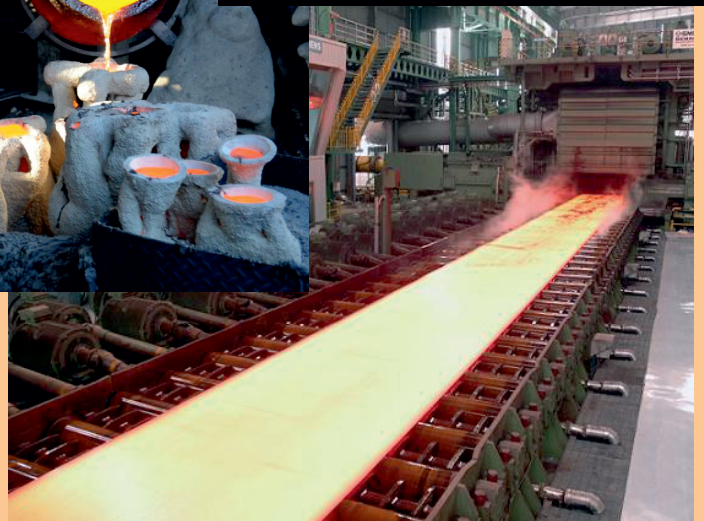
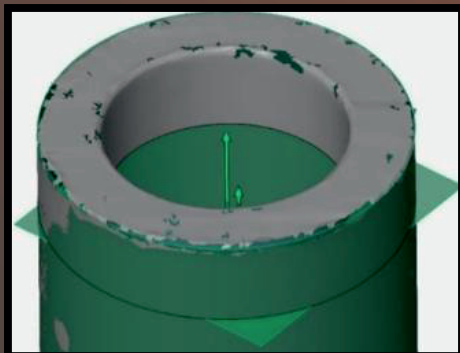
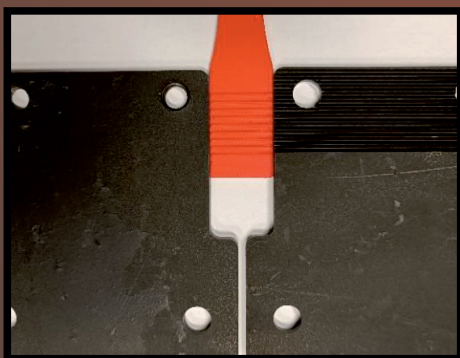
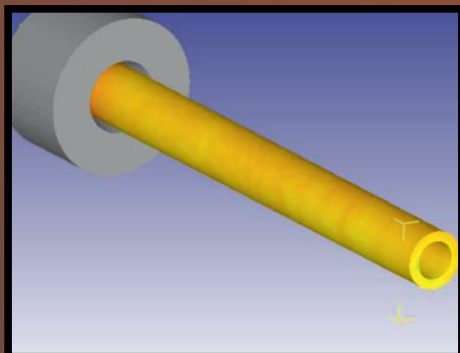
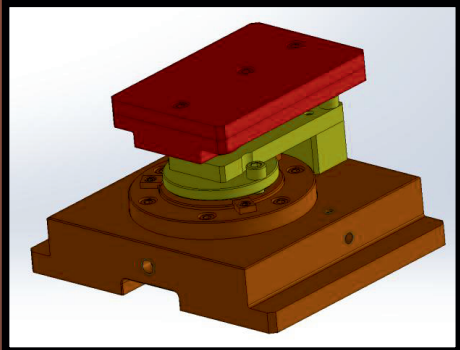




ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE  
Strojnícka  
fakulta

# TECHNOLÓG



# TECHNOLÓG

*Vychádza spravidla dvakrát ročne. Publikuje vedecké, výskumné, odborné, teoretické práce, návody, štúdie, recenzie, informácie o spracovaní technických materiálov. Zameriava sa na uverejňovanie príspevkov a prác venujúcich sa otázkam z oblasti trieskových a beztrieskových technológií, fyzikálnych princípov nekonvenčných technológií, technologickosti konštrukcií nástrojov, ekonomike výrobného procesu, ekologizácii, spracovaniu odpadov. Takisto publikuje práce o strojoch, nástrojoch, prípravkoch a meracej technike pre oblasť mechanických technológií, výsledkoch výskumu vo sfére informačných technológií v technologickej oblasti. Uverejňuje práce o histórii a vývine mechanických technológií.*

*Časopis zverejňuje príspevky v jazykoch: slovenskom, českom, poľskom, ruskom, anglickom a nemeckom.*

Všetky príspevky sú recenzované dvoma nezávislými recenzentmi a redakcia si vyhradzuje právo na ich redakčnú úpravu. Nepreberá sa zodpovednosť za prípadné škody spôsobené použitím úkonov, metód, produktov, ideí, návodov a pod. publikovaných autormi príspevkov.

**Evidenčné číslo MK SR-2800/08, EV 10/22/EPP**

**ISSN 1337-8996, Online ISSN 2730-0501**

**Adresa redakcie:**

**Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Univerzitná 1, 010 26 Žilina**

**Telefón: 041-513 2764**

**e-mail: [jan.moravec@fstroj.uniza.sk](mailto:jan.moravec@fstroj.uniza.sk)**

**Vydáva Žilinská univerzita v Žiline v EDIS-vydavateľstve UNIZA**

**Univerzitná HB, 010 26 Žilina, IČO 00 397 563**

**šéfredaktor - editor in chief:**

doc. Ing. Ján MORAVEC, PhD.

**výkonný redaktor - executive editor:**

doc. Ing. Ján Dižo, PhD.

**redaktor - redactor:**

Ing. Elena Kantoríková, PhD.

**vedecký redaktor - scientific editor:**

prof. Ing. Jozef PILC, CSc.

**redakčná rada - editorial board:**

doc. Ing. Silvia MALÁKOVÁ, PhD. (SK)

doc. Ing. Ján MORAVEC, PhD.

(SK)

doc. Ing. Petr KAWULOK, PhD. (CZ)

prof. Ing. Jozef PILC, CSc.

(SK)

Ing. Vladimíra BIŇASOVÁ, PhD. (SK)

prof. Ing. Alyona LOVSKA, Dr.Sc. Tech.

(UA)

doc. Ing. Jozef BÍLIK, PhD. (SK)

prof. Ing. Eva TILLOVÁ, PhD.

(SK)

doc. Dr. - Inž. Janusz MUSIAL (PL)

prof. Ing. Peter DEMEČ, CSc.

(SK)

Dipl. Ing. Eva REGER (D)

prof. Ing. Jan SUCHÁNEK, CSc.

(CZ)

doc. Ing. Ludmila DULEBOVÁ, PhD. (SK)

prof. Dr. Ing. Milan SÁGA

(SK)

prof. Ing. Georgi KODZHASPIROV, DrSc. (RU)

prof. Dr. Ing. Miroslav NESLUŠAN

(SK)

doc. Ing. Ján DIŽO, PhD. (SK)

prof. Ing. Danka BOLIBRUCHOVÁ, PhD.

(SK)

doc. Mgr. Branislav FTOREK, PhD. (SK)

prof. Ing. Emil EVIN, CSc.

(SK)

prof. Ing. Alžbeta SAPIETOVÁ, PhD.

(SK)

## OBSAH

<b>ZOZNAM RECENZENTOV</b>	<b>4</b>
<b>EDITORIÁL</b>	<b>5</b>
<b>MARIA CURIEOVÁ-SKŁODOWSKÁ</b>	<b>6</b>
<b>ZMENA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH MATERIÁLOV APLIKÁCIOU POVRCHOVÉHO KALENIA</b> <i>Peter Fabián, Martin Jaššo, Richard Pastirčák</i>	<b>8</b>
<b>STANOVENIE STRIŽNEJ SILY POMOCOU EXPERIMENTÁLNEHO NÁSTROJA</b> <i>Borislav Mello</i>	<b>15</b>
<b>VPLYV TEPLoty FORMY NA VYBRANÉ VLASTNOSTI AISi5Cu2Mg</b> <i>Elena Kantoríková</i>	<b>23</b>
<b>SÚČASNÝ STAV PREVODOVIEK S NASTAVITEĽNÝM PREVODOVÝM POMEROM PRI ELEKTRICKOM POHONE</b> <i>Miroslav Blatnický, Vladimír Samaš, Ján Dižo</i>	<b>27</b>
<b>TEPELNÉ SPRACOVANIE NÁSTROJOVÝCH OCELÍ</b> <i>Peter Fabian</i>	<b>32</b>
<b>VÝROBA ŠVOVÝCH RÚR MALÝCH PRIEMEROV Z AUSTENITICKÝCH OCELÍ</b> <i>Jozef Bílik, Róbert Sobota</i>	<b>38</b>
<b>MOTOROVÉ JEDNOTKY NEZÁVISLEJ TRAKCIE S JEDNONÁPRAVOVÝM PODVOZKOM</b> <i>Martin Bučko, Ján Dižo, Miroslav Blatnický, Alyona Lovska</i>	<b>45</b>
<b>NÁVRH UNIKÁTNEHO JEDNOÚČELOVÉHO ZARIADENIA PRE SKÚŠKY TEČENIA</b> <i>Lenka Jakubovičová, Ondrej Piroh, Milan Vaško, Milan Sága</i>	<b>51</b>
<b>IMPROVING THE IMAGE OF THE COMPANY</b> <i>Beáta Furmannová, Vladimíra Biňasová, Ján Zuzik</i>	<b>58</b>
<b>VYUŽITIE OPTICKEJ 3D DIGITALIZÁCIE PRI MERANÍ ROZMEROV BEZŠVÍKOVÝCH OCEĽOVÝCH RÚR ŤAHANÝCH ZA STUDENA</b> <i>Ladislav Morovič, Jozef Bílik, Filip Havran</i>	<b>62</b>
<b>ERGONOMICS IN EXTENDED REALITY: ADDRESSING CHALLENGES AND ENHANCING USER EXPERIENCE</b> <i>Luboslav Dulina, Ján Zuzik, Vladimíra Biňasová, Beáta Furmannová, Marián Matys</i>	<b>68</b>
<b>MODEL NELINEÁRNEHO OSCILÁTORA</b> <i>Ján Minárik, Branislav Ftorek, Radoslav Chupáč</i>	<b>72</b>
<b>ANALYSIS OF PROGRAMS FOR OPERATIONAL AND SYSTEMS ANALYSIS</b> <i>Vladimíra Biňasová, Branislav Mičieta, Martin Buzalka, Marta Kasajová, Ján Zuzik</i>	<b>78</b>

## ZOZNAM RECENZENTOV PRÍSPEVKOV

Ing. Zdena BOHUŠOVÁ, PhD.  
Ing. Aleš DITTRICH, Ph.D., Ing. Paed. IGIP  
prof. Ing. Lubomír HUJO, PhD.  
Ing. Jaroslav KAŠPÁREK, Ph.D.  
doc. Ing. Petr KAWULOK, Ph.D.  
doc. Ing. Róbert LABUDA, PhD.  
Ing. Ivan LITVAJ, PhD.  
prof. Ing. Aleš SLÍVA, Ph.D.  
Ing. Augustín STAREČEK, PhD, Ing. Paed. IGIP  
Ing. Roman STROKA, PhD.  
MUDr. Ing. Zuzana ŠTOFFKOVÁ, PhD.  
prof. Ing. Peter ZVOLENSKÝ, CSc.

*Príspevky boli recenzované dvomi nezávislými recenzentami, ktorí nie sú autormi ani spoluautormi príspevkov, nie sú z rovnakého pracoviska ako ktorýkoľvek z autorov, tak isto nie sú členmi redakčnej rady a ani redakcie časopisu.*

*The articles were reviewed by two independent reviewers who are not authors or co-authors of the articles, are not from the same workplace as any of the authors and are also not members of the editorial board of the journal.*

*Die Arbeiten wurden von zwei unabhängigen Gutachtern geprüft, die weder Autoren noch Mitautoren der Arbeiten sind, nicht aus demselben Fachbereich wie die Autoren stammen und keine Mitglieder der Redaktion oder des Redaktionsausschusses der Zeitschrift sind.*



## EDITORIÁL

Motto: “ *Tak, ako z nesprávnej teórie sa nemôže zrodiť správna prax, zo správnej teórie nikdy nevyplynie nesprávna prax.* ”

Samuel Mikovíni

Vážení autori, čitatelia a priaznivci, nebadane sme sa ocitli na konci roka a s týmto prichádza aj začiatok nového roka, ktorý nám, ako verím, prinesie len samé dobré veci. V našom časopise sa po stránke formálnej ani obsahovej nič prelomové nemení. V časopise *Technológ* má každý prispievateľ svoje miesto pre vedecký príspevok, ktorý vytvoril. Tento rok vychádza už štvrté číslo, ktoré ponúka nové vedecké príspevky, ktoré určite zaujmú vedeckú societu aj ďalších záujemcov. Redakcia zabezpečuje cez recenzentov, že zverejňované príspevky sú na potrebnej úrovni kvality. Grafické spracovanie publikovaných príspevkov je porovnateľné s inými podobnými časopismi. Časopis *Technológ* má za sebou úspešnú a takisto aj dlhú cestu, ktorá vedie cez veľké množstvo článkov, o čom sa môže čitateľ jednoducho presvedčiť zalistovaním v niektorom z čísel *Technológa*. Som presvedčený, že redakcia splňa požiadavky a takisto prináša optimalizáciu časopisu, ktorý je určený pre veľké množstvo záujemcov a čitateľov. Všetky publikované vedecké príspevky v každom čísle, toto nevynímajúc, sú recenzované anonymne dvomi recenzentami zo zoznamu recenzentov uvedených v každom čísle časopisu.

Všetkým čitateľom, autorom a priaznivcom želám veľa zdravia a úspechov, nielen v Novom roku, ale po celý rok!

*Ján Moravec*  
šéfredaktor a editor



## Maria CURIEOVÁ-SKŁODOWSKÁ

(\*7. november 1867 *Varšava, Ruské impérium* –  
†4. júl 1934, *Passy, Francúzsko*)

*Maria Curieová-Skłodowska* bola významná *francúzsko-poľská* vedkyňa, chemička a fyzička. Hoci sa narodila v *Poľsku*, väčšinu života a vedeckej kariéry prežila vo *Francúzsku*. Jej rodné meno sa písalo aj ako *Maria Skłodowska*. V súčasnosti je medzinárodne známa ako *Marie Curie-Skłodowska*, občas sa však používa aj tvar s inverzným priezviskom, teda *Maria Skłodowska-Curie*. Niekedy sa na jej pomenovanie používa aj tvar *Madam Curie*.

K jej najväčším úspechom patrí:

- *teória rádioaktivity*,
- *technika delenia rádioaktívnych izotopov*,
- *objav rádia a polónia*.

Pod jej osobným vedením boli taktiež uskutočnené vôbec prvé výskumy liečby rakoviny pomocou rádioaktivity. Dvakrát získala *Nobelovu cenu* za dosiahnuté vedecké výsledky: prvýkrát v roku 1903 za fyziku spolu s manželom *Pierrom Curieom* za výskumy rádioaktivity, ktorú objavil *Antoine Henri Becquerel* a druhýkrát v roku 1911 za chémiu za izoláciu čistého rádia a za objav dvoch chemických prvkov - *rádia* a *polónia*.

V roku 1891 *Curieová-Skłodowska* urobila ako prvá žena v histórii prijímacie skúšky na *parížsku Sorbonnu* na fakultu fyziky a chémie. V roku 1893 získala *licenciát* a začala vedecky pracovať vo fyzikálnom laboratóriu, ktoré viedol prof. *Gabriel Lippmann* (*Nobelova cena* 1908). Súčasne ďalej študovala na *Sorbonne* a druhý licenciát, z matematiky, získala v roku 1894.

V roku 1894 tiež spoznala svojho manžela *Pierra Curieho*, ktorý bol v tej dobe doktorandom v laboratóriu *Becquerela*. Po *Pierrovom* doktoráte sa v roku 1895 vzali. *Pierre* bol bez vyznania a *Maria* bola nábožensky vlašná, preto mali civilnú svadbu, čo na nejaký čas viedlo k roztržke s jej *poľskou* katolíckou rodinou. V roku 1897 sa im narodila dcéra *Irene* (tiež neskoršia nositeľka *Nobelovej ceny*).

*Pierre* odporučil *Mariu Becquerelovi*, ktorý jej ponúkol doktorandské štúdium pod svojím vedením. *Becquerel* jej navrhol zdanlivo neatraktívnu a dosť namáhavú tému - zistiť, prečo je rádioaktivita niektorých druhov uránovej rudy omnoho vyššia, ako to vyplývalo z podielu čistého uránu v rude.

*Marie*, spočiatku s pomocou mladého chemika *Andrého Louisa Debierna*, ktorý robil licenciát, začala náročnú prácu na delení uránovej rudy na jednotlivé chemické zlúčeniny a hľadala zlúčeninu, ktorá spôsobovala vysokú rádioaktivitu. *Debierna* to rýchlo prestalo baviť a nahradil ho sám *Pierre Curie*. Výskumy po štyroch rokoch viedli najskôr k objavu polónia a potom omnoho rádioaktívnejšieho rádia. Výsledkom bolo aj vyjasnenie pravdepodobných príčin rádioaktivity - ako efektu pri rozpade atómových jadier.

Po získaní *Nobelovej ceny* sa *Maria* a *Pierre* náhle stali veľmi slávnymi. *Sorbonna* ponúkla *Curie* miesto profesora a súhlasila so založením vlastného laboratória, v ktorom sa *Maria* stala vedúcou výskumu. Dňa 19. apríla 1906 *Pierra* zrazil nákladný kónský povoz, následkom čoho zomrel. *Curieová-Sklodovská* tak stratila životného druha a spolupracovníka. Dňa 13. mája toho istého roku sa fakultná rada rozhodla zachovať katedru vytvorenú pre *P. Curieho* a jej vedenie zveriť *Curieovej-Sklodovskej*. V roku 1906 sa *Curieová-Sklodovská* stala prvou profesorkou fyziky na *Sorbonne*.

V roku 1911 získala svoju druhú *Nobelovu cenu*, vďaka ktorej presvedčila *francúzsku vládu*, aby vyčlenila prostriedky na vytvorenie nezávislého *Ústavu pre rádium (Institut du radium)*, ktorý bol zriadený v roku 1914 a v ktorom sa uskutočňovali výskumy z oblasti chémie, fyziky a medicíny. Tento ústav sa stal liahňou nositeľov *Nobelových cien* - vyšli z neho ešte štyria laureáti *Nobelovej ceny*, medzi nimi aj *Mariina dcéra Irene Joliotová-Curieová* a jej zať *Frédéric Joliot Curie*.

Počas prvej svetovej vojny sa *Curieová-Sklodovská* stala šéfkou vojenskej lekárskej bunky, ktorá sa zaoberala organizáciou poľných röntgenografických staníc, známych ako "*Petits Curies*", ktoré spolu vyšetřili viac ako tri milióny prípadov zranení *francúzskych* vojakov. Na tomto projekte s ňou spolupracovala jej dcéra *Irène*.

Po vojne *Curieová-Sklodovská* naďalej viedla *Ústav pre rádium* v *Paríži* a zároveň cestovala po svete, kde pomáhala vďaka svojej nadácii zakladať lekárske ústavy pre liečbu rakoviny. V roku 1932 s pomocou *poľského* prezidenta *Moscického* bol jeden z takýchto inštitútov založený vo *Varšave*.

*Marie Curieová-Sklodovská* zomrela 4. júla 1934 v sanatóriu *Sancellemoz* v *Passy (Haute-Savoie)* na leukémiu, ktorá bola s najvyššou pravdepodobnosťou spôsobená radiáciou, s ktorou pracovala. V roku 1995 bola pochovaná pod kupolou *parížskeho Panteónu* ako prvá žena za vlastné zásluhy.



### Poznámky

**Licenciát** je jedným z vyšších akademických titulov používaný od stredoveku v mnohých európskych krajinách dodnes. Titul so skratkou *Lic.* pred menom udeľujú najmä súkromné zahraničné vysoké školy absolventom prvého stupňa vysokoškolského štúdia a je zhodný s našim *Bc.* Vo *Francúzsku* získa študent trojročného vysokoškolského štúdia tzv. *Titul Licence (francúzsky: titulaire d'une licence)*, ktorý je ekvivalentom k bakalárskemu titulu.

**Parížsky Panteón** je historická stavba v *Latinskej štvrti* v *Paríži*. Stavba pôvodne slúžila ako kostol zasvätený svätej *Genovéve*, v súčasnosti, po mnohých prestavbách, kombinuje republikánsku liturgickú funkciu s funkciou hrobky slávnych osobností. Budova bola postavená v rokoch 1757 - 1790 (pozri obrázok).

# Zmena mechanických vlastností vybraných materiálov aplikáciou povrchového kalenia

## Peter Fabian, doc. Ing., PhD.\*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: peter.fabian@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2767

## Martin Jaško, Ing.

HS Technik, spol. s r. o.  
Žilinská cesta 84, 013 11 Lietavská Lúčka.  
E-mail: jasso.martin@hstechnik.sk, Tel.: + 421 902 394 938

## Richard Pastirčák, doc. Ing., PhD.\*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: richard.pastircak@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2797, Fax.: + 421 41 525 2541

## Change of mechanical properties of selected materials by application of surface hardening

**Abstract:** Comparing the mechanical characteristics of steel used in the weapons sector to make barrels for short, small arms is the study's goal. The heat treatment of representative samples resulted in their hardening, surface hardening to a specific layer thickness, and tempering. It has not yet been thoroughly examined how the thickness of the hardened layer affects the modification of the mechanical characteristics of the chosen materials. Surface hardening is widely regarded as one of the methods for producing a resistant core and a hard surface on a component. Nonetheless, the overall material's mechanical characteristics alter in tandem with the layer's thickness. The outcomes of this study will also be useful for the induction heat treatment of other similar material components.

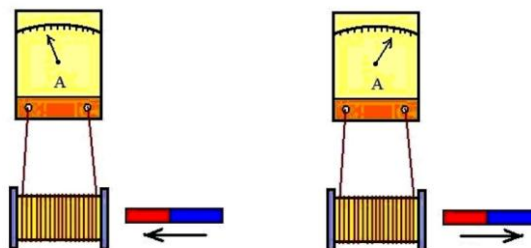
**Keywords:** surface hardening, mechanical properties, selected materials.

## ÚVOD

Zmena mechanických vlastností materiálu použitím „ohňa a vody“, resp. kvapaliny, bola alchymistami skúmaná a využívaná už od čias doby bronzovej. Za ten čas tepelné spracovanie kovových materiálov prešlo podstatnou evolúciou a v súčasnosti sa tento proces používa pri cca 90% súčiastkach, vyrobených zo zliatiny železa. Pokiaľ ide o zvyšovanie tvrdosti súčiastok vyrobených z ocelí, najčastejšie používanou technológiou je kalenie. V praxi sa využívajú rôzne formy kalenia, ako napríklad termálne kalenie, kalenie so zmrazovaním, kalenie vo vákuu alebo povrchové kalenie. Cieľom tejto práce je zistiť a porovnať charakteristiky práve poslednej spomenutej technológie - povrchového kalenia [5].

Povrchové kalenie je často aplikované na súčiastky ako ložiskové krúžky, ozubené kolesá, ozubené a drážkované hriadele, vretená, pinoly a nožové hlavy pre sústruhy, resp. iné obrábacie stroje, ale taktiež sa

využíva aj v zbrojárskom priemysle, napríklad pri kalení hlavni ručných strelných zbraní. Hlaveň pri výstrele musí odolávať rôznym tlakom a napätiam, či už vo vývrte hlavne alebo na jej povrchu, kde dochádza najmä k treniu. Tvrdosť povrchovej vrstvy pri zachovaní húževnatosti jadra je teda jedným zo základných faktorov, ktoré ovplyvňujú životnosť hlavne a teda aj zbrane ako celku [6].



Obr. 1. Vznik elektromagnetickej indukcie [1]

Medzi technológiami povrchového kalenia patrí indukčné kalenie, ktorého základy položil anglický

fyzik *M. Faraday* sformulovaním zákona o elektromagnetickej indukčii (obr. 1). Pri tomto type kalenia je možné dosiahnuť hrúbku kalenej vrstvy (*Rht*) cca  $0,4 \div 4$  mm, v závislosti od frekvencie použitého generátora. Principiálne je možné generátory rozdeliť na stredno-frekvenčné ( $< 1,105$  Hz) alebo vysokofrekvenčné ( $> 1,105$  Hz). Kaliača teplota je rádovo o niekoľko desiatok stupňov vyššia ako pri ostatných technológiách kalenia, avšak jadro súčiastky ostáva neovplyvnené, bez štrukturálnych zmien. Hrúbka a tvrdosť kalenej vrstvy je taktiež ovplyvnená použitím kaliaceho média, konkrétne jeho prúdom a koncentráciou. Najčastejšie sa používa zmes oleja a kvapaliny, napríklad 8 % roztok aquatensidu v čistej vode. Pri kalení do čistej vody vzniká, pri určitých materiáloch, vysoké riziko vzniku povrchových prasklín, z dôvodu vzniku veľkých napätí, spôsobených pri rýchlom prechode z kaliacej teploty

technológiou bude hlavne vyrobená a či je nutné zahrnúť aj proces tepelného spracovania - povrchového kalenia. Preto výrobcovia hlavni v súčasnosti najčastejšie používajú ako vstupný materiál legované ocele triedy 15, konkrétne ocel 15 230.7, 15 330.7 a 15 142.7.



Obr. 2. Vzorky vyrobené pre potreby experimentu [3]

Rozdiel v týchto materiáloch je v percentuálnom

Tab. 1. Chemické zloženie vybraných materiálov [5]

Chem. zloženie	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	V [%]	P [%]	S [%]
15 142 (Cr-Mo)	$0,38 \div 0,45$	$0,50 \div 0,80$	$0,17 \div 0,37$	$0,19 \div 1,20$	$0,15 \div 0,30$	max. 0,50	-	max. 0,035	max. 0,035
15 230 (Cr-V)	$0,24 \div 0,34$	$0,40 \div 0,80$	$0,17 \div 0,37$	$2,20 \div 2,50$	-	-	$0,10 \div 0,20$	max. 0,036	max. 0,036

na teplotu chladiaceho média [1].

V prípade, že sa použije kalenie iba do oleja, tak rýchlosť ochladzovania z kaliacej teploty prebieha značne pomalšie, ako v prípade použitia čistej vody, čo má za následok nižšie hodnoty povrchovej tvrdosti. Na druhej strane, olej má dobré konzervačné vlastnosti a ak sa na ochladzovanie použije iba čistá voda, súčiastky sú omnoho viac vystavené vplyvom korózie, ako v prípade zmesi týchto dvoch kvapalín. Pri popúšťaní ide o popúšťanie v peci a to z dôvodu, že pri indukčnom popúšťaní nie je možné presne kontrolovať rozloženie teploty na súčiastke. Avšak pece, ktoré sa používajú na popúšťanie, sú v mnohých prípadoch taktiež skonštruované na princípe indukčného ohrevu. Najväčšou nevýhodou pri popúšťaní, či už v peci, alebo priamo použitím nástroja (induktora) je, že dochádza aj k ovplyvňovaniu základného materiálu (jadra súčiastky), čo môže byť v určitých prípadoch zušľachtenia materiálu nežiaducim faktorom [4].

Najčastejšie používaným materiálom na výrobu hlavni krátkych ručných strelných zbraní je v súčasnosti ocel, z dôvodu jej dobrej obrobiteľnosti v kombinácii s vhodnými mechanickými vlastnosťami. V určitých špeciálnych prípadoch sa používajú aj zliatiny ľahkých kovov (protitankové zbrane), prípadne kompozitné materiály (plasty vystužené skleneným vláknom). Na výber vstupného materiálu pre výrobu hlavni ma takisto vplyv, akou

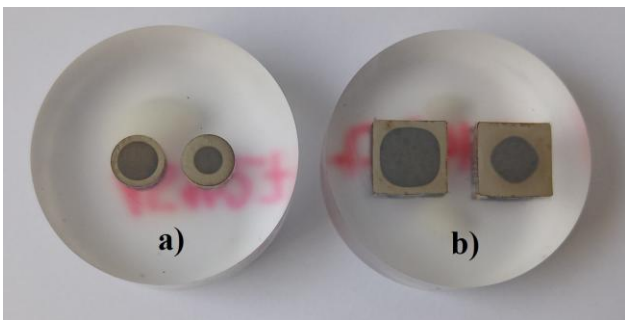
obsahu uhlíka (C) a legujúcich prvkov, čo sa v končnom dôsledku prejavuje najmä po tepelnom spracovaní a to hlavne rozdielnou hodnotou povrchovej tvrdosti. Vývoj v oblasti výroby a ďalšieho spracovania hlavni ručných strelných zbraní z kovových materiálov sa v súčasnosti zameriava na začlenenie postupov chemicko-tepelného spracovania do procesu výroby a to z dôvodu získania lepších mechanických vlastností oproti povrchovému kaleniu. Tento článok však pojednáva o klasickom spôsobe spracovania hlavni vyrobených práve z oceli triedy 15 [7].

## 1 METODIKA EXPERIMENTU

Základnými vlastnosťami ocelí, používaných pre výrobu hlavni krátkych ručných strelných zbraní, sú materiálové charakteristiky, kde patrí povrchová tvrdosť, pevnosť v ťahu ( $R_m$ ), ťažnosť (A), kontrakcia (Z) a vrubová húževnatosť ( $K_{cu}$ ). Vstupný materiál, použitý na výrobu vzoriek, sa v strojárkej výrobe používa na výrobu súčiastok pracujúcich v podmienkach vysokého namáhania. Ide konkrétne o chróm-molybdénovú ocel 15 142, ktorá sa používa na výrobu namáhaných strojných (motorových) súčastí, najmä v tých prípadoch, kde je vyžadovaná vysoká pevnosť a húževnatosť materiálu. Druhým skúmaným materiálom je chróm-vanádiová ocel 15 230, ktorá sa používa na výrobu veľmi namáhaných strojných súčastí a taktiež je tento materiál vhodný pre vytváranie difúzných vrstiev

procesom nitridovania, resp. nitrokarbonovania. V oboch prípadoch bol vstupný materiál po výrobe ešte zušľachtený na strednú hodnotu pevnosti. Z hľadiska obrobiteľnosti patria oba typy materiálu do kategórie s dobrou (vhodnou) obrobiteľnosťou. Rozdiel v chemickom zložení týchto ocelí je najmä v obsahu uhlíka (C), ktorý má vplyv na prekaliteľnosť materiálu a výslednú povrchovú tvrdosť po kalení (tab. 1). Ďalší rozdiel je v obsahu chrómu (Cr), ktorý má vplyv, okrem zlepšenia antikoročných vlastností a odolnosti proti opotrebeniu, aj na výšku kaliacej teploty. Prísady ako *Mo* a *Ni*, ktoré zvyšujú napríklad prekaliteľnosť, sa pri oceli 15 230 nevyskytujú vôbec, rovnako ako sa prísada vanádu, ktorý sa do materiálu pridáva aj kvôli zvýšeniu pevnosti a húževnatosti, nevyskytuje v oceli 15 142. Rozdiel v chemickom zložení materiálov je uvedený v tab. 1 [5].

Princíp experimentu spočíval v zistení a porovnaní vyššie spomenutých mechanických vlastností oboch materiálov. Pre vykonanie experimentu bolo potrebné vykonať viacero operácií, ako zušľachtovanie polotovarov, výrobu vzoriek pre skúšky ťahom a rázom v ohybe, výrobu vzoriek pre skúšky tvrdosti a metalografické skúšky. Po týchto operáciách nasledovalo aj vykonanie týchto skúšok. Skúšky boli vykonané v spolupráci kvalifikovaných pracovníkov *Žilinskej univerzity v Žiline*, ktorí tiež spolupracovali pri spracovaní a formulácii výsledkov týchto vybraných mechanických skúšok materiálov [3].



Obr. 3. Dosažená hrúbka kalenej vrstvy pri vzorkách pre: a) skúšku ťahom, b) skúšku rázom v ohybe [3]

Polotovary pre výrobu vzoriek boli dodané v stave vyžíhanom na mätko. Prvým bodom experimentu bolo zušľachtovanie týchto materiálov na strednú hodnotu pevnosti. Polotovary prešli procesom objemového kalenia - ohrev v peci na teplotu 880°C s následným rýchlym ponorením do kaliaceho média. Po zakalení nasledovalo vysoké popúšťanie na teplotu 470°C, s nábehom dve hodiny a s dvojhodinovou výdržou na tejto teplote. Po uplynutí tohto času prebiehalo voľné ochladzovanie na teplotu prostredia. Polotovary po procese zušľachtovania vykazovali pevnosť približne 1100 MPa (prepočet z tvrdosti). Získaním potrebnej pevnosti v celom priereze polotovaru bolo možné

začať proces výroby vzoriek. Vzorky pre skúšku ťahom, pre skúšky tvrdosti a metalografické skúšky boli vyrobené na univerzálom sústruhu *Trens SN 50* v súlade s normou *ISO 6892-1* (obr. 2). Vzorky pre skúšku rázom v ohybe boli spracované na rovinnnej brúske *TOS BRH 20 A*, kde bol zostrojený aj vrub v tvare „U“, v súlade s normou *ISO 148-1*. Taktiež boli vyrobené aj reprezentatívne vzorky hlavni (bez vývrtu), ktoré boli použité pre zobrazenie zmeny hrúbky kalenej vrstvy v pozdĺžnom a priečnom reze súčiastky, v závislosti na zmene priemeru hlavne. Tieto vzorky však v ďalšej časti experimentu neboli predmetom podrobnejšieho skúmania [3].

Nasledovalo indukčné povrchové kalenie vzoriek. Pre získanie informácií o zmene mechanických vlastností materiálu, v závislosti od zmeny hrúbky kalenej vrstvy, bol zvolený postup spracovania oboch typov ocelí na hrúbku kalenej vrstvy  $1 \pm 0,1$  mm a na hrúbku kalenej vrstvy  $2 \pm 0,1$  mm (obr. 3). Ako koniec kalenej vrstvy (*Rht*) bola uvažovaná tvrdosť 500 HV1. Pri nastavovaní procesu povrchového kalenia bola dosiahnutá rovinnosť kalenej vrstvy 0,1 mm. Rádiusy pri vzorkách zakalené neboli, pričom začiatok aj koniec kalenej vrstvy boli od priemeru  $\varnothing 12$ , určeného pre upnutie vzorky do čeľustí ťhacieho zariadenia, vzdialené v rozmedzí  $6 \pm 0,2$  mm. Vzorky po kalení ďalej prešli procesom popúšťania na teplotu 150°C, s nábehom a aj výdržou jednu hodinu, z dôvodu zníženia vnútorných napätí v novovzniknutej vrstve. Vplyv tohto popúšťania na výslednú povrchovú tvrdosť bol zanedbateľný [3].

Prvou zo skúšok bola skúška tvrdosti pri nízkom zaťažení. Meranie tvrdosti bolo vykonávané pomocou meracieho zariadenia *Qness Q10M*, ktoré ponúka možnosť vyhodnocovania výsledkov *Vickersovou metódou*. Diamantový hrot bol vtlačaný do vzorky silou 9,8 N (1 kg) po dobu 4 s. Vzorky bolo nutné pred meraním pripraviť, t.j. rezať, zalievať a leštiť. Leptanie nitalom na týchto vzorkách realizované nebolo, z dôvodu nepresnejších výsledkov meracieho zariadenia (optimálna je lesklá plocha) [3].

Statická skúška ťahom bola realizovaná na ťhacom zariadení *ZDM 30*. Pri tejto skúške boli zisťované veličiny ako max. sila, dosiahnutá pri prechode z pružného do plastického stavu materiálu (*Fe*), ďalej max. sila, potrebná na pretrhnutie vzorky (*F<sub>m</sub>*), predĺženie vzorky ( $\Delta L_m$ ) a priemer vzorky pred a po roztrhnutí (*d<sub>0</sub>*, *d<sub>u</sub>*). Táto skúška bola pre vyhodnotenie experimentu najdôležitejšia, lebo na základe jej výsledkov bolo možné definovať viac ako 50 % všetkých zisťovaných materiálových charakteristík [5].

Poslednou mechanickou skúškou, vykonanou pre potreby experimentu, bola skúška rázom v ohybe. Pri tejto skúške boli zaznamenávané parametre ako

maximálna práca, ktorú vykoná *Charpyho kladivo* pri zlomení vzorky v oslabenom mieste (*K*) a rozmery vzorky v mieste vrubu pred začatím skúšky a po jej ukončení. Húževnatosť - charakteristika, skúmaná pri tejto skúške, je možné považovať za najpodstatnejšiu materiálovou vlastnosťou z hľadiska životnosti hlavne. Preto aj výsledky, získané pri tejto skúške, majú najväčší prínos pre dimenzovanie rovnakého typu výrobkov. Po vykonaní mechanických skúšok nasledoval posledný bod experimentu - pozorovanie a popisovanie mikroštruktúry všetkých fáz, vzniknutých po procesoch tepelného spracovania. Toto pozorovanie bolo vykonané na zariadení *Neophot 32* pri zväčšení 800x.

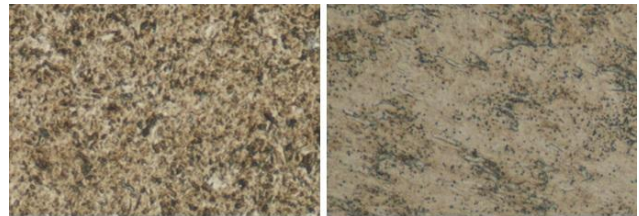
Pre toto pozorovanie boli použité rovnaké vzorky, ako pre skúšky tvrdosti. Tieto vzorky boli vyleštené na plstenom kotúči s pridaním brusiva - diamantovej pasty s veľkosťou zrna 1  $\mu\text{m}$ . V tomto prípade nasledovalo aj leptanie vzoriek v 5% nitale. Kontrolovaná bola mikroštruktúra kalenej vrstvy, prechodovej vrstvy a kalením neovplyvneného, zušľachteného jadra vzorky [3].

## 2 VÝSLEDKY EXPERIMENTU A DISKUSIA

Merania tvrdosti a hrúbky kalenej vrstvy, v priečnom reze, boli realizované na vzorkách pre skúšku ťahom aj rázom v ohybe, pre oba režimy povrchového kalenia (tab. 2). Meranie bolo vo všetkých prípadoch vykonané v polovici dĺžky vzorky. Vzdialenosť medzi meracími bodmi bola 0,2 mm. V prípade vzoriek vyrobených z ocele 15 142.7 bola dosiahnutá povrchová tvrdosť priemerne 700 HV1 a tento nárast predstavoval zlepšenie tejto mechanickej vlastnosti, oproti základnému materiálu, približne o 94 %.

Tab. 2. Výsledky experimentu [3]

Oceľ	Tepelné spracovanie	Tvrdosť [HV1]	$R_e$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A$ [%]	$Z$ [%]	$E$ [GPa]	$K_{cu}$ [J·cm <sup>-2</sup> ]
15142.7	Základný materiál	340 ÷ 380	1000 ÷ 1050	1080 ÷ 1240	12,9 ÷ 13,1	52 ÷ 56	147 ÷ 182	110 ÷ 135
	Povrchovo tvrdý materiál - vrstva 1 mm	700 ÷ 720	-	1240 ÷ 1300	3,2 ÷ 3,4	18 ÷ 25	178 ÷ 201	55 ÷ 56
	Povrchovo tvrdý materiál - vrstva 2 mm	680 ÷ 700	-	1340 ÷ 1390	3,8 ÷ 4,1	30 ÷ 37	164 ÷ 175	30 ÷ 34
15 230.7	Základný materiál	360 ÷ 400	1240 ÷ 1290	1240 ÷ 1290	9,2 ÷ 10,2	50 ÷ 51	219 ÷ 235	86 ÷ 95
	Povrchovo tvrdý materiál - vrstva 1 mm	595 ÷ 600	x	1360 ÷ 1410	5,7 ÷ 5,9	26 ÷ 33	114 ÷ 120	98 ÷ 102
	Povrchovo tvrdý materiál - vrstva 2 mm	590 ÷ 600	x	1440 ÷ 1470	3,3 ÷ 3,4	23 ÷ 24	208 ÷ 218	47 ÷ 49



a) b)

Obr. 4. Mikroštruktúra kalenej vrstvy (zväčšenie 800x): a) 15 142 - Martenzit-troostit, b) 15 230 - jemný martenzit [3]

Vzorky vyrobené z ocele 15 230.7 vykazovali oproti vzorkám, vyrobeným z *chróm-molybdénovej* ocele, nižšiu hodnotu povrchovej tvrdosti, priemerne 597 HV1. Táto hodnota povrchovej tvrdosti predstavuje zlepšenie, oproti vlastnostiam základného materiálu, približne o 57 %. Tento rozdiel v tvrdostiach je samozrejmy a jeho podstatou je rozdiel v percentuálnom obsahu uhlíka a legujúcich prvkov. Vplyv zmeny hrúbky vrstvy na hodnoty povrchovej tvrdosti bol minimálny, pri oboch typoch vybraných ocelí (cca 5 %) [5].

Statická skúška ťahom poskytla informácie o viacerých pevnostných charakteristikách. Ako sa dalo predpokladať, pri povrchovo kalených vzorkách nebol pozorovaný jav plastickej deformácie bez prírastku zaťaženia ( $R_e$ ). V prípade vzoriek, vyrobených iba zo základného materiálu, tento jav pozorovaný bol, avšak sila, odpísaná zo stupnice meracieho zariadenia, pri sledovaní tohto javu, sa v porovnaní so silou, potrebnou na pretrhnutie vzorky, nezvýšila vôbec alebo len minimálne [3].

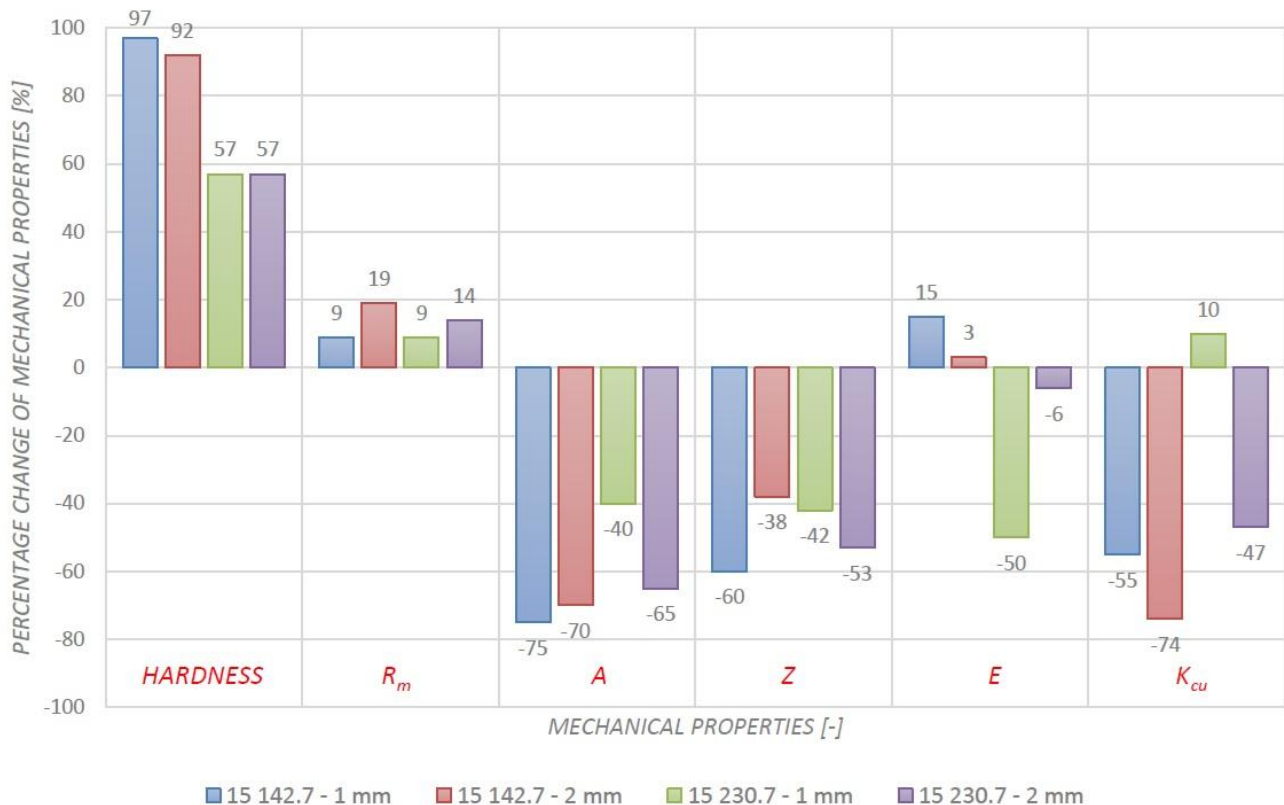
Pevnosť v ťahu ( $R_m$ ) sa zvyšovala zároveň so zväčšovaním hrúbky kalenej vrstvy ( $R_{ht}$ ) a to pri oboch typoch materiálu. V prípade ocele 15 142.7 sa pevnosť v ťahu, v porovnaní so základným materiálom, zvýšila maximálne o 19% a zmena

vlastnosti medzi zvolenými režimami kalenia predstavovala približne 10 %. V prípade vzoriek vyrobených z ocele 15 230.7 bolo zaznamenané zlepšenie tejto materiálovej charakteristiky, oproti základnému materiálu, maximálne o 14 % a pri zvyšovaní hrúbky vrstvy sa táto vlastnosť zvýšila o 6 %. Avšak vyššia hodnota pevnosti v ťahu bola zaznamenaná pri chróm-vanádiovej oceli 15 230.7, takmer 1500 MPa [3].

Ťažnosť (A) sa pri povrchovo kalených vzorkách rapídne znížila, v prípade materiálu 15 142.7 až o 75 %. Pri tomto type materiálu bol rozdiel v

vlastností, pri tomto type ocelí, bola oproti základnému materiálu až 60 % v negatívnom smere a pre vybrané režimy povrchového kalenia približne 20 %. V prípade materiálu 15 230.7 bola zistená zmena kontrakcie maximálne o 53 %, v porovnaní so základným materiálom a s rastúcou hrúbkou kalenej vrstvy sa táto charakteristika znižovala, pričom rozdiel medzi povrchovo kalenými vzorkami bol približne 10 % [3].

Po vykonaní statickej skúšky ťahom je teda možné konštatovať, že pri procese povrchového kalenia, okrem zvyšovania tvrdosti a pevnosti v ťahu,



Obr. 5. Zmena mechanických vlastností vyjadrená v %

mechanických vlastnostiach pri oboch režimoch kalenia minimálny (5 %). V prípade materiálu 15 230.7 sa ťažnosť zmenšovala s rastom hrúbky kalenej vrstvy, približne o 20 % a oproti základnému materiálu sa táto charakteristika znížila maximálne o 65 %. Vplyv zmeny hrúbky kalenej vrstvy na ťažnosť je teda celkom značný a vo svojej podstate aj logický. Podstatou je zmena typu mikroštruktúry v povrchovo kalenej vrstve, čo ma za následok tesnejšie a pevnejšie usporiadanie atómov. Zosilnením väzieb medzi atómami vzrastá aj napätie v materiáli, ktoré sa prejavuje stratou pružných vlastností (ale zlepšením pevnosti v ťahu) [5].

Pri pozorovaní mechanickej vlastnosti, známej ako kontrakcia (Z), bol pozorovaný jav, kedy pri vzorkách vyrobených z chróm-molybdénovej ocele vykazovali lepšie vlastnosti vzorky s väčšou hrúbkou kalenej vrstvy ( $2 \pm 0,1$  mm). Zmena mechanických

dochádza aj k rapídnej zmene pružno-plastických vlastností materiálu. Zmena mechanických vlastností vybraných materiálov, vplyvom zväčšovania hrúbky kalenej vrstvy, bola preukázaná pri všetkých skúmaných charakteristikách, v určitých prípadoch však bola táto zmena zanedbateľná. Celkovo je možné zhodnotiť, že v prípade vzoriek, vyrobených zo zúšľachtenej CrV ocele 15 230.7, boli pri statickej skúške ťahom zaznamenané menšie a menej podstatné zmeny mechanických vlastností, ako pri vzorkách vyrobených z CrMo ocele 15 142, rovnako zúšľachtenej na strednú hodnotu pevnosti [3].

Poslednou skúmanou vlastnosťou bola vrubová húževnatosť ( $K_{cu}$ ). Z fyzikálnej podstaty procesu kalenia je zrejmé, že pri zvyšovaní tvrdosti dochádza aj k zvyšovaniu krehkosti materiálu, resp. k znižovaniu jeho húževnatosti. Z toho vyplýva, že aj pri zvyšovaní hrúbky kalenej vrstvy by malo

dochádzať k zvyšovaniu krehkosti. Preto bolo zaujímavé pozorovať fakt, že vzorky vyrobené z ocele 15 230.7 s hrúbkou kalenej vrstvy  $1 \pm 0,1$  mm vykazovali približne o 10 % lepšie výsledky skúšok rázom v ohybe, ako vzorky, ktoré neprešli procesom povrchového kalenia. V prípade režimu kalenia na vrstvu  $2 \pm 0,1$  mm však už bola maximálna zmena vrubovej húževnatosti, oproti základnému materiálu, až o 47 % v negatívnom smere. Pri vzorkách, vyrobených z ocele 15 142.7 boli zistené väčšie zmeny už pri skúškach povrchovej tvrdosti, čo malo za následok aj zvyšovanie krehkosti. Húževnatosť sa pri tomto type materiálu a spôsobe jeho spracovania na hrúbku kalenej vrstvy  $2 \pm 0,1$  mm, zhoršila maximálne o 74 % a zmena tejto vlastnosti pri zvyšovaní hrúbky kalenej vrstvy predstavovala približne 20 %. Taktiež aj v prípade skúšky vrubovej húževnatosti je možné zhodnotiť, že lepšie vlastnosti po procese povrchového kalenia vykazovali vzorky vyrobené z chróm-vanádiovej ocele 15 230.7 [3].

Na záver experimentu boli vykonané mikroskopické pozorovania, ktoré už priamo nespádajú pod mechanické skúšky materiálov, ale typ mikroštruktúry priamo ovplyvňuje výsledné mechanické vlastnosti. Pozorované boli všetky fázy, vzniknuté po procesoch tepelného spracovania. V prípade ocele 15 142.7 bola pri základnom materiáli pozorovaná sorbitická štruktúra, teda zmes feritu, globulárnych útvarov cementitu a iných karbidických fáz a ktorá je dôsledkom procesu zušľachtovania. V oblasti zakalenej vrstvy bola pozorovaná martenziticko-troostitická štruktúra (obr. 4a). Taktiež pri oceli 15 230.7 bola pri základnom materiáli pozorovaná sorbitická štruktúra a v oblasti kalenej vrstvy maticu tvoril jemný martenzit (obr. 4b). Rozdiel medzi pozorovanými mikroštruktúrami je v tvrdosti, kedy pri martenziticko-troostitckej štruktúre je možné dosiahnuť vyššiu tvrdosť, ako pri jemnom martenzite. Ďalším rozdielom v mikroštruktúrach vybraných materiálov je veľkosť zŕn, ktorá je značne väčšia pri materiáli 15 142.7. Táto veľkosť zŕn má priamy vplyv na húževnatosť materiálu, pretože najväčšie vnútorné napätie v materiáli je práve na hraniciach zŕn (väčšie zrno = väčšia plocha). Zo získaných informácií je teda možné zhodnotiť, že práve typ mikroštruktúry pri materiáli 15 230.7 je podstatou lepších výsledkov pri skúškach vrubovej húževnatosti.

## ZÁVER

Hlaveň je historicky najstaršia časť každej strelnej zbrane, rovnako ako aj najpodstatnejšia. Počas výstrelu zo zbrane dochádza k zrýchleniu a usmerneniu streľiva, čo je spojené s výbuchom prachovej nálož. Tento výbuch je charakteristický vznikom tlakovej sily, ktorá má tendenciu „dostať

sa“ von z hlavne (tlmič je založený práve na princípe eliminácie tohto tlaku). Okrem toho je tento výbuch sprevádzaný aj prudkým nárastom tepelnej energie, ktorá ma zase vplyv na rozmerové zmeny materiálu hlavne. Tieto rozmerové zmeny majú zase priamy vplyv na kvalitu a funkciu zbrane. Taktiež v prípade znefunkčenia alebo poškodenia hlavne je zbraň prakticky nepoužiteľná, až kým nedôjde k jej výmene za nový kus. Požiadavky na čo najlepšie mechanické vlastnosti materiálu sú teda vysoké [2].

Cieľom príspevku bolo zhodnotiť, ako sa menia vybrané mechanické vlastnosti materiálov, používaných, okrem iného, aj na výrobu hlavni krátkych ručných strelných zbraní, v závislosti od spôsobu tepelného spracovania. Tieto materiály prešli procesmi zušľachtovania, povrchového kalenia a popúšťania, spôsobmi bežne používanými pri spracovávaní tohto typu súčiastok. Podstatou skúmania bolo zistiť, ako sa budú meniť mechanické vlastnosti vybraných ocelí, ktoré prejdú dvoma rozdielnymi režimami povrchového kalenia s dosiahnutím maximálnej povrchovej tvrdosti. V prípade prvého režimu bola dosiahnutá hrúbka kalenej vrstvy  $1 \pm 0,1$  mm, pri druhom režime bola dosiahnutá hrúbka kalenej vrstvy  $2 \pm 0,1$  mm [3].

Pre účely zistenia a porovnania potrebných mechanických vlastností vybraných materiálov, bol vykonaný uvedený experiment, popísaný v predošlom texte. Vplyv zmeny hrúbky kalenej vrstvy na výsledné mechanické vlastnosti bol preukázaný pri všetkých kontrolovaných charakteristikách (tab. 3). V určitých prípadoch bola táto zmena zanedbateľná, avšak v určitých prípadoch naopak veľmi podstatná. Dôležitým poznatkom celého experimentu je to, že pri *chróm-vanádiovej* oceli 15 230.7, s režimom tepelného spracovania na maximálnu povrchovú tvrdosť a hrúbku kalenej vrstvy  $1 \pm 0,1$  mm, bolo dosiahnuté, ako v jedinom prípade, zvýšenie koeficientu vrubovej húževnatosti ( $K_{cu}$ ) [3].

Bez vykonania ďalších skúšok sa nedá určiť, ktorý z porovnávaných materiálov je vhodnejší pre výrobu tohto typu súčiastky. Pri zhodnotení faktu, že najpodstatnejším činiteľom pôsobiacim na povrch hlavne je trenie, ktoré vzniká posuvom hlavne pri výstrele, odporúča sa používať pri tomto type súčiastok minimálnu hrúbku zakalenej vrstvy. Výsledky, získané pri tomto experimente sa dajú použiť aj v prípade dimenzovania iných typov súčiastok [3].

Z hľadiska vývoja hlavni strelných zbraní je dôležitým aspektom výskum v oblasti chemicko-tepelného spracovania tohto typu súčiastok. Takýmito procesmi je možné získať omnoho menšie hrúbky „vytvrdenej“ vrstvy. V týchto prípadoch však dochádza okrem zmeny kryštalografickej mriežky, aj k zmene chemického zloženia v tejto vrstve. Oproti

vrstvám, vytvoreným procesom kalenia, však tieto vrstvy vykazujú omnoho vyššiu tvrdosť. V prípade vytvárania difúzných vrstiev procesom boridovania by bolo možné pri rovnakých materiáloch, ako boli použité v experimente, dosiahnuť povrchovú tvrdosť až 2000 HV1, pri hrúbke difúznej vrstvy pohybujúcej sa v stotínach milimetra. Otázne je, ako tento proces ovplyvní celkové mechanické vlastnosti materiálu [7].

## LITERATÚRA

[1] BAAKE, E. - NACKE, B. (2016): *Induction heating*. Essen: Vulkan-Verlag, ISBN 3802723910.

[2] BENCÚR, M. (2020): <https://www.vojsko.net>. Vojsko. [Online]: <https://www.vojsko.net/vyzbroj-pechoty/76-pistole-a-revolvery/3801-uvaha-nad-zabidnutymi-poistkami-pistoli>.

[3] JAŠŠO, M. (2022): *Osobitosti indukčného tepelného spracovania vybraných materiálov pre výrobu hlavni*. Diplomová práca, Žilinská univerzita v Žiline, č. 28230120222019.

[4] PTÁČEK, L. et al. (2003): *Nauka o materiálu 2*. vyd. Brno: CERM, 516 s. ISBN 80-7204-283-1.

[5] SKOČOVSKÝ, P. (2014): *Nauka o materiáli*. Žilina: EDIS, ISBN 978-80-554-0871-2.

[6] LIDMILA, Z. et al. (1999): *Strojírenská technológia II, Technologie ve výrobě zbraní a munice*. Brno: Univerzita obrany.

[7] ŽUK, A. B. (2015): *Revolvery a pistole*. Praha: Naše vojsko, ISBN 978-80-2061-549-7.

# Stanovenie strižnej sily pomocou experimentálneho nástroja

**Borislav Melo, Ing., PhD.\***

Viena International, spol. s r. o.,  
Dolné Kráčiny 2, 036 01 Martin.  
E-mail: melo@viena.sk

## Determination of shear force using an experimental tool

**Abstract:** The contribution deals with the possibility of applying a special shearing tool, which could be used to determine the shearing forces of thinner sheets. The device is suitable for a wide range of presses. Both theoretical and practical knowledge from this issue is presented. The construction of the shearing tool is shown. In the experimental part, the correct solution of the tool was confirmed. The results of process simulations for cutting three types of materials are also published.

**Keywords:** shearing, sheet metal, press, tool, construction.

## ÚVOD

Strihanie je beztrieskový spôsob oddelenia materiálu - najmä plechu v požadovanom rozmere, tvare a kvalite strihov. Pri strihaní sa v mieste deformácie prerušia vlákna materiálu a dôjde k oddeleniu častí materiálu. Strihanie môže byť:

- po otvorenom obryse,
- po uzavretom obryse.

Výstrižok je iba časťou východiskového materiálu, zvyšok je odpad. Výstrižok má úplne vyhovovať účelu – požiadavkám v prevádzke.

Príspevok sa venuje stanoveniu strižnej sily pri použití experimentálneho zariadenia.

## 1 TECHNOLOGIE SPRACOVANIA PLECHU

### 1.1 Delenie materiálu

Okrem trieskového a nekonvenčného delenia sú známe dva spôsoby delenia materiálu: *lámanie* a *strihanie*.

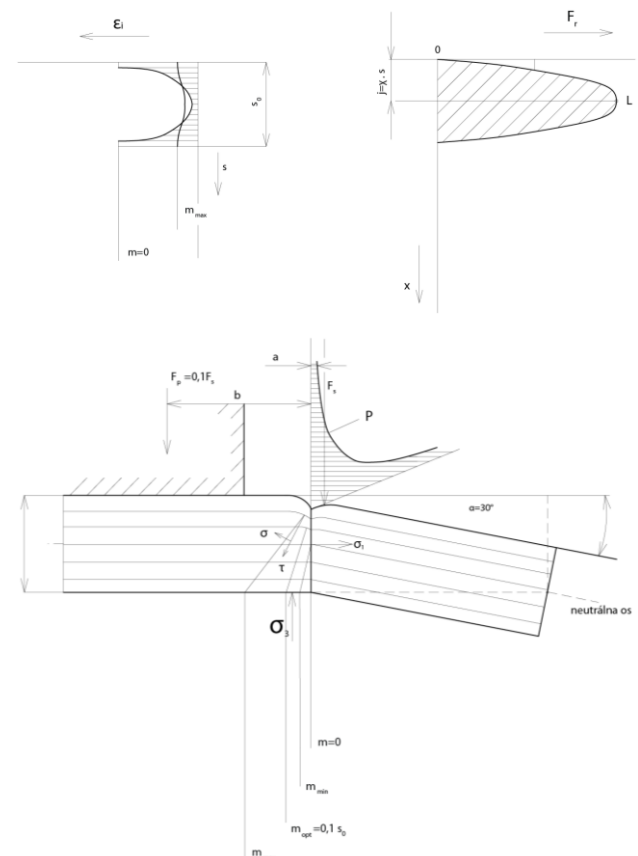
Delenie materiálu je buď prípravou operáciou pred ďalším spracovaním inými technologickými metódami, alebo sa strihaním môže realizovať konečný tvar výrobku.

Lámanie sa používa pri delení tvrdších, krehkých materiálov veľkej hrúbky. Lámaním sa pripravujú polovýrobky pre voľné kovanie, napr. veľkých hriadeľov [1-4].

#### 1.1.1 Strihanie

Strihanie je základnou prácou delenia materiálov strihom. Pri kovocho začína elastickou, potom

plastickou deformáciou a po lokálnom vyčerpaní plasticity končí porušením (obr. 1).



**Obr. 1.** Proces strihu: vľavo - intenzita deformácií, vpravo - pracovný diagram: *M* - strižná medzera, *OE* - elastická oblasť, *EL* - plastická oblasť, *L* - lom, *p* - špecifický tlak noža

Rozdelenie materiálov pri strihaní sa uskutočňuje prostredníctvom vzájomného posuvu jeho susedných častí v smere hrúbky. Aby mohla vzniknúť lokalizácia plastickej deformácie v strižnej rovine, volíme hrany

strižníka a strižnice ostré s malou strižnou vôľou medzi nimi.

Rozloženie napätí a deformácie v ohnisku plastickej deformácie je charakterizované veľkou nerovnomernosťou v smere kolmom na strižnú plochu, ale aj v jej smere, čo veľmi sťažuje úlohu matematického riešenia (obr. 2).

### 1.1.2 Všeobecné a zjednodušené výpočty pri strihaní

Ak sa pri výpočtoch vychádza z tvaru pracovného diagramu, dá sa získať riešenie aj pre najhrubšie zjednodušenia. Pracovný diagram strihania má tvar podľa obr. 2 vpravo a je charakteristický pomerne plynulým rastom sily až po maximálnu hodnotu, pri ktorej pre nízkoelasticke kovy nasleduje prudký pokles sily a pre kovy za maximom sily sa ešte nachádza oblasť menšieho plynulého poklesu sily s nasledujúcim prudkým poklesom. Prudký pokles strižnej sily je spojený s porušením - lomom. Až do tohto maxima sila prekonáva deformačný odpor v oblasti ohniska plastickej deformácie. Dôležité je vedieť, čo spôsobuje plynulý rast strižnej sily až do maxima, keď súčasne od začiatku strihania sa strižná plocha monotónne znižuje. Predpokladá sa, že príčinou je spevnenie. Strižný proces v ohnisku plastickej deformácie sa považuje za šmykový, a teda na strižných hranách strižníka a strižnice pôsobia maximálne šmykové napätia, ktoré sú v podmienkach plastickej deformácie rovné hodnote konštanty plasticity  $k = K = \frac{k_p}{2}$ . Pri predpoklade malého uhla povrchu polotovaru k osi strižníka sa môže napísať:

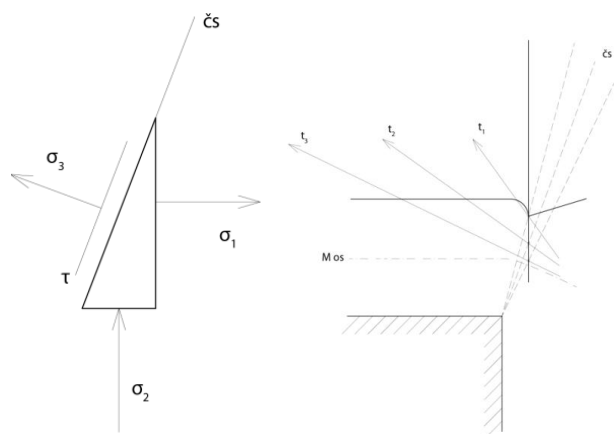
$$F_s = L \cdot (s - x) \cdot \frac{k_p}{2} \quad (1)$$

kde  $L$  - dĺžka čiary strihu,

$s$  - hrúbka materiálu,

$x$  - hĺbka vniknutia strižníka do plechu.

Strižný proces sa pokladá za rovinnú deformáciu podľa obr. 1.

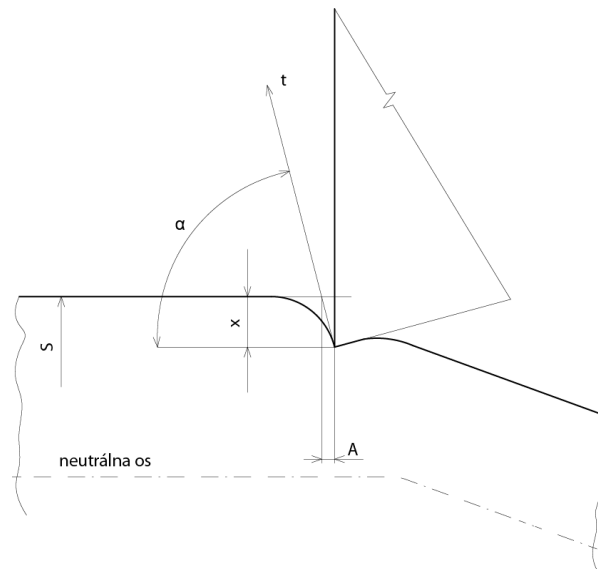


Obr. 2. Rovinná napätosť v neutrálnej osi

Rovinný stav napätosti pre ľubovoľnú hodnotu stredného hlavného napätia a pre podmienku  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$  sa dá stanoviť pomocou zjednodušenej podmienky plasticity v tvare:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \pm \beta \cdot k_p \quad (2)$$

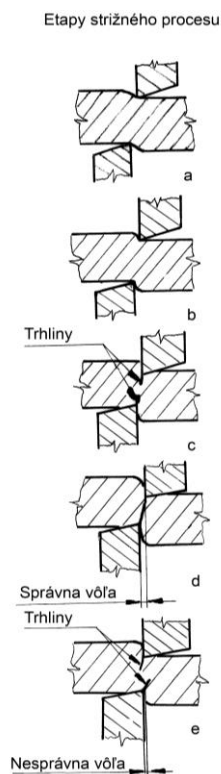
kde  $\beta$  je súčiniteľ v rozmedzí  $1 \div 1,155$ .



Obr. 3. Ohnisko plastickej deformácie pri strihaní

### 1.1.3 Technologický pohľad na proces strihania

Na obr. 4 sú zachytené schematicky fázy strižného procesu.



Obr. 4. Etapy (fázy) strižného procesu

Prvá fáza (pružná) je stláčanie vlákien strihaného materiálu. V druhej fáze vnikajú ostria nástroja do materiálu a nasledovne v tretej fáze začína vlastné

strihanie, kedy sa vytvoria v okolí strižných hrán trhliny, ktoré sa pri správnej strižnej vôli musia stretnúť. V prípade nesprávnej strižnej vôle sa vytvorí zárodok trhlínok v opačnom smere, čo má za následok nekvalitný povrch strižnej plochy. Posledná fáza je oddelenie materiálu a vznik dvoch povrchov. Optimálna veľkosť strižnej vôle medzi strižníkom a strižnicou je dôležitá pre udržanie ostrosti strižných hrán a čistotu strihu. Veľkosť strižnej vôle sa riadi podľa druhu materiálu a jeho hrúbky [5-8].

## 1.2 Prehľad druhov strihania

Pri strihaní sa dajú pozorovať tri základné fázy:

1. Strižník vniká do materiálu a dochádza k pružnej deformácii materiálu. Táto fáza trvá až do dosiahnutia medze pružnosti.
2. V ďalšej fáze dochádza k tvárnej deformácii materiálu, ktorá je charakterizovaná prekročením medze sklzu. Strižník vniká do polovice strihanej hrúbky.
3. V poslednej fáze dôjde k oddeleniu materiálu, čo je prekročenie medze pevnosti v strihu.

Na zhl'ade strižnej plochy sú obe posledné fázy zrejme. Tvárna deformácia vytvára nízku, kovovo lesklú plôšku. Ušmyknutie spôsobí šikmú matnú plochu, niekedy aj s viditeľnými trhlinami [9-10].

Strihanie sa dá deliť takto:

- a) *strihanie jednoduché* - rozdeľovanie materiálu,
- b) *dierovanie* - vyhotovenie dier,
- c) *vystrihovanie* - obrys výstrižkov je uzavretý,
- d) *obstrihávanie* - oddelenie prebytočného materiálu,
- e) *pristrihovanie* - dosiahnutie presných tvarov,
- f) *nastrihovanie* - čiastočné nastrihnutie materiálu,
- g) *pretrhávanie* - pretrhnutie materiálu za účelom vytvorenia hrotu, výstupku a pod.

### 1.2.1 Strižná vôľa

Strižná vôľa má vplyv na strižnú silu, trvanlivosť ostria a na kvalitu strižných plôch. Jej vplyv na kvalitu strihu je zrejmy z obr. 4.

Správne zvolená strižná vôľa zaručuje i správny strižný pochod. Optimálna veľkosť strižnej vôle medzi strižníkom a strižnicou je dôležitá pre udržovanie ostrosti rezných hrán a čistotu strihu. Takisto má vplyv na udržiavacie náklady na strihadlá. Veľkosť strižnej vôle sa riadi podľa druhu materiálu a jeho hrúbky. Ak je pri strihaní rozhodujúci tlak, volíme väčšiu vôľu, ale ak ide o požiadavku zachovania čistoty strižnej plochy volíme menšiu vôľu. Strižná medzera sa stanoví výpočtom podľa Oehlera:

- pre plech hrúbky 3 mm:

$$m = \frac{v}{2} = 0,32 \cdot c \cdot t \cdot \sqrt{k_s} \quad (3)$$

pre plech nad hrúbku 3 mm:

$$m = \frac{v}{2} = 0,32 \cdot (1,5 \cdot c \cdot t - 1,5) \cdot \sqrt{k_s} \quad (4)$$

kde  $v$  - strižná vôľa [mm],

$t$  - hrúbka strihaného materiálu [mm],

$k_s$  - strižný odpor [MPa],

$c = 0,005 \div 0,025$  - súčiniteľ závislý od stupňa strihu,

$m$  - strižná medzera [mm].

### 1.2.2 Strižná sila

Strižná sila, (tangenciálna sila), je typ silového účinku, ktorý pôsobí v materiáli alebo konštrukcii rovno v horizontálnom smere, teda rovno v priestore. Táto sila spôsobuje posun častí materiálu alebo konštrukcie jednu oproti druhej, čo vedie k deformácii alebo roztrhnutiu.

Pri výpočte strižnej sily sa zvyčajne používa základný princíp mechaniky: sila je rovná súčinu tlaku a plochy, na ktorú sa táto sila pôsobí. Pre strižnú silu platí podobný princíp, ale je dôležité zväžiť aj faktor tvaru a orientácie plochy:

$$F_s = 0,8 \cdot R_m \cdot l \cdot t \cdot k \quad (5)$$

kde  $F_s$  - strižná sila,

$R_m$  - medza pevnosti,

$l$  - dĺžka strihu,

$t$  - hrúbka materiálu,

$k$  - koeficient opotrebenia.

## 2 NÁVRH EXPERIMENTÁLNEHO ZARIADENIA

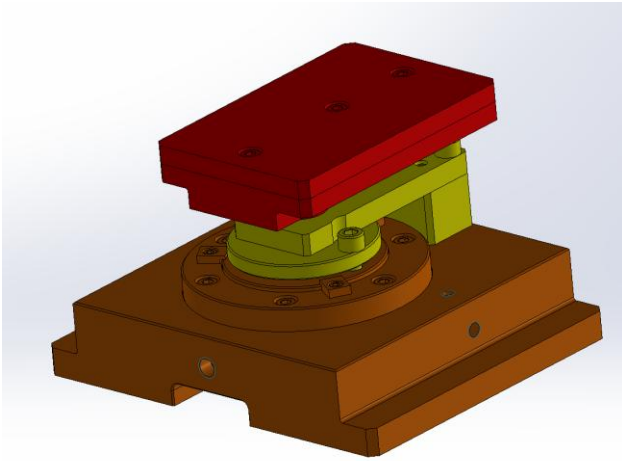
Experimentálne zariadenie sa skladá z 15 samostatných dielov, ktoré sa dajú spojiť do troch základných častí: *tela zariadenia*, *pridržiavača vzorky* a *strižníka* (obr. 5).

Spodná časť zariadenia je nepohyblivá, ktorá v prevádzke stojí na mieste. Jej úlohou je poskytnúť stabilitu a pevnú podporu pre ďalšie časti zariadenia.

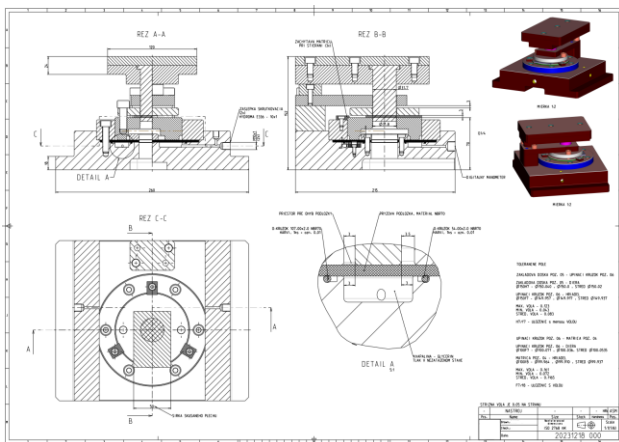
Pridržiavač vzorky zabezpečuje polohu a uchytenie vzorky. Takisto slúži aj ako dorazová plocha pre strižník, čím umožňuje presné a opakované strihanie vzorky.

Strižníková časť vykonáva pohyb a pohybuje sa vo vertikálnej osi a zabezpečuje presné a kontrolované strihanie vzorky podľa požadovaných parametrov.

Po tom čo bolo zariadenie navrhnuté sa vyhotovila výkresová dokumentácia (obr. 6), podľa ktorej bolo celé zariadenie vyrobené a skompletizované do finálnej formy určenej pre vykonávanie experimentu.



Obr. 4. Počítačový model experimentálneho zariadenia, strižník (červená časť), pridržiavač (žltá) a telo (oranžová)



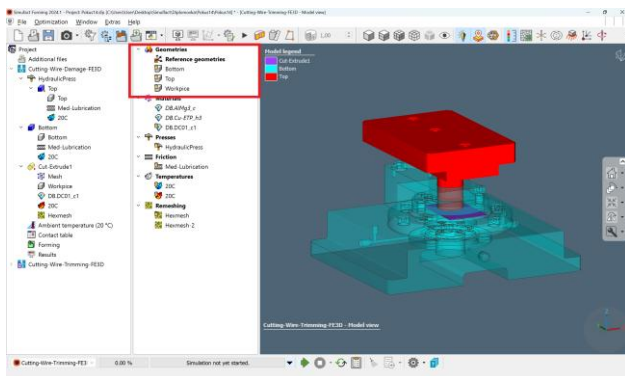
Obr. 5. Zostavný výkres

### 3 SIMULÁCIA

Simulácie boli vyhotovené v softvéri *Simufact Forming 2024.1* pomocou metódy konečných prvkov (MKP). Vďaka tejto metóde bolo možné ušetriť čas potrebný na vyhotovenie týchto simulácií, čo prispelo k efektívnosti a presnosti výsledkov.

#### 3.1 Nastavenie simulácie

Pred tým, ako sa začne samotnou simuláciou a získaním výsledkov je nutné správne nastavenie simuláčného programu.



Obr. 6. Použité časti modelu pre simuláciu

Dôležité je mať k dispozícii čo najpresnejšie modely zariadení, ktoré sa používajú na strihanie vzoriek. Modely by mali zohľadňovať všetky relevantné faktory a parametre zariadenia, aby simulácie boli čo najpresnejšie. Z tohto dôvodu boli preto použité rovnaké modely ako pri technickom návrhu zariadenia (obr. 7).

#### 3.2 Nastavenie materiálov

Použitie rovnakých materiálov a parametrov pre simuláciu ako pre reálny experiment je kľúčové pre dosiahnutie spoľahlivých výsledkov. Použité materiály boli *DC01*, *AlMg3* a *Cu-ETP*.

Každý z týchto materiálov má v knižnici materiálov v softvéri *Simufact Forming* veľké množstvo informácií, ktoré môžu zahŕňať mechanické vlastnosti, termodynamické parametre, správanie sa materiálu pri rôznych teplotách a rýchlostiach deformácie ako aj ďalšie relevantné údaje. Teplota simulácii bola určená na 20°C.

#### 3.3 Vytvorenie mriežky pre materiál

Rozdelenie materiálu na minimálne časti pomocou metódy konečných prvkov (MKP) je jeden z kľúčových princípov tejto simulačnej techniky.

Voľba veľkosti jednotlivých prvkov je dôležitá, pretože ovplyvňuje presnosť výsledkov a výpočtovú náročnosť simulácie. V tomto prípade bola veľkosť dielika 0,45 milimetra, čo je relatívne malá hodnota a umožňuje dosiahnuť detailné a presné simulácie. Posun nástroja bol zvolený 8,0 milimetrov s obmedzením v kontakte s dorazom. Tento prístup umožňuje nástroju dostatočný pohyb na prestrihnutie materiálu a zároveň minimalizuje riziko kolízie.

#### 3.4 Výsledky simulácie

##### 3.4.1 DC01

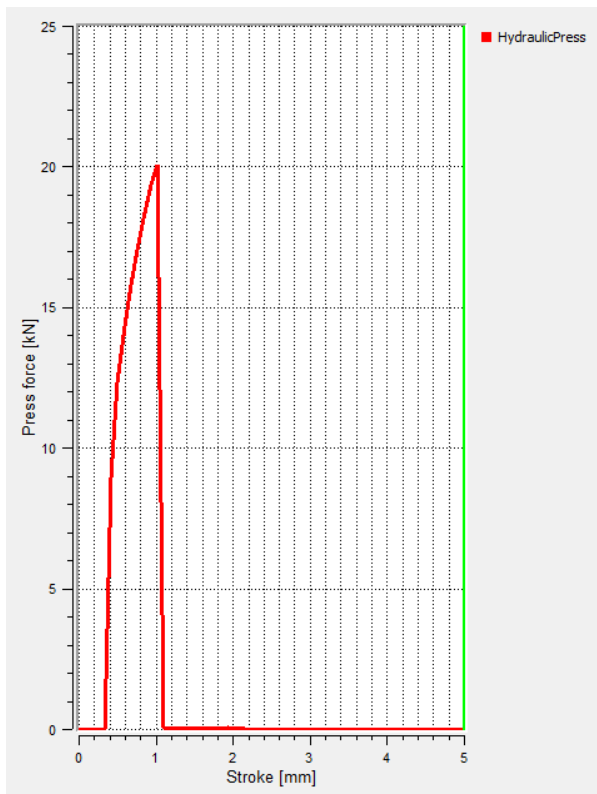
Výsledky simulácie sú v tab. 1 so silami v daných časoch a graf č. 8. sily pre oceľ *DC01*. Je vidieť, ako sa menia sily strihania v závislosti od dráhy, pretože to poskytuje pohľad na správanie sa materiálu počas procesu.

Tab. 1. Porovnanie teoretických síl a simulovaných

	Vypočítaná sila [kN]	Odsimulovaná sila [kN]	Rozdiel [%]
<i>DC01</i>	21 448	20 058	6,5
<i>AlMg3</i>	19 065	19 066	0,0
<i>Cu-EZP</i>	19 065	20 258	5,9

Ku kontaktu medzi strižníkom a materiálom dochádza po prejení dráhy 0,4 mm. Platí pre všetky tri prípady. Tento bod označuje začiatok kontaktu a začiatok procesu strihania. Potom, keď sa dráha zväčšuje na

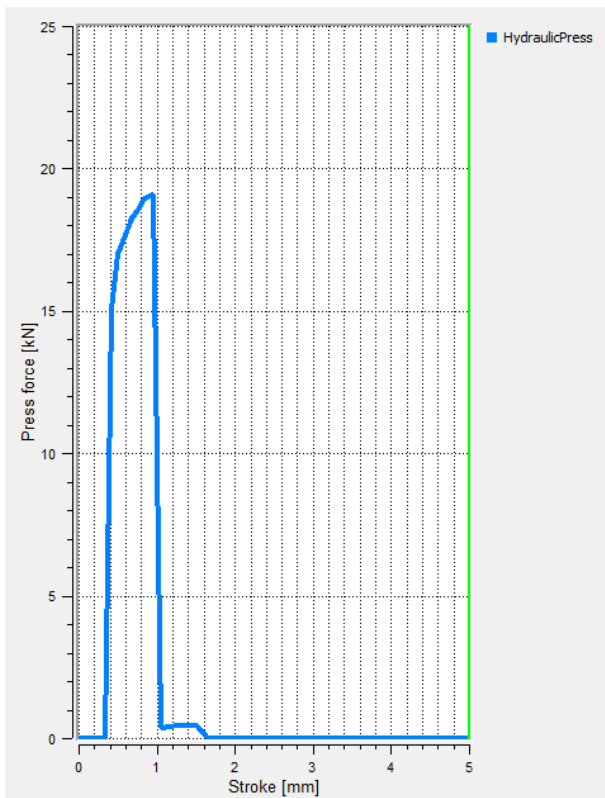
1,0 mm, dochádza k najväčšiemu nárastu síl (20 kN) ktorá sa dosiahla v tomto bode, naznačuje dokončenie procesu strihania.



Obr. 7. Priebeh sily pri simulácii strihu materiálu DC01

### 3.4.2 AlMg3

Výsledky simulácie sú v tab. 1 so silami v daných časoch a graf sily č. 9. pre hliník AlMg3.



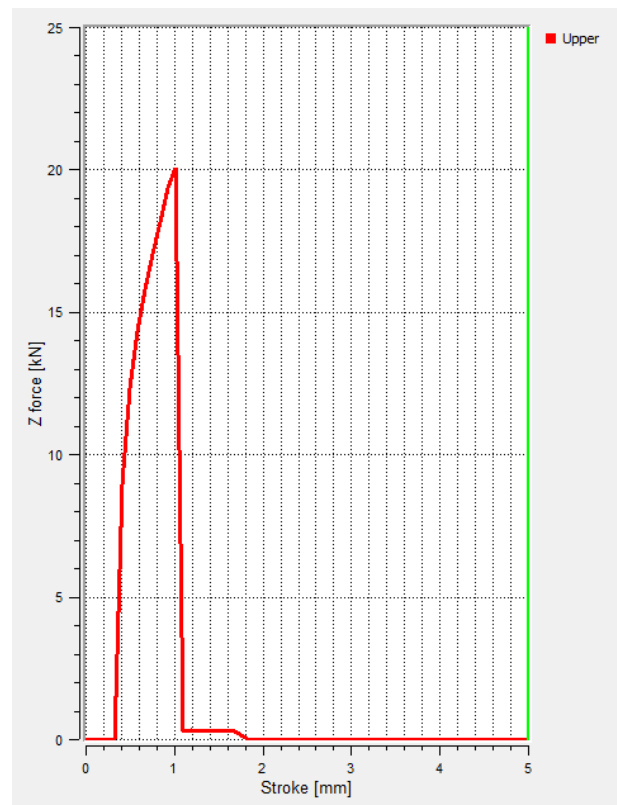
Obr. 8. Priebeh sily pri simulácii strihu materiálu AlMg3

Je vidieť, ako sa menia sily strihania v závislosti od dráhy, pretože to poskytuje pohľad na správanie sa materiálu počas procesu. Pri zväčšení dráhy na 0,9 mm, dochádza k maximálnemu nárastu síl (19 kN) ktorá sa dosiahla v tomto bode, naznačuje dokončenie procesu strihania.

### 3.4.3 Cu-ETP

Výsledky simulácie sú v tab. 1 so silami v daných časoch a graf sily č. 10 pre meď Cu-ETP. Je zrejmé, ako sa menia sily strihania v závislosti od dráhy, pretože to poskytuje pohľad na správanie sa materiálu počas procesu.

Ku kontaktu medzi strižníkom a materiálom dochádza po prejení dráhy 0,4 mm. Tento bod označuje začiatok kontaktu a začiatok procesu strihania. Pri zväčšení dráhy na 0,9 mm, dochádza k najväčšiemu nárastu síl (19 kN) ktorá sa dosiahla v tomto bode, naznačuje dokončenie procesu strihania.



Obr. 9. Priebeh sily pri simulácii strihu materiálu Cu-ETH

## 3.5 Porovnanie teoretických a simulovaných síl

Porovnaním teoretických výpočtov pre jednotlivé materiály a výsledky simulácií sa dá posúdiť, že sa mierne nezhodujú.

- **DC01**

- výpočet:

$$F_S = 0,8 \cdot R_m \cdot l \cdot t \cdot k,$$

$$F_S = 0,8 \cdot 270 \text{ MPa} \cdot 99,3 \text{ mm},$$

$$F_S = 21\,448 \text{ N},$$

- simulácie:

$$F_S = 20\,058\text{ N,}$$

• **AlMg3**

- vypočítaná:

$$F_S = 0,8 \cdot R_m \cdot l \cdot t \cdot k,$$

$$F_S = 0,8 \cdot 240\text{ MPa} \cdot 99,3\text{ mm,}$$

$$F_S = 19\,065\text{ N,}$$

- simulácie:

$$F_S = 19\,066\text{ N,}$$

• **Cu-ETP**

- vypočítaná:

$$F_S = 0,8 \cdot R_m \cdot l \cdot t \cdot k,$$

$$F_S = 0,8 \cdot 240\text{ MPa} \cdot 99,3\text{ mm,}$$

$$F_S = 19\,065\text{ N,}$$

- simulácie:

$$F_S = 20\,058\text{ N.}$$

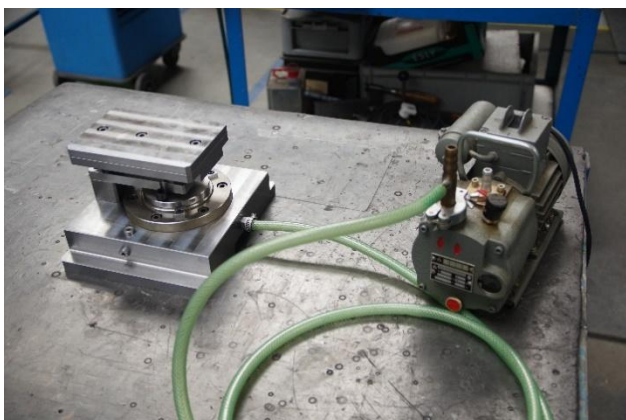
Tieto rozdiely hodnôt sa dajú vysvetliť tým že obe metódy používajú iný druh výpočtu a ich presnosť výpočtu je rozdielna. Určenie toho ktorá metóda je presnejšia a ktorá sa zhoduje viac s realitou sa dá určiť iba tým že sa vykoná experiment v reálnom prostredí.

## 4 EXPERIMENTY

Počas experimentu boli použité tri materiály s tromi vzorkami, aby sa dal presnejšie určiť tlak pri strihaní a vylúčiť prípadne chyby meraní.

Vzorky pre všetky tri skúšané materiály boli z plechu hrúbky 1 mm. Pre každý materiál boli tri vzorky s rozmermi 49x140 mm.

Po tom čo bolo zariadenie skontrolované a pripravené bol vývevou odsatý vzduch. Nástroj sa naplnil olejom pre presnejšie meranie tlaku pri strihaní testovaných vzoriek. Po dokončení príprav bol skontrolovaný tlak pre istotu že všetko prebehlo tak ako malo. Zariadenie bolo upnuté do hydraulického lisu *Raster Zeulenroda* (Typ: *GHP 500 H/J - 10*).



Obr. 10. Príprava zariadenia

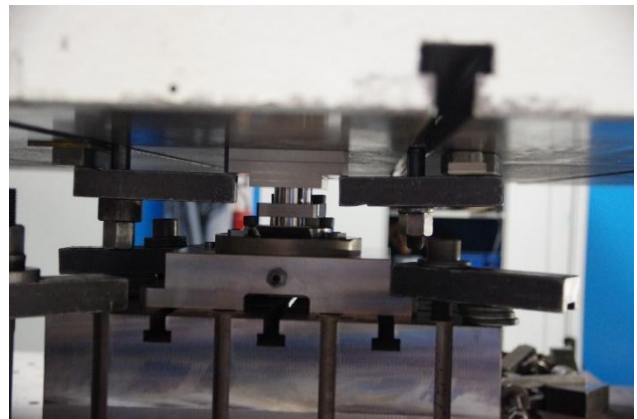
Počas celého procesu bol meraný tlak a následne sa určila sila pomocou jednoduchého vzorca:

$$F = p \cdot S \tag{1}$$

kde  $p$  - tlak [Pa],

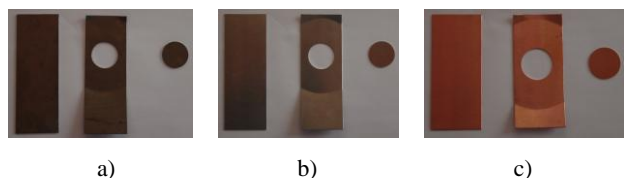
$S$  - plocha [mm<sup>2</sup>],

$F$  - sila [N].



Obr. 11. Strihací nástroj v tvárniacom stroji

Takto sa dá pomocou experimentálneho zariadenie určiť potrebnú sila pre skúšaný materiál bez nutnosti ostatných silomerov. Boli strihané kruhové výstrižky s priemerom 31,6 mm.



Obr. 12. Vzorka: a) DC01, b) AlMg3, c) Cu-ETP

### 4.1 Namerané hodnoty

Lis mal zabudovaný silomer, teda sa dali porovnávať výsledky merania s ďalšími dodatočnými informáciami v podobe sily.

Tab. 2. Namerané výsledky pre materiál DC01

DC01	Sila [kN]	Tlak [MPa]
Strih 1	20,7	26,0
Strih 2	20,8	27,0
Strih 3	20,1	26,0

Tab. 3. Namerané výsledky pre materiál AlMg3

AlMg3	Sila [kN]	Tlak [MPa]
Strih 1	19,3	24,0
Strih 2	19,2	24,0
Strih 3	19,2	24,0

Tab. 4. Namerané výsledky pre materiál Cu-ETP

Cu-ETP	Sila [kN]	Tlak [MPa]
Strih 1	19,5	25,0
Strih 2	19,7	25,0
Strih 3	19,9	25,0

## 4.2 Porovnanie hodnôt

Porovnaním hodnôt teoretických, simulovaných a reálnych sa dá posúdiť presnosť teoretických hodnôt s hodnotami reálne získanými a môže sa určiť s akou presnosťou pracujú teoretické vzorce a simulácie.

Jednou z premenných hodnôt pri teoretických výpočtoch je koeficient opotrebenia nástroja, ktorý sa nedá presne merať a stanoviť v akom momente a kedy dôjde ku známemu opotrebeniu. Postupné opotrebenie sa dá sledovať pri raste sily ktorá je potrebná pre odstrihnutie materiálu v podobe postupného nárastu ako sa nástroj postupne pri každom strihu mierne opotrebil. Sily potrebné na strih boli nižšie v prípade strihania ocele DC01 ktorá sa strihala ako prvá. V prípade medi Cu-ETH ktorá sa strihala posledná sa dá pozorovať nárast potrebnej sily na vykonanie strihu. Rozdiel pozorovaných síl nie je signifikantne veľký. Z výsledkov merania možno stanoviť, že teoretické výpočty pomocou vzorcov sú dostačujúce pre návrh strihacích zariadení.

Tab. 5. Rozdiel síl nameraných voči vypočítaným pre materiál DC01

DC01	Sila odmeraná [kN]	Sila vypočítaná [MPa]	Rozdiel v sile [%]
Strih 1	20,7	21,4	-3,2
Strih 2	20,8	21,4	-2,8
Strih 3	20,1	21,4	-6,1

Tab. 6. Rozdiel síl nameraných voči vypočítaným pre materiál AlMg3

AlMg3	Sila odmeraná [kN]	Sila vypočítaná [MPa]	Rozdiel v sile [%]
Strih 1	19,3	19,1	+1,0
Strih 2	19,3	19,1	+1,0
Strih 3	19,2	19,1	+0,5

Tab. 7. Rozdiel síl nameraných voči vypočítaným pre materiál Cu-ETP

Cu-ETP	Sila odmeraná [kN]	Sila vypočítaná [MPa]	Rozdiel v sile [%]
Strih 1	19,5	19,1	+2,1
Strih 2	19,7	19,1	+3,0
Strih 3	19,9	19,1	+4,0

## 4.3 Výsledky získané simuláciou v porovnaní s reálnymi výsledkami

Ako sa odsimuloval proces strihania a získali sa počítačom určené sily, je možnosť porovnania síl voči reálne odmeraným silám.

Pri MKP simuláciách je veľké množstvo premenných

ktoré sa dajú nastaviť alebo upraviť, ako napríklad teplota, sily, model poškodenia a podľa potreby výpočtových možností ktoré sú k dispozícii v podobe presnosti s akou sa rozloží simulovaný materiál na časti (ich veľkosť). Problémom pri simuláciách je že sa pracuje s ideálnymi podmienkami a je veľmi ťažké zahrnúť všetky premenné a nedokonalosti z reálneho prostredia či už z dôvodu ich náročnosti merania alebo jednoducho z nemožnosti merania takýchto veličín. Aj napriek týmto problémom sú výsledky v simulácii v porovnaní s reálne nameranými výsledkami presné a signifikantne sa nelíšia. Je možné použiť simulácie ako veľmi presný prostriedok pri technologickom návrhu iných zariadení a týmto ušetriť čas pri výrobe.

Tab. 8. Rozdiel síl nameraných voči odsimulovaným pre materiál DC01

DC01	Sila odmeraná [kN]	Sila odsimulovaná [MPa]	Rozdiel v sile [%]
Strih 1	20,7	20,0	+3,4
Strih 2	20,8	20,0	+3,8
Strih 3	20,1	20,0	+0,5

Tab. 9. Rozdiel síl nameraných voči odsimulovaným pre materiál AlMg3

AlMg3	Sila odmeraná [kN]	Sila vypočítaná [MPa]	Rozdiel v sile [%]
Strih 1	19,3	19,1	+1,0
Strih 2	19,3	19,1	+1,0
Strih 3	19,2	19,1	+0,5

Tab. 10. Rozdiel síl nameraných voči odsimulovaným pre materiál Cu-ETH

Cu-ETP	Sila odmeraná [kN]	Sila vypočítaná [MPa]	Rozdiel v sile [%]
Strih 1	19,5	20,0	+2,5
Strih 2	19,7	20,0	+1,5
Strih 3	19,9	20,0	+0,5

## ZÁVER

Experimentálne zariadenie bolo konštrukčne navrhnuté tak aby sa dalo použiť na akomkoľvek lise, kedy nie je na silovom zariadení žiaden silomer ale manometer. Na experimentálnom zariadení je možnosť pripojenia tlakomeru ktorý umožní jednoduché meranie a dá sa jednoduchým výpočtom určiť sila strihaného materiálu.

Experimentálne zariadenie tak isto poslúžilo pre porovnanie teoretických výpočtov simulácií a určenie ich presností, kedy sa zistilo že obe teoretické metódy výpočtov sú veľmi presné.

## LITERATÚRA

- [1] BAČA, J. - TITTEL, V. - BÍLIK, J. (2004): *Technológia tvárnenia, časť plošné tvárnenie*. STU v Bratislave, 97 str., ISBN 80-227-2156-5.
- [2] BOLJANOVIC, V. (2005): *Sheet Metal forming processes and die Design*. ISBN 0-8311-3182-9.
- [3] JOHNSON, W. - MAMALIS, A. G. (1998): *Plasticity and metal forming*. Cambridge.
- [4] KUMAR, S. (2008): *Technology of Metall Forming Processes*, New Delhi, India, 358 p., ISBN 978-81-208-3425-0.
- [5] MARCINIAK, Z. - DUNCAN, J. L. - HU, S. J. (2002): *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Butterworth-Heinemann, Jordan hill, Oxford, UK, 221 p., ISBN 0-7506-5300-9.
- [6] MORAVEC, J. - STROKA, R. (2009): *Vybrané kapitoly z technológie tvárnenia*. Vydalo EDIS - vyd. ŽU v Žiline, ISBN 978-80-8070-980-8.
- [7] MORAVEC, J. - KOPAS, P. - JAKUBOVIČOVÁ, L. (2015): *Teória a technológia lisovania plechu*. EDIS ŽU Žilina, 185 s., ISBN 978-80-554-0986-3.
- [8] BAČA, J. - BÍLIK, J. - TITTEL, V. (2010): *Technológia tvárnenia*. STU v Bratislave, 245 s., ISBN 978-80-227-3242-0.
- [9] BÍLIK, J. - KAPUSTOVÁ, M. - RIDZOŇ, M. (2015): *Teória tvárnenia*. Trnava, Alumni Press CD-ROM, 262 s., ISBN 978-80-8096-9.
- [10] MIELNIK, M. E. (1991): *Mechanical Metallurgy*. Mc Graw - Hill Book Company, New York.

# Vplyv teploty formy na vybrané vlastnosti AlSi5Cu2Mg

**Elena Kantoríková, Ing. PhD.**

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,

Žilinská univerzita v Žiline,

Univerzitná 1, 010 26 Žilina.

E-mail: elena.kantorikova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2763

## The influence of mold temperature on selected properties of AlSi5Cu2Mg

**Abstract:** Currently, high demands are placed on the costs associated with the production of products, therefore it is advisable to know the individual characteristics of materials that are used in industry. The article deals with the influence of mold temperature on the mechanical properties of *aluminium* alloy. By knowing the characteristics of individual materials, it is possible to effectively design and manufacture equipment that will be safe and suitable for the given application. In many cases, *aluminium* alloys are offered as a solution, which are considered innovative construction materials, mainly because of the perfect combination of their properties.

**Keywords:** mechanical properties, *aluminium* alloys, heat treatment.

## ÚVOD

V súčasnosti sa kladú vysoké požiadavky na náklady spojené s vyhotovovaním výrobkov, preto je vhodné poznať jednotlivé charakteristiky materiálov, ktoré sú využívané v priemysle. Znalosťou charakteristík jednotlivých materiálov je možné efektívne navrhovať a vyrábať zariadenia, ktoré budú bezpečné a vhodné pre danú aplikáciu. V množstve prípadov sa ako riešenie ponúkajú *hliníkové* zliatiny, ktoré sú považované za inovatívne konštrukčné materiály, najmä z dôvodu perfektnej kombinácie ich vlastností. Sú to materiály, bez ktorých by sa priemysel nezaobíšiel, predovšetkým v dopravnom sektore. Pridávaním vhodných legúr, tepelným spracovaním možno dosiahnuť skvelú kombináciu vlastností, čím sa zväčší interval použitia v mnohých sektoroch [1].

*Hliník* sa nachádza všade okolo nás. Má vplyv na náš život a výrobky z *hliníka* nachádzajú uplatnenie v nespočetnom množstve aplikácií. Sprevádza nás už približne 100 rokov pri všetkom, čo robíme. V minulosti bol *hliník* drahší než *zlato* z dôvodu malej produkcie, pričom sa v tom období používal len na špeciálne účely v klenotníctve. Postupom času bol *hliník* omnoho prístupnejší, čo malo za následok výrobu produktov s využitím v každodennom živote. Najviac je *hliník* v súčasnosti využívaný v doprave, stavebníctve, v strojárskom a hutníckom priemysle, energetike, v elektrotechnickom a potravinárskom priemysle a v mnohých iných oblastiach. Stavebný priemysel je hneď po dopravnom priemysle na druhom mieste v spotrebe *hliníka*. V posledných desaťročiach stúpila spotreba *hliníka* hlavne vyrábaním fasádnych prvkov, ako sú rôzne tvarované

profily, rúrky [2]. Dnes sa objavuje *hliník* tak ako aj vo vnútri, tak aj z vonka budov na obohatenie ich architektúry. *Hliníkové* prvky uchovávajú bezchybný vzhľad po dlhú dobu, majú jednoduchú a lacnú údržbu, vysokú odolnosť proti korózii, nízku hmotnosť, možnosť prefarbenia atď. Strojárske odvetvie sa radí na tretiu pozíciu z hľadiska spotreby *hliníka*, pretože v tomto odvetví je vyrobených z *hliníka* nespočetné množstvo súčiastok, strojov a zariadení. Ako príklady aplikácie *hliníka* môžeme uviesť súčasti čerpadiel, cisterny a nádrže pre skladovanie i prepravu čpavkovej vody, rotory a ventilátory pračiek pri výrobe čpavku, rôzne technologické potrubia [3].

*Hliníkové* zliatiny na báze *Al-Si* sú charakteristické tým, že na výrobu odliatkov sa môže použiť ktorúkoľvek zlievarenskú metódu. Voľba metódy odlievania je ovplyvnená počtom odlievaných kusov, rozmermi, hmotnosťou a technickými požiadavkami kladených na odliatky [3, 4].

## 1 GRAVITAČNÉ LIATIE DO KOVOVÝCH FORIEM

Je to metóda odlievania *hliníkových* zliatin pôsobením gravitačnej sily do formy (kokily). Najvhodnejšie *hliníkové* zliatiny pre túto technológiu sú zliatiny s nízkou teplotou tavenia, dobrou zabiehavosťou, s úzkym intervalom tuhnutia. To znamená, že optimálnymi materiálmi sú zliatiny *Al-Si* *podeutektického* a *eutektického* zloženia. Použitím tejto progresívnej metódy sa dosahuje zvýšenie mechanických vlastností, kvalitný povrch odliatkov, nižšiu rozmerovú toleranciu odlievaných súčiastok,

zvýšenie produktivity práce, použitím kovového jadra nie je nutná výroba jadra. Formy sa vyhotovujú z jedného, alebo viacerých dielov a zväčša sa vyrábajú odlievaním z liatiny s lupienkovým alebo guľôčkovitým grafitom. Typické prvky formy (deliaca rovina, upínacie výstupky, vyhadzovacie otvory) sa obrábajú a funkčné plochy ostávajú v liatom stave. V praxi sa formy inštalujú na kokilové stroje, ktoré umožňujú efektívnejšiu prácu s formou a manipuláciu s odliatkami. Pred samotným odlievaním musí byť kovová forma predhriata na teplotu pohybujúcu sa v rozmedzí 200°C až 250°C. Aby nedochádzalo poškodeniu povrchu formy, na povrch sa pravidelne nanášajú ochranné nátery [5, 6].

## 2 VYTVRDZOVANIE

Vytvrdzovanie sa považuje sa najdôležitejší spôsob tepelného spracovania hliníkových zliatin. Zámerom je spevnenie zliatiny spätným rozpustením intermetalických fáz do homogénneho roztoku  $\alpha(Al)$ . Tieto intermetalické fázy sa vylučujú vo forme koherentných alebo semi-koherentných útvarov, ktoré danú zliatinu spevnia. Dosiahne sa výrazné zvýšenie medze pevnosti a tvrdosti, na druhej strane ťažnosť klesá. Východiskovým polotovarom bývajú odliatky, pri ktorých je nutným predpokladom prítomnosť prísady, ktorá má výraznú zmenu rozpustnosti v tuhom roztoku. K najčastejšie vytvrdzovaným zliatinám sa radia zliatiny  $Al-Si-Mg$ ,  $Al-Si-Cu$ . Vytvrdzovanie pozostáva z troch častí, ktorými sú rozpúšťacie žihanie, rýchle ochladenie, precipitačné vytvrdenie.

Jednou z troch etáp procesu vytvrdzovania je rozpúšťacie žihanie. Je to ohriatie odliatku na rozpúšťaciu teplotu, pri ktorej sa prítomná intermetalická fáza rozpustí v tuhom roztoku. Doba trvania tejto etapy by nemala byť dlhá, aby nedošlo k zhrubnutiu zrna [7, 8].

V druhej etape dochádza k ochladeniu, kde je snaha získať presýtený tuhý roztok. Ochladzovanie zvyčajne prebieha vo vode pri rôznych teplotách vyplývajúcich z druhu súčiastky. Po tejto etape získa hliníková zliatina nízku pevnosť, tvrdosť a je vysoko plastická. Poslednou etapou procesu vytvrdzovania je

umelé starnutie, ktoré sa skladá z ohrevu s následnou výdržou pri zvýšenej teplote. Okrem umelého starnutia je známe tiež prirodzené starnutie, pri ktorom sa zliatina po rýchlom ochladení ponecháva pri teplote okolia. Teplota výdrže pri umelom starnutí sa zvyčajne pohybuje v rozsahu teplôt 140°C až 200°C. V technickej praxi sa volí výdrž na danej teplote približne niekoľko hodín, pretože môže dôjsť k prestarnutiu. Prestarnutie je nežiaduci jav, pretože nastáva pokles mechanických vlastností zliatiny. V tejto etape nastáva rozpad presýteného tuhého roztoku  $\alpha(Al)$ , čo sa prejavuje konečným spevnením (rastie pevnosť a tvrdosť) zliatiny. Pri umelom starnutí prebieha počas rozpadu presýteného tuhého roztoku  $\alpha(Al)$  niekoľko fáz. Vznikajú tzv. Guinier-Prestonove zóny I. a II (zvyšuje sa efekt vytvrdenia), ďalej vzniká tzv. prechodný precipitát a poslednou fázou je vznik rovnovážneho precipitátu  $CuAl_2$  [9, 10].

## 3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

V experimentálnej časti sa článok venuje sledovaniu zmien štruktúr zliatiny  $AlSi5Cu2Mg$  v závislosti od teploty formy a rýchlosti tuhnutia. Okrem toho sú porovnávané mechanické vlastnosti pred a po tepelnom spracovaní vzoriek danej zliatiny. Na experiment boli vyhotovené tri vzorky, pri ktorých bola využitá metóda odlievania gravitačným liatím do kovovej formy.



Obr. 1. Odliatok v kovovej forme

Tab.1 Chemické zloženie experimentálnej zliatiny

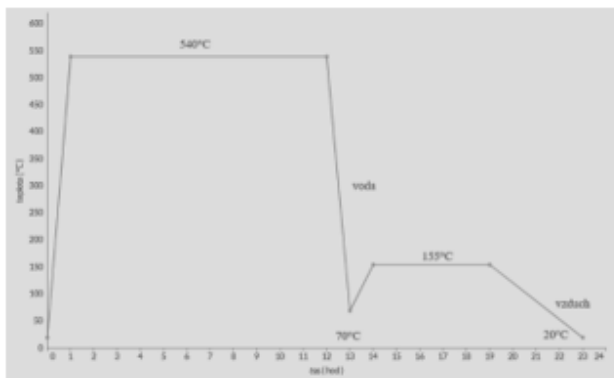
Prvok	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>
Obsah [%]	5,40	0,177	1,85	0,0148	0,286	0,0164	0,0047
Prvok	<i>Zn</i>	<i>Ti</i>	<i>B</i>	<i>Bi</i>	<i>Ca</i>	<i>Cd</i>	<i>Li</i>
Obsah [%]	0,0093	0,0135	0,0001	0,0005	0,00093	0,00027	0,00002
Prvok	<i>Mo</i>	<i>Na</i>	<i>P</i>	<i>Pb</i>	<i>Sb</i>	<i>Sr</i>	<i>Zr</i>
Obsah [%]	0,00051	0,00004	0,0007	0,0045	0,0012	0,0101	0,00086
Prvok	<i>V</i>	<i>ostatné</i>	<i>Mn/Fe</i>	<i>Al</i>	-	-	-
Obsah [%]	0,0053	0,0018	0,0839	92,2	-	-	-

Odlievanie sa uskutočnilo pri troch rôznych teplotách kovovej formy. Postupne sa odlievali vzorky do kovovej formy, ktorá bola nahriata na teploty 370°C, 250°C, 150°C. Na vzorkách sa vykonala chemická analýza.

Ďalej sa vzorky pripravili k skúmaniu ich štruktúry a k tepelnému spracovaniu. Posledným krokom bolo meranie tvrdosti daných vzoriek pred a po tepelnom spracovaní.

### 3.1 Tepelné spracovanie

Proces vytvrdzovania skúmanej zliatiny *AlSi5Cu2Mg* pozostával z dvoch častí. Prvý cyklus tepelného spracovania sa skladal zo žihania pri teplote 540°C ±10°C, kde výdrž na tejto teplote bola 12 hod. s následným ochladením vo vode pri 70°C. Umelé starnutie prebiehalo pri teplote 155°C ±10°C s výdržou na tejto teplote 5 hod. Ochladenie bolo realizované voľne na vzduchu. Proces tepelného spracovania je graficky zobrazený na obr. 2.



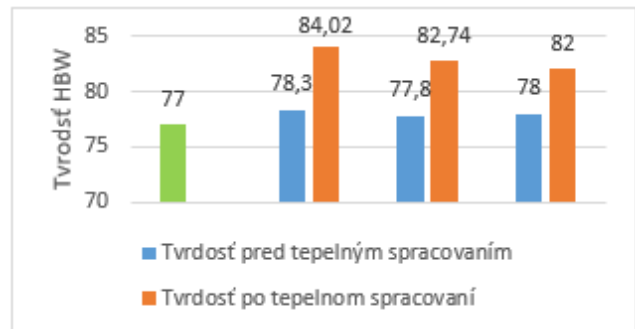
Obr. 2. Graf tepelného spracovania zliatiny *AlSi5Cu2Mg*

### 3.2 Mechanické vlastnosti

Na meranie tvrdosti bola použitá metóda podľa *Brinella*. Princíp tejto skúšky podľa je založený na vtláčaní kalenej oceleovej guľôčky s daným priemerom, s určitou dobou trvania, pri pôsobení určitého zaťaženia. Výsledkom tejto skúšky je hodnota tvrdosti materiálu, ktorej kritériom pre hodnotenie je vtláčok. V tomto experimente sa meranie tvrdosti podľa *Brinella* uskutočnilo na prístroji *Innovatest Nexus 3000*. Priemer vtláčanej guľôčky bol 5 mm so zaťažením 250 kg po dobu trvania 10 sekúnd. Tvrdosť sa merala na vzorkách pred a po tepelnom spracovaní. Každá vzorka sa merala päťkrát. Z nameraných hodnôt tvrdosti sa stanovil aritmetický priemer. Výsledky merania sú zaznamenané v grafe (obr. 3).

Vzorka pred experimentom mala hodnotu tvrdosti v liatom stave 77 HBW. Po následnom tepelnom spracovaní sa tvrdosť experimentálnej zliatiny *AlSi5Cu2Mg* zvýšila. Najvyššia priemerná hodnotu tvrdosti 84,02 HBW bola nameraná po tepelnom spracovaní vzorky pri teplote kovovej formy 370°C.

Naopak najmenšia priemerná hodnota tvrdosti HBW 77,8 bola zistená pred tepelným spracovaním na vzorke, ktorá bola odlíata pri teplote kovovej formy 250°C.



Obr. 3. Graf vyhodnotenia tvrdosti experimentálnej zliatiny *AlSi5Cu2Mg*

### 3.3 Štruktúrna analýza

Teplota formy je dôležitý faktor, ktorý ovplyvňuje výslednú štruktúru odliatkov. V experimente bolo aplikované voľné ochladzovanie odliatkov na vzduchu, čiže tuhnutie bolo ovplyvnené predovšetkým teplotou odlievacej formy. S klesajúcou teplotou formy prebieha tuhnutie tekutého kovu rýchlejšie, odlatok nadobúda jemnejšiu štruktúru, ako aj výhodnejšie vlastnosti.

Základná štruktúra východiskového experimentálneho materiálu *AlSi5Cu2Mg* je tvorená dendritmi primárnej fázy  $\alpha$  (svetlé miesta), eutektikom E a intermetalickými fázami. Štruktúra skúmaných vzoriek pri rôznych teplotách je zobrazená na obr. 4 a obr. 5.



Obr. 4. Mikroštruktúra zliatiny *AlSi5Cu2Mg* pri teplote kovovej formy 370°C, leptaná 0,5% HF

Z fotodokumentácie možno vidieť že, štruktúra je pri všetkých troch teplotách kovovej formy rovnaká, je tvorená dendritmi primárnej fázy  $\alpha$  a eutektikom E, intermetalické fázy nie sú viditeľné [11]. Na každej vzorke sú prítomné póry, ktoré sa považujú za chyby odliatkov. Identifikovať ich možno vo forme väčších, nepravidelných útvarov čiernej farby. Zo zistených údajov vyplýva, že nedochádza k štruktúrnym zmenám experimentálnej zliatiny *AlSi5Cu2Mg*. Na

obr. 6 je viditeľné, že po tepelnom spracovaní došlo k zjemneniu štruktúry, čo by sa malo odzrkadliť na mechanických vlastnostiach v pozitívnom smere.



Obr. 5. Mikroštruktúra zliatiny  $AlSi_5Cu_2Mg$  pri teplote kovovej formy  $250^{\circ}C$ , leptané 0,5% HF



Obr. 6. Mikroštruktúra zliatiny  $AlSi_5Cu_2Mg$  po tepelnom spracovaní, leptané 0,5% HF

## ZÁVER

Z vykonaných experimentov sa dá usúdiť, že teória zjemňujúcej sa štruktúry pri klesajúcej teplote formy sa nepotvrdila. Teplota formy v tomto prípade nemá výrazný vplyv na štruktúralne zmeny danej zliatiny. Pri každej zo skúmaných vzoriek bola štruktúra identická, tvorená dendritmi primárnej fázy  $\alpha$  a eutektikom  $E$ . Typické intermetalické fázy neboli viditeľné. Táto skutočnosť mohla byť spôsobená najmä veľkosťou odliatku. Po tepelnom spracovaní nastalo zjemnenie štruktúry, čo sa následne prejavilo na vykonaných skúškach tvrdosti podľa *Brinella*. Priemerná tvrdosť po cykle umelého starnutia stúpla pri každej vzorke, pričom najvyššia priemerná hodnota tvrdosti HBW 84,02 bola nameraná pri teplote kovovej formy  $370^{\circ}C$ .

## Pod'akovanie

*Táto práca bola podporená projektom KEGA 003ŽU-4/2024 Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva Slovenskej republiky.*

## LITERATÚRA

- [1] BOLIBRUCHOVÁ, D. et al. (2004): *Zlievarenská metalurgia a technológia-návody na cvičenia*. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline. ISBN 80-8070-263-2.
- [2] BOLIBRUCHOVÁ, D. - PASTIRČÁK, R. (2018): *Zlievarenská metalurgia neželezných kovov*. Žilina : EDIS-vydavateľské centrum ŽU. ISBN 978-80-554-1463-8.
- [3] SKOČOVSKÝ P. - BOKŮVKA O. - KONEČNÁ R. - TILLOVÁ E., (2014): *Náuka o materiáli*. Žilina: EDIS. ISBN: 978-80-554-0871-2.
- [4] ROUČKA, J. (2004). *Metalurgie neželezných slitin*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o.
- [5] TOTTEN, G.E. - MACKENZIE, D.S. (2003): *Handbook of aluminium*. s. 1. : CRC Press. ISBN 0-8247-0494-0.
- [6] GIORDANO, G. (2019): [Online]: <https://www.publiteonline.it/ael/aluminiums-leading-role-in-space-exploration/>.
- [7] MARTINEC, L. - ŠIMKOVIČ, M. (1997): *Náuka o materiáloch*. Bratislava, Vazovova 5 : Vydavateľstvo STU. ISBN 80-227-1008-3.
- [8] MICHNA,Š - LUKÁČ,I. - OČENÁŠEK, V. - KORENÝ, R. a kol. (2005): *Encyklopedie hliníku*. Prešov : Adin, s. r. o., ISBN 80-89041-88-4.
- [9] ŠVEC, J. (2010): *Konštrukčné materiály*. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, ISBN 978-80-227-3386-1.
- [10] MIKLOS, T. - IMRE, C. (2018): *ScienceDirect*. [Online] [Dátum: 17. September 2018.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588840418300301>.
- [11] VOJTĚCH, D. (2006). *Kovové materiály*. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, ISBN 80-7090-600-1.

---

# Súčasný stav prevodoviek s nastaviteľným prevodovým pomerom pri elektrickom pohone

---

## Miroslav Blatnický, doc. Ing., PhD.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: miroslav.blatnicky@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2659

## Vladimír Samaš, Ing.\*

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: vladimir.samas@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2557

## Ján Dižo, doc. Ing., PhD.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2560

## Current State of Transmissions with Adjustable Gear Ratios in Electric Drives

**Abstract:** The scope of this article covers potential technologies for transmission mechanisms with variable gear ratios that can be applied to electric traction. A transmission with an adjustable gear ratio allows for the adaptation of the gear ratio according to usage conditions. By adjusting the gear ratio and consequently the traction forces, we can enhance driving parameters, e.g. improved both efficiency and range. The paper theoretically examines various transmissions with variable gear ratios and compares their parameters in the context of electric drives.

**Keywords:** electric traction, transmission, traction force.

---

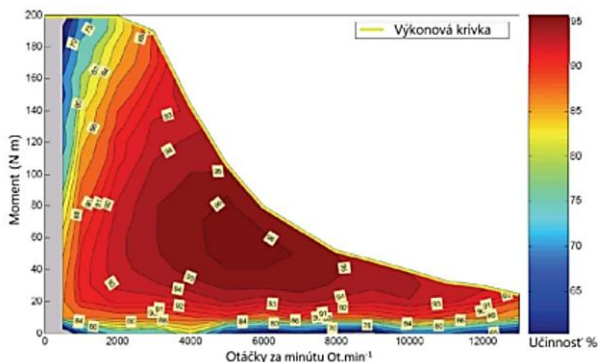
## ÚVOD

Elektrická trakcia je často používaná a v súčasnosti sa aplikuje do elektrických a hybridných vozidiel. Súčasťou tejto trakcie je prevod, ktorý sa najčastejšie používa v konštantnom prevedení. Z pohľadu koncepcie je možné využiť prevodový mechanizmus s nastaviteľným prevodovým pomerom, označovaný ako prevodovka. Existuje viacero druhov prevodoviek, ktoré je možné použiť pri elektrickej trakcii. Využitie prevodovky pri elektrickej trakcii prináša množstvo výhod, ako je napríklad lepšia účinnosť v určitých režimoch, vyššia maximálna rýchlosť a väčšia trakčná sila.

Tento článok prináša teoretický pohľad na problematiku prevodových mechanizmov s nastaviteľným prevodovým pomerom pri elektrickom pohone. Základnou časťou je rozdelenie prevodoviek, ktoré sa môžu použiť pri elektrickej trakcii a ich porovnanie.

## 1 RIEŠENÁ PROBLEMATIKA APLIKÁCIE PREVODOVIEK DO ELEKTRICKEJ TRAKCIE

V súčasnosti sa elektrické vozidlá používajú v stále väčšom množstve a ich parametre sa neustále zlepšujú. Je evidentné, že ich vývoj bude pokračovať, pričom sa bude zvyšovať aj ich využitie a integrácia do dopravy. V súčasnosti sú najčastejšie vybavené stálym prevodovým pomerom medzi motorom a kolesami. Výrobcovia preto musia nastaviť presný prevodový pomer, ktorý musí byť schopný pokrývať rôzne typy používania vozidla. Toto riešenie je možné predovšetkým vďaka výkonovej charakteristike elektrických motorov (obr. 1), ktoré poskytujú maximálny krútiaci moment už pri veľmi nízkych otáčkach. Avšak tento prístup nie je ideálny, pretože obmedzuje maximálnu rýchlosť vozidla, znižuje účinnosť pri vyšších a nižších rýchlostiach a vyžaduje používanie veľmi výkonných motorov.



Obr. 1. Účinnosť charakteristika elektromotora

Na základe charakteristiky variabilnej účinnosti elektrických motorov, ako je zobrazené na obr. 1, vyplýva, že existuje optimálny režim, v ktorom motor dosahuje maximálnu účinnosť. Preto je dôležité udržiavať motor v čo najbližšom rozmedzí tohto optimálneho režimu, aj keď sa mení rýchlosť vozidla. Ak to nie je možné, je potrebné sa pohybovať v intervale, kde je účinnosť čo najlepšia. Účinnosť pri nízkych otáčkach je zvyčajne podpriemerná, preto je z hľadiska dojazdu dôležité udržiavať minimálny otáčkový režim. Naopak, pri veľmi vysokých rýchlostiach je dojazd často horší, pretože účinnosť klesá s rastúcou rýchlosťou. Tento jav je spôsobený indukovaným magnetickým poľom v elektromagnetoch, ktoré pôsobí proti elektrickému prúdu [1].

Na riešenie týchto problémov sa dá použiť prevodový mechanizmus s variabilným pomerom, takzvaná prevodovka. Táto by mohla umožniť zlepšiť maximálnu rýchlosť a účinnosť pri vyšších rýchlostiach a tak isto nižších režimoch a umožniť používať slabší a tým pádom lacnejší motor. Tak isto by to mohlo mať vplyv na zosilnenie rekuperačného brzdenia.

## 2 ROZDELENIE PREVODOVIEK

Prevodovky používané v doprave môžeme rozdeliť podľa spôsobu zmeny prevodového pomeru do dvoch hlavných skupín:

- stupňové,
- plynulé.

Riadenie môže byť vykonané tromi spôsobmi:

- priame riadenie,
- nepriame riadenie,
- samočinné riadenie.

Zmena krútiaceho momentu sa vykonáva:

- hydromechanicky,
- hydrostaticky,
- mechanicky,

- elektronicky.

Ďalšie rozdelenie je podľa prevodového typu, poznáme:

- reťazové,
- ozubené,
- remeňové,
- trecie,
- hydrodynamické,
- hydrostatické.

Každá technológia prevodovky má svoje špecifické výhody a nevýhody. Rôzne typy prevodoviek nachádzajú svoje využitie v závislosti od konkrétnych požiadaviek. V automobilovom priemysle sú najbežnejšie prevodovky s ozubenými kolesami, ktoré môžu byť manuálne alebo automatické. Variátorové prevodovky sú taktiež často používané v automobilovom priemysle, a to najmä kvôli ich schopnosti poskytovať plynulý a nepretržitý prevodový pomer.

## 3 PREVODOVKY S LINEÁRNOU ZMENOU PREVODOVÉHO POMERU

Prevodovky s lineárnou zmenou prevodového pomeru sú systematicky automatické prevodovky, ktoré prispôbujú svoj prevodový pomer aktuálnym trakčným požiadavkám. Tieto prevodovky majú široký prevodový rozsah, v rámci ktorého plynule menia pomer. Existuje viacero typov prevodoviek s lineárnou zmenou prevodového pomeru, ktoré sa využívajú v automobilovom priemysle ako sú guľové CVT, hydrostatické CVT, E-CVT, toroidné CVT, systém rozdelenia výkonu CVT, pásové CVT, reťazové CVT, guľové toroidné CVT, Milner CVT atď. [2].

### 3.1 CVT prevodovka

Štandardná prevodovka s nepretržitou zmenou prevodového pomeru, známa ako CVT (*Continuously Variable Transmission*), sa široko používa v automobilovom priemysle, a to nielen v automobiloch, ale aj v ľahkých motocykloch. Tento typ prevodovky je konštruovaný tak, že využíva kužeľové kolesá, ktoré umožňujú plynulú a lineárnu zmenu prevodového pomeru. Krútiaci moment je prenášaný pomocou pásu alebo reťaze, ktorá je súčasťou systému. CVT prevodovky sú vybavené ovládacím systémom, ktorý umožňuje presnú reguláciu prevodového pomeru v závislosti od aktuálnych jazdných podmienok. Tento typ prevodovky môže prispieť k zlepšeniu palivovej účinnosti vozidiel so spaľovacím motorom o približne 2,2 % [3]. Na obr. 2 je zobrazená schéma remeňovej prevodovky CVT.



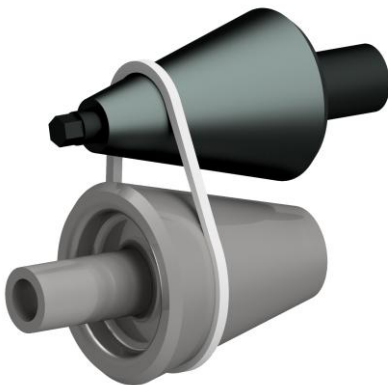
Obr. 2. Ilustrácia CVT prevodovky

### 3.2 E-CVT prevodovka

Elektrická prevodovka s lineárnou zmenou prevodového pomeru (*E-CVT*) predstavuje špeciálny druh prevodovky, ktorý využíva kombináciu generátora a elektrického motora na poskytovanie trakcie. Tento typ prevodovky je často používaný firmou Toyota v ich hybridných vozidlách. *E-CVT* sa vyznačuje tým, že trakciu zabezpečuje elektrický motor s konštantným prevodovým pomerom, a tým nerieši problematiku variabilného prevodového pomeru [4].

### 3.3 Kuželová variabilná prevodovka

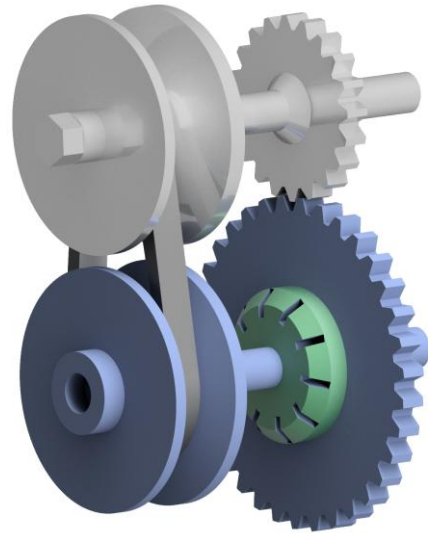
Kuželová variabilná prevodovka sa vyskytuje v rôznych koncepciách. Táto kategória prevodoviek zahŕňa všetky systémy, ktoré sa skladajú z jedného alebo viacerých kuželových telies, ktoré spolupracujú pozdĺž svojich príslušných osí na dosiahnutie požadovanej variácie. Najjednoduchší variant je jednokuželová variabilná prevodovka, ktorá využíva koleso pohybujúce sa pozdĺž sklonu kužela. Tento pohyb vytvára variáciu medzi úzkymi a širokými priermi kužela, čím mení prevodový pomer. Sofistikovanejší variant je dvojkuzelová prevodovka, ktorá je častejšie používaná a zobrazená na obr. 3 [5, 6].



Obr. 3. Ilustrácia kuželovej prevodovky

### 3.4 D-CVT prevodovka

*D-CVT* znamená *Dual Clutch Continuously Variable Transmission*. Je to typ automatickej prevodovky (obr. 4), ktorý kombinuje výhody plynulej variabilnej prevodovky (*CVT*) a dvojspojčkovej prevodovky (*DCT*). *D-CVT* využíva *CVT* na nepretržité prispôsobovanie prevodového pomeru, zatiaľ čo dvojspojčkový systém zabezpečuje rýchle zaradenie prevodového stupňa. Tento systém umožňuje dosiahnuť vysokú účinnosť v rámci prevodového rozsahu a zároveň zabezpečuje plynulé prispôsobovanie prevodového pomeru nad alebo pod prevodovým pomerom ozubeného kolesa.



Obr. 4. Ilustrácia *D-CVT* prevodovky

## 4 PREVODOVKY S STUPŇOVITOU ZMENOU PREVODOVÉHO POMERU

Prevodovky so stupňovitou zmenou prevodového pomeru sa častejšie používajú v automobilovom priemysle ako prevodovky s lineárnou zmenou prevodového pomeru. Tieto prevodovky sa vyznačujú stupňovitou zmenou prevodového pomeru, ktorá je určená radov vyvolených čísiel [7]. Prevodovky s nastaviteľným stupňovým prevodom sa používajú ako automatické, tak manuálne. Vzhľadom na zachovanie jednoduchosti ovládania elektrickej trakcie sa v tomto článku zameriavame iba na automatické prevodovky.

### 4.1 Planétová automatická stupňová prevodovka

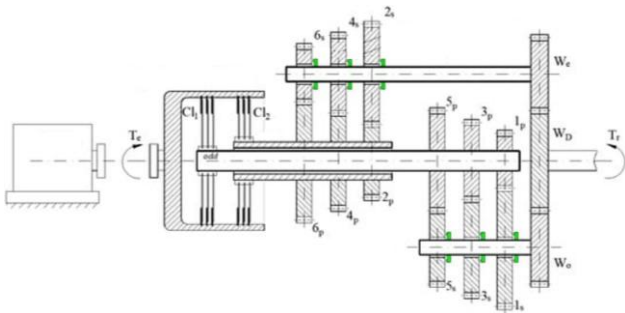
Planétová automatická prevodovka pozostáva z viacerých planétových sústav ozubených kolies, ktoré umožňujú plynulú zmenu prevodových stupňov. Tieto prevodové stupne sa aktivujú pomocou spojok, ktoré riadia postupné prispôbenie prevodového pomeru. Vďaka svojej kompaktnej konštrukcii a vysokej efektívnosti je tento typ prevodovky veľmi populárny v moderných automobiloch. Jednou z

nevýhod je však zložitosť samotnej koncepcie, ktorá si vyžaduje použitie väčšieho počtu spojok a komponentov. To môže znižovať účinnosť najmä počas prechodu medzi prevodovými stupňami, keď sa viaceré spojky aktivujú alebo uvoľňujú, čo môže viesť k vyšším stratám energie a väčšiemu opotrebeniu systému [8].

#### 4.2 Dvojspojková automatická prevodovka

Dvojspojková prevodovka je typ automatickej prevodovky (obr. 5), ktorá využíva dve spojky na plynulejšie a rýchlejšie radenie prevodových stupňov. Tieto spojky pracujú striedavo - jedna ovláda párne prevodové stupne (2, 4, 6 atď.) a druhá nepárne (1, 3, 5 atď.), čo umožňuje rýchlu zmenu prevodov bez prerušenia prenosu výkonu.

Výhodou dvojspojkovkej prevodovky je, že poskytuje efektívnejší prenos výkonu a zvyšuje plynulosť jazdy, čím kombinuje komfort automatickej prevodovky s rýchlosťou a účinnosťou manuálneho radenia. Je obľúbená v športových aj bežných automobiloch, pretože zlepšuje akceleráciu a znižuje spotrebu paliva, resp. má lepšiu účinnosť [9].



Obr. 5. Schéma dvojspojkovkej prevodovky

#### 4.3 Elektronicky riadená prevodovka

Elektronicky riadená prevodovka je typ prevodovky, ktorá využíva elektronický systém na ovládanie prevodových stupňov mechanickej (manuálnej) prevodovky. Hoci je jej rýchlosť radenia o niečo pomalšia ako pri plne automatických prevodovkách, zachováva vysokú účinnosť manuálnej ozubenej prevodovky.

### 5 POROVNANIE PREVODOVIEK S NASTAVITEĽNÝM POMEROM PRI ELEKTRICKEJ TRAKCII

Elektrická trakcia v automobilovom priemysle je zameraná na dosiahnutie vysokej účinnosti, aby obmedzený dojazd spôsobený kapacitou batérie bol čo najväčší. Pre hybridné vozidlá je účinnosť kľúčová z hľadiska emisných noriem, ktoré musia byť splnené. Účinnosť je preto základným parametrom pri porovnávaní prevodoviek.

Prevodovky s lineárnou zmenou prevodového pomeru ktorých účinnosť je horšia nie sú ideálne pre

elektrickú treciu. Na rozdiel od prevodoviek s stupňovitou zmenou prevodového pomeru ktoré majú vyššiu účinnosť. Prevodovky typu *D-CVT* predstavujú jednu z možných variantov.

### 6 UPLATNENIE V KOĽAJOVEJ DOPRAVE

V koľajovej doprave sa pri elektrickej trakkii štandardne používa stáli prevod. Tento systém je prispôbený vysokým ťažným silám pôsobiacim na hnané dvojkolesia, pričom na vyvolanie týchto síl je potrebný vysoký moment vytváraný elektrickým motorom. Vysoký moment však spôsobuje, že motory často pracujú mimo svojich optimálnych prevádzkových bodov [1], a preto môže prevodový mechanizmus s nastaviteľným prevodovým pomerom priniesť významné výhody. V koľajovej doprave nie je z technologických dôvodov možné uplatniť prevodovky s lineárnou zmenou prevodového pomeru, a preto sú vhodné dvojestupňové prevodovky s ozubenými kolesami, ktoré môžu mať priame alebo šikmé zuby.

### ZÁVER

Článok sa zaoberá využitím prevodového mechanizmu s nastaviteľným prevodovým pomerom v elektrických vozidlách, so zameraním na automobilový sektor a koľajovú dopravu. Predstavuje základné druhy automatických prevodoviek, ktoré je možné implementovať do elektrických automobilov, pričom sú rozdelené na prevodovky s lineárnou a stupňovitou zmenou prevodového pomeru. V článku sú následne podrobne uvedené výhody a nevýhody jednotlivých typov prevodových mechanizmov a na záver je vykonané ich vzájomné porovnanie.

### Pod'akovanie

„Táto práca vznikla vďaka podpore projektu KEGA 031ŽU-4/2023: Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného program Vozidlá a motory.“

### LITERATÚRA

- [1] MALICK K. - HLIQUI S. - CHENG Z. - BELHADI M. (2018): *Etat de l'art des topologies de machines électriques utilisées dans les véhicules électriques et hybrides*. 3ème Symposium de Génie Electrique (SGE), Université de Lorraine, hal-02981853. [Online]. Dostupné na internete: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02981853/document>
- [2] OLYAEI, A. (2019): *Novel continuously variable transmission mechanism*. SN Applied Sciences. [Online]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1081-4>
- [3] XIAO, F. - HU, J. - PENG, H. - ZHAO, W. (2022): *CVT discrete speed ratio optimizations based*

on energy efficiency for PHEV. [Online]. Dostupné na internete:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016821006402?via%3Dihub>

[4] CHUNG, C. - WU, C. - HUNG, Y. (2018): *Effects of Electric Circulation on the Energy Efficiency of the Power Split e-CVT Hybrid Systems*. Department of Vehicle Engineering, National Formosa University, Yunlin 63201. [Online]. Dostupné na internete: [www.mdpi.com/journal/energies](http://www.mdpi.com/journal/energies)

[5] SUTAR, S. - MARKAD, M. - ILAG, A. - NISHANT, S. - BHOLSE, S. (2021): *Continuously variable transmission (CVT) Cone type*. Dept Mechanical Engineering, ISB&M School of Technology. [Online], Dostupné na internete: [www.ijaresm.com](http://www.ijaresm.com)

[6] SRINATH, N. (2015): *Cone Type CVT with High Speed Variations*. Puduvoyal, Thiruvallur, Tamil Nadu. 601206 ISSN 2229-5518.

[7] BLATNICKÝ, M. (2015): *Dopravné a manipulačné zariadenia, riešene príklady*. Žilinská univerzita v Žiline, ISBN 978-80-554-1039-5.

[8] RAJPUT, D. - HERREROS, J. - SCHAUB, J. - DIZQAH, A. (2021): *Electrified Powertrain with Multiple Planetary Gears and Corresponding Energy Management Strategy*. [Online], Dostupné na internete: <https://doi.org/10.3390/vehicles3030021>

[9] BRANCATI, R. - PAGANO, S. - ROCCA, E. (2023): *Dynamic Behaviour of an Automotive Dual Clutch Transmission during Gear Shift Maneuvers*. [Online], Dostupné na internete: <https://doi.org/10.3390/app13084828>

# Tepelné spracovanie nástrojových ocelí

**Peter Fabian, doc. Ing., PhD.\***

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: peter.fabian@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2767

## Heat treatment of tool steels

**Abstract:** The article describes the importance of heat treatment of tool steels, referred to as class 19. To obtain the required properties of steels, their chemical composition alone is not enough. An irreplaceable role is also played by subsequent processing, be it thermal, chemical, or a combination chemical-thermal or thermo-mechanical processing. With the right settings processing, the desired properties are achieved, and the service life of the steel is also increased.

**Keywords:** tool steel, heat treatment, mechanical properties.

## ÚVOD

Článok prináša teoretické podklady pre voľbu vhodného tepelného spracovania, na získanie požadovaných a správnych vlastností pre použitie materiálu v praxi. Na získanie požadovaných vlastností ocelí nestačí len ich chemické zloženie. Nenahraditeľnú úlohu zohráva aj následné spracovanie, či už tepelné, chemické, kombinácia chemicko-tepelného alebo termo-mechanického spracovania. Správnym nastavením spracovania sa dosiahnu požadované vlastnosti a zvýši sa aj životnosť ocele.

## 1 NÁSTROJOVÉ OCELE

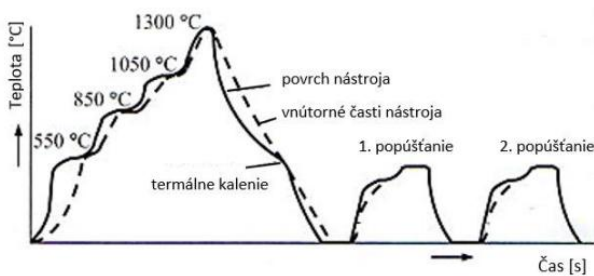
Ocele triedy 19, označované aj ako nástrojové ocele, sú materiály vysokej kvality a vyrábajú sa oblúkovým alebo indukčným tavením. Sú na ne kladené vysoké požiadavky, ako sú tvrdosť, odolnosť proti popúšťaniu, húževnatosť, odolnosť voči opotrebeniu, reznosť, prekaliteľnosť a stálosť rozmerov. Aby bolo možné dosiahnuť tieto vlastnosti, je potrebný vysoký obsah uhlíka. Všetky tieto vlastnosti je potrebné nakombinovať podľa konkrétnych požiadaviek, ktoré budú kladené na materiál [1]. Zvyčajne ich je možné dosiahnuť jedným až dvoma hlavnými prísadovými prvkami. Týmito prvkami sú *Mn*, *Si*, *Cr*, *Ni*, *Mo*, *W*, *V* a *Co*. S rastúcou hodnotou uhlíka stúpa tvrdosť ocele ale zároveň klesá húževnatosť. Ďalšie legujúce prvky zmiernujú negatívne vlastnosti hlavných legujúcich prvkov a ostatné vlastnosti. Dosiachnutie prevádzkových vlastností sa dosahuje aj vďaka vysokému obsahu karbidov, ktorý sa dosahuje práve karbidotvornými legujúcimi prvkami. Dôležitá je aj voľba tepelného spracovania [2]. Životnosť nástrojov výrazne ovplyvňuje aj ich povrchová úprava.

Uhlíkové nástrojové ocele majú obsah *uhlíka* od 0,25 % do 0,6 %. Tento obsah postačuje na dosiahnutie požadovanej tvrdosti. Obsah *fosforu* a *síry* sa drží pod úrovňou 0,06 %. Kalením získavajú tvrdosť len na povrchu do maximálnej hĺbky 2 mm až 3 mm a jadro zostáva nezakalené. Táto vlastnosť je pri niektorých aplikáciách žiadaná, nakoľko nezakalené jadro je húževnaté a dobre odoláva nárazom [3]. Tieto ocele sa využívajú na výrobu menej namáhaných nástrojov. Pracovná teplota týchto nástrojov nie je vyššia ako 200°C, pretože väčšina ocelí tejto kategórie stráca nad 150°C tvrdosť. Požívajú sa na výrobu rezných nástrojov a ručného náradia [4].

Zliatinová skupina ocelí, označovaná aj ako nízkolegovaná, lepšie odoláva vyšším mechanickým namáhaniam ako predošlá skupina. Hlavnými legujúcimi prvkami sú karbidotvorné prvky *chróm* a *volfrám* s obsahom 1 % až 2 %, pretože práve karbidy zvyšujú reznosť nástroja. Podľa konkrétnych požiadaviek sú ďalšími legujúcimi prvkami *Mn*, *Si*, *Ni* a malé množstvá vanádu. Ich množstvo sa pohybuje v rozmedzí 3 % až 5 %. Pokiaľ ide o nástroje určené na tvárnenie za studena, strihanie a obrábanie, sa ocel' vysokoleguje až 12 % *chrómu* a 2 % *kobaltu*. Táto skupina sa vyznačuje vysokou odolnosťou voči opotrebeniu a tvrdosťou. Používa sa na výrobu nástrojov pracujúcich za studena aj za tepla [4, 5].

Rychlorezné ocele (*RO*) tejto triedy získali pomenovanie podľa ich aplikácie na nástroje, ktoré pracujú pri vysokých rýchlostiach. Ich štruktúra je martenzitická. Charakterizuje ich mimoriadne vysoká stabilita vlastností do teplôt 650°C. Táto stabilita je získaná vďaka vysokému obsahu prísad nad 10 %. Obsah *C* = 0,7 % až 0,9 %. V rozmedzí 10 % až 18 % sa pohybuje obsah hlavnej prísady, ktorou je *volfrám*. Ďalšími prvkami sú *chróm*, ktorého obsah sa

pohybuje okolo 4 %, vďaka čomu je oceľ odolnejšia voči oxidácií aj pri vyšších teplotách a 1 % až 4 % vanádu. Vanád výraznou mierou ovplyvňuje tvorbu stabilných karbidov. Vyšší podiel vanádu si však vyžaduje zvýšenie obsahu uhlíka, aby sa zabránilo strate húževnatosti. Pre náročnejšie aplikácie je pri niektorých oceliach časť volfrámu nahradená molybdénom do obsahu 5 %, prípadne 3 % až 10 % kobaltu. Dôležité je držať obsah mangánu a fosforu na minimálnych úrovniach, pretože tieto prvky výrazne zvyšujú krehkosť ocelí a spôsobujú praskanie počas kalenia. Ako tepelné spracovanie sa aplikuje žihanie na teplote 800°C až 840°C. Kalí sa na veľmi vysokých teplotách 1260°C až 1300°C a výdrž na týchto teplotách sa pohybuje na úrovni 100 s. Vysoká teplota je potrebná z hľadiska dosiahnutia požadovaného chemického zloženia austenitu, ktoré sa dosahuje rozpustením potrebnej koncentrácie legujúcich prvkov a uhlíka [6]. Nevýhodou je rast zrna. Ohrev je stupňovitý a pomalý, aby sa dosiahlo vyrovnanie teplôt v celom priereze. Priebeh tepelného spracovania je naznačený na obr. 1.



Obr. 1. Schéma tepelného spracovania rýchlorezných ocelí.

Ocele majú kvôli vysokému obsahu uhlíka a legujúcich prvkov zľú tepelnú vodivosť, preto sa vďaka stupňovému ohrevu tvoria menšie napätia medzi povrchom a jadrom. Po kalení nasleduje popúšťanie na teplotu 560°C až 580°C a opakuje sa 2- alebo 3-krát. Po kalení sa získa matrica pozostávajúca z legovaného martenzitu a veľkého množstva zvyškového austenitu. Táto štruktúra nemá vysokú tvrdosť, preto nasleduje vysoké popúšťanie, počas ktorého sa legujúce prvky a uhlík vylučujú z austenitu. Takto ochudobnený austenit je menej stabilný a nasledovným ochladením z popúšťacej teploty sa ľahko rozpadá na martenzit [6, 7].

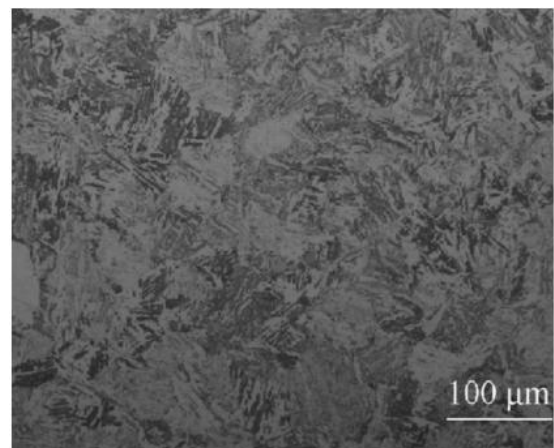
Tab. 1. Mechanické vlastnosti vybraných ocelí triedy 19

Označenie STN	$R_e$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]
19083	821	955	33
19356	748	994	11
19520	854	1014	11
19552	1240	1450	12
19663	1045	1270	10
19735	1080	1230	8

Zvyškový austenit je legovaný a preto je veľmi stály a pre jeho rozpad je nutné viacnásobné popúšťanie. Pokiaľ ide o výrobu veľmi presných nástrojov a meradiel, zvyškový austenit sa znižuje zmrazovaním. Na obr. 1 je znázornená schéma tepelného spracovania rýchlorezných ocelí a v tab. 1 sú mechanické vlastnosti ocelí triedy 19.

## 1.1 Maraging ocele

Trieda ocelí 19 sa rozšírila o novú skupinu špeciálnych ocelí na nástroje. Ide o superpevné ocele so zvýšenou húževnatosťou u nás označované ako maraging. Termín maraging pochádza z anglických slov martensite aging, čo označuje transformovanie štruktúry na martenzit a následné vytvrdzovanie. Do tejto skupiny sa ocele zaraďujú podľa mechanizmu spevňovania a nie podľa chemického zloženia. Maragingová oceľ obsahuje extrémne nízke hodnoty uhlíka do maximálnej koncentrácie 0,03 %. Túto hodnotu je potrebné udržať z dôvodu, aby sa zabránilo tvorbe karbidov titánu, pretože tieto karbidy pri vysokých koncentráciách výrazne znižujú rázovú pevnosť, húževnatosť a ťažnosť. Zato obsahuje vysoké koncentrácie niklu (17 % ÷ 19 %). Medzi ďalšie legujúce prvky patria kobalt (8 % ÷ 12 %), molybdén (3 % ÷ 5 %), titán (0,2 % ÷ 1,8 %) a hliník (0,1 % ÷ 0,15 %). Vysoký obsah kobaltu okrem vplyvu na vlastnosti ocele výrazne vpláva aj na jej cenu, ktorá je značne vyššia oproti iným typom ocelí. Maragingová oceľ sa vyrába zahriatím austenitickej štruktúry na teplotu 850°C a následného pomalého ochladzovania. Pomalým ochladzovaním nevzniká v štruktúre perlit ani ferit ako u bežných ocelí, ale vplyvom vysokého obsahu niklu sa tvorí martenzitická štruktúra (obr. 2).



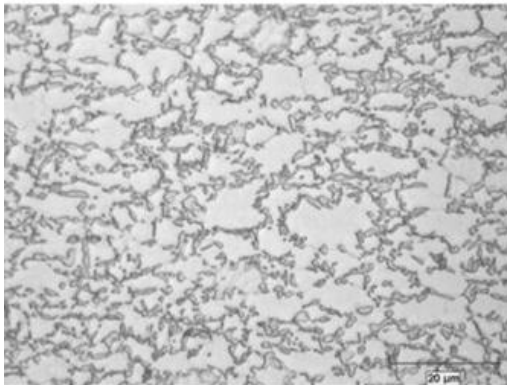
Obr. 2. Mikroštruktúra ocele maraging

Táto martenzitická štruktúra je však v porovnaní s martenzitom vytvoreným kalením pri uhlíkových oceliach mäkkšia. Pri týchto oceliach sa to ale berie ako výhoda z dôvodu zachovania vysokej ťažnosti a húževnatosti bez potreby popúšťania. Následne táto oceľ prechádza štádiom spracovania zvaného

precipitačné vytvrdzovanie - starnutie. Táto časť spracovania prebieha pri teplote  $480^{\circ}\text{C} \div 500^{\circ}\text{C}$ , trvá niekoľko hodín a jej cieľom je vytvorenie jemných tvrdých častí prísad. Vďaka nízkej teplote vytvrdzovania nedochádza vplyvom tepelnej rozťažnosti k veľkým objemovým zmenám [8].

## 1.2 Ocele TRIP

Matrica TRIP ocelí, (z angl. *Transformation Induced Plasticity Steels*) sa skladá z feritu a obsahuje aj zvyškový austenit, ďalej obsahuje zrná bainitu ( $25\% \div 40\%$ ) a pri niektorých typoch ocelí je aj martenzit (obr. 3).



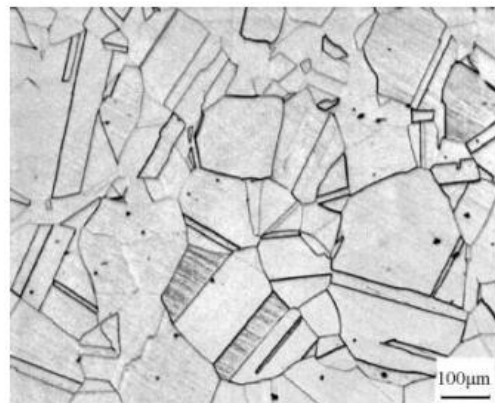
Obr. 3. Mikroštruktúra TRIP ocele

Obsah  $C = 0,20\% \div 0,25\%$  a jeho množstvo je potrebné ako z hľadiska zváratelnosti, tak aj aby teplota  $M_s$  bola posunutá pod izbovú teplotu. Pevnosť ocele sa zvyšuje transformáciou zvyškového austenitu na martenzit s doskovou morfológiou, ktorá sa uskutočňuje počas deformácie. Táto deformačná transformácia je podstatou TRIP ocelí. Podmienkou je podiel zvyškového austenitu v štruktúre  $5\% \div 15\%$ . Správne množstvo austenitu v štruktúre sa dosahuje pomocou  $C$  a  $Si$  (max.  $0,3\%$ ). Inak sú ocele TRIP legované len málo a to prvkami  $Al$ ,  $Mn$ ,  $Cr$ ,  $Mo$ ,  $Nb$  a  $Ti$ . Ocele dosahujú pevnosť  $500\text{ MPa} \div 1050\text{ MPa}$  a ich výhoda spočíva v ich schopnosti predĺženia. Ťažnosť dosahuje  $20\% \div 80\%$ . Zlepšená tvárnosť je dosahovaná vďaka odolnosti voči stenčeniu počas procesu tvarovania. Proces výroby TRIP ocelí pozostáva z rozpúšťacieho žihania pri teplote  $1120^{\circ}\text{C}$ , po ktorom je vďaka chemickému zloženiu teplota  $M_s$  pod  $0^{\circ}\text{C}$ . Následne sa oceľ intenzívne tvárni pri teplote nad  $M_d$ . Podľa druhu ocele sa táto teplota pohybuje okolo  $100^{\circ}\text{C}$ . Stupeň pretvárania dosahuje hodnoty  $80\%$ . Tvárnenie spôsobí zvýšenie teploty  $M_d$  približne o  $100^{\circ}\text{C}$  a o rovnakú hodnotu nastane zníženie teploty  $M_s$ . Tieto ocele našli uplatnenie najmä v automobilovom priemysle [8].

## 1.3 Ocele TWIP

Táto skupina ocelí patrí k novým perspektívnym typom. Ide o ultrapevné vysoko legované mangánové

ocle. Označenie majú z angl. *Twinning Induced Plasticity Steel*. Hodnoty  $R_e$  dosahujú  $280\text{ MPa} \div 1350\text{ MPa}$  a  $R_m$   $580\text{ MPa} \div 1470\text{ MPa}$ . Hodnoty ťažnosti sú v rozpätí od  $15\%$  do  $95\%$ . Týmito hodnotami ťažnosti sa TWIP ocele dajú prirovnať k oceliam hlbokoťažným, avšak majú niekoľkonásobne vyššie hodnoty pevnosti. Svoje vlastnosti dosahujú vďaka austenitickej štruktúre, ktorá sa netransformuje na martenzit ani pri vyšších deformáciách. Namiesto toho dochádza v štruktúre pri deformáciách k dvojčateniu, a to za každých teplôt a v celom objeme. Najlepší výsledok dvojčatenia je možné sledovať pri obsahu  $Mn > 20\%$ . Pokiaľ je obsah  $Mn < 15\%$  dochádza k TRIP efektu (obr. 4).

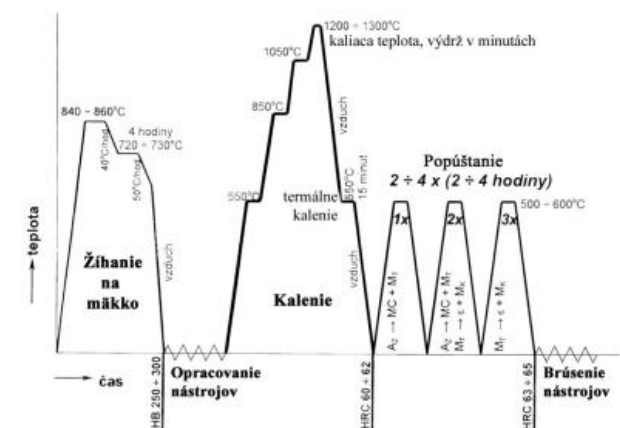


Obr. 4. Mikroštruktúra TWIP ocele

Ocele sú ďalej legované hliníkom, ktorý potláča transformáciu austenitu na martenzit, a kremíkom na zlepšenie pevnosti. Významné zastúpenie táto oceľ našla v automobilovom priemysle pri stavbe rámov aj vďaka schopnosti absorbovať energiu pri náraze, jednoduchosti lisovania a znížení celkovej hmotnosti vozidla. Takisto sa uplatňuje pri stavbe lodí a transportných potrubí [8].

## 2 TEPELNÉ SPRACOVANIE

Tepelné spracovanie nástrojových ocelí je zložitá a nákladná. Jeho cieľom je dosiahnuť čo najlepšie rezné vlastnosti a najvhodnejšie mechanické vlastnosti nástroja (obr. 5).



Obr. 5. Postup tepelného spracovania rýchlorezných ocelí pri výrobe nástrojov

## 2.1 Žihanie

*Žihanie na mätko* - používa sa pre zlepšenie obrábatelnosti výkovkov. Najjednoduchší spôsob žihania na mätko spočíva v pomalom ohreve ocele na teplotu 850°C (podľa typu ocele je táto teplota daná v materiálových listoch) s výdržou 4 až 8 hodín a následným pomalým ochladením v peci do teploty asi 600°C ÷ 500°C a ďalším pozvoľným chladením.

*Žihanie na zníženie vnútorných napätí* - slúži na zníženie napätí vzniknutých pri obrábaní pred tepelným spracovaním. Spočíva v pomalom ohreve na teplotu 600°C ÷ 650°C s 1 až 2 hodinovým zotrvaním na teplote a pomalom chladením v peci. V takomto stave má oceľ *perliticko - ledeburitickú* štruktúru.

## 2.2 Kalenie

*Kalenie* možno realizovať ochladzovaním na vzduchu, pretože *RO* ocele sú samokaliteľné (vďaka vysokému obsahu legúr), a nie je potrebné používať intenzívne chladiace prostredia. Účelom kalenia je rozpustenie väčšiny *karbidov* a dosiahnutie ich nového, jemnejšieho vylúčenia, za súčasného dosiahnutia optimálnych rezných a mechanických vlastností [9]. Nástroje z *RO* sa zohrievajú na kaliacu teplotu stupňovito, pretože veľká rýchlosť ohrevu spôsobuje ich praskanie. Ich kaliaca teplota je vyššia ako u bežných konštrukčných ocelí, pohybuje sa v rozmedzí 1200°C ÷ 1300°C. Prvý stupeň ohrevu sa uskutočňuje na vzduchu, ďalšie už v solných kúpeľoch alebo vo vákuovej peci, a to nasledovne:

*1. stupeň ohrevu* je na teplotu v intervale 350°C ÷ 550°C, s výdržou 1 až 2 hodiny. Teplota 550°C je kritickou teplotou, pri ktorej nedochádza k oduhličeniu nástrojov, preto je možné vykonať ho na vzduchu. Cieľom výdrže na teplote je vyrovnať teplotu jadra a povrchu nástroja, a tým zmenšiť tepelné pnutia.

*2. stupeň ohrevu* je na teplotu v intervale 820°C ÷ 850°C s výdržou 1 až 2 hodiny. Jedná sa o ohrev nad teplotu  $A_1$ , čo umožňuje vyrovnanie štruktúrnych pnutí, ktoré vznikajú zmenou mriežky, teda prekryštalizáciou. Uskutočňuje sa v solnom kúpeli alebo vo vákuu.

*3. stupeň ohrevu* je na teplotu 1050°C v solnom kúpeli. Pri tejto teplote sa karbid *M23C6* rozkladá na zložky, ktoré sa rozpúšťajú v *austenite* a uskutoční sa homogenizácia *austenitu* [10]. Tento stupeň skracuje dobu zotrvania na kaliacej teplote, a teda znižuje aj nebezpečenstvo zhrubnutia zrna.

*4. stupeň ohrevu* je na teplotu v intervale 1200°C ÷ 1300°C, s výdržou menej ako 5 minút, aby nezhrublo zrna a nenatavili sa tenké rezné hrany nástrojov. Dĺžka zotrvania na teplote kalenia je závislá od jej výšky. S vyššou kaliacou teplotou sa skracuje doba výdrže. Voľba kaliacej teploty v predpísanom rozmedzí sa riadi predovšetkým tvarom

a spôsobom namáhania nástroja pri používaní. Kaliaca teplota pri spodnej hranici kaliaceho rozmedzia dáva nástroju vyššiu húževnatosť, oteruvzdornosť, odolnosť proti tepelnej únave a menšie rozmerové zmeny. Je teda vhodná pre menšie a tvarovo komplikovanejšie nástroje. Kaliaca teplota pri hornej hranici kaliaceho rozmedzia zvyšuje prekaliteľnosť, odolnosť proti popúšťaniu a tvrdosť pri zvýšených teplotách, a tým zvyšuje aj životnosť nástrojov. Takáto teplota je vhodná pre väčšie nástroje a nástroje jednoduchých tvarov s minimálnymi rozdielmi v priereze. Po zakalení je štruktúra rýchloreznej ocele tvorená nerozpustenými *karbidmi M6C* a *MC* (v množstve asi 5 % ÷ 10 %), vysokolegovaným zvyškovým *austenitom* (v množstve asi 40 % ÷ 70 %) a vysokolegovaným *martenzitom* (zvyšok do 100 %).

## 2.3 Popúšťanie

*Popúšťanie* zakalenej ocele spôsobí premenu zvyškového *austenitu* na *martenzit*, premenu *tetragonálneho martenzitu* na *martenzit* skoro kubický a vylúčenie *karbidov* disperzne vytvrdzujúcich ocelí. Vysokolegovaný zvyškový *austenit* je stabilný a počas popúšťania z neho precipitujú *karbidy*, čím sa zmenší jeho stabilita a časť z neho sa premení na *martenzit*. Preto treba popúšťať viackrát za sebou:

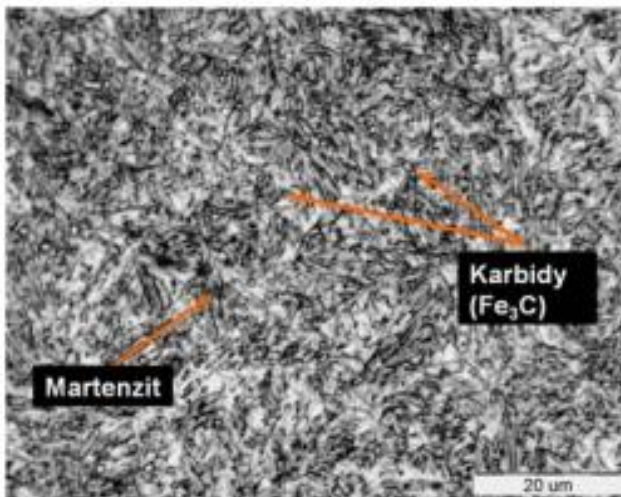
- po 1. popúšťaní - dochádza k popusteniu *martenzitu*, časť zvyškového *austenitu* sa premení na *martenzit* 1, zostáva zvyškový *austenit* 1, dochádza k precipitácii *karbidov* z popusteného *martenzitu* a zvyškového *austenitu*,
- po 2. popúšťaní - dochádza k popusteniu *martenzitu* 1, časť zvyškového *austenitu* 1 sa premení na *martenzit* 2, zostáva zvyškový *austenit* 2, dochádza k precipitácii *karbidov* z popusteného *martenzitu* 1 a zvyškového *austenitu* 1,
- po 3. popúšťaní - dochádza k popusteniu *martenzitu* 2, časť zvyškového *austenitu* 2 sa premení na *martenzit* 3, zostáva zvyškový *austenit* 3, dochádza k precipitácii *karbidov* z popusteného *martenzitu* 2 a zvyškového *austenitu* 2.

Popúšťanie nástrojov musí nasledovať v čo najkratšej dobe po ich zakalení, lebo základom štruktúry sú nerovnovážne fázy (*martenzit* + zvyškový *austenit*), ktoré sa vyznačujú vysokou hustotou dislokácií a bodových porúch [11, 12]. Rozdiely v ich merných objemoch vyvolávajú veľké vnútorné napätia. Popúšťaním prebiehajú štruktúrne zmeny, pri ktorých sa sústava blíži k rovnovážnemu stavu (mení sa štruktúra, fyzikálne a mechanické vlastnosti). Po treťom, maximálne štvrtom popúšťaní je premenený takmer všetok zvyškový *austenit*, ktorý by sa mohol

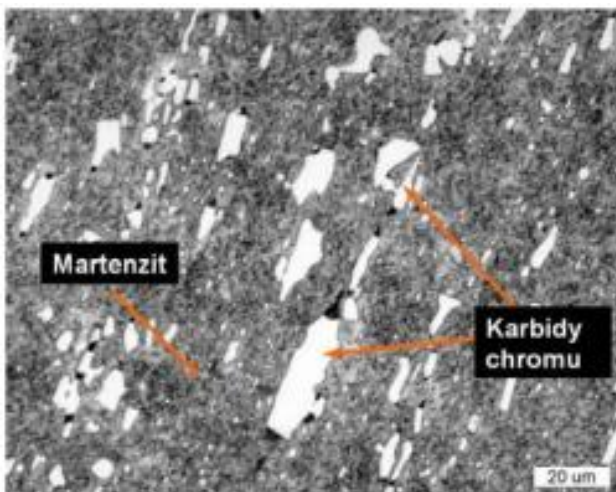
premieňať pri pracovnej teplote nástroja, aj keď nejaké percento zvyškového *austenitu* zostáva. Nástroj je teda rozmerovo stabilný a pripravený na použitie. Doba výdrže na popúšťacej teplote je asi 1 hodina na každých 25 mm hrúbky, minimálne však 30 minút. Rozpad zvyškového *austenitu* prebieha počas ochladzovania z popúšťacej teploty a po každom popúšťaní sa musí nástroj ochladiť na teplotu okolia [13].

### 3 ŠTRUKTÚRA NÁSTROJOVÝCH OCELÍ

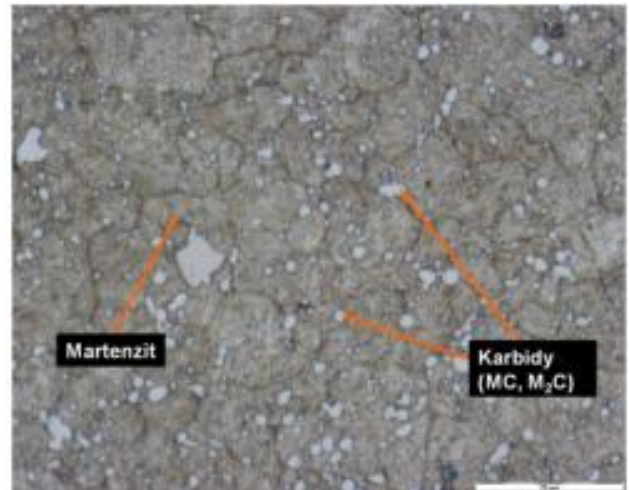
*Martenzit* - žiaduca štruktúra - tvrdý, pevný, krehký. Zvyškový *austenit* - nežiaduca štruktúra (je mäkký), jeho množstvo závisí na obsahu *uhlíka* a legujúcich prvkov rozpustených v *austenite* po výdrži na kaliacej teplote (*C*, *Mn*, *Ni*, *Co* znižujú teplotu *Ms* a *Mf*). *Karbidy* - žiaduca štruktúra, *karbidy* vyskytujúce sa v matrici nástrojových ocelí sú tvrdšie ako základná matrica (obr. 7), takže zvyšujú odolnosť proti opotrebeniu. Ich vplyv je tým väčší, čím je vyššia ich tvrdosť a plocha povrchu [14, 15]. Príklady mikroštruktúry nástrojových ocelí sú na obr. 6 až obr. 11.



Obr. 6. Oceľ C105U (19 191), 850°/voda/200°C



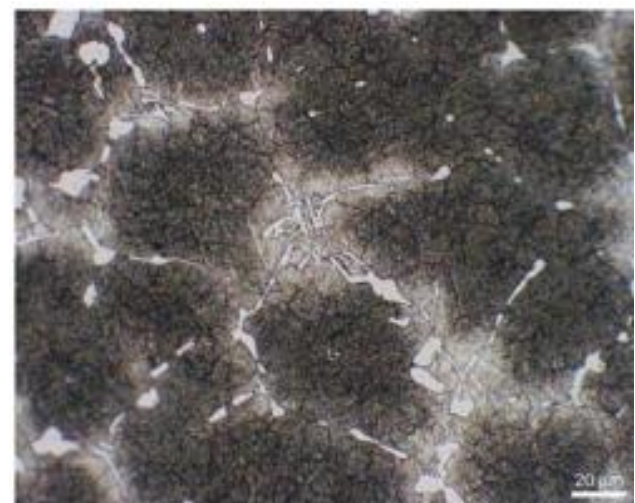
Obr. 7. Oceľ X210Cr12 (19 436), 980°C/olej/200°C - ukážka štruktúry nevhodne tvárnenej nástrojovej ocele - karbidická riadkovitosť



Obr. 8. Oceľ HS 6-5-2 (19 830), 1200°C/olej/550°C



Obr. 9. Liata nástrojová oceľ 170WV6M3



Obr. 10. Liata nástrojová oceľ 170WV6M3



Obr. 11. Nástrojová oceľ vyrobená metódou PM - VANADIS 23.

### Pod'akovanie

Táto práca bola podporená projektom KEGA 003ŽU-4/2024 Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva Slovenskej republiky.

### LITERATÚRA

- [1] SKOČOVSKÝ, P.- PALČEK, P.- KONEČNÁ, R.- VÁRKOLY, L. (2000): *Konstrukčné materiály*. Žilina: EDIS, ISBN 80-7100-608-4.
- [2] SKOČOVSKÝ, P.- BOKŮVKA, O.- KONEČNÁ, R.- TILLOVÁ, E. (2015): *Náuka o materiáli*. Žilina: EDIS, ISBN 978-80-554-1071-5.
- [3] STANĚK, B. (1980): *Oceľ, Výrobní program*, II díl. Hutnictví železa. Praha : s. n.
- [4] SKOČOVSKÝ P.- BOKŮVKA O.- KONEČNÁ R.- TILLOVÁ E. (2014): *Náuka o materiáli*. Žilina: EDIS. ISBN: 978-80-554-0871-2.
- [5] SUDARSANAM, S. B. (2021): *Thermo-Mechanical Processing*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128197264001022>.
- [6] PULC, V. - HRNČIAR, V. - GONDÁR, E. (2008): *Náuka o materiáli*. Bratislava: STU, ISBN 978-80-227-2847-8.

[7] QI-YUAN, CH. - WEI-NA, Z. - SHUAI, T. - PENG-JIE, W - JUN, CH. - ZHEN-YU, L. (2021): *Microstructural heredity of Ni-containing cryogenic steel and its effect on the toughness at 77 K*. [Online] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509321017044#bib1>.

[8] RAZMPOOSH, M. H. - ŠAMANSKÝ, M. - ESMAILZADEH, M. (2014): *Materials&Desing*. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914008802?casa\\_token=iEAEz\\_ZQ6foAAA:AA:yuaLmc9MIwdKq0GtgxNsTj5Qv2BAeHUyGhNyjuUGqECS4vTFpkZ3KrlX4k-0-rRoObH8hlVt4Jg](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914008802?casa_token=iEAEz_ZQ6foAAA:AA:yuaLmc9MIwdKq0GtgxNsTj5Qv2BAeHUyGhNyjuUGqECS4vTFpkZ3KrlX4k-0-rRoObH8hlVt4Jg).

[9] KONEČNÁ, R. - TILLOVÁ, E. - VAŠKO, A. - MARKOVIČOVÁ, L. (2014): *Materiály II*. Žilina : EDIS, ISBN 978-80-554-0883-5.

[10] CHAJRAVARTHI, K. V. A. et al. (2017): *Microstructure, properties and hot workability of M300 grade maraging steel*. [https://www.researchgate.net/publication/319619285\\_Microstructure\\_properties\\_and\\_hot\\_workability\\_of\\_M300\\_grade\\_maraging\\_steel](https://www.researchgate.net/publication/319619285_Microstructure_properties_and_hot_workability_of_M300_grade_maraging_steel).

[11] FREMUNT, P. - KREJČÍ, J. - PODRÁBSKÝ, T. (1994): *Nástrojové oceľi*. Brno: Dům techniky,

[12] GÁBRISOVÁ, Z. - BRUSILOVÁ, A. (2019): *Tepelné spracovanie*. Bratislava: SPEKTRUM STU, pp. 134. ISBN 978-80-227-4894-0.

[13] GRÄSSEL, O. et al. (2000): *International Journal of Plasticity*. [Online]. 28.08. [cit. 2022-04-19]. Dostupné na internete: . Griggs steel company. What is High Speed Steel? [Online]. [cit.2022-04-10].

[14] HRIVŇÁK, I. (1996). *Výber materiálov a nové materiálové technológie*. Košice: Elfa, pp. 177. ISBN 80-88786-39-8.

[15] HRNČIAR, V. (2006): *Nástrojové oceľe*. VŠB Ostrava, Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=161>

# Výroba švových rúr malých priemerov z austenitických ocelí

## Jozef Bílik, doc. Ing., PhD.\*

Katedra tvárnenia kovov a plastov, Ústav výrobných technológií,  
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave,  
Slovenská technická univerzita v Bratislave,  
Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava.  
E-mail: jozef.bilik@stuba.sk, Tel.: +421 915 761 406

## Róbert Sobota, Ing., PhD.

Katedra tvárnenia kovov a plastov, Ústav výrobných technológií,  
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave,  
Slovenská technická univerzita v Bratislave,  
Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava.  
E-mail: robert.sobota@stuba.sk, Tel.: +421 908 657 796

## Production of small diameter seam tubes from austenitic steels

**Abstract:** The article focuses on the analysis of the production process of small diameter seam tubes made of austenitic steels used in the food industry, automotive and aerospace industries, in measurement technology, heating elements, in healthcare in the production of needles for syringes, for heat exchangers designed to cool exhaust gases in the automotive industry and for fuel-oil heat exchangers used in the aerospace industry. The article deals with the production of precision seam tubes with a diameter of 6 mm and a wall thickness of 1 mm. The aim was to optimize the process using simulation using the *DEFORM 3D* simulation program. The solution consisted in adjusting the geometry of the beam and improving the friction ratios during the drawing.

**Keywords:** seam tubes, beam drawing, tube drawing downstanding, reduction size

## ÚVOD

Článok je zameraný na výrobu tenkostenných koróziivzdorných švových rúr malých priemerov do 12 mm ťahaním cez prievlak. Samotnému ťahaniu predchádza výroba švovej zvarenej rúry kontinuálnym ohýbaním medzi valcami s následným zvaraním. Pri finálnom ťahaní na konečný rozmer pri malých priemeroch sa využíva prievlačné ťahanie. Tieto rúry majú uplatnenie najmä v potravinárskom, automobilovom a leteckom priemysle, v meracej technike, vykurovacích telesách alebo v zdravotníctve pri výrobe ihliel do injekčných striekačiek. Tiež sú používané pre tepelné výmenníky určené na ochladzovanie výfukových plynov v automobilovom priemysle a pre palivovo-olejové tepelné výmenníky používané v leteckom priemysle.

## 1 SÚČASNÝ STAV VÝROBY

Proces výroby švových rúr začína kontinuálnym ohýbaním medzi valcami s následným zvaraním pričom ako polotovar je použitý pás s požadovanou šírkou navinutý do tvaru zvitku. Švové rúry sa následne na konečné rozmery ťahajú na ťažných stolicích s navíjaním do tvaru zvitku. Rúry sa ťahajú

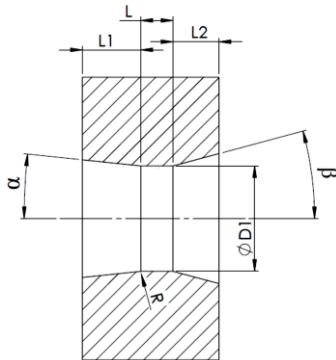
prievlačným ťahom pri maximálnej rýchlosti ťahania  $6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  alebo v niektorých prípadoch s plávajúcim ťiahom s maximálnou rýchlosťou ťahania  $3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Zvárané tenkostenné koróziivzdorné rúry sú vyrábané s vonkajším priemerom od 0,2 mm až do 12 mm a hrúbkou steny od 0,05 mm do 1 mm. Štandardná tolerancia podľa technických noriem je pri oboch rozmeroch  $\pm 0,05 \text{ mm}$ . V tab. 1 sú uvedené materiály používané pri výrobe koróziivzdorných rúr.

Tab. 1. Materiály používané pri výrobe rúr

Číslo materiálu	Označenie	Číslo materiálu	Označenie
1.4301	X5CrNi18-10	1.4435	X2CrNiMo18-14-3
1.4303	X4CrNi18-12	1.4439	X2CrNiMo17-13-5
1.4306	X2CrNi19-11	1.4539	X1NiCrMoCu25-20-5
1.4307	X2CrNi18-9	1.4541	X6CrNiTi18-10
1.4310	X10CrNi18-8	1.4550	X6CrNiNb18-10
1.4318	X2CrNi18-7	1.4561	X1CrNiMoTi18-13-2
1.4401	X5CrNiMo17-12-2	1.4565	X2CrNiMnMoNbN25-18-5-4
1.4404	X2CrNiMo17-12-2	1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2

Článok je zameraný na optimalizáciu procesu výroby švovej rúry z koróziivzdornej ocele s vonkajším priemerom 6 mm. Súčasná geometria prievlaku používaná pri výrobe je znázornená na obr. 1 a hodnoty jednotlivých rozmerov sú uvedené v tab. 2.



Obr. 1. Súčasná geometria prievlaku:  $\alpha$  - uhol vstupnej časti [°],  $\text{ØD1}$  - priemer kalibračného valca [mm],  $L$  - dĺžka kalibračného valca [mm],  $R$  - prechodový rádius [mm],  $L1$  - dĺžka vstupnej časti [mm],  $L2$  - dĺžka výstupového kužeľa [mm],  $\beta$  - uhol výstupového kužeľa [°]

Tab. 2. Hodnoty jednotlivých rozmerov prievlaku

Parameter	$\alpha$ [°]	$\text{ØD1}$ [mm]	$L$ [mm]	$R$ [mm]	$L1$ [mm]	$L2$ [mm]	$\beta$ [°]
Hodnota	6	5,94	0,9	0,1	3,3	2,6	15

Ďalšími vstupným veličinami sú materiál prievlaku, použité mazivo a súčasná používaná rýchlosť ťahania  $v_f$ , ktoré sú uvedené v tab. 3.

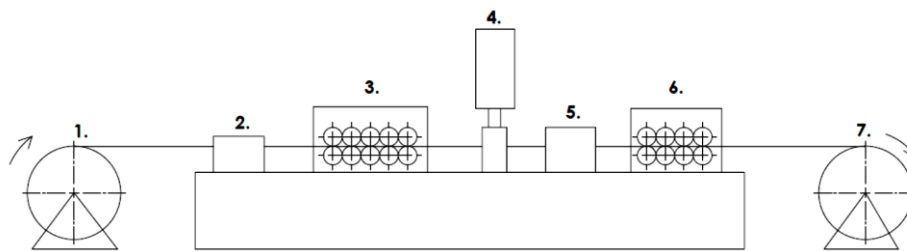
Tab. 3. Vstupné parametre používané v súčasnosti pri ťahaní

Materiál prievlaku	PCD
Mazivo	Vysoko viskózný olej
Súčasná maximálna ťažná rýchlosť $v_f$ [m min <sup>-1</sup> ]	5

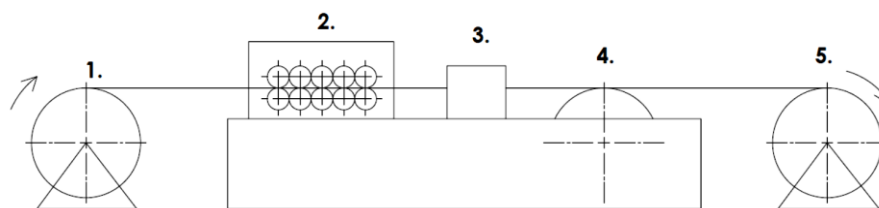
Na obr. 2 je schéma pracoviska na výrobu švovej zvárenej rúry kontinuálnym ohýbaním medzi valcami s následným zváraním. Pred zavedením pásu medzi zakružovacie valce sa jeho povrch mechanicky čistí pomocou papiera namočeného v etanole. Po zvarení rúra postupuje do kontrolnej komory, kde sa kontroluje zvar, ďalej ide cez ďalšie zakružovacie kladky, kde sa kalibruje tvar rúry a navíja sa na bubon.

Pred ťahaním cez prievlak sa navinutá rúra odvíja a postupuje do žihacej pece, kde sa vyžiha pri teplote 950°C až 1080°C a znovu sa navíja na ďalší bubon.

Zvitok sa nasadí na odvíjačku a rúra sa postupne zavedie cez zavádzacie kladky do prievlaku, kde je privádzaný mazací olej a rúra sa ťahá cez prevíjajúci bubon, ktorý udáva rýchlosť ťahania. Potom sa vytiahnutá rúra navíja na navíjajúci bubon (obr. 3).



Obr. 2. Schéma výrobného systému na výrobu švovej rúry kontinuálnym ohýbaním: 1 - odvíjajúci bubon, 2 - mechanické čistenie, 3 - zakružovacie kladky, 4 - zväracie zariadenie so zväracou komorou, 5 - kontrola zvaru, 6 - zakružovacie kladky, 7 - navíjajúci bubon



Obr. 3. Schéma výrobného systému na výrobu presných švových rúr prievlačným ťahaním: 1 - odvíjajúci bubon, 2 - zavádzacie kladky, 3 - prievlak, 4 - prevíjajúci bubon, 5 - navíjajúci bubon

## 2 OPTIMALIZÁCIA PROCESU ŤAHANIA

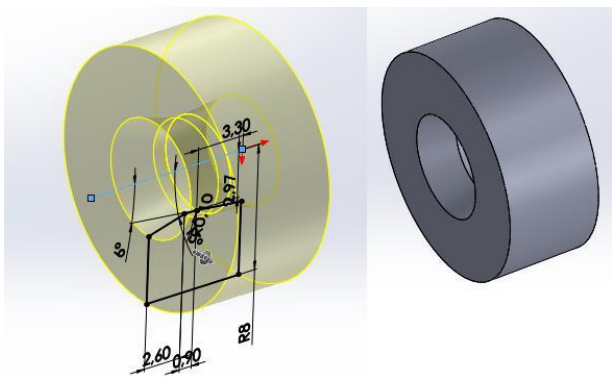
Cieľom bola optimalizácia priebehu procesu ťahania a tiež možnosť zvýšenia rýchlosti ťahania za účelom zvýšenia produktivity výroby pre konkrétny typorozmer rúry. V tab. 4 sú uvedené rozmery a požiadavky kladené na daný typorozmer rúr.

Viaceri autori sa vo svojich štúdiách zhodujú, že významný vplyv na proces prievlačného ťahania má samotné trenie medzi rúrou a prievlakom, čo úzko súvisí s geometriou prievlaku [1]. Vhodná geometria prievlakov umožňuje znížiť ťahové napätia v materiály ťahanej rúry za prievlakom, a tým aj ťažnú silu.

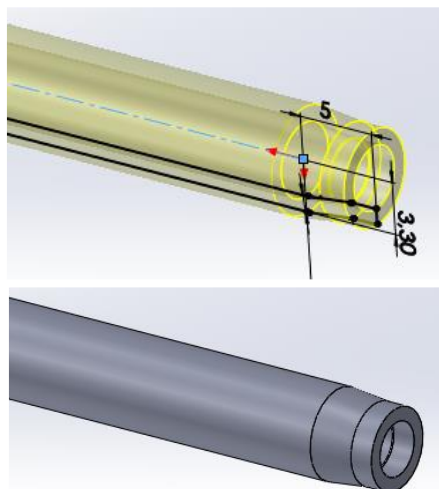
Tab. 4. Rozmery a požiadavky kladené na daný typorozmer rúry

Materiál ťahanej rúry	1.4301(X5CrNi18-10) AISI 304
Vonkajší priemer vstupnej rúry $\theta D_0$ [mm]	6,45 až 6,65
Hrúbka steny vstupnej rúry $t_0$ [mm]	1
Požadovaný vonkajší priemer rúry po ťahaní $\theta D$ [mm]	$6^{-0,05}$
Požadovaná hrúbka steny rúry po ťahaní $t$ [mm]	$1^{+0,05}$

Znížením ťažnej sily dôjde k zníženiu odporu voči ťahaniu, čím vznikne možnosť zvýšenia ťažnej rýchlosti [2]. Vhodnou úpravou uhla vstupnej kužeľovej časti prievlaku  $\alpha$  sa dajú znížiť napätia vznikajúce v materiály počas ťahania [2]. Pri optimalizácii geometrie uhla vstupného kužeľa bola využitá simulácia procesu ťahania v simulačnom softvéri *DEFORM 3D*. 3D model prievlaku a rúry bol vytvorený v programe *Solidworks* a bol importovaný do simulačného softvéru. 3D model prievlaku je na obr. 4 a 3D model rúry pre simuláciu je na obr. 5.



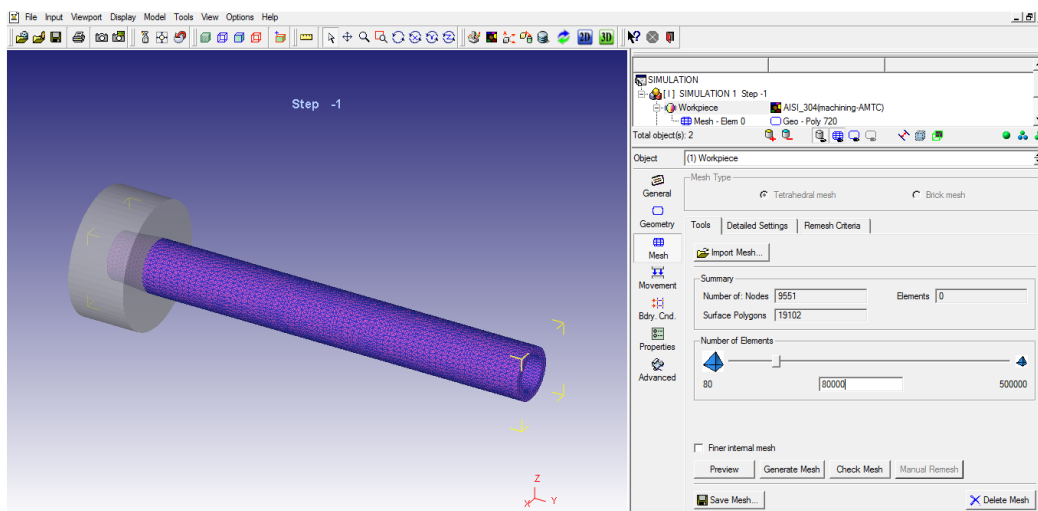
Obr. 4. Vytvorený 3D model prievlaku



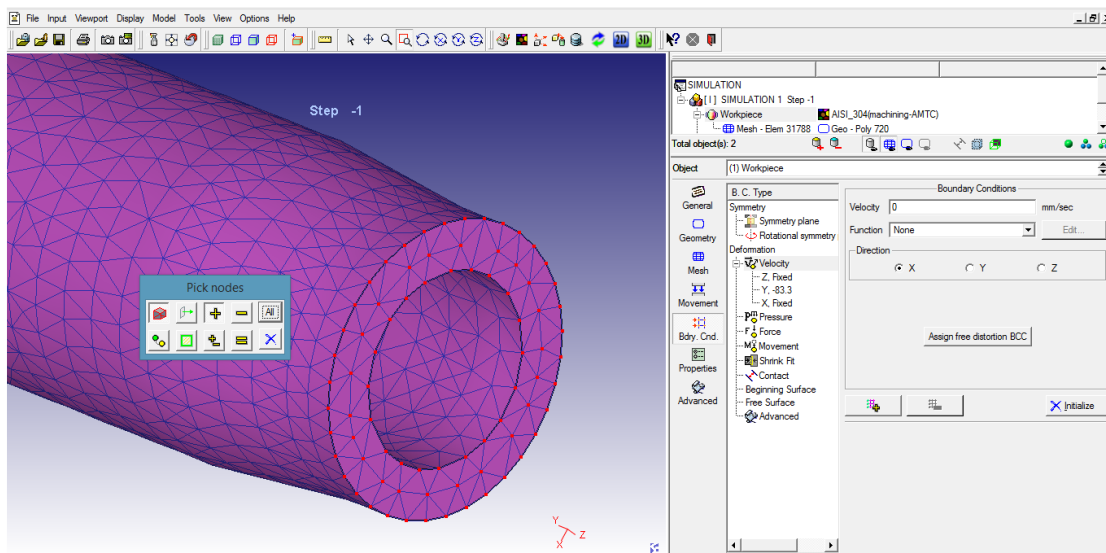
Obr. 5. Vytvorený 3D model rúry s predtvárneným tvarom (hrotom) na presunutie cez prievlak

Pre správne vytvorenie kontaktu medzi prievlakom a rúrou je potrebné upraviť začiatok rúry. To znamená, že je potrebné upraviť tvar geometrie rúry do tzv. predtvárneného tvaru (vytvorenie hrotu). Pri importe geometrie analyzovaných modelov sa importoval osobitne model rúry a potom sa importoval model prievlaku. Nasledovalo zadanie materiálu rúry a typ objektu modelu. V tomto prípade sa pre rúru zvolil elasto-plastický typ a pre prievlak sa zvolil typ *Rigid* (pevný) a zvolil sa materiál rúry z databázy softvéru a to *AISI 304 1.4301* (tab. 4). Nasledovalo vytvorenie siete prvkov (*Mesh*) pre rúru, v tomto prípade konkrétne štvorsten (*tetrahedron*) s počtom použitých prvkov 80 000 (obr. 6).

Potom sa zadefinovali okrajové podmienky (obr. 7) a zafixovanie čelnej plochy rúry v osi *X* a *Z*, t. j. zadanie nulovej rýchlosti v týchto smeroch. Ďalej bolo potrebné zadefinovanie ťažnej rýchlosti v osi *Y*. Pri analýze vplyvu geometrie prievlaku (uhla vstupného kužeľa) na veľkosť ťahového napätia v ťahanej rúre za prievlakom bola zadefinovaná pre danú rúru ťažná rýchlosť  $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  ktorá je štandardne používaná.



Obr. 6. Vytvorenie siete prvkov pre rúru



Obr. 7. Zadefinovanie okrajových podmienok

Ďalším krokom bolo vytvorenie kontaktu medzi rúrou a prievlakom, bolo potrebné zadať aj súčiniteľ trenia ktorý bol zadaný s hodnotou  $f=0,35$ . Počet krokov analýzy bol zadaný 50 a časový prírastok jedného kroku bol 0,01 sekundy. Pred spustením samotnej simulácie sa realizovalo vytvorenie databázy analýzy ktorá slúžila pre softvér na čítanie a čerpanie potrebných informácií pri vykonávaní analýzy. Výsledkom samotnej analýzy boli hlavne farebné mapy a hodnoty ťahových napätí v osi ťahania  $\sigma_p$ . Z dôvodu aby pri ťahaní za prievlakom nedochádzalo k nežiadúcej deformácii prierezu rúry a tým k zmene rozmerov rúry musí byť toto napätie menšie ako je následná medza klzu po deformačnom spevnení ktoré nastane v dôsledku ťahania a ktoré je úmerné veľkosti pretvorenia v danom ťahu. Pre správne vyhodnotenie počítačových analýz a pre ďalší možný postup bolo preto potrebné poznať maximálne dovolené ťahové napätie  $\sigma_{dov}$  v rúre tak, aby nedošlo k jej deformácii resp. k porušeniu za prievlakom. Na určenie týchto napätí bol použitý napäťovo deformačný diagram (krivka deformačného odporu) pre oceľ 1.4301 (X5CrNi18-10), AISI 304 uvedený na obr. 8.

Z hľadiska použitia tohto diagramu na určenie dovoleného ťahového napätia v ťahanej rúre bolo potrebné zistiť skutočné (logaritmické) pretvorenie pri ťahaní a to podľa vzorca:

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{17,59}{15,52} = 0,125, \quad (1)$$

kde  $\varphi$  - logaritmické pretvorenie [ - ],

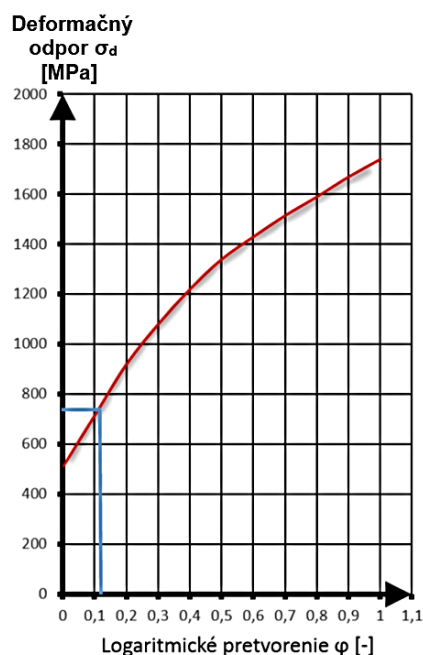
$S_0$  - prierez vstupnej rúry pred ťahaním [mm<sup>2</sup>],

$S$  - prierez rúry po ťahaní [mm<sup>2</sup>].

Prierez vstupnej rúry pred ťahaním  $S_0$  a prierez rúry po ťahaní  $S$  bol určený pomocou softvéru *Solidworks*

na základe 3D modelu vstupnej rúry a 3D modelu rúry po ťahaní.

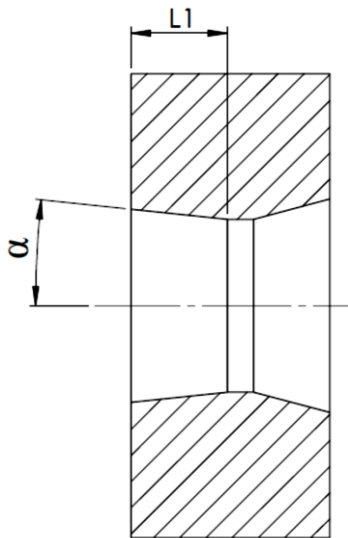
Prierez vstupnej rúry pred ťahaním bol  $S_0 = 17,59 \text{ mm}^2$  a prierez rúry po ťahaní bol  $S = 15,52 \text{ mm}^2$ . Na základe vypočítaného logaritmického pretvorenia  $\varphi$  bolo stanovené najväčšie možné napätie pri ťahaní rúry tak, aby nedošlo k jej deformácii za prievlakom.



Obr. 8. Krivka deformačného odporu - odčítanie najväčšieho možného (dovoleného) napätia

Z diagramu vyplýva, že najväčšie dovolené napätie je  $\sigma_{dov} = 735 \text{ MPa}$ .

Úprava geometrie prievlaku spočívala v zmene uhla zavádzacej časti  $\alpha$ . Z tejto úpravy vyplýva aj zmena dĺžky zavádzajúcej časti prievlaku  $L1$ . Upravované časti sú znázornené na obr. 9.



Obr. 9. Upravované časti prievlaku:  $\alpha$  - uhol zavádzacej časti,  $L1$  - dĺžka zavádzacej časti

Rozmery prievlaku ktoré sa menili v rámci optimalizácie geometrie prievlaku sú uvedené v tab. 5.

Tab. 5. Rozmery prievlaku menené v rámci optimalizácie geometrie prievlaku pomocou simulácie

$2\alpha$ [°]	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$L1$ [mm]	7,9	6,6	5,9	5,1	4,5	4	3,6	3,3	3,1	2,9	2,7

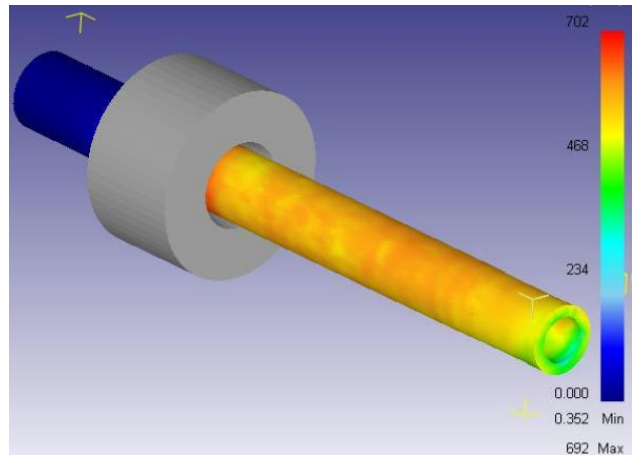
Z analýzy pri použití uhla  $5^\circ$  vyplynulo, že maximálne ťahové napätie dosahovalo hodnotu 850 MPa, čo by znamenalo prekročenie dovolenej hodnoty  $\sigma_{dov} = 735$  MPa a rúra by sa pri použití takého uhla deformovala za prievlakom prípadne by sa roztrhla.

Z analýzy pri použití uhla  $6^\circ$  taktiež vyplynulo, že rúra by sa pri použití tohto uhla deformovala za prievlakom prípadne by sa roztrhla, lebo maximálne ťahové napätie dosahovalo hodnotu 830 MPa.

Pri použití uhla  $7^\circ$  sa už maximálne ťahové napätie v rúre za prievlakom dosahovalo hodnotu  $\sigma_{imax} = 692$  MPa, ktoré je menšie ako dovolené a preto nedôjde k deformácii rúry za prievlakom. Výsledok analýzy pre uhol vstupného kužela prievlaku  $2\alpha = 7^\circ$  je uvedený na obr. 10.

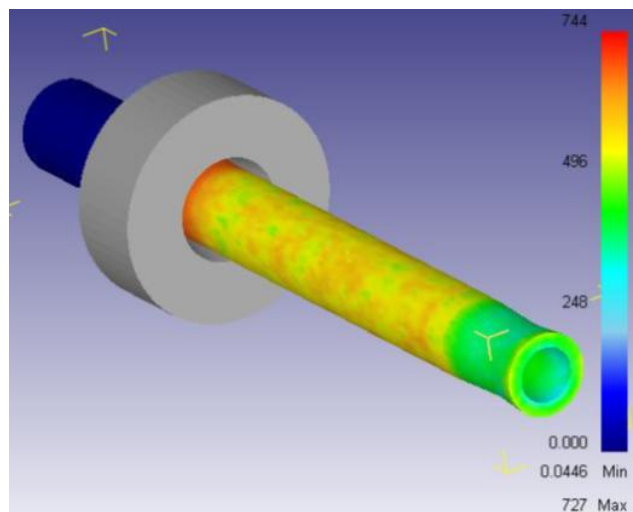
Pri použití uhla  $8^\circ$  dosahovalo maximálne ťahové napätie hodnotu  $\sigma_{imax} = 702$  MPa teda nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Pri použití uhla  $9^\circ$  dosahovalo maximálne ťahové napätie hodnotu  $\sigma_{imax} = 700$  MPa teda nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Pri použití uhla  $10^\circ$  dosahovalo maximálne ťahové napätie hodnotu  $\sigma_{imax} = 716$  MPa teda nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Pri použití uhla  $11^\circ$  dosahovalo maximálne ťahové napätie hodnotu  $\sigma_{imax} = 712$  MPa teda nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Pri použití uhla  $12^\circ$  dosahovalo maximálne ťahové napätie hodnotu  $\sigma_{imax} = 710$  MPa teda nižšiu hodnotu ako

dovolené napätie. Pri použití uhla  $13^\circ$  dosahovalo maximálne ťahové napätie hodnotu  $\sigma_{imax} = 714$  MPa teda nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Pri použití uhla  $14^\circ$  dosahovalo maximálne ťahové napätie hodnotu  $\sigma_{imax} = 721$  MPa, teda o niečo nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Pri použití uhla  $15^\circ$  dosahovalo maximálne ťahové napätie hodnotu  $\sigma_{imax} = 727$  MPa, ktorá sa blíži k dovolenej hodnote.



Obr. 10. Výsledok analýzy pri použití uhla  $7^\circ$

Na obr. 11 je znázornený výsledok analýzy pre uhol  $15^\circ$ .



Obr. 11. Výsledok analýzy pri použití uhla  $15^\circ$

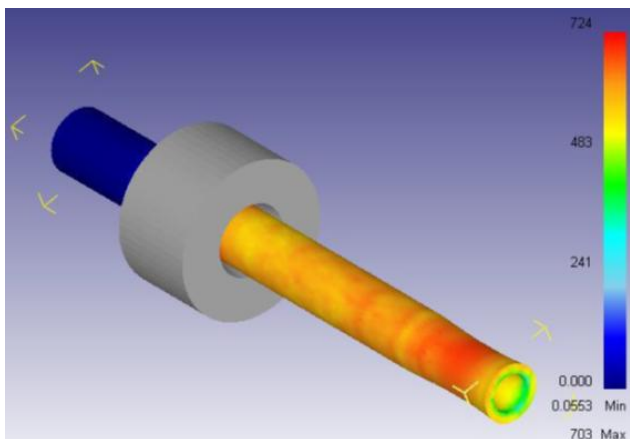
Na základe výsledkov simulácie ako najvýhodnejší uhol vyšiel uhol  $2\alpha = 7^\circ$ , kde boli zistené najmenšie maximálne hodnoty ťahového napätia za prievlakom s hodnotou 692 MPa v smere ťahania, preto sa tento uhol použil aj v následnej optimalizácii rýchlosti ťahania.

Predpokladalo sa, že zvyšovaním rýchlosti ťahania pri nezmenenom spôsobe mazania sa bude zvyšovať deformačný odpor materiálu a teda aj maximálne ťahové napätie v ťahanej rúre za prievlakom. Preto sa pomocou analýzy použitím softvéru *DEFORM 3D* zisťovalo, akou najväčšou rýchlosťou je možné ťahať rúru cez tento prievlak tak, aby maximálne ťahové napätie neprekročilo dovolenú hodnotu  $\sigma_{dov} = 735$  MPa.

Pri analýze sa použili ťažné rýchlosti  $v_f = 5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a  $9 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

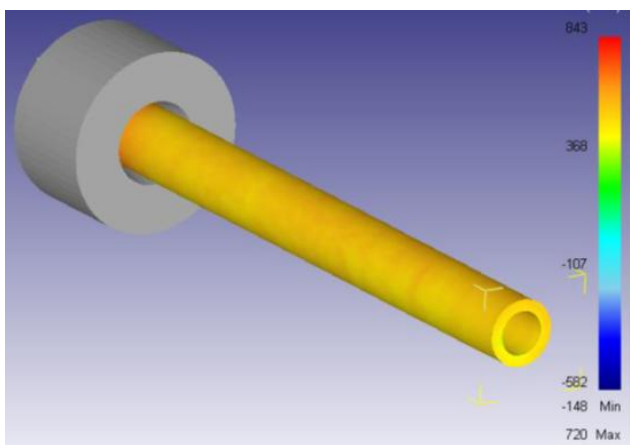
Pri použití ťažnej rýchlosti  $v_f = 5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  dosiahlo maximálne ťahové napätie v osi ťahania hodnotu  $\sigma_{tmax} = 692 \text{ MPa}$  (obr. 10).

Pri použití ťažnej rýchlosti  $v_f = 6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  dosiahlo maximálne ťahové napätie v osi ťahania hodnotu  $\sigma_{tmax} = 703 \text{ MPa}$ . Na obr. 12 sú znázornené výsledky analýzy s použitím ťažnej rýchlosti  $v_f = 6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .



Obr. 12. Výsledky analýzy pri použití ťažnej rýchlosti  $v_f = 6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Pri použití ťažnej rýchlosti  $v_f = 7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  má vzniknuté maximálne ťahové napätie za prievlakom v osi ťahania hodnotu  $\sigma_{tmax} = 720 \text{ MPa}$ . Na obr. 13 sú znázornené výsledky analýzy s použitím ťažnej rýchlosti  $v_f = 7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .



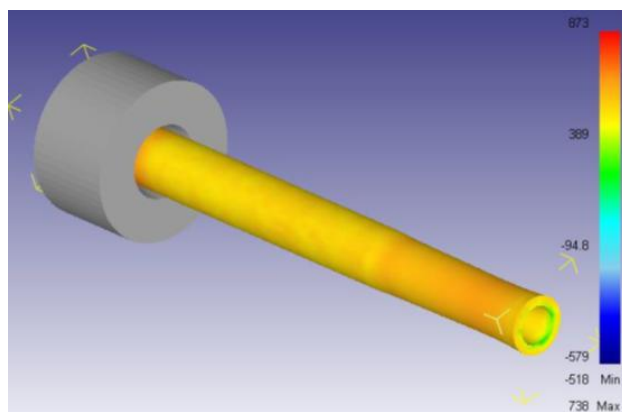
Obr. 13. Výsledky analýzy pri použití ťažnej rýchlosti  $v_f = 7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Pri použití ťažnej rýchlosti  $v_f = 8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  má vzniknuté maximálne ťahové napätie v osi ťahania hodnotu  $\sigma_{tmax} = 738 \text{ MPa}$  a teda došlo k miernemu prekročeniu dovoleného napätia, čo môže viesť k plastickej deformácii ťahanej rúry za prievlakom a teda k nežiadúcej zmene rozmeru ťahanej rúry. Na obr. 14 sú znázornené výsledky analýzy s použitím ťažnej rýchlosti  $v_f = 8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Napriek tomu bola realizovaná aj simulácia pri použití rýchlosti ťahania  $v_f = 9 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , aby sa potvrdil trend ďalšieho

zvýšenia maximálnej ťažnej sily v ťahanej rúre za prievlakom.

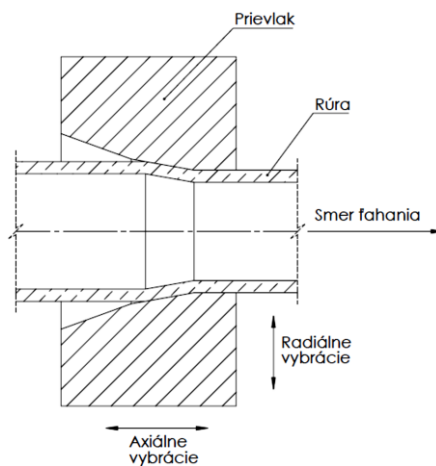
Pri použití ťažnej rýchlosti  $v_f = 9 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  malo vzniknuté maximálne ťahové napätie v osi ťahania hodnotu  $\sigma_{tmax} = 745 \text{ MPa}$ , čo potvrdilo trend nárastu napätia so zvyšovaním rýchlosti ťahania.

Z dôvodu aby nedochádzalo k nežiadúcej plastickej deformácii rúry za prievlakom musí platiť  $\sigma_{tmax} < \sigma_{dov}$ , preto z analýz vyplýva, že najvyššou ťažnou rýchlosťou pri prievlaku s uhlom zavádzacej časti  $2\alpha = 7^\circ$  môže byť  $v_f = 7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Toto zvýšenie rýchlosti ťahania zo 6 na  $7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  umožnilo zvýšenie produktivity pri výrobe daného typorozmeru rúry o 16,7 %.



Obr. 14. Výsledky analýzy pri použití ťažnej rýchlosti  $v_f = 8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

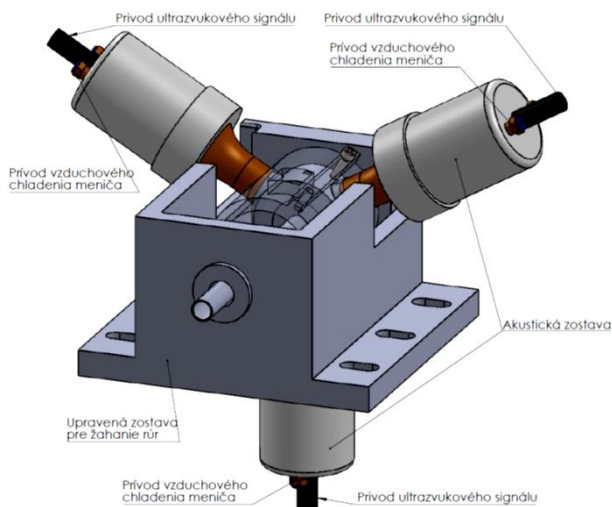
Pre ďalšie zvýšenie rýchlosti ťahania bola analyzovaná aj možnosť zníženia trenia medzi prievlakom a ťahanou rúrou na zníženie veľkosti ťahových napätí, a to aplikáciou ultrazvukovej energie na princípe skrátenie doby kontaktu medzi trúcimi sa plochami [4]. Ultrazvukové vibrácie sú aplikované na prievlak buď v axiálnom alebo radiálnom smere na smer ťahania (obr. 15). Použitím týchto ultrazvukových vibrácií dochádza k zlepšeniu mazacích podmienok a k zníženiu potrebnej sily na ťahanie. Potrebnými parametrami sú frekvencia vibrácií  $f = 20 \text{ kHz}$  a amplitúda  $a = 0,5 \mu\text{m}$  až  $10 \mu\text{m}$  [7].



Obr. 15. Ultrazvukové vibrácie aplikované na prievlak

Pre reálne využitie ultrazvuku pri ťahaní z literárnych zdrojov vyplýva, že je oveľa výhodnejšie použitie ultrazvukových vibrácií v radiálnom smere na zníženie ťažnej sily a v konečnom dôsledku na zvýšenie rýchlosti ťahania [7]. Vibrácie vytvárajú opakujúci sa cyklus zvyšovania a znižovania tlaku na rozhraní prievlaku a rúry, čo okrem zníženia ťažnej sily vedie aj k zvýšeniu kvality povrchu ťahanej rúry [4].

Na základe uvedených poznatkov bola pre ťahanie daného typorozmeru rúry navrhnutá aj zostava na ťahanie s využitím ultrazvukových vibrácií v radiálnom smere. Zostava bez generátora a rozdeľovača signálu je zobrazená na obr. 16.



Obr. 16. Zostava pre ultrazvukom podporované ťahanie rúr

## ZÁVER

Cieľom článku bolo riešenie úlohy zameranej na optimalizáciu priebehu procesu ťahania a možnosť zvýšenia rýchlosti ťahania za účelom zvýšenia produktivity výroby pre konkrétny typorozmer rúry v prevádzkových podmienkach s využitím počítačovej podpory.

Riešenie spočívalo v optimalizácii uhla ťažného kužeľa za účelom zníženia ťažnej sily a teda ťahového napätia v ťahanej rúre za prievlakom za účelom možnosti zvýšenia rýchlosti ťahania.

Na základe simulácie pomocou simulačného softvéru *DEFORM 3D* ako optimálny uhol ťažného kužeľa bol zistený uhol  $2\alpha = 7^\circ$ , ktorý bol následne použitý na optimalizáciu rýchlosti ťahania. Na základe analýzy sa zistilo, že pri ťahaní daného typorozmeru rúry je možné zvýšiť rýchlosť ťahania z pôvodne používanej rýchlosti  $6 \text{ m min}^{-1}$  na  $7 \text{ m min}^{-1}$  bez toho, aby došlo k prekročeniu dovoleného ťahového napätia v ťahanej rúre za prievlakom a teda k vzniku nežiadúcej plastickej deformácie za prievlakom a k ovplyvneniu presnosti vytiahnutej rúry. Zvýšenie rýchlosti ťahania zo  $6 \text{ m min}^{-1}$  na  $7 \text{ m min}^{-1}$  pri zavedení do prevádzky prinieslo zvýšenie produktivity práce o 16,7 %.

Ako ďalšia možnosť zvýšenia rýchlosti ťahania na základe zníženia ťažnej sily a teda zníženia ťahového napätia v ťahanej rúre za prievlakom bola sledovaná možnosť zníženia trenia, a to na základe aplikácie ultrazvuku v procese ťahania. Zistilo sa na základe vykonanej štúdie literárnych zdrojov, že aplikáciou ultrazvukových vibrácií v radiálnom smere je možné výrazne znížiť ťažnú silu a tiež zlepšiť aj kvalitu povrchu ťahanej rúry. Preto bola navrhnutá pre ťahanie daného typorozmeru rúry zostava na ťahanie s využitím ultrazvukových vibrácií v radiálnom smere. Toto riešenie si však vyžaduje vyššie investičné náklady oproti riešeniu s úpravou geometrie prievlaku.

## Pod'akovanie

Článok vznikol s podporou grantovej úlohy KEGA 026STU-4/2023.

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-18-0418.

## LITERATÚRA

- [1] PALENGAT, M. - CHAGNON, G. - FAVIER, D. - LOUCHE, H. - LINARDON, C. - PLAIDEAU, C. (2013): *Cold drawing of 316L stainless steel thin-walled tubes: Experiments and finite element analysis*. In: International Journal of Mechanical Sciences, Elsevier, Vol. 70, pp. 69-78.
- [2] NEVES, F.O. - BUTTON, S.T. - CAMINAGA, C. - GENTILE, F.C. (2005): *Numerical and experimental analysis of tube drawing with fixed plug*. In: Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. Federal University of Sao Joao del Rei, J Vol. 27, (4).
- [3] *How to Reduce Friction between Surfaces* [online]. [cit. 2015-2-3] Dostupné na internete: <http://www.machinerylubrication.com/Read/29181/reduce-friction-surfaces>.
- [4] MAROPIS, N. (2011): *Using ultrasonic energy for drawing tube* [online]. [cit. 2015-22-3] Dostupné na internete: <http://www.thefabricator.com/article/tubepipefabrication/using-ultrasonic-energy-for-drawing-tube>.
- [5] HERDA, M. (2015): *Návrh zlepšenia procesu ťahania švových zvarovaných rúr z austenitických ocelí s počítačovou podporou*. Trnava: Diplomová práca.
- [6] SCHREK, A. (2005): *Ťahanie rúrok hraničných rozmerov z austenitických ocelí*. Bratislava: Sjf STU.
- [7] HAYASHI, M. - JIN, M. - THIPPRAKMAS, S. - MURAKAWA, M. - HUNG, J. - TSAI, Y. - HUNG, CH. (2003): *Simulation of ultrasonic-vibration drawing using the finite element method (FEM)*. In: Journal of Materials Processing Technology, Vol. 140, No. 1-3, pp. 30-35.

---

# Motorové jednotky nezávislej trakcie s jednonápravovým podvozkom

---

## Martin Bučko, Ing.\*

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: martin.bucko@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2557

## Ján Dižo, doc. Ing., PhD.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2560

## Miroslav Blatnický, doc. Ing., PhD.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: miroslav.blatnicky@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2659

## Alyona Lovska, prof. Ing., Dr.Sc. Tech.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.  
E-mail: alyona.lovska@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2660

## Independent traction multiple units with a single-axle bogie

**Abstract:** The article analyses the current state of the motor wagons and units with implemented single-axle bogies, operated on local lines as well as abroad. The technical parameters of individual rolling stock were compared. The main goal of the article is to present an overview of independent traction multiple units, which are equipped with a single-axle bogie. There are described rail vehicles used on only in the *Slovak Republic*, but also in the *Europe*. As the use of this type of rail vehicle is on the decline, this overview reflects the current state in this field of rail vehicle design, at which, information is complemented with corresponding illustrations.

**Keywords:** motor unit, single-axle bogie, technical data

---

## ÚVOD

Motorové vozne sú veľmi rozšírené v oblasti osobnej železničnej dopravy. Tieto koľajové vozidlá zohrávajú kľúčovú úlohu prevažne na lokálnych tratiach, ktorých elektrifikácia nebola možná, respektíve neefektívna s veľmi nízkou návratnosťou. Ich nízka hmotnosť umožňuje aplikáciu jednonápravových podvozkov, ktoré majú nízke priestorové nároky na montáž. Jednonápravové podvozky svojimi malými rozmermi taktiež umožňujú mať veľký podiel nízkopodlažnej časti, čo uľahčí vystupovanie a nastupovanie. Cieľom článku je poskytnúť prehľad o motorových vozňoch prevádzkovaných na regionálnych neelektrifikovaných tratiach s nezávislou trakciou a

jednonápravovými podvozками. Analyzujú sa ich technické parametre, s cieľom lepšieho porozumenia ich potenciálu a prínosu pre súčasnú železničnú osobnú prepravu.

## 1 ANALÝZA AKTUÁLNEHO STAVU MOTOROVÝCH VOZŇOV

Motorové koľajové vozidlá určené na prepravu osôb sa dajú rozdeliť do dvoch hlavných skupín. Prvá skupinu tvoria ľahké dvojnápravové vozidlá, ktoré sú vhodné pre lokálne trate. Druhá skupina zahŕňa ťažšie štvornápravové vozidlá, ktoré sa bežne používajú na hlavných tratiach alebo dôležitých regionálnych trasách.

Motorové vozne sú samostatné jednotky vybavené vlastným zdrojom ťažnej sily, zvyčajne spaľovacím motorom na tekuté alebo plyné palivo, vďaka čomu nevyžadujú napájanie z trakčného vedenia, teda jedná sa o koľajové vozidlá nezávislej trakcie. Ich hlavné využitie je na regionálnych tratiach s nižšou maximálnou rýchlosťou, oblúkmi s malým polomerom, nižším počtom cestujúcich počas celého dňa a frekventovanými zastávkami. Na prímestských tratiach sa očakáva vyšší počet cestujúcich v porovnaní s bežnými regionálnymi traťami.

Motorové vozne by mali byť ľahké, s plynulým rozbehom a dobrými trakčnými vlastnosťami. Ďalšou z hlavných požiadaviek je flexibilita, aby bola zabezpečená možnosť prevádzky ako v hustejšie osídlených prímestských oblastiach, tak aj na menej zaťažených regionálnych tratiach alebo krátkych linkách.

Dôležitým aspektom je aj čiastočne nízkopodlažný dizajn, ktorý uľahčuje nástup osobám s obmedzenou mobilitou a skracuje dobu nástupu a výstupu, čím sa znižuje doba státia vozidla na zastávkach. Z hľadiska prevádzky sa kladie dôraz na ekonomickú a ekologickú efektívnosť. Pohon by mal zabezpečovať spaľovací motor s približným výkonom 200 kW, ktorý by mal byť umiestnený buď na streche, alebo vo vysokopodlažnej časti spolu s ďalšími komponentmi. Vzhľadom na časté zastavovanie by mali byť poháňané obe nápravy, čo zabezpečuje plynulú trakciu. Ekologické alternatívy, napríklad hybridné alebo alternatívne pohony, môžu pozitívne ovplyvniť prevádzkové náklady a znížiť uhlíkovú stopu a tým minimalizovať negatívne dopady na životné prostredie na minimum.

### 1.1 Jednotka DB - 670

Tento dvojposchodový motorový vozeň bol vyrobený nemeckou spoločnosťou *Deutsche Waggonbau AG* v roku 1996 v počte siedmich kusov. Prvý prototyp bol verejnosti predstavený na jeseň 1994 a oficiálne vystavený na veľtrhu *Innotrans* v októbri 1996. Na rozdiel od ostatných šiestich vozňov vyrobených v sériovej výrobe prototyp nikdy nedostal licenciu na prepravu cestujúcich.

Vozeň má obojstranný dizajn s dvojkřídlovými, posuvnými dverami širokými 1300 mm, umiestnenými v strede každej strany. Vonkajšia časť je pokrytá lepenými pozinkovanými plechmi, zatiaľ čo koncové časti sú vyrobené zo sklolaminátu. Nevýhodou tohto modelu je, že ho nie je možné spájať s inými koľajovými vozidlami, čo znižuje celkovú kapacitu pre cestujúcich. Na druhé poschodie vedie úzke špirálové schodisko, ktoré je pomerne nepraktické.

Medzi ďalšie nevýhody patria prehrievajúce sa spaľovacie motory, slabý výkon klimatizácie a

absencia toalety. V začiatkoch vývoja legislatíva povoľovala prevádzku tohto vozidla len na tratiach úplne oddelených od štandardnej železničnej siete. Ďalší vývoj sa zastavil kvôli vysokej poruchovosti, predovšetkým prehrievaniu ložiskových skriň, čo viedlo k nízkemu záujmu a slabému predaju.



Obr. 1. Dvojposchodový motorový vozeň DB - 670 [1]

Tab. 1. Technické parametre motorového vozňa DB - 670 [2]

Technické parametre motorového vozňa DB - 670	
Dĺžka	16332 mm
Šírka	3070 mm
Výška	4630 mm
Počet miest na sedenie	78
Počet miest na státie	32
Vlastná hmotnosť	34,25 t
Maximálna rýchlosť	100 km·h <sup>-1</sup>
Nástupná výška	600 mm
Usporiadanie náprav	1' A'
Výkon motora	250 kW

### 1.2 Jednotka DWA LVT/S

Tento čiastočne nízkopodlažný dieselový motorový vozeň, známy pod prezývkou „sivá myš“ pre svoje šedé farebné prevedenie, bol vyvinutý na prevádzku na menej frekventovaných prímestských a regionálnych tratiach. V roku 1996 spoločnosť *Deutsche Waggonbau* navrhla poschodový motorový vozeň DB radu 670, ktorý však nezožal veľký úspech. Ako alternatívu preto vyvinuli jednoposchodový motorový vozeň LVT/S, navrhnutý pre vyššiu odolnosť a pohodlie cestujúcich. Táto alternatíva k poschodovej jednotke sa vyrábala do roku 1999 s celkovým počtom 24 kusov. Rovnako ako model DB 670 je aj toto vozidlo vybavené usporiadaním náprav 1' A' a poháňa ho dieselový motor *VOLVO* s výkonom 265 kW, ktorý cez prevodovku *Renk Doromat* prenáša výkon na dvojkolesie. Jednou z jeho výhod je univerzálnosť využitia - možnosť spojenia až štyroch vozidiel, jazdy s brzdenými prípojnými osobnými

voznami, ako aj pripojenie nákladných vozňov. V strednej časti má nízku podlahu a na oboch stranách dvojkrídlové predsvuné dvere. Podvozok je identický s modelom *DB 670*.



Obr. 2. Motorový vozeň *DWA LVT/S* [3]

Tab. 2. Technické parametre motorového vozňa *DWA LVT/S* [3]

Technické parametre motorového vozňa <i>DWA LVT/S</i>	
Dĺžka	16540 mm
Šírka	2930 mm
Výška	3500 mm
Počet miest na sedenie	59
Počet miest na státie	40
Vlastná hmotnosť	25,2 t
Maximálna rýchlosť	100 km·h <sup>-1</sup>
Nástupná výška	600 mm
Výkon motora	256 kW
Usporiadanie náprav	1' A'
Výrobca motora	<i>VOLVO</i>

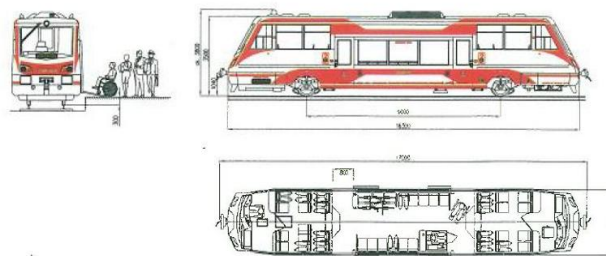
### 1.3 Jednotka *ZNTK RegioTramp*

Tento motorový vozeň, určený predovšetkým pre menej vyťažené neelektrifikované regionálne trate, bol vyrábaný v *Polsku* a ponúkaný v troch verziách: *213 M*, *215 M* a *216 M*. Ide o moderné, ľahké čiastočne nízkopodlažné dieselové vozidlo s rozchodom 1435 mm alebo 1520 mm. Vďaka modulárnej konštrukcii bolo možné vyrobiť aj trojčlánkovú verziu *216 M*, avšak pre túto verziu sa nenašli záujemcovia, a tak zostala iba ako koncept. Zaujímavým prvkom je možnosť vybaviť vozeň mechanizmom pre plynulú zmenu rozchodu kolies.

Nízka podlahu sa nachádza v strednej časti vozidla, pričom koncové časti majú vyššiu podlahu, oddelenú tromi schodmi. Najmenšia verzia *213 M*, súčasť radu *RegioTramp*, má dvojicu jednonápravových podvozkov, z ktorých jeden je hnací. Primárne vypruženie zabezpečujú gumové bloky typu *MEGI*, zatiaľ čo sekundárne vypruženie tvoria vzduchové mechy. Podvozky sú vybavené kotúčovými brzdami.

Vozeň má na každej strane dvojicu jednokrídlových dverí so šírkou 800 mm. Jednotka je vybavená automatickým spriahadlom *Scharfenberg*, umožňujúcim riadenie dvoch motorových vozňov z jedného riadiaceho stanovišťa. Pohonná jednotka *MAN* s výkonom 257 kW je umiestnená pod vysokou podlahou. Prvý vyrobený kus verzie *213 M* nebol vybavený toaletou.

Vo verzii *215 M* sú inštalované dvojkrídlové dvere s rozmerom 1300 mm a nízkopodlažná časť zahŕňa toaletu a priestor pre bicykle. Niektoré vozne majú väčšiu toaletu na úkor sedadiel. V roku 2009 prebehla modernizácia verzie *213 M* v spoločnosti *PESA* v *Polsku*, kde bola do všetkých vozňov pridaná klimatizácia a do prvého kusu inštalovaná toaleta. Dňa 13. augusta 2013 sa začala modernizácia verzie *215 M*, pri ktorej sa zaviedol kamerový systém snímajúci predný pohľad, vylepšený informačný systém pre cestujúcich a ďalšie úpravy, tiež realizované spoločnosťou *PESA*. V júli 2019 pokračovala modernizácia vozňov *213 M* a *215 M*, zahŕňajúca výmenu sedadiel, inštaláciu automatov na lístky, systém na počítanie cestujúcich, *Wi-Fi* a *USB* zásuvky na nabíjanie mobilných zariadení.



Obr. 3. Pohľad na motorový vozeň *RegioTramp* [4]

Tab. 3. Technické parametre motorového vozňa od výrobcu *ZNTK Poznań* [5]

Technické parametre motorového vozňa <i>RegioTramp</i>	
Dĺžka	17720 mm
Šírka	2900 mm
Výška	3800 mm
Výška nízkej podlahy nad koľajnicami	600 mm
Výška vysokej podlahy nad koľajnicami	1240 mm
Maximálna rýchlosť	110 km·h <sup>-1</sup>
Počet miest na sedenie	38
Celkový počet miest	90

### 1.4 Jednotka *Jenbacher Integral*

Táto päťčlánková jednotka pozostáva z jednonápravových podvozkov, z ktorých tri sú hnacie a ďalšie tri bežné. Koncept vozidla je neštandardná - koncové články sú trakčné s vysokou podlahou. Zaujímavosťou je, že jeden koncový článok má dva

trakčné jednonápravové podvozky, zatiaľ čo druhý má jeden trakčný a jeden bežný jednonápravový podvozok. Stredný článok má tiež vysokú podlahu, ale nie je osadený trakčnými podvozkami. Medzi stredným a koncovými článkami sa nachádzajú nízkopodlažné články, ktoré sú zavesené a umožňujú bezbariérový nástup pre osoby so zníženou pohyblivosťou či s kočíkmi. Druhý a štvrtý článok sú vybavené dvojicou dvojkridlových dverí na každej strane, čím vzniká nástupný priestor o šírke 1300 mm.



Obr. 4. Motorová jednotka *Integral* [6]

Tab. 4. Základné technické parametre motorovej jednotky *Integral* [6]

Technické parametre motorovej jednotky <i>Jenbacher Integral</i>	
Usporiadanie náprav	A'A'TT'T'A'
Dĺžka	53430 mm
Šírka	2950 mm
Výška	4330 mm
Hmotnosť prázdneho vozidla	83 t (+2/-2 t)
Hmotnosť pri plnom zaťažení (4 os/m <sup>2</sup> )	cca 113 t
Maximálna rýchlosť	160 km·h <sup>-1</sup>
Celková kapacita cestujúcich	364
Počet miest na sedenie	164
Počet miest na státie	200
Výška nízkej časti nad koľajnicami	780 mm
Výška strednej časti nad koľajnicami	1150 mm
Motor	MAN D2876 LUH
Kapacita palivovej nádrže	1700 l

Táto motorová jednotka je vybavená tromi rovnakými dieselovými motormi s výkonom 315 kW, pričom prenos výkonu sa realizuje cez turbo-prevodovku, kardanový hriadel a nápravovú prevodovku ku každej hnacej náprave. Primárne vypruženie je riešené gumovými blokmi, zatiaľ čo sekundárne vypruženie tvoria vzduchové mechy. Hydraulický riadiaci valec

zabezpečuje natáčanie dvojkolesia do radiálnej polohy pri prejazde zákrutami.

V prevádzke bolo medzi rokmi 1998 a 2020 spolu 17 súprav tejto jednotky, ktorú využívala spoločnosť *Bayerische Oberlandbahn* na regionálnych tratiach medzi *Bayrischzellom*, *Lenggries*, *Mníchovom* a *Tegernsee*. Prevádzka však bola poznačená častými vážnymi poruchami, ktoré tejto jednotke priniesli povest' veľmi nespoľahlivého vozidla.

### 1.5 Jednotka Alstom Coradia Lirex

Názov *Lirex* je skratka pre „*ľahký inovatívny regionálny expres*“ vyvinutý francúzskou spoločnosťou *Alstom*. Vďaka modulárnej konštrukcii bolo možné vyrábať plne nízkopodlažné viacčlánkové jednotky s diesel-elektrickým, elektrickým alebo hybridným pohonom. Pri hybridnom pohone, teda v elektrickej verzii s batériami, boli použité batérie s kapacitou 12 kWh. Zaujímavé je, že *Lirex* sa stal prvým plne nízkopodlažným motorovým vlakom vďaka umiestneniu pohonnej jednotky na strechu vozidla.



Obr. 5. *Alstom Coradia Lirex* poháňaná spaľovacím motorom [7]

Tab. 5. Technické parametre motorovej jednotky *Coradia Lirex* [8]

Technické parametre motorovej jednotky <i>Coradia Lirex</i>	
Usporiadanie náprav	A'T'A'A'+A'A'T'A'
Dĺžka	68490 mm
Šírka	3042 mm
Výška	4500 mm
Hmotnosť	160 t
Maximálna rýchlosť	160 km·h <sup>-1</sup>
Počet miest na sedenie	230 až 300 (podľa konfigurácie)

Jednotka môže byť aj šesťčlánkovou elektrickou verziou s ôsmimi jednonápravovými podvozkami, z ktorých šesť je trakčných. Väčšina vybavenia vozidla je umiestnená na streche, čo umožňuje nízku podlahu po celej dĺžke. Pohon zabezpečuje šesť vodou

chladených inverterových trojfázových asynchrónnych motorov s dvojestupňovými prevodovkami, pričom trakčné motory a prevodovky sú priamo na jednonápravových podvozkoch. *Lirex* vyniká aj atraktívnym dizajnom, najmä na stredných a koncových článkoch. Vypruženie je dvojestupňové - primárne vo forme vinutých pružín a sekundárne vzduchové.

Prvý prototyp bol vyrobený v roku 2000; v súčasnosti už nie je v prevádzke, ale je vystavený ako muzeálny exponát v sídle spoločnosti *Alstom* v *Salzgitter-Watenstedte*.

### 1.6 Jednotka British rail cars 140 - 144 - Pacer

V 80. rokoch čelila *Británia* vážnemu nedostatku koľajových vozidiel, preto sa rozhodlo vyvinúť ľahké vozidlá s maximálnym využitím autobusových komponentov. Použitím upravenej ľahkej karosérie autobusu, kde bolo potrebné zosilniť len prednú časť pre splnenie bezpečnostných noriem, sa podarilo výrazne znížiť náklady na výrobu a prevádzku. Tieto vozidlá sa spočiatku používali na severovýchode *Anglicka*, neskôr však boli presunuté do juhozápadného *Anglicka* a do ďalších oblastí, vrátane *Walesu*.



Obr. 6. Motorový jednotka *Pacer* 143 [9]

Tab. 6. Technické parametre motorovej jednotky *Pacer* 143 [10]

Technické parametre motorovej jednotky <i>Pacer</i> 143	
Dĺžka	15 546 mm
Šírka	2 695 mm
Výška	3 515 mm
Hmotnosť prázdnej súpravy	27 t
Maximálna rýchlosť	120 km/h
Usporiadanie pojazdu	1' A'
Výkon motora	149 kW

Prvý a jediný kus série 140 bol vyrobený v roku 1979. Nasledovala séria 141 s 20 kusmi, pričom prvá jednotka bola vyrobená v roku 1984. Modernizácia série 141 prebehla v rokoch 1988 a 1989. Séria 142, najrozšírenejšia jednotka, sa začala vyrábať v roku 1985 a celkovo vzniklo 96 kusov. Modernizácie tejto

série prebehli v rokoch 1997 až 2003 a 2008 až 2017. Séria 143 bola zavedená v roku 1985 s 25 kusmi a modernizácie sa uskutočnili v rokoch 2001 až 2002 a opäť v rokoch 2015 až 2016. Poslednou sériou bola 144, ktorá sa začala vyrábať od roku 1986; vzniklo 10 trojčlánkových a 13 dvojčlánkových jednotiek, pričom modernizácia prebehla v rokoch 2002 až 2004 a znova v roku 2010.

Aj keď vozidlá *Pacer* mali životnosť plánovanú na 20 rokov, niektoré zostali v prevádzke dlhšie. Kvôli nesúladu s predpismi o prístupnosti železničných vozidiel z roku 2008 sa koncom roka 2010 začalo postupné vyradovanie týchto vozidiel z prevádzky. Niektoré prevádzkovatelia dostali výnimku až do 31. decembra 2020. Spoločnosť *Great Western Railway* vyradila svoj vozový park série 143 v decembri 2020, zatiaľ čo spoločnosť *Transport for Wales* získala predĺženie a prevádzkovala vozidlá do 29. mája 2021. Tieto jednotky sa vyrábali ako dvojčlánkové s výkonom 310 ÷ 340 kW a trojčlánkové s výkonom 510 kW. Kapacita sedadiel pre cestujúcich sa pohybovala v rozmedzí 106 ÷ 195 miest na jednotku.

### 1.7 Motorový vozeň 810

Tieto motorové vozne, určené na prevádzku na neelektrifikovaných železničných tratiach, boli vyrábané v rokoch 1974 až 1984 v národnom podniku *Vagonka Studénka*. Svojou nezávislou trakciou umožňovali dopravu na regionálnych tratiach, kde elektrifikácia buď chýbala alebo bola obmedzená. Cieľom bolo nahradiť staršie vozne typu 801. Pôvodne sa plánoval motorový vozeň s dvoma poháňanými nápravami a silnejším motorom s dôrazom na vyššie pohodlie pre cestujúcich, no pre úsporu nákladov a využitie komponentov z automobilového priemyslu bola vytvorená ďalšia generácia tzv. koľajového autobusu s kapacitou 55 miest na sedenie a 40 na státie.

Hlavným účelom týchto motorových vozňov bola doprava medzi menšími obcami a mestami a väčšími mestskými centrami, kde bola doprava cestnými vozidlami komplikovanejšia. *České dráhy* a *Železničná spoločnosť Slovensko* získali celkovo 600 týchto vozňov a prípojných vozňov, ďalších 100 bolo dodaných do *Maďarska*. Po čase boli vozne modernizované - spoločnosť *ŽOS Zvolen* vyvinula verziu radu 813, zatiaľ čo firma *Pars Šumperk* modernizovala vozne na jednotku *Regionova* radu 814. Tieto jednotky sa líšia v detailoch, napríklad *Regionova* používa spaľovací motor *Tedom*, zatiaľ čo jednotka 813 je vybavená motorom *MAN*.

Pôvodná jednotka radu 810 mala motor *Škoda ML 634* s výkonom 155 kW umiestnený pod podlahou. Rozdiely sú aj v podvozkoch, ktoré sa líšia podľa typu prevodovky. Najvýraznejší rozdiel je však v konštrukcii vozidla - *Regionova* má oproti jednotke

ŽOS Zvolen čiastočne nízku podlahu. Tieto vozne jazdia na jednonápravových podvozkoch s vinutými pružinami pre primárne vypruženie a zvislými záveskami pre sekundárne vypruženie, čo umožňuje mierne natáčanie podvozkov v zákrutách. Tieto jednotky sa vyznačujú spoľahlivosťou, nízkymi prevádzkovými nákladmi a efektívnosťou.



Obr. 7. Motorový vozeň radu 810 [11]

Tab. 7. Základné technické údaje motorového vozňa radu 810 [12]

Technické parametre motorového vozňa 810	
Dĺžka	13 970 mm
Šírka	3 120 mm
Výška	3 509 mm
Hmotnosť prázdnej súpravy	20 t
Maximálna rýchlosť	80 km·h <sup>-1</sup>
Usporiadanie pojazdu	1' A'
Výkon motora	155 kW

## ZÁVER

Po analýze aktuálneho stavu v oblasti motorových vozňov a jednotiek, ktorých výhodou je prevádzka na neelektrifikovaných lokálnych tratiach s veľkým počtom oblúkov s malým polomerom, a ktoré sú prevádzkované v našich zemepisných šírkach, sa zistilo, že vozový park motorových vozňov a motorových jednotiek je pomerne zastaralý. Napriek modernizáciám sa komfort týchto koľajových vozidiel určených pre osobnú železničnú dopravu veľmi nezvýšil a v súčasnosti už nie sú schopné spĺňať najnovšie požiadavky, ktoré sú kľúčové pri cestovaní vlakom. Je nutné prehodnotiť nasledovné kroky pri modernizácii a zlepšovaní tohto druhu koľajových vozidiel, nakoľko sú často nahradené motorovými jednotkami s dvojnápravovými podvozkami.

## Pod'akovanie

„Táto práca vznikla vďaka podpore projektu KEGA 031ŽU-4/2023: Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného programu Vozidlá a motory.“

„Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I03-03-V01-00131.“

## LITERATÚRA

- [1] BUČKO, M. (2024): *Štúdia motorového vozňa pre regionálnu prevádzku s jednonápravovými podvozkami*. ŽU v Žiline, SjF, KDMT, č.: 2823092024003, 83 s.
- [2] KALINČÁK, D. (2008): *Koľajové vozidlá I*. 1. vyd. - Žilina: Žilinská univerzita, 292 s., ISBN 978-80-8070-864-1.
- [3] HELLER, P. (2017): *Kolejová vozidla I*. Západočeská univerzita v Plzni, 186 s., ISBN 978-8026-1069-37.
- [4] HELLER, P. (2019): *Kolejová vozidla II*. Západočeská univerzita v Plzni, 381 s., ISBN 978-8026-1077-36.
- [5] WIKIPEDIA (2024): Dostupné na: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Doppelstock-Schienenbus\\_der\\_Baureihe\\_670.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Doppelstock-Schienenbus_der_Baureihe_670.jpg)
- [6] WIKIPEDIA (2024): DB-Baureihe 670. Online. Dostupné na: DB-Baureihe 670 – Wikipedia
- [7] WIKIPEDIA (2024): Dostupné na: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prignitzer-eisenbahn\\_bombardier\\_lvt-s.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prignitzer-eisenbahn_bombardier_lvt-s.jpg)
- [8] TRANSINFO.PL (2024): Dostupné na: <https://transinfo.pl/inforail/w-przetargu-na-1510-ezt-ow-dla-kolei-mazowieckich-tez-jedna-oferta-ponad-budzetem/>
- [9] WIKIPEDIA.PL (2024): Dostupné na: [https://pl.wikipedia.org/wiki/ZNTK\\_Pozna%C5%84\\_Regio\\_Tramp](https://pl.wikipedia.org/wiki/ZNTK_Pozna%C5%84_Regio_Tramp)
- [10] BAYERISCHE OBERLANDBAHN GMBH (2024): Dostupné na: [https://www.smorgensindevroegte.nl/2013/treinen/fo-lder\\_integral.pdf](https://www.smorgensindevroegte.nl/2013/treinen/fo-lder_integral.pdf)
- [11] BAHNBILDER.DE (2024): Dostupné na: <https://www.bahnbilder.de/bild/deutschland~dieseltriebwagen--95-80--br-0-618-lirex/1131273/ausstellung-im-fzt-minden-am-892001vt.html>
- [12] WIKIPEDIA.DE (2024): Dostupné na: [https://de.wikipedia.org/wiki/Alstom\\_Coradia\\_LIRE\\_X](https://de.wikipedia.org/wiki/Alstom_Coradia_LIRE_X)
- [13] HATTONS.CO.UK (2024): Dostupné na: [https://www.hattons.co.uk/directory/vehicledetails/1511900/class\\_143\\_pacer](https://www.hattons.co.uk/directory/vehicledetails/1511900/class_143_pacer)
- [14] Wikipedia (2024): Dostupné na: [https://en.wikipedia.org/wiki/British\\_Rail\\_Class\\_143](https://en.wikipedia.org/wiki/British_Rail_Class_143)
- [15] DOCPLAYER.CZ (2024): Dostupné na: <https://docplayer.cz/7090574-Motorovy-vuz-rady-810-zachrance-nasich-lokalek.html>
- [16] ATLAS LOKOMOTIV (2024): Dostupné na: <https://www.atlaslokomotiv.net/loko-810.html#udaje>.

---

# Návrh unikátneho jednéhoúčelového zariadenia pre skúšky tečenia

---

## Lenka Jakubovičová, Ing., PhD.\*

Katedra aplikovanej mechaniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: lenka.jakubovicova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2984

## Ondrej Piroh, Ing.

Katedra aplikovanej mechaniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: ondrej.piroh@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2965

## Milan Vaško, doc. Ing., PhD.

Katedra aplikovanej mechaniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: milan.vasko@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2950

## Milan Sága, prof. Dr. Ing.

Katedra aplikovanej mechaniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: milan.saga@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2500

## The unique CREEP testing machine

**Abstract:** To study the viscoelastic behaviour of polymers, creep test is the most accurate experimental method. This paper presents the engineering design and strength analysis of a special purpose disposable device for performing creep tests of commonly commercially available composite materials, specifically materials fabricated through 3D printing. The device, made of *Bosch-Rexroth* aluminium profiles, offers flexibility and easy modification to meet different requirements for testing diverse material types. *Finite element analysis (FEM)* is performed to verify the strength and safety of the device under different load levels. Prior to the actual creep test, a tensile test is performed to obtain material properties such as ultimate strength and maximum elongation. The values obtained are a stepping stone to determine the creep conditions. The results of the finite-element analysis demonstrated the reliability of the equipment for performing the required creep tests and confirmed its suitability for use to perform tests on selected composite materials. The proposed device is also dimensioned for stronger materials in terms of strength, which can be addressed in future studies. The significance of this work lies in providing a cost-effective and customizable solution for creep testing of composite material with wider applications in engineering.

**Keywords:** electric traction, transmission, traction force.

---

## ÚVOD

Pre inžiniersku prax majú mechanické charakteristiky stanovené pri zaťažení ťahom, tlakom, ohybom alebo krutom len obmedzený význam. Existuje celé množstvo aplikácií, kde hlavne polyméry sú vystavované časovo dlhšiemu namáhaniu. Ako uvádzajú rôzni autori [1-3], polyméry vo všeobecnosti reagujú na mechanické namáhanie vždy s určitým časovým oneskorením. Preto pri krátkodobom

namáhaní vykazujú vyššiu pevnosť, modul pružnosti a menšiu ťažnosť, než pri dlhodobom namáhaní. V praxi sa vyžaduje doba životnosti pre kompozitné diely niekoľko rokov, preto je dôležité pri konštrukčných prevedeniach poznať a vychádzať z mechanických charakteristík pri dlhodobom namáhaní. Pre tieto účely slúžia krivky tečenia a isochrónne krivky [4-6].

Skúšky tečenia sa vykonávajú na rôznych typoch za-

riadení, či už komerčne vyrábaných, alebo svojpomocne zostrojených [7-10]. Merať tečenie materiálov, teda ich dlhodobú deformáciu pod konštantným zaťažením, je mimoriadne dôležité v mnohých priemyselných odvetviach, kde materiály musia odolávať dlhodobým mechanickým namáhaniam. Znalosť tohto javu je kľúčová pre správny návrh a použitie materiálov, najmä tých, ktoré sa využívajú v leteectve, automobilovom priemysle, či v stavebníctve. V súčasnej dobe, keď sú kompozitné materiály čoraz častejšie využívané v týchto oblastiach, je presné hodnotenie ich vlastností tečenia nevyhnutné pre zabezpečenie dlhodobej spoľahlivosti a bezpečnosti.

Pred tímom výskumných pracovníkov vznikla náročná úloha, ako vyvinúť unikátne jednoúčelové zariadenie, ktoré by umožnilo vykonávanie skúšok tečenia pre rôzne typy kompozitných materiálov. Hlavným cieľom je vytvoriť zariadenie, ktoré je funkčné, ale aj prispôsobiteľné rôznym požiadavkám na testovanie, čím by sa zabezpečila jeho široká použiteľnosť v rôznych výskumných aktivitách. Po dôkladnej analýze rôznych materiálových a konštrukčných možností uvažujúc aj zvaranú kovovú nevariabilnú konštrukciu sa autori rozhodli použiť hliníkové profily značky Bosch-Rexroth, ktoré ponúkajú jedinečnú kombináciu ľahkosti, pevnosti a flexibility [11, 12]. Rýchla predstaviteľnosť a nízka hmotnosť predurčuje hliníkové profily na bezpečné využitie nielen v strojárstve, ale aj v iných odvetviach ako napríklad v zdravotníctve a pre čisté priestory, kde sa vyžaduje sterilné prostredie. Táto voľba umožňuje rýchlu predstaviteľnosť zariadenia podľa aktuálnych potrieb testovania rôznych kompozitných materiálov a pri rôznych testovacích zaťaženiach.

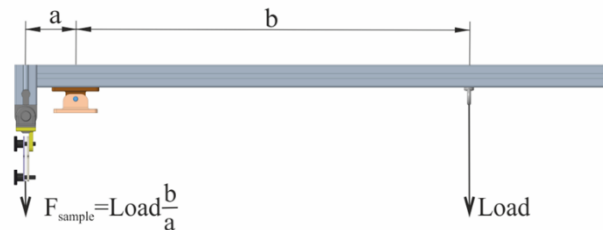
Metódou konečných prvkov (FEM) s využitím softvéru ANSYS Workbench zistíme stav napätosti v konštrukcii a overíme bezpečnosť navrhnutého zariadenia pre stanovenú úroveň zaťaženia. Navrhnuté zariadenie by malo slúžiť na vykonávanie skúšok tečenia kompozitných materiálov. Na dosiahnutie požadovaných podmienok realizovania testov tečenia najprv vykonáme sériu skúšok ťahom kompozitných štruktúr, za účelom určenia základných materiálových vlastností testovaných vzoriek a to hlavne medzi pevnosti, maximálnu silu a maximálne predĺženie. Tieto hodnoty sú kľúčové pre správne nastavenie parametrov skúšok tečenia, ktoré sú následne realizované na tomto zariadení.

## 1 METODIKA

Výskum tečenia materiálov zameriavame na komerčne dostupné polyméry filamentov ako je polyethylene terephthalate glycol (PETG), polylactic acid (PLA), acrylonitrile styrene Acrylate (ASA) a SILK, ktorý tvorí mix PLA a PETG. Na pochopenie

mechanizmu porušenia materiálu a mechanických vlastností (tuhosť a pevnosť) aditívne vyrábaných polymérov uskutočňujeme ťahové skúšky použitím elektromechanického testovacieho zariadenia M500-100CT, výrobné číslo 500-11209, rozsah nerania 0 N ÷ 100 kN, výrobca LABORMACHINE.

Najvhodnejšou metódou vykonávania testu tečenia materiálu je jednoduché použitie konštantnej axiálnej sily pôsobiacej na skúmanú vzorku. Princíp páky umožňuje udržiavať konštantnú silu po dlhú dobu. Tento princíp páky sme použili pri aplikovaní zaťaženia na skúmanú vzorku zvoleného materiálu (obr. 1).

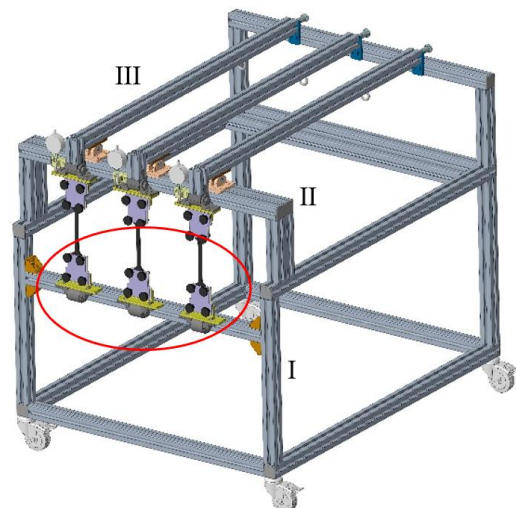


Obr. 1. Princíp Creep zariadenia na skúmanie tečenia

Z ťahovej skúšky získame maximálne hodnoty sily, pri ktorých u skúmaných vzorkách dochádza k porušeniu materiálu, od 650 N do 1300 N. Pre vykonávanie skúšky je dôležité mať informáciu o hodnote veľkosti sily, ktorú treba vyvinúť na dosiahnutie medzi pevnosti  $R_m$ . Pri skúškach tečenia je aplikované percentuálne nižšie zaťaženie z maximálnej hodnoty medzi pevnosti, čo je hodnota pod medzou klzu. Vo všeobecnosti sa výsledky ťahového diagramu popisujú v závislosti napätie a deformácia,  $\sigma$  a  $\varepsilon$ , častejšie ako jednoducho sila a zmena dĺžky,  $F$  a  $\Delta L$ .

## 2 KONŠTRUKČNÝ NÁVRH

Počas samotného návrhu boli vykonávané konštrukčné zmeny a úpravy. Hornú a dolnú časť uchytienia tvoria otočné kĺby, čo je praktické - (viac modelujúce - imitujúci reálny stav) (obr. 2).



Obr. 2. Finálny návrh zariadenia

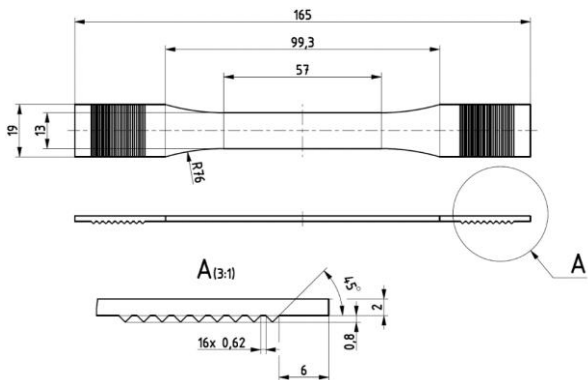
Pri konštrukcii zariadenia sme sa rozhodli použiť hliníkové profily výrobcu *Bosch-Rexroth* [14]. Konštrukčné vyhotovenie zariadenia poskytuje rýchlu zmontovateľnosť, praktickosť, odolnosť proti korózii a flexibilnú prestavbu. Pre naše potreby sme zvolili dva hlavné nosné profily a jeden pevnejší na rameno páky. Hlavná konštrukcia je tvorená hliníkovým profilom I o rozmeroch 45 × 45L (tab. 1). Najviac namáhané rameno, na ktorom sú položené a uchytané zaťažované páky je profil II rozmerov 45 × 90L.

Tab. 1. Použité hliníkové profily

Hliníkový profil	Prierez	Prierezová charakteristika
I. 45 × 45L		$A = 6,0 \text{ cm}^2$ $I_x = 11,7 \text{ cm}^4$ $I_y = 11,7 \text{ cm}^4$ $W_x = 5,2 \text{ cm}^3$ $W_y = 5,2 \text{ cm}^3$ $m = 1,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$
II. 45 × 90L		$A = 11,3 \text{ cm}^2$ $I_x = 82,0 \text{ cm}^4$ $I_y = 23,6 \text{ cm}^4$ $W_x = 18,2 \text{ cm}^3$ $W_y = 10,5 \text{ cm}^3$ $m = 3,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$
III. 45 × 45		$A = 7,5 \text{ cm}^2$ $I_x = 13,8 \text{ cm}^4$ $I_y = 13,8 \text{ cm}^4$ $W_x = 6,1 \text{ cm}^3$ $W_y = 6,1 \text{ cm}^3$ $m = 2,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$

Páka ramena III, na ktorej je zavesené závažie tvorí pevnejší a silnejší hliníkový profil 45 × 45. Zvolené profily využívajú 10 milimetrový slot na spájanie. V tab. 1 sú uvedené použité hliníkové profily spolu s prierezovými charakteristikami.

3D tlačiareň tlačí vzorku od základne smerom nahor. Preto spodná strana vzorky ostáva hladká a vrchnú stranu tvorí zúbkovaný reliéf (obr. 3).



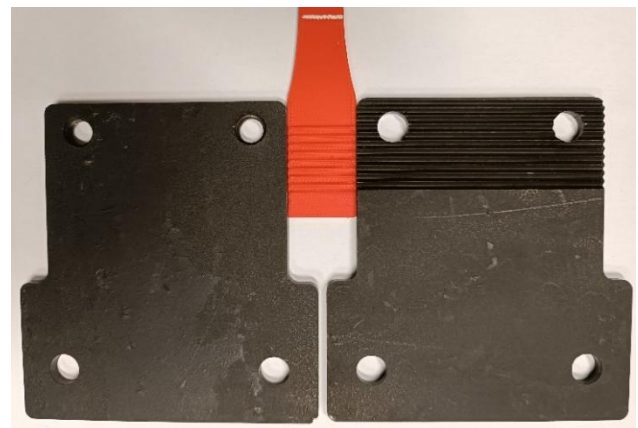
Obr. 3. Kompozitná vzorka so zúbkovitým reliéfom

Profily sú spojené spojovníkmi, taktiež od firmy *Bosch Rexroth* [15, 16]. Všetky spojenia použitých profilov boli realizované použitím *quick* konektor. Pre spevnenie najviac namáhaného profilu 40 × 90L bol použitý *blacket* pre lepšie a bezpečnejšie spojenie. Jednotlivé *Quick* konektory a *blacket* a ich princíp použitia spojenia profilov sú názorne vykreslené v tab. 2.

Tab. 2. Použité *Quick* konektory

<i>Quick connector, 10 mm slot, 0°</i>	
<i>Quick connector, 10 mm slot, 90°</i>	
<i>Blacket 45 × 45</i>	

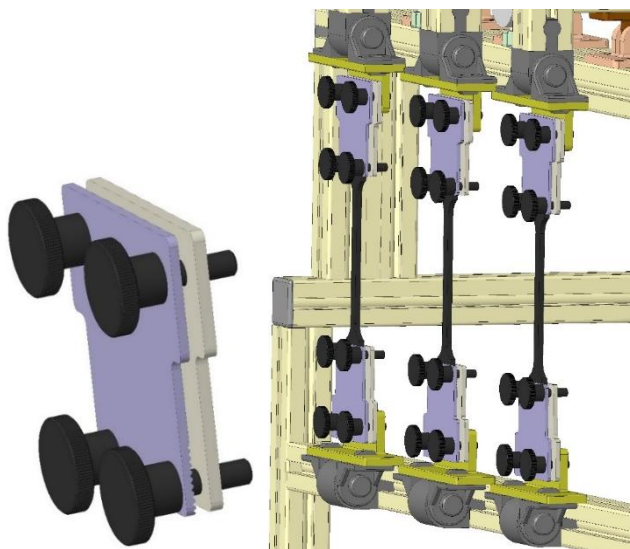
Uchytenie hladkej vzorky bez použitia komerčnej upínacej hlavy bola nasledujúca výzva pre výskumný tím. Normalizovaná vzorka je na povrchu hladká, čo spôsobovalo vyklznutie z upínacích platní.



Obr. 4. Platne spolu s vrúbkovanou vzorkou

Vytvorenie zúbkovanej štruktúry upínacej časti je vhodné riešenie, ktoré zabezpečí pevné neporušiteľné uchytenie. Navrhli sme a vyrobili dve oceľové platne, hladkú platňu a platňu so zúbkovitým reliéfom, ktorého rozostup je zhodný s reliéfom na kompozitnej vzorke (obr. 4).

Spojenie oboch platní a uchytenie vzorky je zabezpečené pomocou ryhovanej skrutky od firmy *Haberkorn*. Súčasne sú uchytené k T spojke na páke, obr. 5 (žltý komponent). Prítláčna sila na uchytenie vzorky je vyvinutá utiahnutím týchto skrutiek.



Obr. 5. Platne spolu s vrúbkovanou vzorkou

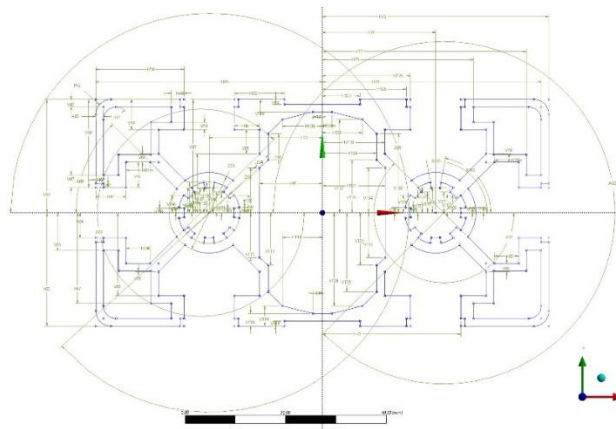
### 3 KONEČNO-PRVKOVÁ ANALÝZA

Na vykonanie konečno-prvkovej analýzy používame *FEM* program *Ansys 2024 R1* [17]. Keďže sa jedná o kontrolný výpočet bezpečnosti zostrojenej konštrukcie, zvolíme alternatívu tvorby modelu použitím nosníkových prvkov [11]. Zvolená metodika umožňuje rýchlu tvorbu komplexného modelu. V časti *Geometry* je potrebné vytvoriť prierezovú charakteristiku hliníkových profilov a následne jednotlivým nosníkovým elementom priradiť presne definovaný prierez (*cross section*). Vo výsledkoch je možné odčítať hodnoty pre *Beam Results: Axial force, Bending Moment, Torsional Moment, Shear Force*. Pre potreby týchto meraní je dôležitý maximálny ohybový moment (*Bending Moment*), z ktorého si následne vypočítame maximálne ohybové napätie  $\sigma_z$  pre profil  $45 \times 45L$  (5) a  $\sigma_y$  pre profil  $45 \times 90L$  (6). Na základe získaných hodnôt maximálneho ohybového napätia vieme určiť bezpečnosť kontrolovanej konštrukcie (7, 8).

#### 3.1 Tvorba konečno-prvkového modelu v programe ANSYS

Geometriu nosníkového modelu konštrukcie realizujeme v *Design Modeler*. *Design Modeler* obsahuje *Cross Sections* základných najviac používaných profilov. Keďže sa jedná o špeciálny

tvar hliníkového profilu, ten zhotovíme podľa dokumentácie poskytnutej firmou [14]. Vytvorený *Cross Section* profilu  $45 \times 90L$  je znázornený na obr. 6.



Obr. 6. Skica prierezu profilu  $45 \times 90L$

Jednotlivým nosníkom priradíme prislúchajúce profily s presne definovanou orientáciou prierezu. Pre hliníkové profily je potrebné definovať špeciálny materiálový model, ktorého vlastnosti korešponujú s materiálovými vlastnosťami udávanými výrobcom. Jedná sa o hliník v zložení *AlMgSi*. Tieto materiálové vlastnosti sú voľne dostupné spolu s katalógom profilov [14].

Na základe citlivostnej analýzy definujeme veľkosť konečno-prvkovej siete na 2,5 mm, kde celý model tvorí 5796 elementov a 11758 uzlových bodov. Rozmer elementu je postačujúci a zvyšovanie počtu elementov vyžaduje väčší výpočtový čas pri malej zmene hodnoty výsledkov.

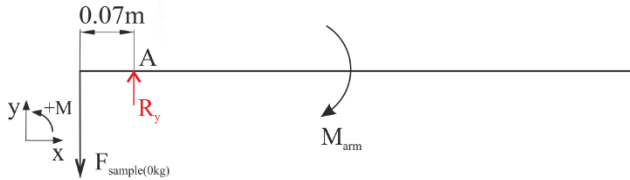
#### 3.2 Okrajové podmienky

Keďže sa jedná o princíp pákového mechanizmu, veľkosť zaťaženia závisí od veľkosti hmotnosti zavesenej na páke. Na pravej dlhšej strane ramena III je zavesené závažie definovanej hmotnosti a na druhej kratšej strane v danom pomere pôsobí konštantná zaťažujúca sila. Otočné uloženie páky je klzné. Schematický model páky ramena je na obr. 1 [11].

Pri prevádzke zariadenia sme stanovili najmenšiu možnú bezpečnosť  $k=2$  pre najkritickejšiu konštrukčnú časť. Na základe viacerých analýz a optimalizačných postupov sme stanovili maximálne povolené zaťaženie  $3 \times 12$  kg. Každá časť ramena ako: skrutky, podložky, upínacie platne, profil a ďalšie komponenty majú svoju hmotnosť a tým pádom pôsobia určitou silou a adekvátnym momentom na nosník. Keď je nezaťažené rameno vo vodorovnej polohe, zistíme vo vzdialenosti 1 meter veľkosť sily. Jej nameraná hodnota je  $F_{arm} = 8,29$  N. Výsledná veľkosť pôsobiaceho momentu od tejto sily na vzdialenosti 1 m je  $M_{arm} = 8,29$  N·m (1):

$$M_{arm} = F_{arm} \cdot 1 = 8,29 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = 8,29 \text{ N} \cdot \text{m} . \quad (1)$$

Meraná vzorka je uchytená vo vzdialenosti 0,07 m na ľavej, kratšej strane ramena. V prípade, že na rameno nemáme žiadne závažie, samotné rameno pôsobí na vzorku silou  $F_{(sample(0kg))} = 118,5 \text{ N}$  (2). V mieste uchytenia ramena k rámu A sa nachádza rotačný kĺb, ktorý odoberá dva stupne voľnosti. Všetky silové účinky sú v smere osi y (obr. 7) ( $R_y$ ). Silový účinok v smere osi x je rovný nule.



Obr. 7. Určenie pôsobiacej sily čistého ramena bez závažia

$$\sum M_{Az} = 0 \rightarrow F_{(sample(0kg))} \cdot 0,07 - M_{arm} = 0,$$

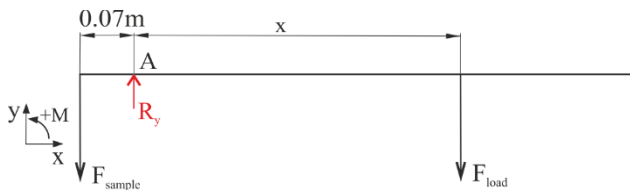
$$F_{(sample(0kg))} = \frac{M_{arm}}{0,07 \text{ m}} = \frac{8,29 \text{ N} \cdot \text{m}}{0,07 \text{ m}} = 118,5 \text{ N}, \quad (2)$$

kde  $F_{arm}$  je veľkosť nameranej sily [N] vo vzdialenosti 1 m,

$M_{arm}$  je veľkosť momentu nezaťažného ramena [N·m],

$F_{(sample(0kg))}$  je veľkosť sily pôsobiacej na vzorku ramena bez záťaže [N].

V mieste závesného oka na rameno je umiestnená tyč, na ktorej je zavesené závažie (obr. 1). Hmotnosť zavesenej tyče je  $m_{bar} = 2,46 \text{ kg}$ . Výsledná hmotnosť  $m_{load} = m_{bar} + m_{weight}$  je sčítaním hmotnosti závažia a tyče, na ktorej je závažie zavesené. Zaťažujúca sila je teda  $F_{load} = m_{load} \cdot g$ , kde gravitačné zrýchlenie  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  (obr. 8). Z momentovej podmienky, rovnice (3), máme prídavnú silu od naloženého zaťaženia  $F_{sample(ykg)}$ . Výsledná sila pôsobiaca na vzorku je sčítaním sily od ramena pri nulovom zaťažení a sily od závažia a tyče,  $F_{sample} = F_{(sample(0kg))} + F_{sample(ykg)}$ .



Obr. 8. Výsledná aplikovaná sila

$$\sum M_{Az} = 0 \rightarrow F_{sample(ykg)} \cdot 0,07 \text{ m} - F_{load} \cdot x = 0$$

$$F_{sample(ykg)} = \frac{F_{load} \cdot x}{0,07}, \quad (3)$$

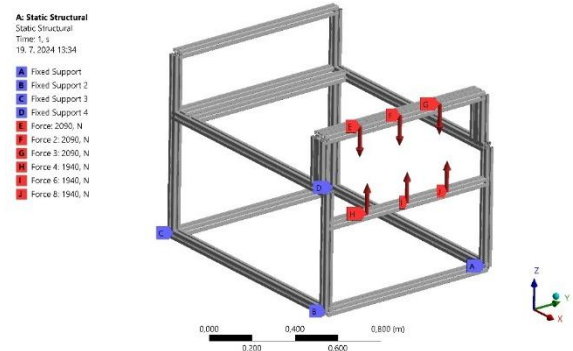
K dispozícii máme viac kusov závažia o hmotnosti 0,5 kg, 1 kg, 2 kg, 5 kg, 10 kg a ich kombináciu. Požadovanú silu pôsobiacu na vzorku  $F_{sample}$  vieme definovať závažím, ktoré je k dispozícii, a zmenou polohy závesnej tyče x na dlhšom ramene. Späťne použijeme opačný prepočet (4). Dĺžka ramena

je okolo 1 metra, preto je vhodné vzdialenosť umiestnenia závažia voliť v rozmedzí 0,80 m až 1 m.

$$F_{sample} = F_{sample(0kg)} + \frac{F_{load} \cdot x}{0,07}$$

$$x = \frac{F_{sample} - F_{sample(0kg)}}{(m_{bar} + m_{weight}) \cdot g} \cdot 0,07, \quad (4)$$

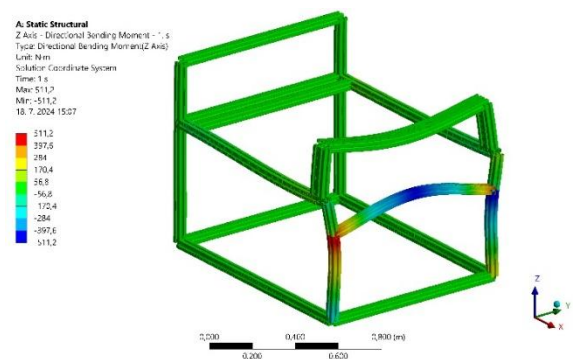
Pevnostný konečno-prvkový výpočet realizujeme pre hmotnosť závažia  $3 \times 12 \text{ kg}$  na všetky tri ramená vo vzdialenosti  $x = 0,9 \text{ m}$ . Sila pôsobiaca v jednej vzorku je  $F_{sample} = 1940 \text{ N}$ . V mieste kontaktu konštrukcie so zemou sa nachádzajú kolieska, ktoré je možné zabrzdiť, takže v tejto časti odoberieme všetky stupne voľnosti.



Obr. 9. Okrajové podmienky

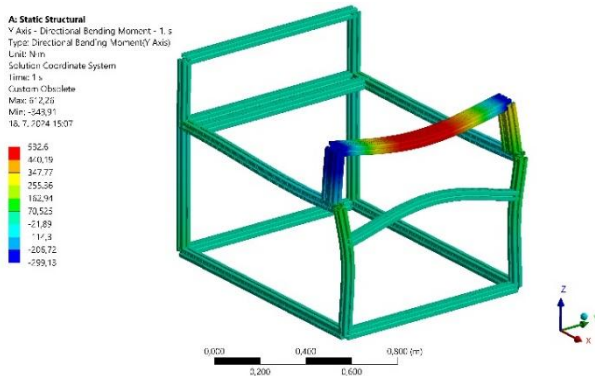
## 4 VÝSLEDKY FEM ANALÝZY

Zo statickej analýzy pre nosníkové elementy identifikujeme najviac namáhané časti zariadenia. Na spodný profil  $45 \times 45L$  sú uchytené tri rotačné kĺby a vzorky namáhané na ťah. Orientácia profilu je nezmenená. Pre tento profil vyhodnocujeme ohybový moment k osi z (obr. 10). Na horný dvojprofil  $45 \times 90L$  pôsobí celá naložená hmotnosť troch závaží a vyvinuté zaťaženie na ramená. Dvojprofil je rotovaný o  $90^\circ$  a jeho lokálny súradnicový je tiež pootočený o  $90^\circ$ . Zo statickej analýzy vyhodnocujeme ohybový moment k osi y (obr. 11).



Obr. 10. Ohybový moment k osi z

Keďže používame nosníkové prvky, veľkosť napätia nezískame priamo z konečno-prvkovej analýzy, ale vypočítaním z maximálneho ohybového momentu.



Obr. 11. Ohybový moment k osi z

Maximálny ohybový moment z pre profil  $45 \times 45L$  je  $M_{Oz} = 511,2 \text{ N}\cdot\text{m}$ . Pre ohyb okolo lokálnej osi z je ohybové napätie  $\sigma_{Oz} = 98,3 \text{ MPa}$ :

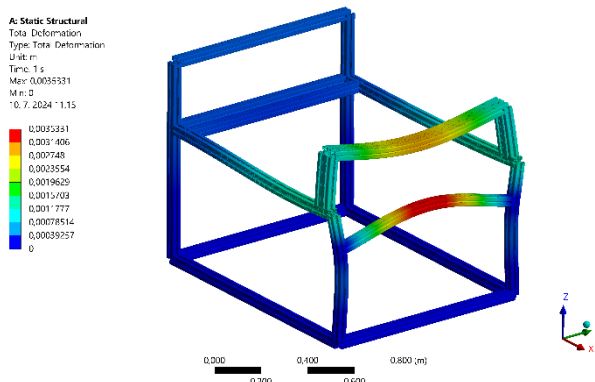
$$\sigma_{Oz} = \frac{M_{Oz}}{W_{Oz}} = \frac{445 \text{ Nm}}{0,0000052 \text{ m}^3} = 98,3 \text{ MPa}, \quad (5)$$

kde  $M_{Oz}$  je ohybový moment k osi z [N·m] (obr. 10),  $W_{Oz}$  je prierezový modul v ohybe vzhľadom na os z [m<sup>3</sup>] [15].

Maximálny ohybový moment v osi y pre dvojprofil  $45 \times 90L$  je  $M_{Oy} = 532,6 \text{ N}\cdot\text{m}$ . Pre ohyb okolo lokálnej osi y je ohybové napätie  $\sigma_{Oy} = 50,7 \text{ MPa}$ :

$$\sigma_{Oy} = \frac{M_{Oy}}{W_{Oy}} = \frac{532,6 \text{ Nm}}{0,0000105 \text{ m}^3} = 50,7 \text{ MPa}, \quad (6)$$

kde  $M_{Oy}$  je ohybový moment k osi y [N·m] (obr. 16),  $W_{Oy}$  je prierezový modul v ohybe vzhľadom na os y [m<sup>3</sup>] [15].



Obr. 12. Maximálna deformácia pri zaťažení  $3 \times 12 \text{ kg}$  na ramene  $0,69 \text{ m}$

Z pohľadu pretvorenia konštrukčných prvkov sú najväčšie hodnoty deformácie na spodnom profile  $45 \times 45L$ , kde sú uchytané tri rotačné kĺby (obr. 12). Deformácia dosahuje maximálnu hodnotu  $3,5 \text{ mm}$  v strede hliníkového profilu pre aplikované zaťaženie  $3 \times 12 \text{ kg}$  zavesené na ramene  $0,69 \text{ m}$  čo predstavuje veľkosť konštantne pôsobiacej sily vo vzorke  $F_{sample} = 1940 \text{ N}$ . Odčítavanie posunutia na vzorke je vykonávané bezkontaktným optickým extenzometrom, ktorý na pracovisku vyvíjame. Vzniknutá deformácia rámu nemá vplyv na presnosť

výsledkov experimentálneho merania. Po upnutí vzorky a aplikovaní zaťaženia sa celá sústava pred samotným meraním ustáli v rovnovážnej nulovej hladine. Následne na to spustíme samotný proces skúšky so súčasným zaznamenávaním posunutia.

Navrhnuté zariadenie chceme bezpečne používať, aby nedošlo k jeho trvalej deformácii, maximálne hodnoty napätí nesmú prekročiť medzi klzu materiálu, ktorá je pre materiál hliníkového profilu daná  $R_{p0,2} = 195 \text{ MPa}$ , medza pevnosti v ťahu  $R_m = 245 \text{ MPa}$ . Z analýzy ohybového napätia vyšlo, že  $\sigma_{Oz} < R_{p0,2}$  a tiež  $\sigma_{Oy} < R_{p0,2}$ . Zvolené zaťaženie zariadenia je teda pod medzou klzu. Z hľadiska spoľahlivého používania zariadenia je vhodné určiť mieru bezpečnosti jednotlivých profilov. Pre profil  $45 \times 45L$  je miera bezpečnosti:

$$k = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{Oz}} = \frac{195 \text{ MPa}}{98,3 \text{ MPa}} = 2. \quad (7)$$

Pre dvojprofil  $45 \times 90L$  je miera bezpečnosti:

$$k = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{Oy}} = \frac{195 \text{ MPa}}{50,7 \text{ MPa}} = 3,8. \quad (8)$$

Z hľadiska bezpečnosti je zariadenie navrhnuté správne a miera bezpečnosti je postačujúca.

Maximálna hodnota sily, pri ktorej dôjde k porušeniu pri ťahovej skúške pre zvolený typ kompozitného materiálu je do  $1300 \text{ N}$ . Pri analýze sme uvažovali so zaťažením skúmanej vzorky  $F_{sample} = 1940 \text{ N}$ , a najnižšia povolená miera bezpečnosti je  $k = 2$  pre profil  $45 \times 45L$ . Pri teste tečenia sa aplikuje nižšia hodnota zaťaženia a teda je zariadenie vhodne skonštruované a skúšky je možné vykonávať s dostatočnou bezpečnostnou rezervou. Ak by sa kolektív vedeckých pracovníkov rozhodol vykonávať skúšky tečenia pre pevnejšie materiály, napríklad iné kompozitné materiály vystužené vláknami rôznych typov, je možné ísť až do hodnoty zaťaženia  $F_{sample} = 1940 \text{ N}$ .

## ZÁVER

Kompozitné materiály sa vyznačujú širokým rozptylom materiálových vlastností. Rotačné uchytanie ramena má zanedbateľný vplyv na vykonávaný experiment. Jedná z vlastností polymérov je absorpcia vzdušnej vlhkosti materiálu. Výraznejší vplyv na kompozitnú štruktúru majú aj podmienky tlačená na 3D tlačiarňi.

Na základe výsledkov pevnostnej analýzy môžeme konštatovať, že navrhnuté zariadenie spĺňa všetky potrebné kritériá pre úspešné vykonávanie skúšok tečenia na kompozitných materiáloch a je vhodné aj pre ďalší výskum v oblasti tečenia iných typov materiálov, vrátane tých, ktoré sú vystužené vláknami. Zariadenie teda predstavuje efektívne a prispôsobiteľné riešenie, ktoré môže nájsť uplatnenie hlavne v akademických a výskumných

laboratóriách, kde môže prispieť k lepšiemu pochopeniu vlastností nových materiálov zaťažovaných dlhodobým rovnomerným konštantným zaťažením.

Význam tohto článku spočíva v poskytnutí nákladovo efektívneho, avšak funkčného a adaptovateľného špeciálneho zariadenia, ktoré umožňuje spoľahlivé vykonávanie skúšok tečenia. Týmto príspevkom sa otvárajú nové možnosti pre výskum a vývoj v oblasti materiálového inžinierstva v mieste pôsobenia výskumného tímu, najmä pokiaľ ide o skúmanie a testovanie nových kompozitných materiálov, ktoré sú nevyhnutné pre ďalší pokrok v rôznych priemyselných aplikáciách.

Z výsledkov analýzy vyplynulo, že zariadenie dokáže bezpečne vykonávať skúšky tečenia v rámci stanovených limitov a zároveň má dostatočnú rezervu bezpečnosti aj pre prípad, že by bolo potrebné testovať materiály s vyššou pevnosťou.

## Pod'akovanie

Táto práca vznikla za podpory grantového projektu KEGA 002ŽU-4/2023 a VEGA 1/0423/23.

## LITERATÚRA

- [1] PAPANICOLAOU, G. C. - ZAOUTSOS, S. P. (2019): *Viscoelastic constitutive modeling of creep and stress relaxation in polymers and polymer matrix composites*. Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites (Second Edition), Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Elsevier, pp. 3-59, ISBN 978-0-08-102601-4.
- [2] XIANG, Q. - XIAO, F. (2020): *Applications of epoxy materials in pavement engineering*. In: Construction and Building Materials, Elsevier, Vol. 235, ISSN 1879-0526.
- [3] RUDIN, A. - CHOI, P. (2023): *Mechanical Properties of Polymer Solids and Liquids*. The Elements of Polymer Science & Engineering (Third Edition), Elsevier, pp. 149-229, ISBN 978-0-12-382178-2.
- [4] HEARN, E. J. (1997): *Mechanics of Materials 2* (Third Edition), Chapter 11 - Fatigue, Creep and Fracture. Elsevier, pp. 443-508, ISBN 978-0-7506-3266-9.
- [5] CHEN, M. - LI, Y. - ZHANG, Y. - QI, M. - WU, N. (2023): *Recent advances in creep behaviors characterization for hydrate-bearing sediment*. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2023, ISSN 1879-0690.
- [6] SCHOECHER, N. - SCHMACHTENBERG, E. (2021): *Calculating Thermally Induced Stresses Using a Nonlinear Viscoelastic Material Model*. Plastics Failure Analysis and Prevention, Elsevier, pp. 187-192, ISBN 978-1-884207-92-1.

[7] MAJCHER, A. - WEGLOWSKI, B. - OCLON, P. (2014): *Multi-Function Device for Creep Testing at Elevated Temperature*. In: Advanced Materials Research, Vols. 875-877, pp 462-466, ISSN print 1022-6680.

[8] SKELTON, R. P. (2003): *Creep-Fatigue Interactions (Crack Initiation)*. Comprehensive Structural Integrity, Elsevier Science, 2003, pp. 241-271, ISBN 978-0-08-043749-1,

[9] NORMAN, E. DOWLING (2013): *Mechanical Behavior of Materials, Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*, Pearson Education Limited, ISBN 10: 0-273-76455-1, ISBN 13: 978-0-273-76455-7

[10] ZHANG, S. - NAKANO, H. - XIONG, Y. - NISHIMURA, T. - ZHANG, F. (2010): *Temperature-controlled triaxial compression/creep test device for thermodynamic properties of soft sedimentary rock and corresponding theoretical prediction*. In: Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Elsevier, Vol. 2, Issue 3, pp. 255-261, ISSN 1674-7755.

[11] JAKUBOVIČOVÁ, L. - VAŠKO, M. - PIROH, O. - SYNÁK, F. (2024): *Simplified FEM Model of the Aluminum Bosch Rexroth Profile*. In: 25th International Scientific Conference, Applied Mechanics, book of articles, 252 pages, ISBN 978-80-554-2090-5.

[12] *Basic mechanic elements, Rexroth a Bosch Company*, available from: [https://store.boschrexroth.com/Assembly-Technology/Basic-mechanic-elements?cclcl=en\\_GB](https://store.boschrexroth.com/Assembly-Technology/Basic-mechanic-elements?cclcl=en_GB)

[13] RAMÍREZ-REVILLA, S. - CAMACHO-VALENCIA, D. - GILMAR GONZALES-CONDORI, E. G. - MÁRQUEZ G. (2023): *Evaluation and comparison of the degradability and compressive and tensile properties of 3D printing polymeric materials PLA, PETG, PC, and ASA*. In: MRS Communications, Vol. 13, Issue 1

[14] MTS (2019): *Aluminium profiles Bosch Rexroth*. [online]. 2019. available from: <https://www.mts.sk/wp-content/uploads/2019/04/prislusenstvo.pdf>

[15] MTS (2019): *Aluminium profiles Bosch Rexroth, connecting elements*. [online]. 2019. available from: <https://www.mts.sk/wp-content/uploads/2019/04/spojovacie-prvky-1.pdf>

[16] MTS (2019): *Aluminium profiles Bosch Rexroth, Accessories*. [online]. available from: <https://www.mts.sk/wp-content/uploads/2019/04/prislusenstvo.pdf>

[17] CHEN, X., - LIU, Y. (2015): *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. Boca Raton: CRC Press, 389 s. ISBN 13: 978-1-4398-7385-4.

---

# Improving the image of the company

---

## Beáta Furmannová, Ing., PhD.\*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,

Univerzitná 1, 010 26 Žilina.

E-mail: [beata.furmannova@fstroj.uniza.sk](mailto:beata.furmannova@fstroj.uniza.sk), Tel.: +421 41 513 27111

## Vladimíra Biňasová, Ing., PhD., DiS.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,

Univerzitná 1, 010 26 Žilina.

E-mail: [vladimira.binasova@fstroj.uniza.sk](mailto:vladimira.binasova@fstroj.uniza.sk), Tel.: + 421 41 513 2727

## Ján Zuzik, Ing.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,

Univerzitná 1, 010 26 Žilina.

E-mail: [jan.zuzik@fstroj.uniza.sk](mailto:jan.zuzik@fstroj.uniza.sk), Tel.: +421 41 513 2748

**Abstract:** The image of the company is a very important tool in the company for proper functioning and representation even outside its gates. Nowadays, it is an indispensable factor. Businesses are "competing" with each other, and customers are not only looking at how the company produces, but also how it presents itself, how it looks and advertises. The article describes proposals for improving the image of the company developed on the basis of the analysis of the current situation and the evaluation of a questionnaire survey in the company.

**Keywords:** artificial intelligence, warehouse, intelligent warehouse.

---

## INTRODUCTION

There is a lot of competition nowadays, so companies must constantly respond to new market demands. They will succeed above all if they know how to fight the competition. The promotion of the soft components of management, such as the image of the company, by building which companies can increase the sale of their products and thus the profit, is coming to the fore. The image of the company itself contributes to the positive or negative perception of the company by its consumers, competitors and the general population. It is divided into four parts that form one whole. It is necessary for companies to focus on each part, because only together can they achieve the desired effect. These factors can direct companies to improve economic activity and new ways of development.

## 1 CORPORATE IMAGE

The corporate image should be understood as the goal of the company, it must also be a corporate part of the strategic management process and should be used within all groups and management procedures. It is necessary to be aware of the following facts, which are related to strategic planning, but also to the creation of a corporate image [6]:

- creating an image is not a matter that cannot be built in a short time, or only with some of its characteristics. Successful companies that applied corporate image claim that their company image does not develop alone but together with the company, which subsequently changes,
- the image of the company is not uniform, but monolithic. It means that the company has the results of several images. Significant influence represents what the given target group considers most important,
- one of the properties of the image is its changeability. Although it adapts to change, it cannot be observed in the short term.

From these facts, it is possible to realize that when the company advances and more strongly expresses its strategic goals towards the public, these steps will gain more trust and favour from the public. As a result, the public will look at the company differently, which will eventually improve its image [2, 6].

The overall image of the company consists of a simple formula (1) [2]:

$$CIm = (CC + Cl + Cd) \cdot CCom, \quad (1)$$

where *Clm* - corporate image,  
*CC* - corporate culture,  
*CI* - corporate identity,  
*CD* - corporate design,  
*CCom* - corporate communication.

All companies should know their focus and goals, which define their company image. Before starting to introduce it, they should examine all the factors, answer their questions and create the ultimate goal of their image [3]. Factors that distinguish the company's image include:

- non-material presentation of the company to the public (e.g. complaints and their processing, direct marketing, presentations at various fairs and exhibitions),
- non-material presentation of the company inside the company (e.g. atmosphere at the workplace, resolution of internal disagreements),
- material factory (e.g. design of manufactured products, quality of products, provision of services).

### 1.1 Corporate culture

Corporate culture is understood as the component that governs the enterprise. The essence rests on people who have always had and will always have the need to belong to someone. This need accompanies them and shows them how to join groups and communities of people with the same interests as them. These people (workers) want to belong to their teams. However, it is necessary to know how to use their predispositions correctly in order for people to find a certain connection in the field of corporate relations, as well as personal values [2, 4].

Among the most used values are services provided to customers, respect for individuality, staff development, professionalism and competence, independence, responsibility. Corporate culture also includes files of the so-called corporate imperatives. All generally valid regulations, orders, wishes or even requests are listed here, as well as activities that prohibit or command them. So corporate culture should contain systems of norms and values, recommendations that inspire defined opinions, attitudes, beliefs, or mandatory regulations [2].

### 1.2 Corporate identity

Corporate identity is exactly the same as a person and his personality. This means something that can be influenced, directed towards one's own ideal, personality, but one cannot determine one's own personality. Personality is determined by the factors and influences of the environment in which it lives.

Just like a person, so is a company creates its own character [7].

Corporate identity includes leadership style, organization policy and strategy. It is a tool enabling the creation, development and stability of the organization. It addresses both the inside of the organization and the outside and takes care of a homogeneous presentation of the company [5].

### 1.3 Corporate design

Corporate design is the image that the company gradually creates in the public, in the environment and in the area of its operation. The visual aspects of the company and its features are exposed to the public. Corporate design forms the overall image of the organization, and many times this corporate design is the tool that helps the surrounding to form an opinion about the given company [6].

Corporate design is part of corporate identity. A property or even an element of corporate design is easily memorable, pleasant from the outside, but especially with a direct "relation" to its activities or organization. It contains six basic images of the company, such as the brand (logo), raster, font and typography, company colours, company architecture, and other essentials [7].

### 1.4 Corporate communication

Communication is a very important tool for all companies. It is important for communication with the supplier, customer or own employees. However, you have to ask yourself whether the communication is successful. Communication in companies consists in ensuring the transfer of corporate identity to the corporate image of the organization. All this happens with the help of planned and controlled communication. Thanks to it, a discussion is conducted with a given goal, i.e. interest groups. Communication is an integral part of every business, especially for the public to understand the organization's identity, but also its values. Communication is divided into internal and external [1, 2].

The purpose of external communication is mainly to inform about activities, products, company results, market position. This also includes communication and related activities, such as selling a product, which is a form of external communication [2].

## 2 CASE STUDY

The purpose of the case study was a project with the main goal of improving the working environment at the workplace.

The case study was carried out in an unnamed company focusing on the field of machining, locksmithing, road and freight transport and

scientific and technical activities. They are specified for simple serial products, but also for complicated, precise single parts of medium series.

Within the current state of the corporate image analysis, individual findings were assigned to the given company.

The non-material presentation of the company to the public includes communication policy, advertising, marketing and handling of advertisements.

The intangible presentation of the company inside the organization includes the working atmosphere, work organization, attitude towards management.

Material companies include corporate clothing, the quality of the products provided.

Based on the findings, a questionnaire consisting of twelve questions was developed, which were aimed at the employees of the mentioned company with regard to selected factors of the corporate image. All employees of the company answered the questionnaire.

### 3 DETERMINATION AND EVALUATION OF HYPOTHESES

At the beginning, two hypotheses were established, which were chosen based on information from the analysis of the current state of the company and from the experience of working in the mentioned company of the drafters of the questionnaire.

Hypothesis 1: More than 70 % of respondents think that the company is not well known in society and advertising is needed.

Hypothesis 2: More than 70 % of the respondents are satisfied with the current work clothes.

#### 3.1 Hypothesis 1

The first hypothesis "More than 70 % of respondents think that the company is not well known in society" was confirmed. As many as 87.5 % of employees answered that they think that the company is not known to the public, which was confirmed using the following question (Fig. 1).

The next question (Fig. 2) confirmed that the company has no active advertising and that employees would prefer the visibility of the company, where 56.3 % of respondents would choose advertising in the form of social networks.

In the next question, which had a clear goal, namely the visibility of the company at various fairs or exhibitions, where it could present its products and technologies it deals with and in this way it could find new potential customers. Here, 37.5 % of employees answered that they do not know if they want the company to participate in such fairs. On the other hand, another 37.5 % of employees chose the answer "it is beneficial for the company".

The other 18.8 % of respondents indicated the option yes and 6.3 % the option no. The results show that up to 56.3 % think that the company should participate in fairs or exhibitions.

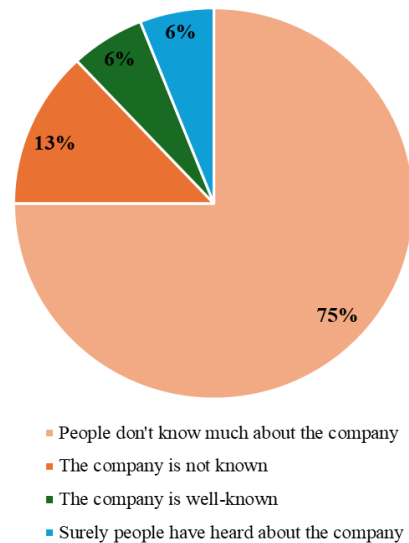


Fig. 1. Knowledge of the company in public

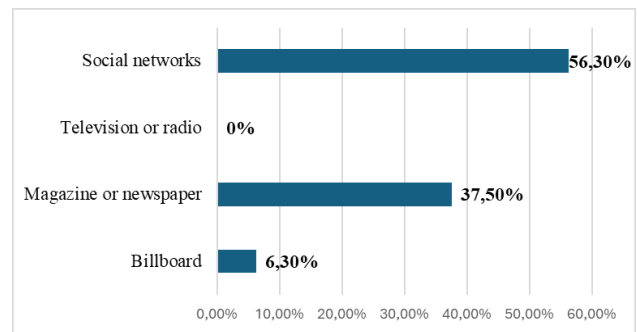


Fig. 2. A form of advertising for the company's visibility

#### 3.2 Hypothesis 2

The second hypothesis "More than 70 % of the respondents are satisfied with the current work clothes" was also confirmed.

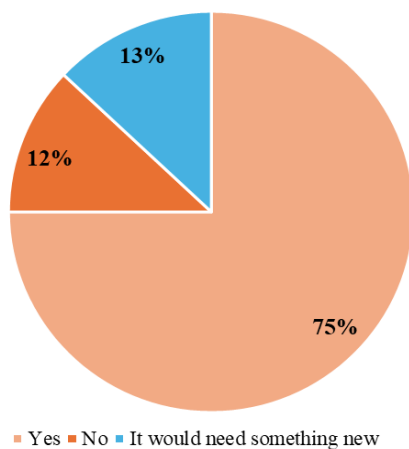


Fig. 3. Employee satisfaction with work clothes

Up to 75 % of employees prefer the current clothes, which was confirmed by the following question (Fig. 3).

Based on the results of the questionnaire, both selected hypotheses were confirmed.

#### 4 SUGGESTIONS FOR IMPROVING THE COMPANY'S IMAGE

Based on the first hypothesis, it was found that the company is not very well known, therefore it is important to focus on this part of improving the image of the company. The questionnaire survey showed that employees would like to make the company more visible using social networks, magazines/newspapers, and ultimately would also accept advertising in the form of billboards. They would also like the company to participate in exhibitions and fairs, which can contribute to the visibility of the company.

The immaterial presentation of the company to the public includes suggestions for making the company more visible:

- creating a profile on social networks (*Facebook*),
- registration on *LinkedIn*,
- magazine advertisement,
- presentation at fairs and exhibitions,
- registration for *Finstat premium*.

In order to improve the image of the company as part of the intangible presentation of the company inside the organization, the following was proposed:

- creation of a code of ethics,
- introduction of regular work schedules.

As a material factor for improving the image of the company, a notice board was designed as a support tool that can motivate workers and simplify their work.

A document was drawn up for the company, where suggested improvements were listed. As part of this, the individual improvements were described in detail with the benefits for the company, indicative prices, how much the given proposal would cost, and the responsible person in the company for the implementation of the individual proposals and their updating were indicated. The company has acquired a sign board, while it has not yet decided what it could use in the near future as part of the advertisements.

#### CONCLUSIONS

To improve the image of the selected company, proposals for improvements were developed, which were divided into three groups of company image factors. These proposals were developed on the basis of questionnaire responses, as well as from the experience of employees in the company. An important part of the proposals is advertising,

where a page was created on the *Facebook* platform and the recommended *LinkedIn* platform. An advertising proposal was created, which is suitable for a magazine or newspaper, or even as a billboard. Exhibitions and fairs were recommended to the company for visibility. As part of the other proposals, a code of ethics was created, a proposal for regular meetings and the introduction of a notice board.

A corporate image can have a significant impact on a company's success. If a company has a positive image, it can attract more customers, partners and talent. On the contrary, a bad image can discourage people from cooperating and customers from buying its products. Building and maintaining a good image is therefore an important part of any company's long-term strategy.

#### Acknowledgements

*This work was supported by project contract No. VEGA 1/00524/22 and VEGA 1/0633/24.*

#### REFERENCES

- [1] CORNELISSEN, J. (2023): *Corporate Communication*. Sage Pubn, 2023. 360 p., ISBN 978-1529-6000-2-5.
- [2] ČIHOVSKÁ, V. - HANULÁKOVÁ, E. - LIPIANSKA, J. (2001): *Firemný imidž*. Bratislava: Eurounion, 135 p., ISBN 80-88984-24-6.
- [3] KOLTNEROVÁ, K. - SAMÁKOVÁ, J. (2011): *The necessity of personnel planning in the project management in industrial enterprises*. In: Annals of DAAAM for 2011 and 22nd International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing and Automation: Power of Knowledge and Creativity", pp. 1593-1594, ISBN 978-390150983-4.
- [4] LORINCOVÁ, S. - HITKA, M. - ČAMBÁL, M. - SZABÓ, P. - JAVORČIKOVÁ, J. (2016): *Motivational factors influencing senior managers in the forestry and wood-processing sector in Slovakia*. BioResources, Publisher: North Carolina State University. Volume 11, Issue 4, pp. 10339-10348, ISSN 1930-2126.
- [5] NĚMEC, P. (2023): *Praxe komunikace s veřejností*. Praha: Management Press 1996. 49 p., ISBN 80-85943-20-4.
- [6] VARTIAK, L. - GOGOLOVÁ, M. - MAJEROVÁ, J. (2022): *Corporate Image and its Impact on Consumer Decision Making in Slovakia*. In: IBIMA Business Review. Vol. 2022, Article ID 340734, 16 pages, ISSN: 1947-3788 DOI: 10.5171/2022.340734.
- [7] WHEELER, A. - MEYERSON, R. (2024): *Designing Brand Identity*. John Wiley & Sons, 352 p., ISBN 978-111998481-8.

# Využitie optickej 3D digitalizácie pri meraní rozmerov bezšvíkových ocelových rúr ťahaných za studena

## Ladislav Morovič, doc. Ing., PhD.

Katedra obrábania a počítačovej podpory technológií, Ústav výrobných technológií, Materiálovotechnologická fakulta v Trnave, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava, Slovenská republika.  
E-mail: ladislav.morovic@stuba.sk, Tel.: + 421 918 600 176

## Jozef Bílik, doc. Ing., PhD.\*

Katedra tvárnenia kovov a plastov, Ústav výrobných technológií, Materiálovotechnologická fakulta v Trnave, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava, Slovenská republika.  
E-mail: jozef.bilik@stuba.sk, Tel.: +421 915 761 406

## Filip Havran, Ing.

Katedra obrábania a počítačovej podpory technológií, Ústav výrobných technológií, Materiálovotechnologická fakulta v Trnave, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava, Slovenská republika.

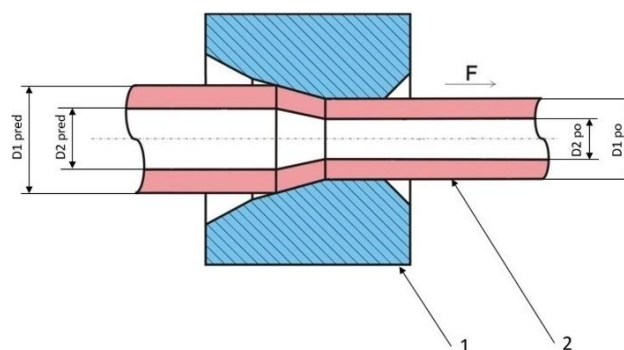
## Utilization of Optical 3D Digitization in Measuring Dimensions of Cold-Drawn Seamless Steel Tubes

**Abstract:** The paper deals with the use of a non-contact measurement method - optical 3D digitization (*active triangulation/structured light method*) - in measuring the dimensions (outer and inner diameter) of seamless cold-drawn steel tubes. The paper focuses on three areas of tube measurement by 3D digitization: (1) measurement of dimensions at different tube sections, (2) measurement of dirty tube surface, (3) evaluation of measured values in terms of different settings of polygonization. The results of the measured values and findings serve as useful information when deciding on the choice of 3D digitization method for measuring seamless steel tubes.

**Keywords:** 3D digitization, optical 3D scanning, polygonization, cold-drawn seamless steel tubes

## ÚVOD

Na meranie vonkajšieho a vnútorného priemeru rúr okrem kontaktných metód merania (napr. pomocou súradnicových meračích strojov) [1, 2] sa využívajú aj bezkontaktné metódy merania, ako napr. optická 3D digitalizácia [3, 4] a počítačová tomografia [2, 5]. Článok sa zameriava na meranie rúr bezkontaktnou metódou merania, konkrétne optickým 3D skenerom GOM ATOS TripleScan (obr. 2, obr. 3), ktorý využíva metódu aktívnej triangulácie (premietanie štruktúrovaného svetla). V článku sú predstavené tri významné faktory, ktoré je potrebné brať do úvahy pri optickom 3D skenovaní rúr. V článku uvedené merané bezšvíkové ocelové rúry boli vyrobené ťahaním za studena (obr. 1). Technológia ťahania rúr za studena [6, 7] sa používa pri výrobe presných bezšvíkových ocelových rúr.



Obr. 1. Schéma prievlačného ťahania [3]:  $D1_{pred}$  - vonkajší priemer pred ťahaním,  $D2_{pred}$  - vnútorný priemer pred ťahaním,  $D1_{po}$  - vonkajší priemer po ťahaní,  $D2_{po}$  - vnútorný priemer po ťahaní,  $F$  - ťažná sila, 1 - prievlak, 2 - ťahaná rúra

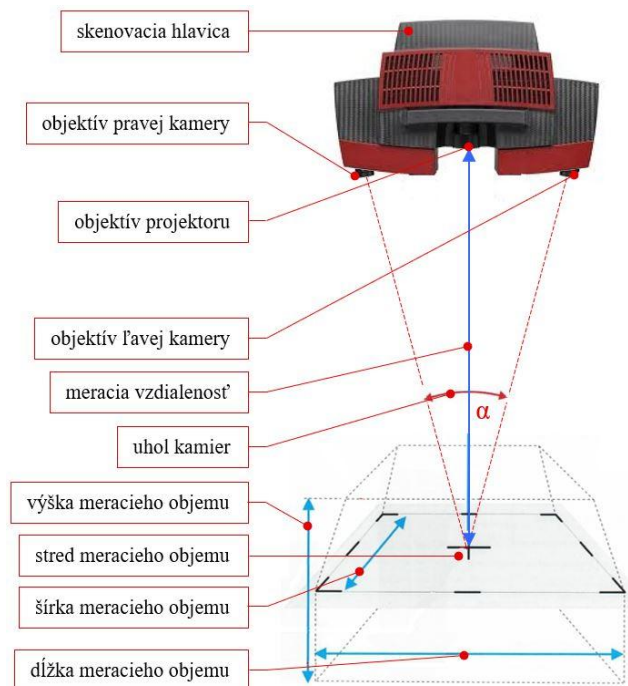
Optický 3D skener GOM ATOS TripleScan (obr. 2) možno charakterizovať nasledovným opisom:

- *projekcia štruktúrovaného svetla*: na meraný objekt (t.j. na povrch rúry) sa pomocou projektora 3D skenera premieta séria svetelných vzorov (nazýva sa tiež ako „štruktúrované svetlo“). Väčšinou ide o pruhy alebo iné geometrické vzory, ktoré 3D skener premieta na povrch objektu v rôznych uhloch. Vďaka tomu dochádza k rôznemu „deformovaniu“ týchto vzorov na povrchu objektu v závislosti od jeho geometrie (t. j. tvaru),
- *snímanie kamerami*: 3D skener GOM ATOS TripleScan je vybavený dvoma kamerami (pravá a ľavá kamera), ktoré snímajú premietané vzory na povrch objektu. Kamery voči projektoru sú pevne umiestnené pod určitým uhlom ( $\alpha = 28^\circ$ ) v trojuholníkovom usporiadaní,
- *výpočet súradníc snímaných bodov pomocou triangulácie*: na základe deformácie vzorov zachytených kamerami sa určuje vzdialenosť jednotlivých bodov tvoriacich povrch objektu. Merací systém využíva trianguláciu - na základe známych vzdialeností medzi projektorom a kamerami a uhla projekcie je možné vypočítať presné priestorové súradnice bodov tvoriacich povrch meraného objektu,
- *získanie priestorových súradníc*: vďaka výpočtu triangulácie každého pixelu obrazu sa získava hustý 3D mrak bodov, ktorý reprezentuje povrch objektu. Tento proces sa opakuje pre každé premietané vzorové pole (t.j. pre každý *individuálny sken*). Jednotlivé individuálne skeny sú spájané do jedného celku.

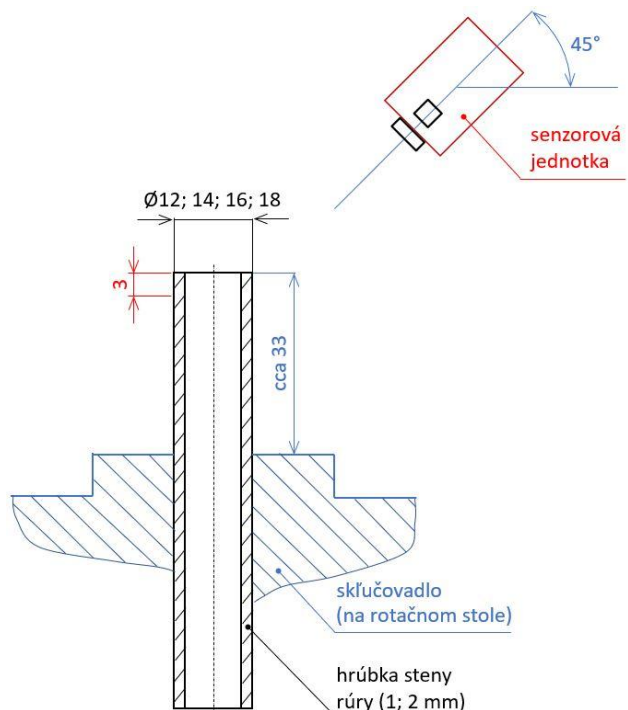
Kľúčové vlastnosti optického 3D skenera GOM ATOS TripleScan:

- *hustý mrak bodov*: pre 3D digitalizáciu metódou štruktúrovaného svetla všeobecne je charakteristická relatívne vysoká hustota získaného mraku bodov. V prípade získaných výsledkov uvedených v tomto článku, použitý bol optický 3D skener GOM ATOS II TripleScan SO MV100, čo znamená, že rozlíšenie kamier je 5 MPa a rozmery meracieho objemu (dĺžka  $\times$  šírka  $\times$  výška, obr. 2) sú 100 mm  $\times$  75 mm  $\times$  70 mm. Pri vyššie uvedených parametroch, vzdialenosť dvoch bodov v mraku bodov je 0,04509 mm,
- *rýchlosť 3D digitalizácie*: metóda štruktúrovaného svetla umožňuje rýchle, presné a nedeštruktívne meranie povrchov, čo robí optický 3D skener vhodným pre priemyselnú metrológiu ) [9] (t.j. aj pre 3D digitalizáciu rúr), kontrolu kvality, reverzné inžinierstvo a pod.,
- *nevýhodou* optického 3D skenovania je napr. relatívne obtiažne 3D skenovanie tmavých, lesklých a priesvitných povrchov. Riešenie

ponúka zmatnenie povrchu (napr. kriedovým sprejom). Ďalšou nevýhodou merania štruktúrovaným svetlom je obmedzená možnosť premietania a následného snímania vzorov v prípade zložitých vnútorných resp. hlbokých a úzkych geometrií (podkapitola 1.1).



Obr. 2. Skenovacia hlavica 3D skenera GOM ATOS TripleScan [8]



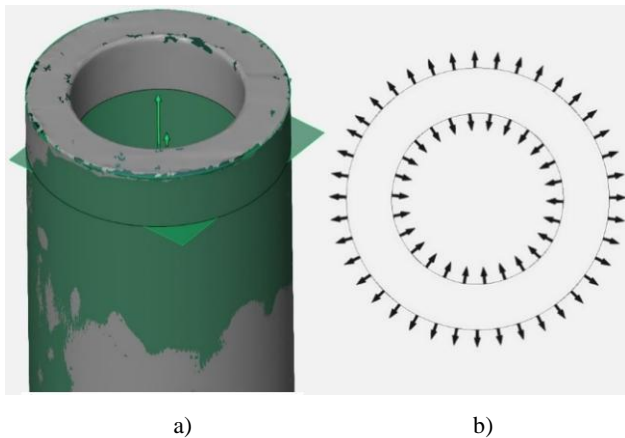
Obr. 3. Schéma vzájomnej polohy senzornej jednotky 3D skenera GOM ATOS II TripleScan SO MV100 a rúry pri 3D skenovaní [3]

Na obr. 3 je znázornená vzájomná poloha senzornej jednotky 3D skenera a meranej rúry. Výsledkom 3D digitalizácie je mrak bodov. Sieťový model rúry

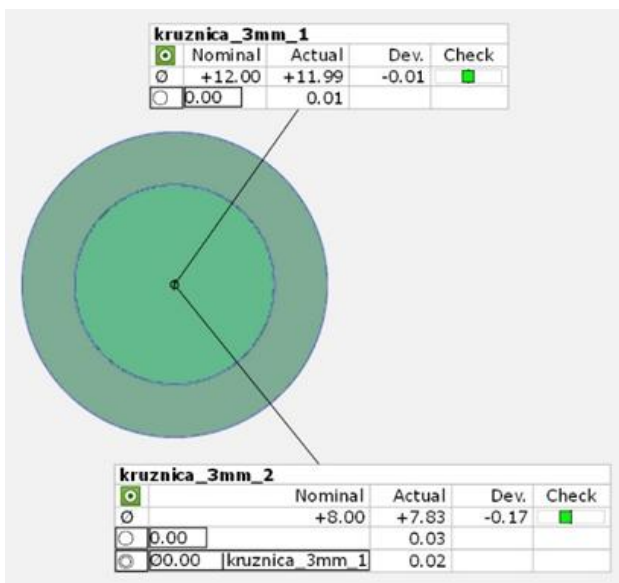
(polygónový .stl model) bol vytvorený polygonizáciou v softvéri *GOM ATOS Professional v7.5 SR2*. Meranie priemerov rúr bolo zrealizované vo voľne dostupnom softvéri *GOM Inspect Suite 2020*.

Meranie bolo väčšinou realizované pomocou best-fit elementov, ktoré boli vytvorené na povrchu naskenovaného modelu rúry alebo na obrysy vytvorené pomocou rezov. Vytvorený bol best-fit valec (t. j. digitálne „napasovaný“ valec na vonkajšiu plochu polygónového .stl modelu rúry) (obr. 4a). Vo vzdialenosti 3 mm od konca rúry, bola vytvorená rovina kolmá na os best-fit valca vytvoreného v predchádzajúcom kroku (obr. 4a). Táto rovina vytvorila rez cez .stl model rúry (obr. 4b) [3].

Po vytvorení rezu boli vytvorené best-fit kružnice (obr. 5), ktoré boli vytvorené pomocou obrysov vonkajšieho a vnútorného priemeru, ktoré sme získali rezom. Keď boli best-fit kružnice vytvorené, nasledovalo meranie ich priemerov (obr. 5) pomocou funkcie *Inspect* a zvolením možnosti *Check* pre zmeranie priemeru [3].



Obr. 4. Vytvorenie rezu cez polygónový .stl model [3]:  
a) rez rúrou pomocou roviny vzdialenej 3 mm od konca rúry,  
b) pohľad na vzniknutý rez rúrou



Obr. 5. Meranie vonkajšieho a vnútorného priemeru, kruhovitosti a sústrednosti [3]

Ďalším krokom bolo vyhodnotenie kruhovitosti a sústrednosti (obr. 5), ktoré sa takisto vzťahovali na vytvorené *best-fit* kružnice. Ich meranie sa takisto vykonávalo pomocou funkcie *Inspect*, kde namiesto možnosti *Check* bola zvolená možnosť *GD&T*. Ako prvá bola odmeraná hodnota kruhovitosti. Pri kruhovitosti nie je potrebné udávať základňu, ku ktorej by sa hodnota kruhovitosti vzťahovala. Pri sústrednosti je už základňa potrebná, preto bol tento geometrický tvar odmeraný pre kružnicu č. 2, ktorá reprezentovala vnútorný priemer. Ako základňa, na ktorú sa vzťahovala hodnota sústrednosti pre túto kružnicu, bola zvolená práve kružnica č. 1, ktorá reprezentovala vonkajší priemer [3].

## 1 VYHODNOTENIE NAMERANÝCH HODNÔT

Merané hodnoty boli teda vonkajší a vnútorný priemer vzorky rúry, ktoré boli merané pred aj po procese ťahania. Z hodnôt priemerov sa následne vypočítali hodnoty hrúbky stien a hodnota redukcie, ktorá vznikla ťahaním príslušných priemerov rúr na priemer po ťahaní [3].

Hrúbka steny sa vypočítala ako rozdiel vonkajšieho a vnútorného priemeru, a to ako pred ťahaním, tak aj po ťahaní. Výpočet pre hrúbku steny bol realizovaný podľa rovnice (1):

$$T = D1(\text{pred}; po) - D2(\text{pred}; po), \quad (1)$$

kde  $T$  - hrúbka steny,

$D1$  pred - vonkajší priemer pred ťahaním,

$D2$  pred - vnútorný priemer pred ťahaním,

$D1$  po - vonkajší priemer po ťahaní,

$D2$  po - vnútorný priemer po ťahaní.

Redukcia pri ťahaní sa vypočítala podľa rovnice (2):

$$R = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100[\%], \quad (2)$$

kde  $R$  - redukcia,

$S_0$  - plocha prierezu rúry pred ťahaním,

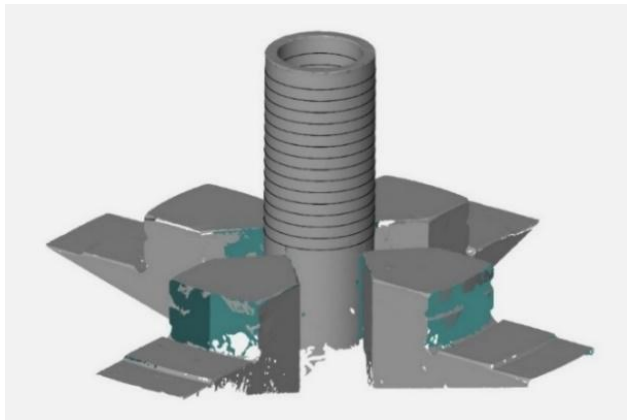
$S$  - plocha prierezu rúry po ťahaní.

### 1.1 Vyhodnotenie nameraných hodnôt v jednotlivých rezoch

Vyhodnotenie bolo realizované na vzorke rúry s vonkajším priemerom  $\text{Ø}18$  mm a hrúbkou steny 2 mm. Rezy boli vytvorené pomocou rovnobežných rovín na základe roviny vzdialenej 3 mm od konca vzorky rúry, a to so vzájomnými vzdialenosťami 2 mm, čo je možné vidieť na obr. 6. Posledná rovina mala vzdialenosť od konca rúry 31 mm [3].

Pre každý rez bola vytvorená best-fit kružnica ako pre vonkajší, tak aj pre vnútorný priemer vzorky rúry. Skenovanie vnútorného povrchu rúry bolo možné len

do určitej vzdialenosti, čo činilo v prípade priemeru vzorky rúry pred ťahaním 13 mm a po ťahaní 7 mm.



Obr. 6. Poloha rezov vo vzdialenosti 2 mm [3]

Limitáciu merania pred aj po ťahaním predstavoval nízky vnútorný priemer vzorky rúry, ktorý obmedzoval projektovanie štruktúrovaného svetla do daných miest. Cieľom experimentálneho hodnotenia bolo porovnanie meraných hodnôt v jednotlivých vzdialenostiach od konca vzorky rúry [3].

Tab. 1. Namerané hodnoty v jednotlivých rezoch - pred ťahaním [3]

Vzdialenosť rezu [mm]	D1 [mm]	D2 [mm]	Kruhovitosť		Sústrednosť
			D1	D2	
3	18,002	13,949	0,02	0,02	0,02
5	18,001	13,948	0,02	0,02	0,00
7	18,000	13,945	0,02	0,02	0,01
9	18,000	13,944	0,02	0,02	0,02
11	18,000	13,942	0,02	0,03	0,03
13	18,000	13,938	0,02	0,09	0,04
15	18,000	-	0,02	-	-
17	18,001	-	0,02	-	-
19	18,003	-	0,03	-	-
21	18,004	-	0,02	-	-
23	18,006	-	0,02	-	-
25	18,007	-	0,02	-	-
27	18,008	-	0,02	-	-
29	18,007	-	0,02	-	-
31	18,008	-	0,06	-	-

Namerané hodnoty priemerov vzoriek rúr sa pred aj po ťahaní menili rádo vo tisícinách milimetra, to znamená, že priemery boli viac-menej konštantné vo všetkých vzdialenostiach od konca rúry. Takisto aj hodnoty odchýlok geometrických tvarov sa menili len nebadane. Z tab. 1 možno tiež vidieť, že hodnoty vnútorného priemeru a odchýlok geometrických

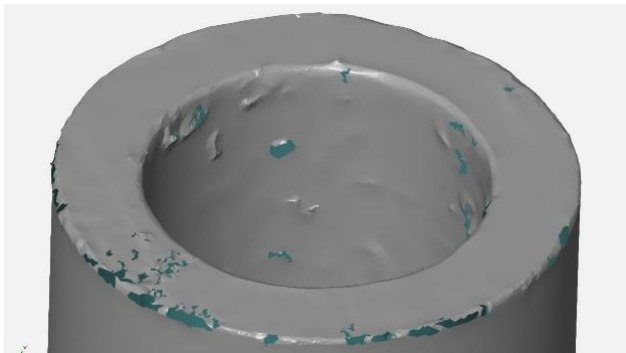
tvarov pred ťahaním vo vzdialenosti 13 mm mali väčšiu odchýlku od priemernej hodnoty, a to z dôvodu vytvorenia neúplného obrysu vnútorného priemeru, čo následne viedlo k nepresnému vytvoreniu best-fit kružnice predstavujúcej vnútorný priemer vzorky rúry. Po ťahaní sa rozptyl hodnôt ako priemerov vzoriek rúr, tak aj odchýlok od geometrických tvarov, výraznejšie nemenil [3].

Tab. 2. Namerané hodnoty v jednotlivých rezoch - po ťahaní [3]

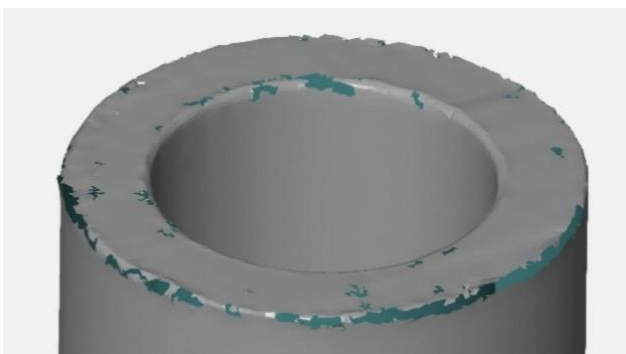
Vzdialenosť rezu [mm]	D1 [mm]	D2 [mm]	Kruhovitosť		Sústrednosť
			D1	D2	
3	11,988	7,832	0,01	0,03	0,02
5	11,989	7,828	0,01	0,03	0,02
7	11,989	7,827	0,01	0,03	0,02
9	11,990	-	0,01	-	-
11	11,991	-	0,01	-	-
13	11,991	-	0,01	-	-
15	11,992	-	0,01	-	-
17	11,992	-	0,01	-	-
19	11,993	-	0,01	-	-
21	11,994	-	0,02	-	-
23	11,995	-	0,01	-	-
25	11,997	-	0,02	-	-
27	11,997	-	0,01	-	-
29	11,997	-	0,01	-	-
31	11,998	-	0,02	-	-

## 2.2 Vyhodnotenie nameraných hodnôt pri znečistenej vzorke rúry

Ďalšie experimentálne meranie bolo zamerané na vyhodnotenie vplyvu znečistenia vzorky rúry na namerané hodnoty. Konce rúr boli po ťahaní zdeformované, preto ich bolo nutné zarovnať pomocou píly. Proces pílenia zanechal vo vnútornom priestore vzorky rúry kovové triesky a tento experiment skúmal ich vplyv na výsledky merania. Namerané hodnoty rozmerov a geometrických tvarov očistenej (1) a neočistenej (1') vzorky rúry boli následne porovnané. Z tab. 3 je evidentné, že vnútorný priemer rúry zanesenej kovovými trieskami v porovnaní s priemerom očistenej rúry bol menší takmer o stotinu milimetra, t. j. o 0,09 mm. Znečistenie malo vplyv aj na hodnotu kruhovitosti, ktorá sa zmenila o 0,04. Z uvedeného experimentu vyplýva, že povrch objektu je nutné pred digitalizáciou dôkladne očistiť za účelom dosiahnutia čo najväčšej presnosti merania [3].



a)



b)

Obr. 7. Porovnanie nameraných hodnôt [3]:  
a) znečistenej vzorky rúry kovovými trieskami,  
b) očistenej vzorky rúry

Tab . 3. Porovnanie hodnôt čistej a znečistenej vzorky rúry [3]

Č.	D1 [mm]		D2 [mm]		Hrúbka steny [mm]		R [%]	Kruhovitosť				Sústrednosť	
	pred	po	pred	po	pred	po	pred	po		po		pred	po
1	18,001	11,988	13,949	7,832	2,026	2,078	36,391	D1	D2	D1	D2		
1'	18,001	11,982	13,949	7,823	2,026	2,080	36,393	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02

### 2.3 Vyhodnotenie nameraných hodnôt z hľadiska rôznych nastavení polygonizácie

Uvedené experimentálne meranie bolo zamerané na zhodnotenie vplyvu rôznych nastavení polygonizácie v softvéri *GOM Inspect Suite 2020* na výstupné hodnoty. Polygonizácia vytvára z naskenovaného mraku bodov (polygónovú) sieť (.stl model), ktorá tieto body spája do jedného celku. Meranie bolo vykonané pred ťahaním na neorezanej rúre, konkrétne na vzorke s vonkajším priemerom Ø18 mm a hrúbkou steny 1 mm [3].

V softvéri *GOM Inspect* parametre *No*, *More details*, *Standard*, *Less details* a *Smallest data volume* pri polygonizácii ovplyvňujú úroveň detailov a veľkosť výsledného súboru po vytvorení trojuholníkovej siete z mraku bodov. Tieto možnosti nastavujú mieru zjednodušenia modelu pri zachovaní dostatočnej presnosti pre konkrétne účely:

- *No*: Tento parameter znamená, že žiadne zjednodušenie nebude použité. Softvér použije maximálne detaily z pôvodných dát mraku

bodov, čo zachová najvyššiu úroveň presnosti. Táto voľba generuje najväčšie súbory a môže spôsobiť, že model bude preťažovať výkon počítača pri vizualizácii alebo ďalšom spracovaní,

- *More details*: Tento parameter zachová veľa detailov, ale aplikuje jemné zjednodušenie, aby sa zmenšila veľkosť súboru. Trojuholníková sieť (.stl model) má vysokú presnosť a detaily sú stále na vysokej úrovni. Objem dát bude o niečo menší ako pri voľbe *No*,
- *Standard*: Vyvážená voľba medzi úrovňou detailov a veľkosťou súboru. Používa sa, keď je potrebná dostatočná presnosť modelu, ale aj optimalizovaná veľkosť súboru. Je to vhodná možnosť pre väčšinu aplikácií, kde presnosť detailov nemusí byť absolútne maximálna, ale stále postačuje pre bežné využitie v analýze alebo vizualizácii,
- *Less details*: Tento parameter znižuje úroveň detailov viac než *Standard*, čím vytvára ešte menší súbor. V tejto voľbe sú zachované základné tvary a kontúry, ale jemné detaily sa strácajú. Tento režim je vhodný, ak model je potrebný pre rýchlu vizualizáciu alebo analýzu, kde nie sú potrebné vysoké detaily,

- *Smallest data volume*: Táto voľba aplikuje najväčšiu mieru zjednodušenia, aby sa minimalizoval objem dát. Výsledná trojuholníková sieť má najmenší počet trojuholníkov. Táto voľba je vhodná na rýchle náhľady alebo v prípadoch, kde je nutné šetriť pamäť počítača, pričom sa obetuje veľká časť detailov.

Rozdiely medzi nimi teda spočívajú najmä v počte a veľkosti trojuholníkov, ktoré tvoria výslednú sieť, a tým aj v úrovni detailov a objeme dát vo výslednom súbore.

Uvedeným experimentom bolo zistené (tab. 4), že jednotlivé nastavenia polygonizácie nemajú významný vplyv na výsledky merania, nakoľko rozdiely medzi nimi sú v desiatich milimetroch. Najväčší rozdiel nastavení bol vo vzhlade polygonizovaných modelov, pričom niektoré mali viac vyhladenú štruktúru povrchu v porovnaní s inými. Polygonizácia nemala zásadný vplyv ani na veľkosť jednotlivých súborov modelov [3].

**Tab. 4. Porovnanie nameraných hodnôt pri rôznych nastaveniach polygonizácie [3]**

Nastavenie	D1 [mm]	D2 [mm]
No	17,97637	16,02247
More details	17,97741	16,02464
Standard	17,97763	16,02348
Less details	17,97756	16,02493
Smallest data volume	17,97744	16,23260

## ZÁVER

3D digitalizované boli vzorky oceľových bezšvíkových rúr, ktoré boli experimentálne ťahané za studena na jeden ťah pomocou trhacieho stroja EU 40. Metóda optického 3D skenovania sa mimoriadne osvedčila [3].

Ako jej výhody možno uviesť získanie kompletného digitálneho modelu vzorky rúry, ku ktorej bolo možné sa kedykoľvek vrátiť bez potreby ďalšieho skenovania [3].

Hlavnou nevýhodou tejto metódy 3D digitalizácie bolo nedostatočné skenovanie vnútorného priemeru, ktoré bolo pri vzorke rúry pred ťahaním možné do vzdialenosti približne 13 mm a pri rúre po ťahaní to bolo už len do vzdialenosti cca 7 mm, avšak pre potreby tohto experimentu boli tieto vzdialenosti dostačujúce. I keď povrch digitalizovaných vzoriek rúr bol lesklý, optické 3D skenovanie sa realizovalo bez použitia zmatňujúceho kriedového spreja. Bolo to hlavne z dôvodu možného skreslenia nameraných výsledkov, keďže by na povrchu skenovanej rúry vznikla tenká vrstva po sprejovaní, a tým spôsobila nárast hrúbky materiálu. Ako ďalší dôvod možno udať zníženie finančnej náročnosti a skrátenie času digitalizácie [3].

## Pod'akovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-18-0418 (Výskum príčin vzniku geometrických odchýlok pri výrobe bezšvíkových rúr a ich technologická dedičnosť s dôrazom na tvarovú stabilitu presných rúr ťahaných za studena s využitím metrologických systémov).

Článok vznikol s podporou grantovej úlohy KEGA 026STU-4/2023 (Implementácia inovatívnych foriem učenia a praktického tréningu do vzdelávania v oblasti výrobných technológií a výrobného manažmentu s cieľom zvýšiť atraktivnosť štúdia a podporiť rozvoj prierezových kompetencií absolventov).

## LITERATÚRA

[1] MOROVIČ, L. - KRITIKOS, M. - DELGADO SOBRINO, D. R. - BÍLIK, J. - SOBOTA, R. - KAPUSTOVÁ, M. (2022): *A Statistical Approach in the Analysis of Geometrical Product Specification during the Cold Tube Drawing Process*. In: Applied Sciences, MDPI, Vol. 12, No. 2, pp. 1-22, ISSN 2076-3417.

[2] GÖRÖG, A. - MOROVIČ, L. - KRITIKOS, M. (2023): *Measurement of Dimensional and Geometric Accuracy of Tubes*. 1. vyd. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 114 p., ISBN 978-80-7380-919-5.

[3] HAVRAN, F. (2021): *Vyhodnotenie presnosti vybraných rozmerov bezšvíkových oceľových rúr pomocou 3D digitalizácie* [Diplomová práca]. Trnava: Slovenská technická univerzita v Bratislave; Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav výrobných technológií. 71 s. Vedúci práce: doc. Ing. Ladislav Morovič, PhD.

[4] GROSS, L. (2022): *Získavanie dát 3D digitalizáciou a vyhodnotenie geometrických tolerancií oceľových bezšvíkových rúr ťahaných za studena* [Diplomová práca]. Trnava: Slovenská technická univerzita v Bratislave; Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav výrobných technológií. 76 s. Vedúci práce: doc. Ing. Ladislav Morovič, PhD.

[5] KRITIKOS, M. - BURANSKÝ, I. - BURANSKÁ, E. - MOJŽIŠ, M. (2019): *Evaluation of accuracy of seamless steel tube scanning by industrial computed tomography*. In: Modern Technologies in Manufacturing (MTeM 2019): 14th International Conference, 09-12.10., Cluj-Napoca, Romania. 1. vyd. United Kingdom: EDP Sciences, pp. 1-8, ISBN 978-2-7598-9083-5.

[6] BÍLIK, J. - SOBOTA, R. - NECPAL, M. (2023): *Výroba bezšvíkových rúr. Teoretickotechnologické aspekty výroby*. 1. vyd. Bratislava: Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve SPEKTRUM, 71 p., ISBN 978-80-227-5308-1.

[7] BÍLIK, J. - SOBOTA, R. - KAPUSTOVÁ, M. - KRITIKOS, M. (2021): Vplyv veľkosti pretvorenia na presnosť rúr pri prievlačnom ťahaní jedno a dvojťahovou technológiou. In: Technológ, EDIS - vydavateľstve UNIZA, Vol. 13, No. 3, pp. 20-24, ISSN 1337-8996.

[8] GOM. (2011): GOM ATOS TripleScan. User Manual – Hardware. Braunschweig: GOM mbH.

[9] MOROVIČ, L. (2016): *Non-Contact Measurement of Free-Form Surfaces*. 1. vyd. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 90 p., ISBN 978-80-7380-628-6.

---

# Ergonomics in extended reality: addressing challenges and enhancing user experience

---

## **Ľuboslav Dulina, prof. Ing., PhD.**

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina KPI,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: [luboslav.dulina@fstroj.uniza.sk](mailto:luboslav.dulina@fstroj.uniza.sk), Tel.: +421 41 513 2709

## **Ján Zuzik, Ing.\***

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina KPI,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: [jan.zuzik@fstroj.uniza.sk](mailto:jan.zuzik@fstroj.uniza.sk), Tel.: + 421 41 513 2710

## **Vladimíra Biňasová, Ing., PhD., DiS.**

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina KPI,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: [vladimira.binasova@fstroj.uniza.sk](mailto:vladimira.binasova@fstroj.uniza.sk), Tel.: +421 41 513 2727

## **Beáta Furmannová, Ing., PhD.**

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: [beata.furmannova@fstroj.uniza.sk](mailto:beata.furmannova@fstroj.uniza.sk), Tel.: +421 41 513 2711

## **Marián Matys, Ing., PhD.**

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: [marian.matys@fstroj.uniza.sk](mailto:marian.matys@fstroj.uniza.sk), Tel.: + 421 41 513 2740

**Abstract:** *Extended Reality (XR)* technologies, encompassing *Virtual Reality (VR)*, *Augmented Reality (AR)*, and *Mixed Reality (MR)*, are rapidly transforming various industries, offering innovative solutions for training, design, and collaboration. However, the integration of *XR* into work environments introduces new ergonomic challenges that must be addressed to ensure user safety, comfort, and performance. This article explores the role of ergonomics in *XR*, emphasizing the importance of physical, cognitive, and organizational ergonomics. It highlights the need for well-designed *XR* devices to minimize physical strain, the optimization of cognitive load to avoid mental fatigue, and the adaptation of organizational workflows to enhance collaboration in virtual spaces. Additionally, the article discusses the emerging issue of simulator sickness and its impact on *XR* applications. By increasing awareness of these ergonomic considerations, this work aims to contribute to the development of safer and more effective *XR* environments, ultimately enhancing user experience and productivity.

**Keywords:** industrial engineering, ergonomics, well-being, extended reality

---

## **INTRODUCTION**

*Extended Reality (XR)* technologies, including *Virtual Reality (VR)*, *Augmented Reality (AR)*, and *Mixed Reality (MR)*, are increasingly used in various fields, including ergonomics. They allow for the simulation of work environments and the evaluation of working conditions without the need for physical devices or prototypes. However, their use is not without

challenges - one of the most significant being simulator sickness [1-3].

Simulator sickness is a condition that can cause dizziness, nausea, or disorientation in users while using *XR* devices. These discomforts arise from a mismatch between what the user sees and what their body perceives. This issue can significantly impact user comfort, limit the duration of *XR* usage, and

reduce the reliability of results obtained from such simulations [4-6].

The aim of this article is to raise awareness of how simulator sickness affects the use of *XR* technologies in ergonomics. Better understanding this issue is essential to enable more effective utilization of *XR* in the analysis and optimization of working conditions [7-9].

## 1 CHARACTERISTICS OF EXTENDED REALITY

*Extended Reality* is a collective term used to describe technologies that blend the physical and digital worlds. It includes *VR*, *AR*, and *MR*, each offering unique ways to interact with and experience digital content. These technologies are rapidly transforming industries by providing immersive and innovative solutions for training, simulation, and design [10, 15].

### 1.1 Virtual reality

*Virtual Reality* immerses users in a completely digital environment, replacing their physical surroundings with a computer-generated world. Using *VR* headsets, users can explore virtual spaces, interact with objects, and perform tasks as if they were in the real world. This makes *VR* particularly useful for training, gaming, and simulating complex or dangerous environments [10, 15].

### 1.2 Augmented reality

*Augmented Reality* overlays digital elements, such as text, images, or 3D models, onto the real world. Unlike *VR*, *AR* does not replace the physical environment but enhances it by adding interactive content. Common examples include mobile applications like *Pokémon GO* or *AR*-assisted navigation systems. In ergonomics, *AR* can be used to visualize design changes directly in a workspace [10, 15].

### 1.3 Mixed Reality

*Mixed Reality* goes a step further by allowing digital and physical elements to interact in real-time. For example, a digital object in *MR* can be anchored to a physical table and manipulated as if it were a tangible item. This technology is still evolving but shows promise for collaborative design and real-time problem-solving [10, 15].

The *XR* spectrum encompasses all these technologies, ranging from fully immersive *VR* to minimally augmented *AR*. This continuum demonstrates the flexibility of *XR*, making it applicable across various fields. In ergonomics, *XR* technologies provide powerful tools for analysing and improving workplaces without the constraints of physical prototyping [10, 15].

In Fig. 1 below, a preview of the *XR* spectrum can be seen.



Fig. 1. A preview of the *XR* spectrum [16]

## 2 CHARACTERISTICS OF ERGONOMICS

*Ergonomics* is the science of designing and arranging work environments, tools, and tasks to fit the needs and capabilities of people. Its primary goal is to optimize performance, safety, and comfort while reducing the risk of injuries or fatigue. By understanding the interactions between humans and their surroundings, ergonomics helps create systems that enhance productivity and well-being [10, 15].

### 2.1 Key areas of ergonomics

The following key areas are known in ergonomics [4, 6, 7]:

- *physical ergonomics*,
- *cognitive ergonomics*,
- *organizational ergonomics*.

*Physical ergonomics* focuses on how the human body physically interacts with tools, tasks, and workspaces, aiming to improve posture, reduce repetitive strain, and prevent *musculoskeletal disorders (MSDs)*.

*Cognitive ergonomics* examines mental processes like perception, attention, and decision-making, seeking to design systems that minimize mental workload, enhance focus, and reduce the likelihood of errors.

*Organizational ergonomics* deals with optimizing workflows, communication, and team structures to improve efficiency, collaboration, and overall workplace dynamics.

The importance of ergonomics is evident in various industries, from manufacturing to healthcare and office work. By designing tools and processes that align with human capabilities, ergonomics not only prevents injuries but also improves efficiency and job satisfaction.

## 3 RELEVANCE OF XR IN ERGONOMICS

The integration of *XR* into ergonomics allows for simulations that closely replicate real-world

conditions. Designers and engineers can evaluate how people interact with their environments, test new tools or layouts, and identify potential risks - all in a safe and controlled setting. However, as promising as *XR* may be, challenges such as simulator sickness need to be addressed to fully unlock its potential [4, 6, 7].

This foundational understanding of *XR* and its spectrum sets the stage for exploring its applications and limitations, particularly in the context of ergonomic assessments and human factors research [4, 6, 7].

#### 4 SIMULATOR SICKNESS

The first *VR* headsets sparked a wave of criticism from users due to the frequent occurrence of motion sickness. Motion sickness occurs when the vestibular sensory input does not align with visual stimuli. This was one of the main reasons for the decline of early virtual reality development. Motion sickness is caused by a mismatch between the signals from the vestibular system and the eyes. The brain then detects this inconsistency and concludes that the body is affected by illness or toxins. As a result, the brain may trigger headaches, nausea, disorientation, or dizziness. Using a *VR* headset can induce a type of motion sickness that doesn't require actual movement, known as simulator sickness [14, 15].

Several methods have been proposed to combat simulator sickness, including unconventional approaches. A study from the *Department of Computer Graphics Technology at Purdue University* suggested adding a *virtual nose* to every *VR* application, which had a stabilizing effect on the user. The company *Virtualis LLC* commercialized this virtual nose under the name *nasum virtualis*. Adding a nose to the user's field of view serves as a fixed reference point to reduce the effects of simulator sickness. The physical nose is within the field of vision, but it is often unnoticed by the person. Most volunteers in studies conducted by *Virtualis LLC* also did not perceive the virtual nose but experienced a 13.5 % reduction in the severity of simulator sickness. Furthermore, they were able to spend longer periods in the virtual world. An example of the *virtual nose* is shown in Fig. 2 [14, 15].



Fig. 2. Demonstration of the *virtual nose* [14, 15]

Another effective method for reducing the effects of simulator sickness is decreasing the response time between the user's actual movements and the *VR* application's reaction. In the real world, there is no latency between the movement of our body and the world around us. Eliminating latency in the virtual world is crucial. An important factor is also the number of *frames per second (FPS)* in the application. The higher this number, the smoother the movements and reactions in the virtual world, enhancing the overall experience [14, 15].

#### CONCLUSIONS

In conclusion, the integration of *XR* technologies into various industries presents both exciting possibilities and new challenges for ergonomics. As *XR* technologies such as *VR*, *AR*, *MR* continue to evolve, it is crucial to apply ergonomic principles to ensure that these immersive environments are not only effective but also safe and comfortable for users.

Physical ergonomics in *XR* must prioritize the design of wearable devices and virtual spaces to prevent discomfort and strain, while cognitive ergonomics must address the mental demands placed on users in complex digital environments. Additionally, organizational ergonomics plays a key role in optimizing how teams interact within *XR* environments, ensuring that these virtual spaces facilitate collaboration without introducing new stressors.

Although *XR* offers numerous benefits in training, design, and productivity, its full potential can only be realized if ergonomic considerations are incorporated into every stage of its development and deployment. As these technologies become more embedded in everyday life, understanding and mitigating issues like simulator sickness and physical fatigue will ensure that *XR* experiences are sustainable and user-friendly. By prioritizing ergonomics, we can harness the power of *XR* while safeguarding user well-being and enhancing overall performance.

#### Acknowledgments

*This work was supported by project contract No. VEGA1/00524/22 and VEGA 1/0633/24.*

#### REFERENCES

- [1] ANTONIUK, I. - SVITEK, R. - KRAJČOVIČ, M., FURMANOVA, B. (2021): *Methodology of design and optimization of internal logistics in the concept of Industry 4.0*. In: *Transportation Research Procedia*, 55, 503-509.
- [2] BURGANOVA, N. - GRZNAR, P. - MOZOL, Š. (2020): *Design of logistics system in production*. In: *Technologie, procesy i systemy produkcyjne*. Bielsko-Biala, Wydawnictwo naukowe Akademii

techniczno-humanistycznej w Bielsku-Białej, p. 11-18, ISBN 978-83-66249-56-1.

[3] VAVRÍK, V. - FUSKO, M. - BUČKOVÁ, M. - GAŠO, M. - FURMANNOVÁ, M. - ŠTAFENOVÁ, M. (2022): *Designing of machine backups in reconfigurable manufacturing systems*. In: Applied Sciences, 12(5), p. 1-27, ISSN 2076-3417.

[4] FILIPOVÁ, I. - DULINA, L. - BIGOŠOVÁ, E. - PLINTA, D. (2021): *Modern Possibilities of Patient Transport Aids*. In: 14th International scientific conference on sustainable, modern, and safe transport (Transcom 2021). Virtual conference 26 May - 28 May, Slovakia, Transportation Research Procedia, 55, pp. 510-517.

[5] BUČKOVÁ, M. - GAŠO, M. - PEKARČÍKOVÁ, M. (2020): *Reverse logistic*. In: InvEnt: Industrial engineering - Invention for enterprise: proceedings. Bielsko-Biała: Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej, pp. 36-39, ISBN 978-83-66249-48-6.

[6] SLAMKOVÁ, E. - DULINA, L. - TABAKOVÁ, M. (2010): *Ergonómia v priemysle*. Žilina: GEORG knihárstvo, 262 p., ISBN 978-80-89401-09-3.

[7] DULINA, L. (2023): *Uplatnenie ergonomie vo výrobných a logistických systémoch*. Žilinská univerzita v Žiline: EDIS, 106 s, ISBN 978-80-554-1960-2.

[8] KRAJČOVIČ, M. - PLINTA, D. (2012): *Comprehensive approach to the inventory control system improvement*. In: W: Management and Production Engineering Review, Vol. 3, No. 3, p. 34-44, ISSN 2080-8208.

[9] PLINTA, D. - WIECEK, D. - MIELCAREK, D. (2011): *Analysis of working conditions on the example of assembly workplaces*. In: W: MOPP: 13. ročník mezinárodního semináře: Modelování

a optimalizace podnikových procesů, Česká republika, Plzeň 24-25.11., pp. 1-7, ISBN 978-80-261-0060-7.

[10] FURDYGIEL, P. - PLINTA, D. (2020): *Production process improvement system*. In: Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Bielsko-Biała.

[11] GREGOR, T. - MAJOR, M. - GREGOR, M. (2016): *Štíhly podnik - princípy, stavebné kamene a zásady implementácie*. In: Časopis ProIN 5-6, pp. 25-29, ISSN 1339-2271.

[12] GRZNÁR, P., et al. (2019): *An optimization methodology for sustainable development of production lines*. In: Zarządzanie Przedsiębiorstwem. Vol. 22, No. 4, pp. 2-6.

[13] BARBUŠOVÁ M. - BIGOŠOVÁ E. - ČECHOVÁ I. (2018): *Systém merania produktivity v podniku*. In: Projekt interdyscyplinárny projektem XXI storočia. Monografia. Bielsko-Biała. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej, ISBN 978-83-65182-92-0.

[14] MEALY, P. (2018). *Virtual & augmented reality for dummies*. Hoboken: John Wiley & Sons, 352 p., ISBN 978-1-119-48152-2.

[15] MATYS, M. (2023): *Utilization of virtual reality tools for virtual training creation*. [dissertation thesis]. Department of Industrial Engineering. Faculty of Mechanical Engineering. University of Zilina. Zilina, 176 p.

[16] PC Expres (2024):

<https://www.pcxpres.sk/blog/virtualna-realita-rozsirena-realita-a-zmiesana-realita>, last accessed 2024-11-21. Virtual reality, augmented reality and mixed reality [online].

---

# Model nelineárneho oscilátora

---

## Ján Minárik, Ing.\*

Katedra aplikovanej matematiky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.  
E-mail: jan.minarik@fstroj.uniza.sk

## Branislav Ftorek, doc. Mgr., PhD.

Katedra aplikovanej matematiky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.  
E-mail: branislav.ftorek@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 4962

## Radoslav Chupáč, RNDr., PhD.

Katedra aplikovanej matematiky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.  
E-mail: radoslav.chupac@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 4954

## A model of a nonlinear oscillator

**Abstract:** This article deals with a simple nonlinear model of mechanical system. Nonlinear mechanical model described by a nonlinear system of differential equations can lead to interesting phenomena. The linearized analytical solution is compared with the numerical solution obtained by the *Runge-Kutta method* in the *MATLAB* environment.

**Keywords:** nonlinear oscillations, differential equation, *Lagrangian mechanics*

---

## ÚVOD

Kmitanie a vibrácie sú prirodzeným javom, ktorý sprevádza činnosť takmer každého stroja. V praxi sú vibrácie a kmitanie strojných súčastí väčšinou považované za negatívny jav, ktorý je potrebné v čo najväčšej miere eliminovať z dôvodu zvýšenej záťaž pre zariadenia. Vibrácie môžu viesť k poruchám a v hraničných prípadoch až k deštrukcii častí zariadení, nepresnostiam výroby, uvoľňovaniu spojov a rôznym iným medzným stavom. Vibrácie a nimi spôsobený hluk taktiež predstavujú pre človeka významné zdravotné riziko. Javy spojené s kmitaním a rôznym typom vibrácií sú prítomné takmer pri každom zariadení, pričom sa vždy nemusí jednať len o stroje s pohyblivými časťami, ale aj o statické konštrukcie, ktoré môžu byť zaťažované dynamicky alebo sa nachádzajú v blízkosti zdroja vibrácií.

Medzi zdroje vibrácií strojných zariadení patria pohyblivé a rotujúce časti, ložiská, dotýkajúce sa povrchy, ozubené kolesá atď. Zdrojom kmitania môžu byť aj zaťažujúce sily, impulzy síl a momentov pri činnosti spaľovacích motorov alebo prúdiace tekutiny. Pri periodickom pohybe pohyblivých častí pôsobia dynamické reakčné sily, ktoré sa prenášajú na zvyšok konštrukcie a vyvolávajú jej vibrácie. Vibrácie a hluk sú významným ukazovateľom pri

meraní a diagnostike strojov. Zvýšené vibrácie a hluk môžu byť prejavom poškodenia alebo blížiaceho sa medzného stavu zariadenia [1, 2].

Matematickým modelom kmitajúceho systému s jedným stupňom voľnosti je diferenciálna rovnica 2. rádu. Koeficienty rovníc sú vo všeobecnosti funkcie závislé od času. Je to napríklad lineárny oscilátor s nekonštantnými tlmiacimi a tuhostnými charakteristikami.

Reálne deje sú častokrát nelineárne a ich matematický popis obsahuje nelineárne diferenciálne rovnice, resp. systémy týchto rovníc. V takýchto prípadoch môžeme použiť numerické metódy alebo niekedy tiež kombinácie numericko-analytických aproximácií. Okrem toho existujú linearizačné procedúry, ktoré umožňujú analytické riešenie problému, dochádza však z princípu ku vzniku rôznych typov nepresností, ktoré toto riešenie môžu úplne znehodnotiť.

V prípade nelineárnych systémov môžeme taktiež hovoriť o vlastnom, tlmenom alebo vynútenom kmitaní. Vo všeobecnom prípade má pohybová rovnica takýchto systémov tvar:

$$\ddot{y} = F(y, \dot{y}, t). \quad (1)$$

Jednou z vlastností nelineárnych systémov je, že ich perióda závisí aj od amplitúdy ich kmitov.

Ak časovo závislé veličiny v rovnici (1) dokážeme separovať v podobe samostatnej funkcie, dostaneme rovnicu núteného kmitania v tvare:

$$\ddot{y} + w(y, \dot{y}) = F(t). \quad (2)$$

Ak navyše nevažujeme budiace sily, pri zanedbanom tlmení systému, dostaneme najjednoduchší tvar nelineárnych pohybových rovníc vyjadrujúci vlastné netlmené kmitanie:

$$\ddot{y} + w(y) = 0. \quad (3)$$

Člen  $w(y)$ , ktorý je nelineárnou funkciou výchylky, sa zvyčajne označuje ako elastická charakteristika. Nelineárne fyzikálne fenomény môžu byť popísané rovnicou s časovo závislými členmi:

$$x + \omega_0^2 \cdot x + \varepsilon \cdot f(t, x, \dot{x}) = 0. \quad (4)$$

V prípade malého parametra  $\varepsilon$ ,  $0 < \varepsilon \ll 1$  sa môžu pri riešení použiť známe *asymptotické metódy* [3, 4].

Štúdium nelineárnych systémov je perspektívnou oblasťou aplikovaného výskumu, ktorá aj v súčasnosti zaznamenáva značný rozvoj, pričom nelineárna dynamika a nelineárne dynamické systémy sú neoddeliteľnou súčasťou inžinierskej praxe (pozri napr. práce [5, 6]).

## 1 LAGRANGEOVE ROVNICE

Zostavovanie pohybových rovníc v iných ako *kartézskych* súradniciach je zvyčajne komplikované, a to najmä pri komplexnejších sústavách telies. Samotná znalosť *Newtonovho zákona* v prípade zložitejších úloh preto nepredstavuje efektívny spôsob zostavovania pohybových rovníc. Vhodnou alternatívou, ktorá poskytuje ekvivalentné výsledky, či už v ľubovoľných súradnicových systémoch alebo tiež pri zložitých sústavách telies, je zostavenie pohybových rovníc metódami analytickej mechaniky [7].

Zovšeobecnené súradnice predstavujú súbor ľubovoľných parametrov, ktorými je možné jednoznačne určiť polohu bodu, bez ohľadu na zvolený súradnicový systém:

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_i(q_1, q_2, \dots, q_k, t). \quad (5)$$

kde  $\mathbf{r}_i$  je polohový vektor  $i$ -teho bodu.

Súbor  $k$  zovšeobecnených súradníc je možné zapísať skráteno ako  $q = \{q_k\}$ . Derivácia týchto súradníc podľa času je súbor zovšeobecnených rýchlostí, t. j.:

$$\frac{dq}{dt} = \dot{q} = \{\dot{q}_k\}. \quad (6)$$

Stav mechanickej sústavy je v danom časovom okamihu jednoznačne určený jej polohou a rýchlosťou. Na základe týchto parametrov je možné vypočítať pohyb sústavy v nasledujúcom okamihu, resp. všeobecne vývoj jej stavu.

Stav mechanickej sústavy popisujeme funkciou:

$$L(q, \dot{q}, t) = T - V. \quad (7)$$

*Lagrangeova funkcia (Lagrangian)* je definovaná ako rozdiel kinetickej  $T$  a potenciálnej energie  $V$ . Princíp najmenšieho účinku je variačným princípom a hovorí, že sústava sa pri pohybe medzi dvoma polohami správa tak, aby funkcionál:

$$S = \int_{q_1}^{q_2} L(q, \dot{q}, t) \cdot dt \rightarrow \min. \quad (8)$$

nadobúdal minimálnu hodnotu. Integrál (8) sa nazýva účinnok. Počiatočná a konečná poloha sústavy sú dané súradnicami  $q(t_1)$   $q(t_2)$ .

S využitím metód variačného počtu je možné odvodiť všeobecný tvar pohybových rovníc:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} = 0 \quad (9)$$

*Euler-Lagrangeove rovnice* sú sústava diferenciálnych rovníc 2. rádu, ktorých počet zodpovedá počtu zovšeobecnených súradníc a ktorých riešením sú funkcie  $q_k(t)$ , určujúce dráhy jednotlivých bodov.

Pre všeobecnejší prípad, kedy na sústavu nepôsobia len potenciálové sily, môžeme zaviesť pojem zovšeobecnená sila  $Q$ :

$$Q_k = \sum_i X_i \cdot \frac{\partial x_i}{\partial q_k} + Y_i \cdot \frac{\partial y_i}{\partial q_k} + Z_i \cdot \frac{\partial z_i}{\partial q_k} \quad (10)$$

kde  $X_i, Y_i, Z_i$  sú zložkami síl  $F_i$ .

Ak navyše uvažujeme aj tlmiace sily, ktoré sú v tomto prípade lineárnymi funkciami rýchlosti (viskózne tlmenie), môžeme rovnako zaviesť zovšeobecnú odporovú silu  $Q_0$ . Pre uvedené odporové sily platí vzťah  $F_{0i} = -\dot{\mathbf{r}}_i \cdot b_i$ , kde  $b_i$  určuje koeficient tlmenia  $i$ -tej sily. Zovšeobecnené sily  $Q_0$  sú potom dané vzťahom:

$$Q_{0k} = \sum_i -b_i \cdot \left( \dot{x}_i \cdot \frac{\partial x_i}{\partial q_k} + \dot{y}_i \cdot \frac{\partial y_i}{\partial q_k} + \dot{z}_i \cdot \frac{\partial z_i}{\partial q_k} \right) \quad (11)$$

Zovšeobecnené odporové sily je súhrnne možné vyjadriť pomocou *Rayleighovej disipatívnej funkcie*:

$$R_D = \sum_i \frac{1}{2} \cdot b_i \cdot (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2) \quad (12)$$

S uvažovaním uvedených síl môžeme zapísať všeobecnejší tvar *Euler-Lagrangeových rovníc* [7]:

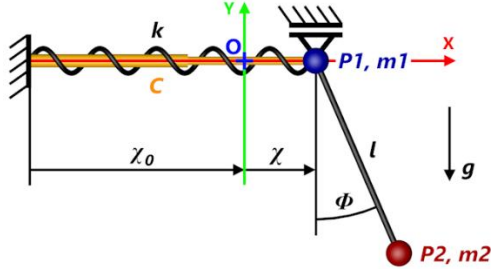
$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} = Q_k - \frac{\partial R_D}{\partial q_k} \quad (13)$$

## 3 MODEL NELINEÁRNEJ SÚSTAVAVY

Modelovaná sústava je zobrazená na obr. 1. Ide o rovinné kyvadlo tvorené hmotným bodom  $P_2$ , s hmotnosťou  $m_2$ , na závese dĺžky  $l$ , ktoré je uchytené

na horizontálnom oscilátore (bod  $P_1$ ), s hmotnosťou  $m_1$ . Pružina oscilátora má počiatočnú dĺžku  $\chi_0$ , jej tuhosť je  $k$  a koeficient tlmenia  $C$ . Model uvažujeme ako sústavu hmotných bodov, hmotnosti závesu a pružiny, tiež príslušné momenty zotrvačnosti preto zanedbávame. Veľkosť tiažového zrýchlenia je  $g$ .

Poloha sústavy je definovaná pomocou dvoch zovšeobecnených súradníc  $\chi$  a  $\Phi$ . Rovnovážna poloha oscilátora sa nachádza v strede súradnicovej sústavy, ktorý zodpovedá bodu  $O$ .



Obr. 1. Kyvadlo na kmitajúcom závese

Najskôr zostavíme *Lagrangian* sústavy v tvare:

$$L = T - V. \quad (14)$$

Kinetická energia bodu  $P_1$  je potom daná ako:

$$T_{P_1} = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot \dot{\chi}^2 \quad (15)$$

Poloha bodu  $P_2$  je  $x_{P_2} = \chi + l \cdot \sin \phi$ ,  $y_{P_2} = -l \cdot \cos \phi$  a po derivácii  $\dot{x}_{P_2} = \dot{\chi} + l \cdot \dot{\phi} \cdot \cos \phi$ ,  $\dot{y}_{P_2} = l \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi$ .

Kinetická energia bodu  $P_2$  je:

$$T_{P_2} = \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot (\dot{x}_{P_2}^2 + \dot{y}_{P_2}^2) \quad (16)$$

Pre kinetickú energiu sústavy potom platí:

$$T = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot \dot{\chi}^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot (\dot{\chi}^2 + l^2 \cdot \dot{\phi}^2 + 2 \cdot l \cdot \dot{\chi} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos \phi) \quad (17)$$

Potenciálna energia  $V$  je daná:

$$V = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \chi^2 + m_2 \cdot g \cdot (l - l \cdot \cos \phi) \quad (18)$$

Po zanedbaní konštantných členov môžeme *Lagrangian* sústavy zapísať ako:

$$L = T - V = \frac{1}{2} \cdot \left[ m_1 \cdot \dot{\chi}^2 + m_2 \cdot (\dot{\chi}^2 + l^2 \cdot \dot{\phi}^2 + 2 \cdot l \cdot \dot{\chi} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos \phi - k \cdot \chi^2) \right] + m_2 \cdot g \cdot l \cdot \cos \phi \quad (19)$$

Tlmiaca sila  $F_O$  je úmerná rýchlosti predĺženia pružiny, ktorá zodpovedá zovšeobecnenej rýchlosti  $\dot{\chi}$ . *Rayleighova disipatívna funkcia* má preto tvar:

$$R_D = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \dot{\chi}^2 \quad (21)$$

Odporová sila  $F_O$  je potom daná ako:

$$F_O = -\frac{\partial R_D}{\partial \dot{\chi}} = -C \cdot \dot{\chi} \quad (22)$$

Pretože  $R_D$  je funkciou len zovšeobecnenej rýchlosti  $\dot{\chi}$ , bude odporová sila  $F_O$  vystupovať len v rovnici patriacej k zovšeobecnenej súradnici  $\chi$ .

Pre derivácie *Lagrangeovej funkcie* (4) príslúchajúcej k súradnici  $\phi$  platí:

$$\frac{\partial L}{\partial \phi} = m_2 \cdot l \cdot (l \cdot \dot{\phi} + \dot{\chi} \cdot \cos \phi), \quad (23)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} \right) = m_2 \cdot l \cdot (l \cdot \ddot{\phi} + \ddot{\chi} \cdot \cos \phi - \dot{\chi} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi), \quad (24)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \phi} = -m_2 \cdot l \cdot \sin(\phi) \cdot (\dot{\chi} \cdot \dot{\phi} + g). \quad (25)$$

Po dosadení vzťahov **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**, (25) do (9) a následnej úprave dostávame prvú pohybovú rovnicu:

$$l \cdot \ddot{\phi} + \ddot{\chi} \cdot \cos \phi + g \cdot \sin \phi = 0. \quad (26)$$

Pre derivácie patriace k súradnici  $\chi$  analogicky platí:

$$\frac{\partial L}{\partial \chi} = (m_1 + m_2) \cdot \dot{\chi} + m_2 \cdot l \cdot \dot{\phi} \cdot \cos \phi, \quad (27)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\chi}} \right) = (m_1 + m_2) \cdot \ddot{\chi} + m_2 \cdot l \cdot (\ddot{\phi} \cdot \cos \phi - \dot{\phi}^2 \cdot \sin \phi). \quad (28)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \chi} = -k \cdot \chi. \quad (29)$$

S uvažovaním odporovej sily (22) a (13) má druhá pohybová rovnica tvar:

$$m_2 \cdot l \cdot \ddot{\phi} \cdot \cos \phi + (m_1 + m_2) \cdot \ddot{\chi} - m_2 \cdot l \cdot \dot{\phi}^2 \cdot \sin \phi + k \cdot \chi + C \cdot \dot{\chi} = 0. \quad (30)$$

Rovnice (26) a (30) sú systémom nelineárnych diferenciálnych rovníc druhého rádu. Zavedieme substitúciu:

$$y_1 = X = \dot{\chi}, \quad y_2 = \Phi = \dot{\phi}, \quad y_3 = \ddot{\chi}, \quad y_4 = \ddot{\phi}, \quad (31)$$

Tým dostávame sústavu štyroch rovníc:

$$y_1 = \dot{\chi} = X \quad (32)$$

$$y_2 = \dot{\phi} = \Phi$$

$$y_3 = \dot{\chi} =$$

$$= \frac{m_2 \cdot g \cdot \sin(2 \cdot \phi) + 2 \cdot \Phi^2 \cdot l \cdot \sin \phi - 2 \cdot k \cdot \chi - 2 \cdot C \cdot X}{2 \cdot (m_1 + m_2 \cdot \sin^2 \phi)}$$

$$y_4 = l \cdot (m_1 + m_2 \cdot \sin^2 \phi) \cdot \Phi =$$

$$= g \cdot \sin \phi \cdot (m_1 + m_2 \cdot \sin^2 \phi) + \cos \phi \cdot (k \cdot \chi + C \cdot X) -$$

$$-\frac{m_2}{2} \cdot \sin(2 \cdot \phi) \cdot (g \cdot \cos \phi + l \cdot \Phi^2).$$

Systém rovníc (32) bol následne riešený numericky v prostredí *MATLAB* s využitím funkcie *ODE45* vychádzajúcej z metódy *Runge-Kutta-Fehlberg (RKF)*.

Po linearizácii *Lagrangiánu* (14) môžeme odvodiť lineárne pohybové rovnice, ktoré sú riešiteľné analyticky. Predpokladáme, že toto riešenie bude v dostatočnej miere zodpovedať skutočnému pohybu sústavy len pre malé hodnoty zovšeobecných parametrov.

*Linearizovaný Lagrangián* sústavy je v tvare:

$$L = \frac{1}{2} \cdot [m_1 \cdot \dot{\chi}^2 + m_2 \cdot (\dot{\chi}^2 + l^2 \cdot \dot{\phi}^2 + 2 \cdot l \cdot \dot{\chi} \cdot \dot{\phi}) - k \cdot \chi^2] - m_2 \cdot g \cdot l \cdot \frac{\phi^2}{2}. \quad (33)$$

Lineárne pohybové rovnice je možné odvodiť rovnakým spôsobom ako v predošlom prípade. Majú tvar:

$$l \cdot \ddot{\phi} + \ddot{\chi} + g \cdot \phi = 0 \quad (34)$$

$$m_2 \cdot l \cdot \ddot{\phi} + (m_1 + m_2) \cdot \ddot{\chi} + k \cdot \chi + C \cdot \dot{\chi} = 0.$$

Sústavu (34) môžeme v tvare matíc zapísať ako:

$$\begin{pmatrix} 1 & l \\ m_1 + m_2 & m_2 \cdot l \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \ddot{\chi} \\ \ddot{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & g \\ k & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \chi \\ \phi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ C & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\chi} \\ \dot{\phi} \end{pmatrix}. \quad (35)$$

Zavedením funkcií  $X = \dot{\chi}$  a  $\Phi = \dot{\phi}$  dostávame sústavu 4 rovníc prvého rádu v maticovom tvare:

$$\begin{pmatrix} \dot{\chi} \\ \dot{\phi} \\ \dot{X} \\ \dot{\Phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k}{m_1} & \frac{m_2 \cdot g}{m_1} & -\frac{C}{m_1} & 0 \\ \frac{k}{m_1 \cdot l} & -\frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{m_1 \cdot l} & \frac{C}{m_1 \cdot l} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \chi \\ \phi \\ X \\ \Phi \end{pmatrix}. \quad (36)$$

Sústava  $n$  homogénnych lineárnych diferenciálnych rovníc s konštantnými koeficientami je v maticovom tvare daná:

$$y' = A \cdot y, \quad (37)$$

kde  $A$  je konštantná matica sústavy s rozmerom  $n \times n$ .

Riešením (37) je všeobecne ľubovoľný vektor:

$$y = [y_1(t), \dots, y_n(t)]^T. \quad (38)$$

Ak vektory  $y^1(t)$ ,  $y^2(t)$ , ...,  $y^k(t)$  sú lineárne nezávislé riešenia (37), potom ich lineárna kombinácia je všeobecným riešením pre ľubovoľné konštanty  $c_i$ , t. j.:

$$y(t) = \sum_{i=1}^k c_i \cdot y^i(t). \quad (39)$$

Predpokladáme, že riešenie (37) má tvar:

$$y = k \cdot e^{\lambda t}, \quad (40)$$

kde  $k$  je vektor,

$\lambda$  neznáme číslo.

Po dosadení predpokladaného riešenia do (37) dostaneme problém nájsť vlastné čísla a vektory štvorcovej matice  $A$  [8]:

$$\det(A - \lambda \cdot I) = 0, \quad (41)$$

$$(A - \lambda \cdot I) \cdot k = 0, \quad (42)$$

kde  $\lambda$  je vlastné číslo matice,

$k$  je príslušný vlastný vektor matice  $A$ ,

$I$  označuje jednotkovú maticu.

Pre dané konkrétne parametre:

$$\left( m_1 [\text{kg}]; m_2 [\text{kg}]; l [\text{m}]; k \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}} \right]; C \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}} \right]; g \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \right) = (1,25; 1,5; 1,4; 25; 2,5; 9,81), \quad (43)$$

má analytické riešenie lineárnej sústavy (36) tvar:

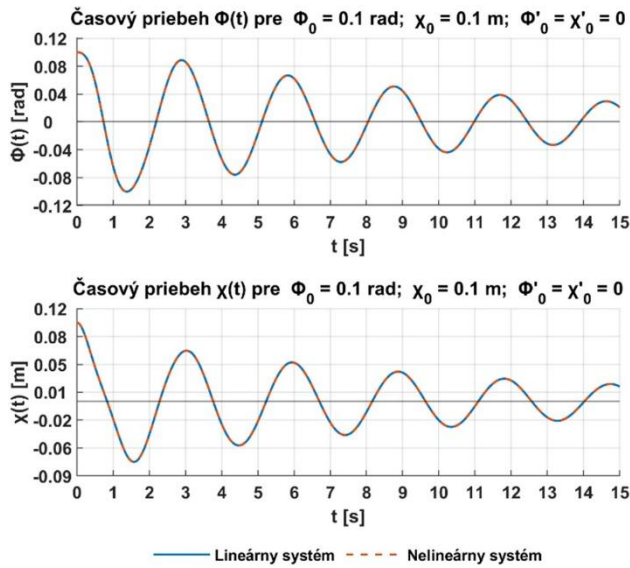
$$\begin{aligned} \phi &= c_1 \cdot e^{-0,90t} \cdot [0,02 \cdot \cos(5,47 \cdot t) - 0,13 \cdot \sin(5,47 \cdot t)] + \\ &+ c_2 \cdot e^{-0,90t} \cdot [0,02 \cdot \sin(5,47 \cdot t) + 0,13 \cdot \cos(5,47 \cdot t)] + \\ &+ c_3 \cdot e^{-0,10t} \cdot [-0,07 \cdot \cos(2,15 \cdot t) + 0,24 \cdot \sin(2,15 \cdot t)] + \\ &+ c_4 \cdot e^{-0,10t} \cdot [-0,07 \cdot \sin(2,15 \cdot t) - 0,24 \cdot \cos(2,15 \cdot t)] \\ \chi &= c_1 \cdot e^{-0,90t} \cdot [-0,03 \cdot \cos(5,47 \cdot t) + 0,12 \cdot \sin(5,47 \cdot t)] + \\ &+ c_2 \cdot e^{-0,90t} \cdot [-0,03 \cdot \sin(5,47 \cdot t) - 0,12 \cdot \cos(5,47 \cdot t)] + \\ &+ c_3 \cdot e^{-0,10t} \cdot [-0,01 \cdot \cos(2,15 \cdot t) + 0,33 \cdot \sin(2,15 \cdot t)] + \\ &+ c_4 \cdot e^{-0,10t} \cdot [-0,01 \cdot \sin(2,15 \cdot t) - 0,33 \cdot \cos(2,15 \cdot t)]. \end{aligned} \quad (44)$$

Pre zvolené počiatkové podmienky majú potom konštanty  $c_i$  hodnoty:

$$c_1 \doteq 0,08; c_2 \doteq 0,21; c_3 \doteq -0,06; c_4 \doteq -0,68. \quad (46)$$

Z porovnania priebehov na obr. 2 je vidieť, že pre malé hodnoty zovšeobecných súradníc sú riešenia

nelineárneho systému (32) a linearizovaného (36) prakticky identické, v celom rozsahu časového intervalu.



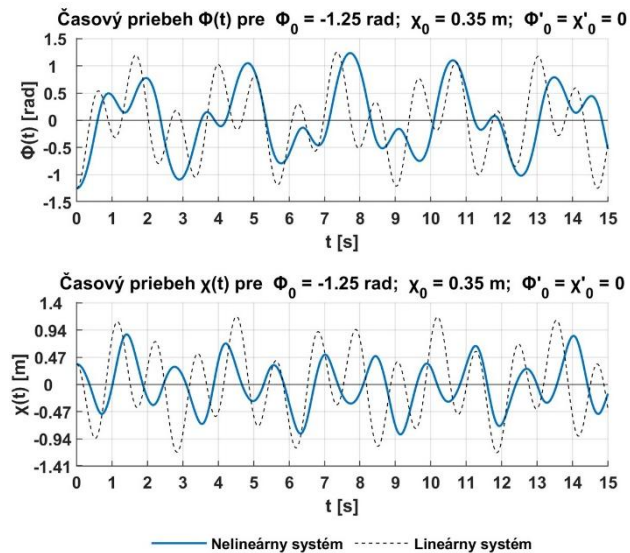
Obr. 2. Riešenie (32) a (36) pre malé výchylky

Keďže je sústava tlmená, dochádza k postupnému poklesu výchyliek, čím je zároveň vo veľkej miere potláčané nelineárne správanie systému.

Riešenie systému pre veľké výchylky s počiatočnými podmienkami:

$$\begin{aligned} \phi_0 &= -1,25 \text{ rad}; \chi_0 = 0,35 \text{ rad} \\ \dot{\phi}_0 &= 0 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}; \dot{\chi}_0 = 0 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned} \quad (47)$$

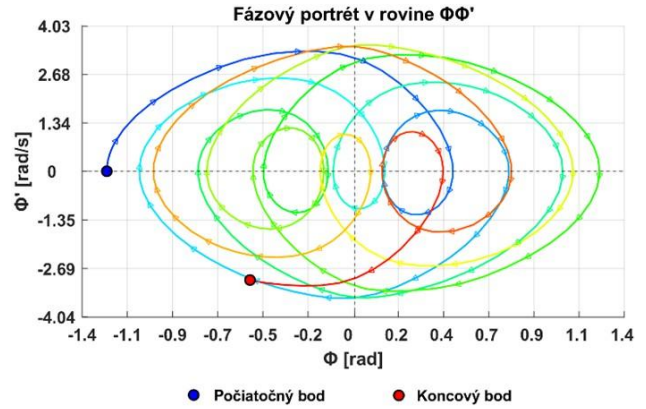
je na obr. 3.



Obr. 3. Riešenie (32) a (36) pre veľké výchylky

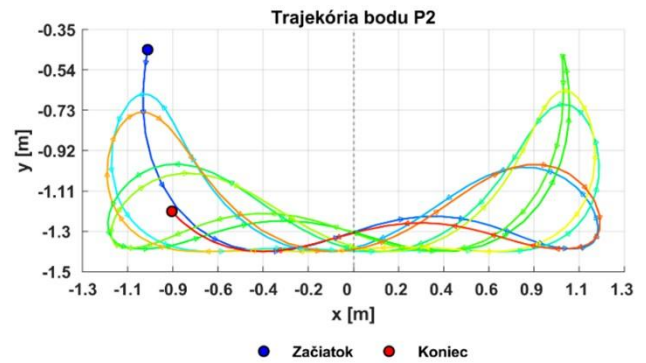
Parametre sústavy zostali rovnaké ako v predošlom prípade, pričom však bolo zanedbané tlmenie ( $C = 0$ ), aby nebolo potláčané nelineárne správanie sústavy.

Fázový portrét pre zovšeobecnenú súradnicu  $\phi$  je uvedený na obr. 4.



Obr. 4. Fázový portrét nelineárnej sústavy (32)

Grafické priebehy riešení ukazujú, že v prípade väčších výchyliek sa periodickosť riešení stráca a ich správanie sa stáva chaotickým. Pre úplnosť je uvedené aj riešenie lineárneho systému (36), ktoré sa od toho numerického výrazne odlišuje prakticky už od začiatku pohybu.



Obr. 4. Trajektória koncového bodu pre (32)

## ZÁVER

Modelom mnohých dejov okolo nás je dynamický systém, ktorého stav sa spojitne mení v čase.

Podľa parametrov fyzikálneho modelu rozlišujeme *sústredené parametry*, ktoré sú opisované *obyčajnými diferenciálnymi rovnicami* a *systémy s rozloženými parametrami*, ktorých modelom sú *parciálne diferenciálne rovnice*. Teória dynamických systémov a diferenciálnych rovníc patrí medzi klasické oblasti matematiky a jej aparát je používaný pre vedecko-technické výpočty v rôznych aplikovaných oblastiach.

Diferenciálne rovnice, ktoré sú matematickým modelom kmitajúcich sústav, dokážeme riešiť analyticky len v prípade lineárnych rovníc s konštantnými koeficientami a bez prípadných nelineárnych členov. Riešenie nelineárnych sústav značne komplikuje neplatnosť *princípu superpozície*.

Niektoré približné analytické metódy poskytujú pomerne dobré aproximácie riešení nelineárnych diferenciálnych rovníc, no veľakrát sme nútení používať len numerické algoritmy. Tie sú do značnej miery robustné a spoľahlivé, avšak neumožňujú nám globálny pohľad na analyzovaný nelineárny systém.

V nelineárnych sústavách vznikajú a sú prítomné fenomény, ktoré v lineárnych sústavách neexistujú, napr. chaos, bifurkácie riešení, subharmonické a ultraharmonické kmity, solitónové riešenia vlnových rovníc a pod. [9].

### Pod'akovanie

Táto práca bola vytvorená v rámci projektu KEGA 025ŽU-4/2024 Implementácia nových didaktických prostriedkov pre zvýšenie kvality výučby matematiky v inžinierskom stupni štúdia na technických VŠ.

### LITERATÚRA

- [1] MINÁRIK, J. (2024): *Kmitanie mechanických sústav*. Diplomová práca, Strojnícka fakulta UNIZA, Edis.
- [2] SMETANA, C. a kol. (1998): *Hluk a vibrace, měření a hodnocení*. 1. Vyd. Praha: Sdělovací technika, 188 s., ISBN 80-901936-2-5.
- [3] STRUBLE, R. A. (1962): *Nonlinear differential equations*. McGraw-Hill book company, New York.
- [4] MURRAY, J. D. (1984): *Asymptotic analysis*. In: Applied mathematical sciences, Springer-Verlag, New-York.

[5] YAKUBU, G. - OLEJNIK, P. - AWREJEWICZ, J. (2022): *On the Modeling and Simulation of Variable-Length Pendulum Systems: A Review*. In: Archives of Computational Methods in Engineering, 29 (4), pp. 2397-2415.

[6] DOBIÁŠ, I. (1988): *Nelineární dynamické soustavy s náhodnými vstupy*. Praha, Academia-nakladatelství ČSAV, 208 s.

[7] LANDAU, L. V. - LIFSHITZ, E. M. (1976): *Mechanics: Volume 1 (Course of Theoretical Physics)*. Oxford: Butterworth-Heinemann, ISBN 978-0-7506-2896-9.

[7] SÁGA, M. - ŽMINDÁK, M. - DEKÝŠ, V. - SAPIETOVÁ, A. - SEGLA, Š. (2009): *Vybrané metody analýzy a syntézy mechanických sústav*. 1. Vyd. Žilina: VTS pri Žilinskej univerzite, 360 s., ISBN 978-80-89276-17-2.

[8] DIBLÍK, J. - RŮŽIČKOVÁ, M. (2008): *Obyčejné diferenciální rovnice*. 1. Vyd. Žilina: EDIS-vydavatelství UNIZA, 312 s., ISBN 978-80-8070-891-7.

[9] STROGATZ, S. H. (1994): *Nonlinear dynamics and chaos*. Westview Press, Cambridge.

---

# Analysis of programs for operational and systems analysis

---

## Vladimíra Biňasová, Ing., PhD., DiS.\*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: vladimira.binasova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2727

## Branislav Mičieta, prof. Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: Branislav.micieta@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2702

## Martin Buzalka, Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: martin.buzalka@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2721

## Marta Kasajová, Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: marta.kasajova@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2707

## Ján Zuzik, Ing.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: jan.zuzik@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2748

**Abstract:** This paper deals with the selection and comparison of programs that students could use when preparing semester papers in the subject of Operational and Systems Analysis. The analysis consists of a comparison of work in selected software based on selected criteria, such as the availability of programs for students, the language in which the programs are written, the time spent on preparing individual assignments and the correctness of their results. The final part evaluates the benefits of the paper and the selection of the most suitable programs for individual types of tasks.

**Keywords:** operational analysis, system analysis, mathematical method, program

---

## 1 INTRODUCTION

Linear programming is a mathematical method for solving problems that allows managers to make optimal decisions. Linear programming is a part of mathematical programming and therefore also of operational analysis, which deals with solving decision-making problems that involve determining the sizes of the implementation of processes that are or may be taking place in a given system [1-6]. It allows converting real processes into mathematical models and using a mathematical approach to subsequently solve them. In general, we can

characterize these problems as having to determine the optimal value of a linear function on the set of solutions of a system of linear equations and inequalities. Many practical problems lead to problems of this type. A manufacturer produces several types of products. He has a certain amount of various means of production at his disposal, for example, raw materials, working time, wages, and production equipment. The manufacturer knows how much of the  $i$ -th means is necessary to produce one  $j$ -th product. He also knows what the profit is from selling a unit quantity of individual products. The task

is to design and plan production so that the manufacturer, with given capacities of means, produces exactly such quantities of goods that maximize profit. The quantity of chemical substances whose content in the required mixture interests us is given [7]. We also know the proportion of these chemical substances in the semi-finished products (raw materials) that we have available for preparing the given mixture. We know the minimum (or maximum) quantities of individual chemical substances that a unit quantity of the required mixture should contain. The prices for unit quantities of the given semi-finished products are also given. The task is to determine what quantities of the semi-finished products that we have available need to mix to obtain the required mixture at minimal cost. In the subject of Operations and Systems Analysis, students are introduced to the basic concepts of systems science and a systems approach to solving complex problems as part of their semester papers. Semester papers are focused on solving practical decision-making problems using mathematical models and methods within linear programming tasks. In the past, students used the *WinQSB* program for calculations and visualization of results, which is no longer supported. The program was available only in the computer labs of the *Department of Industrial Engineering*. This often resulted in time-consuming work on assignments during exercises. Therefore, we decided to look for free programs that are available to students at any time as a replacement [8-10]. The programs are differentiated, meaning that we use different programs for different types of tasks. They are all freely available, which results in certain necessary requirements, such as the need for registration or the need to use a certain time-limited trial version, which is free. The individual software programs are divided into three groups according to the type of tasks for which they are intended, namely the solution of *Linear Programming* 1 tasks, network graph tasks and the associated creation of *Gantt charts*.









Názov	Logo	Typ úlohy	Link - prepojenie
Simplex Tode		OVP	<a href="https://www.mdpi.com">https://www.mdpi.com</a>
AtoZmath		OVP, RP, OZ	<a href="https://cbom.atozmath.com/CBOM/Simplex.aspx?q=s m">https://cbom.atozmath.com/CBOM/Simplex.aspx?q=s m</a>
Zweigmedia		OVP, RP, OZ	<a href="https://www.zweigmedia.com/simplex/simplex.php?lang=en">https://www.zweigmedia.com/simplex/simplex.php?lang=en</a>
MathsTools		OVP, PR, OZ	<a href="https://www.mathstools.com/section/main/simplex_online_calculator#.XrartKg zZPb">https://www.mathstools.com/section/main/simplex_online_calculator#.XrartKg zZPb</a>
Creately		Sieťové grafy	<a href="https://creately.com/">https://creately.com/</a>
MS Project		Sieťové grafy, Ganttov diagram	[-]
Tom's Planner		Ganttov diagram	<a href="https://www.tomsplanner.com/">https://www.tomsplanner.com/</a>
Easy Project		Ganttov diagram	<a href="https://www.easypj.com/">https://www.easypj.com/</a>

Fig. 1. Analyzed programs

More detailed analyses of the work in individual programs are included in point 3. The main comparison criteria (Fig. 1) include the correctness of the results, the availability of the software, the working environment, and the possibilities of saving and exporting the results. Programs for network graph tasks are intended for a sample display of pre-calculated results using software. The output of the analyzed programs is therefore a finished network graph or *Gantt chart* [11-13].

## 2 PROGRAM ATOZMATH

The software is freely available without the need to download or install. It is shown in Fig. 2. To work in it, registration or entering personal data is not required. The program is in *English*. Working in it is slightly difficult, some explanation is needed. The program allows changing the sign of the objective function. This means that it can also calculate tasks on the optimal mixture and optimal cutting plan. After entering the structural conditions and the objective function, we work out the results using the Find button.

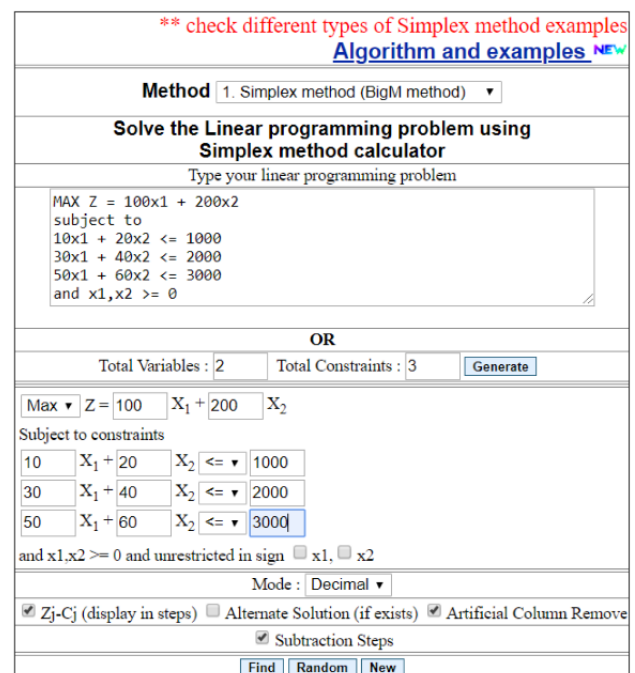


Fig. 2. Program AtoZmath [6]

The results are displayed in three steps, each of which requires confirmation and a 15-second wait. The website interface also offers a number of unwanted advertisements, which do not affect the functionality, only the aesthetics. The program offers several methods of calculating *Simplex algorithms*, which can be seen in Fig. 3.

The results from program *AtoZmath* are shown in Fig. 4.

We will reach the result of the graphical solution after the third step and a short time interval. When

changing the parameters of the variable display, we must also go through all three steps of displaying the results again. The resulting solution is shown in Fig. 5.

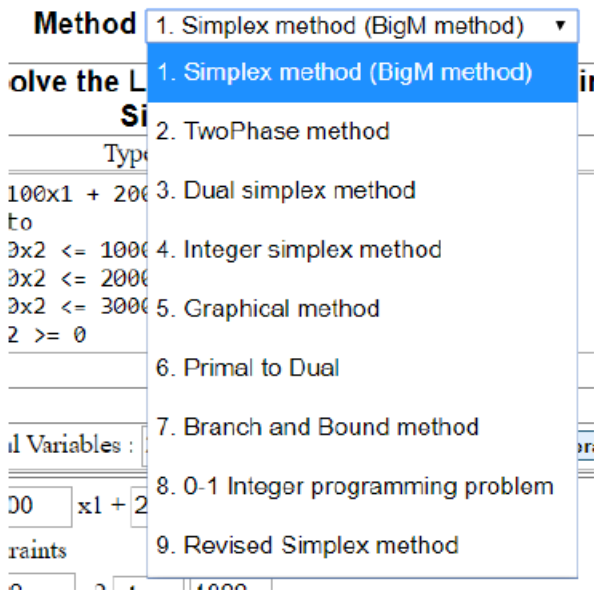


Fig. 3. Calculation methods [6]

The value of the objective function at each of these extreme points is as follows:

Extreme Point Coordinates $(x_1, x_2)$	Lines Through Extreme Point	Objective function value $Z = 100x_1 + 200x_2$
$O(0, 0)$	$4 \rightarrow x_1 \geq 0$ $5 \rightarrow x_2 \geq 0$	$100(0) + 200(0) = 0$
$A(50, 0)$	$3 \rightarrow 40x_1 + 60x_2 \leq 3000$ $5 \rightarrow x_2 \geq 0$	$100(50) + 200(0) = 5000$
$B(3, 5)$	$1 \rightarrow 10x_1 + 20x_2 \leq 100$ $2 \rightarrow 20x_1 + 40x_2 \leq 200$	$100(3) + 200(5) = 1000$

The maximum value of the objective function  $Z = 10000$  occurs at the extreme point  $(0, 50)$ .  
Hence, the optimal solution to the given LP problem is  $x_1 = 0, x_2 = 50$  and  $\max Z = 10000$ .

Fig. 4. The first version of AtoZmath results [6]

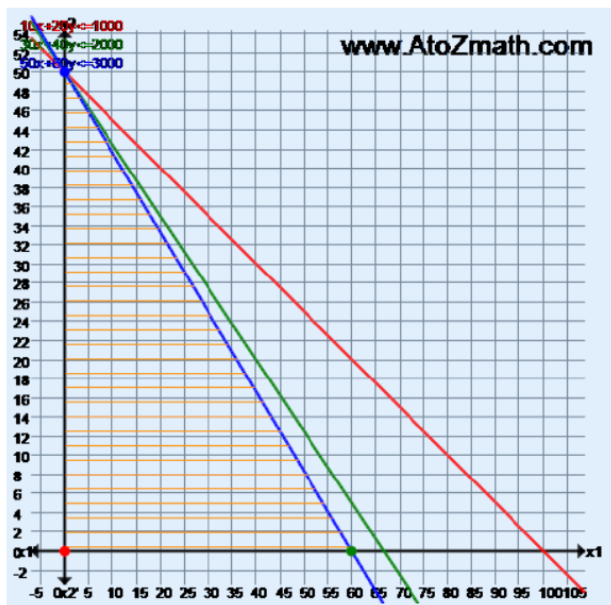


Fig. 5. Graphical solution of AtoZmath

### 3 CONCLUSION

I will evaluate the work in individual programs according to the following criteria correctness of results and output, language, length of work

availability of programs, advantages and disadvantages.

The correctness of the result is the most important for the assignment. All the programs I compared offered the correct result, so I will focus on the output of the results. This means whether the results are clear and whether they can be used in semester papers without modification. The length of the work represents the time spent in a given program. This criterion includes not only the length of work necessary to develop the assigned example, but also the time needed to understand and navigate the environment of the selected software. The criterion of program availability includes all the necessary steps that are necessary to be able to work in the program. Some programs are available anytime and anywhere for free and without registration, while others require registration or entering an email address.

The programs being compared are freely available on the Internet without the need for registration or entering personal data. All four found the correct result, but *Simplex Tode* can only calculate tasks on the optimal production plan. Nevertheless, its great advantages are a simple working environment, *Czech* language and short time of work in it. All software generate results in the form of tables with the optimal solution. The *AtoZmath* program also offers a graphical method of solving tasks. Therefore, I recommend using the graphical solution for all three types of linear programming tasks using the *AtoZmath* program. For solving using the Simplex method, I choose the *MathsTools* software for all types of tasks and the *Simplex Tode* program for tasks on the optimal production plan.

For assignments on network graphs, I recommend the *Creately program*. Working with it is very simple and fast. The creation of a network graph itself ideally takes half an hour and the resulting output can be easily exported directly into a semester paper. Using this software, we can create a sample network graph in a relatively short time. However, it should be added that registration and entering an email address are required to work with it.

For creating *Gantt charts*, I definitely recommend the *Tom's Planner program*. The software is directly designed for creating *Gantt charts*, so it provides everything you need for their creation. Creating a chart is very easy and we also have the option of adding a number of other options, such as adding a description, creating a legend and highlighting the critical path. The result of the work is a clear *Gantt chart* that can be easily exported.

On the other hand, I find the work in *Easy Project* to be lengthy and demanding. The software is mainly designed for working within broad corporate projects. Nevertheless, it can also be used for study purposes

and can create a satisfactory, but less clear *Gantt chart*. For both programs, it is necessary to register.

## Acknowledgements

This work was supported by project contract No. VEGA100524/22 and VEGA 1/0633/24.

## REFERENCES

- [1] ANTONIUK, I. - SVITEK, R. - KRAJCOVIC, M. - FURMANNOVA, B. (2021). *Methodology of design and optimization of internal logistics in the concept of Industry 4.0*. In: Transportation Research Procedia, 55, 503-509.
- [2] BUCKOVA, M. - GASO, M. - PEKARCIKOVA, M. (2020): *Reverse logistic*. In: InvEnt 2020: Industrial engineering - Invention for enterprise - proceedings. Bielsko-Biala: Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humnistycznej.
- [3] BURGANOVA, N. - GRZMAR, P. - MOZOL, S. (2020): *Design of logistics system in production*. In: Technologie, procesy i systemy produkcyjne. Bielsko-Biala: Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Bialej, p. 11-18, ISBN 978-83-66249-56-1.
- [4] VAVRIK, V. - FUSKO, M. - BUČKOVÁ, M. - GASO, M. - FURMANNOVÁ, B. - STAFFENOVA, K. (2022): *Designing of machine backups in reconfigurable manufacturing systems*. In: Applied Sciences, Vol. 12, No. 5, p. 1-27, ISSN 2076-3417.
- [5] FILIPOVA, I. - DULINA, L. - BIGOSOVA, E. - PLINTA, D. (2021): *Modern Possibilities of Patient Transport Aids*. In: Transcom, Virtual conference 26 May - 28 May, Transportation Research Procedia, 55, pp. 510-517.
- [6] SUKALOVA, V. - STOFKOVA, Z. - STOFKOVA, J. (2022): *Human Resource Management in Sustainable Development*. In: Sustainability, Vol. 14, No. 21, 14258.
- [7] BEREŽNÝ, Š. - KRAVECOVÁ, D. (2012): *Lineárne programovanie*. [online]. [cit. 2019-12-20].
- [8] GANTTOV DIAGRAM (2016): [online]. [cit. 2019-11-15]. Available on: <https://managementmania.com/sk/ganttov-diagram-gantt-chart>
- [9] LINEÁRNE PROGRAMOVANIE 1 (2019): [online]. 2019, [cit. 2019-11-21]. Available on: [http://www.fbi.uniza.sk/ktvi/leitner/2\\_predmety/OA/Semester/P03\\_LP\\_modely,%20graficke%20riesenie.pdf](http://www.fbi.uniza.sk/ktvi/leitner/2_predmety/OA/Semester/P03_LP_modely,%20graficke%20riesenie.pdf)
- [10] TOMA, V. (2008): *Základy lineárneho programovania*. [online], [cit. 2019-11-22].
- [11] SLAMKOVÁ, E. - CAJCHANOVÁ, O. - CHROMJAKOVÁ, F. (1998): *Operačná a systémová analýza*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 181 p., ISBN 80-7100-467.
- [12] MÁČA, J. - Leitner, B. (1999): *Operačná analýza. I. diel*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 181 p., ISBN 80-88829-39-9.
- [13] SLAMKOVÁ, E. (1990): *Operačná a systémová analýza: Návod na cvičenia*. Bratislava: Alfa, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 177 p., ISBN 80-0500-2017.

## Magazin TECHNOLOG

*Publiziert werden wissenschaftliche, fachliche und Forschungsbeiträge, theoretische Abhandlungen, Anleitungen, Studien, Rezensionen, Informationen über die Bearbeitung der technischen Materialien. Der Fokus liegt auf Beiträgen und Arbeiten, die sich mit den Fragen aus dem Gebiet der Span- und Spanlosen Technologien, der physikalischen Prinzipien der unkonventionellen Technologien, der technologischen Konstruktion der Werkzeuge, der wirtschaftlichen Seite des Herstellungsprozesses, der Ökologie, so wie der Abfallverwertung befassen. Genauso werden Beiträge über Maschinen, Werkzeuge, Vorrichtungen und Messtechnik für den Bereich der mechanischen Technologien, Untersuchungsergebnisse über die Informationstechnologie im technologischen Bereich publiziert. Des Weiterem werden Beiträge über die Geschichte und die Entwicklung der mechanischen Technologie veröffentlicht. Das Magazin TECHNOLOG publiziert Beiträge in folgenden Sprachen: Slowakisch, Tschechisch, Polnisch, Russisch, Englisch und Deutsch.*

Alle Beiträge sind rezensiert und die Redaktion behält sich den Anspruch auf ihre Bearbeitung durch sie vor. Die Redaktion übernimmt keine Verantwortung für mögliche Schäden, die durch die Anwendung der Tätigkeiten, Methoden, Produkte, Ideen, Anleitungen etc. publiziert durch die Autoren der Beiträge verursacht werden.

**Evidenznummer MK SR-2800/08.**

**ISSN 1337-8996**

**Adresse der Redaktion: Universität Žilina, Fakultät Maschinenbau, Univerzitná 1, 01026 Žilina**

**Telefon: +421 (0) 41-513 2764, 513 2814,**

**Fax: +421 (0) 41-513 1535**

**Email: jan.moravec@fstroj.uniza.sk**

## Журнал ТЕХНОЛОГ

*Печатает научные, исследовательские, профессиональные, теоретические работы, инструкции, аналитические обзоры, рецензии, информации о переработке технических материалов. Направлен на печатание работ посвященных вопросам в области технологий обработки со стружкой и без, физикальных принципов нестандартных технологий, технологичности конструкции инструментов, экономики производственного процесса, экологизации, переработке отходов. Также публикует работы о машинах, инструментах, препаратах и измерительной технике для области механических технологий, результатов научных исследований в сфере информационных технологий в технологической области. Публикует статьи по истории и эволюции механических технологий. Журнал публикует статьи на языках: словацком, чешском, польском, русском, английском и немецком.*

Все статьи рецензируются и редакция оставляет за собой право их редакционного корректирования. Редакция не несет никакой ответственности за возможные повреждения вызванные использованием операций, методов, продуктов, идей, инструкций и т.д. в опубликованных авторами статьях.

**Регистрационный номер MK SR 2800 - /08.**

**ISSN 1337 – 8996**

**Адрес редакции: Žilinská univerzita, strojnica fakulta, Univerzitná 1, 01026 Žilina**

**Telefón: 041-513 2764, 513 2814**

**Fax: 041-513 1535**

**e-mail: jan.moravec@fstroj.uniza.sk**

**ISSN 1337-8996**

**DOI: <https://doi.org/10.26552/tech.J.2024.4>**