3	49,1

* 1 - dobavljač plaća transport i obavlja transport kupcu, 2 - dobavljač plaća transport, a kupac carinjenje, 3 - dobavljač dovozi do zbirnog skladišta na lokaciji 1, zatim transportira kupac, 4 - dobavljač dovozi do zbirnog skladišta na lokaciji 2, zatim transportira kupac, 5 - kupac sam organizira transport.

** 3 - pakiranje uključeno u cijenu, 6 - pakiranje nije uključeno u cijenu, 7 – palete.

Uspoređivanjem kriterija u parovima (tablica 5.2), dobivene su težine kriterija, primjenjujući ocjene Saatyeve skale (tablica 3.1). Težine pojedinoga kriterija računaju se prema koraku 2. poglavlja 3 i prikazane su u normaliziranoj tablici (tablica 5.3). Vidljivo je da kriterij odgoda plaćanja ima najveću težinu, a zatim slijede cijena i pakiranje, dok najmanju težinu imaju isporuka i paritet.

Tablica 5.2 Uspoređivanje kriterija u parovima

	Isporuka	Plaćanje	Pakiranje	Paritet	Cijena
Isporuka	1	0,33	0,5	2	0,33
Plaćanje	3	1	1	2	2
Pakiranje	2	1	1	3	0,5
Paritet	0,5	0,5	0,33	1	1
Cijena	3	0,5	2	1	1

Tablica 5.3 Normalizirana matrica i težine kriterija

	Isporuka	Plaćanje	Pakiranje	Paritet	Cijena	Težine
Isporuka	0,11	0,10	0,10	0,22	0,07	0,12
Plaćanje	0,32	0,30	0,21	0,22	0,41	0,29
Pakiranje	0,21	0,30	0,21	0,33	0,10	0,23
Paritet	0,05	0,15	0,07	0,11	0,21	0,12
Cijena	0,32	0,15	0,41	0,11	0,21	0,24

Zatim se pristupa uspoređivanju alternativa po pojedinom kriteriju i računanju lokalnih prioriteta, što je prikazano u tablicama 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 i 5.8.

Tablica 5.4 Uspoređivanje alternativa u parovima po kriteriju vrijeme isporuke

	Dobavljač 1	Dobavljač 2	Dobavljač 3	Lokalni prioriteti
Dobavljač 1	1	0,333333333	1	0,2
Dobavljač 2	3	1	3	0,6
Dobavljač 3	1	0,333333333	1	0,2

Tablica 5.5 Uspoređivanje alternativa u parovima po kriteriju odgoda plaćanja

	Dobavljač 1	Dobavljač 2	Dobavljač 3	Lokalni prioriteti
Dobavljač 1	1	3	3	0,6
Dobavljač 2	0,333333333	1	1	0,2
Dobavljač 3	0,333333333	1	1	0,2

Tablica 5.6 Uspoređivanje alternativa u parovima po kriteriju pakiranje

	Dobavljač 1	Dobavljač 2	Dobavljač 3	Lokalni prioriteti
Dobavljač 1	1	1	1	0,333
Dobavljač 2	1	1	1	0,333
Dobavljač 3	1	1	1	0,333

Tablica 5.7 Uspoređivanje alternativa u parovima po kriteriju paritet

	Dobavljač 1	Dobavljač 2	Dobavljač 3	Lokalni prioriteti
Dobavljač 1	1	0,5	2	0,297
Dobavljač 2	2	1	3	0,539
Dobavljač 3	0,5	0,333333333	1	0,164

Tablica 5.8 Uspoređivanje alternativa u parovima po kriteriju cijena

	Dobavljač 1	Dobavljač 2	Dobavljač 3	Lokalni prioriteti
Dobavljač 1	1	0,333333333	0,5	0,159
Dobavljač 2	3	1	3	0,589
Dobavljač 3	2	0,333333333	1	0,252

Ukupni prioriteti pojedine alternative se računaju prema izrazu 3.1, a vrijednosti su prikazane u tablici 5.9.

Tablica 5.9 Težine kriterija, lokalni i ukupni prioriteti alternativa

	Isporuka 0,12	Plaćanje 0,29	Pakiranje 0,23	Paritet 0,12	Cijena 0,24	Ukupni prioriteti
Dobavljač 1	0,2	0,6	0,33	0,297	0,159	0,347
Dobavljač 2	0,6	0,2	0,33	0,539	0,589	0,411
Dobavljač 3	0,2	0,2	0,33	0,164	0,252	0,238

Nakon izračuna ukupnih prioriteta za pojedine dobavljače, može se zaključiti da je dobavljač 2 najbolji. Za tri kriterija (vrijeme isporuke, paritet, cijena) imao je najveće lokalne prioritete. Dobavljač 1 je za kriterij odgode plaćanja (koji ima najveću težinu) imao najveći lokalni prioritet, te mu je i ukupni prioritet visok. Dobavljač 3 ni po jednom kriteriju nema najveći lokalni prioritet, te se i nalazi na posljednjem mjestu.

6 ZAKLJUČAK

Na osnovi rezultata istraživanja u radu, može se zaključiti da višekriterijski pristup problemu pomaže donijeti objektivnu odluku. Jedan od zaključaka je i da se za različite uvjete proizvodnje mogu definirati i različiti kriteriji za izbor dobavljača. Kriterij pakiranje uopće se ne mora uzeti u obzir u nekim drugim djelatnostima, dok je za djelatnost montaže značajan. Kriterij odgoda plaćanja, vjerojatno ne mora postojati u uvjetima gdje se raspolaže s više novčanih sredstava.

U dalnjim istraživanjima, razmotrena će biti, osim primjene AHP metodologije i mogućnost ocjene dobavljača primjenom ekspertnog sustava, kao jedne od metoda umjetne inteligencije, čime se može također doprinijeti rangiranju dobavljača. Ova dva pristupa moguće je usporediti, a osnovni kriteriji za usporedbu će biti mogućnost učinkovite implementacije modela u informacijski sustav poduzeća, te mogućnost integriranja oba predložena modela s, predloženim AHP modelom višekriterijske klasifikacije zaliha (u radu [24]), kako bi se izbor i ocjena dobavljača provodili samo za zalihe koje se ubrajaju u skupinu A i B.

Kao što postoji više različitih dobavljača za proizvodnju sličnih ili istih pozicija ili proizvoda, pomoću kojih se može doći do velikih realizacija na planu proizvodnje i suradnje, na isti način postoji kod isporuke i transporta više poduzeća koja se bave prijevozom robe. Stoga se i na tom području može, uz dobar plan i realizaciju, djelovati na smanjenje troškova izborom optimalnog prijevoznika.

7 LITERATURA

- [1] Boer, L., Labro, E., Morlacchi, P. A review of methods supporting supplier selection. // European Journal of Purchasing and Supply Management. 7 (2001), pp. 75-89
- [2] Aissaoui, N., Haouari, M., Hassini, E. Supplier selection and order lot sizing modeling: A review. // Computers and Operations Research. 34 (2007), pp. 3516-3540
- [3] Verma, R., Pullman, M. An analysis of the supplier selection process. // Omega, International Journal of Management Science. 26 (1998), 6, pp. 739-750
- [4] Kokangul, A., Susuz, Z. Integrated analytical hierach process and mathematical programming to supplier selection problem with quantity discount. // Applied Mathematical Modelling. 33 (2009), 3, pp. 1417-1429
- [5] Yang, C.C., Chen, B.S. Supplier selection using combined analytical hierarchy process and grey relational analysis. // Journal of Manufacturing Technology Management. 17 (2006), 7, pp. 926-940
- [6] Saaty, T.L. Decision making with dependence and feedback the Analytic Network Process. // RWS Publications, Pittsburgh, 2001.
- [7] Bayazit, O. Use of analytic network process in vendor selection decisions. // Benchmarking: An International Journal. 13 (2006), pp. 566-579
- [8] Ghodsypour, S.H., O'Brien, C. A decision support system for supplier selection using an integrated analytic hierarchy process and linear programming. // International Journal of Production Economics. 56-57 (1998), pp. 199-212
- [9] Ting, S.C., Cho, D.I. An integrated approach for supplier selection and purchasing decisions. // Supply Chain Management: An International Journal. 13/2 (2008), pp. 116-127
- [10] Sanaye, A., Farid Mousavi, S., Abdi, M.R., Mohaghar, A. An integrated group decision making process for supplier selection and order allocation using multi-attribute utility theory and linear programming. // Journal of Franklin Institute. 345 (2008), pp. 731-747
- [11] Ng, W.L. An efficient and simple model for multiple criteria supplier selection problem. // European Journal of Operational Research. 186 (2008), pp. 1059-1067
- [12] Celebi, D., Bayraktar, D. An integrated neural network and data envelopment analysis for supplier selection under incomplete information. // Expert Systems with Application. 35 (2008), pp. 1698-1710
- [13] Moghadam, M.R.S., Afsar, A., Sohrabi, B. Inventory lot-sizing with supplier selection using hybrid intelligent algorithm. // Applied Soft Computing. 8 (2008), pp. 1523-1529
- [14] Che, Z.H., Wang, H.S. Supplier selection and supply quantity allocation of common and non-common parts with multiple criteria under multiple products. // Computers and Industrial Engineering. 55 (2008), pp. 110-133
- [15] Amid, A., Ghodsypour, S.H., O'Brien, C. Fuzzy multiobjective linear model for supplier selection in a supply chain. // International Journal of Production Economics. 104 (2006), pp. 394-407
- [16] Choy, K.L., Lee, W.B., Lau, L.C., Choy, L.C. A knowledge-based supplier intelligence retrieval system for outsource manugacturing. // Knowledge Based Systems. 18 (2005), pp. 1-17

- [17] Lujić, R., Šarić, T., Heffer, G. Application of expert system for determination of the most beneficial suppliers in single production. // Tehnički vjesnik. 16 (2009), 4, pp. 81-86
- [18] Saaty, T.L. The analytic hierarchy process. // McGraw Hill, New York, 1980.
- [19] Saaty, T.L. How to make a decision: the analytical hierarchy process. // European Journal of Operational Research. 48, 1(1990), pp. 9-26
- [20] Višekriterijsko odlučivanje AHP metoda.
http://www.foi.hr/CMS_library/studiji/dodiplomski/IS/kolegiji/mzvo/ahp.pdf, 15.07.2010.
- [21] Matematički temelj AHP metode.
http://www.foi.hr/CMS_library/studiji/dodiplomski/IS/kolegiji/mzvo/MatematickiTemelj_AHPMetoda.pdf, 15.07.2010.
- [22] Hunjak, T., Jakovčević, D. Višekriterijski modeli za rangiranje i uspoređivanje banaka. // Zbornik Ekonomskog fakulteta u Zagrebu. 1, 1(2003), pp. 43-60
- [23] Pogarčić, I., Frančić, M., Davidović, V. Application of AHP method in traffic planning. // ISEP 2008, Proceedings of ITS - A Condidition for Sustainable Development and Prosperity of A Modern and Safe Transport / ed. Boštjan Hernavs, Pavel Meše. Ljubljana, 2008.
- [24] Šimunović, K., Draganjac, T., Šimunović, G. Application of Different Quantitative Techniques to Inventory Classification. // Tehnički vjesnik. 15 (2008), 4; pp. 41-47
- [25] Partovi, F.Y., Burton, J. Using the analytic hierarchy process for ABC analysis. // International Journal of Production and Operations Management. 13, 9(1993), pp. 29-44
- [26] Šimunović, K., Galović, M., Šimunović, G., Svalina, I. Applying of AHP methodology and weighted properties method to the selection of optimum alternative of stock material. // Acta Technica Corviniensis - Bulletin of Engineering. Fascicule 3 (2009); pp. 65-69
- [27] Rozman, Č., Pažek, K. Application of computer supported multi-criteria decision models in agriculture. // Agriculturae Conspectus scientificus. 70, 4(2005), pp. 127-134
- [28] Braglia, M., Carmignani, G., Frosolini, M., Grassi, A. AHP-based evaluation of CMMS software. // Journal of Manufacturing Technology Management. 17, 5(2006), pp. 585-602

UNAPRJEĐENJE TEHNOLOŠKOG MODULA ERP SUSTAVA PRIMJENOM UMJETNE INTELIGENCIJE

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGICAL MODULE OF ERP SYSTEM USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Goran Šimunović, Tomislav Šarić, Roberto Lujić, Ilija Svalina

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu
Trg I. Brlić-Mažuranić 2, HR-35000 Slavonski Brod, Croatia

SAŽETAK

Tradicionalni pristup projektiranju tehnoloških procesa temeljen uglavnom na iskustvu tehnologa, zahtijeva dosta akumuliranog znanja, nefleksibilan je i dugotrajan. Značajnu podršku i unaprjeđenje ovog pristupa predstavlja primjena metoda umjetne inteligencije. U radu su opisani rezultati istraživanja primjene neuronskih mreža u procjenjivanju tehnoloških parametara i, neizravno, tehnološkog vremena poliranja šavnih cijevi. Analizirane su različite strukture neuronske mreže širenja unazad, te izabrana optimalna s najmanjom razinom RMS greške. Točnije procjene tehnološkog vremena koje daje model upotpunjavaju prethodno definirane tehnološke operacije i predstavljaju osnovu za planiranje proizvodnje i kontrolu rokova isporuke. Na ovaj se način olakšava rad tehnologa i skraćuje vrijeme tehnološke pripreme proizvodnje.

Ključne riječi: ERP sustav, projektiranje tehnoloških procesa, umjetna inteligencija, neuronske mreže

1 UVOD

Primjena znanstvenih pristupa u pripremi proizvodnje uz razinu znanja i organizacije u odjelima pripreme proizvodnje značajno određuje krajne karakteristike proizvoda i neizravno utječe na troškove proizvodnje, odnosno rokove isporuke. Integracija računala, odnosno računalskih sustava, u pripremu, proces proizvodnje i upravljanja utjecala je na podizanje razine automatizacije, produktivnosti i fleksibilnosti u proizvodnim poduzećima. Na taj je način bitno smanjeno sudjelovanje čovjeka u proizvodnji, dok je istovremeno značaj ljudskog faktora u pripremi proizvodnje još uvijek izuzetno velik. Primjenom sustava temeljenih na umjetnoj inteligenciji godinama stjecana pojedinačna znanja i iskustva djelatnika u odjelima pripreme proizvodnje, pokušavaju se objediniti i učiniti općedostupnim. Prikupljena ekspertna znanja koriste u okviru Computer Aided Process Planning (CAPP) sustava za identifikaciju (klasifikaciju) radnih predmeta, izbor načina obrade, strojeva i parametara obrade, a sve s ciljem skraćenja vremena i smanjenja grešaka u pripremi tehnoškog procesa za obradu odvajanjem čestica [1-3]. Tehnološka su znanja nužna za određivanje polaznog materijala, redoslijeda tehnoških operacija, izbor alata, itd. Problem optimizacije u navedenim aktivnostima je dosta značajan u proizvodnim poduzećima. Jedna od suvremenih tehnika u postupku optimizacije je primjena genetičkih algoritama (GA). Ovu tehniku optimizacije, koja je učinkovitija od tradicionalnih (geometrijsko programiranje, dinamičko programiranje,...), opisuju i primjenjuju u svojim radovima mnogi autori [4-7]. Autori [4] i [5] primjenom genetičkih algoritama provode optimizaciju parametara obrade kod tokarenja. Pri tome u obzir uzimaju veliki broj ograničenja kao što su sila rezanja, snaga stroja, postojanost alata, temperatura u zoni rezanja, itd., a s ciljem skraćenja vremena i smanjenja troškova obrade. Isti se ciljevi pokušavaju ostvariti kontinuiranim poboljšanjem uvjeta rezanja, odnosno razvojem i primjenom on-line intelligentnog sustava za monitoring i optimizaciju uvjeta rezanja temeljenog na genetičkim algoritamima [6,7]. Autori [8] i [9] se također bave optimiranjem režima obrade, ali uz primjenu modificiranih GA. U postupcima optimiranja režima obrade često se uz GA kombiniraju i neuronske mreže (NN) [10-13].

U spomenutim radovima zaključci uglavnom potvrđuju opravdanost primjene umjetne inteligencije za rješavanje konkretnih tehnoških problema. U višedimenzionalnim problemima u kojima je teško uspostaviti matematičku zavisnost ulaznih i izlaznih varijabli, značajnu primjenu svakako imaju neuronske mreže. Ovaj rad se stoga bavi problemom predviđanja tehnoškog vremena poliranja šavnih cijevi. Za postavljanje i analizu modela prikupljeni su rezultati eksperimentalnih istraživanja.

2 DEFINICIJA PROBLEMA I CILJA ISTRAŽIVANJA

Proizvodnju šavnih cijevi iz nehrđajućeg čelika čine faza valjanja i faza brušenja i poliranja. U početnoj se fazi traka od nehrđajućeg čelika različitih debljina i širina, ovisno o traženom vanjskom promjeru cijevi, valja preko niza vertikalnih i horizontalnih valjaka i oblikuje u cijevnicu. U nastavku procesa se zagrijavaju rubovi izvaljane cijevnice i pripremaju za zavarivanje, koje se TIG postupkom obavlja u prolaznoj zaštitnoj komori. Slijedi brušenje nadvišenja zavara i kalibriranje cijevi prema zahtijevanoj toleranciji vanjskog promjera i zahtijevanoj ovalnosti. Nakon provedenog ispitivanja zavara metodom bez razaranja i povremenim tehnoškim probama, cijevi se grubo bruse, označavaju, odrežuju na određenu duljinu i odlažu u skladište poluproizvoda. Prva faza proizvodnje na skladištu poluproizvoda stvara planirane minimalne zalihe različitih dimenzija cijevi.

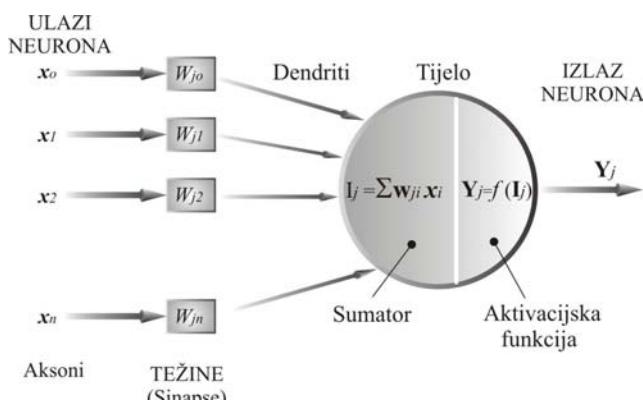
U većini slučajeva (oko 95 %) ovako dobivene šavne nehrđajuće cijevi potrebno je dodatno brusiti i polirati. Ovisno o narudžbama kupaca, slijedi izuzimanje cijevi sa skladišta poluproizvoda i druga faza proizvodnje: brušenje i poliranje. Prolaskom cijevi kroz abrazivno remenje i glave za poliranje, te rotiranjem oko osi, postiže se visoko zahtijevana čistoća i sjaj vanjske površine. S ciljem postizanja zahtijevane kvalitete, potrebno je pravovremeno mijenjati potrošeno abrazivno remenje. U protivnom se cijevi vraćaju na dodatnu obradu (II ili III faza poliranja), koja osim gubitka vremena povisuje i troškove radnog naloga. Parametri obrade i vrijeme potrebno za drugu fazu proizvodnje uglavnom se procjenjuju na osnovi iskustva. Vrijeme obrade se može izračunati na osnovi brzine poliranja, a brzina poliranja ovisi o velikom broju drugih utjecajnih parametara.

Stoga je jedan od ciljeva u radu, za procjenjivanje tehnoloških parametara i neizravno tehnološkog vremena poliranja šavnih cijevi, razviti procesni model temeljen na primjeni neuronskih mreža i pratiti primjenu modela u realnim uvjetima. Podaci za postavljanje modela su prikupljeni sa 172 radna naloga tijekom duljeg vremenskog perioda u poduzeću Đuro Đaković Zavarene posude d.d. u proizvodnji šavnih cijevi od nehrđajućeg čelika.

Nakon objavlјivanja rada [14] uslijedio je nastavak istraživanja i prikupljanja eksperimentalnih podataka. Ovaj rad prikazuje vremenska odstupanja procijenjenih i realnih vrijednosti tehnološkog vremena nakon korekcije modela.

3 PROCJENA TEHNOLOŠKIH PARAMETARA OBRADE PRIMJENOM NEURONSKIH MREŽA

Promatrano istraživanje pripada problemima s kontinuiranim vrijednostima ulaza i izlaza, odnosno skupini problema predviđanja, te je stoga primjenjena mreža „širenja unazad“ (*eng. Back-Propagation Network*). Na slici 3.1 je prikazana struktura umjetnog neurona.



Slika 3.1 Model strukture neurona

Tijekom procesa učenja cilj je omogućiti brzo konvergiranje i smanjiti globalnu grešku danu izrazom (3.1).

$$E = 0,5 \cdot \sum (d_k - x_k)^2 \quad (3.1)$$

Globalna se greška kod ove vrste mreže širi unazad kroz mrežu sve do ulaznog sloja pri čemu se prema željenim vrijednostima izlaza neuronske mreže podešavaju težine veza u mreži. Povećanje ili smanjenje trenutnih vrijednosti težina $w_{ij}^{[s]}$ utječe na opadanje globalne greške.

Primjenom pravila gradijentnog opadanja može se izraziti prirast težina veza u mreži $\Delta w_{ji}^{[s]}$:

$$\Delta w_{ji}^{[s]} = -\alpha \cdot \left(\frac{\partial E}{\partial w_{ji}^{[s]}} \right) \quad (3.2)$$

gdje je α stopa učenja.

Derivacije u gornjem izrazu se mogu izračunati kao:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ji}^{[s]}} = \left(\frac{\partial E}{\partial I_j^{[s]}} \right) \cdot \left(\frac{\partial I_j^{[s]}}{\partial w_{ji}^{[s]}} \right) = -e_j^{[s]} \cdot x_i^{[s-1]} \quad (3.3)$$

Vrijednost prirasta težina veza u mreži $\Delta w_{ji}^{[s]}$ sada glasi:

$$\Delta w_{ji}^{[s]} = \alpha \cdot e_j^{[s]} \cdot x_i^{[s-1]} \quad (3.4)$$

gdje je α stopa učenja, $x_j^{[s]}$ predstavlja izlazno stanje j -tog neurona u s -tom sloju, a parametar $e_j^{[s]}$ koji predstavlja grešku i prolazi unazad kroz sve slojeve mreže se definira

kao:

$$e_j^{[s]} = \frac{-\partial E}{\partial I_j^{[s]}} \quad (3.5)$$

Stopa učenja se nastoji držati na niskoj razini da bi se izbjegla divergencija (odstupanje), ali istovremeno ovako niska razina stope učenja za posljedicu može imati veoma sporo učenje. Ovi suprotni zahtjevi riješeni su uvođenjem vrijednosti momentum u izraz (3.4):

$$\Delta w_{ji}^{[s]} = \alpha \cdot e_j^{[s]} \cdot x_i^{[s-1]} + momentum \cdot \Delta w_{ji}^{[s]} \quad (3.6)$$

Osvježavanje težina veza u mreži se može provoditi za svaki vektor učenja posebno ili kumulativno što znatno povećava brzinu učenja (konvergiranje).

Dakle, cilj procesa učenja u neuronskoj mreži je postići što manju razinu greške između izlaza dobivenih učenjem mreže i stvarnih (željenih) rezultata. Ovo se ostvaruje podešavanjem težina neurona, a prihvaćanjem funkcije cilja, koja je u nastavku definirana kroz minimalizaciju sume kvadrata grešaka.

Opći oblik vektora modela pogodnog za ulaz u neuronsku mrežu je slijedeći:

$$X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}\} \Rightarrow Y_o = \{y_{o1}, y_{o2}, y_{o3}, \dots, y_{on}\} \quad (3.7)$$

gdje vektor $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}\}$ predstavlja ulazne varijable, a vektor $Y_o = \{y_{o1}, y_{o2}, y_{o3}, \dots, y_{on}\}$ izlazne varijable.

Za promatrani problem vektor modela ima jednu izlaznu varijablu-brzinu poliranja. Iz brzine poliranja izračunava se tehničko vrijeme obrade. Ulazne varijable su slijedeće: vrsta materijala, vanjski promjer cijevi, debljina stjenke, ovalnost cijevi nakon prve faze proizvodnje, gradacija remenja za brušenje ili poliranje podešenog na stroju (liniji), stanje remenja (vrijeme uporabe remenja), pritisak remenja, zahtijevana hrapavost površine, ostvarena hrapavost površine, duljina cijevi i faza poliranja (tablica 3.1).

Kao kriterij za ocjenu mreže prihvaćena je RMS greška (eng. Root Mean Square error) definirana izrazom:

$$RMS = \sqrt{MS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (d_n - y_n)^2}{N}} \quad (3.8)$$

gdje je:

- MS - Mean Square error,
- N - broj parova ulazno-izlaznih vrijednosti skupa za učenje,
- y_n - n-ti izlaz neuronske mreže,
- d_n - željena vrijednost n-tog izlaza neuronske mreže.

Tablica 3.1 Varijable s vrijednostima protezanja za predloženi model istraživanja

Rb.	Naziv varijable	Donja vrijednost	Gornja vrijednost
1.	vrsta materijala	1	4
2.	vanjski promjer cijevi [mm]	10	50
3.	debljina stjenke [mm]	0,5	2,5
4.	ovalnost cijevi nakon prve faze proizvodnje [mm]	0,04	0,1
5.	gradacija remenja za brušenje ili poliranje [grit]	80	700
6.	stanje remenja (vrijeme uporabe remenja) [min]	0	1200
7.	pritisak remenja [A]	0,8	2,5
8.	zahtijevana hrapavost [μm]	8	12
9.	ostvarena hrapavost [μm]	10	14
10.	duljina cijevi [mm]	1000	6000
11.	faza poliranja	1	3

Za učenje mreže je primjenjeno Delta pravilo. Prijenosna funkcija korištena u ovom istraživanju je Sigmoidna funkcija koja se izračunava prema izrazu (3.9).

$$Izlaz_i = \frac{1}{1 + e^{-G \cdot ulaz_i}} \quad (3.9)$$

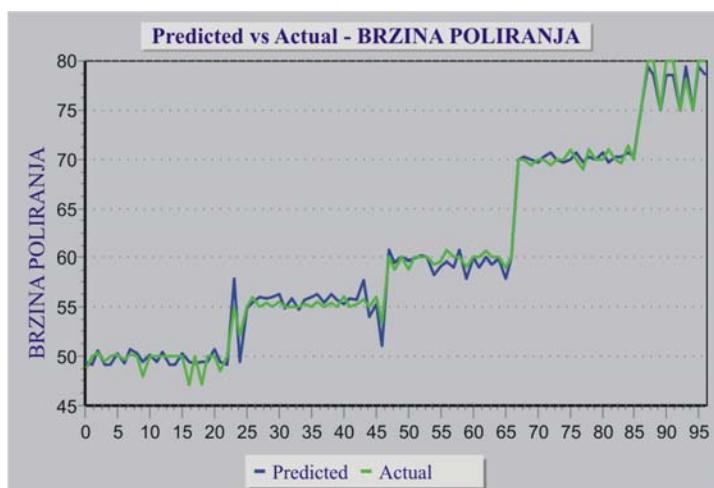
gdje je G – prirast funkcije, a izračunava se kao $G=I/T$. T je prag funkcije. Ova funkcija se često koristi pri kreiranju i istraživanju neuronskih mreža. Graf funkcije je kontinuirano monoton, a vrijednosti ove prijenosne funkcije kreću se u intervalu $[0,1]$.

Istraživanje primjene mreže „širenja unazad“ provedeno je za definirani model podataka. Mijenjanjem atributa istraživane su različite arhitekture neuronskih mreža. Atributi mreže koja daje najmanju RMS grešku prikazani su u tablici 3.2. Ova arhitektura mreže generirala je izlaz mreže s razinom RMS greške 3,01 % u fazi učenja, odnosno 4,82 % u fazi validacije.

Tablica 3.2 Atributi neuronske mreže s najmanjom RMS greškom

Rb.	Naslov atributa	Usvojeno obilježje
1.	Ulagani broj neurona	11
2.	Izlazni broj neurona	1
3.	Broj skrivenih neurona	6
4.	Pravilo učenja	Delta
5.	Prijenosna funkcija	Sigmoidna
6.	Veličina epohe	11
7.	Maksimalni broj epoha za učenje	75000
8.	Broj epoha učenja između testova	215
9.	Broj pokušaja	45
10.	Stopa učenja	0,21; 0,095; 0,1; 1,0
11.	Momentum	0,2; 0,05; 0,1; 0,8
12.	RMSE u fazi učenja	0,0301
13.	RMSE u fazi validacije	0,0482
14.	Faktor korelacije	0,9870

Dakle, neuronska mreža čiji su atributi navedeni u tablici 3.2 najbolje aproksimira rezultate dobivene eksperimentalnim istraživanjem. Na slici 3.2 prikazani su grafički rezultati dobiveni ovom strukturu mreže, u odnosu na eksperimentalne vrijednosti.



Slika 3.2 Prikaz stvarnih i predviđenih vrijednosti koje daje NM za brzinu poliranja

4 INTEGRACIJA MODELA PREDIKCIJE TEMELJENOG NA NEURONSKIM MREŽAMA U TEHNOLOŠKI PODSUSTAV

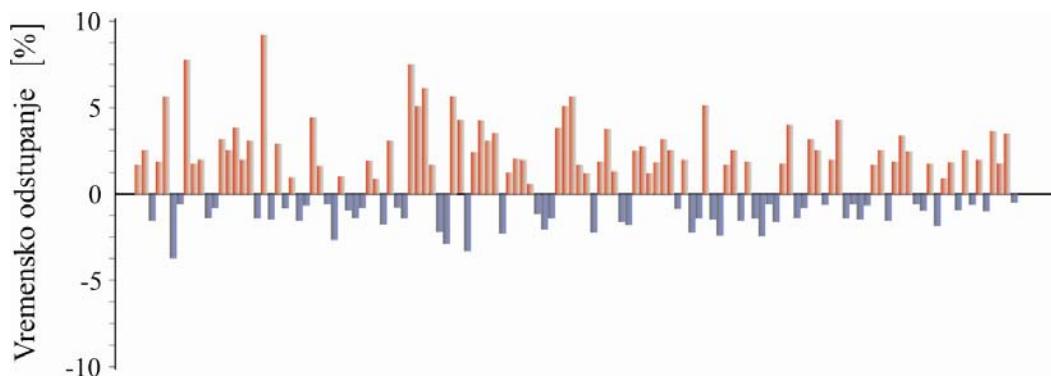
U poduzeću u kojem je provedeno istraživanje prethodno je implementiran ERP (eng. Enterprise Resource Planning) sustav. Uvođenjem ERP sustava podignuta je organizacijska razina pripremnih, proizvodnih i uslužnih poslova, podignuta je kvaliteta upravljanja i omogućena lakša kontrola procesa pripreme i proizvodnje, smanjene su zalihe materijala, troškovi proizvodnje, troškovi odstupanja od kvalitete (škart, dorade), troškovi reklamacija kupaca, troškovi penala zbog kašnjenja u isporuci, skraćeno je vrijeme ciklusa proizvodnje, vrijeme pripreme proizvodnje, smanjen je broj potrebnih dokumenata i ručnog rada na upisivanju i prepisivanju podataka, te smanjeno je vrijeme na otklanjanju kvarova i zastoja u radu proizvodnih

kapaciteta. Tehnološki podsustav (modul) ERP sustava omogućava upis i određivanje materijala, sirovina, dijelova, sklopova i proizvoda, određivanje sastavnice proizvoda s normativima sirovina, materijala i gotovih dijelova, definiranje tehnoloških postupaka, te normativa materijala i iskustveno procijenjenih tehnoloških vremena po operaciji, povezivanje i pregled crteža dijelova, sklopova i proizvoda, te ispis tehnološke dokumentacije.

Određivanje mogućih rokova isporuke na ponudama, a kasnije i na narudžbama u podsustavu Prodaja i kalkulacije uglavnom se radi iskustveno. Korisnici sustava rijetko uopće rade detaljnije višekriterijske analize. Bitan faktor kod definiranja rokova isporuke je tehnološko vrijeme. Ukupno trajanje tehnološkog procesa može se dobiti na osnovi prethodno definiranih tehnoloških parametara, pa tako i brzine poliranja, iz tehnološkog podsustava (modul) ERP-a. Međutim, ta se teoretska, iskustvena vrijednost brzine poliranja na osnovi stanja cijevi, stroja i opreme mijenja. Upravo je stoga dobiveni model temeljen na primjeni neuronskih mreža integriran u postojeći ERP poduzeća Đuro Đaković Zavarene posude d.d. Model je direktno povezan u tehnološki podsustav (modul).

Jedan od ciljeva integracije modela predikcije u ERP sustav je dakle, na osnovi trenutnog stanja podataka u sustavu dobivenim modelom točnije procijeniti brzinu poliranja, a time i vrijeme obrade, te moguće rokove isporuke. Ovako točne procjene brzine i vremena poliranja, koje daje prethodno dobiveni model, su bitne i kod planiranja i terminiranja proizvodnje, te naročito rebalansa plana proizvodnje. Također je, na osnovi stanja podataka u sustavu i primjenom modela predikcije, moguće u trenutku pripreme tehnološke dokumentacije provesti korekciju iskustvene (teoretske) brzine poliranja i lansiranje provesti s realnim tehnološkim vremenima.

Primjena integriranog modela pokazala se učinkovitom, jer daje vremena poliranja s odstupanjima do 10 % (slika 4.1). Nakon višemjesečne primjene prikupljenim podacima korigiran je postavljeni model. Iz slike je vidljivo da se vremenom odstupanje, procijenjenih i realnih vrijednosti tehnološkog vremena, smanjuje.



Slika 4.1 Odstupanje stvarno utrošenog od planiranog vremena po radnom nalogu

5 ZAKLJUČAK

U radu su opisani rezultati primjene neuronskih mreža u procjenjivanju tehnoloških parametara i tehnološkog vremena poliranja šavnih cijevi. Model predikcije temeljen na neuronskim mrežama daje rezultate s greškom koja je manja od 10%. Istraživanje je pokazalo da mladi i manje iskusni inženjeri u postupku projektiranja tehnoloških procesa kod određivanja brzine obrade i tehnološkog vremena grijše u pravilu oko 10%.

Integracijom modela u ERP sustav olakšano je projektiranje tehnoloških procesa poliranja šavnih cijevi i skraćeno ukupno potrebno vrijeme za tehnološku pripremu proizvodnje.

Praćenjem primjene modela u okviru ERP sustava pokazano je da model uz točnije procjene brzine poliranja, a time i vrijednosti tehnoloških vremena, olakšava aktivnosti planiranja i terminiranja proizvodnje i definiranja rokova isporuke.

6 LITERATURA

- [1] Grabowik C. Knosala R. The method of knowledge representation for a **CAPP system**. *Journal of Materials Processing Technology*. 133(1-2):90-98, 2003 Feb 1.
- [2] Wang KS. An integrated intelligent process planning system (**IIPPS**) for machining. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 9(6):503-514, 1998 Dec.
- [3] Park KS. Kim SH. Artificial Intelligence Approaches To Determination of CNC Machining Parameters In **Manufacturing - A Review**. *Artificial Intelligence in Engineering*. 12(1-2):127-134, 1998 Jan-Apr.
- [4] Singh G. Choudhary AK. Karunakaran KP. Tiwari MK. An evolutionary approach for **multi-pass turning** operations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*. 220(2):145-162, 2006 Feb.
- [5] Sardinas RQ. Santana MR. Brindis EA. **Genetic algorithm-based multi-objective** optimization of cutting parameters in turning processes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 19(2):127-133, 2006 Mar.
- [6] Cus F. **Balic** J. Optimization of cutting process by GA approach. *Robotics And Computer-Integrated Manufacturing*. 19(1-2):113-121, 2003 Feb-Apr.
- [7] Cus F. Milfelner M. **Balic** J. An intelligent system for monitoring and optimization of ball-end milling process. *Journal of Materials Processing Technology*. 175(1-3):90-97, 2006 Jun 1.
- [8] Ahmad N. Tanaka T. Saito Y. **Cutting parameters** optimization and constraints investigation for turning process by GA with self-organizing adaptive penalty strategy. *JSME International Journal Series C-Mechanical Systems Machine Elements & Manufacturing*. 49(2):293-300, 2006 Jun.
- [9] Wang ZG. Rahman M. Wong YS. Sun J. Optimization of **multi-pass milling** using parallel genetic algorithm and parallel genetic simulated annealing. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 45(15):1726-1734, 2005 Dec.
- [10] **Tansel** IN. Ozcelik B. Bao WY. Chen P. Rincon D. Yang SY. Yenilmez A. Selection of optimal cutting conditions by using GONNS. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 46(1):26-35, 2006 Jan.
- [11] Jain RK. Jain VK. Optimum selection of **machining** conditions in **abrasive flow machining** using neural network. *Journal of Materials Processing Technology*. 108(1):62-67, 2000 Dec 1.
- [12] Zuperl U. Cus F. Mursec B. Ploj T. A hybrid analytical-**neural network** approach to the determination of optimal cutting conditions. *Journal of Materials Processing Technology*. 157-58(Special Issue SI):82-90, 2004 Dec 20.

- [13] Zuperl U. Cus F. **Optimization of cutting conditions during cutting** by using neural networks. *Robotics And Computer-Integrated Manufacturing.* 19(1-2):189-199, 2003 Feb-Apr.
- [14] Šimunović, G.; Šarić, T.; Lajić, R.: *Application of neural networks in evaluation of technological time.* Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering. 54 (2008) , 3; 179-188

POPRAVAK ZAVARIVANJEM KONSTRUKCIJA IZ TITANOVIH SLITINA

REPAIR WELDING OF TITANIUM ALLOY CONSTRUCTION

Dražen Živković

Sveučilište u Splitu

Fakultet elektrotehnike, strojarstva i Brodogradnje, Ruđera Boškovića bb, 21000 Split

Igor Gabrić, Slaven Šitić

Sveučilište u Splitu

Sveučilišni studijski centar za stručne studije, Livanjska 5, 21000 Split

SAŽETAK

Problematika zavarivanja titana i njegovih legura bez korištenja specijalnih komora sa vakuum ili inertnom atmosferom izražena je kod popravaka gdje zavareni dijelovi mogu biti različitih dimenzija i oblika, te bi bilo preskupo za svaki pojedinačni slučaj raditi zaštitnu komoru. Najčešće su komore neugodne za zavarivača i ograničavaju vođenje pištolja i dodatnog materijala. Zbog toga se pristupilo razmatranju mogućnosti obavljanja kvalitetnog popravka bez korištenja komore. Praktični dio rada jest popravak zavarivanjem kućišta kamere za snimanje unutrašnjosti plašta peći klinkera u tvornici cementa. Kućište se sastoji od dvostrukе stjenke plašta iz legure titana između kojih struji rashladni medij. Vanjski plašt kućišta je izložen temperaturama od 700 do 1000°C uz povremeno strujanje vrućeg zraka koji sadrži abrazivne čestice. Zbog ekstremnih radnih uvjeta dolazi do intenzivnog trošenja izloženog dijela plašta te isti otkazuje ovisno o položaju u peći ili hladnjaku nakon 6 - 12 mjeseci eksploracije. Popravak se obavlja zavarivanjem TIG postupkom uz primjenu dvostrukе sekundarne zaštite zavara (lica i korijena) argonom. Prije samog popravka obavljeno je ispitivanje kemijskog sastava osnovnog materijala, te je izvršen izbor odgovarajućeg materijala zamjenskog dijela plašta, kao i dodatnog materijala. Prije popravka provedeno je zavarivanje probnih uzoraka u specijalno pripremljenoj napravi za pozicioniranje, uz osiguranje zaštitne atmosfere u zoni zavara. Svrha ovog probnog zavarivanja je provjera mogućnosti zavarivanja titanove legure bez zaštitne komore. Ispitana je mikrostruktura uzorka, te izmjerena tvrdoća po izvodnici koja se proteže od osnovnog materijala, preko zone utjecaja topline, do samog zavara. Ispitivanje je pokazalo da nema značajnih promjena u mikrostrukturi zavara u odnosu na osnovni materijal, te da su tvrdoće izmjerene po izvodnici prilično ujednačene, a to su pokazatelji ispravnog izbora tehnologije zavarivanja. Nakon ispitivanja uzorka izvršen je popravak zavarivanjem plašta kućišta. Popravljeni kućište ima vijek trajanja koji odgovara novom kućištu što ukazuje da je sanacija obavljeno uspješno.

Ključne riječi: titan legure, zavarivanje, metalografija

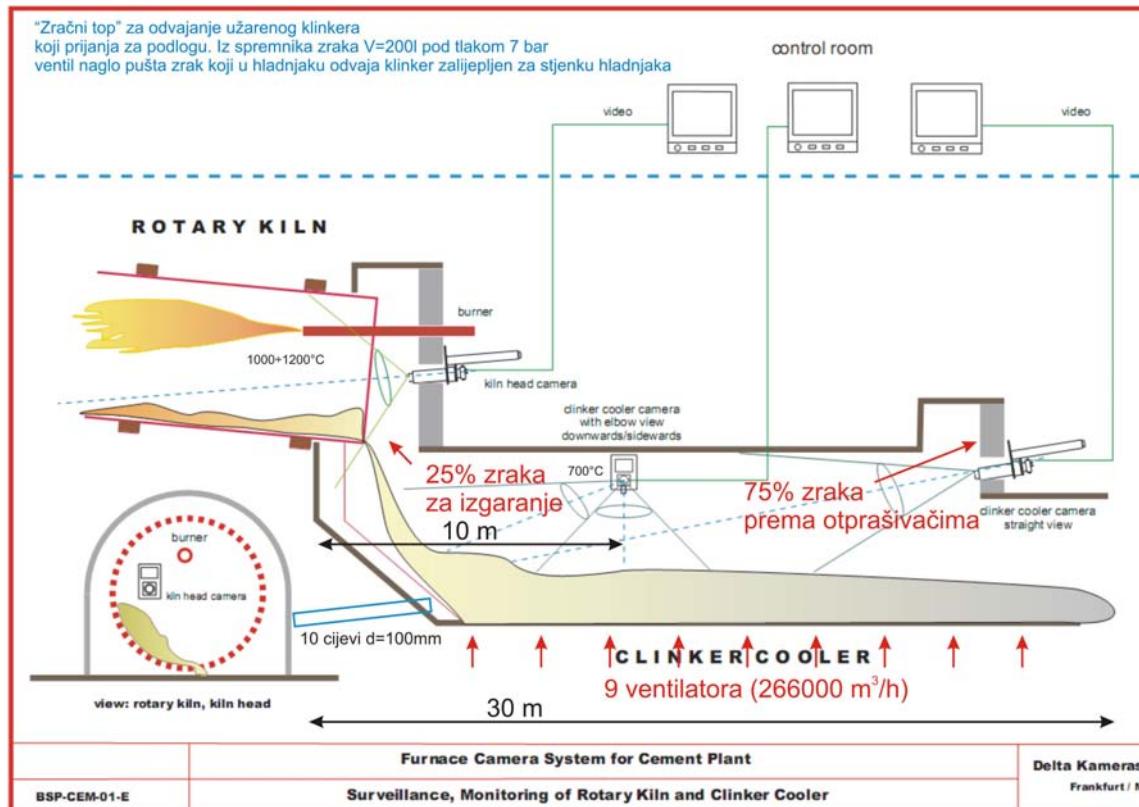
1. UVOD

U tvornicama cementa unutrašnjost plašta rotacione peći i hladnjaka vizualno se nadzire na pomoću specijalnih TV kamera. Kamere su smještaju u posebna kućišta iz legure titana (slika 1.) sa dvostrukim stjenkama između kojih struji rashladni medij (voda - tretirana sredstvima za omešavanje). Sam otvor za objektiv kamere dodatno je zaštićen konstantnim dotokom struje hladnog zraka.

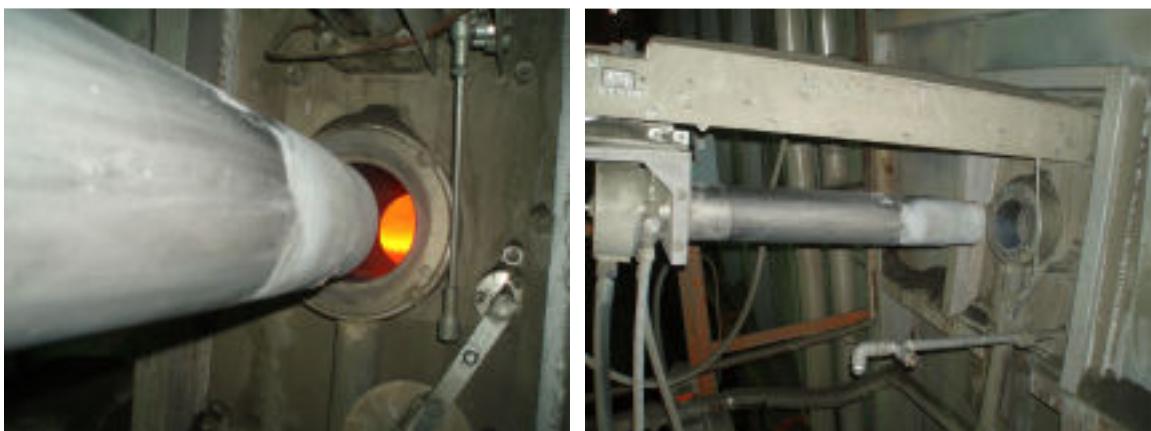


Slika 1. Kućište TV kamere iz titan slitine

Shematski izgled rotacione peći i hladnjaka sa ucrtanim smještajem kamera prikazan je na slikama 2 i 3. Temperature unutar rotacione peći nalaze se u granicama od 1000 do 1200°C, a unutar hladnjaka temperatura iznosi oko 700 °C.



Slika 2. Shematski prikaz sustava nadzora unutrašnjeg plašta rotacione peći i hladnjaka klinkera pomoću TV kamera [1]



Slika 3. Kućište TV kamere prije uvlačenja u prostor hladnjaka klinkera

Površina titana na sobnoj temperaturi reagira sa kisikom iz zraka i vrlo brzo nastaje nepropusni sloj TiO_2 koji metalu daje visoku antikorozivnost [2]. Iznad $400^{\circ}C$ titan postaje visoko reaktivni materijal. Površinski sloj rutila TiO_2 puca te više ne predstavlja zaštitu metala koji se nalazi ispod tog sloja.

Tada dolazi do difuzije kisika i dušika iz zraka od površine prema dubljim slojevima, stvaraju se krti slojevi uključinskih mješanca, koji narušavaju svojstva metala. Na mjestima najvećih koncentracija naprezanja (mjesta nagle promjene oblika - zavar) dolazi do nastajanja pukotina.

Oštećeni plašt kamere prikazan je na slici 4.

Do prekomjernog zagrijavanja dolazi, ako iz određenog razloga dođe do zastoja ili smanjenja intenziteta hlađenja, u eksploraciji (nastajanje taloga ili kamenca na unutarnjoj stjenki kućišta, slika 5). Osim visoke temperature dio vrha kućišta TV kamere, unutar hladnjaka klinkera, izložen je povremenoj struji vrućeg zraka koje u sebi sadrži abrazivne čestice, što uzrokuje "brušenje" izložene površine. Sanacija ovako oštećenog kućišta TV kamere izvodi se zamjenom oštećenog dijela plašta.

Vijek trajanja novog kućišta iznosi 6 do 12 mjeseci, što ovisi o položaju kućišta (rotaciona peć ili hladnjak klinkera).



Slika 4. Oštećeni plašt kućišta kamere



Slika 5. Kamenac na unutarnjem dijelu plašta

2. IZBOR TEHNOLOGIJE POPRAVKA

Zbog dostupnosti i cijene opreme odabran je TIG postupak zavarivanja uz dvostruku sekundarnu zaštitu inertnim plinom,. Izbor zamjenskog i dodatnog materijala napravljen je na temelju kemijske analize osnovnog materijala. Prije samog popravka napravljena su probna zavarivanja 3 uzorka, te je provedeno njihovo ispitivanje kako bi se utvrdila ispravnost predložene tehnologije zavarivanja.

2.1. Analiza kemijskog sastava materijala

Visoki intenziteti Ti, V i Cr i nešto manji spektri Al, Fe, i Cu ukazuju da se najvjerojatnije radi o leguri Ti-13V-11Cr-3Al (UNS¹ R58010). Ova legura spada u grupu metastabilnih titanovih legura i dobro je zavarljiva. Kod izbora zamjenskog i dodatnog materijala vodilo se računa da kemijski sastav bude odgovarajući osnovnom materijalu, te da izabrani materijal bude lako dobavljen. Odabran je materijal za popravak Ti-6Al-4V (UNS R56400). Kemijski sastavi materijala dani su tabelarno [3]:

Tablica 1. Kemijski sastavi izvornog i dodatnog materijala

	Legirni elementi %			Nečistoće – max. %				
	Al	V	Cr	N	C	H	Fe	O
Ti-13V-11Cr-3Al	2,5-3,5	12,5-14,5	10-12	0,05	0,05	0,025	0,35	0,17
Ti-6Al-4V	5,5-6,75	3,5-4,5	-	0,05	0,1	0,01	0,3	0,2

2.2. Laboratorijsko zavarivanje probnih uzoraka

Da bi ocijenili prihvatljivost predložene tehnologije zavarivanja izvršeno je probno zavarivanje uzoraka. Izrađene su 3 probne epruvete dimenzija 50x50x2 (mm). Zbog nemogućnosti nabavke identičnog materijala kao što je materijal plašta kućišta, kao materijal za izradu epruveta koristio se lim iz legure Ti-6AL-4V. Ispitana je tvrdoća duž izvodnice koja se proteže od osnovnog materijala preko zone utjecaja topline do zavara, mikrostruktura i izvršena je proba savijanja. Temeljem rezultata ispitivanja usvojena je predložena tehnologija zavarivanja.

Postupka zavarivanja

Probni uzorci su zavareni TIG postupkom zavarivanja uz sekundarnu zaštitu zavara bez korištenja specijalne komore za zavarivanje, vidi sliku 6. [4].

Lice zavara se dodatno sekundarno štiti pomoću posebnog dodatka na keramičkoj sapnici pištolja za distribuciju sekundarnog zaštitnog plina sa produženim stražnjim dijelom (5 cm) koji štiti neohlađeni zavar [5], (slika 8). Dodatak za distribuciju plina je izrađen iz nehrđajućeg čelika.



Slika 6. Zavarivanje probnih uzoraka

¹ Unified Numbering System - North America

Korijen zavara se štiti po cijeloj dužini zavara pomoću posebno pripremljene naprave [5], koja se sastoji od bakrenog tijela (zbog intenzivnijeg odvođenja topline) sa kanalom za distribuciju plina sekundarne zaštite korijena zavara, te dvije stezaljke za učvršćenje epruveta u poziciji za zavarivanje, (slika 7).

Dovod sekundarnog zaštitnog plina (argona) je odvojen od primarne zaštite te se njegov protok posebno regulira. Neposredno prije zavarivanja četkom iz nehrđajućeg čelika uklonjeni su površinski oksidi sa uzorka, te su površine dodatno očišćene acetonom. Zavarivanje se obavlja u jednom prolazu. Protok plina primarne i sekundarne zaštite je prilagođen tako da štiti zavar i njegovu okolinu dok se temperatura ne spusti ispod 400 °C (titani i titanove slitine zbog velike sklonosti upijanja plinova na temperaturama iznad 400°C moraju biti u potpunosti zaštićene od utjecaja atmosfere).



Slika 7. Naprava za zavarivanje uzorka



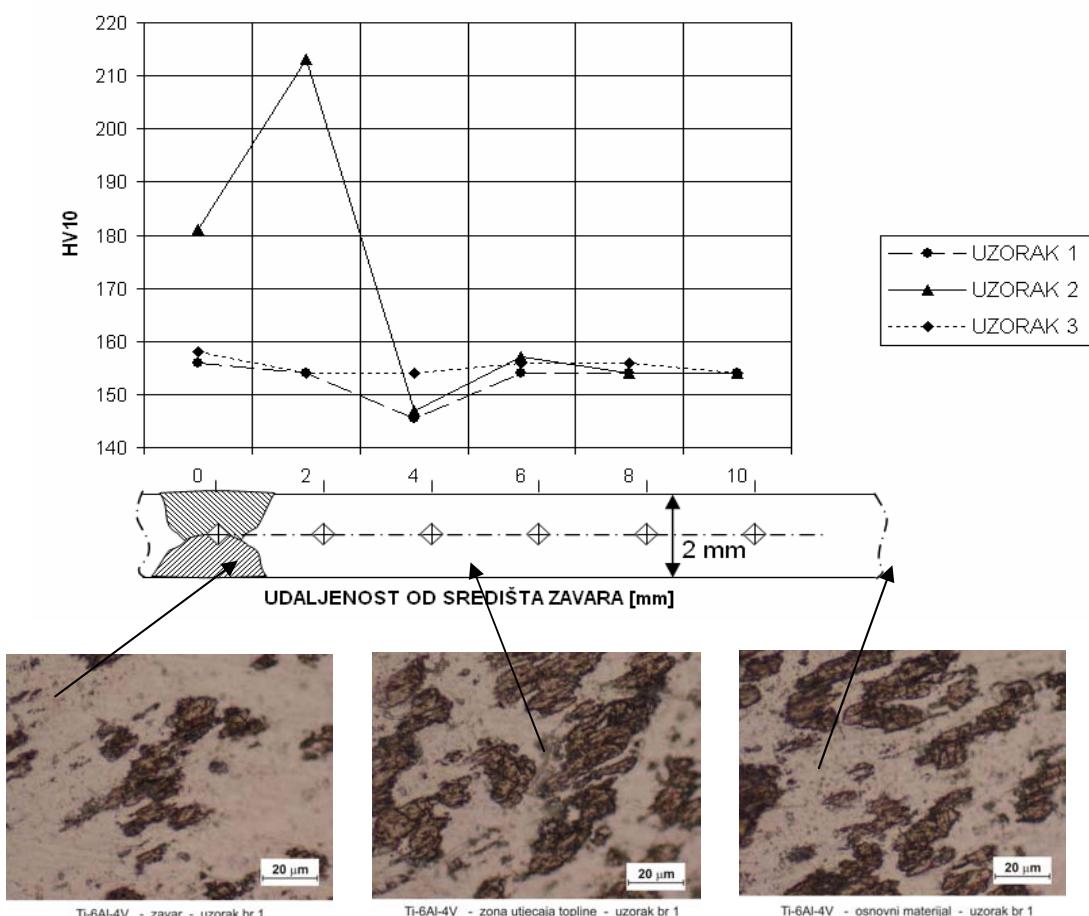
Slika 8. Naprava za sekundarnu zaštitu lica zavara

Tablica 2. Parametri zavarivanja

Struja zavarivanja	150A DC EN
Elektrode	EW Th-1 Ø1,6 [mm]
Promjer plinske sapnice	Ø19 [mm]
Zaštitni plin	99,996% Ar
Protok zaštitnog plina Primarna zaštita	12 [l/min]
Protok zaštitnog plina Sekundarna zaštita lica zavara	5 [l/min]
Protok zaštitnog plina Sekundarna zaštita korijena zavara	5 [l/min]
Vrijeme zaštite nakon zavarivanja	30 [s]

2.3. Analiza tvrdoće probnih uzoraka

Mjerenje tvrdoće na probnim uzorcima izvršeno je nakon zavarivanja uzduž izvodnice koja se proteže po središtu presjeka iz osnovnog materijala preko zone utjecaja topline pa do zavara (slika 9). Mjerenje je izvršeno metodom Vickers HV10. Rezultati su prikazani dijagramom na slici 9. Izmjerene tvrdoće se podudaraju za uzorak 1 i 3. Uzorak br. 2 je pokazao veću tvrdoću zavara i zone utjecaja topline zbog loše zaštite prilikom zavarivanja (zavarivanje bez sekundarne zaštite sa lica zavara). Povećana tvrdoća ukazuje na kontaminaciju kisikom i dušikom koji povećavaju tvrdoću i krtost materijala.

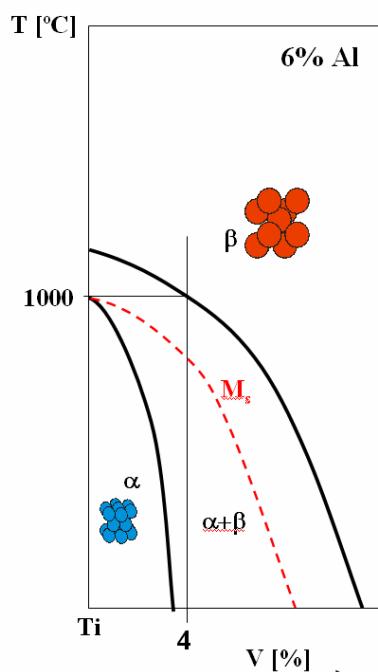


Slika 9. Rezultati mjerenja tvrdoće sa shematskim prikazom mjernih mesta i mikrostrukturom

Uzorci 1 i 3 koji su zavareni primjenom dvostrukog sekundarnog zaštite (lica i korijena zavara) imaju ujednačenu tvrdoću duž cijele izvodnice, što je jedan od pokazatelja ispravnog izbora postupka zavarivanja.

2.4. Analiza mikrostrukture

Na slici 10. prikazan je dio pseudobinarnog dijagrama slijevanja za slitine (Ti6Al)-V i to za fiksnu koncentraciju 6% Al. U dijagramu je istaknuta koncentracija 4%V, te temperatura 1000°C koja odgovara temperaturi pretvorbe u β fazu za korištenu leguru. U dijagramu je i označena M_s linija koja predstavlja temperaturu modifikacije rešetke prostorno centriranog kuba u kompaktni heksagon, bez difuzije, prilikom gašenja sa temperaturom oko 1000°C. [6]

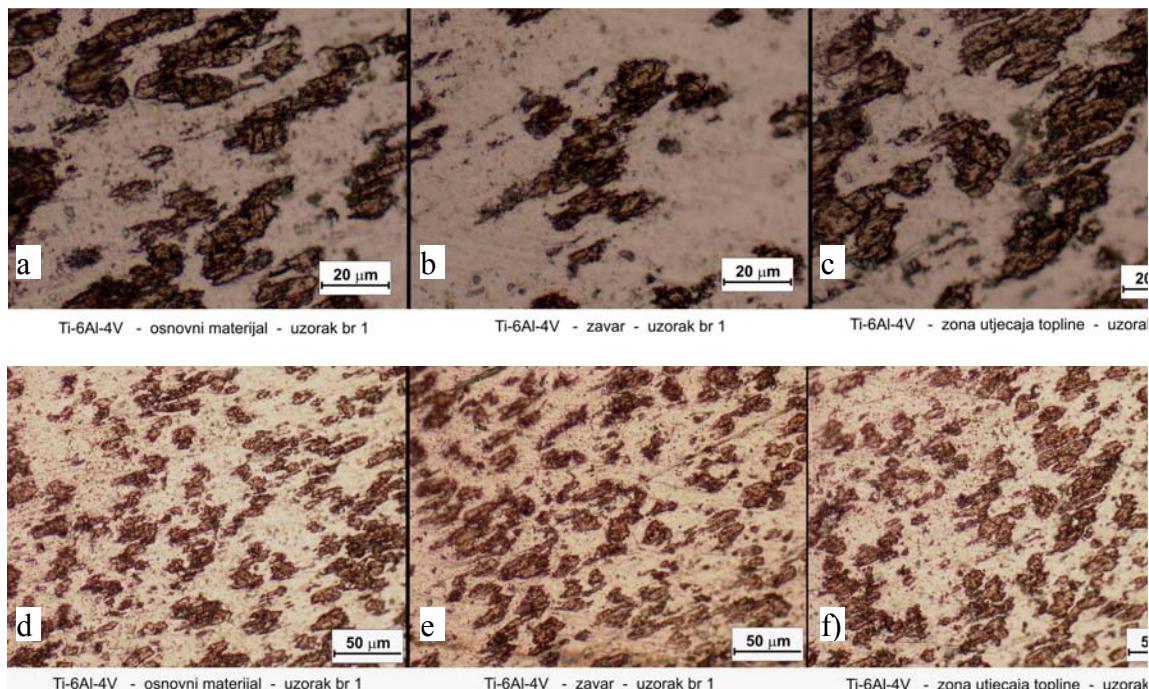


Slika 10. Pseudobinarni dijagram slijevanja slitina Ti6Al - V

Zbog različitih temperatura zagrijavanja i brzina hlađenja duž poprečnog presjeka zavara, nastaju različite mikrostrukture i različita mehanička svojstva. Cilj našeg zavarivanja je da ove razlike budu što manje.

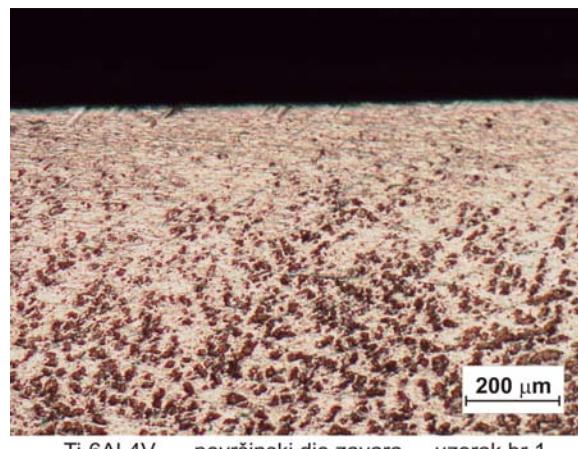
Vidimo da prilikom zavarivanja sam zavar prolazi kroz sva temperaturna područja od taline, preko homogenog β do heterogenog $\alpha+\beta$ područja. Kako se radi o bržem hlađenju (hlađenje brzine reda veličine 30-50°/s), spuštaju se temperature pretvorbe, te dolazi do transformacije β faze kao kombinacija difuzijske –nastaje α faza i bezdifuzijske promjene, pa izabrana legura na sobnoj temperaturi sadrži kombinaciju ravnotežnih faza $\alpha + \beta$, te neravnotežnu fazu α' . nastalu zbog bržeg hlađenja. Zona utjecaja topline je ovisno o udaljenosti od zone taljenja bila zagrijana od najviših temperatura visokog β područja pa naniže. U dijelu presjeka koji je hlađen sa temperaturom iznad linije pretvorbe u β (iznad 1000°C) došlo je do potpunog rastvaranja α faze tako da je slitina prije hlađenja imala izvornu koncentraciju legirnih elemenata u svojoj β rešetki što je dovelo do konačne strukture sa nešto smanjenom količinom nepretvorene β faze nakon hlađenja (slike 11b i 11e) u odnosu na osnovni materijal. Mikrostruktura osnovnog materijala je prikazana na slikama 11a i 11d. Udaljeniji dio zone utjecaja topline koji je zagrijan ispod linije pretvorbe u β sadržavao je prije hlađenja dio nepretvorene α faze i ostatak β faze koja je u ovom slučaju bila bogatija legirnim elementima, pa je nakon hlađenja na sobnu temperaturu struktura bila bogatija nepretvorenom β fazom od osnovnog materijala (slike 11c i 11f).

Vidimo da se povećanjem udjela β faze tvrdoča nešto smanjuje (sliku 9). Tvrdoča samog zavara je nešto veća zbog većeg udjela martenzitične α' faze. Na prikazanim snimcima mikrostrukture na slici 11 nije moguće razlikovati α i α' fazu. U slučaju potrebe dobivanja ravnomjernije strukture može se obaviti toplinska obradba žarenja na temperaturi nešto ispod 1000 °C u visoko heterogeno područje.



*Slika 11. Metalografske slike slitine Ti-6Al-4V za dva različita povećanja (osnovni materijal – zavar – zona utjecaja topline)
Razvijač: Kroll-ov reagens 100 ml voda, 2 ml HF, 5 ml HNO₃ [7]*

Na slici 12 prikazana je mikrostruktura površinskog dijela zavara. Uočljivo je da sama površina do dubine cca 0,2 mm ima strukturu $\alpha+\alpha'$. Do ove pojave je došlo zbog kontaminacije same površine plinovima iz zraka (koji stabiliziraju α fazu). Iako je zavar bio sekundarno zaštićen inertnim plinom turbulencije pri strujanju zaštitnog plina moglo su djelomično usisati i dio zraka iz okolne atmosfere. Radi se o blagoj kontaminaciji uskog površinskog sloja koju je dobro ukloniti mehaničkim putem, jer se radi o krtoj fazi sklonoj nastajanju pukotina.



Slika 12. Mikrostuktura površine zavara

2.5. Proba savijanja

Proba savijanja je obavljena na sva tri uzorka do kuta 180°. Savijanje je izvršeno u napravi sa 3 valjka od kojih je srednji bio promjera 12 mm (6x2 mm) [8]. Na površini u vlačnoj zoni na uzorcima 1 i 3 nema nikakvih tragova pucanja, dok se na uzorku 2 uočava više površinskih prskotina (uzorak br.2 je zavaren bez sekundarne zaštite korijena zavara). Na slici 13. prikazano je ispitivanje epruvete i uzorci nakon ispitivanja. Na slici 14. prikazane su površine vlačnih zona epruvete nakon savijanja pod povećanjem 10X.



Slika 13. Savijanje epruveta i epruvete nakon savijanja



Uzorak br.1

Uzorak br.2

Uzorak br.3

Slika 14. Izgled površine vlačne zone epruvete nakon savijanja

2.6. Ocjena tehnologije zavarivanja

Uzorci 1 i 3 zavareni predloženom tehnologijom dali su ujednačenu tvrdoću duž centralne izvodnice, pokazali neznatna odstupanja u mikrostrukturi te zadovoljili probu savijanja. Obavljeni ispitivanja potvrđuju ispravnost odabrane tehnologije zavarivanja.

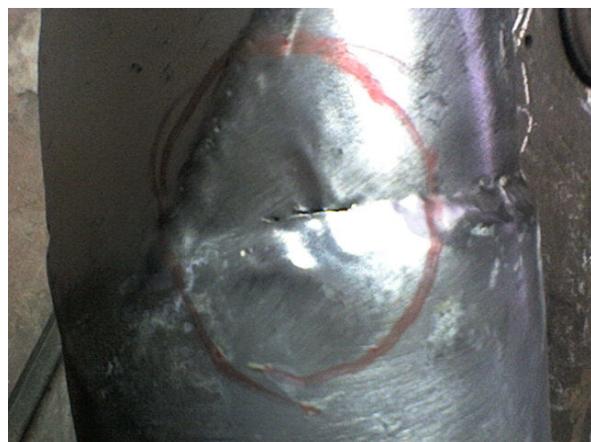
3. TEHNOLOGIJA POPRAVKA

Popravak kućišta kamere se obavlja u više faza. Izvršena je detekcija oštećenja (može sadržavati pukotine, rupice, smanjenje debljine stjenke – slika 15), te piljenjem uz intenzivno hlađenje rashladnom emulzijom izrezan oštećeni dio plašta. Korištenje brusilice sa reznim pločama nije dozvoljeno zbog kontaminacije rubova budućeg zavara vezivim sredstvom i brusnim zrncima. Unutrašnji dio između dva plašta obično sadrži nešto kamenca i taloga (slika 16) kojeg treba očistiti i isprati. Kućište treba osušiti zagrijavanjem na temperaturu oko 100°C. Sušenje je najbolje obaviti neposredno prije zavarivanja. Četkanje se vrši isključivo četkama iz titana ili nehrđajućeg čelika. Odabran je TIG postupak zavarivanja uz dvostruku sekundarnu zaštitu inertnim plinom.

Izbor zamjenskog i dodatnog materijala napravljen je na temelju kemijske analize osnovnog materijala.

Iz odabranog materijala napravljen je zamjenski dio plašta i neposredno prije zavarivanja očetkan i očišćen pomoću acetona, te postavljen u poziciju na koju će biti zavaren na kućištu. Kako ne bi došlo do smicanja uslijed zavarivanja i povećanja zračnosti među spajanim djelovima za vrijeme zavarivanja, prije zavarivanja izvršeno je pripajanje istih (slika 17). Naravno, i pripajanje treba biti izvršeno uz adekvatnu zaštitu (primarnu i sekundarnu).

Sekundarna zaštita korijena zavara u našem slučaju je obavljena propuhivanjem unutrašnjosti kućišta inertnim plinom u trajanju od 15 (min) uz protok plina 10 (l/min). Kućište je postavljeno na način da se mjesto zavarivanja nalazi u gornjoj zoni. Kako je argon teži od zraka, on ispunjava komoru kućišta odozdo na gore istiskujući zrak. Nakon određenog vremena propuhivanja atmosfera u kućištu postaje inertna. Osim primarne zaštite na pištolj za zavarivanje je postavljena i produžena



Slika 15. Oštećeni dio plašta kućišta



Slika 16. Kamenac u unutrašnjem dijelu kućišta



Slika 17. Pripojeni dio plašta kućišta

sapnica iz nehrđajućeg čelika sa sekundarnom zaštitom lica zavara. Pripajanje je obavljeno TIG postupkom. Za pripajanje i zavarivanje kao dodatni materijal korištena je žica za TIG zavarivanje promjera Ø2 mm iz legure Ti-6Al-4V.

Zavarivanje je obavljeno u više faza kako ne bi došlo do pretjeranog zagrijavanja okolnog materijala. Zavarivani su segmenti u duljini cca 50 mm uz pauze dostaone da se komad ohladi na temperaturu ispod 50 °C. Zavareni plašt, prije čišćena oksida sa površine, prikazan je na slici 18.

Boje oksida na površini zavara ukazuju na njegovu kvalitetu koja ovisi o zaštitnoj atmosferi.

Tablica 3. Boje površinskih oksida [8]

Boja zavara	Uzrok i tretman
srebrna	Uredan zavar
žućasta, i svjetlo plava	Površinski oksid. Ukloniti četkanjem sa četkom iz nehrđajućeg čelika.
tamno plava, siva	Loše. Kontaminacija zavara. Zavar ukloniti i zavarivanje ponovno obaviti nakon korekcije zaštite.
bijela	Ekstremno loše. Kontaminacija zavara i zone utjecaja topline. Zavar i zonu utjecaja topline treba ukloniti i zavarivanje ponovno obaviti nakon korekcije zaštite.

Nakon zavarivanja obavljen je vizualni pregled zavara, četkanje površinskih oksida (slika 19) i provjera nepropusnosti tlačnom probom pri tlaku 5 bar u trajanju 60 min.



Slika 18. Zavareni plašt kućišta TV kamere prije čišćenja oksida



Slika 19. Zavareni plašt kućišta TV kamere nakon čišćenja oksida

4. ZAKLJUČAK

Popravak kućišta titanove kamere može se uspješno obaviti gore opisanom tehnologijom. Kao potvrda rečenog koristi nam povratna informacija o vijeku trajanja popravljenog kućišta koji odgovara vijeku trajanja novonabavljenog. Zavarivanja bez korištenja skupih specijalnih vakuum komora ili komora sa inertnom atmosferom omogućuju bolju kontrolu procesa zavarivanja i bržu sanaciju, ali mora se posvetiti posebna pažnja za osiguranje sekundarne zaštite inertnim plinom svih dijelova koji se zagrijavaju na temperature iznad 400°C. Također je važno pažljivo odstraniti površinske okside prije zavarivanja i osigurati čistoću kako osnovnog i dodatnog materijala tako i plina za zaštitu.

5. LITERATURA

- [1] DELTA KAMERASYSTEME: *Furnace Probe Camera System - Application and Scope of Supply*, Delta Kamerasyteme GmbH, Frankfurt, Germany – page 5
- [2] ASM INTERNATIONAL: *ASM Handbook Volume 2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Introduction to Titanium and Titanium Alloys, 1992
- [3] MATWEB – MATERIAL PROPERTY DATA: <http://www.matweb.com>
- [4] ASM INTERNATIONAL: *ASM Handbook Volume 6 – Welding, brazing and soldering*, Welding of Titanium Alloys, 1993
- [5] LUKAČEVIĆ,Z.:– *Zavarivanje*, Slavonski brod, 1998. poglavlje 16 str.1-5
- [6] MATTHEW J. DONACHIE, JR.: *Titanium - A technical guide*, Understanding Ti's Metallurgy, ASM INTERNATIONAL – Metal park – 1988, page 21-36
- [7] PAUL DANIELSON, RICK WILSON AND DAVID ALMAN: *Microstructure of titanium welds*, U.S. Department of Energy, Struers Journal of Materialography, 3/2004
- [8] AWS: *Recommended practices for gas tungsten arc welding for titanium piping and tubing*, AMERICAN WELDING SOCIETY, Miami, Florida, 2/2000, page 10

CUTTING FORCE ANALYSIS IN FACE MILLING USING ROTATABLE CENTRAL COMPOSITE DESIGN OF EXPERIMENTS AND TAGUCHI METHOD

Dražen Bajić¹, Sonja Jozić², Luka Celent³

^{1, 2, 3} Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture,
University of Split, Ruđera Boškovića bb, Split
Croatia

Abstract

This paper presents a study of the influence of cutting conditions on the cutting force components during face milling of steel 42CrMo4. Two experimental plans, rotatable central composite design and the Taguchi method with orthogonal arrays and signal-to-noise ratio, have been designed and performed on controlled machining with corresponding cutting conditions. Equations for the cutting force components, as a functions of cutting parameters, have been obtained by means of regression analysis. The Taguchi method has been used to analyse impact of cutting parameters on the cutting force components and to find optimal level of the cutting parameters. The comparison of results obtained by means of the rotatable central composite design and the Taguchi method was performed.

Keywords: face milling, cutting forces, design of experiments, regression analysis, Taguchy method.

Sažetak

U radu je istraživan utjecaj parametara obrade na komponente sile rezanja pri čeonom glodanju čelika 42CrMo4. Eksperimenti su provedeni primjenom odgovarajućih parametara obrade i sukladno odabranim planovima pokusa, rotabilni centralni kompozicijski plan i Taguchijeva metoda s ortogonalnim nizovima i omjerom signala i šuma. Jednadžbe komponenti sila rezanja, kao funkcije parametara obrade, dobivene su regresijskom analizom. Taguchijeva metoda je korištena za analizu utjecaja parametara obrade na komponente sile rezanja te pronađenje optimalnih parametara. Uspoređeni su rezultati dobiveni rotabilnim centralnim kompozitnim planom i Taguchijevom metodom.

Ključne riječi: čeono glodanje, sile rezanja, plan pokusa, regresijska analiza, Taguchijeva metoda.

INTRODUCTION

Contemporary manufacturing and technological process request implementation of sophisticated mathematical and other methods for the purpose of their efficient control. Thus a research is needed to get the mathematical approximations of machining processes and appearing phenomena as better as possible. Engineers are facing in manufacturing with two main practical problems. The first is to determine the values of the process parameters that will provide the desired product quality and the second is to maximize manufacturing system performance with available resources. Cutting force is one of the important physical variable that comprise relevant process information in machining. Such information can be used to assist in understanding machining features such as machinability, tool wear fracture, machine tool chatter, machining accuracy and surface finish [1].

The subject of this study is to analyse dependence of the cutting force components on three cutting parameters in face milling (cutting speed v_c , feed per tooth f_t and depth of cut a_p). In this work the response surface method (RSM) based on the rotatable central composite design (RCCD) has been used with an analysis of variance (ANOVA) and regression analysis (RA). A comparison of results obtained by means of the Taguchi method with the regression model was carried out.

EXPERIMENTAL SETTINGS

For the present work, all experiments have been performed at the Tool machine laboratory at Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, Split. Vertical machining center VC560 Spinner, equipped with a 12000 rpm electospindle and the SK 40 tool holder, has been used for the milling experiments. The face milling experiments were performed by a tool CoroMill 390 with three TiN coated inserts, produced by Sandvik. Test samples were made of steel 42CrMo4, with dimensions 250x110x110 mm. All of the inserts in every experiment were new to eliminate the effect of tool wear. The cutting forces were measured by utilizing dynamometer Kistler type 9271A produced in Winterthur Switzerland. The dynamometers signals were then processed via charge amplifiers and analog/digital converter to computer. Cutting parameters as the cutting speed, the feed per tooth and the depth of cut were taken within their region of interest of 120 to 140 m/min, 0.10 to 0.20 mm/tooth and 1.0 to 1.5 mm, respectively. All experiments were carried out without cooling and lubrication agents.

APPLICATION OF ROTATABLE CENTRAL COMPOSITE DESIGN (RCCD)

Design of experiment (DOE) has been achieved by the rotatable central composite design (RCCD). The RCCD models the response using the empirical second-order polynomial:

$$y = b_0 + \sum_{i=0}^k b_i \cdot X_i + \sum_{i=0}^k b_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum_{i=0}^k b_{ii} \cdot X_i^2 \quad (1)$$

where:

- b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} are regression coefficients and
- X_i, X_j are the coded values of input parameters.

In order to determine the required number of experimental points for RCCD the following expression is used:

$$N = 2^k + 2k + n_0 = n_k + n + n_0, \quad (2)$$

where:

- k is the number of parameters,
- n_0 is the repeated design number of the average level,
- n is the design number on the central axes.

Rotatability provides equal precision of estimation in all directions and the central composite design is made rotatable by adding the points $\alpha = \pm 1.682$ to the central axes. The coordinate α was calculated using expression: $\alpha = (2^k)^{1/4}$. The 3-factorial RCCD of experiment demands 8 experiments (3 factors on two levels, 2^3), 6 experiments on the average level and 6 experiments on the central axes, what makes total of 20 experiments.

In order to collect data for RA, software Design-Expert 6.0 has been used to generate experimental points. Considering material of workpiece and tool producer recommendations for cutting parameters, table 1 has been created, for 3-factor design of experiments. Measurements of component cutting forces have been presented in Table 2.

Table 1. Physical and coded values of input factors for second order design of experiments

Input factors						
d value	Levels	-1.682	-1	0	1	1.682
Physical values	$X_1 = v_c$ [m/min]	113.18	120	130	140	146.82
	$X_2 = f_z$ [mm/tooth]	0.07	0.10	0.15	0.20	0.23
	$X_3 = a_p$ [mm]	0.83	1.00	1.25	1.50	1.67

Table 2. Results of components of cutting forces according to multifactor second order design

Number of experiment	Factors			F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]
	X_1	X_2	X_3			
1.	-1	-1	-1	196	135	36
2.	1	-1	-1	157	132	40
3.	-1	1	-1	290	150	48
4.	1	1	-1	235	145	51
5.	-1	-1	1	192	135	36
6.	1	-1	1	198	131	38
7.	-1	1	1	316	192	56
8.	1	1	1	261	168	46
9.	-1.682	0	0	205	165	45
10.	1.682	0	0	185	142	39
11.	0	-1.682	0	160	103	33
12.	0	1.682	0	308	175	54
13.	0	0	-1.682	166	134	40
14.	0	0	1.682	250	180	45
15.	0	0	0	190	140	41
16.	0	0	0	188	142	42
17.	0	0	0	190	141	42
18.	0	0	0	192	139	43
19.	0	0	0	189	141	42
20.	0	0	0	187	140	40

By applying the regression analysis the coefficients of regression, multi-regression factors, standard false evaluation and the value of t-test have been assessed. After omitting insignificant factors the mathematical models for components of cutting force F_x , F_y , F_z are obtained as follows:

$$F_x = 1526.97 - 15.69 \cdot v_c + 882.34 \cdot f_t - 654.16 \cdot a_p + 7743.04 \cdot f_t^2 + 162.64 \cdot a_p^2 \quad (3)$$

$$F_y = 796.95 - 9.38 \cdot v_c + 357.74 \cdot f_t - 144.94 \cdot a_p + 0.042 \cdot v_c^2 + 86.93 \cdot a_p^2 + 660 \cdot f_t \cdot a_p \quad (4)$$

$$F_z = -63.81 + 379.57 \cdot f_t - 3.25 \cdot v_c \cdot f_t - 0.75 \cdot v_c \cdot a_p \quad (5)$$

Analysis of results

The analysis of variance and the regression analysis for Fx indicate:

- variables which are significant for mathematical model are: cutting speed v_c , feed per tooth f_t , depth of cut a_p , square of feed per tooth f_t^2 and square of depth of cut a_p^2 ,
- feed per tooth f_t has the most significant influence,
- coefficient of determination is $R^2=0.9468$, which means that the model is representative, because it clarifies 94.68 % of deviations, which are the result of variable's influence.

The analysis of variance and the regression analysis for Fy indicate:

- variables which are significant for mathematical model are: cutting speed v_c , feed per tooth f_t , depth of cut a_p , square of cutting speed v_c^2 and square of depth of cut a_p^2 and interaction of feed per tooth and depth of cut $f_t \cdot a_p$
- feed per tooth f_t and depth of cut a_p have the most significant influence,
- coefficient of determination is $R^2=0.9607$, which means that the model is representative, because it clarifies 96.07 % of deviations, which are the result of variable's influence.

The analysis of variance and the regression analysis for Fz indicate:

- variables which are significant for mathematical model are: feed per tooth f_t , the interactions of cutting speed and feed per tooth $v_c \cdot f_t$, cutting speed and depth of cut

$v_c \cdot a_p$,

- feed per tooth f_t has the most significant influence,
- coefficient of determination is $R^2=0.9402$, which means that the model is representative, because it clarifies 94.02 % of deviations, which are the result of variable's influence.

Criterion for deciding about "most significant influence" is the value of Prob>F. Real meaning of Prob>F is in testing of H_0 hypothesis (there is no factor effect) against alternative H_1 hypothesis (there is a factor effect). Namely, this is the probability of getting the F Value if the term did not have an effect on the response. The F Value for a term is the test for comparing the variance associated with that term with the residual variance. It is the mean square for the term divided by the mean square for the residual. In general, a term that has a probability value less than 0.05 would be considered to have a significant effect. A probability value greater than 0.10 is generally regarded as not significant. In this analysis of variance, the values of Prob>F for feed per tooth (for all cutting force components) and depth of cut (only for Fy) have the smallest value, less than 0.001, and therefore feed per tooth and dept of cut have the most significant influence on the corresponding responses.

APPLICATION OF TAGUCHI METHOD

The Taguchi's design of experiments uses orthogonal arrays, the basic characteristics of which is balance, i.e. both balance of elements of columns and balance between the columns. This means that every factor appears on the same number of levels and that every factor on any level will be in all combinations with other factors [5]. The number of input factors, as in the RCCD, is three, but the levels of input factors have been changed. In the design of experiments based on othogonal array L9 (3^4), three levels have been used. The necessary number of test runs is nine, which represents big advantage since the number of tests is reduced in relation to RCCD. Robust design and experimental results, together with result transformations into signal-to-noise ratio are given in table 3.

Table 3. Ortogonal array L9 (3^4) with experimental results and calculated S/N ratios

Input factors									
Levels			-1	0		1			
$X_1 = v_c$ [m/min]			120		130		140		
$X_2 = f_t$ [mm/tooth]			0.10		0.15		0.20		
$X_3 = a_p$ [mm]			1.00		1.25		1.50		
Nr	X_1	X_2	X_3	F_x [N]	S/N	F_y [N]	S/N	F_z [N]	S/N
1.	-1	-1	-1	196	-45,85	135	-42,61	36	-31,13
2.*	-1	0	0	215	-46,65	140	-42,92	44	-32,87
3.	-1	1	1	316	-49,99	192	-45,67	56	-34,96
4.*	0	-1	0	160	-44,08	122	-41,73	38	-31,60
5.*	0	0	1	220	-46,85	156	-43,86	43	-32,67
6.*	0	1	-1	249	-47,92	144	-43,17	48	-33,62
7.	1	-1	1	198	-45,93	131	-42,35	38	-31,60
8.*	1	0	-1	170	-44,61	137	-42,73	43	-32,67
9.*	1	1	0	230	-47,23	159	-44,03	51	-34,15

* - additonally performed experiments

The core criterion for analysis of experimental data is signal-to-noise ratio, i.e. ratio S/N [5]. For the minimal components of cutting forces, the best solution is "smaller is better", ratio S/N is determined:

$$S/N = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (6)$$

where: n – is the number of replication,
 y_i – measured value of output variable.

Analysis of results

Influence of control factor on S/N ratio has been presented in Figure 1, 2 and 3. The response graphics of components of cutting forces have been shown for all three control factors. The smallest components of cutting forces are achieved using the cutting parameters where the S/N ratio is maximal.

Parameter influence on the response could be presented by means of response graphs, which show the change of the S/N ratio in the moment of the level change of control parameter from the first to the third for applied design of experiment L9 (3^4). Influence of terms on the process response is expressed graphically by the slope of the line connecting different levels of parameters. The higher slope means greater parameter influence on the response. The greatest influence of feed per tooth on all components of cutting force can be seen from presented graphs.

Cutting speed and depth of cut has certain influence on components F_x and F_y , and minor influence on cutting force component in axial direction, F_z . The optimization of cutting parameters inside of offered factors levels, with regard to criterion "smaller is better", gives the combination of control factors:

For F_x : $X_1=1, X_2=-1, X_3=0$

For F_y : $X_1=0, X_2=-1, X_3=-1$

For F_z : $X_1=0, X_2=-1, X_3=-1$

Namely, this combination of control factors, which is within the tested range, enables the smallest components of cutting forces.

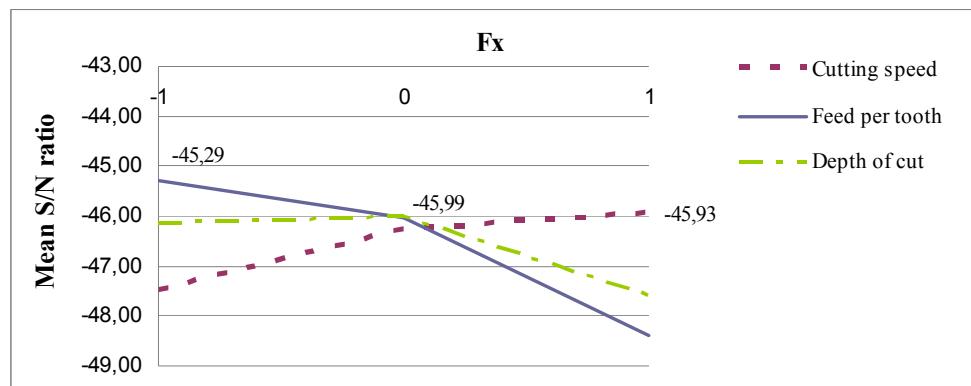


Figure 1. Influence of control factor on S/N ratio for F_x

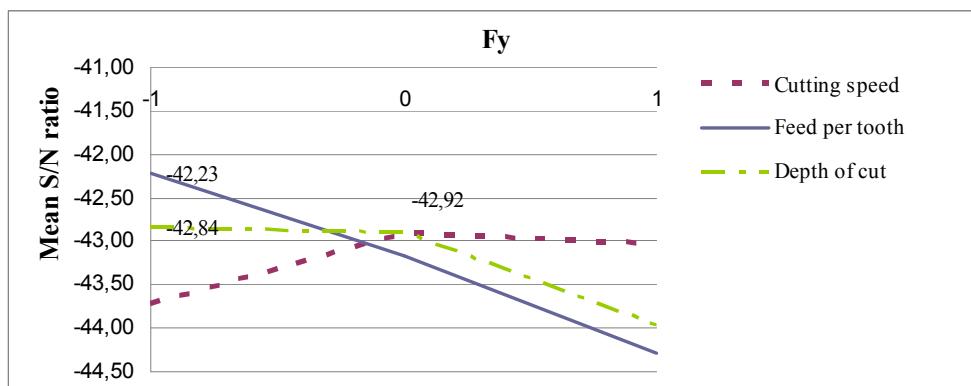


Figure 2. Influence of control factor on S/N ratio for F_y

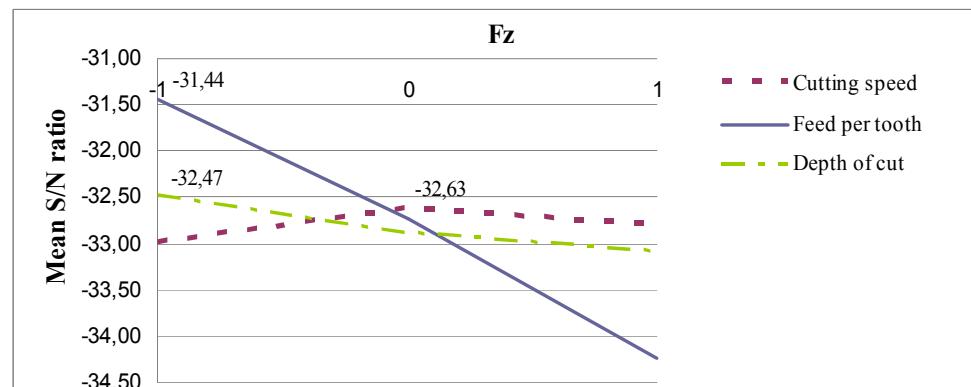


Figure 3. Influence of control factor on S/N ratio for F_z

CONCLUSIONS

Based on performed experiments and by comparing the test results acquired with RCCD method and the Taguchi method, it can be concluded:

- The advantage of classical experimental design method is possibility to obtain mathematical model, which exactly determines response for certain cutting parameters values within the experimental domain, and it enables a high quality analysis of experiments range as well as achieving of optimal exact values. On the other side there is the Taguchi method by means of which values of optimal parameters are obtained among control factor levels. In addition, Taguchi method is better for parameters with discrete values in contrast to classical optimization technique and continuous values.
- The main advantage of the Taguchi method, in relation to classical experimental design method, is the effectiveness of robust design itself which can be seen through reliable results and reduced number of test runs. Taguchi method uses a special design of orthogonal arrays to study the entire parameter space with a small number of experiments. Furthermore, to obtain optimal value of process parameters the classical method needs the prediction model to be used for optimization procedure, which is not necessary for orthogonal arrays design. Also, the parameters value needs to be defined strictly numerical in RCCD, unlike the description of state as in Taguchi method.

REFERENCES:

- [1] D. Bajić, B. Lela, D. Živković: Modeling of machined surface roughness and optimization of cutting parameters in face milling, Metallurgy 47(2008) 4, 331-334,
- [2] B. Lela, D. Bajić, S. Jozić: Regression analysis, support vector machines and Bayesian neural network approaches to modeling surface roughness in face milling International Journal of Advanced Manufact. Technology, Vol. 42, No. 11-12, 2009., pp. 1082-1088,
- [3] D. Bajić, S. Jozić, S. Podrug: Design of experiment's application in the optimization of milling process, Metallurgy 49(2010), 2, 123-126,
- [4] J. Z. Zhang, J. C. Chen, J. D. Kirby: Surface roughness optimization in an end-milling operation using Taguchi design method, Journal of Material Processing Technology, 184(2007), 233-239,
- [5] K. Yang, B. El-Haik: Design for six sigma: A roadmap to product development, The McGraw-Hill Companies, New York, 2003., 437-469.

MODERN ENGINEERING MATERIALS FOR DESIGN OF SUSTAINABLE PRODUCTS

Jaroslav Jerz

Institute of Materials & Machine Mechanics, Slovak Academy of Sciences
Racianska 75, 83102 Bratislava 3, Slovakia (ummsjerz@savba.sk)

ABSTRACT

The subject of materials is very broad in modern times, drawing together understanding from physics, chemistry, mathematics, computer science, etc. The applying of various materials in industry bridges at present these “pure” scientific disciplines and the materials science is therefore becoming more or less an applied science. However, the real decisions on proper choice of engineering material and appropriate manufacturing process have much broader objectives, e.g. to minimize not only cost, but also energy consumption or CO₂ footprint per unit of function, etc. The next generation of engineers will need the ability to use conventional as well as advanced materials in ways that meet more demanding technical, environmental, economic and aesthetic requirements than ever before. In particular, the requirements for “eco-design” are today increasingly significant area in which only an integrated materials strategy provides benefits [1]. The main factors influencing sustainability of products and manufacturing processes have been presented in this contribution. The paper presents the approach how to achieve extremely high added value of products by applying of advanced engineering materials. Finally, several case studies of successful cooperation between research institute and their industrial partners by innovation of products using effective knowledge transfer are outlined.

Key words: engineering materials, advanced technologies, knowledge transfer, aluminium foam, light-weight design

INTRODUCTION

Designing and manufacturing of sustainable products is a most important challenge to the industry of the nearest future. It involves therefore highly complex, interdisciplinary approaches and solutions. **Fig. 1** shows the exponential increase in shareholder value when the innovation-based sustainability concepts are implemented against the traditional cost-cutting, substitution-based growth [2].

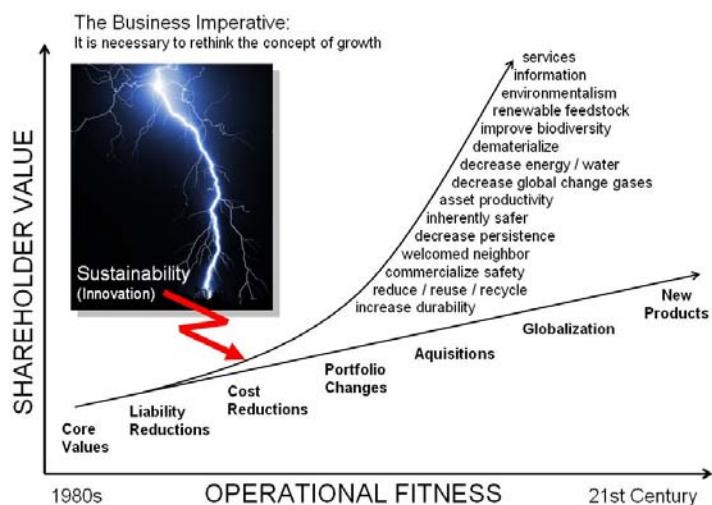


Fig. 1. The exponential shareholding growth of innovation-based sustainability (adapted from [2]).

Engineers must keep on thinking beyond their traditional considerations of functionality, cost, performance and time-to-market also in terms of minimizing energy, consumption, waste-free manufacturing processes, reduced material utilization and resource recovery following the end of product use. For this purpose, of course, are both the involvement of stakeholders and the development of innovative technologies, tools and methods unavoidable.

ASSESSING OF PRODUCT SUSTAINABILITY

Because of various societal and ethical aspects there is no universally acceptable measurement method for quantifying and assessing of product sustainability as yet. The most appropriate multidisciplinary approach for formulating the product sustainability level was developed at the University of Kentucky in Lexington within the Collaborative Research Institute for Sustainable Products (CRISP) [2]. This includes science based so-called “Product Sustainability Index” (PSI) which represents the level of sustainability built in a product by taking into account of the following six major contributing factors:

- product's environmental impact (life-cycle factor – including useful life span; environmental effect – toxicity, emissions, etc.; ecological balance and efficiency; regional and global impact – CO₂ emissions, ozone depletion, etc.),
- product's societal impact (operational safety; health and wellness effects; ethical responsibility; social impact – quality of life, peace of mind, etc.),
- product's functionality (service life – durability; modularity; easy of use; maintainability and serviceability – including unitized manufacture and assembly effects; upgradability, ergonomics, reliability, functional effectiveness, etc.),

- product's resource utilization and economy (energy efficiency and power consumption; use of renewable source of energy; material utilization; market value; instalation and training cost; operation cost – labour cost, capital cost, etc.),
- product's manufacturability (manufacturing methods, assembly, packaging, transportation, storage, etc.),
- product's recyclability and remanufacturability (dismountability, disposability, reusability, etc.).

For each major factor a single rating can be used on a percentage basis on a 0-10 scale, with 10 being the best. Each product will be required to comply with appropriate ratings for all groups. The standards are used for establishing of “acceptable” level of rating for each group. The composite rating represents the overall product sustainability (PSI).

The sustainable products are fully compatible with nature throughout their entire life cycle. The recycling, reuse and remanufacturing effort has in recent times emerged with innovative and viable engineering materials, advanced manufacturing processes and systems to provide multiple life-cycle products. The increasingly important consideration is given to eco-efficiency and the environmental concerns often associated with minimum toxic emissions into the air, soil and water, production of minimum amount of useless waste and minimum energy consumption at all levels.

SUSTAINABLE MANUFACTURING PROCESS

Manufacturing processes differ very widely depending on the product being manufactured, the method of manufacture and their key characteristics. The processing cost largely depends on the method used to produce the component and selected material. In order to minimize the manufacturing cost, the industrial organizations are struggling to maintain the product quality, operator and machine safety and power consumption. The following six main influencing factors can be regarded as significant to make a manufacturing process sustainable:

- energy consumption,
- manufacturing costs,
- environmental impact,
- operational safety,
- personnel health,
- waste management.

However, it is clear that due to technological and cost implications all these factors cannot simultaneously achieve their best levels (e.g. energy consumption and environmental impact – minimum; others – maximum). The strong interactions among these factors often require trade-off and only an optimized solution would be practical.

Energy consumption

Savings of energy during manufacturing process is one of the most needed sustainability factor. The power consumption level can be observed and evaluated against the theoretical values to calculate the efficiency of the power usage during manufacturing process. Though the focus on energy efficiency has increased significantly in recent years, the industrial manufacturers have been making major strides for decades. The potential for savings of energy consumption is huge and that is why companies around the globe are highlighting their efforts to improve energy efficiency. The significant reduction in energy intensity, measured by the quantity of energy required per unit of product cost (so that using less energy to produce a product reduces the intensity), has been achieved during last years. If the renewable energy sources are available in abundance and are used in industry

widely, the source of energy can significantly help to achieve extremely good sustainability of the manufacturing process.

Manufacturing costs

Manufacturing costs are the cumulative total of resources that are directly used in the process of making goods and products, including the expenses associated with the purchase of raw materials as well as human labour, equipment operation and the general overhead for maintaining the production facility, etc. These costs involve a range of expenditures starting from the process planning activities until the product is dispatched to the next workstation, including the both the idling and queuing time. The criterion for selecting appropriate processing would generally facilitate the cost-effective technological operation. The choice of processing parameters and the cost of tooling are, of course, further important factors affecting final manufacturing cost.

Environmental impact

The International Association for Impact Assessment (IAIA) defines an environmental impact assessment as the process of identifying, predicting, evaluating and mitigating the biophysical, social, and other relevant effects of development proposals prior to major decisions being taken and commitments made [3]. This is a formal process to predict the environmental consequences of human development activities and to plan appropriate measures to eliminate or reduce adverse effects and to augment positive effects.

The ISO 14000 series of standards can be used to help enterprises meet and improve their environmental management system needs. The motivation may come from the need to better manage compliance with environmental regulations, from the search for process efficiencies, from requirements of customers, from environmental campaign group pressures, or simply from the desire to be good corporate citizens.

Operational safety

Operational safety is the collection of safety services that supports operational managers achieve and maintain the high levels of safety and mechanical integrity required by regulation and by their own safety and risk processes. Several recent major industrial accidents demonstrate that industry successes in improving occupational safety have not been mirrored in major accident performance. Most of these accidents did not result primarily from deficient design, rather it was inadequate operational safety not sufficiently addressing specific threats inherent in the operation. Both the ergonomic design of the human interface with the work environment and the proper implementation of regulatory safety requirements are considered in assessing the personnel safety factor.

Personnel health

Assessment of the personnel health element contributing to the technological process sustainability is based on the compliance with the regulatory requirements, imposed on industries by governmental and regulatory enforcement units (such as The National Institute for Occupational Safety and Health – NIOSH [4]) on emissions and waste from technological operations and their impact on directly exposed labour.

Many workplace fatalities and injuries are caused by poor design of equipment and processes, yet design standards for occupational safety and health are few. It is extremely important to eliminate hazards from the workplace that result from design flaws. The prevention against health hazards through desirable design helps engineers, architects, employers and owners to recognize design issues that affect worker safety and to

incorporate safe design, equipment and work practices early in the design process.

Waste management

Recycling and the disposal of all types of manufacturing wastes are accounted for in this factor influencing sustainability of manufacturing process. The efforts to find means reduce or eliminate wastes are continuing and increasingly urgent. Zero waste generation with no emissions into the environment is the ideal condition to be expected for industrial products and processes, although it is technologically in many cases very difficult achievable as yet.

While the concept of product sustainability continues to grow and become more compelling, the assessment of product sustainability has become difficult and challenging. Using the product sustainability principles comprehensively, all manufactured products can be designed, manufactured, assembled, used, serviced/maintained/upgraded and at the end of its life-cycle, these products can also be effectively disassembled, recycled or reused. This multi-life-cycle approach and associated need for product sustainability principles bring out an enormous technological challenge for the future. A cursory look at what would be required shows a long list of things to be performed, e.g.:

- Known theories will be utilized while new theories emerge for sustainable product design.
- Effective manufacturing processes with enhanced sustainability application will be developed and implemented.
- Sustainable manufacturing systems will be developed to provide the overall infrastructure for sustainable product manufacture.

CASE STUDIES OF SUCCESSFUL INDUSTRIAL PRODUCT INNOVATIONS

Recent trends in development of sustainable products and processes indicate the need for using of new science-based approaches for achievement of appropriate values of main factors influencing this sustainability. Institute of Materials & Machine Mechanics of Slovak Academy of Sciences (IMMM SAS) has been long time successfully applied newly developed engineering materials and advanced technologies in industrial practice due to the fact that the development of innovative products is systematically focused preferably on those with great potential to achieve particularly high added value thanks to effectively utilized know-how. These innovative products and their manufacturers are therefore predicted to obtain a good competitiveness which will in the nearest future ensure sustainable development of their entrepreneurial activities in specific industrial fields.

The following applications of materials developed at the IMMM SAS can be regarded as the significant examples of highly sustainable products and manufacturing processes:

Aluminium foam crash absorber for railway carriages

Aluminium foam is a part of crash absorbing box used for enhancement of passive safety in railway carriages (**fig. 2**). The crash box is placed behind conventional spring-based damping element and chassis of carriage, whereas there are 4 such boxes for one carriage, two for each front side. The main objective to use aluminum foam part is to reduce high crash forces in case the absorbing capability of conventional damping elements is exhausted. In such excessive crash between adjacent carriages aluminium foam crushes as the last part of all energy absorbing components in the assembly. It is expected from the crash box to protect chassis of 22 ton heavy carriage in a case of frontal crash at the velocity of 8 km/h. The kinetic energy must be dissipated within about 30 mm deformation length.

These expectations set quite challenging requirements for aluminium foam part, i.e. very high yield stress in compression (above 17 MPa) at rather higher porosity (above 75%). To meet these requirements special 3D shape aluminium foam component was designed comprising natural “foam skin” and cell walls made from heat treatable aluminium alloy and preferred orientation of pores in the compression direction. Compared to conventional deformation elements as i.e. hollow profiles or honeycomb structures, it was possible to reduce the deformation length needed for required energy absorption by almost 50%.

The supplier of assembled crash absorber is the German company Gleich GmbH, Kaltenkirchen. Aluminium foam component with the weight 1250 g are manufactured and supplied under subcontract by IMMM SAS (current volume 500 pieces per year). There are two world wide leading manufacturers of railway carriages as end users of this innovative crash absorber.



Fig. 2. Assembled crash box of railway carriage containing Al foam (left) and Al foam component (right).

Al-foam component for automotive application produced in high volume series

Crash absorbers in automotive sector protect passengers from the effect of sudden impact. This is achieved by converting the impact energy into plastic deformation of absorber, keeping the peak force acting on the protected object below the level which could cause damage. The material of impact energy absorber must also provide a long deformation path to sufficiently reduce rest of the kinetic energy affecting the protected object.



Fig. 3. Aluminum foam crash energy absorber mounted into the dividing net of Audi Q7 developed by IMMM SAS.

IMMM SAS has developed in cooperation with Austrian company Alulight International GmbH, Ranshofen crash energy absorber (**fig. 3**) which is produced fully automated in high volume series (200.000 pieces per year) since August 2005 and mounted into the cars Audi Q7. This crash energy absorbing component is part of the upper segment safety net build in to separate the trunk from the passenger area. In case of sudden rear impact net has to protect the passengers against serious injuries caused by catapulted luggage items. One part of the impact energy gets absorbed by the net itself, the other part has to be transformed in the anchorages of the net to avoid them from breaking. Large energy is absorbed by the net in the case that a plateau stress stays constant for a long deformation path. This characteristic gets fully achieved by abovementioned aluminium foam crash energy absorber (true values of stress – strain during static compression test are plotted in **fig. 4**). The German company Reum GmbH & Co. Betriebs KG, Harheim decided in favour of this absorber for the new design of their dividing net protected by utility model [5]. The tube-shaped absorber made of aluminium foam mounted in the upper profile channel of the net gets strained by pressure via a pin during impact and the kinetic energy of approximately 100 kJ is transformed by deformation of absorber. The commercialisation of this crash absorbing system is carried out by the German company BOS GmbH & Co. KG, Ostfildern [6].

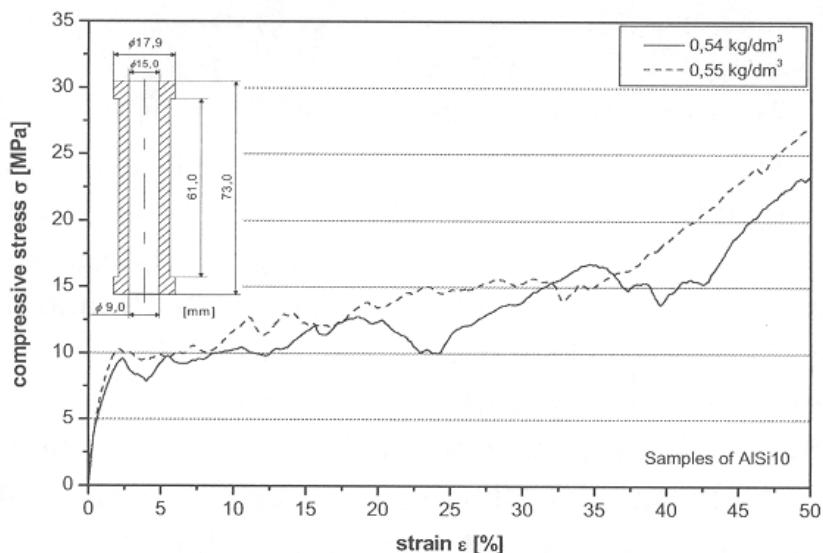


Fig. 4. Stress-strain characteristics of aluminium foam crash absorbers [6].

Cooling and heating panels using aluminium foams

Cooling/heating floor or ceiling panel developed recently by IMMM SAS which utilize aluminium foam as heat spreader has also the great potential for industrial applications (**fig. 5**). The Institute has developed and owns European patent for invention of their production (granted in 2007) [7]. The basis of innovative approach to the new design of cooling/heating panels is aluminium foam panel with integrated copper tubes for distribution of cooling/heating medium. Aluminium foam in floor and ceiling panels in the combination with thin layer of plaster is the unique technical solution utilized firstly in industrial praxis. Uniformity of the temperature distribution in the panel, enhancement of its radiating emissivity and considerable reduction of reaction time after the temperature changes are the main advantages that can not be achieved by any other technical solution as yet.

This kind of innovative cooling possesses very low operating costs. Energy

consumption is very low as well as it is almost maintenance-free and the natural water sources can also be utilized as source of cooling medium. Using these systems the air inlet volume can be reduced to a minimum, just up to a necessary fresh air volume and for sufficient thermal comfort (because of radiant heat exchange) is already 26°C enough. Beside the all benefits, a drawback of cooled ceilings is only their limited cooling power, because they operate with low temperature difference. This difference can not be wider because of danger of dewing (dew point is about 14°C; the cooling water circulating in panels must be above the dew point). On this account, rooms with cooled ceilings may be equipped with additional fan air-conditioning in order to ensure cooling ability also during the temporary extreme conditions.

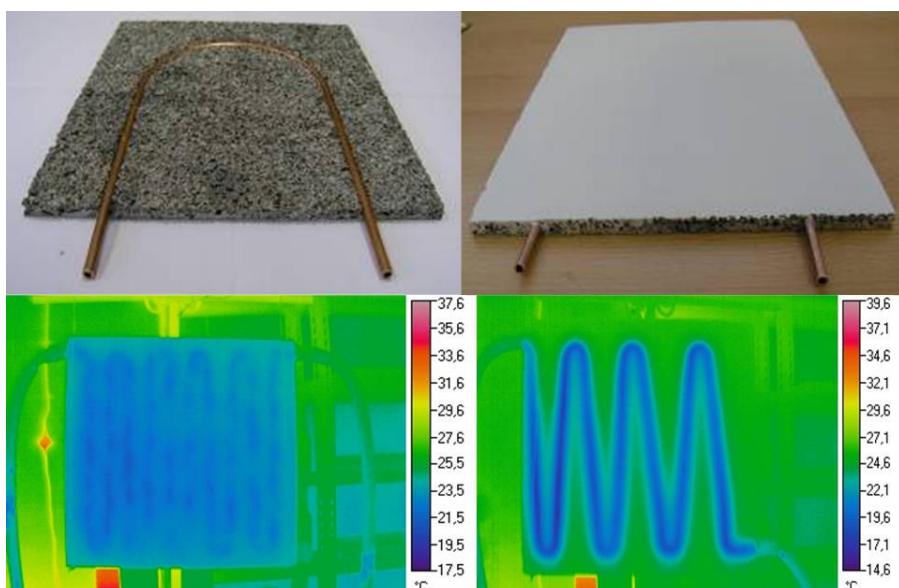
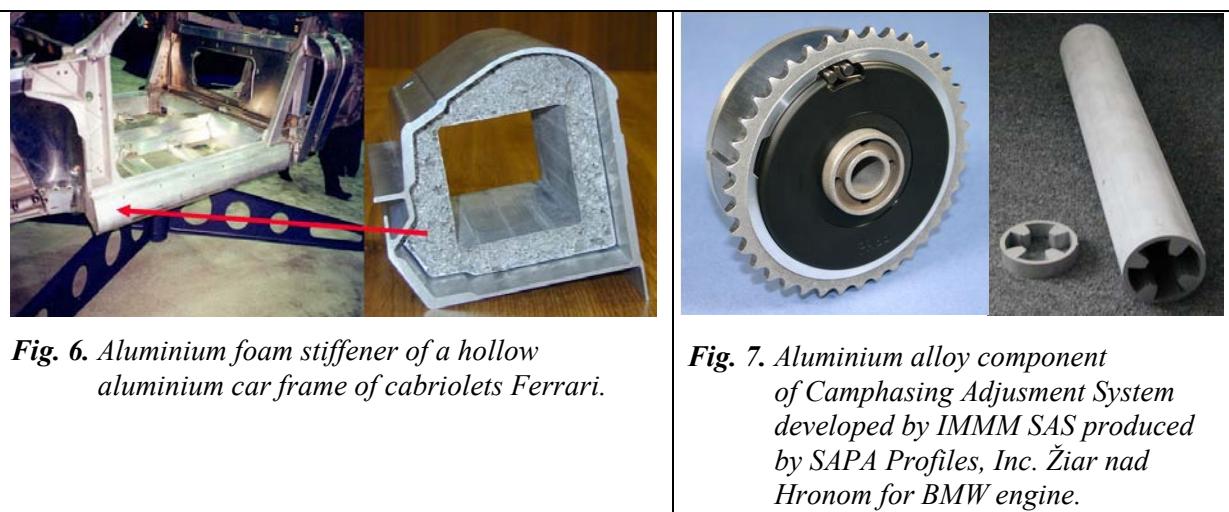


Fig. 5. Cooling/heating floor and ceiling panels developed by IMMM SAS utilizing aluminium foam as very effective heat spreader. The lower figures shows the comparison of the temperature distribution in innovative cooling panels made of aluminium foam (left) and standard plasterboard panel with integrated tube for distributing cooling medium (right).



There are many further examples of successful cooperation with cooperating industrial partners besides case studies described thereinbefore. Extremely profitable industrial innovations are e.g. aluminium foam stiffener of a hollow aluminium profile mounted in the frame of cabriolets Ferrari produced in the series of 40.000 pieces per year (**fig. 6**), stator ring for adjusting the position of camshaft in automobile engines produced

for BMW by company Sapa Profiles Inc. Žiar nad Hronom using novel powder-metallurgically prepared aluminium alloy (**fig. 7**), sliding electrical contacts for trolleybuses and railway locomotives made of graphite infiltrated with copper developed in collaboration with Slovak company Elektrokarbon Inc. Topoľčany, ceramic/lead composite plates prepared by the melt infiltration process for the new type of bipolar batteries based on lead-infiltrated-ceramic plates developed for Swedish company EFF – Power, Hisings Backa, etc.

CONCLUSIONS

The new innovative engineering materials and advanced technologies developed by IMMM SAS have been long time successfully applied in various industrial fields. Development of innovative products is systematically focused preferably on those with great potential to achieve particularly high added value thanks to effectively utilized know-how. Achieving global sustainability is a major challenge for the nearest future and that is why international cooperative research, development and technology transfer (R&D&TT) of modern engineering materials into the industrial praxis is unavoidable.

ACKNOWLEDGEMENT

The article was elaborated within the project “Establishment of a cross-border platform for technology transfer aimed at the application of advanced engineering materials in the region of Vienna – Bratislava” co-financed by European Regional Development Fund under the programme of Slovak-Austrian cross-border cooperation 2007-2013.

REFERENCES

- [1] J. Jerz (2009). Research, Development and Technology Transfer (R & D & TT) in the Field of Engineering Materials and Related Technologies, Advances in Technology, Education and Development, Wim Kouwenhoven (Ed.), ISBN: 978-953-307-011-7, INTECH, Available from: <http://sciyo.com/articles/show/title/research-development-and-technology-transfer-r-amp-d-amp-tt-in-the-field-of-engineering-materials-an>
- [2] I. S. Jawahir, P. C. Wanigaranthne, X. Wang (2006). Product Design and Manufacturing Processes for Sustainability, Mechanical engineer's handbook, Myer Kutz (Ed.), ISBN-13 978-0-471-44990-4, Lohn Wiley & Sons, Inc.
- [3] <http://www.iaia.org/>
- [4] <http://www.dnv.com/>
- [5] Gebrauchmusterschrift DE202005007544 – Trennvorrichtung für einen Innenraum eines Kraftfahrzeugs
- [6] P. Schäffler, G. Hanko, H. Mitterer, P. Zach (2007). Alulight Metal Foam Products. In MetFoam 2007, Montreal, September 5-7, 2007. Montreal, p. 7 – 10.
- [7] EP1611262 – F. Simančík, J. Jerz: Method for strengthening a component consisting of a deformable cellular material, said component and the use thereof.
- [8] R. Florek, F. Simančík, M. Nosko, P. Tobolka, R. Uhrík (2007). Heating and cooling panels using aluminium foam. In MATRIB'07, Vela Luka, 21-23 June 2007. Editor: Krešimir Grilec. Zagreb: CSMT. ISBN 978-953-7040-12-3. p. 430-437. (CD)

FORGED COMPONENTS AND POSSIBILITIES OF THEIR INVESTIGATION BY NEUTRON TECHNIQUES

Massimo Rogante¹, László Rosta²

¹Rogante Engineering Office, Contrada San Michele n. 61, 62012 Civitanova Marche, Italy

²Research Institute for Solid State Physics and Optics, POB.49, Budapest, Hungary, H-1525

Abstract

Forging process can lead to material's micro- and nano-structure evolution, as well as a production of internal residual stresses (RS). Typical fine-grained microstructures are achieved after forging at different temperatures, which are usually investigated and interpreted via conventional tests and analyses including optical, scanning and transmission electron microscopy. The outputs from these methods can present an important lack of data, regarding basic parameters that aid comprehend and eventually predict degradation, possible fracture and lifetime. These parameters are determinable on real samples and can be supplied by neutron-based non-destructive diagnostic methods, in particular small angle neutron scattering (SANS) for micro- and nano-scale characterisation and neutron diffraction (ND) to assess internal RS.

In this paper, some examples related to forged components - in particular, made of AlSi12CuNiMg alloy - are reported, concerning investigations by neutron techniques. The result can be translated directly into optimization of performances, reliability, design of operating conditions and procedures, supporting to achieve a better quality of forged products.

Keywords: Forging; Nanostructure; Residual stresses; Cracks; Industrial Applications of Neutron Techniques.

1. Introduction

Mechanical forging allows obtaining high quality products by means of cold, warm or hot plastic deformations caused from collisions and pressures originated by forging machines (e.g., open-die, hydraulic radial and mechanical forging presses). The deformations happen freely between flat or very simple shape plates (free forging), or in closed matrixes (fixed forging or pressing). The free forging is carried out on small and large pieces with simple shape, while the pressing concerns relatively small pieces with complex shape. Temperature is below 3/10ths of the material's recrystallisation temperature (MRT) in cold, above 3/10ths of MRT in warm and above MRT in hot forging. In the pressing process, the material is deformed, until the required shape, between a mould and a dolly that are approached suddenly by a hammer or gradually by means of a press, allowing the production of components with very tight dimensional tolerances. The main feature of the forged pieces consists in their fibrous structure - visible often to nude eye - corresponding to the orientation of the crystal grains and the fragmented phases. This structure gives to the product excellent mechanical properties along certain directions, with high relation mechanical resistance vs. weight, high tenacity, impact and fatigue resistance. The major fields of applications are automotive and truck, aerospace, agricultural machinery, railroad, valves, defence and energy Industry. A schematic representation of the main forging processes is reported in Tab. 1.

Tab. 1. Main forging processes

Free deformation without mould	by flat plates	
	by formed punches	
Deformation on mould (pressing - relatively small pieces with more complex shape)	by closed matrixes	with formation of burr
	with open matrixes	without formation of burr (coining) extrusion

The variables associated to the elements characterizing the machining system of mechanical forging are correlated reciprocally and the interactions between the more significant variables are reported in Fig. 1.

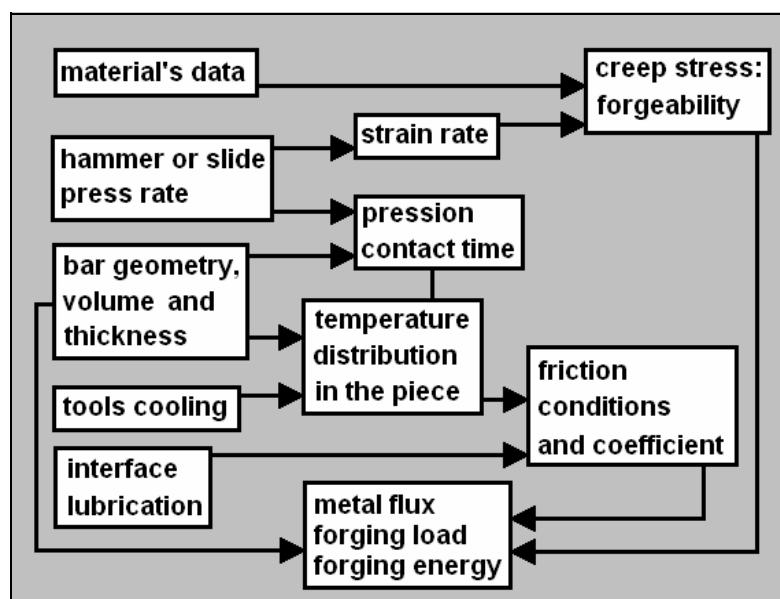


Fig. 1. Interactions between the key variables associated to the elements characterizing the machining system of mechanical forging.

Forgings classically exhibit major grain flow arising from the forced flow of material during mechanical working. The grain results continuous throughout the piece, whose strength characteristics are improved. Additionally, the restoration mechanisms together with dynamic recovery and recrystallisation can lead to crystallographic texture and anisotropy of mechanical properties, which consecutively could origin an orientation dependence of RS. In press forging, e.g., as the part cools it becomes stronger and less ductile, with consequent risk of cracking induction if deformation continues [1]. Stresses, strains, micro- and nano-structure play a key rule in the forging process. Machine working rate, moreover, can influence deformation rate and creep stress and, together with the tools temperature and the piece geometry, it determines the metal flow, the process energy and the forging load.

A list of materials correlated with an increasing degree of forgeability is reported in Tab. 2. The thermal parameters affecting the forging are: temperature, heating procedure, homogeneousness of the heating process in the mass of the material under deformation and permanence time, which, associated with the temperature level influences significantly the grain dimensions. Superalloys are hardly forgeable, while cast irons are not forgeable, since they are not deformable.

High temperature stability and deformation behaviour of nickel-base superalloys, in particular, depend strongly on microstructural changes caused by complex operating thermo mechanical conditions [2-3]; precipitates behaviour, moreover, depends on temperature and duration of heat treatments [4].

Tab. 2. Metallic materials' classification according to the forging temperature ranges	
Metal or alloy	Machining Temperature range, °C
Al alloys	400-500
Mg alloys	250-350
Cu alloys	600-900
C and low alloy steels	850-1150
Martensitic inox steels	1100-1250
Maraging steels	1100-1250
Austenitic inox steels	1100-1250
Ni alloys	1100-1150
PH Semi-austenitic inox steels	1100-1250
Ti alloys	700-950
Fe-base superalloys	1050-1180
Co-base superalloys	1180-1250
Nb alloys	950-1150
Ta alloys	1050-1350
Mo alloys	1150-1350
Ni-base superalloys	1050-1200
W alloys	1200-1300

Carbon steels are enough well forgeable, whereas the stainless steel is forged only in particular cases. In the greater part of moulding processes, the piece temperature is higher than that of the tools, so the metal flow and the mould filling up are influenced by the following parameters: creep stress, forgeability of the piece and complexity of its final geometry, effects of the cooling aside of the moulds at the matrix/mould interface and consequent changed wear conditions. Forgeability and grain dimensions increase with temperature; in some materials, temperature decreases by the enhance of the grain dimension, moreover it is influenced by the presence of second phases and the process

related stress state. The resistance to deformation increases remarkably if temperature decreases under the minimum, while a risk exists that the material sticks to the mould if the temperature rises above the maximum: in this case, the pieces are rejected and the mould should be restored, with consequent economical damage. Tensile stresses and cracks may occur, in the case of large deformations, in correspondence of the part where barrelling happens. To hinder these problems, hydrostatic pressures are usually created to enhance material's forgeability. Austenitizing, followed by hardening and tempering, e.g., is a heat treatment generally carried out on carbon- and alloy-steel forgings. Forged components, nevertheless, can present a RS state and a micro- and nano-structure configuration, leading to prejudices for their performances. A proper investigation of the forged pieces, thus, is essential for their improvement, and a particular advantage can be achieved by using neutron techniques.

2. Methods

The classical investigation methods allow obtaining information, which suffer a fundamental lack of data essential to understand and ultimately forecast ageing, duration and potential failures. These data are well assessable by neutron techniques, in particular SANS for micro- and nano-scale characterisation and ND for internal RS determination. Neutron investigations have lately become an increasingly major probe for materials across a wide range of disciplines and they can reveal significant properties of industrial materials. Neutron techniques, due to their peculiarities, are capable to provide full information down to $\sim\text{\AA}$ (0.1nm) dimensions regarding the micro- and nano-physical structure, investigating from within $\sim 50\mu\text{m}$ of the surface to a depth of centimetre or still tens of centimetres with a spatial resolution of millimetres. For instance, while X-ray diffraction allows assessing extreme surface RS just to a depth of few hundred Ångström units and only in distinct positions and layer removal methods are unadvisable as they induce additional RS, ND allows determining precisely RS from the surface to depth.

The residual strain assessment by ND is carried out by measurements of angular deviation of the Bragg peak position from its value related to the stress-free state and then, when knowing the diffraction elastic Young modulus and Poisson ratio of the considered material, RS can be determined. ND, thanks to its weak interaction with matter, has an elevated test penetration depth and more non-destructive property than other techniques; therefore it is very suitable to measure the global texture of forged components. The theoretical bases of this technique are described in [5-8]. SANS allows a true and full characterization of materials on the nano-scale: averaging over a macroscopic sample volume, it supplies information with high statistical accuracy. The theoretical bases of this technique are described in [5, 8-14].

Models based on the neutron investigation of real samples/components and combined with finite element analysis (FEA), can be developed in terms of dynamic recrystallisation and grain growth phenomena in order to predict material's micro- and nano-structure evolution during forging and also other thermo-mechanical processes. RS, as well as the grain orientation, could be measured by ND, e.g., as a function of time in different regions of the forged component. ND, finally, can facilitate to study the texture evolution during phase transformations in forged materials: the combination of numerical and experimental results is useful to predict the formation of huge crystallographic entities subsequent to forging. The achievable results could aid the quality optimization of forged products, especially in relation with their performances and reliability.

3. Experimental, results and discussions

SANS measurements have been carried out by Rogante Engineering Office at the Budapest Research Reactor, to analyse the microstructure evolution in new and exercised AlSi12CuNiMg alloy components, whose hot die forging was carried out in the temperature range 360-500°C. The working temperature of these parts, in some cases and with relation to certain locations, can go beyond the ageing temperature. Various mechanical characteristics of this alloy, in addition, are highly sensitive to thermal treatments. The same material, among monolithic alloys, exhibits better resistance to thermal cracking than Al25Si and Al-20SiNi alloys [14]. The alteration of mechanical properties due to ageing can be compared with the precipitates size distribution alterations. The characteristic changes of precipitates, in fact, are able to provide practical information, particularly if compared with the results of conventional tests and analyses, for instance micrographs and residual hardness measurements. Micrographs of the considered material have shown an intense growth of precipitates on the grains borders (or regions of dislocations grouping): the arrangement of precipitates, therefore, reflects the grain surfaces geometry (see Fig. 2).

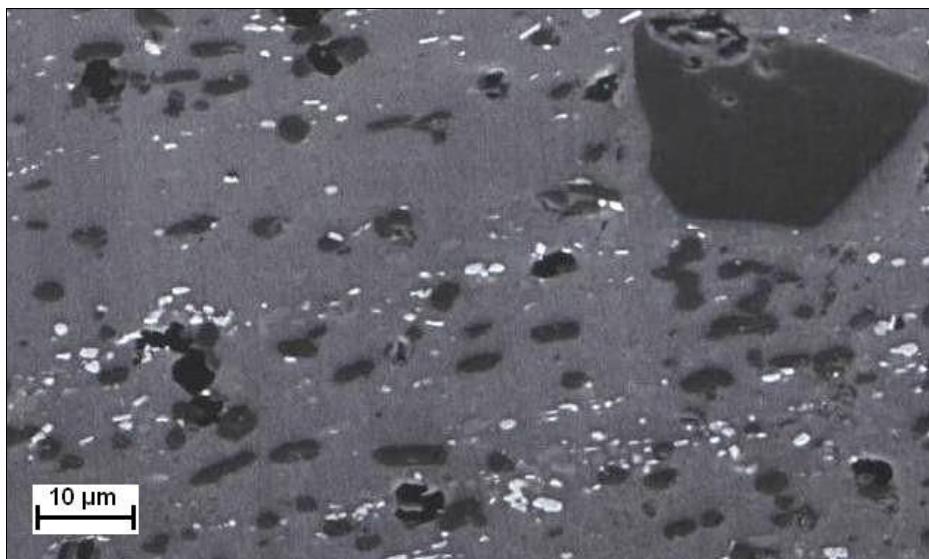


Fig. 2. Transmission electron micrograph of AlSi12CuNiMg alloy.

A coalescence of the hardener elements may happen, in these components, with a mixed hardening mechanism and a precipitation of CuMgAl₂, Mg₂Al₃CuAl₂ and CuAl₂. The last carbide is often a major responsible of the hardening due to precipitation and it is able to improve mechanical proprieties. Comparative SANS analyses of shape and size of these precipitates after different operative periods are helpful to evaluate the ageing process as well as to find the areas of highest thermal alteration. Fig. 3 shows SANS patterns obtained for the new and exercised components.

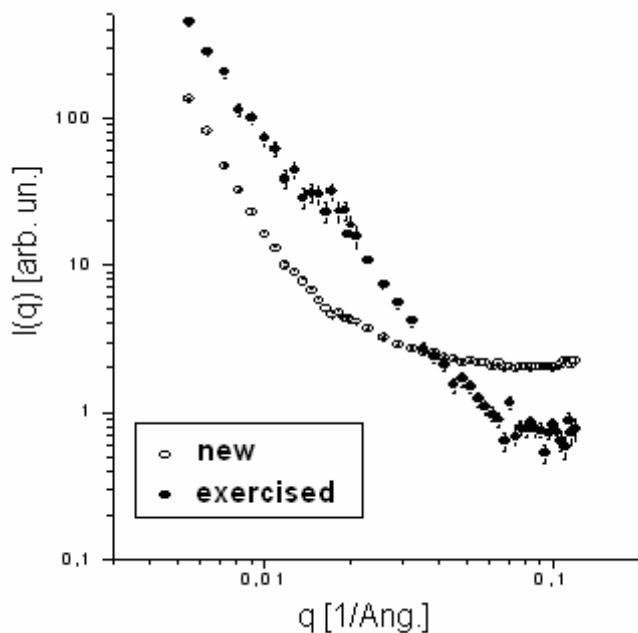


Fig. 3. SANS patterns from new and aged AlSi2CuNiMg components.

The data have been achieved in the momentum transfer range $q = (4\pi/\lambda)\sin(\theta/2) = 0.005 - 0.12 \text{ \AA}^{-1}$, corresponding to the spatial scale $R \sim 1/q = 8-200 \text{ \AA}$. An increase of the scattering intensity I at small $q \sim 0.005-0.02 \text{ \AA}^{-1}$ has been observed for the exercised component, indicating a defects' growth at the scale $\sim 100 \text{ \AA}$. A weaker scattering has been observed at larger momentum transfer values $q \sim 0.1 \text{ \AA}^{-1}$, indicating the disappearance of small defects such as vacancies annealing, as a result of a thermal effect on the material during the component operation. The search of defects (in particular, precipitates) in the momentum transfer range $q=0.005-0.12 \text{ \AA}^{-1}$ can be considered essential to diagnose early stages of material's ageing. The gain in the scattering intensity at small angles, in the considered case, is clearly visible in the behaviour of the ratio $R(q) = I_{EXERCISED}/I_{NEW}$ (Fig. 4).

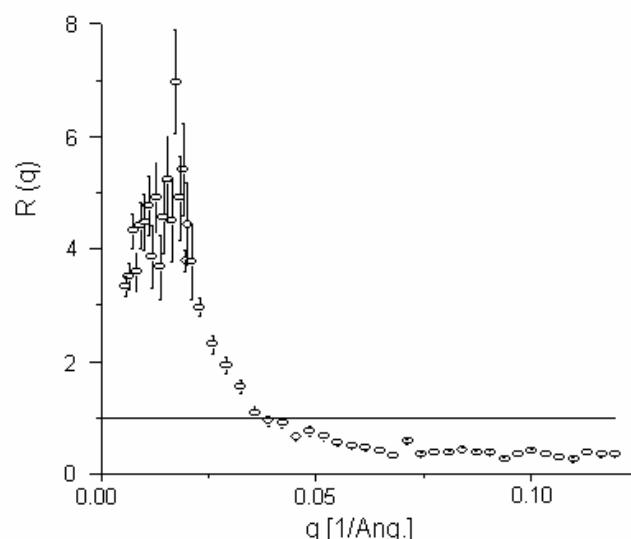


Fig. 4. Behaviour of the ratio $R(q) = I_{EXERCISED}/I_{NEW}$.

The intensity for the exercised component is enhanced by a factor 3 to 4 ($q \sim 0.01 \text{ \AA}^{-1}$). Some substantial structural changes have been observed even at small scales $\sim 10\text{\AA}$, apart from an intense growth of nano-scale defects ($\geq 100\text{\AA}$, Figs. 3 and 4). Another representation, the Porod plot (Fig. 5) helps the understanding in detail of these material structure transformations, showing a crucial difference between the structures of new and exercised components.

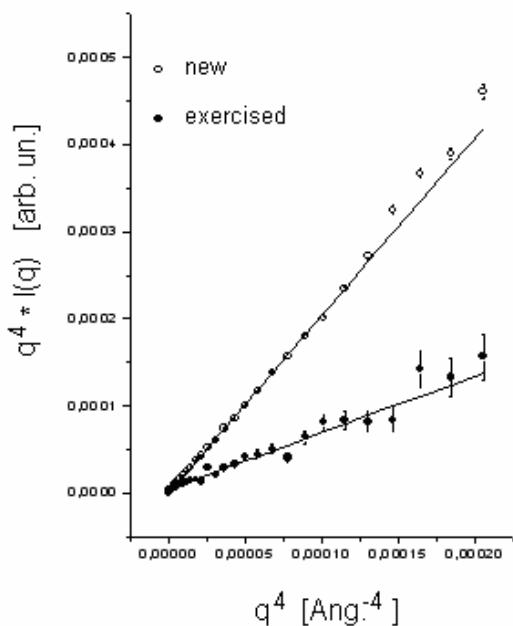


Fig.5. Porod approximation.

The intensity data $I \cdot q^4$ for both new and used materials obey the linear function $I \cdot q^4 = A + Bq^4$ in the range of $q^4 = (2-12)10^{-5} \text{ \AA}^{-4}$. The fitting parameters for the Porod approximation are listed in Tab. 3.

Tab. 3. Porod approximation parameters for AlSi2CuNiMg components

component	A·10 ⁶ , arb. un.	B, arb. un.
new	0.64 ± 0.60	2.04 ± 0.02
exercised	4.44 ± 1.16	0.65 ± 0.04

The first parameter $A \propto 2\pi(\Delta K)^2 \cdot S_T$ is proportional to the total area of particles (e.g. for spheres $S_T = 4\pi R_p^2 N_p$, where R_p is the radius and N_p is the number of particles in the sample). The second parameter $B \propto d\sigma_{inc}/d\Omega \approx B_{Al}^2 \cdot N_{Al}$ is the measure of incoherent scattering mostly reflecting nuclei concentrations and scattering lengths. A strong increase of defects' surface (factor ~ 7) and a simultaneous decrease of incoherent background indicate an intense formation of internal surface via integration of small defects (disappeared). The differential signal $I_{EXERCISED} - I_{NEW}$ has been obtained using the parameters of Tab. 3 and having subtracted the incoherent background (see Fig. 6).

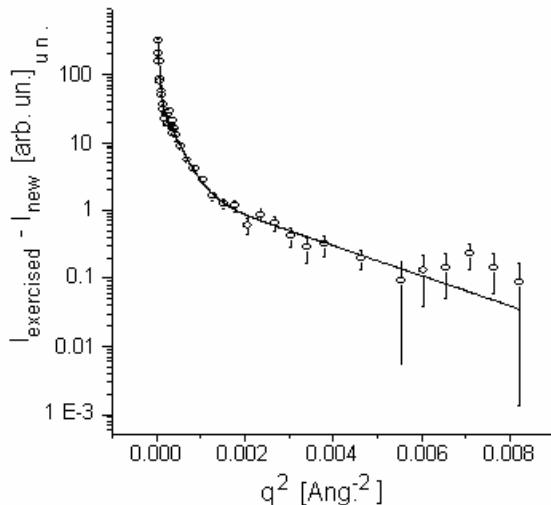


Fig. 6. Guinier approximation.

The pattern in Fig. 6 shows an intense growth of defects as a thermal treatment result due to the exercise of the investigated component. The difference $I_D = I_{\text{EXERCISED}} - I_{\text{NEW}}$ really represents the nano-scale precipitates grown in the material. This differential intensity demonstrates primarily the contribution of the defects $\sim 100 \text{ \AA}$. The same plot shows the particles as themselves and their clusters as revealed at small angles. The intensity distribution is reasonably described by a three component Guinier function (see Tab. 4).

Tab. 4. Parameters of three component Guinier approximation

I_{o1} , arb.un	R_{G1} , \AA	I_{o2} , arb.un	R_{G2} , \AA	I_{o3} , arb.un	R_{G3} , \AA
2.3 ± 0.5	39.0 ± 3.0	49.1 ± 5.1	104.5 ± 4.0	829 ± 149	343 ± 18

In the diagram of Fig. 7, finally, the magnitudes $I_{oi}/R_{Gi}^3 \propto \varphi = N_i \cdot V_i$ are plotted, which are proportional to the component's volume fractions.

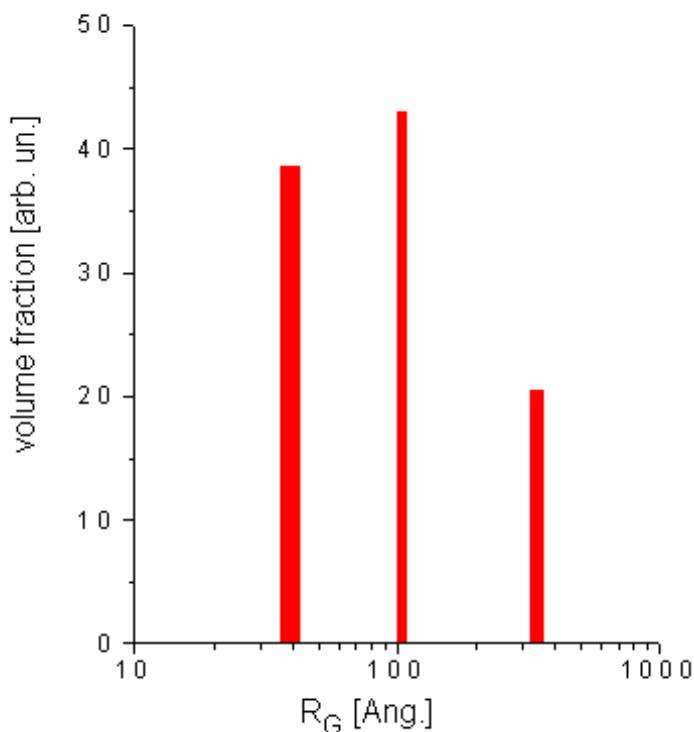


Fig.7. Volume fractions of small ($R_G \sim 40\text{\AA}$), middle ($R_G \sim 100\text{\AA}$) and large defects ($R_G \sim 200\text{-}400\text{\AA}$) grown.

Various other examples related to neutron investigation of forged components are reported in [4, 15]. A NiCrMoV forged wheel of an axial compressor for a heavy duty gas turbine was considered for RS determination by ND and for a SANS nanostructure investigation in correspondence of specific positions individualized from a previous FEA, to perform comparative studies of the expected changes of the precipitate distribution with the results of the RS investigation. ND, in particular, allowed measuring radial and hoop RS (see Fig. 8), revealing that the fatigue of the wheel is also a lifetime limiting factor [16]. SANS investigation, on the other hand, showed that the material possesses an isotropic nanostructure composed of tiny domains (precipitates, diameter $\sim 200\text{-}300\text{\AA}$), concentration $N \approx (1\text{-}3) \cdot 10^{14}\text{ cm}^{-3}$, volume fraction $\varphi \approx 0.1\text{-}0.2\%$ and total area of interface $S_t \approx 0.2\text{-}0.4\text{ m}^2$. The SANS-data testified a low concentration of nano-defects in the wheel's material, as compared to steels after thermal treatment, in which an intense formation of precipitates with volume fraction exceeding $\sim 1\%$ is usually induced [17].

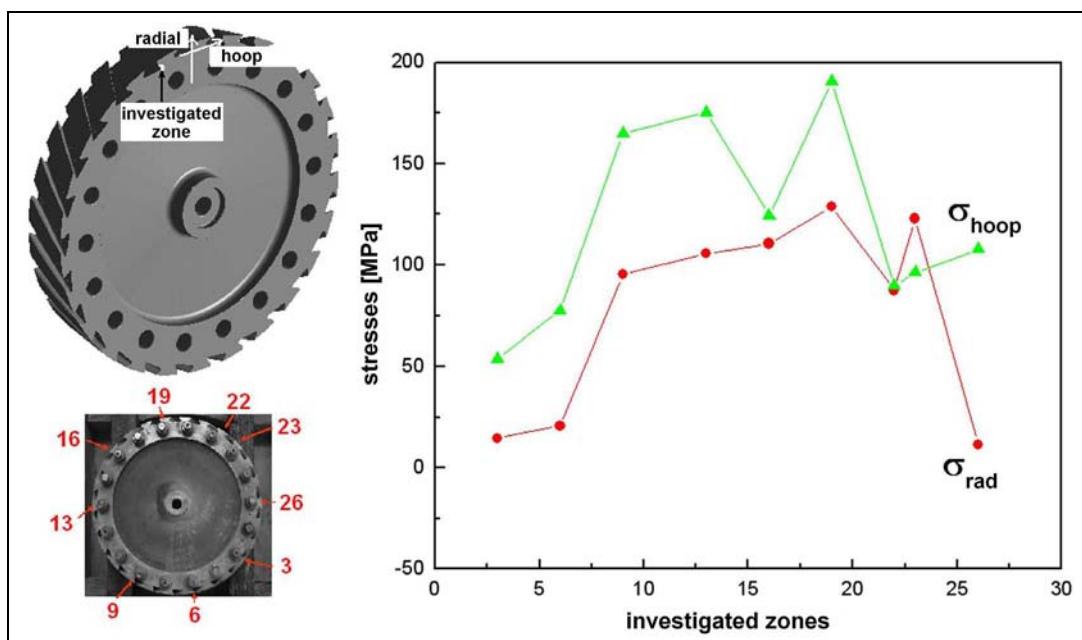


Fig. 8. Residual stresses measured by neutron diffraction in a NiCrMoV forged wheel of an axial compressor for a heavy duty gas turbine [15].

Various other studies and feasibility applications of ND and SANS related to forged materials and components can be mentioned as follows. Deformed metallic alloys were analysed by SANS (the size of defects being ~ 100 nm), especially in the fracture zones. The results showed that the main sources of scattering are micro-cracks and precipitates and that plastic deformation of metals for a few tens percent gives rise to huge scattering intensities several times higher than those existing in the original samples (Cu, Al and Ni) [18]. A quenched IN718 aero-engine compressor disc (weight ~ 40 kg, diameter ~ 400 mm and maximum thickness ~ 45 mm) produced by forging was investigated by ND in order to measure RS, whose hoop and radial components resulted compressive at the surface (up to -600 MPa) and tensile at depth (up to 400 MPa) [19]. RS were analysed by ND in a number of identical hot-forged water quenched IN718 compressor discs and the results agree with those obtained from FEA [20]. The through-thickness RS distributions were determined by ND within three 120mm thick 7449 aluminium alloy rectilinear forgings with similar geometry. Results indicated large magnitude (>250 MPa) tensile RS in the centre of an as quenched forging, balanced by surface regions stressed in compression (<-200 MPa). Cold water quenching these forgings resulted in biaxial surface compressive stresses in the range 250-300 MPa, balanced by inner tensile stresses up to 350 MPa [21]. Through-thickness RS measurements by ND were carried out in two 215 mm thick heat treated rectilinear Al7075 and Al7010 alloy forgings. 7075 is a much more quench sensitive alloy when compared to 7010, whose forging exhibited considerably larger tensile stresses in the core. The RS distribution was found to be comparable for both alloys changing from highly tri-axial and tensile in the core to biaxial compression in correspondence of the surface [22]. Few works have been performed on studying the texture evolution of forged particulate reinforced magnesium matrix composites by ND. The as-cast ingots of SiCp/AZ91 magnesium matrix composite produced by stir casting were cut into cylindrical billets and then forged at different temperatures (320, 370, 420, 470 and 520 °C) at a constant RAM speed of 15mm/s, with a 50% reduction in height. The texture of these forged composites was measured by ND. The results showed a

characteristic forging texture with the normal direction of the basal plane turning to forging direction clearly during the whole forging process. A strong basal plane texture was found in the matrix of composite with the basal plane perpendicular to forging direction; the intensity of the basal plane texture appeared weakened by increasing the forging temperature [23]. The crystal structures - both in austenitic and martensitic states - of a hot forged ferromagnetic shape memory alloy (SMA) of Ni₄₈Mn₃₀Ga₂₂ prepared by induction melting, were investigated by ND, in order to study the strong textures the large anisotropy of in plane plastic flow developed during the forging process. The results supplied also information on structure changes by cooling the considered material up to 243 K and successively to 19 K, indicating, in particular, that no inter-martensitic transformation exists in the investigated alloy, which is dissimilar from the transformation processes in the Ni-Mn-Ga alloys with higher martensitic transformation temperatures [24]. ND was adopted to investigate the bulk textures of HSF-Bi2223 superconductors' samples formed by hot stacking-forging process. The texture data showed extreme intensity variations as the sample was tilted and rotated azimuthally in relation to the neutron beam. The obtained information helped to explain anisotropy, superconducting properties and microstructure observations related to the investigated samples [25].

A co-deformed Cu-10vol.% Cr composite produced from cast Cu-Cr by hot forging and then cold swaging to a reduction of 95.6% (to achieve a fibrous reinforcing microstructure) was tested by ND in order to measure the changes in elastic strain with applied tensile loading in the axial and transverse directions. The results showed that the Cr phase deforms more than the Cu phase, reaching the yield locus at approximately the same strain as the Cu phase, due to the co-deformation previous to testing and to a mixture of its elevated stiffness and the possible existence of swaging induced RS [26]. An unalloyed Al matrix reinforced by spherical Al–Cu–Fe alloy particles consolidated by vacuum hot pressing and quasi-isostatic forging was tested by ND to determine RS. Composites reinforced by 15, 20, and 30 vol.% particles were investigated and the results showed that those consolidated from Al and Al₆₃Cu₂₅Fe₁₂ quasi-crystal alloy powders possess compressive RS in the Al matrix, probably due to the volume expansion of the reinforcement particles during the phase transformation and to the stiffness mismatch of the matrix and reinforcement phases [27].

Conclusions

Neutron techniques, as non-destructive diagnostics, can be helpful to investigate forged components, supplying significant data on basic parameters connected with degradation, fracture and other phenomena and allowing more reliable lifetime assessments.

Key works have been individuated and reported in this paper, showing a sort of state-of-the-art and also demonstrating the complementarity between neutron-based methods and the other techniques traditionally used. In particular, defects' evolution in new and exercised AlSi12CuNiMg forged components were analysed by SANS. Precipitates' intensity distribution and volume fractions were determined and a significant growth of the defects ~100 Å together with the loss of small defects such as vacancies annealing was detected, due either to the exercise or to thermal effects; important differences between the structures of new and exercised components were also found.

Acknowledgements

Financial assistance from the Budapest Neutron Centre in the frame of the EU-FP7-CP-CSA INFRA-2008-1.1.1 Number 226507-NMI3 programme is acknowledged.

References

- [1] E.P. Degarmo, J T. Black, R.A. Kohser, Degarmo's Materials and Processes in Manufacturing, John Wiley and Sons Ltd (2007), p. 1032.
- [2] T. Khan, P. Caron, in: E. Bachelet et al., Eds., High Temperature Materials for Power Engineering, Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, Part II (1990), pp. 1261-1270.
- [3] J. Zrník, Influence of thermal and stress loading on the structure of nickel superalloys, Habilitation Thesis, Deptm. Mat. Sciences, Techn. Univ. Košice, Slovakia (1990), pp. 15-22.
- [4] M. Rogante, V. T. Lebedev, SANS comparative investigation of Inconel 738 samples submitted to different ageing treatments, Materials and Design, Volume 29, Issue 5 (2008), pp. 1060-1065.
- [5] M. Rogante, in: Rogante Engineering, Ed., Proc. 1st Italian Workshop for Industry “Industrial Applications of Neutron Techniques”, Civitanova Marche, Italy, 12-14 June 2008 (2008).
- [6] I. C. Noyan, J. B. Cohen, in: Residual Stress - Measurement by Diffraction and Interpretation, Springer-Verlag, NY (1987), p. 276.
- [7] M. A. M. Bourke, Ph. D. thesis, Imperial College, London (1990).
- [8] M. Rogante, Ph. D. thesis, University of Bologna (1999).
- [9] Lecture Notes on Neutron Scattering, Introductory Course to ECNS'99, G. Kádár and L. Rosta, Eds., KFKI-1999-04/E report, KFKI, Budapest (1999), p. 128.
- [10] O. Glatter, O. Kratky, Small Angle X-ray Scattering, Academic Press, London (1982), p. 515.
- [11] C. Williams, R.P. May, A. Guinier, Small-Angle Scattering of X-rays and Neutrons, in: Characterisation of Materials, E. Lifshin ed., Vol. 2B of “Materials Science and Technology”, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1994), pp. 611-656.
- [12] H.M. Rietveld, Line profiles of neutron powder-diffraction peaks for structure refinement, Acta Cryst., 22 (1967), pp. 151-152.
- [13] H.M. Rietveld, Profile refinement method for nuclear and magnetic structures, J. Appl. Cryst., 2 (1969), pp. 65-71.
- [14] J. Sobczak, Z. Slawinski, N. Sobczak, P. Darlak, R. Asthana, P. Rohatgi, Thermal fatigue resistance of discontinuously reinforced cast aluminium-matrix composites, Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 1176 (2002), pp. 595-602.
- [15] M. Rogante, L. Rosta, Nanoscale characterisation by SANS and residual stresses determination by neutron diffraction related to materials and components of technological interest, Proc. of SPIE Vol. 5824, Opto-Ireland 2005: Nanotechnology and Nanophotonics, W. J. Blau, D. Kennedy and J. Colreavy, Eds., SPIE, Bellingham, WA (2005), pp. 294-305.
- [16] M. Rogante, G. Török, G. F. Ceschini, L. Tognarelli, I. Füzesy, L. Rosta, High resolution diffraction for residual stress determination in the NiCrMoV wheel of an axial compressor for a heavy-duty gas turbine, Physica B: Condensed Matter, 350/1-3S (2004) pp. E479-E481.
- [17] M. Rogante, G. F. Ceschini, L. Tognarelli, E. Rétfalvi, V. T. Lebedev, Sans-study of the nano-defects in a NiCrMoV wheel of the axial compressor of a heavy duty gas turbine, J. Mat. & Design, 26/3 (2005) 191-195.

- [18] L. Cser, I. Kovach, N. Kroo, G. Zsigmond, Small-angle Neutron Scattering Study of Metallic Alloys by a Double Crystal Device, report KFKI 1982-35, Budapest (1982), p. 15.
- [19] D. Dye, B.A. Roder, S. Tin, M.A. Rist, J.A. James, M.R. Daymond, Modeling and measurement of residual stresses in a forged IN718 superalloy disc, Proceedings of the International Symposium on Superalloys (2004), pp. 315-322.
- [20] U. Cihak, M. Stockinger, P. Staron, J. Tockner, H. Clemens, Characterization of residual stresses in compressor discs for aeroengines: Neutron diffraction and finite element simulations, Proceedings of the International Symposium on Superalloys and Various Derivatives (2005), pp. 517-526.
- [21] J.S. Robinson, S. Hossain, C.E. Truman, A.M. Paradowska, D.J. Hughes, R.C. Wimpory, M.E. Fox, Residual stress in 7449 aluminium alloy forgings, Materials Science and Engineering A 527 (2010), pp. 2603-2612.
- [22] J.S. Robinson, C.E. Truman, S. Hossain, R. Wimpory, Residual stress and microstructural variations in thick aluminium alloy forgings, Materials Science Forum, Volume 571-572 (2008), pp. 45-50.
- [23] K.K. Deng, K. Wu, X.J. Wang, Y.W. Wu, X.S. Hu, M.Y. Zheng, W.M. Gan, H.G. Brokmeier, Microstructure evolution and mechanical properties of a particulate reinforced magnesium matrix composites forged at elevated temperatures, Materials Science and Engineering A 527 (2010), pp. 1630-1635.
- [24] D.Y. Cong, Y.D. Wang, P. Zetterström, R.L. Peng, R. Delaplane, X. Zhao, L. Zuo, Crystal structures and textures of hot forged Ni48Mn 30Ga22 alloy investigated by neutron diffraction technique, Materials Science and Technology, Volume 21, Issue 12, (2005), pp. 1412-1416.
- [25] J.G. Noudem, E. Guilmeau, D. Chateigner, B. Ouladdiaf, D. Bourgault, Performance of hot stacked-sinter forged Bi2223 ceramics, Physica C 408–410 (2004), pp. 862-863.
- [26] K.L. Lee, A.F. Whitehouse, P.J. Withers, M.R. Daymond, Neutron diffraction study of the deformation behaviour of deformation processed copper-chromium composites, Materials Science and Engineering A348 (2003), pp. 208-216.
- [27] F. Tang, T. Gnäupel-Herold, H. Prask, I.E. Anderson, Residual stresses and stress partitioning measurements by neutron diffraction in Al/Al–Cu–Fe composites, Materials Science and Engineering A 399 (2005), pp. 99-106.

ELEKTROKEMIJSKA SVOJSTVA ALUMINIJSKE SLITINE EN AW-6060

ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM ALLOY EN AW-6060

Ratko Mimica⁽¹⁾, Jagoda Radošević⁽¹⁾, Sanja-Slavica Matešić⁽²⁾

⁽¹⁾Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Arhitecture,
Department of Mechanical Technology, Ruđera Boškovića b.b., 21000 Split

⁽²⁾ Head of Enviromental protection office at Šibensko-Kninska country

Sažetak: Aluminjske slitine serije 6xxx karakteriziraju odlična deformabilnost, mogućnost toplinskog očvršćivanja, dobra otpornost koroziji i relativno dobra mehanička svojstva. Stoga se u obliku poluproizvoda (u vidu šipki i cijevi) dosta često upotrebljava kao konstrukcijski materijal gdje se traži relativno mala masa, srednja mehanička svojstva i dobra otpornost vanjskim utjecajima. U ovom radu elektrokemijskim mjernim tehnikama određena je korozionska otpornost slitine EN AW-6060 (u ekstrudiranom stanju) u kloridnom mediju (0.5M NaCl). Rezultati ispitivanja pokazali su da je slitina EN AW-6060 sklona jamičastoj (pitting) koroziji, što je u vezi sa karakerističnom mikrostrukturom slitine.

Ključne riječi: Aluminjska slinta EN AW-6060, ekstrudirano stanje, kloridni medij, korozija.

Abstract: The 6xxx series aluminium alloys are characterised by excellent extrudability, heat treatment hardenability, good corrosion resistance, and relatively good mechanical properties. Therefore it's frequently used as extruded product (bars, tubes) for structures requiring low weight, average mechanical strength, and good corrosion resistance. In this article, electrochemical measurements were used to determine corrosion resistance of En AW-6060 (extruded) in 0.5M NaCl chloride media. The results have shown that EN AW-6060 is susceptible to pitting corrosion, which is due to microstructural characteristics of that alloy.

Key words: aluminium alloy EN AW-6060, as extruded, chloride medium, corrosion.

1. Uvod:

Slitina EN AW-6060, ili AlMgSi0.5 je toplinski očvrstiva, koroziji otporna slitina, posebno u atmosferskim uvjetima. Odlična je za obradu gnječenjem i ekstrudiranjem, s mogućnošću izrade vrlo kompleksnih oblika [1]. Sama slitina je dostupna u više varijanti, s različitim udjelima silicija i magnezija, optimirajući na taj način različite skupine svojstava, kao što su izgled površine, pogodnost anodiziranju ili mehanička svojstva. Mehanička svojstva ispitivane slitine su u skladu sa serijom 6xxx. Prosječne tvrdoće i čvrstoće, mogu se dodatno poboljšavati dodavanjem silicija i bakra aluminijskoj osnovi. Toplinskom obradom, bilo umjetnim ili prirodnim starenjem postižemo dodatna poboljšanja tvrdoće i čvrstoće. Dobra zavarljivost i lemljivost te dobra deformabilnost u hladnom stanju čine je izvrsnom za konstrukcije transportne primjene (dijelovi automobila, okviri od bicikli, željeznički vagoni,...).

Međutim, kao i kod ostalih aluminijskih slitina, osjetljive su na pojavu jamičaste korozije (pitting) u agresivnom mediju. Do pittinga dolazi uslijed prisutnih heterogenosti u metalu koje vode formiranju lokalnih galvanskih mikročlanaka između intermetalnih čestica i aluminijске matrice. Pitting korozija je kompleksan proces na koji mogu utjecati različiti faktori kao što su pH, temperatura, medij ili strukturne karakteristike oksidnog pasivnog filma [2].

Prisutnost intermetalnih faza poboljšava mehanička svojstva slitine, ali vodi ka dodatnoj osjetljivosti prema koroziji, što naprimjer, dolazi do izražaja prilikom zavarivanja ove slitine s preporučenim dodatnim materijalom (EN AW 4043). Tokom samog procesa dolazi do protaljivanja i mješanja s osnovnim materijalom što rezultira dodatnu složenost pri raspodjeli intermetalnih spojeva u mikrostrukturi.

U ovom radu su izvršena osnovna elektrokemijska ispitivanja navedene slitine, koja će služiti kao temelj dalnjih istraživanja korozionske postojanosti zavarenih spojeva.

2. Eksperimentalni dio

Eksperimentalni dio rada proveden je u Laboratoriju za napredne materijale Zavoda za strojarsku tehnologiju Fakulteta Elektrotehnike, Strojarstva i Brodogradnje u Splitu. Kao materijal ispitivanja korišteni su uzorci izrađeni iz poluproizvoda aluminjorskog profila, pravokutnog presjeka, dimenzija 50 mm x 40 mm debljine 2 mm. Materijalu profila je EN AW-6060 (AlMgSi0.5) utvrđen je sljedeći kemijski sastav analizom s optičkim emisijskim spektrometrom (ARL-MA):

Tablica 1: rezultati (ARL-MA) analize kemijskog sastava uzorka EN – AW 6060

Element:	Al	Si	Mg	Fe	Mn
Količina: (%)	98.72	0.49	0.45	0.21	0.02

Iz osnovnog materijala izrađene su elektrode radne površine od 1cm^2 , ostale površine su izolirane da ne dolaze u doticaj s otopinom tijekom ispitivanja, a kontakt je ostvaren utiskivanjem bakrene žice u osnovni materijal. Prije svakog mjerjenja površina elektrode je mehanički i kemijski obrađena. Elektrode su brušene brusnim papirima finoće: 360, 600, 800. Da bi se odstranio površinski oksidni sloj i eventualno unesene nečistoće, elektrode su držane 1 minutu u alkalnoj otopini 0.1M NaOH, zagrijanoj na $40^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$. potom su elektrode ispirane destiliranom i redestiliranom vodom, te što je moguće brže, postavljene u elektrokemijski reaktor.

Elektrokemijska mjerjenja izvedena su u standardnom elektrokemijskom sustavu sastavljenom od 3 elektrode: radne, protuelektrode i referentne elektrode. Dupla staklena stijenka elektrokemijskog reaktora omogućavala je termostatiranje. Za sva mjerjenja upotrebljena je grafitna protuelektroda u obliku štapa, površine 10 puta veće od radne elektrode. Kao referentna elektroda korištene je Ag/AgCl 3M elektroda, tako da su sve vrijednosti potencijala prikazane u ovom radu odnose na ovu elektrodu. Korozionska svojstva ispitivana su u otopini 0.5M NaCl pri $25^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$, pH vrijednosti 5.5. Otopina je bila deareerirana, upuhivanjem pročišćenog dušika u reaktor. Elektrokemijska mjerjenja provedena su pomoću potencijostata/galvanostata BioLogic Science Instruments SP-150, upravljanog s odgovarajućim softverom „EC.Lab“ v.9.55. Za ispitivanje koroziskog ponašanja legure EN AW 6060 te za određivanje elektrokemijskih parametara korištene su sljedeće metode:

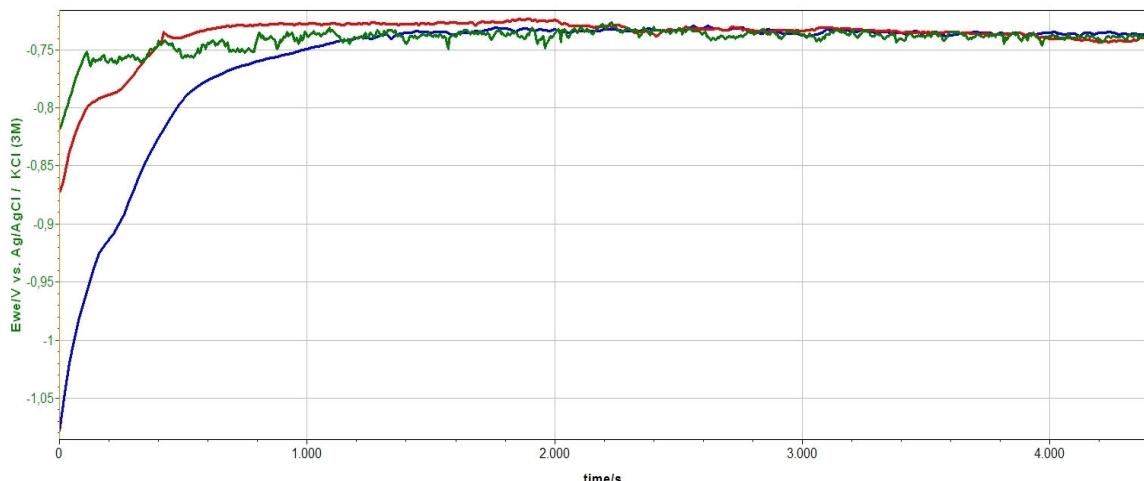
- Potenciodinamička polarizacijska metoda
- Metoda linearne promjene potencijala (ciklička voltametrija)

Morfologija površine je promatrana optičkim mikroskopom (OPTON Axioscop povećanja 20x10, s izmjenjivim lećama) a snimke su dobivene s kamerom (JVC KY – F1030; KY – Link Softver).

3. Rezultati i diskusija:

3.1 Potencijal otvorenog kruga (OCP)

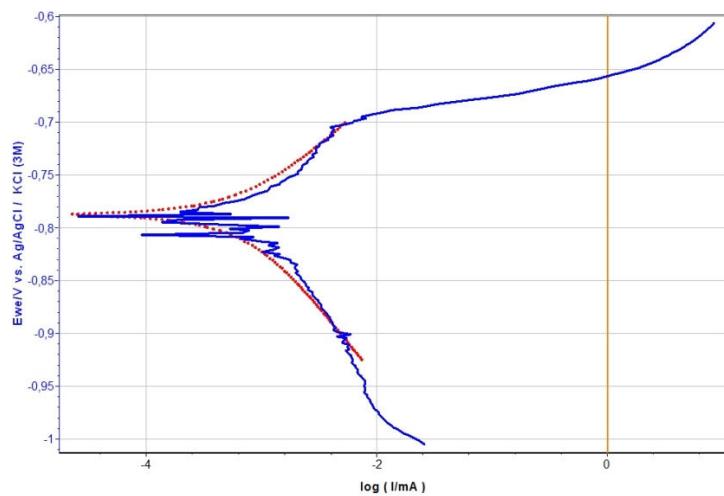
Vremenska ovisnost potencijala otvorenog strujnog kruga (E_{OCP}) legure AW EN 6060 u 0.5M NaCl otopini pri temperaturi $25^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$ praćena je u vremenskom razdoblju od 12h, 8h, 4h i 2h. Utvrđeno je da se uzorak stabilizira nakon 15 min na potencijalu od -740 mV u odnosu na referentnu elektrodu (slika 1). Za daljnje eksperimente je uzeta navedena vrijednost, a vrijeme stabilizacije sustava je postavljeno na 20 min.



Slika 1: Potencijal otvorenog kruga slitine EN AW 6060 za 3 različita vremenska perioda; 8 sati (plava linija), 4 sata (crvena linija) i 2 sata (zelena linija)

3.2 Potenciodinamička polarizacijska metoda

Potenciodinamička polarizacijska mjerila su se nakon uspostavljanja stabilne vrijednosti potencijala otvorenog strujnog kruga (E_{OCP}) u potencijalnom području $E = E_{OCP} \pm 250\text{mV}$ u smjeru od katodne do anodne strane, uz brzinu promjene potencijala od $2 \frac{\text{mV}}{\text{s}}$ (slika 2), a rezultati elektrokemijskih parametara prikazani su u Tablici 2.



Slika 2: potenciodinamička polarizacijska krivulja slitine EN AW 6060;
eksperimentom izmjerena krivulja (plavo), računalom podešena
krivulja (crveno).

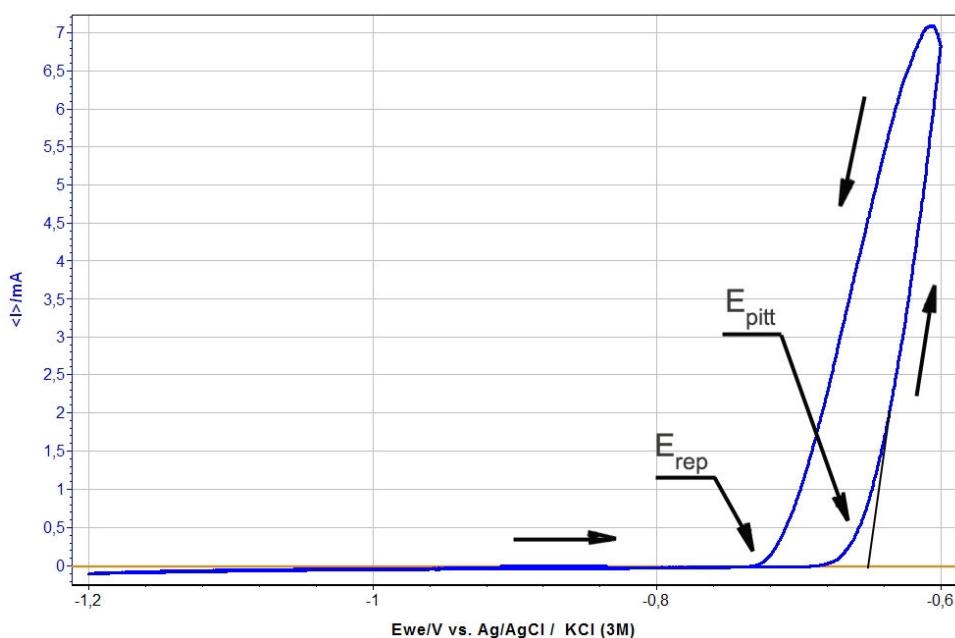
Tablica 2: vrijednosti elektrokemijskih parametara dobivenih uz pomoć računala iz slike 2.

E_{corr} (mV) vs. Ref	-787,497
I_{corr} (μA)	0,733
b_c (mV)	136,7
b_a (mV)	99,6

Dobiveni podatak iz polarizacijske krivulje je (E_{corr}) služi kao polazna točka za slijedeća ispitivanja.

3.3 Ciklička voltametrija:

Da bi se preciznije odredilo područje potencijala u kojem se uzorak ponaša pasivno i područje gdje dolazi do aktivnog otapanja, izvedena su mjerena cikličkom voltametrijom. Polarizacijom elektrode počevši od E_{corr} u anodnom smjeru i natrag, moguće je odrediti karakteristične parametre materijala sklonih pasiviranju. To su pitting potencijal (E_{pit}), kod kojeg dolazi do probora pasivnog sloja i repasivizacijski potencijal (E_{rep}), kod kojeg se ponovo uspostavlja pasivno stanje. Sposobnost repasivizacije se manifestira postepenim smanjenjem struje polarizacije, što je uočljivo kao histereza ($E_{his} = E_{pit} - E_{corr}$) koja se zatvara pri E_{rep} (slika 3), (Tablica 3).



Slika 3: ciklički voltamogram za slitinu EN AW 6060

Tablica 3: elektrokemijski parametri određeni iz cikličkog voltamograma slitine EN AW 6060

	E_{corr} [mV]	E_{pit} [mV]	E_{rep} [mV]	E_{his} [mV]
EN AW 6060	-787	-663	-732	69

Iz krivulje na slici 3 je vidljivo da prilikom povratne polarizacije slitina EN AW 6060 pokazuje standardno cikličko ponašanje s uskom histereznom petljom širine 69 mV. Površina koju zatvara histerezna petlja ukazuje na sposobnost repasivizacije slitine: što je petlja uža, to je materijal skloniji repasivaciji pri uvjetima mjerjenja. To područje potencijala karakterizirano je metastabilnom ravnotežom na sučelju metal/elektrolit, gdje se neki pitovi produbljuju, a neki repasiviraju. Nadalje, ustanovljeno je da ispitivana slitina stvara pasivni oksidni sloj u području potencijala od -1.1 V do -0.66 V u odnosu na referentnu elektrodu. Intenzivna korozija nastaje nakon probora pasivnog sloja (E_{pit}), što se manifestira naglim porastom jakosti struje. Korozija koja nastaje je jamičasta (pitting) korozija koja se smatra najčešćim oblikom elektrokemijskog razaranja uzrokovanih lokalnom depasivacijom metala koji su uobičajeno u pasivnom stanju. Kloridni ioni u vodenim otopinama (slično kao i ostali halogenidi) specifičan su agresivni čimbenik koji uzrokuje pitting koroziju na metalima. Budući da su kloridi anioni jake kiseline, mnogi metali posjeduju znatnu topivost u kloridnim otopinama. Također,

kloridi su relativno mali anioni s velikom moći difuzije što ometa pasivaciju metala. Mehanizam rasta jamice kod jamičaste korozije može biti kontroliran procesima: prijenosa naboja (aktivacija), omskim efektima, prijenosom tvari ili kombinacijom sva tri procesa. Anodno otapanje aluminija rezultira nastajanjem Al^{3+} kationa, nakon čega slijedi hidroliza koja rezultira sniženjem pH u jamici prema jednačbi:



Nastaju pozitivni ioni koji reagiraju sa Cl^- ionima povlačeći ih iz elektrolita u jamicu, gdje niska vrijednosr pH i visoka koncentracija kloridnih iona pogoduju otapanju metala nad repasivizacijom.

Jamičasta korozija se promatra u uvjetima gdje postoji malo ili uopće nema korozije, a opseg pojave pittinga može se razlikovati ovisno o uvjetima i stanju površine materijala, nastanak jamicu kod aluminijskih slitina obično je povezan sa međumetalnim česticama [3]. Sastav i morfologija aluminijске matrice i međumetalnih čestica funkcija su toplinske i mehaničke obrade tijekom proizvodnje legure, kao što su skrućivanje, homogenizacija, precipitacijski tretmani, valjanje izvlačenje i sl. Međumetane čestice sadrže prijelazne metale čiji oksidi su poluvodiči i bolja su mjesta za elektrokemijsku reakciju nego je aluminijска matrica što je prekrivena oksidom tj., izolatorom [4].

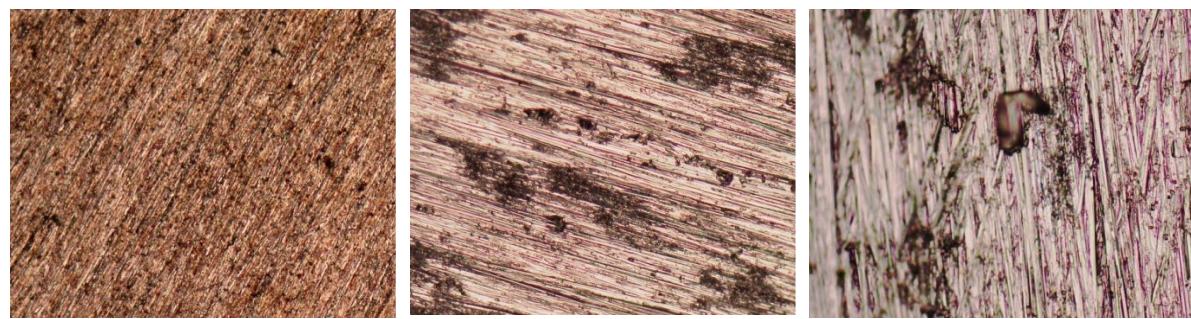
U Tablici 4 dati su potencijali najčešćih čestica i međumetalnih faza koje se formiraju u aluminijskim slitinama u odnosu na Ag/AgCl 3M elektrodu [5].

Tablica 4: katodni potencijali najčešćih čestica u aluminijskim legurama

Element / međumetalna faza	Potencijal / V vs. Ag/AgCl 3M
Si	-0.23
Al_3Ni	-0.49
Al_3Fe	-0.53
Al_2Cu	-0.70
Al_6Mn	-0.82
Al_8Mg_5	-1.21

Po iznosima vrijednosti potencijala, međumetalne čestice možemo svrstati u anodne, katodne i neutralne u odnosu na slitinu. Guillaumin i Mankowski [6] su pronašli da su međumetalne čestice, koje sadrže Al-Mg-Si u leguri AA 6065 nukleacijska mjesta jamicu pitting korozije, te da se jonica najprije razvija unutar zrna.

Proces korozije praćen je optičkim mikroskopom pri 10 minutnoj anodnoj polarizaciji uzorka na potencijalu od -650 mV vs. Ag/AgCl 3M (slika 4).



Slika 4: slitina EN AW 6060: bez polarizacije (a); nakon anodne polarizacije u 0.5M NaCl, povećanje 100X(b) i 200X(c)

4. Zaključak:

Provedenim elektrokemijskim i metalografskim istraživanjima slitine EN AW 6060 u kloridnom mediju 0.5M NaCl ustanovljeno je da pasivni zaštitni film formiran na zraku gubi svoja zaštitna svojstva pri uvjetima anodne polarizacije. Do proboga pasivnog sloja dolazi kod potencijala pittinga od -663 mV prema Ag/AgCl 3M, uz brzinu promjene potencijala od 10 mV/s.

Rezultati ukazuju da je navedena slitina sklopa jamičastoj koroziji zbog prisustva intermetalnih faza na površini slitine koji pogoduju stvaranju mikrogalvanskih članaka.

Napomena:

Ovaj rad je izrađen u okviru projekta „ELEGRAFA III“ uz potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske

References:

- [1] – C.Vargel, Corrosion of Aluminium, Elsevier publications, 2004
- [2] – Z.Szklarska-Smialowska, Pitting Corrosion of Aluminium, Corrosion Science, **41**, 1743-1767,(1999)
- [3] – J.O.Park, C.H. Paik, Y.H. Huang, R.C.Alkire, Journal of the Electrochemical Society, **146**, 517-523,(1999)
- [4] - O. Seri, Corrosion Science, **36**, 1789-1803, (1994)
- [5] – ASM speciality Handbook, Aluminium and Aliminium Alloys, ASM International (1993)
- [6] – V.Guillaumin, G.Mankowski, corrosion Science, **42**, 105-125,(2000)

Implementation of CAD/CAM system in virtual simulation of automated turning center

Implementacija CAD/CAM sustava u virtualnoj simulaciji automatiziranog tokarskog obradnog centra

Nikola Vitulic, Zoran Jurkovic, Mladen Perinic

Faculty of Engineering, University of Rijeka, Vukovarska 58, Rijeka, Croatia

Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci, Vukovarska 58, Rijeka, Hrvatska

Abstract:

All areas of business have the need to store, exchange and process information as fast and secure as possible. The one who is able to handle these tasks best is considered to increase his productivity, to reduce time to market, to avoid redundant work and thus become more competitive. This paper deals with implementation of the advanced CAD/CAM system and simulation tools which are used at Department of Industrial Engineering and Management for design of machining processes and tools. The common benefit of using CAD/CAM has been explained with application of Solidcam software in real manufacturing environment. Virtual simulation and verification of machining tasks on the automated turning center with new defined postprocessor for EltroPilot control system have been presented. The current state of conventional NC programming and Step-NC have been also presented.

Keywords: CAD/CAM; simulation; turning center; postprocessor; NC programming

Sažetak:

U svim područjima poslovanja postoji potreba za pohranom, razmjenom i obradom informacija čim brže i sigurnije. Onaj koji je u stanju bolje se nositi s ovakvim zadacima stvara uvjete za povećanje svoje produktivnosti, smanjenje vremena izlaska proizvoda na tržište, kao i izbjegavanje prekomernih poslova čime postaje konkurentniji. Ovaj rad se bavi implementacijom naprednog CAD/CAM sustava i simulacijskih alata koji se koriste na Zavodu za industrijsko inženjerstvo i management za projektiranje procesa obrade i alata. Opće prednosti korištenja CAD/CAM kao i primjena Solidcam softvera objašnjene su na primjeru stvarnog proizvodnog okružja. Dan je prikaz virtualne simulacije i verifikacije obrade na automatiziranom tokarskom obradnom centru s novim definiranim postprocesorom za upravljački sustav EltroPilot. Također dan je i pregled trenutnog stanja kod konvencionalnog NC programiranja kao i Step-NC.

Ključne riječi: CAD/CAM; simulacija; tokarski obradni centar; postprocesor; NC programiranje

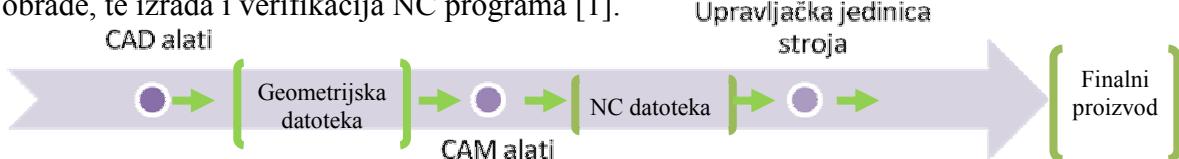
1. UVODNA RAZMATRANJA

Od samog početka strojne obrade u industriji teži se povećanju produktivnosti, točnosti obrade i smanjenju vremena izlaska proizvoda na tržište. Težnja da se i složeniji proizvodi izrade brže, kvalitetnije i efikasnije dovela je do intezivnog razvoja i primjene softverskih rješenja. Upravo CAD/CAM softverska rješenja, kao napredni alat u fazi razvoja proizvoda i njegove izrade, predstavljaju najznačanije i najintezivnije promjene koje su našle svoj put do široke industrijske primjene posebice u zadnjem desetljeću. 3D modeliranje povezano sa tehnologijom i simulacijom izrade zahtijevaju nova znanja djelatnika gdje sa odgovarajućom proizvodnom opremom stvaraju uvjete za globalnu konkurentnost.

Ovaj rad bavi se implementacijom naprednog CAD/CAM sustava u virtualnu simulaciju automatiziranog tokarskog obradnog centra. Ovaj sustav se koristi na Zavodu za industrijsko inženjerstvo i management, Tehničkog fakulteta u Rijeci za projektiranje, analizu i optimizaciju procesa strojne obrade.

2. POGODNOSTI KORIŠTENJA NAPREDNOG CAD/CAM SUSTAVA

Tehnologija koja stoji iza kratica CAD i CAM poznata je još od 1965. godine. Te kratice predstavljaju (CAD) Computer-Aided Drafting ili Computer-Aided Design (Računalno Potpomognuto Crtanje/Dizajniranje) i (CAM) Computer-Aided Manufacturing (Računalno Potpomognuta Proizvodnja). CAD obuhvaća sve zadatke uključene u izradu podataka o proizvodu kako što su tehnički nacrti, popisi dijelova proizvoda i grafički modeli proizvoda. CAM podrazumijeva izradu tehničkih i upravljačkih podataka u proizvodnji kako što su: tehnologija obrade, planovi stezanja, popis alata i parametara obrade, te izrada i verifikacija NC programa [1].



Slika 1: Tok informacija kod CAD/CAM sustava

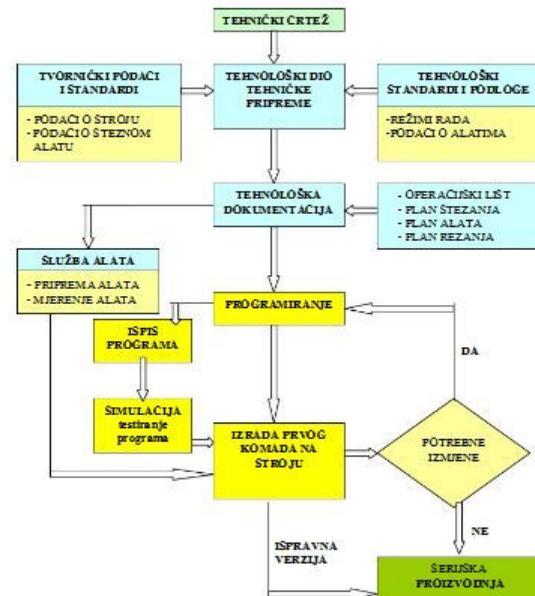
Kombinacijom CAD i CAM alata u CAD/CAM sustavu dobije se napredan sustav koji je u mogućnosti povećati efikasnost rada. SolidWorks/SolidCam je jedno takvo napredno CAD/CAM rješenje. Pogodnost korištenja ovih alata je u tome kad se jednom napravi dizajn proizvoda isti se može provjeravati, te izvoditi virtualna simulacija obrada. Simulacijom obrade dobivaju se vremena obrade koja su vrlo važna u planiranju proizvodnje, te NC program, kao konačni cilj, za određeni obradni centar i njegovu upravljačku jedinicu.

3. RAZVOJ PROGRAMIRANJA NC STROJEVA

Postoje različiti pristupi programiranja NC strojeva detaljnije prikazani na slikama 2, 3 i 4.

Ručno programiranje

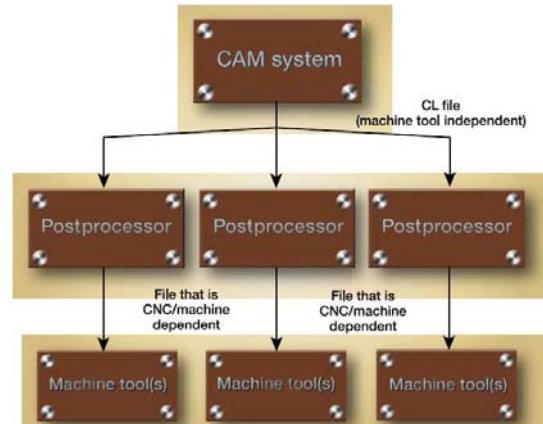
- Programer ručno piše NC program
- Potrebno znanje programiranja
- Programiranje jednostavnijih dijelova



Slika 2: Tijek ručnog programiranja [2]

CAM programiranje [3]

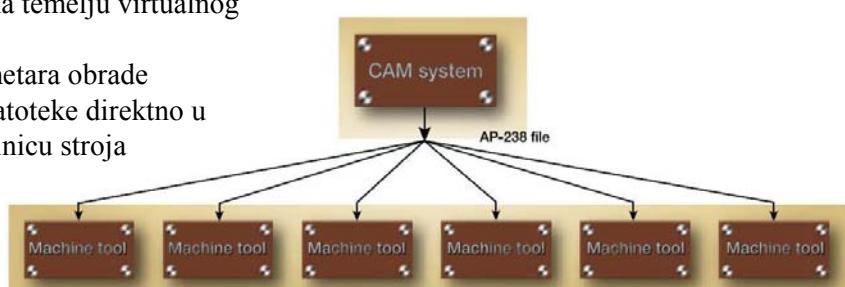
- Programiranje na temelju virtualnog 3D modela
- Poznavanje tehnologije obrade
- Pretvaranje CL datoteke u NC datoteku pomoću postprocesora
- Potreban definiran postprocesor za određenu upravljačku jedinicu



Slika 3: Dijagram CAM programiranja [3]

STEP NC programiranje [3]

- Izbacivanje postprocesora iz uporabe
- Programiranje na temelju virtualnog 3D modela
- Unošenje parametara obrade
- Unos AP-238 datoteke direktno u upravljačku jedinicu stroja



Slika 4: Dijagram STEP-NC programiranja [3]

4. SOLIDCAM I SOLIDWORKS POTPUNO INTEGRIRANI CAD/CAM SUSTAV

SolidCAM je integriran u SolidWorks-ovo CAD sučelje. Podržava programiranje CNC obradnih centara: glodanje do simultano 5-osi, tokarenje s više nosača alata i suprotnim vretenom te pogonjenim alatima, erodiranje žicom s 2+2 osi. Integracija SolidCAM-a u SolidWorks-ovom okružju omogućava jednostavniju CAD/CAM komunikaciju nužnu za kvalitetnu i brzu razmjenu podataka što praktično podrazumijeva da bilo kakva promjena SolidWorks modela rezultira automatskom osvježavanjem podataka definiranih CAM operacija [4].

Napredna CAM-Inteligencija [4] podrazumijeva:

- SolidCAM podržava baze znanja u obradi kroz prilagodljive predloške parametarskih procesa.
- SolidCAM modul automatski raspoznaće i (AFRM) automatizira obradu dijelova.
- U bilo kojem stadiju proizvodnog procesa, SolidCAM omogućuje jake funkcije prikaza, analize i obrade ostatka materijala.
- Realistična verifikacija za 2D simulaciju, solid verifikaciju i simulacija stroja.
- Jaka detekcija kolizije uključujući stege, škripce i pritezače.
- Jaki i fleksibilni postprocesori, lako prilagodljivi korisnicima.

Osim programiranja CNC alatnih strojeva ovaj integrirani sustav pruža mogućnosti konstrukcije i izrade nacrta proizvoda u SolidWorksu.

5. PROGRAMIRANJE I VIRTUALNA SIMULACIJA OBRADE U SOLIDCAM SUSTAVU

Pojavom CAM sustava za NC programiranje ručno programiranje polako odlazi u zaborav. Jednostavnost, mnoštvo korisnih alata i funkcija CAM sustav čine nezaobilaznim u programiranju i simulaciji obrade proizvoda na alatnim strojevima. Kroz prikaz virtualne simulacije i verifikacije obrade na automatiziranom tokarskom obradnom centru ukratko je pokazan proces izrade NC programa korištenjem SolidCam softvera.

Današnji CAM sustavi da bi izradili NC program moraju imati definiran postprocesor kojeg se izrađuje za svaki alatni stroj zasebno. Postprocesor ima funkciju pretvaranja CL datoteke (cutter location file) u NC datoteku u obliku G-koda. Za potpuno definiranje postprocesora u SolidCam softveru koristi se GPPTool alat koji omogućuje modificiranje potrebnih (machine.mac i machine.gpp) datoteka. Machine.mac datoteka definira pre-processor-ove parametre koji utječu na putanju alata unutar SolidCam-a (Slika 5), dok machine.gpp definira post-processor-ove parametre koji utječu kako će se putanja alata transformirati u G-kod (Slika 6) [5].

```

@pre_processor
;Internal parms
machine_type          = TURNING
post_processor         = GILDEPL2
gpp_file_ext           = NC

;Machine Initialize
machine_plane          = XY
z_with_xy              = N
mac_axes                = XYZ
num_axes                = 4
num_simult_axes        = 2
abs_coord               = N
rotate                  = Y
mirror                 = N
variables               = N
loops                   = Y

;Program numbers
prog_num_min            = 1000
prog_num_max             = 8999
prog_num_dflt            = 5000
get_prog_num             = Y
proc_num_min             = 1
proc_num_max             = 8999
proc_num_dflt            = 5001
get_proc_num             = Y

```

Slika 5:

Machine.mac

datoteka

Pre-processor-a

```

@start_of_file
; before tools definition
{%'program_number}
;{NL}
; {nb,'G90 G95 G00'}
; {nl,'N5 G00 X-600 M08'}
; blknum = 6
endp

;-----

@start_program
; after tools definition
endp

;-----


@end_program
endp

;-----


@end_of_file
gcode_s = 40
ggcode = true
if save_spin_unit <> 0
    spin = (1000 * spin)/3.14/(xx * 2)
    spin_unit = rpm
; call @feed_spin
    spin_unit = css
endif
{nb, 'G14 Q0'}
{nb, 'M30'}
endp

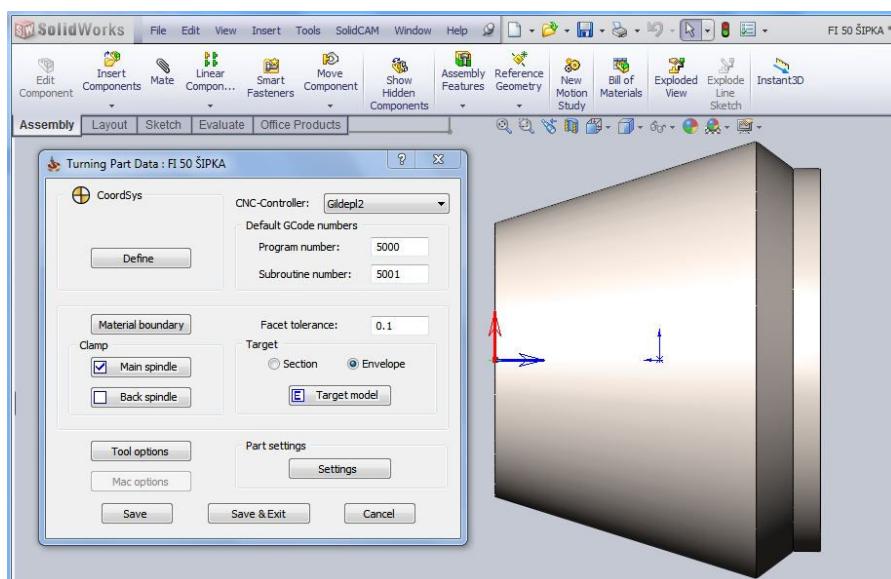
```

Slika 6: Machine.gpp datoteke Post-processor-a

Nakon pripremljenog postprocesora može se pristupiti CAM programiranju. Zato je potrebno imati pripremljen 3D model izratka koji će se obraditi na odgovarajućem alatnom stroju.

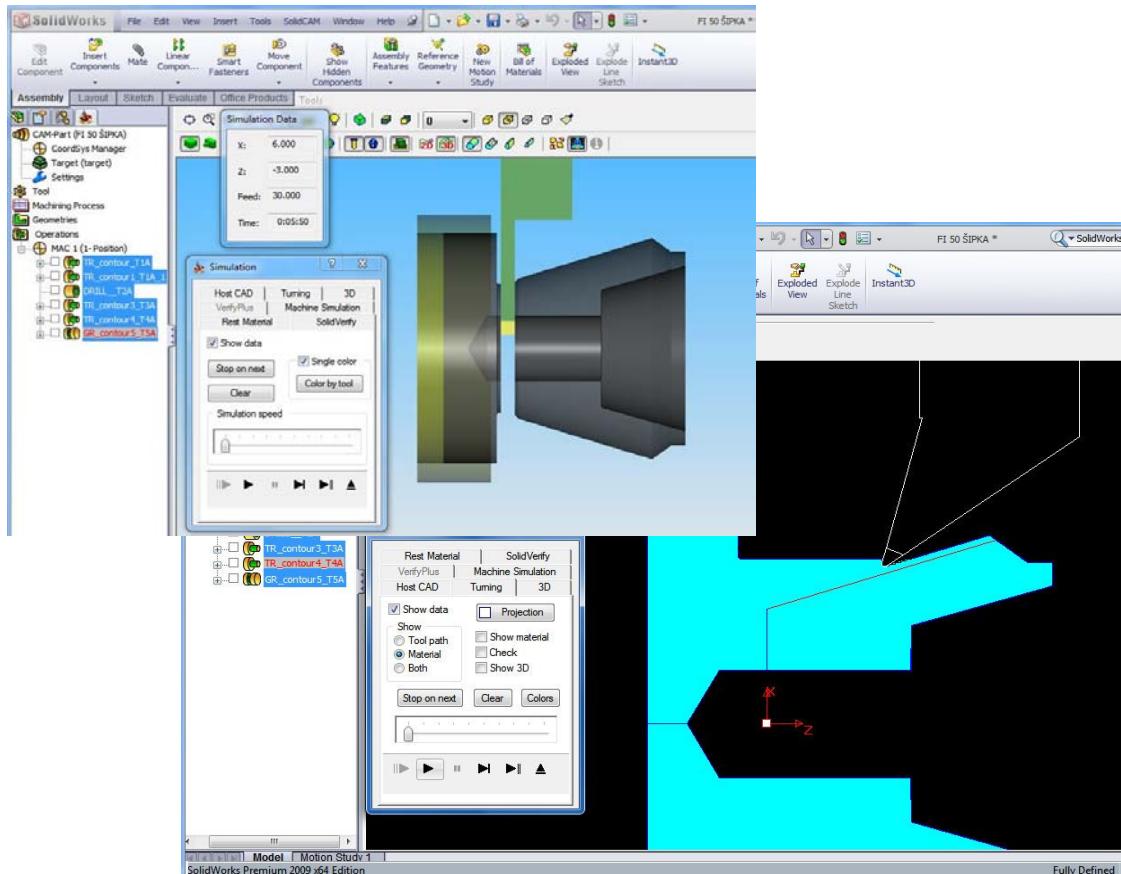
U kratkim koracima dan je postupak programiranja

- I. Definiranje koordinatnog sustava po kojemu se vodi obrada
- II. Definiranje ulaznog materijala za obradu
- III. Definiranje poziciju stezanja vretena
- IV. Definiranje gotovog modela za obradu
- V. Vrstu upravljačke jedinice za koju postoji definirani postprocesor



Slika 7: Prikaz sučelja za definiranje osnovnih parametra

Nadalje potrebno je definirati konture pripremka za obradu, te kako to postići kojim alatima i parametrima rezanja. Plan obrade ovisi o projektiranoj tehnologiji od strane tehnologa. Tehnolog za definirane konture pripremka iz biblioteke alata, koju stalno nadograđuje, odabire alat definira parametre rezanja, uvjete i način obrade. Nakon upisivanja potrebnih podataka za svaku operaciju tehnolog može virtualno provjeriti cijeli postupak obrade, te time izbjegći moguće kolizije u procesu obrade (Slika 8).



Slika 8: Verifikacija i simulacija obrade

Konačni rezultat cijelog procesa je NC program. Primjer jednog takvog NC programa dan je na slici 9, za konkretni primjer obrade na automatskom tokarskom obradnom centru i definiranoj upravljačkoj jedinici Eltro Pilot.

```
%5.000
N0 G96 S230 T01 M4 M7
N1 G95 F0.18
N2 G0 X54 Z38.662
N3 G0 X50.6
N4 G1 X46.6
N5 G1 Z30.543
N6 G1 X53.358 Z26.009
N7 G0 X53.758
N8 G0 Z38.662
N9 G1 X43.6
N10 G1 Z32.555
N11 G1 X46.6 Z30.543
N12 G1 X47 Z30.743
N13 G95 F0.13
N14 G96 S280
N15 G1 X49.758 Z31.771
N16 G1 Z32.05
N17 G0 Z38.662
N18 G0 X47.662
N19 G0 X0 Z0
N20 G42 G1 X42 Z39.062
N21 G1 Z32.662
N22 G1 X54.142 Z24.517
N23 G40 X0
N24 G95 F0.1
N25 G0 Z35.662
N26 G0 X46
N27 G1 X44
N28 G1 X-0.8
N29 G0 Z36.663
N30 G0 X52
```

Slika 9: NC program
spreman za upravljačku
jedinicu EltroPilot

6. ZAKLJUČAK

Ovaj rad imao je za cilj prikazati implementaciju naprednog CAD/CAM sustava i simulacijskih alata koji se koriste na Zavodu za industrijsko inženjerstvo i management za projektiranje procesa obrade i alata. Opće prednosti korištenja CAD/CAM kao i primjena Solidcam softvera objašnjene su na primjeru stvarnog proizvodnog okružja, te je dan prikaz virtualne simulacije i verifikacije obrade na automatiziranom tokarskom obradnom centru s novim definiranim postprocesorom za upravljačku jedinicu EltroPilot. Također dan je i osvrt na postupke programiranja, te naznačene njihove glavne karakteristike.

7. LITERATURA

- [1] Hans B. Kief: CNC for industry, Hanser Gardner Publications, 2000.
- [2] Zdravko Blažević: Programiranje CNC tokarilice i glodalice, Virovitica, 2004.
- [3] Woods, Susan "Stepin' Out". Cutting Tool Engineering 58 (4), (April 2006).
<http://www.ctemag.com/pdf/2006/0604-StepNC.pdf>. Retrieved 2008-10-27.
- [4] <http://www.strojotehnika.hr/hr/software.html>
- [5] SolidCam 2009 GPPTool Help Topics

APSORPCIJA ENERGIJE OJAČANIH ALUMINIJSKIH PJENA

ENERGY ABSORPTION OF REINFORCED ALUMINIUM FOAMS

Krešimir Grilec, Ivan Hrabrić, Gojko Marić

Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Ivana Lučića 5, Zagreb

Sažetak: Pjene općenito, kao i aluminijске pjene imaju mnoga povoljna svojstva zahvaljujući njihovoj poroznoj strukturi što ih čini pogodnima za mnoge primjene. Mogućnost apsorpcije energije je jedno od najzanimljivijih uporabnih svojstava pjena. Primjena lakih poroznih materijala visoke čvrstoće u transportnoj industriji je sve zanimljivija u pogledu povećanja sigurnosti. Aluminijske pjene se sve češće koriste kao različiti apsorberi kinetičke energije (odbojnici automobila, vlakova, tramvaja). U ovom radu istraživan je utjecaj ojačanja u obliku čeličnih šipki na ponašanje pri tlačnom opterećenju.

Ključne riječi: aluminijska pjena, tlačno ispitivanje, apsorpcija energije

Abstract: Foamed materials in general, and aluminium foams in particular, demonstrate a number of interesting properties due to their porous structure, which makes them usable in a wide range of applications. Possibility of absorbing the energy is one of the most interesting properties of foams. The use of lightweight porous materials with high specific strength has attracted much interest in the transportation industry in order to improve safety. Recently, foamed aluminium is frequently used in various absorbers of kinetic energy (buffers of automobiles, trains, trams). This paper studies the influence of reinforcement in the form of steel rods on compression behaviour of aluminium foams.

Keywords: aluminium foam, compression test, absorption of energy

1. UVOD

U svakodnevnom životu je široko rasprostranjena upotreba čelijastih materijala i oni se koriste za: izolaciju, konstruiranje, filtriranje i mnoge druge primjene. Za visoko porozne materijale je poznato da imaju visoku krutost kombiniranu s vrlo niskom specifičnom težinom. To je razlog što se često materijali koji se nalaze u prirodi (npr. drvo i kosti) koriste kao konstrukcijski materijali, [1].

Činjenica da se čak i metali i metalne legure mogu proizvoditi kao čvrste čelije ili metalne pjene nije tako dobro poznata kao mogućnost pjenjenja tradicionalnih konstrukcijskih materijala kao što su polimeri, keramike ili staklo. Metalne pjene nude interesantnu perspektivu zbog kombinacije osobina koje su povezane s osobinama metala s jedne strane i poroznom struktukrom s druge strane. U posljednjih 40 godina izvode se brojni pokušaji pjenjenja metala ili proizvodnje porozne metalne strukture, ali metode su trpjele zbog relativno visoke cijene i proizvodnje pjenastog materijala loše kvalitete, [2].

Metalne pjene mogu se proizvesti iz gotovo svih vrsta metala koji postoje u obliku praha, no zbog ranog stadija istraživanja komercijalno su danas najčešće dostupne metalne pjene na bazi aluminija (Al) i nikla (Ni). Po posebnoj narudžbi proizvode se i pjene na bazi magnezija, olova, cinka, bakra, bronce, titana, čelika pa čak i zlata, [3].

Relativno nova vrsta i oblik materijala, te činjenica da upravljanje procesima izrade nije usavršeno, ostavljaju veliku mogućnost napretka, kao i proširivanja znanja te usavršavanja proizvodnje metalnih pjena.

Osnovna svojstva metalnih pjena su:

- niska gustoća (masa),
- relativno visoka krutost,
- dobra izolacijska svojstva (zvuk, toplina),
- negorivost,
- odlična apsorpcija energije udara itd.

Tijekom proizvodnje formiraju se slučajne raspodjele šupljina različitih oblika, a neizbjježno je i nastajanje gусте površinske kore, koja značajno poboljšava savojnu krutost i izgled pjene. S druge strane, ta kora sadrži često nevidljive napukline i praznine koje mogu inicirati prijevremen lom pjene, naročito pri vlačnom opterećenju i kada su povoljni uvjeti za stvaranje napuklina u visokoporoznom materijalu. Zbog toga je vlačna čvrstoća aluminijskih pjena nedovoljna za efikasniju uporabu za jače opterećene konstrukcijske dijelove, iako je omjer krutosti i mase odličan. Rast napuklina u stjenkama čelija može se spriječiti ojačanjem pjena, slično kao kod ojačanja betona. Za ojačanje Al pjena rabe se različiti oblici mreža od nehrdajućih čelika. Ako materijal ojačanja ima viši modul elastičnosti i dovoljnu granicu tečenja, naprezanja se prenose s pjene na ojačavajući element i postojeća napuklina u čeliji postaje neaktivna, [3].

2. APSORPCIJA ENERGIJE UDARA

Primjena lakih poroznih materijala visoke čvrstoće u transportnoj industriji je sve zanimljivija u pogledu povećanja sigurnosti, [4]. Aluminijске pjene se sve češće koriste kao različiti apsorberi kinetičke energije (odbojnici automobila, vlakova, tramvaja), [5].

Način na koji su čelije oblikovane u metalnim pjenama omogućava apsorpciju energije udara u svim smjerovima. Oblik čelije približno je definiran matematičkim modelom poliedra tetrakaidekahedrona i to je čini neosjetljivom na smjer naprezanja, tj. izotropnom. Ta geometrija omogućava metalnim pjenama da apsorbiraju udarnu energiju iz bilo kojeg smjera i omogućava prijenos topline, toplinsku otpornost i protjecanje fluida također u svim smjerovima. Važno je naglasiti da se pjene s jednakom veličinom, periodičnom raspodjelom čelija i porozitetom mogu idealizirano smatrati izotropnim. Međutim, prilikom obrade i proizvodnje, nepravilnosti se uvijek javlja kod raspodjele čelija koje se same orijentiraju u određenom smjeru (obično je to smjer agensa za pjenjenje), dolazi do povećanja njihovog volumena i to rezultira nejednakim veličinama čelija, [6].

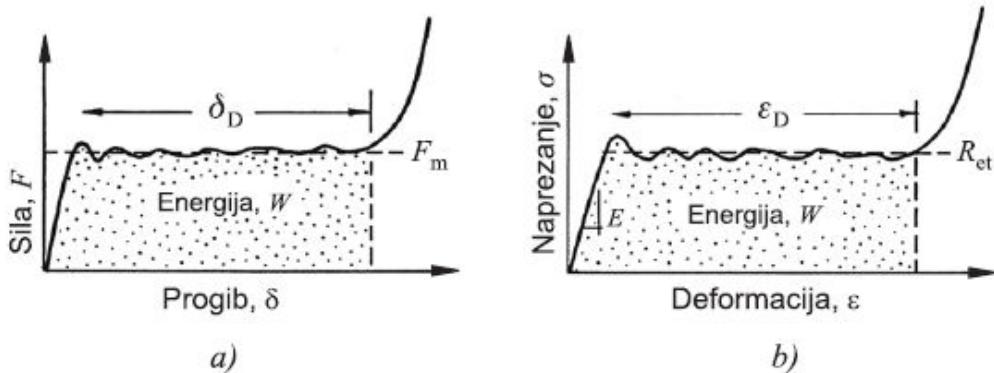
Apsorpcija energije udara po jedinici volumena (W) može se prikazati sljedećom relacijom:

$$W = \int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$$

Gdje je:

W – apsorbirana energija udara po jedinici volumena (MJ/mm^3)
 ili (N/mm^2)
 σ – tlačno naprezanje (N/mm^2)
 ε – deformacija (%)

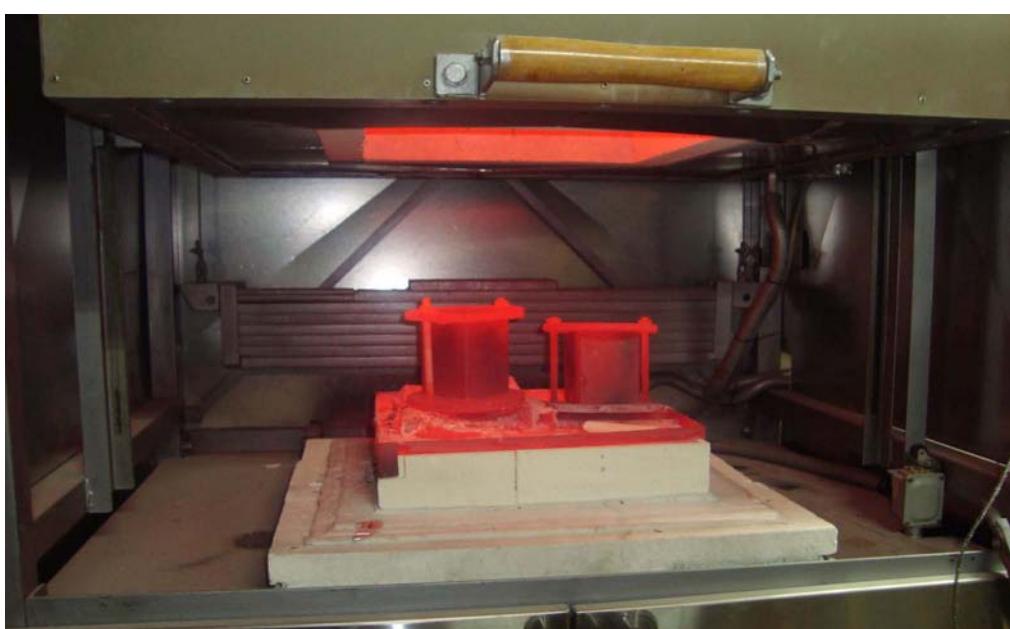
Bitno je da granica stlačivanja (R_{et}) bude tek nešto manja od naprezanja pri kojem dolazi do loma materijala, odnosno do dosizanja kritične deformacije zgušnjavanja (ε_D). Površina ispod krivulje $R_{et} - \varepsilon_D$ pokazuje kolika se količina energije udara može apsorbirati (slika 1).



Slika 1 - Krivulje koje prikazuju apsorpciju energije pri savijanju a) i tlaku b), [3]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U radu su ispitivani uzorci aluminijске pjene dobivene iz prekursora oznake Alulight AlMgSi 0,6 TiH₂ - 0,4. Prekursor je poluproizvod koji se proizvodi na način da se prah metalne legure, pomiješan s agensom koji omogućava pjenjenje, ekstrudira u profile pravokutnog presjeka. Materijal od kojeg je prekursor izrađen sastoji se od praha AlMgSi 0,6 pomiješan sa 0,4% TiH₂. Uzorci su izrađeni u Laboratoriju za nemetale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, a korištena je elektrootorna zvonasta peć sa zračnom atmosferom snage 7,5 kW (slika 2).



Slika 2 - Kalupi unutar peći prilikom izrade aluminijskih pjena

Izrađeno je 6 uzoraka aluminijске pjene od kojih su tri ojačana sa po 4 čelične šipke kvadratnog presjeka 6 × 6 mm, dužine 95 mm, međusobno zavarene kako bi stajale okomito u kalupu.

U tablici 1 navedeni su masa, relativna gustoća i dimenzije ispitivanih uzoraka

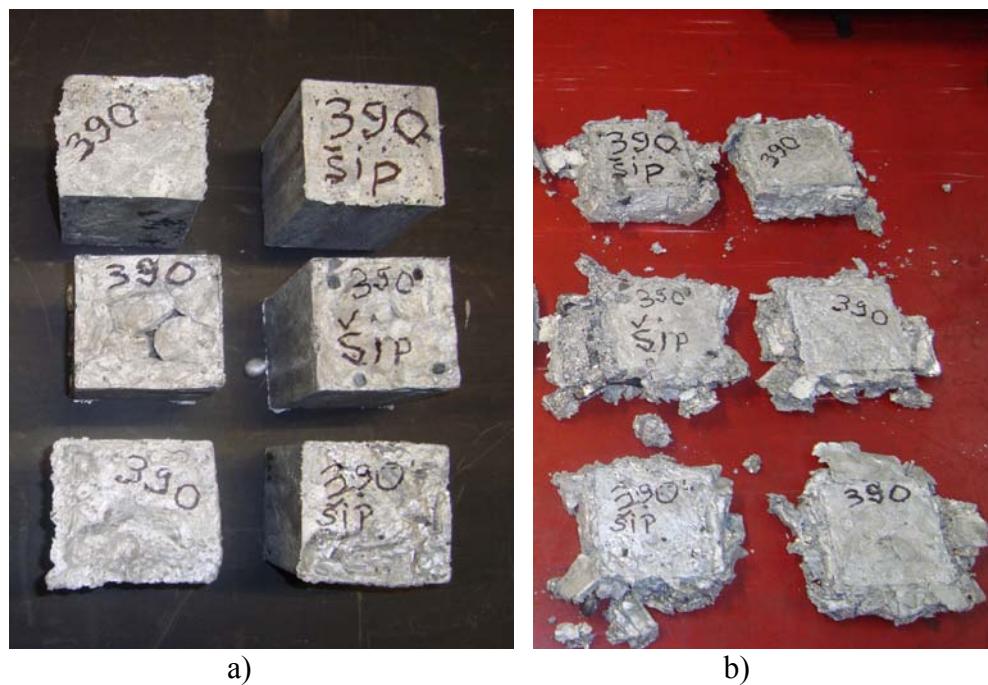
Tablica 1 - Uzorci aluminijskih pjena i brzine tlačenja

Oznake uzoraka	Neojačane aluminijске pjene (uzorci 390 sjaj 1, 390 sjaj 2, 390 sjaj 3)	Ojačane aluminijске pjene (uzorci 390 sjaj šipke 1, 390 sjaj šipke 2, 390 sjaj šipke 3)
masa, g	390	530
relativna gustoća	0,27	0,27
dimenzije, mm	74 x 74 x 100	

Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Za ispitivanje se koristila kidalica maksimalne tlačne sile od 400 kN. Brzina ispitivanja iznosila je 60 mm/min. Na slici 3 prikazan je proces ispitivanja uzorka, a na slici 4 uzorci prije i nakon ispitivanja

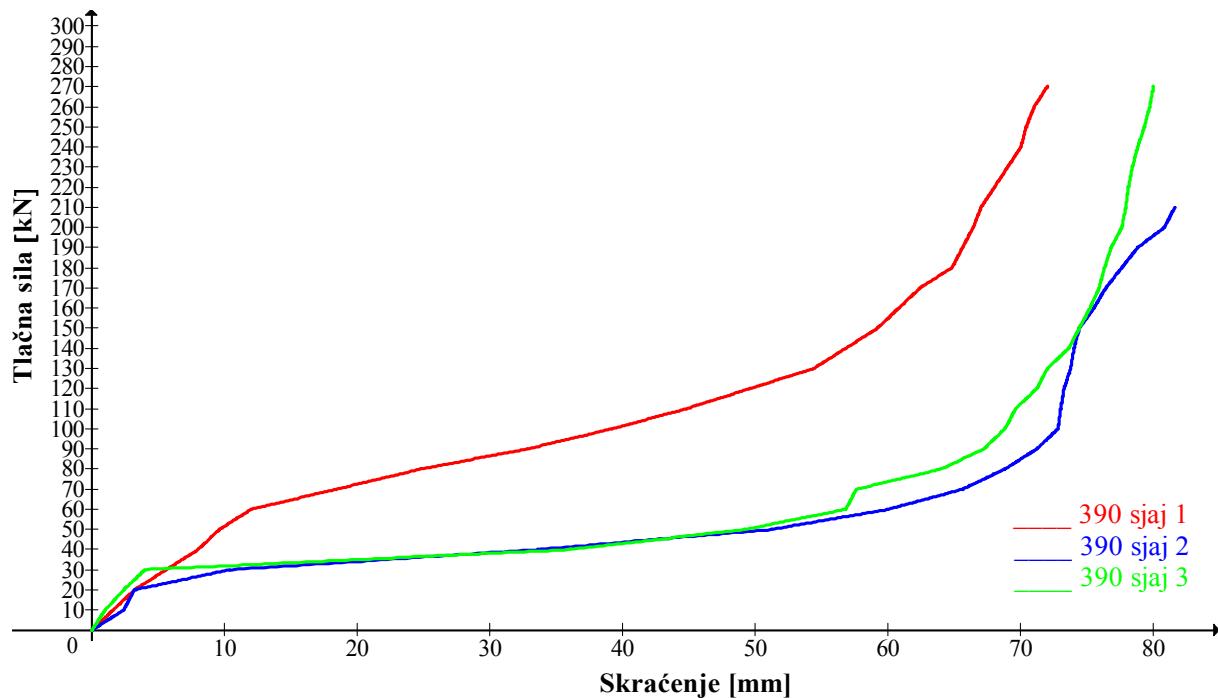


Slika 3 – Tlačno ispitivanje uzorka aluminijске pjene

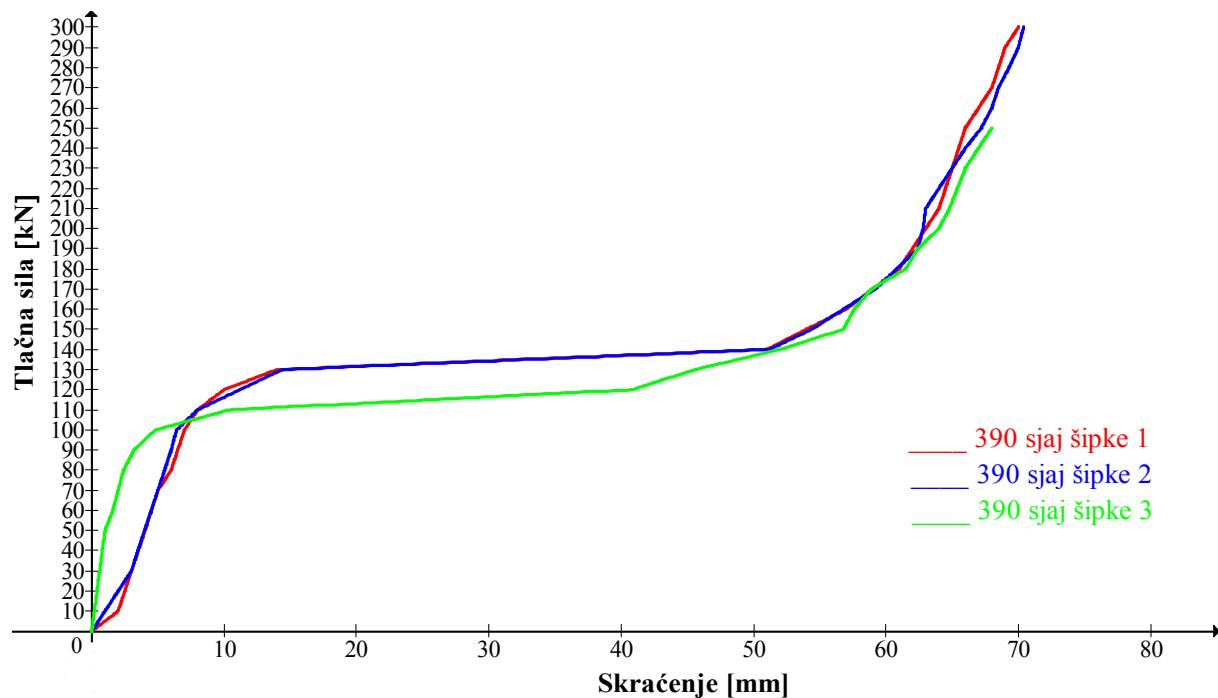


Slika 4 – Uzorci aluminijskih pjena, a) prije ispitivanja, b) nakon ispitivanja

Rezultati tlačnog ispitivanja uzorka prikazani su na slikama 5 i 6.



Slika 5 - Aproksimirani dijagram "tlačna sila – skraćenje" za uzorke "390 sjaj" (neojačane aluminijuske pjene)



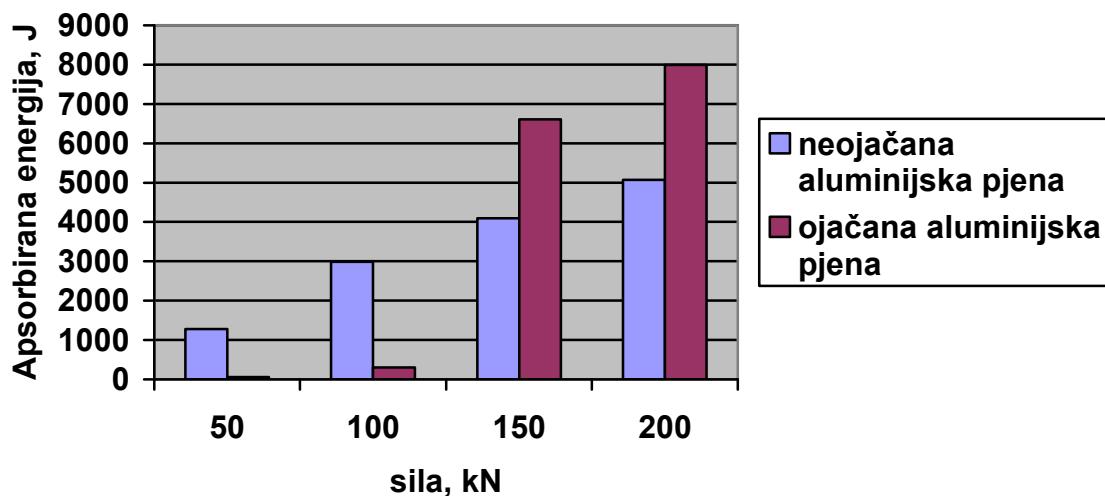
Slika 6 - Aproksimirani dijagram "tlačna sila – skraćenje" za uzorke "390 sjaj šipke" (aluminijuske pjene ojačane čeličnim šipkama)

Na slikama 5 i 6 vidljivo je da dodavanjem šipki krivulja u dijagramu zadržava oblik pogodan za apsorpciju energije (oblik je čak i nešto povoljniji) odnosno izraženje je postojanje konstantne sile tlačenja koja aktivira značajno skraćenje pri čemu se postiže velika apsorpcija energije. Jednako tako ta sila se pomici u područje viših vrijednosti te na taj način povećava apsorbiranu energiju.

Kako bi se usporedila količina apsorbirane energije koja se aktivira kod različitih razina sile tlačenja izračunata je površina ispod krivulje “sila – skraćenje” svih uzoraka do vrijednosti sile od 50, 100, 150 i 200 kN. Srednje vrijednosti rezultata su prikazane u tablici 2 i na slici 7.

Tablica 2 - Apsorbirana energija pri različitim tlačnim silama

uzorak	Apsorbirana energija W , [J] pri tlačnoj sili od 50, 100, 150 i 200 kN			
	W_{50}	W_{100}	W_{150}	W_{200}
Neojačana aluminijска pjena	1278	2988	4095	5069
Ojačana aluminijска pjena	59	298	6610	7992



Slika 7 - Histogramski prikaz srednje količine apsorbirane energije pri zadanim silama

Tablica 2 i slika 7 pokazuju da je pri manjim tlačnim silama apsorbirana energija veća za neojačane uzorke dok je pri većim tlačnim silama apsorbirana energija veća za uzorke aluminijskih pjena ojačane čeličnim šipkama.

4. ZAKLJUČAK

Dodavanjem ojačanja u obliku čeličnih šipki u aluminijsku pjenu krivulja u dijagramu “tlačna sila – skraćenje”zadržava oblik pogodan za apsorpciju energije (čak je i nešto povoljniji) odnosno izraženije je postojanje konstantne sile tlačenja koja aktivira značajno skraćenje pri čemu se postiže velika apsorpcija energije. Jednako tako ta sila se pomiče u područje viših vrijednosti te na taj način povećava apsorbiranu energiju. Pri manjim tlačnim silama (50 i 100 kN) apsorbirana energija je veća za neojačane uzorke dok je pri većim tlačnim silama (150 i 200 kN) apsorbirana energija veća za uzorke aluminijskih pjena ojačane čeličnim šipkama.

Zahvala

Prikazani rezultati su nastali u okviru projekta „Prototip uređaja za zaštitu od stražnjeg i bočnog podlijetanja na teretnim vozilima“ programa TEST – Tehnologiski istraživačko-razvojni projekti. Zahvaljujemo na potpori Ministarstvu znanosti, obrazovanja i športa.

LITERATURA

- [1] <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/364/1838/5.full.pdf+html>
- [2] D. Prusac, “Otpornost na trošenje keramičkih prevlaka na aluminijskim pjenama”, magisterski rad, Zagreb, 2007.
- [3] T. Filetin, I. Kramer, G Marić: “Metalne pjene”, Hrvatsko Društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2003.
- [4] S:Y: Kim, B.Y. Hur, K.C. Kwon, S.H. Cho, C.Y. Lim, Y.M. Yoo, M.H. Lee: “Mechanical and sound absorption properties of closed cell Al foam by pot furnace method”, International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology METFOAM 2003, Berlin
- [5] V.I. Lebedev, V.I. Komov, D.A. Andreev: “Ability of constructions from foamed aluminium to absorb different kinds of energy”, International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology METFOAM 2003, Berlin
- [6] <http://www.lib.ncsu.edu/theses/available/etd-11282004-014635/unrestricted/etd.pdf>

IZRADA POLIMERNOG KOMPOZITA OJAČANOG PRIRODNIM

VLAKNIMA

CONSTRUCTION OF NATURAL FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITE

Mario Krajinović, Gojko Marić,

Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Ivana Lučića 5, Zagreb

Sažetak: Jedan od velikih nedostataka sadašnjih kompozitnih materijala poput kompozita sa staklenim ili ugljičnim vlaknima jest nemogućnost njihova recikliranja. Nakon isteka životnog vijeka proizvoda ili dijela, iz kompozitnih materijala trenutno nije moguće razdvojiti vlakna i matricu, niti ih reciklirati drugim metodama osim deponiranjem ili usitnjavanjem za agregat pri polaganju cesta. Bio-polimerni kompoziti imaju sve veću primjenu i svijetlu budućnost upravo iz razloga recikličnosti, luke obnovljivosti, dostupnih izvora i ekonomičnosti, bez znatnih gubitaka mehaničkih svojstava. U ovom radu pokazana je izrada kompozitnog materijala, poliesterske matrice, ojačanog prirodnim, bambusovim vlaknima, te ispitivanje osnovnih mehaničkih svojstava ispitnog uzorka.

Ključne riječi: polimerni kompozit, prirodna vlakna, ispitivanje mehaničkih svojstava

Abstract: One of the main disadvantages of composite materials in use today, like glass or carbon fibre reinforced composites is the inability to recycle them. After the ending of a product or part life cycle, there is no way to separate the fibres from the matrix, or to recycle them except for deposition or shredding. Bio-polymer based composites have an increasing and bright future due to their recyclability, reproduction capability, available sources and economic factors without the fundamental loss of mechanical properties. This paper studies the construction of a natural – bamboo fibre reinforced composite material and the testing of basic mechanical properties of the test samples.

Keywords: polymer composite, natural fibres, testing of mechanical properties

1. UVOD

Bambus je biljka iz porodica trava (lat. Poaceae) koji u izobilju raste u većini tropskih zemalja i predstavlja jednu vrstu prirodnog kompozita jer se sastoji od celuloznih vlakana raspoređenih unutar ligninske matrice. Celulozna vlakna su usmjerena po dužini rasta, te bambusu pružaju najveće vrijednosti vlačne čvrstoće i krutosti u tom smjeru. Postoje preko 1200 vrsta bambusa koje su identificirane diljem svijeta, a bambus predstavlja i jedan od najstarijih građevinskih materijala. Postoje nekoliko razlika između bambusa i drva. Bambus nema zrakastu strukturu presjeka niti čvorova. Bambus je šuplja cijev, ponekad s vrlo tankim stjenkama, što otežava spajanje bambusa za razliku od običnog drveta. Bambus ne sadrži iste kemijske spojeve kao drvo, pa se može vrlo dobro spajati lijepljenjem. Bambus predstavlja vrlo jeftin i obnovljiv materijal, vrlo dobrih fizikalnih i mehaničkih svojstava, te alternativu drugim materijalima. Sve većim zahtjevima za ekološki prihvatljive materijale odgovaraju i kompozitni materijali prirodnog porijekla koji se za razliku od dosadašnjih materijala mogu razdvojiti i reciklično zbrinuti nakon isteka životnog vijeka proizvoda.

Kemijski sastav bambusa je sličan kemijskom sastavu drveta. Glavni konstituenti bambusove strukture su celuloza, hemiceluloza i lignin, koji iznosi više od 90% ukupne mase. Manje prisutni sastojci su smole, tanin, voskovi i anorganske soli. Bambus sadrži druge organske spojeve osim celuloze i lignina, poput 2-6% škroba, 2% saharida, 2-4% masti, te 0,8-6% proteina. Sadržaj ugljikohidrata ima važnu ulogu u trajnosti i duljini života bambusa. Trajnost bambusa protiv pljesni, gljivica i nametnika je snažno povezana s kemijskim sastavom. Za bambus je poznato da je osjetljiv na gljivične bolesti i napade insekata. Prirodna trajnost bambusa varira između 1 i 36 mjeseci, ovisno o vrsti i klimatskim uvjetima. Visoki sadržaj pepela u nekim vrstama bambusa može negativno utjecati na strojnu preradu.

Pojedini uzorci bambusovine, kao materijala prirodnog podrijetla, mogu se znatno razlikovati u fizičkim i mehaničkim svojstvima. Zbog toga se u trgovini bambusovinom i proizvodima od nje treba služiti normama i klasifikacijom WBO-a (eng. World Bamboo Organization). Vrijednost bambusovine kao materijala može dobro ilustrirati usporedba njezinih mehaničkih svojstava s mehaničkim svojstvima drva i ostalih sveprisutnih materijala – čelika i betona (slika 1). U odnosu na vlastitu masu, bambusovina ima bolja mehanička svojstva od drva i mnogih drugih materijala. Uteže se i bubri oko 0,14% pri svakoj promjeni vlage od 1%, a vлага ravnoteže iznosi 10% na 20° C i 65% relativne vlage zraka. [1]

MATERIJAL	NAPREZANJE	GUSTOĆA	ODNOS
ČVRSTOĆA			
Beton	8 N/mm ²	2400 kg/m ³	0,003
Čelik	160 N/mm ²	7800 kg/m ³	0,020
Drvo	7,5 N/mm ²	600 kg/m ³	0,013
Bambusovina	10 N/mm ²	600 kg/m ³	0,017
MODUL ELASTIČNOSTI			
Beton	25.000 N/mm ²	2400 kg/m ³	10
Čelik	210.000 N/mm ²	7800 kg/m ³	27
Drvo	11.000 N/mm ²	600 kg/m ³	18
Bambusovina	20.000 N/mm ²	600 kg/m ³	33

Slika 1. Usporedba čvrstoće i modula elastičnosti bambusa u odnosu na ostale materijale [1]

2. IZRADA KOMPOZITNOG MATERIJALA OJAČANOG VLAKNIMA BAMBUSA

Za izradu kompozita ojačanog prirodnim vlaknima potrebno je relativno malo opreme i osnovnih sirovina. Kao sirovina poslužila su osušeni trupci bambusa duljine 25-30 cm i promjera 3 cm. Za ekstrakciju vlakana potrebno je bilo ispitati najbolji način ručnog postupka izvlačenja, zbog nedostupnosti mehaničkih naprava za ekstrakciju. Zbog velike čvrstoće bambusa, potrebno je bilo usitnjavanje čekićem i natapanje u vodi kako bi se stabljika razdvojila i omogućila izvlačenje pojedinih vlakana rukom. Ručno izvlačenje vlakana je komplikiran postupak koji ne rezultira jednolikim vlaknima. Pri izvlačenju se događa da vlakna vrlo dobrog omjera presjek/duljina lome ili savijaju pri duljini od ~ 4 cm, što se pokazalo nedovoljnim za izradu ispitnih uzoraka na kalupu veličine 20 x 20 cm. Na slici 2. se vide vlakna koja su dobivena ručnim izvlačenjem. Svi uzorci su izrađeni u Laboratoriju za nemetale, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 2. Vlakna nakon sušenja

Za izradu ispitnog uzorka primjenjen je vrlo jednostavan i ekonomičan način izrade kompozitnog materijala ručnim polaganjem. Ručno polaganje se temelji na polaganju vlakana povezanih u neki oblik tkanja u kalup. Na njih se nanosi smola koja se impregnira u ojačanja pomoću valjaka ili kistova. Do umrežavanja smole (skrućivanja) dolazi pri atmosferskim uvjetima. Kao materijal za matricu se najčešće koriste poliesterske i epoksidne smole, ali i ostali tipovi poput vinil esterskih i fenolnih smola. Mogu se koristiti gotovo svi tipovi materijala za vlakna. Neke prednosti i nedostatci ovog postupka su:

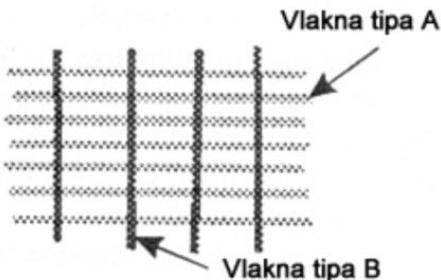
prednosti:

- brz i jednostavan postupak koji se primjenjuje već dulje vrijeme
- izradak neograničene veličine, složene geometrije, srednjeg volumena
- dobra kvaliteta površine
- malen trošak izrade alata
- veliki izbor vrsti materijala i dobavljača

nedostaci:

- kvaliteta postupka u velikoj mjeri ovisi o umješnosti radnika
- teško proizvesti kompozite s malim udjelom smole bez pukotina
- moraju se koristiti smole male viskoznosti što znatno utječe na svojstva

Ručnim izvlačenjem i naknadnim vaganjem je dobiveno 40.3 grama vlakana. Kako bi dobili dovoljnu debljinu uzorka, odlučeno je podijeliti skup vlakana na 4 dijela identične mase, kako bi dobili 4 sloja vlakana za izradu tkanja. Zbog male količine vlakana, neuniformnosti i nedostatka mehaničkih naprava za izradu tkanja, za ovaj zadatak je korištena orijentacija vlakana $0-90^{\circ}$ prikazano grafički na slici 3. Takva orijentacija dopušta umanjenje loših osobina jednosmjerne orijentacije vlakana i omogućuje širi spektar ispitivanja mehaničkih svojstava.



Slika 3. Shematski prikaz usmjerenja vlakana [2]

Zbog nedostatka boljih metoda poput vakuumskog spajanja koje omogućuje uklanjanje poroziteta uzrokovanih zarobljenim zrakom između pojedinih slojeva, uniformnog polaganja vlakana i sl., ručno polaganje je rađeno vrlo polako i oprezno kako bi se što više eliminirali nedostatci ovog postupka.

Za prvi stupanj nanošenja je izabrana smola kako bi vlakna imala neku podlogu koja bi ih početno zadržavala na mjestu, jer u suprotnom bi došlo do lijepljenja vlakana za kist i njihovog teškog orijentiranja. Nanošenje prvih slojeva se pokazalo komplikiranim zbog ranije navedenog razloga, kao i zbog male viskoznosti smole. Orientiranje vlakana se moralo provoditi skoro za svako vlakno zasebno, no zbog neuniformnih vlakana, nije pridavana prevelika važnost pojedinačnim vlaknima već općoj orijentiranosti sloja (slika 4).



Slika 4. Polaganje sloja vlakana i smole

Još jedan od problema ručnog izvlačenja i polaganja vlakana je i nepokrivenost cijele površine kalupa, što je posebice evidentno na rubovima, ali kako je pri konačnoj obradi uzorka rub uklonjen, ovome se nije pridavala veća važnost. Kako bi osigurali ravnomjernu

raspodjelu smole i eliminirali što više zraka iz kalupa, potrebno je osigurati dovoljan pritisak na kalup. To je izvedeno postavljanjem 35 kg utega na sami kalup i osiguravanjem dovoljno vremena za sušenje, skrućivanje i potpuno umrežavanje u trajanju od 3 dana. Rezanjem ploče (slika 5.) dobiveno je 15 epruveta za tri različite skupine po 5 epruveta za potrebe dalnjeg ispitivanja mehaničkih svojstava



Slika 5. Kompozitni izradak

3. ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA

Ispitivanje mehaničkih svojstava je provedeno na 15 epruveta, 3 različita oblika. Provedena su ispitivanja za dobivanje podataka o sljedećim svojstvima:

- udarna radnja loma – žilavost
- savojni modul elastičnosti
- međuslojna savojna čvrstoća

Udarna žilavost se izražava kao utrošena energija (energija loma) potrebna za deformaciju i lom zarezne epruvete - udarom. Ta energija se može izračunati preko izraza:

$$E = mg\Delta h$$

pri čemu je:

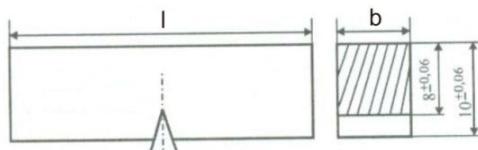
$E [J]$ - energija loma (udarna žilavost)

$m [kg]$ - masa udarnog bata

$g = 9,81 [m/s^2]$ - gravitacijsko ubrzanje

$\Delta h = h_1 - h_2 [m]$ - visinska razlika između dva položaja udarnog bata

Žilavost se najčešće određuje testom za ispitivanje udarne žilavosti (eng. *impact toughness*) po Charpyu koji je obuhvaćen u svim važnijim standardima. Za ovo ispitivanje je napravljeno 9 umjesto početnih 5 epruveta. Kako su 4 epruvete pokazale vrijednosti sa znatnim odstupanjem od ostatka mjerjenih epruveta, zaključeno je da je do takvih mjerjenja došlo zbog vrlo malog udjela vlakana u ispitnom području ili mjesta gdje je prisutno vlakno vrlo velikog presjeka, što je posljedica ručnog postupka. Ta mjerjenja su odbačena iz konačnih rezultata. Kako bi nadomjestili odbačene rezultate, naknadno je načinjeno još 8 epruveta, što je u konačnici dalo dovoljan broj ispravnih rezultata. Epruvete su zarezne V-epruvete shematski prikazane na slici 6., dimenzija i rezultata udarne radnje loma danih u tablici 1.



Slika 6. Shematski prikaz V-savojne epruvete [3]

Tablica 1. Dimenzije epruveta i rezultati dobiveni ispitivanjem žilavosti

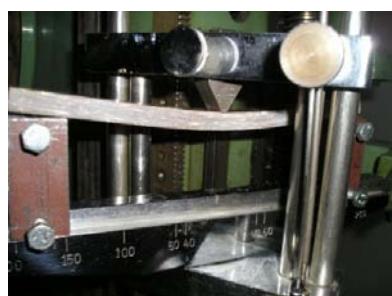
Redni broj epruvete	Dimenzije epruvete [mm]			Udarna radnja loma	
	b	h	l	kp	J/mm ² (*)
C1	10,1	8,02	80	1,8	
C2	10,2	8,2	80	1,1	
C3	9,88	8,16	80	4,0	0,0392
C4	9,54	8,04	80	4,1	0,0402
C5	9,82	8,1	80	8,0	
C6	9,98	8,07	80	5,9	0,0579
C7	9,91	8,2	80	4,1	0,0402
C8	9,96	7,98	80	9,5	
C9	9,95	7,97	80	2,6	0,0255

* 1 J = 9,80665 kp/m

Tablica 2. Usporedbena ploča: Mat stakleni 300g/ m², smola tix- scot bader (CHROMOS)[4]

Ep	a [mm]	b [mm]	L [mm]	[J]	[J/mm ²]
1	10,00	4,60	62	3,43	0,075
2	10,30	4,60	62	3,57	0,075
3	10,50	3,90	62	3,10	0,076
4	10,30	4,40	62	3,10	0,068
5	10,20	4,70	62	3,55	0,074

Savojnim ispitivanjem se utvrđuju mehanička svojstva u uvjetima savojnog naprezanja, na kidalici, uz pomoć naprave za pozicioniranje epruvete. Izabrano je 5 epruveta pravokutnog poprečnog presjeka, dimenzija danih u tablici 3. Također su dane i vrijednosti sile pri kojoj je došlo do loma epruvete. Primjenjeni mehanizam je ispitivanje savijanjem u 3 točke kako bi se ispitala međuslojna savojna čvrstoća (slika 7).



Slika 7. Savojno ispitivanje epruvete

Tablica 3. Dimenzije i vrijednosti savojne čvrstoće ispitivanih epruveta

Redni broj epruvete	Dimenzije epruvete [mm]			Savojna čvrstoća [N/mm ²]	F _{max} [N]
	b	h	l		
B1	9,16	10,04	120	95,27	352
B2	9,12	9,86	120	55,31	252
B3	9,08	9,62	120	66,72	294
B4	9,10	9,52	120	90,42	396
B5	9,08	9,7	120	63,47	282

Tablica 4. Usporedbena ploča: Mat stakleni 300g/ m², smola tix- scot bader (CHROMOS)[4]

EP.	h [mm]	b [mm]	F/f	L [mm]	E [N/mm ²]	Rms [N/mm ²]	Fmax [N]
1	2,9	10,5	32,052	64	8202,6	243,5	224
2	3,2	10,2	44,622	64	8749,4	220,6	240
3	3,2	10,3	42,61	64	8273,8	249,4	274
4	3,4	10,3	42,831	64	6933,7	211,2	262
5	3,5	10,1	42,014	64	6358,4	190,9	246

Za mjerjenje savojnog modula elastičnosti upotrijebljeno je 5 epruveta dimenzija danih u tablici 4. Ispitivanje je provedeno identično kao i ispitivanje savojne čvrstoće, s tim da je samo mjerjenje različito što je također prikazano u tablici 4. Kako dosada nije bilo poznato koliki prirast sile je potreban da bi se odredio savojni modul elastičnosti, prve dvije epruvete su bile iskorištene kako bi se odredio raspon prirasta savojnog naprezanja. Pokazalo se da prirast od 20N dovodi do loma epruvete nakon 5 koraka, dok prirast od 4N vodi do povećanog broja koraka koji nisu bili relevantni za mjerjenje. Preostale epruvete su bile podvrgнуте prirastu sile od 10N po koraku što je dalo adekvatne mjerljive rezultate. Mjerjenje savojnog modula elastičnosti je dano preko izraza:

$$E = \frac{l^3}{4 \cdot b \cdot h^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f}$$

pri čemu su:

$$E [\text{N/mm}^2] - \text{savojni modul elastičnosti}$$

l [mm] - duljina epruvete
 b [mm] – širina epruvete
 h [mm] – debljina epruvete
 ΔF [N] – prirast sile
 Δf [mm] – progib epruvete

Tablica 4. Dimenziije epruveta i dobiveni progibi za odgovarajući prirast sile

Epruveta		A1 *		A2 **		A3		A4		A5	
Dimenzije [cm]		b₁=15,24	h₁=9,9	b₂=15,22	h₂=9,9	b₃=15,33	h₃=9,2	b₄=15,2	h₄=9,4	b₅=15,34	h₅=9,6
Progib [cm]	Prirast sile [N]	0,74	20	0,05	4	0,29	10	0,34	10	0,26	10
		1,54	40	0,18	8	0,87	20	0,59	20	0,65	20
		1,82	60	0,33	12	1,03	30	0,79	30	0,82	30
		2,18	80	0,57	16	1,19	40	1,00	40	0,92	40
		2,78	100	0,71	20	1,38	50	1,22	50	1,17	50
			0,81	24	1,61	60	1,45	60	1,29	60	
			0,87	28	1,84	70	1,67	70	1,48	70	
			0,96	32	2,08	80	1,91	80	1,66	80	
			1,03	36	2,32	90	2,12	90	1,97	90	
			1,07	40	3,02	100	2,39	100	2,14	100	
			1,17	44	3,37	110	2,64	110	2,35	110	
			1,24	48	3,73	120	2,94	120	2,57	120	
			1,34	52...	4,35	130	3,22	130...	2,80	130...	
			1,58	186				3,81	210	3,03	214

Mjerenjem su dobiveni rezultati prikazani u tablici 5. koji su usporedivi sa rezultatima mjerenja polimernog kompozita ojačanog staklenim vlaknima dobivenim ispitivanjem na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (tablica 6.). Vrijedi napomenuti kako je prilikom mjerenja dobiveno veliko rasipanje rezultata koje je posljedica ručnog postupka polaganja i izvlačenja vlakana iz matrice uslijed savojnog opterećenja.

Tablica 5. Rezultati mjerjenja savojnog modula elastičnosti

ploča 1					E [kN/mm ²]	Fmax
EP.	h (cm)	b (cm)	F/f	I [cm]		
1	9,9	15,24	35,791	18,5	3,831	100
2	9,9	15,22	117,721	18,5	12,618	186
3	9,2	15,33	29,885	18,5	3,963	130
4	9,4	15,2	55,118	18,5	6,911	210
5	9,6	15,34	70,627	18,5	8,237	214
					$\Sigma=7,112$	

Tablica 6. Usporedbena ploča: Mat stakleni 300g/ m², smola tix- scot bader (CHROMOS) [4]

EP.	h [mm]	b [mm]	F/f	L [mm]	E [N/mm ²]	Rms [N/mm ²]	Fmax [N]
1	2,9	10,5	32,052	64	8202,6	243,5	224
2	3,2	10,2	44,622	64	8749,4	220,6	240
3	3,2	10,3	42,61	64	8273,8	249,4	274
4	3,4	10,3	42,831	64	6933,7	211,2	262
5	3,5	10,1	42,014	64	6358,4	190,9	246
		S	7703,6	223,1			

4. ZAKLJUČAK

Bit ovog rada je bila izrada kompozitnog materijala, poliesterske matrice, ojačanog prirodnim, bambusovim vlaknima, te ispitivanje osnovnih mehaničkih svojstava ispitnog uzorka. Nedostatak pri izradu ovog kompozitnog materijala je predstavljao nedostatak u svim koracima izrade. Prilikom dobivanja vlakana, potrebno je mehaničko ili kemijsko izvlačenje vlakana koje daje uniformna vlaka, te nemogućnost oblikovanja vlakana u tkanje. Pri samom postupku izrade – ručnim polaganjem je bilo nemoguće kontrolirati ni utjecati na udio zraka koji je ostao zarobljen u samom uzorku. Kako je postupak izrade najvažniji na utjecaj svih svojstava materijala, razumljivo je da vrijednosti dobivene ispitivanjem nisu potpuni prikaz mogućnosti bio-polimernog kompozita ojačanog bambusovim vlaknima. Ovako dobiven materijal pokazuje vrlo veliki potencijal svim uspoređenim materijalima u mehaničkim svojstvima udarne radnje loma, savojne čvrstoće te modula elastičnosti.

Zahvala

Svi rezultati su nastali tijekom izrade projekta iz kolegija „Napredne tehnologije materijala”, pri čemu je velika pomoć ukazana od strane g.Božidara Bušetinčana iz Laboratorija za nemetale, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

LITERATURA

- [1] <http://www.webgradnja.hr/images/clanci/147/index.aspx>
- [2] T. Filetin, G. Marić, predavanja iz kolegija Napredne tehnologije materijala, FSB, Zagreb, 2010.
- [3] <http://www.mechanicaluniversity.org>
- [4] podaci dobiveni iz Laboratorija za nemetale, FSB, Zagreb
- [5] Janssen, J.A., Building with bamboo (second edition), Intermediate Technology Publication Limited, London, 1995.

FRACTURE OF JAW ARM MADE OF CAST STEEL GS-42CrMo4

PRIJELOM POLUGE KLIJEŠTA OD ČELIČNOG LIJEVA GS-42CrMo4

Božo Smoljan, Dario Iljkic, Neven Tomašić, Furio Traven

Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, University of Rijeka, Vukovarska 58, HR-51000 Rijeka, Croatia

Abstract: Unsuitable mechanical behaviour of cast steel GS-42CrMo4 (EN) was investigated. In this paper the influence of inclusions and pouring temperature on mechanical properties of arm of carrying jaw made of cast steel GS-42CrMo4 (EN) was investigated. It was found out that high content of aluminium caused the formation of aluminium nitride, AlN which significantly decreased strength of casting. In the process of solidification enrichment of lamellas of AlN nitride arise on the grain boundaries. Because of low deformability of AlN nitride, initiation of fracture was possible at minimal deformation. The strength of the casting was not being raised by subsequent heat treatment. High pouring temperature and low cooling rates resulted in coarse-grained microstructure of steel casting. Coarse microstructure was not being reduced by subsequent heat treatment.

Keywords: cast steel, microstructure, mechanical properties

Sažetak: Istraživano je nepovoljno mehaničko ponašanje čeličnog lijeva GS-42CrMo4 (EN). U radu je prikazan utjecaj uključaka i temperature lijevanja na mehanička svojstva poluge klješta izrađenih od čeličnog lijeva GS-42CrMo4 (EN). Visok sadržaj aluminija uzrokovao je tvorbu aluminijevog nitrida AlN, kojim se bitno umanjila čvrstoća odljevka. Za vrijeme skrućivanja slitine došlo je do obogaćivanja lamela AlN nitrida na granicama kristalnih zrna. Zbog male deformabilnosti AlN nitrida, do iniciranja prijeloma došlo je već kod minimalne deformacije. Čvrstoća odljevka nije se povećala naknadnom toplinskom obradom. Visoka temperatura ulijevanja prouzrokovala je grubozrnatu strukturu. Grubozrnata struktura nije se usitnila naknadnom toplinskom obradom.

Ključne riječi: čelični lijev, mikrostruktura, mehanička svojstva

1. INTRODUCTION

The analysis of failure of arm of carrying jaw made of cast steel GS-42CrMo4 (EN) has been done. The jaw arm was produced by sand casting. Optimal temperature of pouring for this steel is approximately 1500 °C. Because of heavy dimension of investigated steel casting, temperature of pouring was 100 °C higher than optimal.

Due to non-uniform size and orientation of grains as well as to anomaly microstructural transformations during the cooling of castings, the load capacity of steel castings is lower than of wrought steels with the same chemical composition. Some of the negative influence of as-cast structure on mechanical properties of steel castings is possible to neutralize by the heat treating processes. Starting point in studying of the mechanical properties of steel castings can be the fact that the mechanical properties of steel castings are derived from the mechanical properties of ordinary steel metal matrix reduced by the influence of the typical as-cast structure on those properties [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Very undesired inclusion in steel castings is aluminium nitride, AlN. Because of brittleness, aluminium nitride, AlN causes very low toughness of steel castings. These inclusions are probably arising by folding in of surface films which are formed in reactions of aluminium and nitrogen from atmosphere. During the solidification and dendrite growth, these AlN films are pushed in the interdendritic regions, i.e., grain boundaries.

2. FRACTURE OF JAW ARM

Geometry of fractured jaw arm is shown in Figure 1.

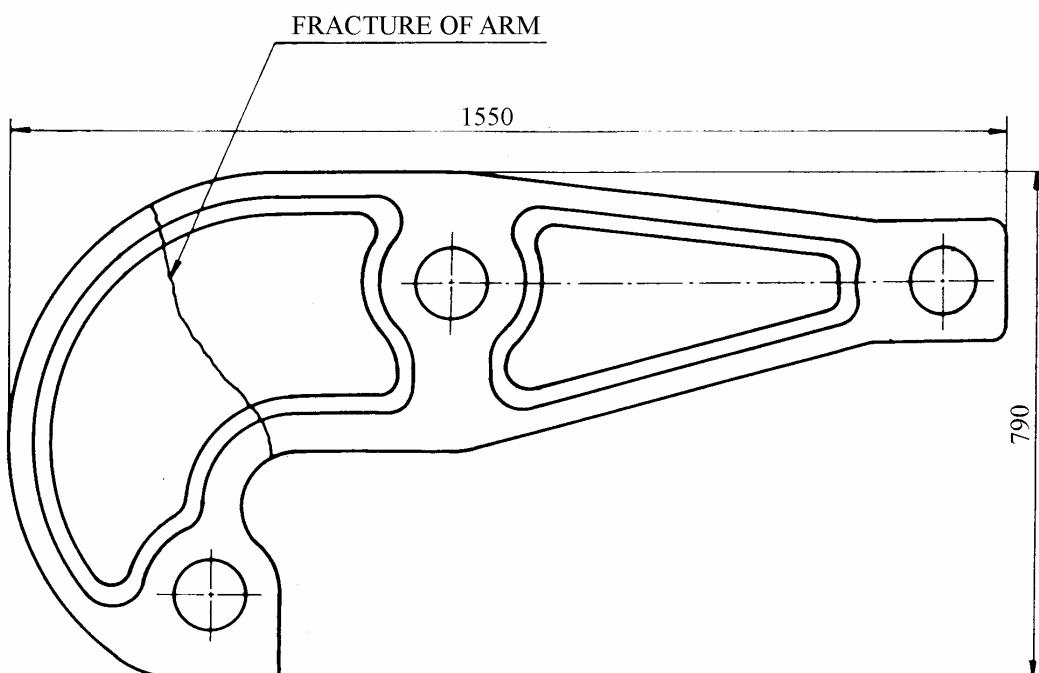


Figure 1. Geometry of fractured jaw arm

Fracture of the jaw arm take place in critical section. Fracture surface and manner of fracture of jaw arm are shown on Figure 2. It is visible that character of fracture was brittle. On fracture surface there are two distinguishable areas. At surface area of the fracture surface there is 10 to 20 mm depth of coarse-grained area which spreads from surface to core of the casting. At location of fracture surface which corresponds with internal area of the casting there is less coarse-grained area, in which is noticeable dendritic solidification. Figure 3 shows detail of the fracture surface.



Figure 2. Fracture surface of jaw arm



Figure 3. Detail of the fracture surface

Coarse-grained microstructure at surface area of fracture indicates that temperature of pouring was too high.

3. ANALYSIS OF CHEMICAL COMPOSITION OF JAW ARM

The chemical composition of investigated arm is shown in Table 1.

Chemical composition of investigated arm corresponds to the chemical composition of GS-42CrMo4 (EN) with increased phosphorus and silicon content (Table 2).

Table 1. Chemical composition of investigated arm

C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Cr, %	Mo, %	Al, %
0.45	0.57	0.56	0.038	0.021	0.91	0.24	0.16

Table 2. Chemical composition of GS-42CrMo4 (EN)

C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Cr, %	Mo, %
0.38-0.45	0.15-0.35	0.50-0.80	0.035 max	0.035 max	0.90-1.20	0.15-0.25

By chemical compositions analysis it was found out that content of aluminium was 0.16%, which is too high content for this kind of cast steel.

4. ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF JAW ARM

Results of mechanical testing are shown in Table 3.

Table 3. Results of mechanical testing

Ultimate tensile stress, N/mm ²	Yield strength, N/mm ²	Percent elongation, %	Hardness, HB	Impact toughness, KV, J
744	-	-	320	15

Because of extremely brittle fracture of tensile test specimen, it was not been possible to determine the yield strength of investigated steel. Likewise, because the fracture occurs in elastic area percent elongation was equal to zero.

Mechanical properties of cast steel GS-42CrMo4 (EN) are shown in Table 4.

Table 4. Mechanical properties of cast steel GS-42CrMo4 (EN)

Ultimate tensile stress, N/mm ²	Yield strength, N/mm ²	Percent elongation, %	Hardness, HB	Impact toughness, KV, J
900-1050	680	> 8	-	40

Results of mechanical testing show inadequate levels of ultimate tensile stress, yield stress, percent elongation, and impact toughness. Jaw arm was designed based on mechanical properties shown in Table 4 that are much more better than actual mechanical properties of investigated jaw arm.

5. ANALYSIS OF MICROSTRUCTURE OF JAW ARM

During the preparation of specimen for microanalysis some casting defects have been detected (Figure 4). This kind of defects was not found on fracture surface. These defects could be raised because of high temperature of pouring.

Microstructure of investigated casting is shown in Figure 5.

Microstructure consists of tempered martensite and bainite. Interdendritic segregations, which can be distinguished in surface and internal area of the fracture surface, are shown in Figure 6. Non-metallic inclusions, which are mainly consisted on sulphides, are placed in dendrite pockets.



Figure 4. Casting defects, 3:1



Figure 5. Microstructure of the casting: tempered martensite and bainite, 500:1, nital

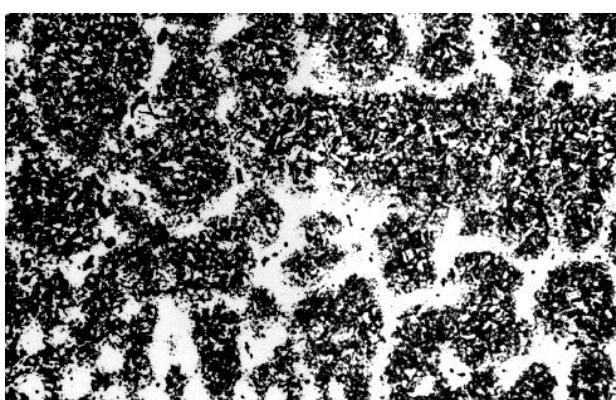


Figure 6. Interdendritic segregations, 30:1, natal

6. MICROANALYSIS OF FRACTURE SURFACE

Microanalysis of fracture surface by scanning electron microscope showed that micromorfology and microtopology differences between surface area and internal area of fracture surface is far less expressed than it was shown by macroscopic examination.

Figure 7 shows intergranular fracture in surface area. Figure 8 shows intergranular part of fracture in internal area.



Figure 7. Fracture surface in jaw arm surface area, 1000:1

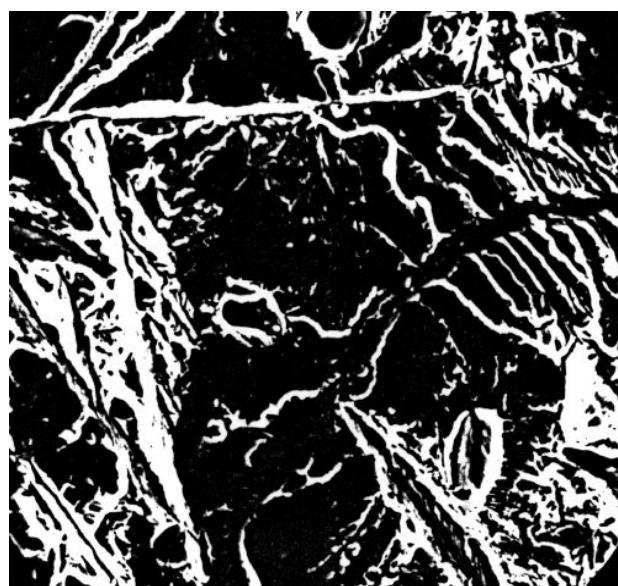


Figure 8. Fracture surface in internal area, 1000:1

By microanalysis there are also found out, that in internal area or area near the surface of the fracture, individually fields of ductile transgranular fracture are surrounding by intergranular part of fracture. Figure 9 shows transgranular parts of fracture. In fracture dimples, which are characteristic of ductile fracture, there are inclusions which are mainly consisted on sulphides.

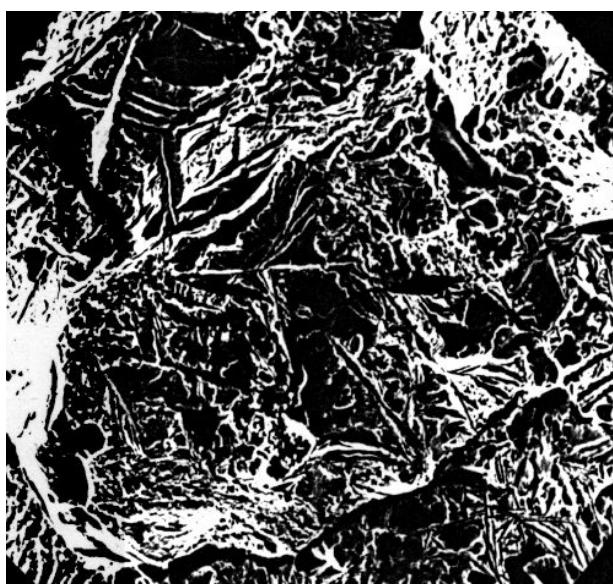


Figure 9. Fracture surface in internal area, 1000:1

By scanning electron microscope analysis of fracture surface was found out many lamellas on fracture surface. These lamellas indicated that jaw arm was fractured because of too high content of aluminium nitride, AlN, in the casting. So, the main reason of increased brittleness of the investigated jaw arm is too high content of aluminium. Aluminium was added in the process of deoxidation of steel casting. Adequate amount of the aluminium is necessary to add in melting bath to reduce dissolved oxygen in the process of deoxidation. Too high amount of aluminium could cause formation of the brittle aluminium nitride, AlN.

7. CONCLUSION

Based on the results of investigation of failure of jaw arm, it can be concluded that chemical composition of investigated steel casting conforms the requirement on chemical composition, and that the temperature of pouring was too high. Because of high content of aluminium high temperature of pouring was necessary in order to achieve good castability. Furthermore, high content of aluminium caused formation of aluminium nitride, AlN, which significantly decreased strength of casting. In the process of solidification amount of lamellas of AlN nitride was arise in grain boundaries. Because of low deformability of AlN nitride, initiation of fracture is possible at very low strain. The strength of the casting was not being raised by applied subsequent heat treatment. High temperature of pouring resulted in coarse-grained microstructure, which was not being refined by subsequent heat treatment.

REFERENCES

- [1]Campbell J., Castings, Oxford, United Kingdom: Butterworth Heinemann, 2003.
- [2]Smoljan, B., Iljkić, D., Tomašić, N., Fracture of Steel Casting, Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Modern Aspects of Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals”, 9-10 September 2010, Mariupol, Ukraine.
- [3]Smoljan, B., Iljkić, D., Microstructure and Mechanical Properties of Steel Castings, Proceedings Book of the 8th International Foundrymen Conference / Unkić, Faruk (ur.). - Sisak: Faculty of Metallurgy, University of Zagreb , 2008.
- [4]Svoboda J.M., Monroe R.W., Bates C.E., Griffin J., Appearance and Composition of Macro-inclusions in Steel Castings, AFS Transactions, 1987, vol. 95, pp. 187-202.
- [5]Cottrell A.H., The Mechanical Properties of Matter., Wiley, 1964, p. 82.
- [6]Hertzberg, R., Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, John Wiley and Sons Inc., 1995, chap. 2, 3, 4, 7, 10.

CRITICAL SUCCESS FACTORS IN QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS

KRITIČNI FAKTORI USPJEHA U SUSTAVIMA UPRAVLJANJA KVALITETOM

Doc.dr.sci. **Marija Šiško Kulis**
FESB, SPLIT & Hrvatska elektroprivreda
Gundulićeva 42, 21000 Split
e-mail:marija.sisko-kulis@hep.hr

Prof.dr.sci. **Dragana Grubišić**
Ekonomski fakultet Split
Mätze hrvatske 31, 21000 Split
e-mail:dragana.grubisic@efst.hr

Summary

The purpose of this paper is to identify critical success factors for implementing quality management systems. For this purpose, the first are categorized critical success factors according to different models of excellence (EFQM, MBNQA, DP), and then presented results of relevant empirical researches (over 30 studies). Finally, an overview of the most important attributes of identified critical success factors with a recommendation of their use is shown.

Sažetak

Svrha ovog rada je identificirati kritične faktore uspjeha za implementaciju sustava upravljanja kvalitetom. S tim ciljem, prvo su kategorizirani kritični faktori uspjeha prema različitim modelima izvrsnosti (EFQM, MBNQA, DP), a potom su prikazani rezultati relevantnih empirijskih istraživanja (preko 30 istraživanja). Na kraju je dan pregled najznačajnijih obilježja identificiranih kritičnih faktora uspjehnosti s preporukom njihova korištenja.

Kay words: Critical Success Factors, Quality Management Systems

Ključne riječi: kritični faktori uspjeha, sustavi upravljanja kvalitetom

1. UVOD

Ostvarivanje materijalne dobiti i opstanak na tržištu su najčešće misije tvrtki (organizacija) koje u današnje vrijeme recesije, turbulentnog okruženja i globalizacije postaju svojevrsni poslovni poduhvati. Na tragu toga sve se više organizacija okreće prema poboljšanju kvalitete poslovanja i upravo ovaj put prepoznaće kao viziju ostvarenja zacrtanih ciljeva. Kvaliteta se smatra važnom za suvremene organizacije zbog tri konkretna razloga: konkurenčije, proizvodnosti i troškova [19]. Međutim, sve je zanimljivije pitanje kako postići željenu kvalitetu. U principu, do nje se može doći na dva načina: prvim načinom koji predstavlja implementaciju jednog od sustava upravljanja kvalitetom kao što su ISO 9000, TQM (*Total Quality Management*), *Six Sigma*, *Kaizen*, Vitka proizvodnja, 5S, Metodologija dvadeset ključeva ili drugim načinom koji podrazumijeva jednostavno okretanje k kvaliteti u svim aspektima poslovanja organizacije ali bez formalne implementacije nekog konkretnog sustava upravljanja kvalitetom. U oba slučaja, jedan od prvih koraka je analiza kritičnih faktora uspjeha. Na tragu navedenog, treba razlučiti dva pojma: kritične faktore uspjeha upravljanja kvalitetom koji su, kao kategorija, subordinirani kategoriji kritični faktori uspjeha (*Critical Success Factors, CSFs*). Inače, CSF se susreću u svim sferama ljudskog djelovanja, počevši od sporta, umjetnosti, gospodarstva pa do znanosti. Najjednostavnije određenje kritičnih faktora uspjeha je koncept zasnovan na elementima koji su nužno potrebni da bi određena ideja, projekt ili tvrtka postigli svoju misiju.

Kritični faktori uspjeha, prema *Rockard i Bullen*, predstavljaju ograničeni broj područja čiji će zadovoljavajući rezultati osigurati uspješne konkurentne performanse za pojedinca, odjel ili organizaciju [34]. Isto tako, kritični faktori uspjeha mogu se odrediti i kao one karakteristike proizvoda koje posebno cijeni i vrednuje određena skupina i prema čemu organizacija u njima mora nadmašiti konkurenčiju [40].

Ovaj koncept je prvi osmislio *Ronald D. Daniel*, a publicirao ga je 1961. godine u *Harvard Business Review, HBR*. Međutim šira primjena ovog koncepta događa se deset godina kasnije kada ga je *John F. Rockart*, na *MIT Sloan School of Management*, primijenio te se od tada intenzivno koristi u provedbi strategije tvrtke kao i realizaciji raznih projekata [37]. Postoji nekoliko kategorizacija kritičnih faktora uspjeha, među kojima su najpoznatije dvije. Prva kategorizacija kao kriterij uzima područje implementacije, kao što su: industrija, strategija, okoliš i vrijeme [32]. Druga kategorizacija, prema *Rockart* (1979), kao kriterij uzima tipsku dimenziju i za kritične faktore uspjeha organizacije nominira njih devet: financije: pozitivan novčani tok, rast prihoda i dobit izvođača; stjecanje novih kupaca i/ili distributera; zadovoljstvo kupaca; kvalitetu; razvoj proizvoda/usluge; intelektualni kapital; strateške odnose; privlačenja i zadržavanja zaposlenika i održivost [30].

Iz navedenog se vidi da je prije više od trideset godina kvaliteta prepoznata kao jedan od ključnih faktora uspjeha organizacije.

Nadalje, i u kvantitativnom smislu kritični faktori uspjeha nisu uvijek bili jednoznačni. Ono što je sigurno to je činjenica da je njihov broj ograničen obično u intervalu između pet i osam, a čine ga varijable koje imaju izravan i jak utjecaj na efikasnost, efektivnost i održivost organizacije, programa, odnosno projekta. Aktivnosti vezane uz CSF moraju se obavljati na najvišoj mogućoj razini izvrsnosti kako bi se ostvarili planirani ciljevi [33].

Na tragu navedenog, kritični faktori uspjeha u sustavima upravljanja kvalitetom mogu se odrediti kao ključni elementi nužni da bi sustav upravljanja kvalitetom polučio očekivane rezultate. Kategorizacija im je relativno široka u kvalitativnoj i kvantitativnoj dimenziji, počevši od kriterija samocijenjivanja, kriterija modela izvrsnosti do kriterija koji predstavljaju rezultate brojnih empirijskih istraživanja. Više detalja daje se u nastavku.

2. KRITIČNI FAKTORI USPJEHA UPRAVLJANJA KVALITETOM PREMA MODELIMA IZVRSNOSTI

Kritični faktori uspjeha upravljanja kvalitetom u uskoj su vezi s modelima izvrsnosti. Naime, za dobivanje prestižnih nagrada, koje se dodjeljuju temeljem pojedinih modela izvrsnosti, određeni su kritični faktori uspjeha kao kriterij dodjele nagrade. U kontekstu spomenutog, kritični faktori uspjeha upravljanja kvalitetom, kriterij dodjele nagrade i element dodjele nagrade najčešće se koriste kao sinonimi. U svakom slučaju značenje je isto. Međutim, specifikacija tih faktora u kvantitativnom i kvalitativnom smislu ovisna je o modelu izvrsnosti i kako postoji veliki broj modela izvrsnosti tako postoje i brojne klasifikacije istih. Ovdje ćemo se osvrnuti na najčešće korištene modele izvrsnosti u svijetu. To su:

- Europski model Europske zaklade za upravljanje kvalitetom (*European Foundation Quality Model, EFQM*), koji se primjenjuje i za natječaj za nagradu *European Quality Award, EQA*.
- Američki model (*Malcolm Baldrige National Quality Award, MBNQA*).
- Japski model (*Deming Prize, DP*).

Prema definiciji EFQM-a IZVRSNOST je natprosječna vještina vođenja organizacije i postizanja rezultata. Potrebno je napomenuti da modeli izvrsnosti predstavljaju sustavni, integrirani i trajniji pristup poboljšavanju, odnosno integriranu strategiju. Ti modeli mogu poslužiti za pripremanje kompanije za natjecanje za odgovarajuću nagradu za kvalitetu, ili za planiranje i neprestano provođenje poboljšavanja. Oni omogućuju objektivno utvrđivanje položaja kompanije na skali izvrsnosti, ali također otkrivaju i područja u kojima je ona slaba odnosno jaka [31]. Znači, korištenjem modela izvrsnosti otkrivaju se slabe i jake strane tvrtke. Strategijom, planovima i politikama t nastoji potencirati i koristiti jake strane tvrtke, a slabe strane unaprijediti ili neutralizirati.

Potrebno je osvrnuti se na temeljne karakteristike ova tri najpoznatija modela izvrsnosti. EFQM model izvrsnosti predstavljen je 1992. godine [36]. Sastoji se od devet faktora: prvi pet odnosi se na činitelje (vodstvo, ljudi, politika i strategija, partnerstvo i resursi, procesi), a preostalih četiri na učinke odnosno rezultate (rezultati s obzirom na ljudе, rezultati s obzirom na potrošače, rezultati s obzirom na društvo, rezultati s obzirom na ključne performanse) [61]. Najveći stupanj ovog modela izvrsnosti predstavlja *European Quality Award* koja je ujedno i najprestižnija europska nagrada za organizacijsku izvrsnost. Dodjeljuje se u četiri kategorije: velika poduzeća i poslovne jedinice, operacijske jedinice unutar kompanija, organizacije iz javnog sektora, mala i srednja poduzeća. EFQM model izvrsnosti nije samo mjerilo za dobivanje nagrade, već vrlo korisno sredstvo za samoprocjenu poduzeća. Istinski izvrsne organizacije su one koje teže zadovoljavanju svojih vlasnika onime što postižu i načinom na koji to postižu.

Malcolm Baldrige National Quality Award ustanovljena je 1987. godine na temelju zakona koji je prihvatio američki kongres. Dodjeljuje je predsjednik SAD-a poslovnim subjektima (proizvodni i uslužni, mali i veliki), obrazovnim i zdravstvenim organizacijama koje se prijave, a moraju biti natprosječno dobre prema sedam (7) faktora : vodstvo (do 110 bodova), strateško planiranje (do 80 bodova), usmjerenost na potrošače i tržište (do 80 bodova), informacije i analiza (do 80 bodova), razvoj i upravljanje ljudskim resursima (do 100 bodova), upravljanje procesima (do 100 bodova) i poslovni rezultati (do 450 bodova). Maksimalni broj bodova je 1000. Tvrte koje se žele natjecati trebaju uz prijavu priložiti i dokumentaciju o svojim sustavima kvalitete, a one koje prođu inicijalnu provjeru podvrgnute su ispitivanju tima za procjenjivanje. Ovaj tim ispitivača provjerava svaku prijavu i zatim odlaze u organizacije koje su ušle u uži krug kako bi se provjerili navodi iz prijave i razjasnile eventualne nejasnoće. Svaki prijavljeni zatim primi njihovu analizu o svim njihovim jakim i slabim stranama, te područjima na kojima su moguća poboljšanja. Na kraju se odabiru pobjednici u svih pet kategorija: proizvodnja, usluge, mala poduzeća, obrazovanje i zdravstvo [29].

Deming Prize nagradu dodjeljuje Japansko društvo znanstvenika i inženjera. Postoje tri kategorije za dodjelu nagrade: *Deming Prize for Individuals*, *Deming application Prize for Business?* (za tvrtke) i *Quality Control Award for Operations Business Units* (za pojedine dijelove tvrtki). Nagrada se dodjeljuje jednom godišnje tvrtkama koje postižu zadovoljavajuće rezultate prema slijedećih deset (10) faktora: politika i ciljevi, način upravljanja organizacijom, obrazovanje, upravljanje informacijama, analize, metode i tehnike, odnosno alati primjenjeni na rješavanju problema, standardizacija, kontrola kvalitete, osiguranje kvalitete, rezultati, planovi za budućnost [35].

Za sve tri opisane nagrade zajednička je karakteristika da se zasnivaju na temeljnim koncepcijama i načelima potpunog upravljanja kvalitetom. Nadalje, kriteriji odnosno kritični faktori upravljanja kvalitetom, koji se vrednuju temeljem propisanih procedura ovih modela kvalitativno i kvantitativno se razlikuju, što je zorno prikazano u tablici 1.

Tablica 1: Usporedba kriterija triju modela izvrsnosti

	EFQM	MBNQA	Deming Prize
1.	Orijentiranost na rezultate	Vodstvo	Politika i ciljevi
2.	Usmjerenost na kupce	Strateško planiranje	Način upravljanja organizacijom
3.	Vodstvo i konstantnost svrhe	Usmjerenost na potrošače i tržište	Obrazovanje
4.	Upravljanje kroz procese i na temelju činjenica	Informacije i analiza	Upravljanje informacijama
5.	Razvijanje i uključenost zaposlenika	Razvoj i upravljanje ljudskim resursima	Analize (metode i tehnike, odnosno alati primjenjeni na rješavanju problema)
6.	Stalno učenje	Upravljanje procesima	Standardizacija
7.	Inovativnost i unapređivanje	Poslovni rezultati	Kontrola kvalitete
8.	Razvijanje partnerstva		Osiguranje kvalitete
9.	Javna odgovornost		Rezultati
10.			Planovi za budućnost

Kako se vidi iz tablice 1, najveći broj kriterija izvrsnosti ima *Deming Prize* nagrada (deset kriterija), a najmanje MBNQA (sedam).

3. PREGLED REZULTATA EMPIRIJSKIH ISTRAŽIVANJA

Da bi se stvorila kvalitetna i jasna slika problematike kritičnih faktora upravljanja kvalitetom potrebno se osvrnuti na podatke iz dostupne relevantne literature. Na tragu navedenog, u relevantnoj literaturi pronađeno je niz kategorizacija ovih faktora, a njih 30 prikazano je u tablici 2.

Tablica 2: Pregled kritičnih faktora upravljanja kvalitetom

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	
Ahire i sur. (1996)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X											
Ang et al. (2000)		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X											
Babbar & Aspelin (1994)	X					X		X																	
Black & Porter (1996)		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X											
Blank (1978)																					X				
Claver i sur. (2003)	X				X	X	X	X	X												X	X	X	X	
Crosby (1979)	X					X																			
Crosby (1986)																					X	X	X	X	
Das i sur. (2006)	X				X	X	X	X	X																
Dale (1999)	X					X	X	X	X												X	X	X	X	
Deming (1975)						X																			
Deming(1982)	X		X	X	X																				
Feigenbaum (1961)							X	X													X	X	X	X	
Flynn i sur. (1994)	X		X	X	X	X	X	X																	
Grocock (1986)			X																						
Hill & Wilkinson (1995)	X						X	X	X	X										X	X	X	X	X	

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x
Ishikawa (1985)					X																			X
Juran (1962)		X			X																			X
Juran (1980)		X	X																					X
Kanji 1990																								X
Nwabueze (2001)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X								
Oakland (1989)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X							
Oakland(1993)	X	X																					X	X
Pheng & Wei (1996)		X				X	X			X														
Saraph i sur. (1989)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X							
Shewhart (1931)		X																						
Tari (2005)	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Thiagarajan i sur. (2001)		X			X		X		X		X		X		X									
Zairi (1992)																		X						
Zhang i sur. (2000)	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X							

Gdje je:

- a. Opredijeljenost top menadžmenta, Vodstvo (*Top Management Commitment, Leadership*).
- b. Strateško upravljanje kvalitetom, Planiranje (*Strategic Quality Management, Planning*).
- c. Menadžment procesa (*Process Quality Management*).
- d. Projektiranje upravljanja kvalitetom (*Design Quality Management*).
- e. Obrazovanje i osposobljavanje (*Education and Training*).
- f. Dobavljačeve upravljanje kvalitetom (*Supplier Quality Management*).
- g. Zadovoljstvo kupca, Usmjerenost na kupce (*Customer Satisfaction, Using Customer Feedback, Customer Focus*).
- h. Osnaživanje i uključivanje zaposlenika (*Employee Empowerment and Involvement*).
- i. Poslovni rezultati (*business results*).
- j. Informacije i analiza (*information and Analysis*).
- k. Najbolja praksa (*Benchmarking*).
- l. Resursi (*Resources*);
- m. Utjecaj na društvo i okoliš (*Impact on Society and Environment*).
- n. Statistička kontrola procesa (*Statistical Process Control*).
- o. Kultura (*Culture*).
- p. Proizvodnja bez škarta (*Zero Defects*).
- q. Politike kvalitete (*Quality Policies*).
- r. Mjerenje troškova kvalitete (*Measuring Quality Costs*).
- s. Timski rad (*Teamwork*).
- t. Sustavi kvalitete (*Quality Systems*).
- u. Kontinuirano poboljšavanje (*Continuous Improvement*).
- v. Inovacija proizvoda (*Product Innovation*).
- w. Nagrade i priznanja (*Reward and Recognition*).
- x. Kvaliteta proizvoda (*Product Quality*).

Znači, u navedenim istraživanjima ukupno su razmatrana 24 različita kritična faktora upravljanja kvalitetom, i njihov broj varira od autora do autora. Razlog leži u raznolikosti uzorka istraživanja bilo u kvalitativnoj dimenziji (profilu poduzeća, temeljnoj djelatnosti) bilo u kvantitativnoj dimenziji (broju poduzeća u uzorku). Osim toga, neka od navedenih istraživanja nisu isključivo orijentirana na specifikaciju kritičnih faktora upravljanja kvalitetom već su poneka istraživala samo jedan ili par faktora koja su posebno važna za ispitni uzorak.

Nadalje, rezultati relativno novijih empirijskih istraživanja (*Hill & Wilkinson, 1995; Dewhurst i sur., 1999; Claver i sur., 2003; Tari, 2005; Das, 2006;*) ukazuju na deset najvažnijih kritičnih faktora upravljanja kvalitetom:

- 1. Opredijeljenost top menadžmenta (*Top Management Commitment*).
- 2. Dobavljačeve upravljanje kvalitetom (*Supplier Quality Management*).
- 3. Kontinuirano poboljšavanje (*Continuous Improvement*).
- 4. Inovacija proizvoda (*Product Innovation*).
- 5. Najbolja praksa (*Benchmarking*).
- 6. Uključenost zaposlenika (*Employee Involvement*).
- 7. Nagrade i priznanja (*Reward and Recognition*).
- 8. Obrazovanje i osposobljavanje (*Education and Training*).
- 9. Usmjerenost na kupca (*Customer Focus*).
- 10. Kvaliteta proizvoda (*Product Quality*).

4. ANALIZA KARAKTERISTIKA DESET NAJVAŽNIJIH KRITIČNIH FAKTORA UPRAVLJANJA KVALitetom

4.1. Opredijeljenost top menadžmenta kao CSF

Ovaj prvi faktor je istaknut u kategorizacijama velikog broja istraživača i može se reći da je Opredijeljenost top menadžmenta jedan je od ključnih čimbenika uspjeha organizacije u cjelini. To pokazuju rezultati brojnih empirijskih istraživanja (*Ahire i sur.*, 1996.; *Barbar & Asperin*, 1994.; *Claver i sur.*, 1979.; *Das i sur.*, 2006.; *Dewhurst*, 1999.; *Flynn*, 1994.; *Hill & Wilkinson*, 1995.; *Oakland*, 1993.; *Tari*, 2005.; *Zhang*, 2000.) kao i drugih empirijskih istraživanja (*Ramirez & Loney*, 1993.; *Zairi & Youssef*, 1995.; *Ali*, 1997.; *Daytonu*, 2001.; *Saraf i sur.*, 1989.-; *Thiagarajan*, 1996.; *Rao i sur.*, 1999.; *Zhangi i sur.*, 2000.; *Pun*, 2001.; *Sureshchandar i sur.*, 2001.; *Lau & Idris*, 2001.; *Li i sur.*, 2001.). Isto tako, o važnosti ovog faktora svjedoče i rezultati istraživanja u različitim tvrtkama diljem svijeta, kao što su *Asahi Breweries Ltd.*, Japan (*Nakajo & Kono*, 1989.), *Xerox, Inc*, USA (*Kenedy*, 1989.), *Dunlop, Ltd*, Malaysia (*Seetharman*, 2006.), *Dow Coming-Pvt. Ltd*, Australia (*Champan*, 1991.). Ono što je presudno za uspješno upravljanje kvalitetom je upravo ovaj faktor, tj. potreba da menadžment organizacije uspostavi formalnu politiku kvalitete jer jedino tada zaposlenici neće uspostavljati vlastite politike [11]. Drugim riječima, djelotvorno upravljanje kvalitetom počinje od vrha, a ne u odjelu za kvalitetu [13].

Na tragu navedenog, nedvojbena je konstatacija da je opredijeljenost menadžmenta jedan od najvažnijih *CSF-a*. Međutim, itekako je važno i zanimljivo saznanje o vrsti menadžerskih aktivnosti kroz koje se iskazuje ovaj faktor. Stoga se u nastavku daju rezultati nekoliko relevantnih empirijskih istraživanja koji pokazuju da se predanost menadžmenta očituje u sljedećim aktivnostima:

- Povećanje prioriteta kvalitete u odnosu na troškove i vremensku dinamiku planiranja (*Ferdows & Demeyer*, 1990.; *Garvin*, 1984.).
- Osiguravanje adekvatnih resursa za provođenje upravljanja kvalitetom.
- Ulaganja u ljudske potencijale i financijske resurse (*Chapman i sur.*, 1991.; *Ham & Williams*, 1986.).
- Ugradnju kategorije kvalitete u proceduru evaluacije performansi za sve parametre unutar organizacije (*Saraph i sur.*, 1989.).

4.2. Klijentovo (dobavljačeve) upravljanje kvalitetom

Visoka kvaliteta ulaznih materijala (poluproizvoda) za tehničke kompetentne, kao i pouzdan i fleksibilan način poslovanja dobavljača, je preduvjet za visoku kvalitetu gotovog proizvoda [42]. Naime, u proizvodnim organizacijama, gdje se glavni fokus stavlja na kvalitetu proizvoda, jedan od važnijih ciljeva odjela za kvalitetu je minimalizacija troškova. U uskoj vezi s troškovima je kvaliteta proizvoda kojeg isporučuje dobavljač (poluproizvoda i/ili sirovine) jer ako je ona niža od zahtijevane dolazi do izravnog povećanja troškova proizvodnje. Naime, u tom slučaju poluproizvod ili finalni proizvod se mora odbaciti (škart) ili sanirati. U suprotnom, ako je kvaliteta proizvoda kojeg isporučuje dobavljač u skladu sa specifikacijama ili čak bolja od toga, proces proizvodnje se ubrzava, finalni proizvod je kvalitetniji što, u principu, rezultira pozitivnim financijskim posljedicama. U nekim slučajevima, kad se radi o proizvodima velikih vrijednosti (turbine, generatori, transformatori, zrakoplovi, brodovi,...) povećanje kvalitete i skraćenje rokova isporuke (u odnosu na ugovorenou) može rezultirati premiranjem od strane naručitelja. U svakom slučaju, dobavljačeve upravljanje kvalitetom je vrlo važan faktor u procesu proizvodnje, a ista stvar je i u uslužnim djelatnostima.

Znači, razvijanje dugoročno kooperativnog odnosa s dobavljačima, redovito sudjelovanje u aktivnostima osiguranja i kontrole kvalitete dobavljača i davanje povratne informacije o izvedbi proizvoda su nužne aktivnosti kako bi se osigurala kontinuirana opskrba sirovinama/poluproizvodima zahtijevane kvalitete [72].

4.3. Kontinuirano poboljšanje

Kontinuirano poboljšanje je filozofija unapređenje aktivnosti koje uspjehe povećavaju, a neuspjehe smanjuju. Koncepcijski temelj kontinuiranog unapređivanja nalazi se u *Shewartovom ciklusu (Shewart Cycle)*, ili *Demingovom krugu PLANIRAJ – ČINI – PROVJERI – DJELUJ*.

Koncept neprekidnog poboljšanja procesa temelji se na pretpostavci da je svaki rad niz međusobno povezanih koraka i aktivnosti koji rezultiraju nekim *izlazom*. Stalna kontrola nad svakim korakom u radnom procesu, kao i stalno poboljšanje njegovog izvršenja, smanjuje promjenjivost izlaza (proizvoda/usluge), poboljšava pouzdanost i raspoloživost procesa, odnosno osigurava konzistentnost izlaza u vremenskoj domeni. Stalna poboljšanja procesa su nužna i zbog varijacija potreba i želja korisnika, pritisaka konkurenčije, ali i optimizacije procesa u cilju smanjenja troškova. Poboljšanje se odnosi na sve procese u organizaciji, poslovne i tehnološke. Danas su u svijetu najuspješnije one organizacije koje se bore za kontinuirano poboljšanje procesa rada, kao i kvalitetu proizvoda [64].

Japanske kompanije koriste se ovim konceptom već godinama, kao jednim od temelja pristupa proizvodnji i poslovanju u cjelini. Ovo je polučilo značajan uspjeh pa su onda i druge organizacije, posebno one u razvijenim zapadnim zemljama, počele usmjeravati svoj način poslovanja prema kontinuiranom poboljšanju.

4.4. Inovacija proizvoda

Inovacija proizvoda je bitna dimenzija upravljanja kvalitetom. Ulaganje novca i vremena u inovacije proizvoda i/ili procesa proizvodnje je dugoročno vrlo isplativo [42]. Na tragu navedenog, u razvijenim gospodarstvima odnosno razvijenim zemljama, na nove tržišne uvjete odgovara se inovacijama, tj. pretvaraju se u *inovirajuća društva*.

Isto tako, i u slabije razvijenim zemljama sve više jača svijest o važnosti inovacija kako u proizvodnim tako i u uslužnim djelatnostima. Naime, bez učinkovite inovacije proizvoda organizacija će stagnirati i brzo izgubiti svoju konkurentsku prednost. Sve je jasnije da inovacije proizvoda trebaju biti usmjerene na stvaranje komparativnih prednosti. Primjerice, osmišljavaju se veliki projekti kao što je *Društvo znanja* koji predstavljaju okosnicu strategiju gospodarskog razvoja pojedinih relativno malih zemalja. Intelektualni kapital i inovacije sve više postaju resurs koji predstavlja ulog kako za budućnost tako i za opstanak organizacije, gospodarske grane pa i puno šire od toga.

4.5. Benchmarking kao CSF

Benchmarking je engleski izraz za Najbolju praksu koji se udomaćio u hrvatskom govornom području. Riječ je o procesu kontinuiranog mjerjenja i unapređivanja poslovnih procesa jedne organizacije u odnosu na poslovne procese najuspješnijih organizacija iz cijelog svijeta radi dobivanja informacija koje će pomoći organizaciji da poboljša vlastite rezultate. Cilj je ne samo dostići najbolje organizacije, već ih i nadići koristeći njihovo iskustvo. *Benchmarking* u užem i širem smislu ima slijedeće karakteristike [64]:

- Predstavlja proces sistematskog mjerjenja-uspoređivanja poslovnih procesa promatrane organizacije u odnosu na poslovne procese lidera.
- Mjeri organizacijske proizvode, usluge i procese, utvrđuje ciljeve, prioritete i poboljšanja, vodi konkurentskom unapređenju i/ili sniženju troškova.
- Uspoređuje performanse predmetne organizacije s performansama najboljih; u tom smislu potrebno je praktički identificirati podređenu kompaniju odnosno drugu organizaciju koja je u nečemu najbolja, a potom provesti modeliranje vlastite organizacije prema njoj.

Niz istraživača, od svih alata i tehnika upravljanja kvalitetom, baš ovaj alat ubraja u kritične faktore uspjeha upravljanja kvalitetom. Primjerice, ako se kao uzorak uzmuh rezultati 37 istraživača navedenih u tablici 2, njih 15 *benchmarking* navodi kao CSF (*Ahire* i sur., 1996.; *Ang* i sur., 2000.; *Claver* i sur., 2003.; *Das* i sur., 2006.; *Dale*, 1999.; *Hill & Wilkinson*, 1999.; *Nwabueze*, 2001.; *Oakland*, 1993.; *Saraph*, 1989.; *Tari*, 2005.; *Zairi*, 1992.).

Mogući razlog relativno dobroj poziciji *benchmarkinga* leži prije svega u svestranosti ove tehnike koja se može gledati kao katalizator mnogim pozitivnim organizacijskim promjenama poput reinženjeringa poslovnog procesa [70]. Osim toga, *bechmarking* poboljšava operativno poslovanje kao i organizacijsko razmišljanje i djelovanje [8]. Riječ je o najboljoj menadžerskoj praksi koja je sve više prepoznata kao snažan napor za poboljšanje performansi procesa, poslovnih jedinica i organizacije u cjelini [39].

Globalizacija, dostupnost podataka, internet, korištenje raznih socijalnih mreža su golemi katalizatori razvoja *bechmarkinga* i značaj ovog kritičnog faktora svakim danom će biti sve veći.

4.6. Uključenost zaposlenika

Uključenost zaposlenika u aktivnosti organizacije je nužan uvjet za poboljšanje kvalitete proizvoda i/ili usluga. Ona pomaže zaposlenicima da unaprijede svoje sposobnosti, povećaju samopouzdanje, a isto tako ih obvezuje da uspjeh organizacije shvate kao vlastiti uspjeh [72]. Zato tvrtka mora razvijati formalni sustav uključivanja zaposlenika u sve aspekte svojeg poslovanja.

Unutar poduzeća treba biti ustaljena praksa da zaposlenici daju prijedloge i primjedbe za poboljšanje rada organizacije (često se najbolji prijedlozi posebno nagrađuju). Takav odnos pretvara organizaciju u sustav orientiran prema *benckmarkingu* [64]. Zaposlenici osluškuju i prepoznaju relevantna događanja na tržištu, ponašanje konkurenčije i samim tim su u mogućnosti podijeliti svoja saznanja s organizacijom. S druge strane, organizacija prepoznaje takvu inicijativu i sluša zaposlenike, što zaposlenike čini važnim, čega oni postaju svjesni i samim tim motivirani za daljnju uključenost.

Puno sudjelovanje zaposlenika odnosi se na njihovu participaciju i uključenost u poslove tako da to dovodi do povećanja vrijednosti za kupce. Sustav upravljanja kvalitetom zahtijeva angažiranje svih subjekata organizacije da bi se ostvarili ciljevi, kao što su: zadovoljenje potreba korisnika i sistematsko i neprekidno poboljšanje procesa i proizvoda [61].

Jednostavno rečeno, ukupna odgovornost podrazumijeva učešće i posvećenost kvaliteti svih organizacijskih jedinica, a ne samo odjela kvalitete. Svaka radna grupa u organizaciji mora konstantno tražiti načine i putove za unapređenje vlastitih proizvoda i usluga. Isto tako, ovlast je izvor ponosa i kreativnosti za sve zaposlene i *motor* unaprijeđivačkih aktivnosti [61]. Uključenost zaposlenika također može izmijeniti njegove negativne stavove i omogućiti mu bolje razumijevanje važnosti kvalitete proizvoda.

4.7. Nagrada i priznanje

Nagrade i priznanja stimuliraju usmjerenost zaposlenika k poboljšanju kvalitete svoga rada, a time i finalnog proizvoda ili usluge. Organizacije trebaju implementirati sustav naknade zaposlenicima koji snažno povezuje kvalitetu i zadovoljstvo zaposlenika [7]. Top menadžment treba poticati zaposlenike da daju svoje prijedloge u smislu inovacija, smanjenja troškova, poboljšanja kvalitete i sl. Naravno, najuspješniji prijedlozi trebaju biti adekvatno nagrađeni bilo novčanim ili nenovčanim nagradama.

4.8. Obrazovanje i osposobljavanje

Ovaj faktor odnosi se na usavršavanje sposobnosti zaposlenika, timski rad, vještina rješavanja problema, donošenja odluka, analizu pokazatelja i karakteristika. Važnost obuke zaposlenika uočio je pionir automobilske industrije, *Henry Ford*. Jedan je od prvih vlasnika tvornica koji je u svoja postrojenja uveo sustav upravljanja kvalitetom (proizvodne trake), naglašavajući potrebu da svaki automobilski dio bude proizveden u skladu s visokim standardima kvalitete. Isto tako, naglašavao je da svaki zaposlenik na proizvodnoj traci treba biti osposobljen za svoj rad te da razumije važnost kvalitetnog obavljanja svog posla. Ovo su bili začeci TQM-a i spoznaje o važnosti obuke zaposlenika

za funkcioniranje masovno proizvedenih dobara. *Deming* je među svojim preporukama (14 točaka kvalitete) također naglasio važnost obuke zaposlenika i cijeloživotnog obrazovanja s ciljem poboljšanja svih performansi poslovanja određenog poduzeća.

Rezultati brojnih istraživanja pokazuju da su obrazovanje i obuka jedan od vitalnih elemenata za uspješnu provedbu sustava upravljanja kvalitetom. Ulaganje u obrazovanje i osposobljavanje je vrlo važno za uspjeh upravljanje kvalitetom.

Zaposlenike treba smatrati vrijednim, dugoročnim resursom dostoјnjim primanja obrazovanja i obuke tijekom cijele njihove karijere. Svest o kvaliteti obrazovanja i upravljanja kvalitetom treba razvijati kako kod rukovodećeg osoblja i supervizora tako i kod svih zaposlenika [72]. Sudjelovanje zaposlenika i menadžera u zajedničkim obukama, u principu, može poboljšati komunikaciju i interpersonalne odnose, atmosferu za timski rad i u konačnosti poboljšati kvalitetu poslovanja.

4.9. Usmjerenošć na klijente

Suvremeni koncept upravljanja kvalitetom zasniva se na činjenici da svaka organizacija ili bilo koji njen podsistem ima klijenta, eksternog ili internog. Zahtjevi, potrebe i očekivanja, ili čak i sklonosti klijenta, moraju biti zadovoljene da bi organizacija kao cjelina bila uspješna.

Zahtjev klijenata u praksi se neprekidno mijenjaju stoga ih organizacija mora redovito procjenjivati i svoje poslovanje uskladiti prema očekivanjima klijenata [64]. Dapače, organizaciju trebaju pokretati upravo elementi vezani za klijente koji se moraju shvatiti i transformirati u odgovarajući interni zahtjev organizacije. Navedeni zahtjevi imaju veliki upliv na način rada organizacije i ponašanje njenih subjekata. Ovo uzrokuje studiozno sagledavanje potreba klijenta, njihovo prevođenje, primjenom odgovarajućih kriterija, u zahtjeve odnosno kvalitativne i/ili kvantitativne performanse, a zatim zadovoljenje tako iskazanih potreba.

Ovaj kritični faktor upravljanja kvalitetom je u svakom slučaju vrlo bitan, po nekim najvažniji i stoga ga je potrebno dobro razumjeti. Znači, da bi organizacija postala i ostala uspješna potrebno je da stavi klijenta na prvo mjesto što se treba odražavati ne samo na sustav upravljanja kvalitetom već na cjelokupno planiranje.

4.10. Kvaliteta proizvoda

Sve rasprave o različitim komponentama ukupnog upravljanja kvalitetom do sada su se fokusirale na poboljšanje kvalitete proizvoda. U cilju poboljšanja kvalitete proizvoda bitno je izmjeriti postojeću kvalitetu proizvoda, razumjeti pitanja kvalitete i identificirati područja koja zahtijevaju posebnu pozornost za poboljšanje i unapređenje kvalitete proizvoda.

5. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljena analiza kritičnih faktora uspjeha u sustavima upravljanja kvalitetom. Napravljeno je kabinetsko istraživanje tri modela izvršnosti i analiza više desetaka rezultata empirijskih istraživanja. Iz svega se može zaključiti sljedeće:

- (1) Kategorizacija kritičnih faktora upravljanja kvalitetom je široka, ali novija istraživanja izbistrica su deset najvažnijih kritičnih faktora uspjeha u sustavima upravljanja kvalitetom. Riječ je o sljedećim faktorima: Opredijeljenost top menadžmenta, Dobavljačevo upravljanje kvalitetom, Kontinuirano poboljšavanje, Inovacija proizvoda, Najbolja praksa (*Benchmarking*), Uključenost zaposlenika, Nagrade i priznanja, Obrazovanje i osposobljavanje, Usmjerenošć na kupca i Kvaliteta proizvoda i Opredijeljenost (privrženost) menadžmenta kvaliteti je najvažniji kritični faktor za uspješnu implementaciju sustava upravljanja kvalitetom. Ovaj faktor je najčešće nominirani kritični faktor na ljestvicama rezultata brojnih empirijskih istraživanja.
- (2) Svaki od kritičnih faktora ima svoj određeni doprinos na ljestvici ocjene uspješnosti upravljanja kvalitetom te je preporuka za daljnje istraživanje ponderiranje deset najvažnijih kritičnih faktora i njihovo empirijsko istraživanje na homogenom uzorku relevantnom za određenu gospodarsku granu.

LITERATURA

- [1] AHIRE, S., GOLHAR, D. AND WALLER, M.: *Development and validation of TQM Implementation constructs*, Decision Sciences, Vol.27, No.1, 1996, str. 23-56.
- [2] ALI, M.: *An empirical study of total quality management in the Middle East: a proposed model for implementation*, unpublished PhD thesis, University of Bradford, Bradford, 1997.
- [3] ANG, C. L., DAVIES, M. AND FINLAY, P. N.: *Measures to assess the impact of information technology on quality management*, International Journal of Quality and Reliability Management, Vol. 17, No. 1, 2000, str. 42-65.
- [4] BABBAR, S., ASPELIN, D. J.: *TQM it is as easy as ABC. The TQM magazine*, Vol. 6, No. 3, 1994, str. 32-38.
- [5] BLACK, S. AND PORTER, L.: *Identification of critical factors of TQM*, Decision Sciences, Vol. 27, No. 1, 1996, str. 1-21.
- [6] BLANK, L., SOLONANO, J.: *Using quality cost analysis for management improvement*, Industrial Engineering, 10(2), 1978, str. 46-52.
- [7] BROWN, M. G., HITCHCOCK, D. E., WILLARD, M. L.: *Why TQM Fails and What to Do about It*, Irwin, Burr Ridge, IL, 1994.
- [8] CASSELL, C., NADIN, S., OLDER GRAY, M.: *The use and effectiveness of benchmarking in SMEs*, Benchmarking: An International Journal, Vol. 8 No. 3, 2001, str. 212-22.
- [9] CHAPMAN, R. L., CLARKE, P., SLOAN, T.: *TQM in continuous-process manufacturing*: Dow-Corning (Australia) Pvt. Ltd., International Journal of Quality and Management, Vol. 8, No.5, 1991, str. 77-90.
- [10] CLAVER, E., TAN', J. J., MOLINA, J. F.: *Critical factors and results of quality Management: an empirical study*, Total Quality Management, Vol. 14 No.1, 2003, str.. 91-118.
- [11] CROSBY, P.: *Quality is Free: the Art of Making Quality Certain*, Penguin Books, New York, N Y, 1979, str. 123.
- [12] CROSBY, P.: *Let's Talk Quality: 96 Questions that you always wanted to ask*, Phil Crosby, McGraw-Hill, New York, 1989.
- [13] DAFT, R.L.: *Management*, 4th ed., Fort Woeth, TX, The Dryden Press, 1997., str. 641.
- [14] DALE, B. G., DUNCALF, A. J.: *Quality-related decision making: a study in six British companies*, International Journal of Operations & Production Management, Vol. 5 No. 1, 1984, str. 15-25.
- [15] DAS, A., PAUL, H., SWIERCZEK, F. W., LAOSIRIHONGTHONG, T: *Updating and Validating Total Quality Management (TQM) Constructs*, proceeding of 11th International conference on ISO 9000 & TQM (11-ICIT), Hong Kong, 10-12 April, 2006.
- [16] DAYTON, N.A.: *Total quality management critical success factors, a comparison: the UK versus the USA*, Total Quality Management, Vol. 12 No. 3, 2001, str.. 293-8.
- [17] DEMING, W.E.: *Quality, Productivity, and Competitive Position*, MIT Center for Advanced Engineering Study, Cambridge, MA, 1982.
- [18] DEMING, W.E.: *On probability as a basis for action*, American Statistician 29: 1975, str. 146-152.
- [19] DEMING, W.E.: *Out of the Crisis* Cambridge, MA, Massachusetts Institute of Technology, 1982.

- [20] DEWHURST, F., MARTINEZ – LORENTE, A.L., BARRIE, G., DALE: *TQM in public organisations: an examination of the issues*, Managing Service Quality, 9,4, 1999, 265-274.
- [21] EFQM: *Total Quality Management: The European Model for Self-Appraisal*, European Foundation for Quality Management, Brussels, 1992.
- [22] FEIGENBAUM, A. V.: *Total Quality Control*, 4th edn, McGraw-Hill, New York, NY, 1991.
- [23] FERDOWS, K. AND DEMEYER, A.: *Lasting improvements in manufacturing performance: in search of a new theory*, Journal of Operations Management, Vol. 9 No. 2, 1990, str. 168-83.
- [24] FLYNN, B. B., SCHOEIDER, R. G., SAKAKIBARA, S.: *A Framework for Quality Management Research and Associated Measurement Instrument*, Journal of Operations Management, vol. 11, 1994, str. 339-66.
- [25] GARVIN, D. A.: *What does 'product quality' really mean?*, Sloan Management Review, Fall, 1984, str. 25-8.
- [26] GROOCOCK, J. M.: *The chain of quality*, Market Dominance Through Product Superiority, John Wiley, New York, NY, 1986.
- [27] HAM, K. V., WILLIAMS, R.: *The quest for quality at Phillips*, International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 3 No. 6, 1986, str. 25-36.
- [28] HILL, S., WILKINSON, A.: *In Search of TQM*, Employee Relations, 17 (3), 1995, str. 9-20.
- [29] <http://www.baldridge.gov> (12.07.2010.)
- [30] <http://dictionary.sensagent.com/critical+success+factor/en-en/> (11.07.2010.)
- [31] http://kvaliteta.inet.hr/e-quality/prethodni/8/Oslic_Ivica.pdf (12.07.2010.)
- [32] http://www.12manage.com/methods_rockart_csf_kpis.html (11.07.2010.)
- [33] <http://www.businessdictionary.com/definition/critical-success-factors-CSF.html> (11.07.2010.)
- [34] <http://www.coursework4you.co.uk/essays-and-dissertations/critical-success-factors.php> (10.07.2010.)
- [35] <http://www.deming.org/demingprize/prizeinfo.html> (12.07.2010.)
- [36] <http://www.efqm.org> (12.07.2010.)
- [37] http://www.mindtools.com/pages/article/newLDR_80.htm (06.07.2010.)
- [38] ISHIKAWA, KAORU 1985 What is Total Quality Control? The Japanese Way. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall
- [39] JARRAR, Y., ZAIRI, M.: *Best practice transfer for future competitiveness: a study of best practices*, Total Quality Management, Vol. 11 No. 4/5/6, 2000, str. 734-40.
- [40] JOHNSON, G., SCHOLE, K., WHITTINGTON, R.: *Exploring Corporate Strategy*, 7th ed., Prentice Hall Financial Times, 2005, str. 95.
- [41] JURAN, J. M.: *Product quality a prescription for the west: part I*, Management Review, Vol. 70 No. 6, 1981a, str. 8-14.
- [42] JURAN, J. M., GRYNA, F. M.: *Quality Planning and Analysis: From Product Development through Use*, McGraw-Hill, New York, NY, 1993.
- [43] JURAN, J. M.: *Quality-Control Handbook*, 2nd ed., New York: McGraw-Hill Book Company Inc., 1962.
- [44] KANJI, G. K.: *Total Quality Management: Second Industrial Revolution*, TQM, Vol 1, No 1, 1990, str. 3-11.
- [45] KENNEDY, C.: *Xerox charts a new strategic direction*, Long Range Planning, Vol. 22 No. 1, 1989, str. 10-17.

- [46] LAU, H., IDRIS, M.: *The soft foundation of the critical success factors on TQM implementation in Malaysia*, The TQM Magazine, Vol. 13 No. 1, 2001, str. 51-60.
- [47] LEE, P., QUAZI, H.: *A methodology for developing a self-assessment tool to measure quality performance in organisations*, International Journal of Quality & Reliability Management, Vol.18, No.2, 2001, str.118-141.
- [48] LI, E., ZHAO, X. AND LEE, T-S.: *Quality management initiatives in Hong Kong's banking industry: a longitudinal stud'*, Total Quality Management, Vol. 12 No. 4, 2001, str. 451-68.
- [49] NWABUEZE, U.: *How the mighty have fallen: the naked truth about TQM*, Managerial Auditing Journal, Vol.16, No. 9, 2001, str. 504-513.
- [50] OAKLAND, J.: *Total quality management*, Oxford, UK: Heinemann 1989.
- [51] OAKLAND, J.: *Total quality management: The route to improving performance*, London: Butterworth Heinemann, 1993.
- [52] PHENG, L. S., WEI, V. A.: *Framework for implementing TQM in construction*, The TQM Magazine, Vol. 8, No. 5, 1996, str. 39-46,
- [53] PUN, K-F.: *Cultural influences on total quality management adoption in Chinese enterprises: an -- empirical study*, Total Quality Management , Vol. 12 No. 3, 2001, str. 323-42.
- [54] RAMIREZ, C.,LONEY, T.: *Baldridge award winners identify the essential activities of a successful quality process*, Quality Digest, January, 1993, str. 38-40.
- [55] RAO, A., CARR, L., DAMBOLENA, I., KOPP, R., MARTIN, J., RAFII, F., SCHLESINGER, P.: *Total Quality Management: A Cross-functional Perspective*, John Wiley and Sons, 1996.
- [56] RAO, S., SOLIS, L., RAGHUNATHAN, T.: *A framework for international quality management research: development and validation of a measurement instrument*, Total Quality management, Vol. 10 No. 7, 1999, str.1047-75.
- [57] ROCKART, J.: *Chief Executives Define Their Own Information Needs*, In: Harvard, Business Review, March/April 1979, str. 81-92.
- [58] SARAPH, J. V., BENSON, G. P., SCHROEDER, R. G.: *An instrument for measuring the critical success factors of quality management*, Decision Science, Vol. 20, 1989, str. 810-289
- [59] SHEWHART, WALTER A.: *Economic control of quality of manufactured product*, D. Van Nostrand Company, 1931.
- [60] SKOKO, H.: *Upravljanje kvalitetom*, Sinergija d.o.o., Zagreb, 2000., str. 176.
- [61] STAMM, C. L., GOLHAR, D. Y.: *JIT purchasing: attribute classification and literature review*, Production Planning and Control, Vol. 4 No. 3, 1993, str. 273-82.
- [62] SURESHCHANDAR, G. S., CHANDRASEKHARAN RAJENDRAN AND ANANTHARAMAN: *“A conceptual model for total quality management in service organisations”*, Total Quality Management, Vol. 12 No. 3, 2001 str. 343-63.
- [63] ŠIŠKO KULIŠ, M., GRUBIŠIĆ D.: *Upravljanje kvalitetom*, Sveučilište u Splitu - Ekonomski fakultet Split, 2010.
- [64] TAKEUCHI, H., QUELCH, J. A.: *Quality is more than making a good product*, Harvard Business Review, Vol. 61 No. 4, 1983, str. 139-45.
- [65] TARI, J. J.: *Components of successful total quality management*, The TQM Magazine, Volume 17 No.2, 2005, str. 182-194.
- [66] THIAGARAJAN, T.: *An empirical study of total quality management (TQM) in Malaysia: a proposed framework of generic application*, unpublished PhD thesis, University of Bradford, Bradford, 1996.

- [67] THIAGARAJAN, T., ZAIRI, M.: *A review of total quality management in practice: understanding the fundamentals through examples of best practice applications, part 1*, The TQM Magazine, Vol. 9 No. 4, 1997, str. 270-86.
- [68] THIAGARAJAN, T., ZAIRI, M.: *An empirical analysis of critical factors of TQM: a proposed tool for self-assessment and benchmarking purposes*, Benchmarking for Quality Management & Technology, Vol. 5 No. 4, 1998, 291-303.
- [69] THIAGARAJAN, T., ZAIRI, M., DALE, B. G.: *A proposed model of TQM implementation based on an empirical study of Malaysian industry*, International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 18 No. 3, 2001, str. 289-306.
- [70] THOR, C., JARRETT, J.: *Benchmarking and reengineering: alternatives or partners?*, International Journal of Technology Management, Vol. 17 No. 7/8, 1999, str. 786-96.
- [71] ZAIRI, M.: *Measuring Performance for Business Results*, Chapman & Hall, London, 1992.
- [72] ZHANG, Z. WASZINK, A., WIJNGAARD, J.: *An instrument for measuring TQM implementation for Chinese manufacturing companies*, International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 17 No. 7, 2000, str. 730-55.

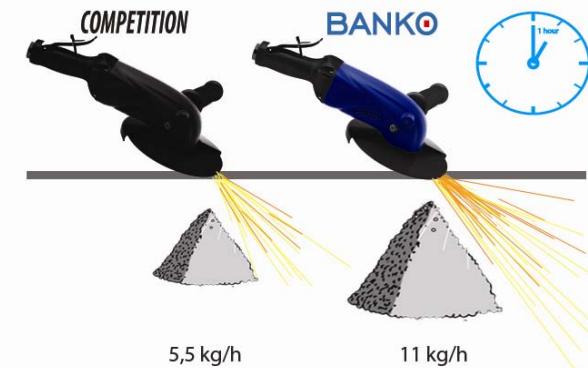
BANKO

INDUSTRIAL POWER TOOLS

Banko vs. Competition



The Banko pneumatic grinder achieves 60-100 % faster grinding at the right speed with extreme high material removal rate, which improves production rates and allows new levels of productivity



up to 100 % longer life time

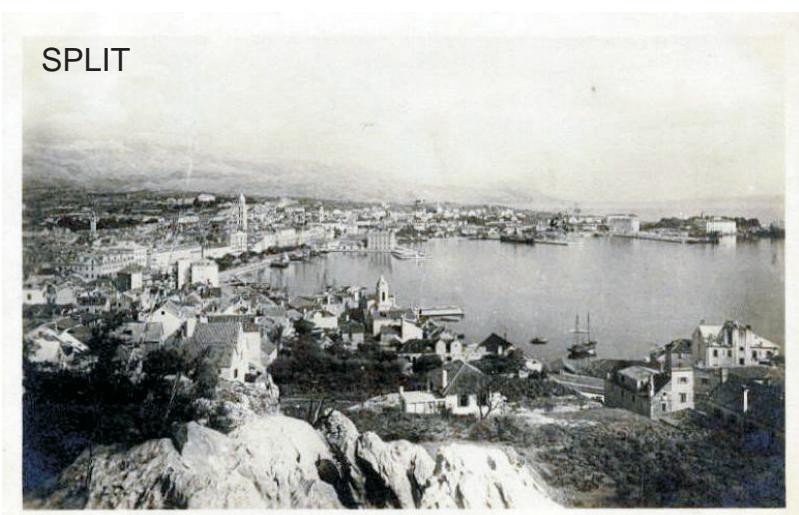
A new, improved ergonomic design for less operator fatigue and easy control of the operator



Oil free operation which enables clean working surface and more environmental-friendly operation

Less vibration due to grinding at the right speed of the accessories

SPLIT



ISSN 1847-7917