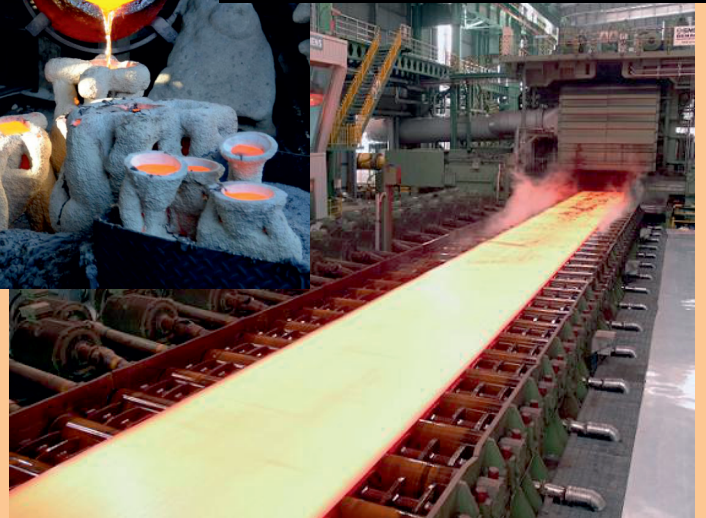
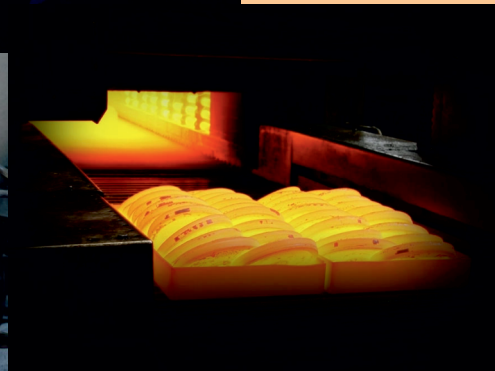
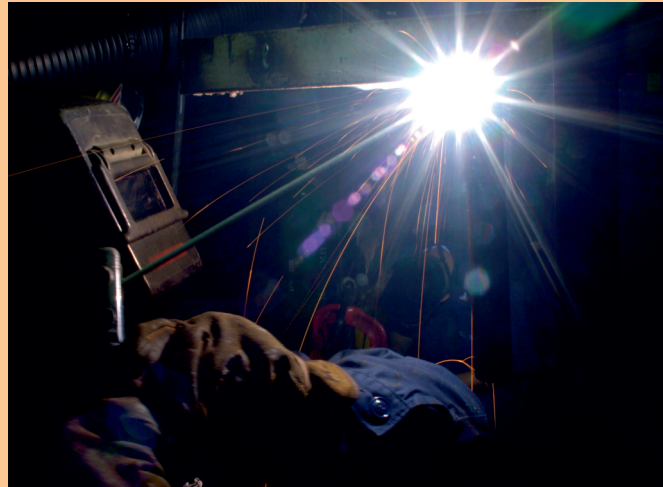
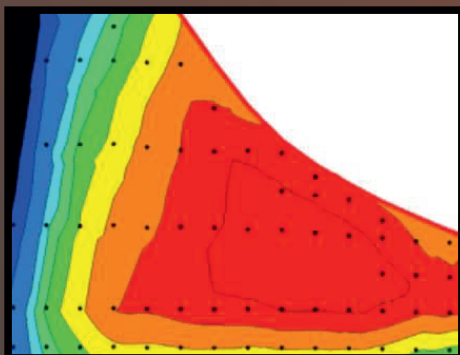


ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

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:**

**výkonný redaktor - executive editor:**

**redaktor - redactor:**

**vedecký redaktor - scientific editor:**

doc. Ing. Ján MORAVEC, PhD.

doc. Ing. Ján Dižo, PhD.

Ing. Elena Kantoríková, PhD.

prof. Ing. Jozef PILC, CSc.

**redakčná rada - editorial board:**

prof. Ing. Ivo SCHINDLER, CSc. (CZ)

doc. Ing. Silvia MALÁKOVÁ, PhD. (SK)

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

Ing. Vladimíra BIŇASOVÁ, PhD. (SK)

doc. Ing. Jozef BÍLIK, PhD. (SK)

doc. Dr. - Inž. Janusz MUSIAL (PL)

Dipl. Ing. Eva REGER (D)

doc. Ing. Ludmila DULEBOVÁ, PhD. (SK)

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

doc. Ing. Ján DIŽO, PhD. (SK)

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

doc. Ing. Ján MORAVEC, PhD. (SK)

prof. Ing. Jozef PILC, CSc. (SK)

Dr.h.c. prof. Ing. Karol VASILKO, DrSc. (SK)

prof. Ing. Eva TILLOVÁ, PhD. (SK)

prof. Ing. Peter DEMEČ, CSc. (SK)

prof. Ing. Jan SUCHÁNEK, CSc. (CZ)

prof. Dr. Ing. Milan SÁGA (SK)

prof. Ing. Oleksandr KRAVCHENKO, Dr.Tech.Sc. (UA)

prof. Dr. Ing. Miroslav NESLUŠAN (SK)

prof. Ing. Danka BOLIBRUCHOVÁ, 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>VAVRINEC BENEDIKTI Z NEDOŽIER</b>	<b>6</b>
<b>OCHRANA KOVOVÝCH MATERIÁLOV PRED CHEMICKÝM VPLYVOM PROSTREDIA PRI OHREVE</b> <i>Elena Kantoríková</i>	<b>11</b>
<b>HYDRAULICKÝ RÁZ A JEHO APLIKÁCIE V TVÁRNENÍ</b> <i>Ján Moravec</i>	<b>15</b>
<b>ANALÝZA MERANIA OPTICKÝM 3D SKENEROM A VÝSLEDKY MERANIA BEZŠVÍKOVÝCH OCEĽOVÝCH RÚR ŤAHANÝCH ZA STUDENA</b> <i>Ladislav Morovič, Jozef Bílik, Filip Havran</i>	<b>19</b>
<b>POROVNANIE SYSTÉMOV PRENOSU VÝKONU KOĽAJOVÝCH VOZIDIEL S NEZÁVISLOU TRAKCIOU</b> <i>Martin Bučko, Vladimír Samaš, Ján Dižo, Miroslav Blatnický</i>	<b>25</b>
<b>METHOD YAMAZUMI AND ITS APPLICATION</b> <i>Vladimíra Biňasová, Branislav Mičieta, Martin Buzalka, Marta Kasajová</i>	<b>29</b>
<b>ZDRUŽENÉ VOĽNÉ A ZÁPUSTKOVÉ KOVANIE</b> <i>Ján Moravec</i>	<b>33</b>
<b>UPLATNENIE PLÁNOVANÉHO EXPERIMENTU POČAS REALIZÁCIE KUDOVEJ SKŮŠKY</b> <i>Bohdan Savytskyi, Jozef Bílik, Janette Kotianová</i>	<b>37</b>
<b>ANALYSIS OF THE USE OF AGILE PROJECT METHODOLOGY</b> <i>Vladimíra Biňasová, Peter Bubeník, Martin Buzalka, Marta Kasajová</i>	<b>45</b>
<b>SYSTÈMES DE TRACTION ÉLECTRIQUE MODERNES: AVANTAGES DES MOTEURS PMSM DANS LE TRANSPORT FERROVIAIRE</b> <i>Vladimír Samaš, Martin Bučko, Juraj Gerlici, Ján Dižo, Miroslav Blatnický</i>	<b>49</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.

*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: “*Tajomstvom úspechu je vedieť niečo, čo iní nevedia.*”

Aristoteles Onassis

Vážení autori, čitatelia, priaznivci a priatelia, dostáva sa vám do rúk číslo 1 *Technológa* 2025. Možno publikované príspevky prinášajú nové riešenia, výsledky, resp. poznatky potrebné k riešeniu nejakej problematiky, ktorá vám je najbližšie. *Technológ*, vedecký časopis ponúka už sedemnášť rokov príspevky a články z veľkej sféry, prednostne strojárstva. Príspevky a potrebné informácie z publikovaných článkov vedeckého časopisu *Technológ* sú k dispozícii aj v jeho elektronickej verzii, takže sa dajú veľmi ľahko vyhľadať. *Technológ*, keďže vychádza v tlačenej a elektronickej verzii, ponúka záujemcovi široké možnosti. Hlavným cieľom a snahou redakčného kolektívu je ísť s dobou a priniesť zaujímavé a podnetné publikácie pre čo najširšie spektrum záujemcov a čitateľov. Publikované príspevky sú recenzované anonymne dvomi z uvedeného zoznamu recenzentov v každom konkrétnom čísle časopisu.

Všetkým nám prajem veľa zdravia a úspechov. Takisto verím, že náš časopis sa stane alebo už stal dôležitou súčasťou zdrojov informácií pre záujemcov v ich odbornej činnosti a práci.

*Ján Moravec*  
šéfredaktor a editor

**Vavrinec BENEDIKTI z Nedožier**(\*10. august 1555 *Nedožery Brezany* –  
†4. jún 1615, *Praha*)

Na hodinách matematiky sa často spomínajú mená *Archimedes, Euklides, Pytagoras, Newton* a ďalší. Vtedy sa žiaci často opýtajú: „*A čo Slováci? Tí ako prispeli do bohatej pokladnice matematických vedomostí?*“ Je zaujímavé, že autor prvej našej učebnice matematiky je známy. V 16. storočí neboli na území *Slovenska* žiadne možnosti vyššieho vzdelávania. Preto mladí ľudia odchádzali študovať do cudziny. V *Prahe* natrvalo zostal aj *Vavrinec Benedikti* (1555 - 1615) z *Nedožier*, od roku 1603 profesor matematiky a klasickej filológie na univerzite v *Prahe*. *Slovák*, známy ako jazykovedec, literárny teoretik, básnik, prekladateľ, pedagóg a školský reformátor. Do povedomia verejnosti sa dostal latinsky napísanou „*Gramatikou českého jazyka*“. Pre svojich študentov napísal a vydal dielo „*Elementa Aritmeticae*“ „*Základy aritmetiky*“. Je to prvá matematická práca, ktorej autorom je *Slovák*.

*Vavrinec Benedikt z Nedožier* alebo *Vavrinec Benedikt Nedožerský* (aj *Laurenc Benedikt Nudožerský, M. Laurentius Benedictus Nudozierinus*) bol *slovenský* humanista, básnik, pedagóg, klasický filológ, jazykovedec, matematik a hudobník.

*Vavrinec Benedikti Nedožerský* bol popredný *slovenský* humanistický vzdelanec, jedna z našich najvýraznejších a najvýznamnejších osobností z obdobia humanizmu a renesancie, a to nielen ako profesor, dekan *Filozofickej fakulty* a prorektor *Karlovej univerzity v Prahe*, ale aj ako pedagogický reformátor a autor diel obsahujúcich progresívne návrhy na reformu školstva, jazykovedec a tvorca po *latinsky* napísanej prvej systematickej gramatiky *českého* jazyka humanistický básnik a autor kníh o poetike, autor žalmových parafráz celého žaltára a hudobník presadzujúci nové formy v jeho zhudobnení či matematik a autor učebnice o základoch aritmetiky.

**ŽIVOTOPIS**

*Vavrinec Benedikti Nedožerský* pochádzal zo *Slovenska*, ako desaťročný navštevoval školu v *Prievidzi*. Po otcovej smrti odišiel do *Jihlavy* ku svojmu strýkovi *Samuelovi*, kde mal možnosť ďalej sa vzdelávať. Počas štúdií však prechladol a na niekoľko rokov ťažko ochorel. Uzdravil sa až roku 1587, keď v *Uhorsku* vypukli proti turecké boje. Po vyliečení a dokončení prípravných štúdií študoval na *Karlovej univerzite v Prahe* filozofiu a teológiu. V roku 1593 prijal miesto učiteľa v *Moravských Budějoviciach* a ďalšie dva roky bol rektorom v *Uherskom Brode*. V roku 1595 sa opäť vrátil do *Prahy*, aby ukončil štúdium na *Karlovej univerzite*: 16. septembra 1597 dosiahol na artistickej fakulte hodnosť bakalára za prácu na tému z vojenského umenia. Od 10. októbra 1599 krátko pôsobil ako rektor partikulárnej školy (gymnázia) v *Žatci*, ktorá bola vtedy po *Karlovej univerzite* najslávnejšou školou v *Čechách*. Dňa 4. júla 1600 rektor *Karlovej univerzity Martin Bacháček* promoval *Benedikta* ako licenciáta na magistra filozofie, čiže doktora, spolu s ďalšími ôsmimi kandidátmi. Od 20. júna 1602 do 3. júla 1603 bol *Benedikt* rektorom vyššej partikulárnej školy v *Nemeckom Brode* (dnes *Havlíčkov Brod*). V tom čase na *Slovensku* zúrili boje s *Turkami*. To, že *Benedikt* často myslel na svoju vlasť - rodné Slovensko, dokladá aj jeho *Píseň nová*, v ktorej sa zamýšľa nad nebezpečenstvom hroziacim svetu od *Turkov*. V nej žalostí nad vraždením svojich krajanov, plienením slovenských dedín a miest a vyzýva svojich spolurodákov, aby zanechali vzájomné spory a vrhli sa na nepriateľa.

Roku 1604 *Vavrinca Benedikta Nedožerského* prijali medzi členov profesorského zboru *Filozofickej fakulty Karlovej univerzity*, kde bol profesorom až do svojej smrti. Prednášal klasickú filológiu, antických autorov klasikov, matematiku a fyziku. Ako pedagóg sa usiloval zlepšiť vyučovací poriadok na partikulárnej škole. V roku 1609 sa stal prísediacim konzistória a podieľal sa s kolegami na vytvorení učebných osnov jednotlivých tried partikulárnych škôl. V roku 1610, keď sa profesori zišli na poradu o tom, kto bude čo prednášať, *Benedikt* si vybral aritmetiku a *Iliadu*. Dňa 28. júna 1611 - už ako prorektor - bol na audiencii u nového uhorského a českého kráľa *Mateja II. Habsburského*. V tom istom roku, keď sa profesori rozhodovali, kto bude prednášať ktorý odbor, *Benedikt* si zvolil matematiku. Roku 1612 sa stal dekanom artistickej (filozofickej) fakulty na *Karlovej univerzite*. V októbri 1613 ho zvolili za prepošta do *Karolína*. Roku 1614 *Benedikt* bol prepoštom i prorektorom. Ako prorektor učil aritmetiku a geometriu.

*Vavrinec Benedikti Nedožerský* umrel ako slobodný 4. júna 1615 na pravé poludnie po dlhej chorobe (TBC). Celý svoj majetok venoval univerzite. Pochovali ho v *Kostole Božieho tela* na dnešnom *Karlovom námestí* v *Prahe*, hrob mu ozdobili nákladnou mramorovou tabuľou. Kostol a s ním aj *Benediktov* hrob tam už dnes, žiaľ, nie je. Odkaz *Benediktovho* života však zostáva uchovaný v jeho diele veľkého humanistu európskeho formátu, ktoré svojou pokrokovosťou a odbornou úrovňou v mnohých ohľadoch prekračuje svoju dobu a ktoré od svojho vzniku patrí k moderným základom *slovenskej* a *českej* vzdelanosti a kultúry. Jeho pamiatku si podnes uctieva aj na rodnom *Slovensku*, v jeho rodisku v *Nedožeroch-Brezanoch*, kde má pamätnú tabuľu, sochu a kde jeho meno nesie základná škola.

## TVORBA

*Vavrinec Benedikti Nedožerský* bol nielen vynikajúcim pedagógom, ale aj jazykovedcom, filológom a matematikom - bol autorom viacerých pedagogických, jazykovedných a filozofických spisov, o. i. aj prvej systematickej gramatiky českého jazyka *Grammaticae Bohemicae* (1603), matematickej učebnice *Elementa arithmeticae...*, literárnovedeckých prác i ďalších odborných diel. Bol aj vynikajúcim básnikom a hudobníkom - autorom príležitostnej poézie, parafráz žalmov s prevzatými i čiastočne vytvorenými nápevmi. Vo svojich filozofických, pedagogických, jazykovedných či iných odborných náhľadoch bol ovplyvnený nemeckým humanistickým učencom, reformačným teológom *Philippom Melanctonom* a kritickým *francúzskym filozofom* a humanistom *Pierre de la Raméom*, ktorí boli aj autormi humanistických gramatík. Upozorňoval na potrebu „vedeckosti“ výučby reálnymi predmetmi, medzi nimi aj matematikou, ktorú nechápal len ako súbor praktických poznatkov nevyhnutných pre kupcov a remeselníkov, ale ako exaktný základ vedeckých štúdií.

## LITERATÚRA, POETIKA A HUDBA

Literárnu činnosť začal *Vavrinec Benedikti Nedožerský* príležitostnou poéziou. Svoju prvú *latinskú* príležitostnú báseň (42 hexametrov) zložil na počesť svojich dvanástich priateľov, povýšených 7. októbra 1596 na magistrov. Napísal asi sto formálne vyspelých oslavných, gratulačných a iných básní, ktorými prispel do spisov iných autorov.

Svoju znalosť klasickej poetiky a obdiv k žalmom uplatnil v knihe *Žalмовé někteří v písni české na způsob veršů latinských nově uvedeni a vydáni* (1606). Bol prvým *slovenským* literárnym autorom, ktorý sa rozhodol pre preklad celého žaltára (pred ním prvú ucelenú časť básnický spracoval *Ján Silván*). Jeho predhovor v knihe o časomerných prozodických pravidlách predstavuje prvý systém časovej rýmovanej prozódie. Pri parafrázovaní žalmov *Benedikti* používal výrazné ľudové prívlastky, dával prednosť ľudovej reči a niekde podľa svojho spôsobu a dobových spoločenských potrieb aktualizoval a dopĺňal základný text. Hoci žil *Benedikti* v *Prahe*, nezabúdal na svoje rodné *Slovensko*, neprestajne vyjadroval súcit a bolesť nad utrpením vlastného, *slovenského* ľudu, prenasledovaného morom, vojnami a *tureckým* plienením, poukazoval na dobové spoločenské rozpory a nabádal k svornosti.

*Benedikt* bol aj autorom štvordielneho diela *Poetica* (Poetika), v ktorom sa zaoberal prozodickými vlastnosťami českého básnictva. Rukopis *Benediktiho* prozódie, ktorý tlačou mala vydať po jeho smrti *Karlova univerzita*, ani jeho štyri knihy *Poetiky* a pravdepodobne celý žaltár sa, žiaľ, nezachovali. Celé dielo, prichytné už do tlače, sa zničilo pri plienení *Prahy* roku 1620. *Jan Amos Komenský*, želejúc za ním, chcel ho nahradiť vlastnými prekladmi, dokonalosť *Benediktovho* verša však nedosiahol. *Benedikti* sa uvedomele zaradil do svetovej prekladovej i parafrázovanej žalmistiky.

## JAZYKOVEDA

Po dlhej prípravnej práci *Vavrinec Benedikti Nedožerský* napísal a vydal prvú systematickú gramatiku českého jazyka *Dve knihy české gramatiky zostavenej podľa zásad prirodzenej metódy a osvetlenej poznámkami aj rozdelenéj číslymi* (*Grammaticae Bohemicae ad leges naturalis methodi conformatae et notis numerisque*

*illustratae ac distinctae libri duo*, 1603). Na jej príprave a vydaní pracoval plných deväť rokov. Jeho práca je najlepším a najsamostatnejším gramatickým dielom takmer na dve storočia. V tomto zmysle ju hodnotili aj všetci významní českí lingvisti, z nich napr. *Josef Dobrovský*, či *Josef Jungmann*, ako aj slovenský jazykovedec *Martin Hattala*.



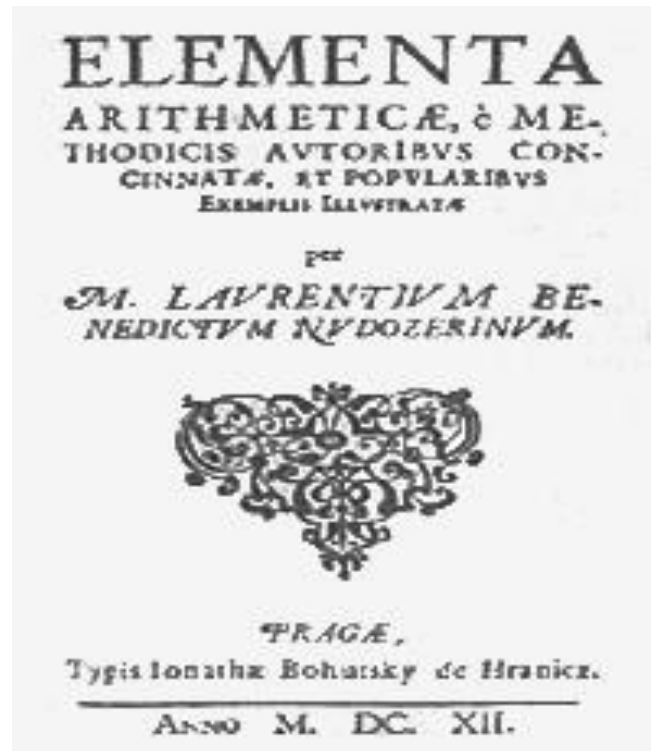
**Obr. 1.** Obálka vedeckého diela *Vavrinca Benedikta Nedožerského „Dve knihy českej gramatiky...“*, napísaného v latinčine pod názvom *Grammaticae Bohemicae ad leges naturalis methodi conformatae et notis numerisque illustratae ac distinctae libri duo* (Praha 1612)

*Benedikti* svoju gramatiku venoval českej a slovenskej mládeži. V *latinskom* úvode vysvetľuje, že jeho *slovenský* pôvod mu nebráni napísať gramatiku *češtiny*. Svoju publikáciu venuje ctihodným správcom cirkevným, obecným pisárom, ale aj poctivej a dobre vzdelanej mládeži *českej, moravskej a slovenskej* a iných národov, dbajúc o *český* jazyk. V príhovore vyčíta svojim rodákom *Slovákom* nedbanlivosť v pestovaní materinského jazyka. Všimá si rozdiely medzi spisovným a ľudovým jazykom a medzi *českými, slovenskými a moravskými* nárečiami. V prvej knihe sa zaoberal tvaroslovím a čiastočne hláskoslovím a v druhej knihe skladbou. V štyridsiatich ôsmich krátkych kapitolách dvojdielnej gramatiky napísanej podľa *latinských, nemeckých a francúzskych* vzorov rozviedol *latinské* pravidlá, po ktorých nasledujú *české* príklady, vysvetlenie a poznatky. Pri hodnotení *Benediktovej* gramatiky treba vyzdvihnúť predovšetkým jeho humanistické vlastenectvo a význam pri normovaní *českého* spisovného jazyka a upevňovaní *českého* povedomia, ako aj jeho jedinečný prejav starostlivosti o pestovanie a kultivovanie vlastného, *slovenského* jazyka, čím sa stáva prvým výrazným podnecovateľom formovania spisovnej *slovenčiny*.

## PEDAGOGICKÁ VEDA

Význačným dokladom reformnej pedagogickej aktivity *Vavrinca Benedikta Nedožerského* je jeho rozsiahla *latinská* básnická skladba *Vnútornej školskej sústavy*, resp. *Štruktúra nižšej školy* (1607, *Penitioris scholae structura*), ktorá je napísaná „vo forme 370 dokonalých hexametrov didaktického rázu podľa spôsobu *Horatiovho*“. Aj keď je jeho práca napísaná vo veršoch, ide o odborné dielo, ktoré obsahuje nový nepomerne zlepšený vyučovací poriadok (učebné osnovy) partikulárnej školy, rozbor príčin neúspechu pri vyučovaní a návrhy niektorých opráv. Predstavuje tak progresívne návrhy na reformu školskej výučby. Navrhované učebné osnovy sa riadia požiadavkami vývinovej psychológie, v ktorých sa zdôrazňovala potreba uplatniť vo výučbe princíp názornosti a systematickosti, nevyhnutnosť spájať teóriu s praxou, ako aj potreba vyučovania v materinskom jazyku. *Nápravný plán a Vnútornej školskej sústavy Benedikta* predniesol na slávnosti otvorenia partikulárnej školy u sv. *Egidia* v Prahe. V tomto príhovore predniesol zásadný reformný návrh na vyučovanie v mestských školách, aby sa jednak pozdvihla úroveň škôl, jednak aby sa zabezpečila rovnaká príprava žiakov na univerzitu. Vychádza z päťtriednej mestskej školy, no navrhuje ju rozšíriť o šiestu triedu, aby sa učebný plán

mohol rozšíriť o nové učebné predmety, aby si žiaci mohli lepšie osvojiť učivo. Náboženstvo ponecháva, ale navrhuje presunúť ho na nedele a sviatky, odporúča obmedziť spev žiakov v kostoloch a takmer každodenné pohrebné sprievody. Vyučovanie v 1. - 3. triede sa sústreďuje na gramatické učivo, v 4. a 5. triede venuje pozornosť rétorike, logike a dialektike. V šiestej triede, ktorú navrhuje doplniť, by sa vyučovala najmä matematika, prírodné vedy, astronómia a etika. Veľkú pozornosť venoval vyučovaniu *latinčiny* a pri jej vyučovaní využíva aj materinský jazyk. Najväčšou prednosťou jeho vyučovacieho poriadku je sústavné zdôrazňovanie potreby vyučovať v materinskom jazyku vo všetkých piatich triedach partikulárnej školy. V básnickej skladbe *Štruktúra nižšej školy Benedikti* podal mnohé novátorské návrhy s dôrazom na materinský jazyk a objavovanie prírodných vied. V jeho úsiliach sa najlepšie ukazoval jeho humanizmus, vďaka čomu sa stal pedagogickou autoritou ešte pred *Komenským*.



**Obr. 2.** Obálka učebnice *Vavrinca Benediktiho Nedožerského „Základy aritmetiky“*, napísanej v latinčine pod názvom *Elementa arithmeticae e methodicis autoribus concinnatae et popularibus exemplis illustratae* (Praha 1612)

Reformám sa *Benedikti* venoval aj v *latinskom* pedagogicko-reformačnom spise *Nápravná reč obsahujúca návod na ozdravenie Pražskej akadémie* (*Oratio therapeutica continens modum curandae Pragensis academiae*, 1612). V ňom vykladá a odôvodňuje svoje návrhy na nápravu a povznesenie univerzitného života, ktorými sú: 1. aby zo súkromných škôl schopní poslucháči boli pripustení na prednášky univerzitných profesorov, 2. aby sa presne a určite ustanovil poriadok a doba prednášok, 3. aby profesori boli pozbavení hmotných starostí o existenciu, 4. aby sa učiteľské miesta udeľovali len poslucháčom usilovným a riadne sa podrobujúcim skúškam. Okrem iného v tomto spise s ľútosťou konštatuje, že v tejto veci najviac prekáža nedostatok hmotných prostriedkov - chudoba.

Z reforiem *Benediktiho* ako nového dekana treba uviesť predovšetkým myšlienku, ktorú vyslovil počas rektorskej voľby 17. októbra 1612 vo svojej slávnostnej reči, aby sa obyčaj o štyroch národoch na univerzite uviedla do života pri voľbe rektorových konziliárov (radcov) tak, aby traja boli *Česi* a jeden cudzí. V marci 1612 taktiež presadil, aby bol volený notár a kvestor univerzitných majetkov.

*Benedikt* napísal i matematickú učebnicu *Základy aritmetiky* (*Elementa arithmeticae e methodicis autoribus concinnatae et popularibus exemplis illustratae*, 1612). V práci vyčleňuje dve základné aritmetické disciplíny: jednoduchú a porovnávaciu a podľa nich určuje aj rozdelenie svojho spisu na dve knihy; z nich prvá (aritmetika jednoduchá) obsahuje štyri základné početové úkony a zlomky, druhá zasa (aritmetika porovnávacia) vysvetľuje pomery medzi číslami. *Benedikti* bol prvým našim matematikom, ktorý svoju aritmetiku začal stavať na exaktnom podklade pre vedecké štúdium, pretože všetky ostatné publikácie tohto druhu boli len praktickými príručkami pre kupcov, remeselníkov a pod. *Benedikti* bol aj dobrým znalcom rétoriky. V roku 1605 mal akademickú dišputu *O rečníctve a rečníkovi*, od ktorého vyžadoval filozofické vzdelanie. Vďaka svojmu dielu a učeniu sa *Vavrinec Benedikt Nedožerský* zaraďuje medzi najvýznamnejšie osobnosti nášho humanizmu a renesancie.

## DIELO

### Poézia:

1606 - *Aliquot psalmorum Davidicorum paraphrasis rhythmometrica, lyrico carmine ad imitationem. Latinorum nunc primum attentata. Item oda istis temporibus congrua.* Žalmové někteří v písňě české na způsob veršů latinských v nově uvedení a vydání.

1606 - *Žalmové devadesátý první a stý třetí na způsob latinských veršů vydání (Staré město Pražské)*, žalmy

### Odborné dielo vo veršoch:

1607 - *Penitioris scholae structura (Vnútorňa školská sústava, resp. Štruktúra nižšej školy)*, latinská básnická skladba v hexametroch.

### Odborné diela:

1603 - *Grammaticae Bohemicae ad leges naturalis methodi conformatae et notis numerisque illustratae ac distinctae libri duo* (Dve knihy českej gramatiky zostavené podľa zásad prirodzenej metódy a osvetlenej poznámkami aj rozdelené číslami), prvá systematická gramatika českého jazyka, v latinčine.

1612 - *Elementa arithmeticae e methodicis autoribus concinnatae et popularibus exemplis illustratae* (Základy aritmetiky), učebnica matematiky (Praha).

1612 - *Oratio therapeutica continens modum curandae Pragensis academiae, habita in solenni promotione tredecim iuvenum, quibus primus in philosophia gradus conferebatur* (Nápravná reč obsahujúca návod na ozdravenie Pražskej akadémie) (Praha), spis.

1612 - *Decanus facultatis philosophicae in academia Pragensi M. Laurentius Benedictus Nudozierinus lecturis S. D.* (Čítanie dekana Filozofickej fakulty Univerzity v Prahe M. Laurenca Benedikta Nudožerského) (Praha), príhovor.

## LITERATÚRA

KOLLÁRIK, O. (1965): *Laurenc Benedikt Nudožerský* [online]. Martin: Matica slovenská, 61 s.

KRČMÉRY, Š. (1976): *Dejiny literatúry slovenskej I* [online]. Bratislava: Tatran.

KUCIANOVÁ, A. (2010): *Vavrinec Benedikt z Nedožier (10. 8. 1555 – 4. 6. 1615)*.

BENEDIKT NEDOŽERSKÝ Vavrinec. In: Mikula, V.a kol. *Slovník slovenských spisovateľov*. ISBN 80-7149-801-7

MINÁRIK, J. (ed.) (1997): *Z Klenotnice staršieho slovenského písomníctva II.: Renesancia a humanizmus*. 481 s. Bratislava: Slovenský Tatran, ISBN 80-222-0463-3.

ŠMATLÁK, S. (2002): *Dejiny slovenskej literatúry I*. 3. prepracované vydanie. Bratislava: Literárne informačné centrum, 359 s., ISBN 80-88878-70-5.

# Ochrana kovových materiálov pred chemickým vplyvom prostredia pri ohreve

Elena Kantoriková, 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

## Protection of metal materials from chemical environmental influences during heating

**Abstract:** Protecting metal components from chemical influences during heat treatment is important due to corrosion, where metals can react at high temperatures and subsequently weaken the component. Due to *oxidation*, metals can *oxidize*, meaning they react with *oxygen* in the air. This process can create *oxide* layers that can be brittle and peel off, exposing fresh metal that can further *oxidize*. Chemical reactions can change the structure of the metal, leading to its weakening and increased susceptibility to mechanical damage.

**Keywords:** heat treatment, chemical environment, mechanical properties.

## ÚVOD

Pri ohreve kovov môže nastať nežiaduce ovplyvňovanie povrchu prostredím v pecnom priestore. V komorových, šachtových a vozových peciach je zvyčajne *oxidačná* atmosféra, ktorá spôsobuje *oxidáciu* povrchu ohrievaného kovu. Pri teplotách nad 700°C sa u ocelí tvorí silná *oxidická* vrstva a aj povrch pod touto vrstvou je silne poškodený. Okrem toho nastáva aj ochudobňovanie povrchu ocele o *uhlík*, ktoré sa nazýva *oduhličovanie*. *Oduhličovanie* nie je na pohľad zjavné a z tohto hľadiska je nebezpečnejšie ako *oxidácia*. V *oduhličenej* vrstve sa po tepelnom spracovaní nedosiahnu požadované vlastnosti (tvrdosť, odolnosť proti opotrebeniu a pod.). *Oxidácia* aj *oduhličovanie* sú dôsledkom chemických reakcií medzi ohrievaným materiálom a prostredím, ktoré ho pri ohreve obklopuje. Pre optimálny ohrev kovov je dôležité poznať zákonitosti interakcie ohrievaného kovu a prostredia a rešpektovať ich pri stanovení podmienok a parametrov ohreву. V rade prípadov, ako pri konštrukčných súčiastkach, pri ktorých je tepelné spracovanie konečnou operáciou, tak najmä pri nástrojoch, je potrebné povrch ohrievaných súčiastiek proti vplyvu prostredia chrániť [1, 2]. Chrániť súčiastky proti *oxidácii* a *oduhličeniu* je možné v podstate dvoma spôsobmi:

- vytvoriť na povrchu ohrievanej súčiastky ochrannú vrstvu, ktorá dokonale oddelí kovový povrch od prirodzeného prostredia pece,
- nahradiť prirodzené prostredie umelým, ktoré nereaguje (alebo reaguje podstatne obmedzene) s

ohrievaným materiálom (najčastejšie používaná).

Kvalifikované rozhodovanie konštruktéra pri voľbe materiálu alebo jeho povrchovej ochrany kladie vysoké nároky na presnú špecifikáciu agresivity prostredia a dostatok údajov o možnostiach riešenia protikorózneho ochrany pre požadovanú dobu životnosti s nutným ohľadom na ekonomickosť zvoleného riešenia [2, 3].

## 1 OXIDÁCIA

*Oxidácia* je reakcia medzi *oxidačnými* plynmi ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ) obsiahnutými v pecnej atmosfére s kovom a jeho prímiesami. Ak sa zameria pozornosť na ocele, potom výsledkom *oxidačných* pochodov je zmes *oxidov železa* (s rôznym stupňom *oxidácie železa*) a *oxidov prímiesi*.

- $FeO$ , stabilný pri teplotách nad 570°C, s teplotou topenia 1377°C,
- $Fe_3O_4$ , stabilný od teploty okolia až po teplotu topenia 1538°C,
- $Fe_2O_3$ , stabilný od nízkych teplôt až po teplotu topenia 1565°C.

Prímiesi a prísady podľa rastúcej afinity ku *kyslíku* je možné zoradiť takto:  $Cu$ ,  $Ni$ ,  $Co$ ,  $Mo$ , ( $Fe$ ),  $W$ ,  $Cr$ ,  $Mn$ ,  $Si$ ,  $Ti$ ,  $Al$ .

K *oxidom* typu  $MeO$  patria  $TiO$ ,  $NiO$ ,  $CoO$ ,  $VO$ .

K typu  $Me_3O_4$  patria  $Mn_3O_4$ ,  $MnO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $NiO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $FeO$ ,  $Cr_2O_3$  a ďalšie.

K typu  $Me_2O_3$  patria *oxidické* fázy  $Cr_2O_3$ ,  $Ti_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  a  $V_2O_3$ .

Odolnosť kovu proti *oxidácií* závisí od charakteru povrchovej vrstvy, ktorá sa tvorí v *oxidačnom* prostredí. Pri vzácnych kovoch nedochádza k *oxidácií* kvôli tomu, že povrchová vrstva má väčšiu tenziu ako parciálny tlak *kyslíka* vo vzduchu [1-3]. K *oxidácií* dochádza iba vtedy, ak má povrchová vrstva tenziu menšiu ako parciálny tlak *kyslíka* vo vzduchu. *Oxid* kovu môže byť nestály (rozrušovanie sa uskutočňuje vyparovaním - povrch zostáva lesklý) alebo ustálený (kov sa pokrýva vrstvou *oxidov*). V prípade nestálych *oxidov* je dôležité, aký objem bude mať *oxid* voči objemu kovu.

Ak bude objem *oxidu* menší ako objem kovu, bude vrstva *oxidu* pórovitá a bude umožňovať ďalší priebeh *oxidácie* (napr. pri *Mg, K, Na*).

Ak bude objem *oxidu* väčší ako objem kovu, bude vrstva *oxidu* súvislá a *oxidácia* nebude prebiehať priamym účinkom *kyslíka* na kov. Takto prebieha *oxidácia*, napr. pri *Fe, Ni* atď. Pri zliatinách *železa* hrá významnú úlohu difúzia iónov *Fe* k povrchu [4].

*Oxidácia* ocele do teplôt 600°C až 650°C je prakticky zanedbateľná a ďalej do teploty 900°C je pomalá. Nad touto teplotou sa rýchlosť tvorby *oxidickej* vrstvy neustále zvyšuje. Hrubá *oxidická* vrstva, ktorá vznikne na povrchu kovu pri ohreve sa nazýva okoviny. Chemické zloženie *oxidickej* vrstvy závisí od teploty ohrevu (mení sa vzájomný pomer hrúbok vrstiev jednotlivých druhov *oxidov*). Hrubšie *oxidické* vrstvy majú najčastejšie priemerný obsah *Fe* cca 30 % (zvyšok je *kyslík*, obsah prímiesí je väčšinou nepodstatný).

*Zoxidovaná* vrstva znižuje medzu únavy, je príčinou nerovnomernej tvrdosti povrchu po kalení a pod. Preto je potrebné upravovať povrch technologickými operáciami (morenie, otryskávanie, brúsenie atď.), ktoré zvyšujú výrobné náklady. *Oxidáciou* povrchu ocele pri ohreve sa aj priamo znižuje hmotnosť použiteľného kovu takého straty sa nazývajú prepal a udáva sa v hmotnostných percentách [4, 5].

## 2 ODUHLIČOVANIE

Je reakcia plynov z pecnej atmosféry s *uhlíkom* v oceli (nech už rozpustených v tuhom roztoku, alebo vylúčeným vo forme *cementitu*), pri ktorom sa ochudobňujú povrchové vrstvy oceľových výrobkov o *uhlík*. Plynmi, ktoré *oduhličujú* oceľ sú: vodná para, *CO<sub>2</sub>*, *H<sub>2</sub>*, príp. *O*. Naopak, *CO* a *CH<sub>4</sub>* spôsobujú *nauhličenie*, t. j. obrátený pochod, pri ktorom sa prejaví chemické pôsobenie plynov na oceľ tým, že sa v povrchovej vrstve absorbuje *uhlík* v atomárnom stave *železom* a vytvára *cementit*.

*Oduhličovanie* má za následok výrazné zníženie tvrdosti povrchu. Zhoršuje sa medza únavy, odolnosť proti korózii (najmä interkryštalická) a pod. Pri oceliach k zušľachtovaniu má *oduhličenie* za následok že povrch je kaliteľný [6].

## 3 OCHRANNÉ ATMOSFÉRY

Ochranné atmosféry sú najpoužívanejšími druhmi umelého prostredia, ktoré sa používajú pri ochrane proti *oxidácií* a *oduhličeniu*. Ide o plynné umelé prostredia, ktoré nahrádzajú prirodzenú pecnú atmosféru a prakticky vyplňa celý pracovný priestor pece. Ochranné atmosféry dovoľujú získať po tepelnom spracovaní lesklý povrch bez *oxidov* aj bez iných zmien chemického zloženia povrchu ocele (*oduhličenie, nauhličenie*). Sú napr. základom pre lesklé žihanie, ktoré odstraňuje nutnosť ďalších úprav povrchu pred nasledujúcim spracovávaním ocele (morenie, pieskovanie), ale majú význam aj pre kalenie a zušľachtovanie.

Hlavné druhy ochranných atmosfér sa vyrábajú nedokonalým spaľovaním plynných alebo tekutých palív, (*exoatmosféry, endoatmosféry*), príp. ich ďalšou úpravou (*exomonoatmosféry*). Ďalšie druhy ochranných atmosfér sa získavajú rozštiepením vhodných kvapalných médií (*čpavok, metanol*) alebo sa používajú jednozložkové atmosféry niektorých plynov (*dusík, vzácne plyny*) [6, 7].

### 3.1 Exoatmosféry

Vznikajú nedokonalým spaľovaním *svietiplynu, koksárenského* alebo *zemného plynu, propánu, butánu* alebo tekutého paliva so vzduchom, pričom v spaľovacej komore nastáva nedokonalé spaľovanie za vývinu tepla, takže reakcia má exotermický charakter.

Východisková surovina (plynné, tekuté palivo) obsahuje *uhl'ovodíky*. Pre jej spaľovanie sa privádza vzduch v množstve asi 55 % až 98 % množstva, potrebného pre úplné spálenie paliva. Vyrobená atmosféra obsahuje *oxid uhličitý, oxid uhoľnatý, vodík*, príp. vodnú paru a *dusík* [6, 7].

Rozlišuje sa chudobná a bohatá *exoatmosféra*.

Chudobná *exoatmosféra* má nízky obsah *H<sub>2</sub>* a *CO*, ale vysoký obsah *CO<sub>2</sub>*. Bohatá *exoatmosféra*, má vysoký obsah *H<sub>2</sub>* a *CO* a nízky obsah *CO<sub>2</sub>*.

Tieto rozdiely v chemickom zložení sú dané rozdielnym množstvom použitého spaľovacieho vzduchu. Pri použití plynných palív sa mieša vzduch s plynom pri výrobe chudobnej atmosféry v pomere 4:1, zatiaľ čo pri výrobe bohatej atmosféry v pomere 2,5:1. Chudobná atmosféra je lacnejšia, pretože z rovnakého množstva suroviny (paliva) sa vyrobí väčšie množstvo atmosféry. Má však nižší obsah spáliteľných zložiek (*CO, H<sub>2</sub>*).

Pri úprave *exoatmosféry* je dôležité najmä jej sušenie, ktorým sa dosahuje požadovaná hodnota rosného bodu (čím menšia je vlhkosť atmosféry, tým nižší je rosný bod). Rosný bod je teplota, na ktorú je potrebné ochladiť plyn alebo plynnú zmes, aby bola nasýtená vodnou parou, čiže teplota, pri ktorej dochádza ku kondenzácii vodnej pary v plynenej zmesi, čím je rosný bod nižší tým je kvalitnejšia atmosféra. Rosný bod je

veľmi dôležitý, preto sa kontroluje a upravuje. Vyvíjače *exoatmosfér* sa väčšinou konštruujú ako samostatné prídavné zariadenia k ohrievacím peciam. *Exoatmosféry* sú lacné a vhodné pre všetky druhy pecí. Používajú sa pri tepelnom spracovaní *nízkouhľikových* ocelí [7, 8].

### 3.2 Exomonoatmosféry

Sú atmosféry bez *oxidu uhličitého* s nižším rosným bodom, ktoré sú vhodné pre tepelné spracovanie ocelí so stredným a vyšším obsahom *uhlíka*, ako aj ocelí legovaných, t. j. ocelí, pri ktorých by pri použití *exoatmosféry* dochádzalo k *oduhličovaniu*. V chemickom zložení atmosféry prevláda jedna zložka, preto označenie mono-). *Oxid uhľičitý* sa odstraňuje dvoma spôsobmi:

- pomocou roztoku *monoetylamínu*,
- pohlčováním  $CO_2$  tlakovou vodou vo valcových peciach [7, 8].

### 3.3 Endoatmosféry

Vznikajú nedokonalým spaľovaním palív, obsahujúcich uhl'ovodíky, pri ktorom sa privádza len také malé množstvo vzduchu (25% až 40%) potrebného na úplné spálenie, aby pokiaľ možno dochádzalo k *oxidácii uhlíka* len na *oxid uhoľnatý*. Reakčné teplo reakcie však v takomto prípade nestačí k udržaniu sústavy na teplote, potrebnej pre priebeh požadovaného procesu. Preto je potrebné reakčný priestor zohrievať prídavným elektrickým alebo plynovým kúrením. V spaľovacej komore teda nastáva nedokonalé spaľovanie pri dodávaní tepla. Sú to kvalitné ochranné atmosféry so širokým uplatnením. Sú vhodné pre tepelné spracovanie *vysokouhľikových* ocelí, zliatinových ocelí stredne a *vysokouhľikových*, ako aj ocelí rýchlorezných. Sú drahšie ako *exoatmosféry* a *exomonoatmosféry*, pretože k ich výrobe je potrebný veľký príkon energie. Napriek tomu je ich použitie v tepelnom spracovaní vždy hospodárnejšie, ako tepelné spracovanie bez ochrannej atmosféry. *Endoatmosféry* sú jedovaté a výbušné, pretože obsahujú vysoký podiel  $CO$  a  $H_2$ . *Endotermické* vyvíjače sú vybavené vykurovacím zariadením, ktoré udržuje v retorte teplotu asi  $1000^\circ C$ . Pre priebeh požadovanej spaľovacej reakcie je ďalej potrebný katalyzátor. Surová atmosféra, ktorá vznikla v retorte, sa ďalej zbavuje vlhkosti a podľa potreby ešte upravuje [7, 8].

### 3.4 Rozštiepený amoniak

Je typom *OA*, ktorá sa vyrába rozštiepením synteticky vyrobeného *čpavku* na zmes *vodíka* a *dusíka* pri dodávaní tepla vonkajším tepelným zdrojom, teda *endotermickou* reakciou. Veľká výhoda je, že táto atmosféra neobsahuje *kyslík* ani *uhlík*. Rosný bod závisí od vlhkosti vo východiskovom *čpavku*.

Zníženie vlhkosti nie je zvlášť ťažké, robí sa to absorpciou alebo chemickým sušením. Nevýhodou tejto atmosféry je výbušnosť a vysoká cena [8]. Používa sa preto iba pri tepelnom spracovaní drahších typov ocelí (s vysokým obsahom *Ni*, *Cr*). Lacnejšia atmosféra na báze rozštiepeného amoniaku sa získava čiastočným alebo úplným spaľovaním podielu *vodíka* v ďalšom vyvíjači (*exotermickom*). Pri odstránení vlhkosti môže atmosféra dosiahnuť obsah *dusík* aj nad 99 %.

### 3.4 Dusík a vzácne plyny

Sú ako ochranné atmosféry pre bežnú prax tepelného spracovania príliš drahé. Priemyslovo dodávaný *dusík* obsahuje určitý podiel *kyslíka* a vlhkosť. Čistenie *dusíka* je nákladné, v reálnych podmienkach sa nedá vždy zaručiť, že do pece nevnikne vzdušný *kyslík*. Preto je dobré ak pecné atmosféry obsahujú určitý podiel plynu, ktorý na seba viaže *kyslík* (*vodík*). Patria tu vzácne plyny *Ar* a *He* [9].

### 3.5 Ohrev vo vákuu

Na ohrev vo vákuu sa používajú vákuové pece. Tým, že sa tento ohrev deje v peci, v ktorej je produkt obklopený vákuom počas spracovania, má veľa výhod. Najväčšia výhoda je to, že sa tam nenachádza žiadny vzduch alebo iný plyn. Ich neprítomnosť má za následok, že nedochádza k *oxidácii*, tepelným stratám a nedochádza ku kontaminácii produktu. To umožňuje peci ohrievať materiály (kovy alebo keramiku) na teploty až do  $3000^\circ C$ . Bežne sa využívajú pre žíhanie, spekanie, tvrdé spájkovanie alebo na tepelné spracovanie s vysokou konzistenciou a nízkou kontamináciou. Výhodou vákuovej ochrany je, že súčiastky sú obklopené tepelným štítom alebo izoláciou. Je možná regulácia teploty, nízka kontaminácia produktu *uhlíkom*, *kyslíkom* a inými plynmi. Dochádza k odstraňovaniu nečistôt pri procese zahrievania, čím dochádza k tomu, že konečný produkt má väčšiu čistotu. Rýchle ochladzovanie produktu skrátenie času výrobného cyklu. Proces je možné riadiť opakovane pomocou počítačového systému [10].

## 4 OHREV V KÚPEĽOCH

Kvapalné prostredia pre ohrev boli vo veľkej miere používané v nedávnej minulosti. Teraz sú však čím ďalej tým viac nahradzované plynými prostrediami a používajú sa iba vo zvláštnych prípadoch. Kvapalné prostredia pre ohrev poznáme dva druhy:

1. *Tavenina solí a hydroxidov*.
2. *Roztavené kovy* (sú využívané zriedkavo).

Kvapalné prostredia majú vo všeobecnosti niektoré nesporné výhody, avšak tie sú prevažované nevýhodami [11].

#### Výhody:

1. Jednoduchosť zariadenia.
2. Veľmi ľahké dosiahnutie odpovedajúceho chemického zloženia a tým aj kvalitný ochranný povrch vsádzky, ktorý zabráňuje vzniku okují a oduhlíčeniu.
3. Možnosť veľmi kvalitnej regulácie teploty (miešanie).
4. Veľmi dobrá rovnomernosť a intenzita ohrevu vsádzky.
5. Nadláhčovanie vsádzky behom ohrevu.
6. Veľmi ľahká manipulácia so vsádzkami zvlášť pri nízkej hmotnosti.

#### Nevýhody:

1. Vysoká energetická náročnosť zvlášť pri veľkých zariadeniach
2. Veľmi problematická bezpečnosť a hygiena práce. Kvôli ručnej manipulácii môže dôjsť k vystreknutiu a pod.
3. V niektorých zvláštnych prípadoch vysoká toxicita (roztavené olovo, kyanidové a barnaté soli).
4. Problémy s toxickým odpadom.
5. Vysoké korózne zaťaženie niektorých súčiastok zariadenia (*chloridové pary*) [12].

## 5 OHREV V ZÁBALE

Ohrev v zábale je najstarším, najjednoduchším, ale súčasne aj najmenej spoľahlivým spôsobom vytvorenia umelého ochranného prostredia pri ohreve. Podstata tohto spôsobu spočíva v tom, že ohrievaná súčiastka je po dobu ohrevu obklopená tuhým zábalovou hmotou, ktorá je schopná viazať kyslík. Súčiastky so zábalovou hmotou sa vkladajú do utesnených zváraných krabíc, po ukončení ohrevu sa súčiastka vyberie. Manipulácia so zábalom vyžaduje skúsenosť a zručnosť pracovníka, najmä vtedy keď nasleduje po tejto operácii kalenie [13].

Ako aktívny obalový materiál sa používa *drevené uhlie* alebo vypálený *koks*. Vrstva zábalovej hmoty má hrúbku 15 mm až 30 mm. Čisté, drobné *drevené uhlie*, rovnomernej zrnitosti, zbavené prachu a okovín, je vhodným zábalom až do teploty 800°C. Pre vyššie teploty sa používa drobný, dobre vypálený hutnícky *koks*. *Koks* sa vypaľuje pri teplote o 50°C vyššej ako bude jeho teplota použitia. Je vhodný pre všetky druhy nástrojových ocelí pri ohreve, a to do teploty 1350°C. Je dobré chrániť povrch súčiastok najmä tých leštených najprv čistým neglejeným papierom a tenkou vrstvou veľmi jemného *koksu*.

Počas ohrevu reaguje vzduch uzavretý v krabici s *uhlíkom* v zábalovej hmote a vytvára sa tak zmes *oxidu uhličitého* a *oxidu uhoľnatého*. Zloženie tejto

zmesi závisí od kvality zábalového materiálu a od teploty ohrevu a nie je presne regulovateľné. V podstate to závisí iba od empirických skúsenosti, či bude atmosféra neutrálna, *oxidačná* alebo *nauhličujúca*. V tomto spočíva hlavná nevýhoda, t. j. v menšej funkčnej spoľahlivosti. Ďalšou nevýhodou je zvýšenie spotreby tepelnej energie pri ohreve, pretože sa zvyšujú tepelné straty ohrevom pomocného materiálu (krabice, zábalová hmota) [14].

## Pod'akovanie

*Táto práca bola podporená projektom KEGA 022ŽU-4/2021 Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva Slovenskej republiky.*

## LITERATÚRA

- [1] SKOČOVSKÝ, P. - DURMIS, I. (1984): *Technológia tepelného spracovania*. Bratislava: Alfa vydavateľstvo technickej literatúry. 63-783-84.
- [2] ŠVAČ, V. - KOVAČ, J. (2009): *Korózia kovov a protikorózna ochrana*. In: Transfer inovácií 15/2009.
- [3] SKOČOVSKÝ, P. - BOKŮVKA, O. - KONEČNÁ, R. - TILLOVÁ, E. (2014): *Náuka o materiáli*. Žilina: EDIS, ISBN: 978-80-554-0871-2.
- [4] FABIAN, P. - KEČKOVÁ, E. - BETÁK, P. (2007): *Tepelné spracovanie kovov*. Žilina. ISBN 978-80-969592-7-3.
- [5] TAKÁČ, K. - KRÁTKY, I. (1982): *Strojárske materiály a povrchové úpravy*. ES VŠT Košice.
- [6] MOHYLA, M. (1991): *Technologie povrchových úprav kovů*. VŠB - TU Ostrava.
- [7] ASM HANDBOOK (1998): *Powder Metal Technologies and Applications*. Volume 7: Ed. Peter W. Lee. 1st. ed. Materials Park: ASM International, 1147 p., ISBN 978-0871703873.
- [8] SVOBODA, M. - VROBEL, L. (1981): *Povrchové úpravy II - Organické povlaky, Galvanické povlaky*. ES VŠT Košice.
- [9] KREIBICH, V. (1987): *Strojírenské materiály a povrchové úpravy*. Vysoké učení technické, Praha.
- [10] KOVÁČ, M. a kol. (2002): *Metodické aspekty projektovania laboratórií a skúšobní a ich vybavenie zariadeniami pre testovanie závesových systémov*. SJF TU Košice.
- [11] KOCICH, J. a kol. (1978): *Katalóg povrchových úprav*. ES VŠT Košice.
- [12] KOCICH, J. (1985): *Povrchová ochrana ocelí*. ES VŠT Košice.
- [13] GÁBRIŠOVÁ, Z. - BRUSILOVÁ, A. (2019): *Tepelné spracovanie, Návod na cvičenia*. STU Bratislava, ISBN 978-80-227-4894-0.
- [14] ŠVEC, P. (2010): *Konstruktívne materiály*. Bratislava: STU, ISBN 978-80-227-3386-1.

# Hydraulický ráz a jeho aplikácie v tvárnení

Ján Moravec, doc. Ing., PhD.\*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,

Žilinská univerzita v Žiline,

Univerzitná 1, 010 26 Žilina.

E-mail: jan.moravec@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2764

## Hydraulic shock and its applications in forming

**Abstract:** The presented paper discusses the issue of the possibility of forming metals using hydraulic shock. The first part of the text presents the necessary theoretical knowledge about the issue. The second part presents some solutions of this advanced metal forming technology.

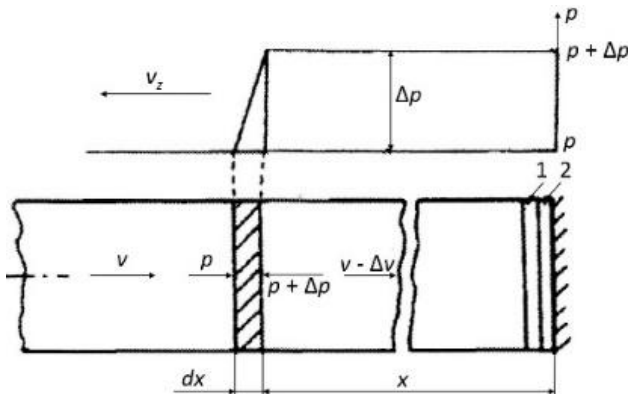
**Keywords:** forming, hydraulic shock, liquid.

### ÚVOD

Neustále v každej oblasti ľudskej činnosti pri priemyselne výrobe sú hľadané nové, resp. Také možnosti, ktoré vyhovujú daným podmienkam po stránke technologickej a najmä ekonomickej. Jedna z takýchto ciest ku skvalitneniu výroby vedie aj cez hydrotvárnenie.

### 1 TEORETICKÉ PODMIENKY

Jav náhleho zatvorenia potrubia sa nazýva *hydraulický ráz*. Pri náhlom zastavení prúdu kvapaliny klapkou (náhlejš zmeň rýchllosti, vyvolanej rýchlym priškrtením ventilu) sa uplatní stlačiteľnosť kvapaliny. Obrázok 1 schematicky znázorňuje proces stlačenia kvapaliny počas hydraulického rázu [1-3].



Obr. 1. K analýze hydraulického rázu

Vrstvička kvapaliny 1, nachádzajúca sa bezprostredne na stene klapky, sa na nej zastaví. Na vrstvičke 1 sa potom zastaví vrstvička 2 atď., až jav zastavovania vrstvičiek dorazí do miesta vzdialeného  $x$  od klapky. Na vrstvičku s hrúbkou  $dx$ , ktorá sa práve zastavuje, môžu pôsobiť mimo sily tiaže a trenia o steny potrubia (ktoré sa zanedbávajú ako sily veľmi malé), iba sily od tlaku kvapaliny z oboch strán vrstvičky, na priereze

potrubia  $S$ . Pri označení ich výslednice  $F$  (kladná v smere  $x$ ):

$$dF = (p + dp) \cdot S - p \cdot S = S \cdot dp. \quad (1)$$

Z rovnice pre impulz sily:

$$F \cdot dt = m \cdot dv \quad (2)$$

sa dá jav zastavovania popísať tak, že sila  $dF$  účinkujúca po určitú dobu  $dt$  na element kvapaliny v úseku potrubia  $dx$ , zmení jeho rýchllosť o  $dv$ . Ak sa ďalej zväží, že:

$$dm = \rho \cdot S \cdot dx \quad (3)$$

a z rovnice (1) vyplýva:

$$dp \cdot S \cdot dt = \rho \cdot S \cdot dx \cdot dv \quad (4)$$

Potom sa vyjadri  $\Delta p$  a označí sa výraz:

$$\frac{dx}{dt} = v_z \quad (5)$$

ako *rýchllosť tlakovej vlny* (šírenia sa zvuku v kvapaline), keďže  $dx$  má význam posunutia sa javu zastavovania a susedný element kvapaliny za dobu  $dt$ . Stúpnutie tlaku  $\Delta p$  sa nasledujúco dá vyjadriť vzťahom:

$$dp = \rho \cdot dv \cdot \frac{dx}{dt} = \rho \cdot v_z \cdot dv, \quad (6)$$

$$\Delta p = \rho \cdot v_t \cdot \Delta v. \quad (7)$$

Podľa obr. 2 sa dá presne popísať správanie sa tlakovej vlny v potrubí. Okamih náhleho zatvorenia potrubia v bode 2 sa vyznačuje tým, že v celom potrubí je rýchllosť  $v$  a  $\Delta p = 0$ . Tlaková vlna sa šíri k nádrži (1). Po dorazení vlny do bodu 1 (fáza 2) vrstvička kvapaliny bude v rovnováhe a posunie sa smerom do nádrže. To sa bude opakovať s ďalšími vrstvičkami, čo sa prejaví vznikom vlny poklesu tlaku na pôvodnú úroveň (3) a kvapalina potečie do nádrže. Vlna dorazí k uzáveru (4), vrstvička kvapaliny na

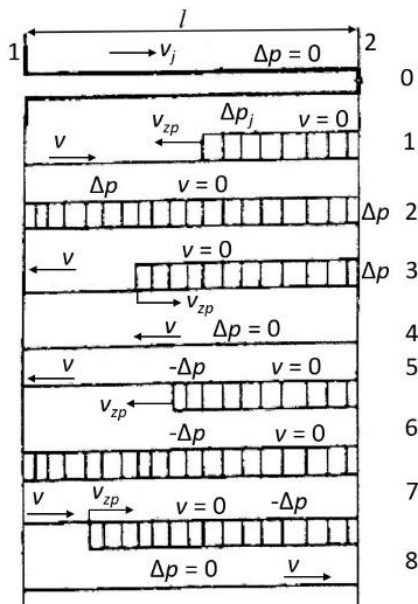
uzáveru bude stáť a zostanú stáť aj susedné vrstvičky. Na ich zastavenie je treba pretlak zo strany od nádrže. Musí teda vzniknúť vlna podtlaku, šíriaca sa od uzáveru (5). Táto vlna dorazí do bodu 1(6), odkiaľ sa odrazí ako vlna vyrovnania tlaku (7). Keď táto vlna dorazí k uzáveru, vznikne fáza javu veľmi blízka počiatkovej fáze javu (0). Z naznačeného popisu vyplýva opakovanie sa popísaného javu s periódou:

$$T = 4 \cdot \frac{l}{v_{zp}} \quad (8)$$

Uplatní sa pritom väzkosť kvapaliny i odpor proti deformácii potrubia, čo spôsobí, že amplitúda tlakov bude klesať a jav zanikne (tlmené kmitanie).

Totálnym hydraulickým rázom sa nazýva jav, keď zmena rýchlosti  $\Delta v$  nastane v čase  $\Delta t$  kratšom, než vlna vyrovnania tlaku dorazí k uzáveru (fáza 4). Pre čas  $\Delta t$  musí platiť:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot L}{v_{zp}} \quad (9)$$

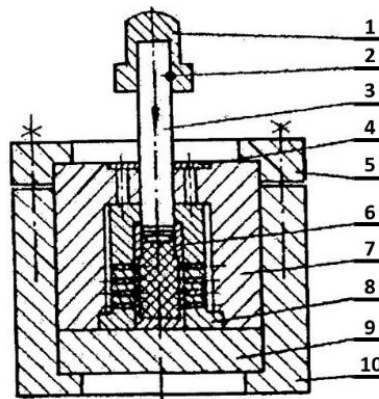


Obr. 2. Správanie sa tlakových vln v potrubí

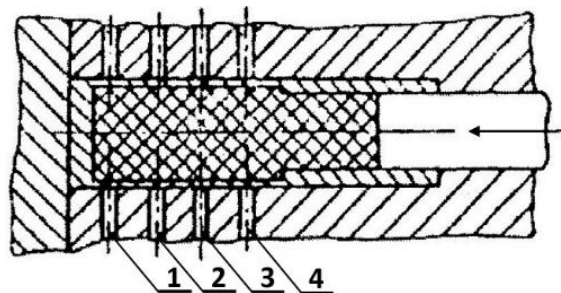
V mieste uzáveru vtedy nastane maximálne stúpnutie tlaku odpovedajúce rovniciam 6 a 7. V opačnom prípade odrazená vlna ovplyvní tlakové pomery v bode 2 a stúpnutie tlaku bude menšie.

Z uvedeného vyplýva, že v rázovo zaťažených kvapalinách alebo čisto plastických médiách vznikajú hydraulické rázy. V hydraulických konštrukciách pôsobia nepriaznivo, ale v oblasti impulzného zaťaženia, napr. pri tvárnení kovov, ich možno použiť tak, že rázová vlna tvorí jednu polovicu činnej časti nástroja. Účinky všestranných hydrostatických tlakov spôsobujú prírastky tvárnosti. Výskumy potvrdili výrazný vzrast tvárnosti po prekročení prahového tlaku  $p_{pr}$ , pričom možno tvárniť aj materiály ťažko tváriteľné vrátane nástrojových ocelí triedy 19 s vysokým stupňom pretvorenia v

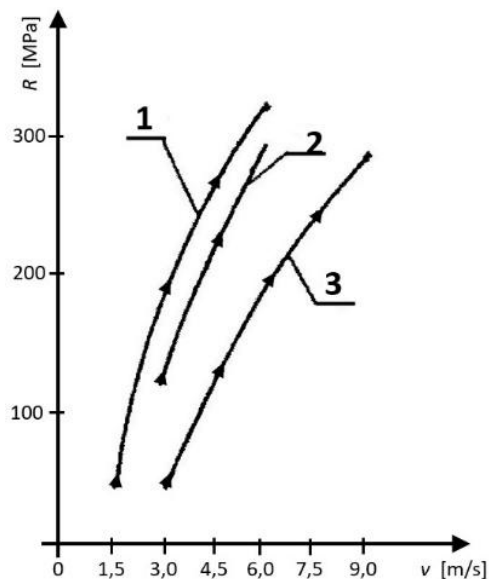
jednej operácii. Technická aplikácia synchronného účinku všestranného tlaku a rázovej rýchlosti zaťaženia sa riešila využitím hydrodynamických rázov v kvapalinách. Experimentálne sa na zariadení znázornenom na obr. 3 potvrdil predpoklad použitia hydraulického rázu ako zdroja vysokých tlakov a aj činiteľ zabezpečujúci synchronizáciu tlakového a úderového tvárnenia.



Obr. 3. Vysokotlakové zariadenie: 1 - hlavica, 2 - košík, 3 - piest, 4 - podložka, 5 - veko, 6 - skúšobná vzorka, 7 - puzdro, 8 - delené puzdro, 9 - oporná platňa, 10 - puzdro II



Obr. 4. Skúšobný priestor vysokotlakového zariadenia: 1, 2, 3, 4 - meracie otvory



Obr. 5. Priebeh aproximovaných hodnôt hydrodynamických tlakov

V skúšobnom zariadení sa pri experimentoch dosiahli tlaky až 350 MPa, pričom tieto tlaky spôsobil úder

barana pádostroja, ktorý mal hmotnosť 6 kg a rýchlosť  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pri statickom zaťažení bolo potrebné vyvinúť osoú silu zaťažovania 27 150 N. Na obr. 3 je detail skúšobného priestoru vysokotlakového zariadenia a na obr. 5 grafický priebeh aproximovaných hodnôt hydrodynamických tlakov a závislosti od rýchlosti pohybu barana pre rôzne hodnoty hmotnosti barana pádostroja. Hydrodynamické tvárnenie zabezpečuje synchronizáciu účinkov tlakového vysoko rýchlostného tvárnenia. Hydraulický ráz spôsobený úderom barana na lisovací piest možno použiť ako lacný, energeticky málo náročný zdroj dynamických tlakov. Hydrodynamické tlaky, ktoré vznikajú hydraulickým rázom sú radovo rovnaké, ako tlaky používané pri hydrostatickom tvárnení. Hydrodynamické tvárnenie, pretože spája výhody tlakového a úderového tvárnenia, má veľké predpoklady aplikácie v strojárskych praxi.

V mieste uzáveru vtedy nastane maximálne stúpnutie tlaku zodpovedajúce vzťahu (2). V opačnom prípade odrazená vlna ovplyvní tlakové pomery v bode 2 a stúpnutie tlaku bude menšie.

## 2 APLIKÁCIE HYDRAULICKÉHO RÁZU

Vzťah (2) sa môže písať po úprave v tvare:

$$\Delta p = \pm \rho \cdot C_z \cdot C, \quad (10)$$

kde  $C$  - rýchlosť zaťaženia,

$C_z$  - rýchlosť zvuku (rozruchu).

Absolútna hodnota prírastku tlaku závisí od hustoty, zmeny rýchlosti zaťaženia a rýchlosti šírenia rozruchu v tlakovom médiu. Rýchlosť rozruchu v tlakovom médiu nie je obyčajne konštantná veličina, ale premenlivá v závislosti od vlastností média a jeho usmernenia geometriou nádoby [4-8]. Hodnota rýchlosti rozruchu, čiže šírenia tlakovej vlny pružným médiom pri zohľadnení pružnosti tlakovej nádoby sa vypočíta zo vzťahu:

$$C_z = \sqrt{\frac{E \cdot g \cdot v_m}{E \cdot v \cdot D} \cdot C}, \quad (11)$$

kde  $g$  - tiažové zrýchlenie,

$E_v$  - modul objemovej pružnosti média,

$v_m$  - merný objem,

$D$  - priemer tlakovej nádoby,

$s$  - hrúbka steny tlakovej nádoby,

$E$  - modul pružnosti v ťahu materiálu tlakovej nádoby.

Z analýzy vzťahu (4) vyplýva, že na dosiahnutie maximálnej rýchlosti rozruchu je nevyhnutné, aby hodnota menovateľa vo vzťahu (4) bola blízka 1, čo je vtedy, keď tlaková nádoba je dokonale tuhá. Vzťah (2, resp. 3) vyjadruje tlakovú zmenu v dôsledku náhle

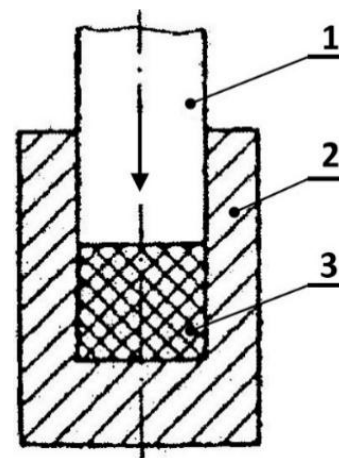
zmeny pohybu média až po anulovanie prúdenia. Hydraulický ráz podľa vzťahu (2, 3) vznikne vtedy, ak zastavenie média nastane v kratšom čase ako perióda kmitu  $T$  daná vzťahom:

$$T = \frac{2 \cdot e}{C_z}, \quad (11)$$

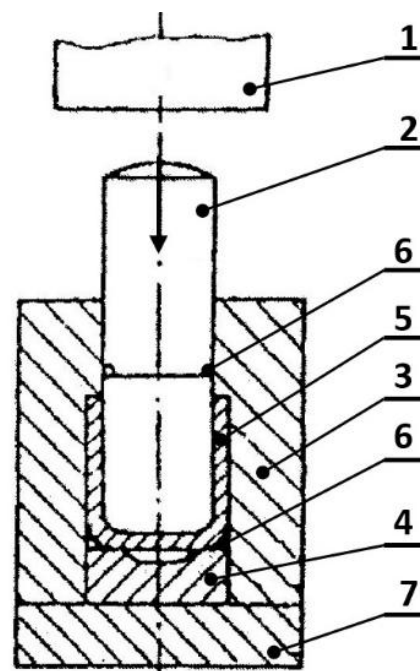
kde  $l$  je dĺžka nádoby v smere chodu média.

Tlaková zmena vznikne aj vtedy, ak časť pohybujúceho sa média jednostranne nahradí tuhý lisovník, ktorý po ráze naň náhle zastaví (obr. 6). Tlaková zmena spôsobená úderom lisovníka s hmotnosťou  $m$  pohybujúceho sa rýchlosťou  $v_0$  sa určí zo vzťahu:

$$p_{zt} = v_0 \cdot \sqrt{\frac{E_v \cdot v_m}{v_0}}. \quad (12)$$



Obr. 6. Nahradenie kvapaliny lisovníkom: 1 - lisovník, 2 - tlaková komora, 3 - tlakové médium



Obr. 7. Princíp tvárnenia hydraulickým rázom: 1 - baran tvárniaceho stroja, 2 - lisovník, 3 - tlaková nádoba, 4 - opora s tvárniacou dutinou, 5 - polovýrobok, 6 - tesnenie, 7 - podložka

Zmena tlaku vo vzťahu (12) závisí aj od modulu objemovej pružnosti  $E_v$  použitého tlakového média a od objemu tlakovej komory  $v_0$ . Z analýzy vzorca (12) vyplýva, že objem média v tlakovej komore sa prejavuje ako faktor, ktorý znižuje tlakové hodnoty. Vo vzorci (12) je opísaná tlaková zmena, ktorá nastane v tlakovej komore pri náhlom zastavení pohybujúceho sa lisovníka nárazom o tlakové médium. Podobná tlaková zmena vznikne aj vtedy, ak je tlakové médium uzavreté v tlakovej komore lisovacím piestom, ktorému sa udelil impulz ráznym účinkom barana vysoko rýchlostného tvárniaceho média. Tlaková zmena, ktorá vznikne v tlakovej komore sa využíva v tvárnení. Princíp tohto spôsobu je schematicky znázornený na obr. 6.

## ZÁVER

V príspevku bolo podané vysvetlenie problematiky vodného rázu a uvedené boli niektoré aplikácie tohto javu. Dôležitým problémom a jeho riešením je stanoviť veľkosť tlakových zmien v ľubovoľnom profile potrubia a stanovenie ich závislosti od času a od polohy uvažovaného profilu.

## LITERATÚRA

- [1] SMETANA, J. (1977): *Hydraulika 2*. NČSAV, Praha.
- [2] MORAVEC, J. (2016): *Hydrotvárnenie*. EDIS-vydavateľstvo UNIZA, ISBN 978-80-554-1205-4.
- [3] MORAVEC, J. (2011): *Nekonvenčné metódy tvárnenia*. EDIS-vydavateľstvo UNIZA, ISBN 978-80-554-0389-2.
- [4] HENRYCH, J. (1980): *Vlastnosti tekutín*. ALFA-SNTL Bratislava, Praha.
- [5] BOLJANOVIC, V. (2004): *Sheet metal forming Processes and Die Design*. Industrial Press, NY, ISBN 0-8311-3182-9
- [6] PEARCE, R. (2010): *Sheet Metal Forming*. ISBN 0-7503-0101-5.
- [7] MARCINIAK, Z. D.(2008): *Theory of Sheet metal forming*. Prague: Univ. Press. ISBN 978-1-107-00452-8.
- [8] VATER, M. - LIENHART, A. (1982): *Bänder, Bleche, Rohre*. 13, No.8.

---

# Analýza merania optickým 3D skenerom a výsledky merania 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 STU so sídlom 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 STU so sídlom v Trnave,  
Slovenská technická univerzita v Bratislave,  
Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava, Slovenská republika.

## The Analysis of Measurement Using Optical 3D Scanner and the Results of Measuring Cold-Drawn Seamless Steel Tubes

**Abstract:** The paper explores the application of a non-contact measurement technique - optical 3D digitization (active triangulation/structured light method) - for determining the dimensions (outer and inner diameters) of seamless cold-drawn steel tubes. The paper focuses on three areas of steel tube measurement by 3D digitization: (1) evaluation of the measured values using two different measuring volumes, (2) evaluation of the measured values with different 3D digitization parameter settings, (3) *Computer Aided Design (CAD) comparison*. The outcomes of the measurements and insights gained provide valuable guidance in selecting the appropriate 3D digitization method for seamless steel tube measurement.

**Keywords:** 3D digitization, optical 3D scanning, cold-drawn seamless steel tubes, measuring volume, exposure time, CAD comparison

---

## 1 ÚVOD

Tento článok nadväzuje a zároveň je pokračovaním publikácie [1], ktorá podobne, ako aj tento článok, sa venuje zisteniam a využitiu optickej 3D digitalizácie pri meraní rozmerov bezšvíkových ocelových rúr ťahaných za studena. Článok [1] sa zameriava na 3 oblasti pri 3D digitalizácii ocelových rúr, a to: 1 - vyhodnotenie nameraných hodnôt v jednotlivých rezoch, 2 - vyhodnotenie nameraných hodnôt pri znečistenej vzorke rúry, 3 - vyhodnotenie nameraných hodnôt z hľadiska rôznych nastavení polygonizácie. Tento článok sa zameriava na ďalšie tri oblasti pri 3D digitalizácii ocelových rúr, menovite: 1 - vyhodnotenie nameraných hodnôt pri použití dvoch rôznych meracích objemov (kapitola 2.1), 2 -

vyhodnotenie nameraných hodnôt pri rôznych nastaveniach parametrov 3D digitalizácie (kapitola 2.2), 3 - CAD porovnanie (CAD Comparison) (kapitola 2.3).

Článok sa zameriava na meranie rúr bezkontaktnou metódou merania, konkrétne optickým 3D skenerom GOM ATOS II TripleScan SO (obr. 1), ktorý využíva metódu aktívnej triangulácie (premietanie štruktúrovaného svetla).

V článku uvedené merané bezšvíkové ocelové rúry boli vyrobené priedlačným ťahaním za studena. Technológia ťahania rúr za studena [1-6] sa používa pri výrobe presných bezšvíkových ocelových rúr.

Vzájomná poloha sensorovej jednotky 3D skenera a meranej rúry je znázornená v článku [1].

Výsledkom 3D digitalizácie (t.j. 3D skenovania) je mrak bodov. Trojuholníkový model rúry (.stl súbor) bol vytvorený polygonizáciou v softvéri *GOM ATOS Professional v7.5 SR2*. Meranie priemerov rúr sa uskutočnilo pomocou bezplatného softvéru *GOM Inspect Suite 2020*. V ďalšom je v krátkosti uvedený postup merania priemerov (podrobnejšie je to vysvetlené v práci [7] a v článku [1]).

Meranie sa vykonávalo prevažne pomocou best-fit prvkov vytvorených na povrchu naskenovaného modelu rúry alebo na obrysoch získaných rezmi. Na vonkajšiu plochu polygónového .stl modelu rúry bol aplikovaný *best-fit valec*. Vo vzdialenosti 3 mm od konca rúry bola vytvorená rovina kolmá na os tohto *best-fit valca*, ktorá zároveň vytvorila rez cez .stl model rúry. Z rezu boli určené *best-fit kružnice* z obrysov vonkajšieho a vnútorného priemeru. Po ich vytvorení sa priemery merali pomocou funkcie *Inspect* a možnosti *Check*.

V prípade optického 3D skenovania, konkrétne pri zariadeniach *GOM ATOS TripleScan*, výraz *merací objem* (*measuring volume (MV)*) (obr. 1, obr. 2) označuje priestor, ktorý 3D skener dokáže zmerať („zachytiť“) v rámci jednej snímky. Tento priestor je určený veľkosťou zorného poľa (*field of view (FOV)*) 3D skenera a vzdialenosťou medzi ním a objektom, ktorý sa meria (rozmer *meracia vzdialenosť*, obr. 2).

Pri voľbe optimálneho meracieho objemu pre dané meranie je potrebné zohľadniť: 1 - rozmery skenovaného (meraného) objektu, 2 - požadovanú presnosť výsledkov, 3 - rozlíšenie detailov potrebných pre konkrétnu aplikáciu (napr. pre kontrolu kvality alebo pre účely reverzného inžinierstva). Merací objem je teda kľúčový parameter, ktorý ovplyvňuje použitie 3D skenera, presnosť a kvalitu získaných dát 3D meraním.

Významné atribúty *meracieho objemu* v prípade optického 3D skenovania sú:

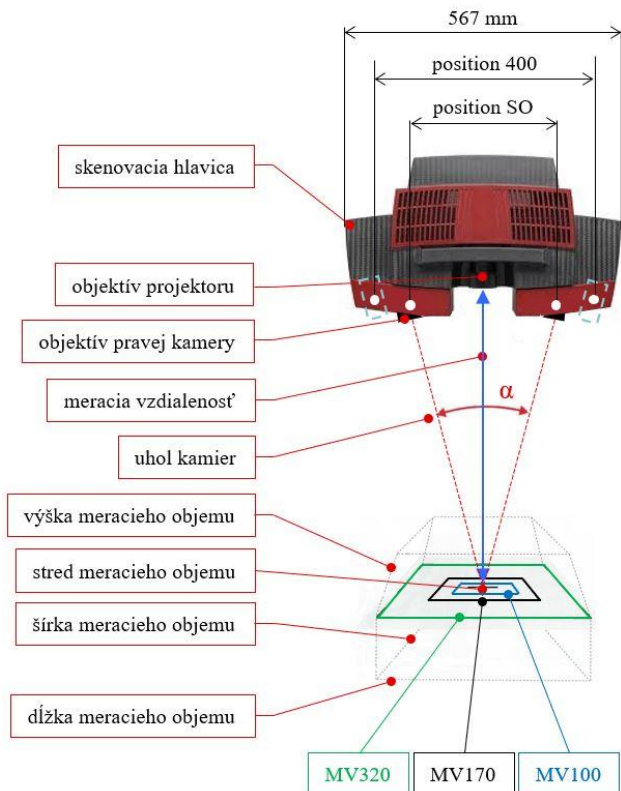
- *rozmery meracieho objemu*: Uvedené sú v podobe troch rozmerov (dĺžka × šírka × výška) a sú definované v mm. Rozmery meracieho objemu závisia od použitej konfigurácie skenera, vrátane: 1 - použitých šošoviek, 2 - nastavenia vzdialenosti medzi kamerami a projekčnou jednotkou (obr. 1, tab. 1);
- *presnosť a rozlíšenie*: Presnosť skenovania je vyššia v menších meracích objemoch, pretože skener sníma detaily na menšej ploche s vyšším rozlíšením (obr. 2). Naopak, väčšie meracie objemy umožňujú zachytiť väčšie objekty, ale môžu mať nižšie detaily;
- *modularita*: 3D skener *GOM ATOS TripleScan* umožňuje vymieňať šošovky (pre pravú a ľavú kameru resp. pre projektor je potrebné vymeniť šošovky súčasne) a upravovať konfiguráciu kamier, čo znamená, že je možné nastaviť rôzne meracie objemy pre rôzne aplikácie, napr. *malý merací objem* (v prípade *GOM ATOS II TripleScan SO*, napr. *MV38, MV60*) pre vysoko detailné skenovanie malých objektov (napr. diely hodínok, mince a pod.), *veľký merací objem* (v prípade *GOM ATOS II TripleScan 400* napr. *MV1400, MV1000*) pre skenovanie rozmernejších objektov (napr. karosérie áut, sochy).

Optický 3D skener *GOM ATOS II TripleScan* pozíciou kamier *SO* (*Small Objects* (*malé objekty*)) ponúka 5 meracích objemov (viď tab. 1), pozíciou kamier „400“ ponúka meracie objemy *MV1400, MV1000, MV700, MV560, MV320, MV170* a pozíciou kamier „800“ *GOM ATOS II TripleScan 800* meracie objemy *MV2000, MV1400, MV1000, MV560* [8].

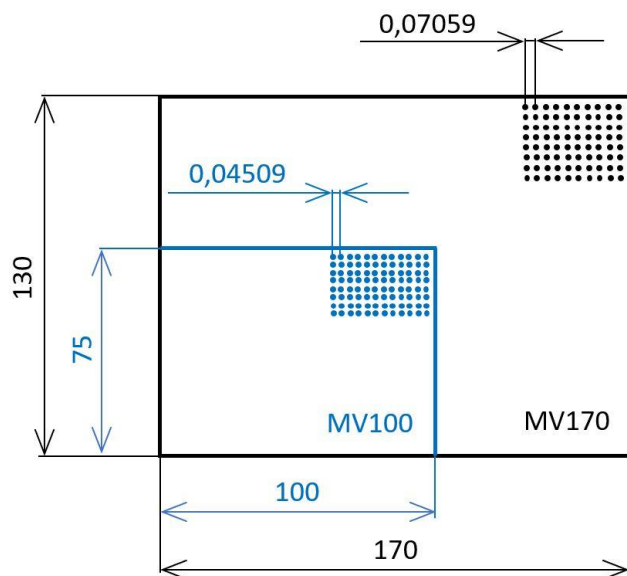
Rozdiel medzi pozíciami kamier *SO*, 400 a 800 je vo vzájomnej vzdialenosti ľavej a pravej kamery (obr. 1). Expozičný čas je doba, počas ktorej kamerový čip v senzore nahráva dáta, zatiaľ čo meraný objekt je skenovaný.

Tab. 1. Technické parametre sensorovej jednotky optického 3D skenera *GOM ATOS II TripleScan SO* [8] (uhol kamier je pre všetky meracie objemy  $\alpha = 28^\circ$ )

Merací objem ( $d \times \check{s} \times v$ ) [mm]	Rozlíšenie senzora kamery [mm]	Vzdialenosť nameraných bodov [mm]	Ohnisková vzdialenosť kamery [mm]	Ohnisková vzdialenosť projektora [mm]	Referenčné body [mm]	Meracia vzdialenosť [mm]
<b>MV320</b> (320 × 240 × 240)	5 000 000	0,124	12	30	Ø 1,5	490
<b>MV170</b> (170 × 130 × 130)	5 000 000	0,071	23	60	Ø 0,8	490
<b>MV100</b> (100 × 75 × 70)	5 000 000	0,045	35	80	Ø 0,8	490
<b>MV60</b> (60 × 45 × 35)	5 000 000	0,023	35	120	Ø 0,4	490
<b>MV38</b> (38 × 29 × 15)	5 000 000	0,015	80	150	Ø 0,4	490



Obr. 1. Skenovacia hlavica optického 3D skenera GOM ATOS II TripleScan SO a schematicky znázornené 3 rôzne meracie objemy (measuring volume - MV320, MV170 a MV100) (upravený na základe [8])

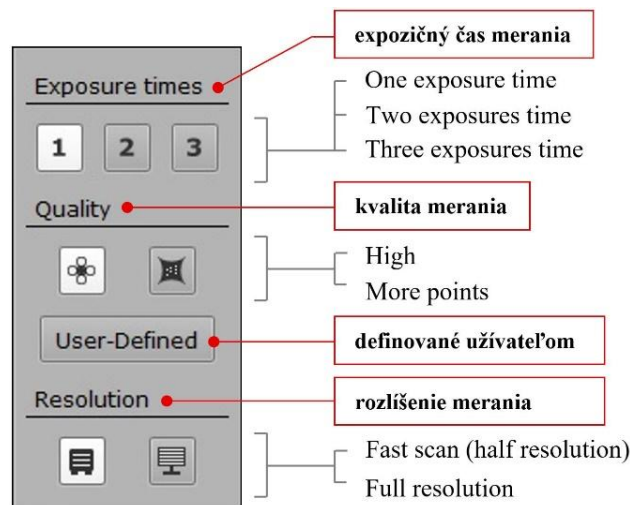


Obr. 2. Znázornenie dĺžky a šírky meracieho objemu (measuring volume) MV100 a MV170 so schematickým zobrazením vzdialenosti nameraných bodov (podľa [8])

Aby bolo možné skenovať ťažko digitalizovateľné povrchy alebo povrchy rôznych farieb, softvér GOM ATOS Professional v7.5 SR2 ponúka možnosť skenovania (t.j. merania) s rôznymi expozičnými časmi (1, 2 alebo 3) (obr. 3). Koeficient medzi časmi expozície je fixný a odvodzuje sa od prvého expozičného času. Každý ďalší expozičný čas je násobkom prvého expozičného času. Čím dlhší expozičný čas sa použije, tým dlhšie trvá skenovanie

(meranie). Pri skenovaní sa treba snažiť o použitie najkratšieho expozičného času [9].

Problematikou expozičného času pri 3D skenovaní sa zaoberá literatúra [10-12].



Obr. 3. Parametre merania v softvéri GOM ATOS Professional v7.5 SR2 (upravený na základe [9])

V softvéri je možné nastaviť aj kvalitu merania povrchu objektu (obr. 3). Doporučuje sa nastavenie High (Vysoké), aby boli získané čo najkvalitnejšie dáta. Na kvalitu dát môže mať vplyv napr. aj zníženie kontrastu premietaného rastra (t. j. štrukturovaného svetla). Môžu sa vyskytnúť oblasti na skenovanom povrchu, na ktorých zníženie kvality má zmysel, pretože vysoká kvalita nie je dôležitá. V tom prípade je možné zvoliť nastavenie More points (Viac bodov). Je možné aj užívateľské nastavenie (User-Defined)[9].

Nastavenie rozlíšenia merania (Resolution) v softvéri GOM ATOS Professional v7.5 SR2 (obr. 3) ovplyvňuje hustotu bodov, ktoré sa zbierajú počas skenovania, tým pádom aj objem dát. Na výber sú 2 možnosti: (1) Fast scan (half resolution) (Rýchle skenovanie (polovičné rozlíšenie)) a (2) Full resolution (Plné rozlíšenie). V prípade polovičného rozlíšenia sa zníži hustota bodov, ktoré sa zbierajú počas merania, čo vedie k modelu s menším počtom bodov. Výhodou polovičného rozlíšenia je rýchlejšie skenovanie a spracovanie dát a menšie nároky na úložný priestor dát a výpočtový výkon. Nevýhodou je skenovanie detailov. Voľba polovičného rozlíšenia sa doporučuje, keď je potrebné rýchlo získať menej detailné dáta (zvyčajne pri skenovaní rozmerovo veľkých objektov, kde jemné detaily nie sú kľúčové). Pri plnom rozlíšení sa sníma maximálny možný počet bodov, ktorý 3D skener podporuje (v našom prípade 5 Mpx, tab. 1). Výsledkom je podrobný model s vysokým počtom nameraných bodov a detailov. Nevýhodou plného rozlíšenia je väčšia veľkosť dátových údajov, dlhší čas spracovania a väčšie nároky na výpočtovú techniku. Voľba plného rozlíšenia sa doporučuje, keď je dôležité zachytiť jemné detaily objektu.

## 2 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 vstupných priemerov rúr na priemer po ťahaní [1, 7].

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):

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

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.

### 2.1 Vyhodnotenie nameraných hodnôt pri použití dvoch rôznych meracích objemov

Cieľom tohto experimentálneho vyhodnotenia bolo porovnanie nameraných hodnôt pri použití dvoch rozličných meracích objemov 3D optického skenera *GOM ATOS II TripleScan SO*. Konkrétne išlo o meracie objemy *MV100* a *MV170*, ktoré sa odlišovali aj vzdialenosťou jednotlivých nameraných bodov. Pri *MV100* bola táto hodnota 0,04509 mm, zatiaľ čo pri *MV170* výrobca udáva hodnotu 0,07059 mm (obr. 2). Z vyššie uvedených číselných hodnôt je evidentné, že merací objem *MV100* je vhodný pre skenovanie rozmerovo menších objektov, kedy je požiadavka na meranie jemných detailov [7].

Keďže merací objem *MV170* bol použitý iba na digitalizáciu vzoriek rúr, ktoré neboli podrobené procesu ťahania, v tabuľkách (tab. 2 až tab. 5) sú uvedené len namerané hodnoty pred ťahaním. Experiment bol vykonaný na dvojici rúr s priemerom Ø18 mm a dvoma rôznymi hodnotami hrúbky steny, t. j. 1 mm a 2 mm. Výsledky merania ukázali, že priemerné hodnoty vonkajšieho priemeru namerané pomocou *MV170* boli pri oboch hrúbkach steny vzoriek väčšie ako pri vzorkách meraných pomocou *MV100*, a to o približne stotinu milimetra. Podobný rozdiel bol zaznamenaný aj pri priemerných hodnotách hrúbky steny rúrok [7].

Tab. 2. Merací objem *MV170* - vzorka rúry Ø18 mm s hrúbkou steny 1 mm [7]

Č.	D1 [mm]		D2 [mm]		Hrúbka steny [mm]	
	pred	po	pred	po	pred	po
1	17,978	-	16,016	-	0,981	-
2	17,977	-	16,017	-	0,980	-
3	17,982	-	16,009	-	0,986	-

Tab. 3. Merací objem *MV170* - vzorka rúry Ø18 mm s hrúbkou steny 2 mm [7]

Č.	D1 [mm]		D2 [mm]		Hrúbka steny [mm]	
	pred	po	pred	po	pred	po
1	18,013	-	13,942	-	2,036	-
2	18,042	-	13,970	-	2,036	-
3	18,038	-	13,966	-	2,036	-

Tab. 4. Merací objem *MV100* - vzorka rúry Ø18 mm s hrúbkou steny 1 mm [7]

Č.	D1 [mm]		D2 [mm]		Hrúbka steny [mm]	
	pred	po	pred	po	pred	po
1	17,962	12,028	16,029	9,911	0,967	1,059
2	17,967	12,034	16,029	9,842	0,969	1,096
3	17,965	12,033	16,023	9,873	0,971	1,080

Tab. 5. Merací objem *MV100* - vzorka rúry Ø18 mm s hrúbkou steny 2 mm [7]

Č.	D1 [mm]		D2 [mm]		Hrúbka steny [mm]	
	pred	po	pred	po	pred	po
1	18,002	11,988	13,949	7,832	2,027	2,078
2	18,033	12,007	13,977	7,682	2,028	2,163
3	18,028	11,986	13,971	7,831	2,029	2,078

Pri priemerných hodnotách vnútorného priemeru sa výsledky správali opačne, t. j. hodnoty namerané pomocou objemu *MV170* boli o stotinu milimetra menšie ako tie, ktoré boli získané pomocou objemu *MV100* [7].

### 2.2 Vyhodnotenie nameraných hodnôt pri rôznych nastaveniach parametrov 3D digitalizácie

Povrch digitalizovaných rúr bol lesklý, čo spôsobilo, že ich skenovanie bolo náročnejšie než obvykle. Počas optického 3D skenovania nebol aplikovaný zmatňovací sprej, a preto bolo potrebné prispôsobiť parametre digitalizácie:

- expozičný čas 3,

- *High Quality*,
- *Full Resolution* [7].

V rámci tohto experimentálneho vyhodnotenia sa skúmal vplyv zmeny parametrov na výsledné hodnoty. Z tohto dôvodu boli pre optický 3D skener zvolené nasledujúce nastavenia:

- expozičný čas 2,
- *More Points*,
- *Half Resolution* [7].

Tab. 6. Porovnanie nameraných hodnôt pri rôznych parametroch 3D digitalizácie [7]

Č.	D1 [mm]		D2 [mm]		Hrúbka steny [mm]		R [%]
	pred	po	pred	po	pred	po	
16	13,998	12,005	10,000	7,900	1,999	2,053	14,836
16'	13,998	12,004	10,000	7,900	1,999	2,052	14,861

pokračovanie Tab. 6.

Č.	Kruhovitosť				Sústrednosť	
	pred		po		pred	po
	D1	D2	D1	D2		
1	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02
1'	0,02	0,02	0,01	0,07	0,02	0,01

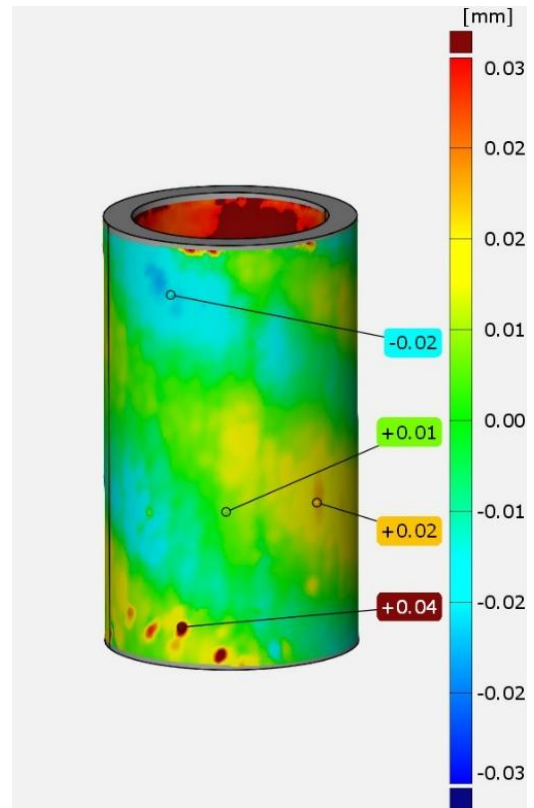
Experimentálne hodnotenie vplyvu zmeny parametrov bolo realizované na vzorke rúry s priemerom  $\varnothing 14$  mm a hrúbkou steny 2 mm. Hodnoty získané zo skenovania rúry s pôvodnými parametrami (16) boli porovnané s hodnotami získanými pri použití upravených parametrov (16'). Na základe údajov z tab. 6 možno konštatovať, že zmena týchto parametrov nemá významný vplyv na merané hodnoty vzoriek rúr, keďže rozdiely sú minimálne alebo zanedbateľné [7].

### 2.3 CAD porovnanie (CAD Comparison)

Experimentálne vyhodnotenie nazývané *CAD Comparison* zahŕňa vytvorenie referenčného modelu vzorky rúry pomocou *CAD* softvéru a jeho následné porovnanie s modelom rúry získaným prostredníctvom 3D digitalizácie [13]. Výsledkom tohto procesu je farebná mapa odchýlok (obr. 4), ktorá zobrazuje oblasti na naskenovanom modeli, kde sa rozmerovo alebo tvarovo líši od referenčného modelu vzorky rúry [7].

Experimentálne vyhodnotenie bolo uskutočnené na vzorke rúry s priemerom  $\varnothing 18$  mm a hrúbkou steny 1 mm, ktorá nebola vystavená procesu ťahania. V *CAD* softvéri bol vytvorený presný referenčný model, na základe ktorého vznikla farebná mapa odchýlok. Tá obsahuje farebnú škálu, umožňujúcu určiť veľkosť odchýlky podľa farebného odtieňa. Okrem toho je možné presne zistiť odchýlku v konkrétnych bodoch

výberom požadovaných miest na modeli (obr. 4). Na vonkajšom povrchu vzorky rúry je viditeľná zmena farebného odtieňa v špirálovom vzore (po skrutkovici), čo odráža proces výroby rúry, ktorý zahŕňa ťahanie [7].



Obr. 4. Farebná mapa odchýlok pre vzorku rúry [7]

### ZÁVER

Vzorky bezšvíkových ocelových rúr boli úspešne digitalizované pomocou 3D optického skenovania. Táto metóda sa ukázala ako veľmi efektívna, pretože umožnila vytvorenie detailného digitálneho modelu rúry, ktorý bolo možné opakovane analyzovať bez nutnosti ďalšieho skenovania. Medzi hlavné výhody patrí možnosť získať presné údaje o geometrii rúr bez opakovaných meraní, čo šetrí čas aj náklady.

Aj napriek lesklému povrchu skúmaných vzoriek nebolo nutné použiť zmatňujúci kriedový sprej. Tento krok bol zvolený kvôli potenciálnemu skresleniu meraní, keďže kriedový sprej vytvorí vrstvu na povrchu skenovanej rúry, čo môže viesť k nesprávnemu odhadu hrúbky nanesej vrstvy. Okrem toho eliminácia tohto kroku znížila celkové finančné náklady a zrýchlila celý proces digitalizácie.

Rozšírenie tejto metódy na ďalšie aplikácie v priemysle môže priniesť ešte väčší prínos, predovšetkým tam, kde sú potrebné rýchle a presné výsledky bez potreby priamych zásahov do skúmaného objektu. V budúcnosti by bolo vhodné skúmať aj možnosti automatizácie procesu skenovania, aby sa dosiahla vyššia efektivita a eliminovali sa možné chyby spôsobené ľudským

faktorom. Taktiež by sa mohla detailne analyzovať schopnosť tejto technológie spracovať ešte komplexnejšie geometrie rúr (napr. profilových rúr) a trňov na výrobu profilových rúr [14] a iných kovových nástrojov a výrobkov, čo by otvorilo nové možnosti využitia v rôznych odvetviach priemyslu.

## PodĎakovanie

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).

## LITERATÚRA

- [1] MOROVIČ, L. - BÍLIK, J. - HAVRAN, F. (2024): *Využitie optickej 3D digitalizácie pri meraní rozmerov bezšvíkových ocelových rúr ťahaných za studena*. In: Technológ, Žilinská univerzita v Žiline v EDIS - vydavateľstve UNIZA, Roč. 16, č. 4, pp. 62-67, ISSN 1337-8996.
- [2] BÍLIK, J. - SOBOTA, R. - NECPAL, M. (2023): *Výroba bezšvových rúr. Teoretickotechnologické aspekty výroby*. 1. vyd. Bratislava: Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve SPEKTRUM, 71 p., ISBN 978-80-227-5308-1.
- [3] BÍLIK, J. - SOBOTA, R. - KAPUSTOVÁ, M. - KRITIKOS, M. (2021): *Vplyv veľkosti pretvorenia na presnosť rúr pri prievlačnom ťahaní jedno a dvojtáhovou technológiou*. In: Technológ, Žilinská univerzita v Žiline v EDIS - vydavateľstve UNIZA, Roč. 13, č. 3, pp. 20-24, ISSN 1337-8996.
- [4] 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, iss. 2, pp. 1-22, ISSN 2076-3417, <https://doi.org/10.3390/app12020676>
- [5] 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.
- [6] GROSS, L. (2022): *Získavanie dát 3D digitalizáciou a vyhodnotenie geometrických tolerancií ocelových 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.
- [7] HAVRAN, F. (2021): *Vyhodnotenie presnosti vybraných rozmerov bezšvíkových ocelových 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.
- [8] GOM (2011): *GOM ATOS TripleScan. User Manual - Hardware*. Braunschweig: GOM mbH.
- [9] GOM. (2010): *GOM ATOS Professional. Příručka V7. Základní školení*.
- [10] OJAL, N. - CAVINESS, A. - BLUM, A. - AU B. - JAYCOX, W. A. - GIERA, B. (2024): *Optimizing exposure times of structured light metrology systems using a digital twin*. In: Measurement, Vol. 224, 113816, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113816>
- [11] EKSTRAND, L. - ZHANG, S. (2011): *Auto-exposure for three-dimensional shape measurement using a digital-light-processing projector*. In: Optical Engineering, Vol. 50, iss. 12, 123603, ISSN 1560-2303, <https://doi.org/10.1117/1.3662387>.
- [12] ALEXANDROV, V. S. - PRANKL, J. - ZILLICH, M. - VINCZE, M. (2017): *High Dynamic Range SLAM with Map-Aware Exposure Time Control*. In: 2017 International Conference on 3D Vision (3DV), pp. 48-56, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.07427>.
- [13] 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.
- [14] BURANSKÝ, I. - MOROVIČ, L. (2015): *Využitie 3D optického merania nástrojov a rúr*. In: Zborník príspevkov: Odborná konferencia ŽP VVC 2015 konaná pri príležitosti 175. výročia Železiarní Podbrezová a.s., 21.-23.09., Hotel Stupka, Tále.

---

# Porovnanie systémov prenosu výkonu koľajových vozidiel s nezávislou trakciou

---

## 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 2257

## 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 2257

## 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.blatnický@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2659

## Comparison of power transmission systems of rail vehicles with an independent traction

**Abstract:** The article deals with independent traction rail vehicles, mainly the power transmission type. The advantages and disadvantages of different types of power transmission for independent traction vehicles are compared, including the use of a particular type in each category of rail vehicles and a schematic illustration.

**Keywords:** independent traction, a power transmission, a rail vehicle.

---

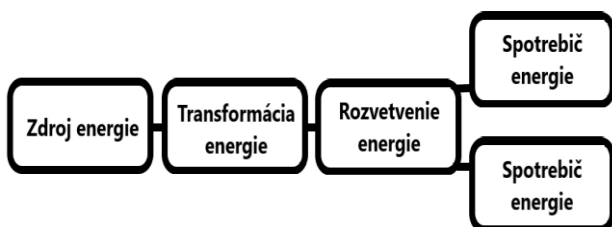
## ÚVOD

Železničná osobná doprava je považovaná za lídra v oblasti udržateľnej mobility, najmä z hľadiska environmentálnej šetrnosti. V súčasnej ére rýchleho technologického rozvoja a neustálych zmien v dopravnom priemysle je kľúčové hľadať inovatívne riešenia, ktoré zvýšia efektivitu, spoľahlivosť a ekologickú udržateľnosť dopravných prostriedkov. Napriek tomu, že železničná doprava je vnímaná ako ekologická alternatíva, jej popularita medzi cestujúcimi je primárne ovplyvnená inými faktormi, ako sú vysoká úroveň komfortu, bezpečnosť, relatívne hustá dopravná sieť a rýchlosť prepravy. Jedným z hlavných cieľov súčasného vývoja v železničnej doprave je konštrukcia vozidiel, ktoré spĺňajú neustále prísnejšie požiadavky na výkon, komfort cestujúcich a environmentálnu udržateľnosť. Veľkou

výzvou je obmeniť zastaraný vozový park, ktorý v mnohých krajinách prekračuje svoju plánovanú životnosť za nové moderné koľajové vozidlá. Dopravcovia sa v snahe minimalizovať náklady často uchýľujú k modernizácii existujúcich vozidiel s cieľom predĺžiť ich životnosť, avšak tieto riešenia málokedy vedú k požadovaným ekologickým a technologickým štandardom. Pri vozidlách nezávislej trakcie, ktoré nepotrebuju energiu z trakčného vedenia, sa tieto požiadavky sprisňujú rapidným tempom, preto sú výrobcovia nútení zlepšovať účinnosť komponentov, ktoré sa podieľajú pri prenose výkonu. Aj napriek prosperujúcemu vývoju jednotlivých typov prenosu výkonu nezávislej trakcie sa dopravcovia snažia nahradiť tento typ trakcie vozidlami so závislou trakciou z ekonomických a environmentálnych dôvodov.

## 1 PRENOS VÝKONU

Prenos výkonu predstavuje kľúčový prvok trakčných systémov koľajových vozidiel nezávislej trakcie, pričom jeho hlavnou úlohou je sprostredkovať prenos energie zo zdroja na hnacie dvojkolesie. Vo všeobecnosti sa pod pojmom prenos výkonu rozumie prenos energie zo zdroja do spotrebiča, pričom môže dochádzať k transformácii jedného druhu energie na iný alebo k rozvetveniu energie. V prípade koľajových vozidiel ide o proces prenosu točivého momentu z kľukového hriadeľa spaľovacieho motora na hnacie dvojkolesie. Keďže momentová charakteristika spaľovacieho motora nie je vhodná na priamy pohon dvojkolesia, prenos výkonu musí zabezpečiť transformáciu tejto charakteristiky na optimálnu trakčnú charakteristiku vozidla. Okrem toho je nevyhnutné, aby zabezpečoval plynulý rozjazd vozidla z nulovej rýchlosti a optimálny prenos energie počas celého prevádzkového režimu.



Obr. 1. Jednoduché schéma prenosu výkonu

Prenos výkonu sa delí do nasledujúcich skupín:

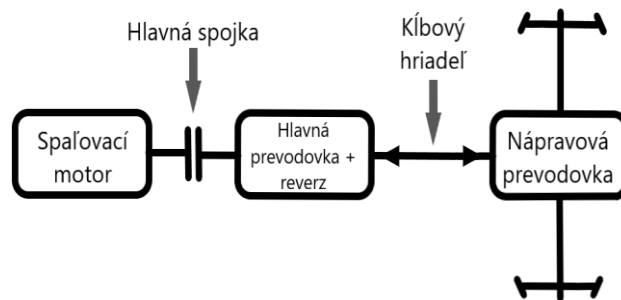
- mechanický,
- hydraulický.

Existuje ešte elektrický prenos výkonu, avšak tento typ sa používa pri vozidlách závislej trakcie.

### 1.1 Mechanický prenos výkonu

Mechanický prenos výkonu koľajových vozidiel je principiálne podobný ako v automobiloch. Pri automobiloch sa používa spiatka, avšak pri koľajových vozidlách, ktoré by mali mať rovnaké trakčné vlastnosti pre oba smery sa používa reverz. Tento prenos je relatívne jednoduchý a pozostáva z hlavných častí, ktoré zahŕňajú spaľovací motor, hlavnú spojku, hlavnú, reverzačnú a nápravovú prevodovku, kľbové hriadele. Spaľovací motor býva zvyčajne vznetrový. Hlavná spojka zabezpečuje v pohonnom reťazci rozjazd z nulovej rýchlosti pomocou preklzovania a na následné radenie prevodových stupňov. Nakoľko koľajové vozidlá majú podstatne vyššiu hmotnosť ako cestné vozidlá, čas preklzu je vyšší a tepelná záťaž na hlavnú spojku je výrazne vyššia, ktorej musí odolať. Hlavná prevodovka je často 4-stupňová a má vysokú účinnosť, teda umožňuje použitie spaľovacích motorov z nákladných vozidiel. Nevýhodou je nekonštantný prenos výkonu a obmedzenie použitia pre ľahké a malé vozidlá. Bežne sa používajú dvoj-

alebo trojhriadeľové prevodovky s účinnosťou v rozsahu 96 % až 98 %. Taktiež sa používajú planétové prevodovky. Ovládanie prevodoviek je zvyčajne ručné, alebo automatické. Nápravová prevodovka je posledný člen v hnacom ústrojenstve, ktorá prenáša výkon na dvojkolesie. Výhodou mechanického prenosu výkonu je vysoká účinnosť, nenáročnosť údržby, nízka hmotnosť a priaznivá cena. Avšak má nekonštantný prenos výkonu a je určená na prenosi malých výkonov. Príkladom aplikácie tohto prenosu výkonu je motorový univerzálny vozík *MUV-69*, zhutňovač štrku *ZŠ-72*, alebo pluh na úpravu štrkového lôžka *PUŠL-71*.



Obr. 2. Hlavné komponenty mechanického prenosu výkonu

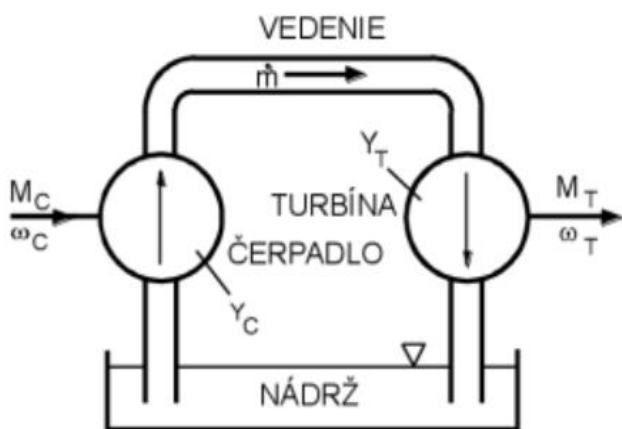
### 1.2 Hydraulický prenos výkonu

Hydraulický prenos výkonu predstavuje mechanizmus sprostredkovania prenosu krútiaceho momentu z primárneho zdroja na výstupný člen, pričom ako prenosové médium využíva prúdiacu kvapalinu. Tento typ prenosu môže, ale nemusí meniť krútiaci moment v závislosti od konkrétneho systému a jeho prevedenia. Hydraulické prenosi výkonu sa delia na dve hlavné skupiny: hydrodynamické a hydrostatické prenosi výkonu. Hydrodynamické systémy využívajú pohyb kvapaliny na prenos energie prostredníctvom hydrodynamických meničov, zatiaľ čo hydrostatické systémy prenášajú výkon prostredníctvom tlaku kvapaliny a menia ho na mechanickú energiu.

#### 1.2.1 Hydrodynamický prenos výkonu

Hydrodynamický prenos výkonu je proces sprostredkovania prenosu energie, pri ktorom sa využíva kinetická energia prúdiacej kvapaliny, zatiaľ čo hydrostatický tlak v systéme zostáva pomerne nízky a stabilný. Základnými prvkami hydrodynamického prenosu výkonu sú hydrodynamické meniče (čerpadlá, turbíny a statory-reaktory). Hydrodynamické čerpadlá sú rotačné hydraulické zariadenia, ktoré premieňajú mechanickú energiu privádzanú vstupným hriadeľom na kinetickú energiu kvapaliny. Táto kvapalina následne vstupuje do turbíny, kde prebieha opačný proces premeny energie. Voľnobežný reaktor, umiestnený medzi čerpadlom a turbínou, zvyšuje účinnosť systému tým, že usmerňuje prúd kvapaliny a teda násobí krútiaci

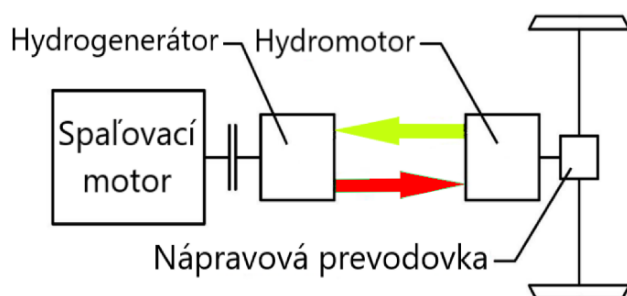
moment. Prepínanie meničov zabezpečujú olejové posúvače, pričom meniče v podstate fungujú ako prevodové stupne mechanickej prevodovky. Vďaka tomu je hydrodynamický prenos výkonu schopný zabezpečiť plynulú a efektívnu transformáciu energie v trakčných sústavách s účinnosťou až do 90%. Niekedy sa dodatočne používajú hydrodynamické spojky, ktoré majú podobnú konštrukciu ako hydrodynamické vodiče, avšak nedisponujú reaktorom a teda nenásobia krútiaci moment. Výhodami hydrodynamického prenosu výkonu sú napríklad plynulý rozjazd, vysoká odolnosť voči prehratiu, s tým spojená vysoká životnosť, alebo výrazné násobenie krútiaceho momentu, vhodnosť použitia pre vysoké výkony. Nevýhodami sú napríklad premenlivá účinnosť, zložitý prevodový pomer, vysoké nároky na tesnosť systému, problémy udržať konštantnú rýchlosť.



Obr. 3. Hydrodynamický okruh [4]

### 2.2.2 Hydrostatický prenos výkonu

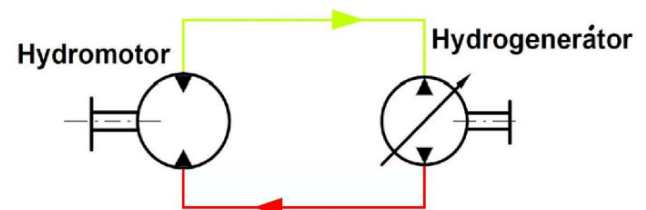
Pri hydrostatickom prenose výkonu premeňa hydrogenerátor, ktorý je často piestikový, mechanickú energiu od spaľovacieho motora na tlakovú energiu kvapaliny. Natlakovaná kvapalina je ďalej vedená sústavou trubiek a hadíc k hydromotoru, kde je jej energia premenená naspäť na mechanickú energiu. Výstupný hriadeľ hydromotora je spojený s nápravovou prevodovkou, cez ktorú je poháňané dvojkoľesie. Po odovzdaní energie prúdi kvapalina naspäť do hydrogenerátora a takto sa cyklus opakuje.



Obr. 4. Princíp činnosti hydrostatického pohonu

Pre pohon koľajovej techniky sa využívajú uzavreté hydrostatické obvody. V takomto obvode kvapalina

vytlačená hydrogenerátorom prúdi vysokotlakovou vetvou (až 450 bar), odovzdá tlakovú energiu hydromotoru a vracia sa nízkotlakovou vetvou priamo späť do sania hydrogenerátora. Tlak na saní je vždy vyšší ako 0,1 MPa. To zabezpečí, že sa na rozvodových doskách prevodníkov nevyskytuje kavitácia, a otáčky hydrogenerátora tak môžu byť podstatne vyššie ako v otvorenom obvode.



Obr. 5. Uzavretý hydrostatický obvod

Nevýhodou sú vysoké nároky na kvalitu oleja, ktorý priamo ovplyvňuje životnosť komponentov. Hydrostatický prenos výkonu motorových vozňov ponúka niekoľko výhod, medzi ktoré patrí nízka hmotnosť komponentov, priaznivá cena, nižšie rozmerové požiadavky na inštaláciu, možnosť intenzívneho brzdenia pohonom a flexibilita v konštrukčnom usporiadaní, jednoduchá zmena smeru. Významným prínosom je aj charakteristika výstupného krútiaceho momentu. Pri konštantných otáčkach spaľovacieho motora je riadený prietok kvapaliny k hydromotoru pomocou naklápania dosky hydrogenerátora, čo predstavuje primárnu reguláciu. Ak však nie je dosiahnutá požadovaná rýchlosť vozidla, použijú sa regulačné hydromotory. Znižovanie ich geometrického objemu vedie k nárastu otáčok, pričom prietok a tlak v systéme zostávajú nezmenené. Krútiaci moment na výstupnom hriadeľ hydromotora má takto plynulý hyperbolický priebeh, čo je ideálne pre efektívne využitie výkonu spaľovacieho motora. Jednou z nevýhod hydrostatického prenosu výkonu je relatívne nižšia účinnosť a životnosť v porovnaní s mechanickými systémami prenosu výkonu. Ďalším problémom je nižšia tepelná kapacita uzavretého hydrostatického okruhu, ktorá vyžaduje chladenie a občasnú výmenu prevádzkovej kvapaliny, alebo zložitost' olejového hospodárstva. Tento systém nie je ideálny pre vozidlá, ktoré vyžadujú vysoké prevádzkové rýchlosti, pretože na dosiahnutie požadovaného regulačného rozsahu by bolo potrebné nasadiť veľké hydrostatické prevodníky. Z týchto dôvodov sa hydrostatický pohon využíva najmä pre vozidlá s nízkou rýchlosťou, ako sú menšie motorové vozne a úzkorozchodné lokomotívy v banskom priemysle.

### ZÁVER

Koľajové vozidlá nezávislej trakcie predstavujú dôležitú súčasť dopravného systému, najmä v oblastiach s nedostatočnou elektrifikáciou a v

špecifických segmentoch dopravy, ako je regionálna osobná doprava a manipulačné práce. Efektívnosť a ekologická udržateľnosť týchto vozidiel je výrazne ovplyvnená voľbou prenosu výkonu, ktorý zohráva kľúčovú úlohu pri optimalizácii trakčných vlastností, prevádzkovej spoľahlivosti a celkovej účinnosti pohonných systémov. Analýza jednotlivých typov prenosu výkonu preukázala, že mechanický prenos výkonu je vhodný pre vozidlá s nižšími výkonovými požiadavkami, kde je rozhodujúce vysoká účinnosť a nízke prevádzkové náklady. Naproti tomu hydrodynamický prenos výkonu vyniká schopnosťou zabezpečiť plynulý rozjazd a vysokú odolnosť voči prehrievaniu, čo ho predurčuje na použitie vo výkonnejších trakčných systémoch. Hydrostatický prenos výkonu sa vyznačuje kompaktným konštrukčným riešením a možnosťou presnej regulácie výstupného momentu, avšak jeho uplatnenie je obmedzené na vozidlá s nižšou prevádzkovou rýchlosťou. Budúci výskum a vývoj v oblasti trakčných pohonov nezávislej trakcie by sa mal zamerať na integráciu hybridných riešení a alternatívnych zdrojov energie s cieľom zvyšovať ich ekologickú udržateľnosť a energetickú efektívnosť. Kombinácia moderných systémov a inovatívnych prenosových mechanizmov môže viesť k výraznému zníženiu emisií a prevádzkových nákladov. Vzhľadom na rastúcu potrebu udržateľných dopravných riešení bude dôležité naďalej rozvíjať a optimalizovať technológie prenosu výkonu tak, aby boli schopné splňať náročné požiadavky moderného železničného sektora.

### Pod'akovanie

Táto práca vznikla vďaka podpore projektu KEGA 024ŽU-4/2024: „Prehlbovanie vedomostí študentov univerzitného štúdia v oblasti konštrukcie dopravných prostriedkov realizáciou odborných a vedeckovýskumných aktivít v odbore“ a projektu KEGA 031ŽU-4/2023: „Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného programu Vozidlá a motory.“

### 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] STRÁŽOVEC, P. (2014): *Hydrostatické pohony koľajových vozidiel*. ŽU v Žiline, SjF, KDMT, č.: 28230920141032, 71 s.
- [5] HELLER, P. (2019): *Kolejová vozidla II.* Západočeská univerzita v Plzni, 381 s., ISBN 978-8026-1077-36.
- [6] HORVÁTH, M. (2014): *Trakčné charakteristiky vybraných koľajových vozidiel nezávislej trakcie*. ŽU v Žiline, SjF, KDMT, č.: 28230920141012, 54 s.
- [7] BUČKO, M. - BARTA, D. - DIŽO, J. - BLATNICKÝ, M. - LOVSKA, A. - KOWALSKI S. (2025): *Analysis of the current state of motor units with single-axle bogies*. In: *Transportation Research Procedia* (to be published).
- [8] Baek, B. - Lim, O. (2022): *Performance improvement of independent high pressure pump for DME engine*. In: *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 23, No. 5, pp. 1365-1371, ISSN 1229-9138.
- [9] SPIRYAGIN, M. - WOLFS, P. - WU, Q. - COLE, C. - MCSWEENEY, T. (2022): *What is the right way to model traction power distribution in complex heavy haul locomotive models?* In: *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 342-351, ISSN 2195-4356.

---

# Method Yamazumi and its application

---

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

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.  
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, Slovak Republic.  
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, Slovak Republic.  
E-mail: martin.buzalka@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2713

## Marta Kasajová, Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.  
E-mail: marta.kasajova@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2707

**Abstract:** The main objective of the contribution is to improve the selected production process in an electrical engineering company. In order to achieve the main objective, it was necessary to gradually develop the specified partial objectives. The *Yamazumi method*, which is subsequently used to balance the V03 line or explain the bottleneck in the production process, which in the case of the analysed line is a hydraulic tester. After balancing the line and distributing the workstations among the workers, it was possible to plan and carry out a test of adding a worker to the line.

**Keywords:** *yamazumi*, process improvement, industrial engineering.

---

## INTRODUCTION

Lean manufacturing is a production control technique to eliminate waste from the manufacturing process. Lean manufacturing also focuses on reducing costs by eliminating unnecessary activities by applying a management philosophy that focused on identifying and eliminating waste from every step in the production chain. The benefits of lean manufacturing include reduced inventory, less process waste, less rework, reduced lead times, financial savings, and improved process understanding. In order to achieve maximum production, a company must manage its production line using systematic techniques or approaches. One of the techniques is the line balancing technique. It has been shown that the use of line balancing technique can increase a company's productivity.

An assembly line is a cycle of workstations where tasks related to the assembly of a product are performed. The common objective of assembly line

balancing is to minimize the number of workstations for a given cycle time and to minimize the cycle time for a given number of workstations.

## 1 METHOD YAMAZUMI

*Yamazumi* is a visual tool that originated in Japan and helps to streamline work cycles, identify losses, and properly balance a work line between multiple operators. Individual work operations in the production flow are divided into colour scales (Fig. 1), thanks to which it is easier to detect hidden waste.

The main task of this method is to help balance the individual steps of the production operations that are necessary to carry out the production cycle. The visualization of the individual steps of the production process is displayed using a cumulative bar graph, while the individual steps of the production process are color-coded into individual categories:

- *green colour* indicates work with added value, changes the properties, form and value of the product. Work can be manual or automated and represents any assembly operation that adds value to the product (screwing, pressing, loading pins, etc.),
- *orange colour* indicates necessary work that is without added value, but is necessary to change the properties, form or value of the product (grabbing, releasing a part). These steps must be performed so that the steps that add value can be carried out,
- *red colour* indicates work that does not add value, does not change the form or properties of the product (worker walking, searching for material, etc.). This work should be included in the method as little as possible and the company should eliminate it,
- *yellow colour* indicates work that is not performed on every product but depends on the specifications. This work is applicable to products of different designs and types,
- *blue colour* indicates variable work. It is performed on every product, its duration and scope depend on the specifics of individual product variants [14].

- balancing activities with respect to the bottleneck of the line,
- improving employee performance,
- increasing the content of activities that add value,
- reducing production time,
- time alignment of work steps.

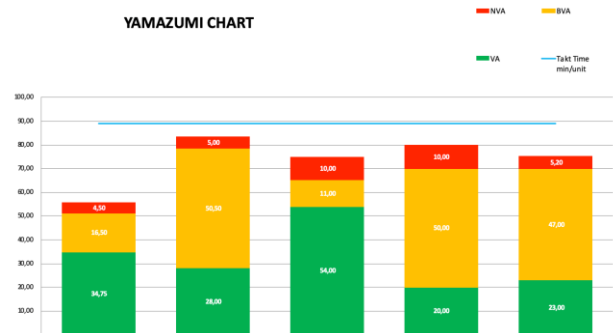


Fig. 2. Yamazumi chart after eliminating waste

The Japanese Yamazumi method is used in the Toyota car factory. The success of this method is also confirmed by other companies that adopt it and apply it to their production processes. It is a tool for reducing labour and eliminating costs. The purpose of this method is to analyse the process in the smallest details and find the best solution that will simplify the process and increase production. Yamazumi uses its colour marking standard to define the type of work and points out the possible elimination or need for balancing cycle times.

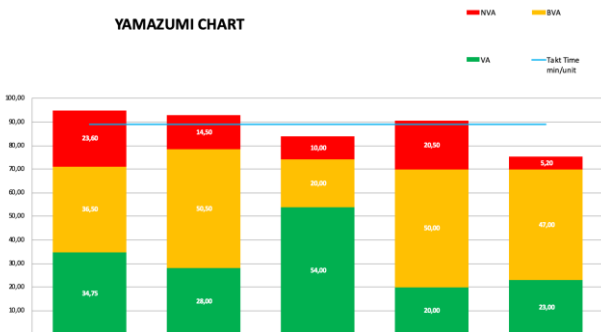


Fig. 1. Yamazumi chart - formed before any changes have been made

After you have the Yamazumi chart formed you can see the whole process, involving each and every step individually and you can rearrange it as you want. (technically approved) This too can lead to reducing a lot of waste, especially useless movement. Removing *Mura*, *Muri*, and *Muda*, gives you a better organized process with less wasted time and increases productivity.

Time data for creating a Yamazumi diagram can be obtained using a snapshot of the work operation or by determining predefined times using one of the methods.

Yamazumi is an ideal method for increasing labour productivity and balancing the production line. Changes in the production process can bring several benefits:

- eliminating a bottleneck on the assembly line,

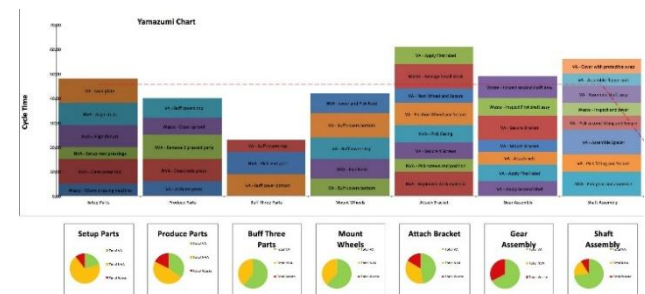


Fig. 3. Yamazumi chart - an example

The Yamazumi chart's capacity to offer a visual picture of how work is distributed among various process phases or operators is one of its main advantages.

## 2 THE USE THE YAMAZUMI CHART IN LEAN MANUFACTURING

The Yamazumi chart can work amazingly well for any process-based company. By implementing this easiest of tools, it allows the company to better understand where time is being potentially wasted in each process, which alone provides a number of advantages.

However, to better illustrate this point, we can look at just three reasons as to why a Yamazumi chart should

be used in Lean manufacturing. By studying these reasons, it should then make it easier for the reader to understand how and why they can use this chart within their own business or process-driven application.

Wasted time is wasted money, and no organization wants to go ahead and waste money if it can be avoided. Thus, any method that can reduce this possibility should be embraced with open arms, and a *Yamazumi* chart is a free and simple approach that generates results.

By being able to look at each process individually and the time that each step takes, it is easier to see it in a visual format to then know where time is being wasted.

Imagine that a particular part of the manufacturing process has a number of steps. The *Yamazumi* chart would have one bar for that process, with additional bars for each individual aspect, but within the one bar would be a block for each individual aspect. Think of it as being *Process 1* followed by *Process 1:1*, then *1:2* and so on.

When you then look at the chart, you can see how long it takes for part 1:2 compared to other sections and determine if too much time is being spent on that part of the process. As a result, changes can be made in the process to reduce that time, leading to a faster end result and a better outcome overall.

The *Yamazumi* chart can allow you to determine which option is better by looking at each individual component of each part of the manufacturing process. Then you can try to work out if the order should be changed. It's all about optimization from a time-based perspective, and it simply presents the information in a way that is easier to follow and to compare across the board. In fact, when companies such as *Toyota* use this approach to streamline the manufacturing side of their business and change the order on production lines, that gives us strong evidence that this method can be used on a large scale too.

By gaining insight into the time spent on each process, as well as coming to terms with the best order, it can mean that the target process will then become far more balanced thanks to employing one of these charts. By becoming aware of the potential wastage at various stages, it ultimately delivers something that is more efficient and still achieves that end result that the manufacturing process requires.

If the process is unbalanced, then it can ultimately lead to issues, making up for lost time or not enough energy being exerted into various key areas due to too much time being spent elsewhere. A balanced approach to business strategies and production will always lead to a better outcome overall.

## 2.1 The comparison of time balancing

The *Yamazumi method* visually showed how long the activities take, at which workstation, and how they can be divided among the workers. To make it logical, the worker will operate the workstations that follow each other. The first worker will perform activities at workstations *AP 50* and *AP 60* (79.4 seconds) and the second worker will be at the remaining four workstations (47.4 seconds).

The comparison of time balancing can be seen in Fig. 4. where the manual times of both workers and the automatic testing time are graphically shown and compared. It can be seen that the worker who will operate the first two workstations will perform the tasks 32 seconds longer than the second worker, but it is not possible to divide the work so that it is balanced evenly. Since I will be present when performing this test of two workers, it is possible to adjust this distribution during or notice how it suits the workers best.

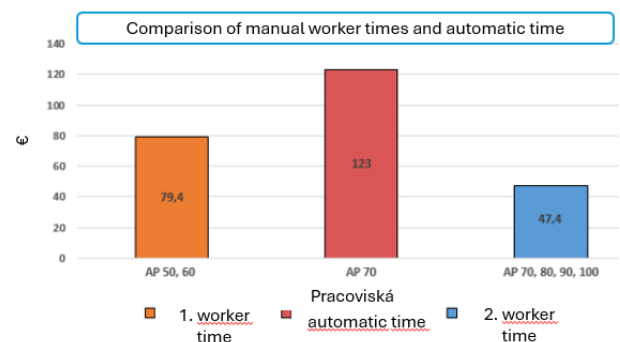


Fig. 4. *Yamazumi* chart - an example

After balancing the line and distributing the workstations among the workers, it was possible to plan and carry out a test of adding a worker to the line.

## CONCLUSIONS

Balancing the line based on the *Yamazumi method* suited the workers, and in the event that the second worker with a smaller number of operations was waiting for the first worker, he attached a label to the cube and thus performed part of the operations at the *AP 60* workplace. The high difference between the calculated number of pieces produced and the actual number is caused by the fact that the workers not only adhered to the specified norm per worker so that the current norm would not increase, but also by the fact that the workers produced more slowly towards the end of the shift because the company did not want to keep a large number of pieces in stock.

## Acknowledgement

This work was supported by project contract No. VEGA 1/0633/24.

This work was supported by the Slovak Research and Development Agency under the contract No. APVV-19-0305.

## REFERENCES

- [1] ANTONIUK, I. - SVITEK, R. - KRAJČOVIČ, 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. - PEKARCICOVA, M. (2020): *Reverse logistic*. In: InvEnt 2020: Industrial engineering - Invention for enterprise - proceedings. Bielsko-Biala: Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humnistycznej.
- [3] BURGANOVA, N. - GRZGAR, 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-Białej, p. 11-18, ISBN 978-83-66249-56-1.
- [4] VAVRIK, V. - FUSKO, M. - BUČKOVÁ, M. - GASO, M. FURMANNOVÁ, N. - STAFFENOVA, K. (2022): *Designing of machine backups in reconfigurable manufacturing systems*. In: Applied Sciences, 12(5), pp. 1-27, ISSN 2076-3417.
- [5] FILIPOVA, I. - DULINA, L. - BIGOSOVA, E. - PLINTA, D. (2021): *Modern Possibilities of Patient Transport Aids*. In: Transcom 2021. Virtual conference 26 May – 28 May, Slovakia. Transportation Research Procedia, 55, pp. 510-517.
- [6] SUKALOVA, V. - STOFKOVA, Z. - STOFKOVA, J. (2022): *Human Resource Management in Sustainable Development*. In: Sustainability, 14(21), 142.
- [7] BEREŽNÝ, Š. - KRAVECOVÁ, D. (2012): *Lineárne programovanie*. [cit. 2019-12-20]. Dostupné na internete.
- [8] GANTTOV DIAGRAM (2016): [cit. 2019-11-15]. Dostupné na internete: <https://managementmania.com/sk/ganttov-diagram-gantt-chart>
- [9] LINEÁRNE PROGRAMOVANIE 1 (2019): [online], [cit. 2019-11-21]. Dostupné na internete: [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 s. ISBN 80-7100-467-
- [12] MÁČA, J. - LEITNER, B. (1999): *Operačná analýza. I. diel*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 181 s, ISBN 80-88829-39-9.
- [13] SLAMKOVÁ, E. (1990): *Operačná a systémová analýza: Návod na cvičenia*. Bratislava: Alfa, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 177 s. ISBN 80-0500-2017.
- [14] SEJMON, V. - EVIN, E. (2022): *Zvyšovanie produktivity montážnej linky vybalansovaním montážnych staníc pomocou metódy Yamazumi* [online], [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: Microsoft Word - 073-077.doc (tuke.sk).

# Združené voľné a zápustkové kovanie

**Ján Moravec, doc. Ing., PhD.\***

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: jan.moravec@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2764

## Combined open and drop forging

**Abstract:** The article deals with the issue of metal processing by hot forming, in this case by forging. The text points out the supporting facts that influence the possibility of applying combined open and drop forging. This technology will become a good way to achieve optimal results. The theoretical and practical aspects of the analysed process are pointed out. One solution to produce a forging by combined open and drop forging is presented.

**Keywords:** forging, die, press, hammer, technology.

## ÚVOD

Kvalita výkovkov kovaných na bucharoch závisí najmä od zručnosti kováča. Výkovky majú spravidla veľké a nerovnomerné prídavky na trieskové obrábanie. Tento nedostatok sa dá nahradiť technológiou kovania výkovkov na kľukových lisoch združeným voľným a zápustkovým kovaním. Hlavnou výhodou združeného kovania na kľukových lisoch pred kovaním na bucharoch sú nasledujúce:

1. Pri vybavení lisu nástrojmi jednoduchej konštrukcie pre jednotlivé operácie, sú takto súčasne ustálené a zaistené rozmery výkovkov, ktoré sú pri každom kuse. Presnosť sa dosahuje kinematikou a konštrukčnými danosťami kľukového lisu.
2. Spotreba materiálu, počet ohrevov, spotreba energie na ohrev kovu a energia pri kovaní sú až dvakrát nižšie.
3. Pracovník môže mať nižšiu kvalifikáciu.
4. Zvýši sa produktivita práce.
5. Kováč sa menej unaví.
6. Práca sa dá veľmi ľahko mechanizovať.

## 1 KOVANIE

Kovaním sa vyrábajú diely požadovaného tvaru a rozmeru tvárnou deformáciou východiskového polovýrobku na určitom kovacom zariadení. Kovaním sa dosiahne nielen stanovený tvar, ale zlepšia sa takisto aj mechanické vlastnosti kovu [1-5].

### 1.1 Spojenie voľného a zápustkového kovania

Združené kovanie na kľukových lisoch, ktoré je zakončené operáciami zápustkového kovania sa aplikuje pri výrobe súčastí zložitého geometrického tvaru, kde je potrebné zabezpečiť presné rozmery

výkovku. Okrem uvedených predností má združené kovanie ešte jednu výhodu, ktorá určuje rentabilitu využitia použitého náradia, a to možnosť rýchlej výmeny jednotlivých dutín skladaných nástrojov pri ich opotrebovaní alebo pri predčasnom poškodení [6-8].

### 1.1.1 Združené voľné kovanie a zápustkové kovanie jadra čerpadlového piesta

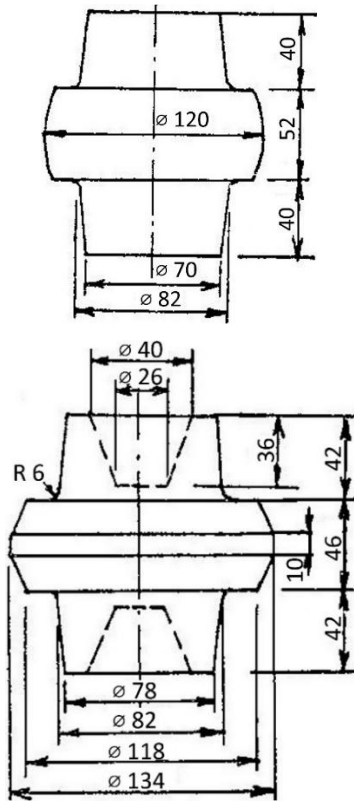
Výkovok tohto dielca sa vyrába z polovýrobku z polovýrobku s priemerom 80mm a dĺžke 195 mm na jeden ohrev a na dva zdvihy šmýkadla lisu. Operačné úseky voľného a zápustkového kovania sú na obr. 1. Prvá operácia, t.j. nadelenie dávky presných polovýrobkov za studena sa robí špeciálnym nástrojom, na 600 t lise. V druhej operácii sa po ohreve polovýrobku na teplotu kovania 1 150°C polovýrobok predbežne čelne ubíja pre tvárnenie a súčasne sa odstraňujú okoviny. Napokon v tretej operácii sa dielec tvárni v zápustkovej dutine. Operácie tohto postupu sa robia vo zvláštnom nástroji, a to v združenej dvoj dutinovej zápustke skonštruovanej pre kovanie štyroch zhodných kusov, ktoré sa vzájomne líšia hlavnými rozmermi. Nástroj je na obr. 2.

## 2 NÁSTROJE A ICH TRIEDENIE

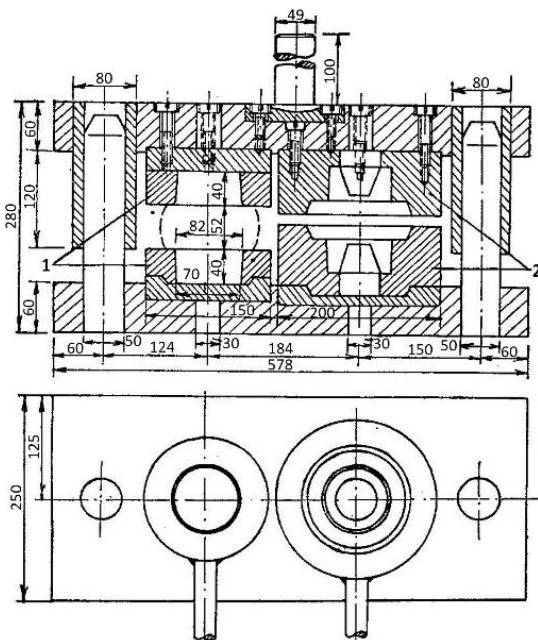
Nástroje, ktoré sa používajú pri kovaní na kľukových lisoch sa dajú rozdeliť do takýchto kategórií:

1. Nástroje jednoduchého profilu pre voľné kovanie.
2. Nástroje tvarového profilu pre voľné kovanie.
3. Nástroje pre kovanie v zápustkách s výronkom.
4. Nástroje pre kovanie v zápustkách bez výronku.
5. Nástroje pre razenie.

6. Držiaky pre upevnenie skladaných nástrojov.
7. Podložky pre upnutie podložných zápustkových výronkov.



Obr. 1. Výrobné úseky pri kovaní jadra piestu čerpadla: a- predbežné ubijanie polovýrobku v zásuvnej kruhovej tvárnici; b- dokončenie tvárnenia súčiastky v zásuvnej tvárnici zápustkovej dutiny



Obr. 2. Združená dvoj dutinová zápustka pre kovanie jadra čerpadla

### 3 KLUKOVÉ LISY

Združené voľné a zápustkové kovanie sa dá vykonávať na obyčajných kľukových lisoch. Hlavnými časťami takéhoto lisu sú: stojan, kľukový

mechanizmus, hnacie ústrojenstvo a šmýkadlá. Kľukový hriadeľ sa otáča v oporách, umiestnených na stojane lisu. Šmýkadlo sa vratne pohybuje vo vedení, ktoré je takisto na stojane lisu. Jedna časť nástroja sa upína do šmýkadla a druhá časť nástroja na stôl lisu. Kovaný materiál leží na stole lisu a tvárni sa pritlačením šmýkadla. Sily vznikajúce pri tvárnení preberá stojan lisu. Hlavnou zvláštnosťou kľukového lisu je stálosť pohybu pracovného šmýkadla nezávisle od odporu výkovku (pretvárneho odporu). Výpočty sa odlišujú podľa druhu lisu a sústavy pohonu. Kľukové lisu s jednou ojniciou sa triedia takto: podľa uloženia hlavného hriadeľa v oporách sa kľukové lisu delia na dva druhy:

- a) na dvoj stojanové, ak sú opory hriadeľa na oboch stranách ojnice,
- b) na lisu jedno stojanové, ak ležia opory na jednej strane ojnice [9, 10]

### 3.1 Kinematika kľukového lisu

V nasledujúcom texte je použité nasledujúce označenie:

$R$  je polomer kľuky, čiže vzdialenosť medzi osou hriadeľa v oporách a osou kľukovej hlavy ojnice [cm],

$L$  je dĺžka ojnice, teda vzdialenosť medzi stredmi kľukovej a piestnej hlavy ojnice [cm],

$\frac{R}{L}$  je polomer kľuky k dĺžke ojnice [- ],

$S$  je dráha šmýkadla [cm].

Pri kľukových lisoch je najdôležitejšia poloha šmýkadla na konci zdvihu, teda v tom úseku, kde sa vykonáva výrobná operácia. Z toho dôvodu sa dráha šmýkadla stanovuje od dolnej krajnej polohy. Uhly natočenia kľuky sa odpočítajú od dolnej polohy stredy kľukového času v opačnom smere, než ako sa otáča hriadeľ (obr. 3). Dráha šmýkadla  $S$  sa určí v závislosti od uhla natočenia kľuky podľa vzťahu:

$$S = R \cdot \left[ (1 - \cos \alpha) + \frac{1}{K} \cdot (1 - \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2 \alpha}) \right], \quad (1)$$

približne:

$$S = R \cdot \left[ (1 - \cos \alpha) + \frac{K}{2} \cdot \sin^2 \alpha \right]. \quad (2)$$

Ak je známa dráha šmýkadla, môže sa určiť uhol natočenia kľuky  $\alpha$ :

$$\cos \alpha = \frac{2 \cdot \left(1 - \frac{S}{R}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{K}\right) + \left(\frac{S}{R}\right)^2}{2 \cdot \left(1 - \frac{S}{R} + \frac{1}{K}\right)}. \quad (3)$$

Rýchlosť šmýkadla v závislosti od uhla natočenia kľuky v závislosti od uhla natočenia kľuky, dá sa vyjsť z približného vzťahu pre dráhu bude:

$$v = \omega \cdot R \cdot \left[ \sin \alpha + \frac{K}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha) \right]. \quad (4)$$

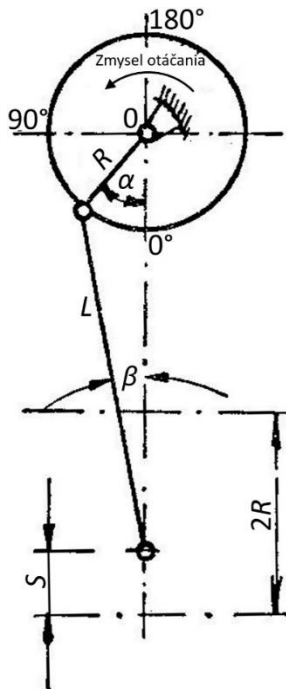
Zrýchlenie šmýkadla:

$$I = -\omega^2 \cdot R \cdot (\cos \alpha + K \cdot \cos \alpha), \quad (5)$$

kde  $\omega$  je uhlová rýchlosť otáčania hriadeľa [ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}.$$

Ako je z predošlých vzťahov zrejme, závisí rýchlosť  $v$  a zrýchlenie  $I$  šmýkadla od uhla natočenia kľuky. Rýchlosť  $v$  má maximálnu hodnotu pri  $\alpha = 90^\circ$  a nulovú hodnotu pri  $\alpha = 0^\circ$  a tiež ak  $\alpha = 180^\circ$ . Maximálna hodnota zrýchlenia bude naopak pri  $\alpha = 0^\circ$  a  $\alpha = 180^\circ$ , kdežto nulová hodnota pri  $\alpha = 90^\circ$  a  $\alpha = 270^\circ$ .



Obr. 3. Kinematická schéma kľukového mechanizmu

### 3.2 Výpočet potrebnej sily lisu a deformačnej práce

Sila lisu sa vypočíta pre voľné kovanie zo vzorca:

$$F = k \cdot S, \quad (6)$$

pre kovanie v zápustke podľa vzorca:

$$F = k \cdot S + k_y \cdot S_y, \quad (7)$$

Vo vzťahu značí:

$k$  - merný tlak klzu materiálu výkovku [MPa],

$S$  plocha priemetu zápustkového výkovku v deliacej rovine [ $\text{mm}^2$ ],

$k_y$  - merný tlak klzu materiálu výronku [MPa],

$S_y$  - plocha výronku v deliacej rovine pri zápustkovom kovaní [ $\text{mm}^2$ ].

Ak sú známe zmeny plochy  $S$ , jej dĺžkové rozmery a zákonitosti zmeny teploty pri deformácii, dá sa

stanoviť potrebná sila lisu [t] v ľubovoľnom úseku ubíjaného výkovku. Zmena plochy  $S$  sa dá určiť aplikovaním zákona stálosti objemu. Pre približný výpočet sa predpokladá, že vplyvom deformácie zachová plocha svoj geometrický tvar, čo zvyšuje hodnotu súčiniteľa vplyvu trenia na čelách a zväčšuje zásobu výkonu lisu pri porovnaní s potrebným výkonom. Plocha pri voľnom ubíjaní sa určí podľa vzorca:

$$S_x = \frac{V}{h_x}, \quad (8)$$

kde  $S$  je plocha deformovaného polovýrobku v danom okamihu ubíjania [ $\text{mm}^2$ ],

$V$  je objem ubíjaného kovu [ $\text{mm}^3$ ],

$h_x$  výška polovýrobku v danom okamihu ubíjania [mm].

Dĺžkové rozmery čelnej plochy, ktoré je potrebné poznať pre výpočet vplyvu síl trenia, sa stanovujú podľa vzorcov:

- pre kruhovú základňu je:

$$d = 1,13 \cdot \sqrt{S_x}, \quad (9)$$

- pre štvorcovú základňu:

$$a_x = b_x = a_0 \cdot \sqrt{y}, \quad (10)$$

Vo vzťahoch sú:

$a$  hľadané dĺžkové rozmery [mm], ktoré sa dosiahnu pri ubíjaní,

$a_0$  rozmery strany štvorca pred ubíjaním,

$y$  je stupeň prekovenia rovnajúci sa  $\frac{S_x}{S_0}$ ,

$S_0$  je plocha východiskového polovýrobku [ $\text{mm}^2$ ].

## ZÁVER

V predloženom texte bolo poukázané na nosné fakty, ktoré vplyvajú na možnosť aplikovania združeného voľného a zápustkového kovania. Táto technológia je istotne dobrou cestou po ktorej sa dá prísť k optimálnym výsledkom. Budúcnosť ukáže, či sa aj tzv. nie veľmi používané postupy dočkajú svojej renesancie.

## DODATOK

### Kovanie plochého hranola so štvorcovou základňou

V nasledujúcom riešení sa s prihliadnutím k výsledkom pokusov predpokladá stálosť napätia  $\sigma_x$  pozdĺž úsečky  $AB$  (obr. 4) a jeho nezávislosť od súradnice  $z$ , takže v trojuholníku  $COD$  sú napätia  $\sigma_x$  iba funkciou súradnice  $x$ . Zo symetrie je zrejme, že vo zvyšných trojuholníkoch na ktoré je základňa rozdelená je napätosť rovnaká ako v trojuholníku

COD. Podmienka rovnováhy síl pôsobiacich na vyšrafovaný element na obr. 4 v smere osi  $x$ . Vyplýva:

$$\begin{aligned} & \sigma_x \cdot 2 \cdot h \cdot \tan \alpha - (\sigma_x + d \cdot \sigma_x) \cdot 2 \cdot (x + dx) \cdot \\ & \cdot h \cdot \tan \alpha + \sigma_y \cdot 2 \cdot \frac{dx}{\cos \alpha} \cdot h \cdot \sin \alpha - \\ & - 4 \cdot \bar{\tau}_z \cdot \tan \alpha \cdot dx = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

pričom  $\bar{\tau}_z$  označuje veľkosť šmykového napätia v styčnej ploche. Tretí člen na ľavej strane (11) udáva zložky síl pôsobiacich v smere osi  $x$  v plôškach  $AA'$  a  $BB'$  a nemôžu sa zanedbať.

Pretože je  $\alpha = \frac{\pi}{4}$ , dá sa rovnica (11) po zvyčajnom zanedbaní nekonečne malých veličín druhého rádu upraviť na tvar:

$$d\sigma_x = -\frac{2}{h} \cdot \bar{\tau}_z \cdot dx, \quad (12)$$

Pri aplikovaní podmienky plasticity  $d\sigma_x = d\sigma_y$ , a zavedení predpokladu, že šmykové napätie v styčnej ploche je stále dané vzťahom:

$$\bar{\tau}_z = -f \cdot \sigma_x, \quad (13)$$

kde  $f$  je súčiniteľ trenia,

vyplynie z rovnice (12):

$$d\sigma_y = \frac{2 \cdot f \cdot \sigma_k}{h} \cdot dx, \quad (14)$$

teda:

$$\bar{\sigma}_y = \frac{2 \cdot f \cdot \sigma_k}{h} \cdot \alpha + C. \quad (15)$$

Integračná konštanta  $C$  sa určí z podmienky:

$$\bar{\sigma}_y = \left(\frac{a}{2}\right) = -\sigma_k, \quad (16)$$

vyjde:

$$C = -\frac{f \cdot \alpha \cdot \sigma_k}{h} \cdot \sigma_k, \quad (17)$$

teda platí:

$$\bar{\sigma}_k = -\sigma_k \cdot \left[ 1 + \frac{2 \cdot f}{h} \cdot \left( \frac{a}{2} - x \right) \right]. \quad (18)$$

Tvárnica sila  $F$  je daná výrazom:

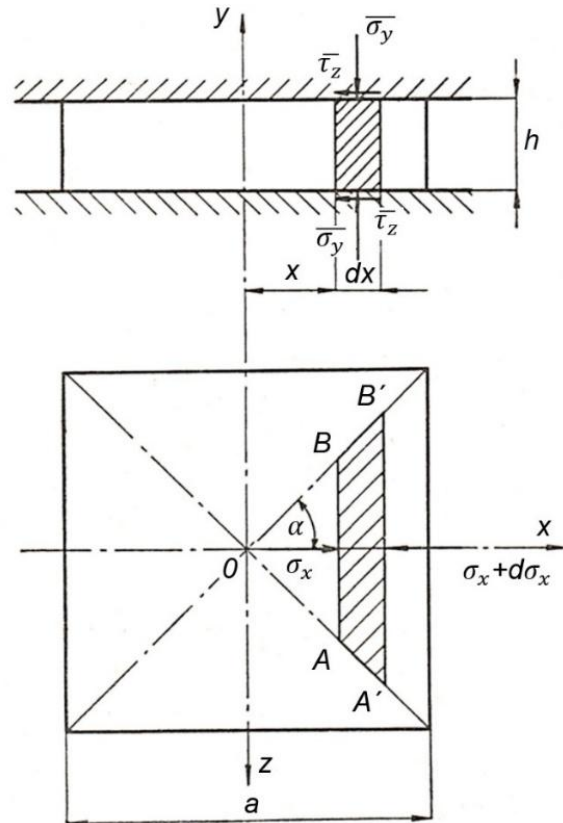
$$F = 4 \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} |\bar{\sigma}_y| \cdot 2x \cdot \tan \alpha \cdot dx, \quad (19)$$

z ktorého po dosadení, integrovaní a úprave vyplýva:

$$F = \sigma_k \cdot \left[ 1 + \frac{f_a}{3 \cdot h} \right] \cdot a^2. \quad (20)$$

Napokon stredný kovací tlak bude:

$$p_{strk} = \frac{F}{a^2} = \sigma_k \cdot \left[ 1 + \frac{f_a}{3 \cdot h} \right]. \quad (21)$$



Obr. 4. Kovanie plochého výkovku so štvorcovou základňou

## LITERATÚRA

- [1] JOHNSON, W. - MAMALIS, A. G. (1998): *Plasticity and metal forming*. Cambridge.
- [2] KUMAR, S. (2008): *Technology of Metall Forming Processes*. New Delhi, India, pp. 358, ISBN 978-81-208-3425-0.
- [3] MORAVEC, J. - STROKA, R. (2009): *Vybrané kapitoly z technológie tvárnenia*. EDIS - vyd. ŽU v Žiline, ISBN 978-80-8070-980-8.
- [4] BAČA, J. - BÍLIK, J. - TITTEL, V. (2010): *Technológia tvárnenia*. STU v Bratislave, ISBN 978-80-227-3242-0.
- [5] BÍLIK, J. - KAPUSTOVÁ, M. - RIDZOŇ, M. (2015): *Teória tvárnenia*. Trnava, Alumni Press, ISBN 978-80-8096-9.
- [6] MIELNIK, M. E. (1991): *Mechanical Metallurgy*. Mc Graw - Hill Book Company, NY.
- [7] ŽÍDEK, M. - DĚDEK, V. - SOMMER, B. (1988): *Tváření oceli*. SNTL ALFA Praha.
- [8] BLAŠČÍK, F. - POLÁK, K. (1985): *Teória tvárnenia*. ALFA SNTL, Bratislava.
- [9] MORAVEC, J. (2015): *Teória tvárnenia kovov*. EDIS vyd. UNIZA, ISBN 978-80-554-1095-1.
- [10] MORAVEC, J. (2024): *Vybrané kapitoly z technickej plasticity a teórie tvárnenia*. EDIS vyd. UNIZA, ISBN 978-80-554-2093-6.

---

# Uplatnenie plánovaného experimentu počas realizácie Kudovej skúšky

---

## Bohdan Savytskyi, Bc.

Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave,  
Slovenská technická univerzita v Bratislave,  
Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava  
E-mail: xsavytskyi@stuba.sk

## Jozef Bílik, doc. Ing., PhD.\*

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

## Janette Kotianová, PaedDr., PhD.

Katedra aplikovanej matematiky, Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a mechatroniky,  
Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave,  
Slovenská technická univerzita,  
Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava.  
E-mail: janette.kotianova@stuba.sk

## Application of the planned experiment during the implementation of the Kudo test

**Abstract:** This research is concerned with the application of a *Design of Experiments (DOE)* during the execution of the *Kudo* test, focusing on the analysis of the influence of three factors: relative transformation, compression speed and range of forces. The aim is to compare their effect and identify their interdependence and potential influence on the progress of the test. Based on a detailed review of the available literature and an analysis of scientific databases such as *Web of Science*, *Science Direct*, *Springer Link* and *ResearchGate*, no relevant studies addressing this issue were found. Therefore, this research focuses on the design of an experimental approach and its possible application in practice. The findings may contribute to the optimization of test parameters and to the extension of knowledge in the field of mechanical testing of materials.

**Keywords:** *Kudo* test, *DOE - Design of Experiments*, *FFE - Full Factorial Experiment*, relative transformation, compression speed, range of forces.

---

## ÚVOD

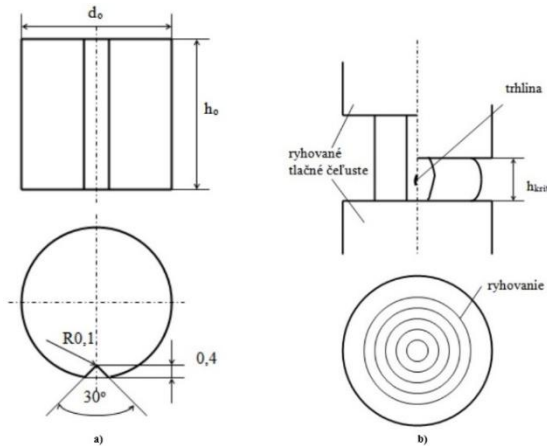
*Kudova skúška* je technologická skúška používaná na hodnotenie objemovej tvárniteľnosti materiálov za studena. Pri tejto skúške sa valcová vzorka (obr. 1a) umiestni medzi dve rovnobežné čeluste s ryhovaným povrchom a postupne sa stláča (obr. 1b). Ryhované čeluste zabezpečujú pevné uchopenie vzorky a znižujú riziko jej nekontrolovaného vybočenia počas deformácie. Pri *Kudovej skúške* dochádza k plastickej deformácii materiálu, ktorá pokračuje až do jeho porušenia. Výsledky skúšky umožňujú určiť mechanické vlastnosti materiálu, ako je jeho schopnosť deformácie a odolnosť voči porušeniu pri tvárnení za studena. *Kudova skúška* sa často používa na hodnotenie materiálov, ktoré sú určené na tvárnenie za studena. Pomocou tejto skúšky je

možné získať cenné informácie o plastických vlastnostiach materiálov, ako je ich tvárniteľnosť, pevnosť a schopnosť absorbovať deformácie bez porušenia [1].

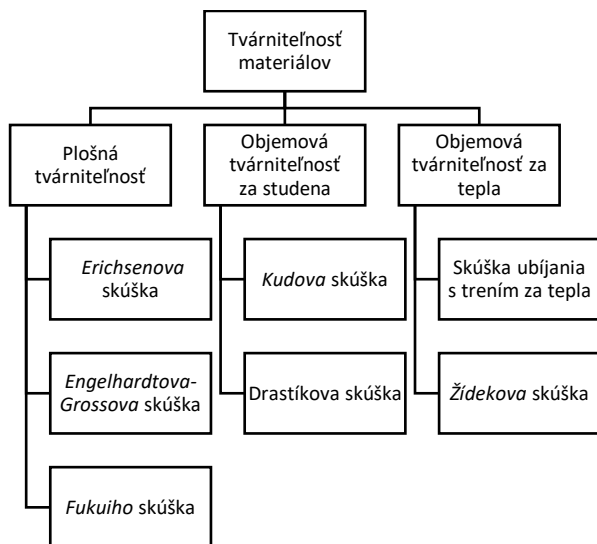
Tieto informácie sú kľúčové pri vývoji nových materiálov a optimalizácii výrobných procesov, kde je potrebné zabezpečiť vysokú kvalitu a efektívnosť pri spracovaní materiálov za studena.

*Kudova skúška* patrí k hodnoteniu tvárniteľnosti materiálov a je zaradená medzi skúšky na hodnotenie objemovej tvárniteľnosti za studena. Táto skúška sa využíva na určenie schopnosti materiálov podstúpiť plasticke deformácie bez porušenia pri spracovaní za studena. Na obr. 2 je znázornené celkové rozdelenie metód, ktoré umožňujú hodnotiť tvárniteľnosť materiálov. Tento rozdelený systém

zahŕňa rôzne skúšky a metódy na posúdenie tvárniteľnosti materiálov pri rôznych podmienkach, čím sa poskytuje komplexný pohľad na mechanické vlastnosti materiálov v procese tvárnenia [1].



Obr. 1. a) Tvar a rozmery skúšobnej vzorky, b) princíp Kudovej skúšky [1]



Obr. 2. Rozdelenie metód hodnotenia tvárniteľnosti materiálov

Úplný faktorový experiment (FFE - Full Factorial Experiment) je experimentálny dizajn, ktorý umožňuje skúmať všetky možné kombinácie úrovní rôznych parametrov procesu. Využíva sa na analýzu vplyvu viacerých faktorov na výsledok experimentu, pričom každý faktor sa testuje pri všetkých možných úrovniach. Táto metóda je užitočná nielen na identifikáciu účinkov jednotlivých faktorov, ale aj ich vzájomných interakcií, ktoré môžu mať výrazný vplyv na výsledky experimentu, a tým prispieť k optimalizácii procesu [2].

Naplánovanie FFE typu  $n^k$  znamená určiť rôzne experimentálne podmienky, v ktorých sa merania uskutočnia. V tomto prípade je  $n$  počet úrovní faktorov a  $k$  počet faktorov. Interval každej premennej sa delí na  $n-1$  podintervalov rovnakej dĺžky. Experiment sa vykonáva v  $n^k$  rôznych bodoch, ktoré predstavujú všetky možné kombinácie úrovní

faktorov. Okrem toho sa v každom naplánovanom bode vykoná  $m$  meraní. Po realizácii experimentu sa získa celkový počet meraní, ktorý sa rovná  $m \cdot n^k$ , čo predstavuje kompletný súbor údajov potrebný na štatistickú analýzu a vyhodnotenie vzťahov medzi faktormi a odozvami v experimente [3].

## 1 EXPERIMENT

### 1.1 Plánovanie experimentu

Pre porovnanie výsledkov z dvoch rôznych tlakových skúšok bol zvolený materiál s priemerom  $\varnothing 10$  a  $\varnothing 12$ , ktorý mal chemické zloženie  $Al-Mg-Si0,5$  (STN 424401, EN AW6060) v hmotnostných % (obr. 4).

Tab. 1. Chemické zloženie valcových skúšobných vzoriek (hm.%) [4]

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ostatné
0,30	0,35	0,10	max.	max.	max.	max.	max.
až	až	až	0,10	0,10	0,05	0,15	0,15
0,60	0,60	0,30					

### Design Summary

Factors: 3 Base Design: 3; 8  
Runs: 20 Replicates: 2  
Blocks: 1 Center pts (total): 4

Obr. 3. Sumarizácia všetkých naplánovaných nameraných hodnôt pre Kudovu skúšku

CenterPt	Blocks	pomerne pretvorenie	rychlost	rozsah sil	sila_10	sila_12	tlak_10	tlak_12
1	1	1	20	0,0010	3			
2	1	1	40	0,0010	3			
3	1	1	20	0,0100	3			
4	1	1	40	0,0100	3			
5	1	1	20	0,0010	5			
6	1	1	40	0,0010	5			
7	1	1	20	0,0100	5			
8	1	1	40	0,0100	5			
9	1	1	20	0,0010	3			
10	1	1	40	0,0010	3			
11	1	1	20	0,0100	3			
12	1	1	40	0,0100	3			
13	1	1	20	0,0010	5			
14	1	1	40	0,0010	5			
15	1	1	20	0,0100	5			
16	1	1	40	0,0100	5			
17	0	1	30	0,0055	4			
18	0	1	30	0,0055	4			
19	0	1	30	0,0055	4			
20	0	1	30	0,0055	4			

Obr. 4. Experimentálne body generované v softvéri Minitab pre jednotlivé faktory

Experiment bol navrhnutý s cieľom analyzovať vplyv rôznych faktorov na tvárniteľnosť materiálov pri spracovaní za studena. Na podrobnú analýzu a vizualizáciu experimentálnych dát bol použitý softvér Minitab, ktorý poskytol nástroje na efektívne vyhodnotenie výsledkov. Experiment sa zameriaval na tri faktory: pomerne pretvorenie, rýchlosť stláčania a rozsah sil. Tieto faktory boli testované pri dvoch replikáciách v každom bode a experiment zahŕňal aj štyri centrálné body (obr. 3). Celkový počet nameraných hodnôt pre každý druh vzoriek dosiahol hodnotu 20, čím sa dosiahol celkový počet 40 meraní.

Pre každý faktor bol stanovený jeho rozsah: pomerné pretvorenie v intervale 20 % až 40 %, rýchlosť stláčania od 0,001 mm·s<sup>-1</sup> do 0,01 mm·s<sup>-1</sup> a rozsah síl od 3 do 5. Na základe týchto hodnôt boli pomocou softvéru *Minitab* vygenerované experimentálne body, v ktorých bolo potrebné vykonať merania (obr. 4).

## 1.2 Realizácia plánovaného experimentu

Samostatná tlaková skúška bola realizovaná na trhacom zariadení *EU 40* (obr. 5), ktoré umožnilo presné hodnotenie objemovej tváriteľnosti materiálov za studena.



Obr. 5. Trhacie zariadenie *EU 40* použité pre realizáciu *Kudovej* skúšky



Obr. 6. Pripravené vzorky, očíslované od 1 po 20, so skúšobným valcom označeným bodkou slúžiacim na kalibráciu faktorov experimentu

Tento experiment sa vykonával pri rôznych parametroch, ako je pomerné pretvorenie, rýchlosť stláčania a rozsah síl. Výsledkom skúšky bola nameraná sila, na základe ktorej bol následne vypočítaný tlak pôsobiaci na materiál počas deformácie.

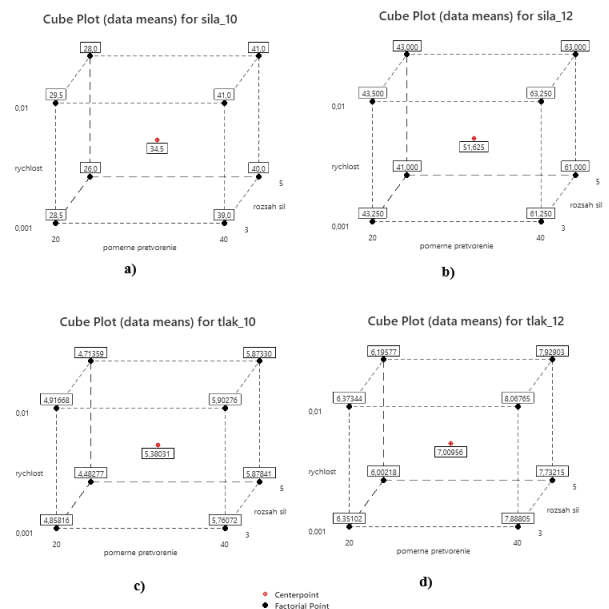
Pre lepšiu identifikáciu a vyhodnotenie výsledkov boli vzorky po realizácii skúšky očíslované od 1 po 20 (obr. 6). Na obr. 6 je znázornená skúšobná vzorka s bodkou, ktorá slúžila ako referenčný bod pre kalibráciu faktorov experimentu. Táto vzorka bola nevyhnutná pre správne nastavenie experimentálnych parametrov, čím sa zabezpečila presnosť pri realizácii skúšky.

## 1.3 Získané údaje

Následne boli získané údaje o sile a tlaku počas realizácie tlakovej skúšky (obr. 7).

	CenterPt	Blocks	pomerne pretvorenie	rýchlosť	rozsah síl	sila_10	sila_12	tlak_10	tlak_12
1	1	1	20	0,0010	3	27,5	43,0	4,73322	6,30499
2	1	1	40	0,0010	3	39,0	61,0	5,75221	7,84062
3	1	1	20	0,0100	3	29,5	44,0	4,90849	6,42336
4	1	1	40	0,0100	3	40,0	63,0	5,80552	8,07692
5	1	1	20	0,0010	5	26,0	40,0	4,49050	5,89971
6	1	1	40	0,0010	5	40,0	60,0	5,92593	7,56620
7	1	1	20	0,0100	5	26,0	42,0	4,45205	6,06061
8	1	1	40	0,0100	5	40,0	62,0	5,76369	7,87802
9	1	1	20	0,0010	3	29,5	43,5	4,98311	6,39706
10	1	1	40	0,0010	3	39,0	61,5	5,76923	7,93548
11	1	1	20	0,0100	3	29,5	43,0	4,92487	6,32353
12	1	1	40	0,0100	3	42,0	63,5	6,00000	8,05838
13	1	1	20	0,0010	5	26,0	42,0	4,47504	6,10465
14	1	1	40	0,0010	5	40,0	62,0	5,83090	7,89809
15	1	1	20	0,0100	5	30,0	44,0	4,97512	6,33094
16	1	1	40	0,0100	5	42,0	64,0	5,98291	7,98005
17	0	1	30	0,0055	4	34,0	52,0	5,27132	7,05563
18	0	1	30	0,0055	4	34,0	51,0	5,41401	6,91057
19	0	1	30	0,0055	4	35,0	51,5	5,41796	7,00680
20	0	1	30	0,0055	4	35,0	52,0	5,41796	7,06522

Obr. 7. Získané údaje o sile a vypočítanom tlaku počas realizácie tlakovej skúšky



Obr. 8. Kockové grafy hodnoty: a) sily pre  $\phi 10$ , b) sily pre  $\phi 12$ , c) tlaku pre  $\phi 10$ , d) tlaku pre  $\phi 12$

Tlak, ktorý objektívnejšie popisuje správanie materiálu pri deformácii, bol vypočítaný na základe nameranej sily a pomocou rovnice (1). Tento výpočet umožnil získať presnejší pohľad na vplyv aplikovaného tlaku na materiál počas jeho tvárnenia:

$$p = \frac{F}{S} \text{ [MPa]}, \quad (1)$$

kde  $p$  - tlak [MPa],

$S$  - plocha (prierez po stlačení) [mm<sup>2</sup>],

$F$  - nameraná sila realizácie skúšky [kN].

Obrázok 8 znázorňuje *Cube Plot* vizualizácie zo softvéru *Minitab*, ktoré zobrazujú priemerné hodnoty sily a tlaku pri rôznych kombináciách faktorov. Čierne body predstavujú faktorové body, červený bod centrálne hodnoty. Obrázky a) a b) zobrazujú hodnoty sily pre vzorky  $\phi 10$  mm a  $\phi 12$  mm,

zatial' čo c) a d) znázorňujú tlak pre rovnaké priemery. Vizualizácia umožňuje lepšie pochopiť vplyv faktorov na získané výsledky.

## 1.4 Vyhodnotenie získaných údajov

### 1.4.1 Zhrnutie modelu

Na obr. 9 sú štyri tabuľky s názvom *Model Summary*, ktoré obsahujú štatistické ukazovatele kvality regresného modelu. Každá tabuľka obsahuje tieto hodnoty: *S* (štandardná reziduálna odchýlka) Vyjadruje priemernú veľkosť chýb (rezíduí) modelu. Nižšia hodnota znamená lepší model, pretože odhady sú presnejšie. *R-sq* (koeficient determinácie,  $R^2$ ) vyjadruje, aká časť variability závislej premennej je vysvetlená nezávislými premennými v modeli. Vyššia hodnota znamená lepšie vysvetlenie variability dát. *R-sq(adj)* (upravený koeficient determinácie, *Adjusted R<sup>2</sup>*) Tento ukazovateľ upravuje hodnotu  $R^2$  podľa počtu prediktorov v modeli. Oproti  $R^2$  penalizuje nadbytočné premenné, ktoré neprinášajú významné informácie. *R-sq(pred)* (prediktívny koeficient determinácie, *Predicted R<sup>2</sup>*) vyjadruje schopnosť modelu predpovedať nové hodnoty. Ak je hodnota *R-sq(pred)* výrazne nižšia ako  $R^2$ , znamená to, že model je pravdepodobne preučený (*overfitting*) [5].

Model Summary				Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,04722	97,41%	96,71%	94,91%	0,979610	99,25%	98,82%	97,55%
a)				b)			
Model Summary				Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,145273	95,34%	92,63%	83,91%	0,114547	98,65%	97,86%	95,40%
c)				d)			

Obr. 9. Štatistické vyhodnotenie modelov pre sily a tlaky pri priemeroch  $\varnothing 10$  a  $\varnothing 12$

Na základe vyhodnotenia možno konštatovať, že tlak je objektívnejšia hodnota na opis závislostí. Tento odhad bol potvrdený aj číselnými hodnotami, pričom hodnoty štandardnej smerodajnej odchýlky (*S*) sú výrazne vyššie pri sile v porovnaní s tlakom. Konkrétne, pre priemer  $\varnothing 10$  je  $1,04722 > 0,145273$  a pre priemer  $\varnothing 12$  je  $0,979610 > 0,114547$ . To naznačuje, že modely založené na tlaku majú menší rozptyl chýb a teda poskytujú presnejšie výsledky.

Zároveň možno pozorovať, že koeficient determinácie ( $R^2$ ) je pri každom modeli vyšší ako 95 %, čo je dôkazom toho, že všetky vytvorené modely veľmi dobre vysvetľujú variabilitu nameraných dát. Tento fakt podporuje vysokú spoľahlivosť regresných modelov pri popise skúmaných závislostí.

Rozdiel medzi  $R^2$  a  $R^2(adj)$  je relatívne malý, čo naznačuje, že modely neobsahujú nadbytočné premenné, ktoré by mohli znižovať ich kvalitu.

Vysoké hodnoty  $R^2(pred)$  taktiež potvrdzujú, že modely majú dobrú prediktívnu schopnosť.

Celkovo možno dospieť k záveru, že tlak je stabilnejší a presnejší parameter na opis závislostí, pričom modely vykazujú vysokú úroveň spoľahlivosti a presnosti.

### 1.4.2 Grafická analýza rezíduí

*Residual Plots* obsahuje štyri typy grafov:

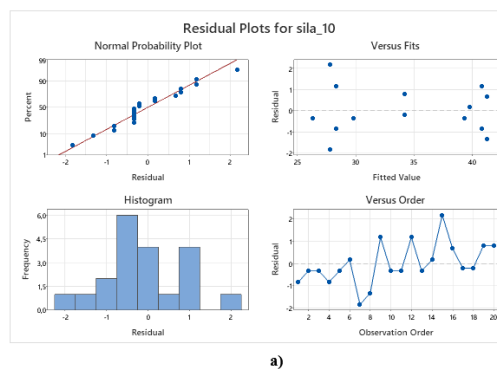
*Normal Probability Plot* - body rezíduí by mali ležať približne na priamke, čo by naznačovalo ich normálne rozdelenie údajov.

*Versus Fits* (reziduá vs. fitované hodnoty) - graf zobrazuje vzťah medzi reziduami a predikovanými hodnotami. Ideálne by mali byť body náhodne rozptýlené okolo nulovej čiary bez viditeľného vzorca.

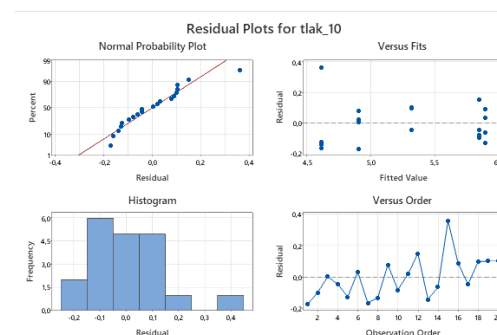
*Histogram* - zobrazuje rozdelenie početností rezíduí. Tvar by sa mal približovať normálnemu rozdeleniu so symetrickým rozložením okolo nuly.

*Versus Order* (reziduá v poradí pozorovaní) - graf zobrazuje reziduá v časovom poradí merania. Nemal by vykazovať žiadny systematický vzorec, čo by potvrdzovalo nezávislosť pozorovaní [6].

Pre  $\varnothing 10$  pri sile model vykazuje určité nedostatky. Hoci reziduá sú približne normálne rozdelené, histogram naznačuje miernu asymetriu. Graf rezíduí v poradí pozorovaní je viditeľný systematický vzor, čo môže naznačovať autokoreláciu. Tieto faktory znižujú spoľahlivosť modelu (obr. 8a).



a)



b)

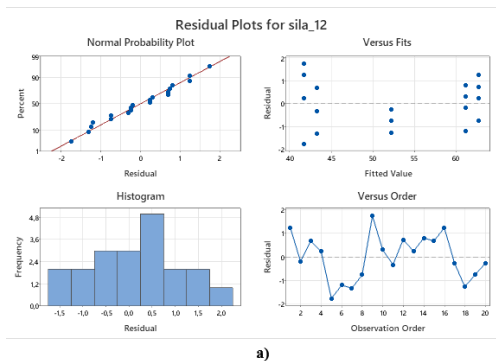
Obr. 10. Stabilita modelu pre: a) sila  $\varnothing 10$ , b) tlak  $\varnothing 10$

Pre  $\varnothing 10$  pri tlaku model vykazuje lepšie vlastnosti. Reziduá sú normálne rozdelené, histogram je vyvážený a rozptyl chýb je rovnomerný. Grafy

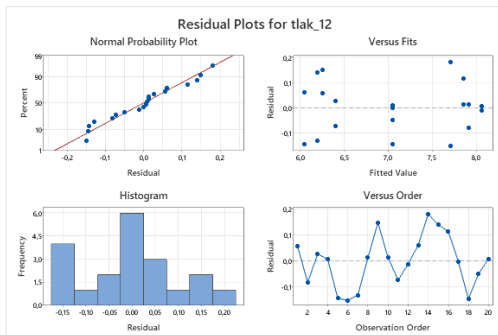
ukazujú náhodné rozloženie rezíduí bez systematických vzorov, čo naznačuje vyššiu stabilitu modelu. Celkovo poskytuje presnejšie výsledky a lepšie vystihuje skúmanú závislosť (obr. 8b).

Pre  $\sigma_{12}$  pri sile: model vykazuje určité nedostatky. Hoci reziduá vo všeobecnosti sledujú normálne rozdelenie, histogram naznačuje miernu odchýlku.

Graf rezíduí v poradí pozorovaní ukazuje systematický vzor, čo poukazuje na možnú autokoreláciu. Taktiež graf rezíduí verzus predpokladané hodnoty naznačuje neúplne vyrovnaný rozptyl, čo môže znížiť spoľahlivosť modelu (obr. 10a).



a)



b)

**Obr. 11. Stabilita modelu pre: a) sila  $\sigma_{12}$ , b) tlak  $\sigma_{12}$**

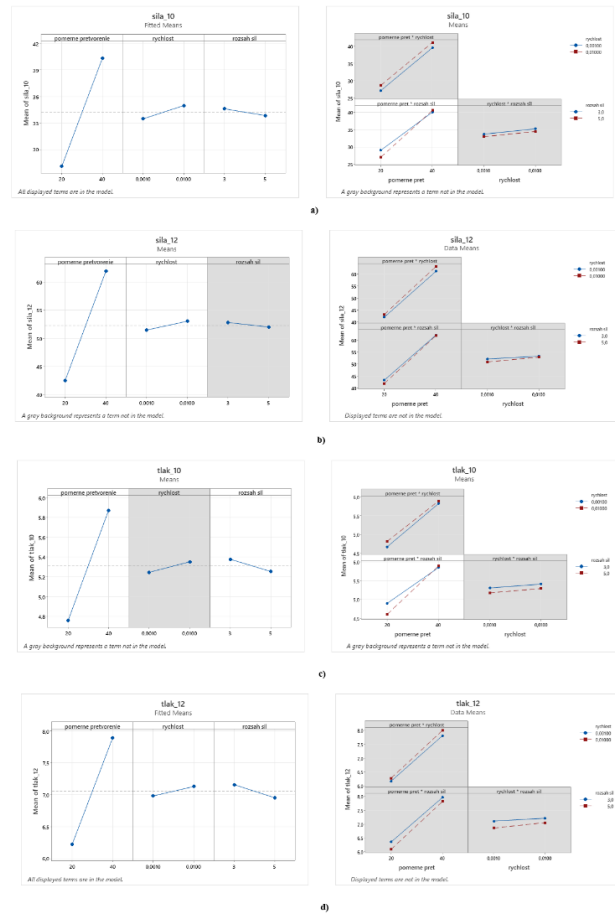
Pre  $\sigma_{12}$  pri tlaku: model má výrazne lepšie vlastnosti. Reziduá sú takmer perfektne normálne rozdelené, čo potvrdzuje aj histogram. Graf rezíduí podľa poradia pozorovaní neodhalil žiadny systematický vzor a rozptyl chýb je rovnomerný. Táto stabilita modelu naznačuje, že lepšie vystihuje skúmanú závislosť a poskytuje spoľahlivejšie výsledky (obr. 11b).

Modely pre  $\sigma_{10}$  a  $\sigma_{12}$  pri sile vykazujú určité nedostatky. Reziduá síce približne sledujú normálne rozdelenie, no histogramy naznačujú miernu asymetriu. Grafy rezíduí podľa poradia pozorovaní ukazujú systematické vzory, čo naznačuje možnú autokoreláciu a znižuje spoľahlivosť týchto modelov.

Naopak, modely pre  $\sigma_{10}$  a  $\sigma_{12}$  pri tlaku vykazujú lepšie vlastnosti. Reziduá sú normálne rozdelené, histogramy vyvážené a rozptyl chýb rovnomerný. Grafy neodhalili systematické vzory, čo naznačuje vysokú stabilitu. Modely pri tlaku sú preto presnejšie a vhodnejšie na popis skúmaných závislostí.

### 1.4.3 Grafy hlavných efektov a interakcii

Grafy zobrazujú vplyv jednotlivých faktorov a interakcie faktorov na výslednú premennú pri rôznych podmienkach. Sivé oblasti označujú faktory a interakcie, ktoré boli vylúčené z regresného modelu, pretože nepreukázali štatisticky významný vplyv [7].



a)

b)

c)

d)

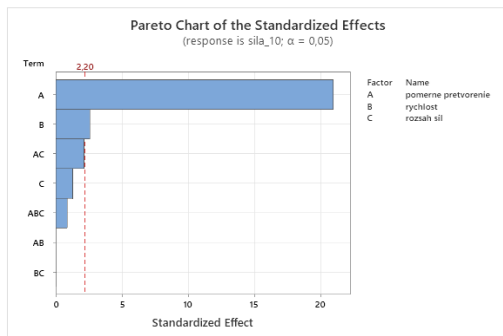
**Obr. 12. Faktoriálne grafy pre  $\sigma_{10}$  a  $\sigma_{12}$  pri sile a tlaku**

- $\sigma_{10}$  pri sile (obr. 12a) a  $\sigma_{12}$  pri sile (obr. 12b): pri  $\sigma_{10}$  pri sile sa úsečky pretínajú, čo naznačuje prítomnosť interakcie medzi faktormi pretvorenie a rozsah síl. Táto interakcia ovplyvňuje výslednú hodnotu, čo naznačuje, že vplyv jedného faktora závisí od úrovne ostatných faktorov. Naopak, pri  $\sigma_{12}$  pri sile sú úsečky takmer rovnobežné, čo naznačuje, že medzi faktormi neexistuje významná interakcia.
- $\sigma_{10}$  pri tlaku (obr. 12c) a  $\sigma_{12}$  pri tlaku (obr. 12d): Model pre  $\sigma_{10}$  pri tlaku ukazuje pretínanie úsečiek, čo naznačuje prítomnosť interakcie medzi faktormi pretvorenie a rozsah síl. Naopak, pri  $\sigma_{12}$  pri tlaku sú úsečky takmer rovnobežné, čo znamená, že interakcia medzi faktormi nie je prítomná a ich účinky sa prejavujú nezávisle.

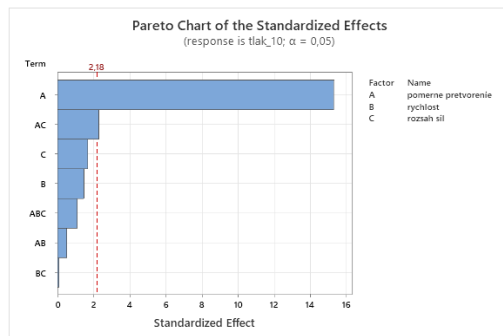
Celkovo možno konštatovať, že prítomnosť interakcie medzi faktormi je potvrdená pri  $\sigma_{10}$  pri sile a  $\sigma_{10}$  pri tlaku, zatiaľ čo pri  $\sigma_{12}$  pri sile a  $\sigma_{12}$  pri tlaku sa faktory prejavujú nezávisle.

### 1.4.4 Pareto graf štandardizovaných efektov

*Pareto graf štandardizovaných efektov* je štatistický nástroj používaný na identifikáciu najvýznamnejších faktorov ovplyvňujúcich výsledok experimentu. Na zvislej osi sú znázornené štandardizované efekty jednotlivých faktorov a ich interakcií, pričom sú zoradené zostupne podľa veľkosti ich vplyvu. Červená prerušovaná čiara predstavuje kritickú hodnotu, nad ktorou sú faktory považované za štatisticky významné. Faktory, ktoré túto hodnotu prekračujú, majú zásadný vplyv na sledovanú odpoveď, zatiaľ čo tie pod ňou sú menej dôležité alebo nevýznamné [8].



a)



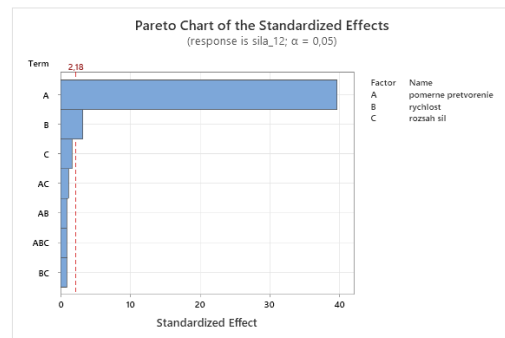
b)

**Obr. 13. Pareto graf štandardizovaných efektov pre: a) sila  $\varnothing 10$ , b) tlak  $\varnothing 10$**

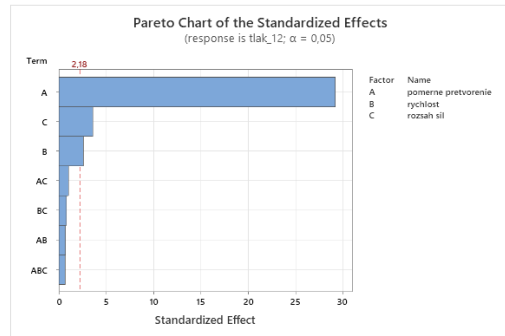
V experimente boli analyzované tri hlavné faktory: *A* - pomerné pretvorenie, *B* - rýchlosť stláčania, a *C* - rozsah síl. Okrem jednotlivých faktorov sú v grafoch prítomné aj interakcie druhého rádu: *AC*, *AB*, *BC*, ktoré vyjadrujú kombinovaný vplyv dvoch faktorov, a interakcia tretieho rádu: *ABC*, kde sa prejavuje súčasné pôsobenie všetkých troch faktorov.

Pre  $\varnothing 10$  pri sile (obr. 13a) má najväčší vplyv faktor *A*, ktorý výrazne prevyšuje ostatné faktory. Faktor *B*, má menší, ale stále významný vplyv. Interakcia *AC*, sa nachádza na hranici štatistickej významnosti. Ostatné faktory a interakcie majú zanedbateľný efekt a neprekračujú kritickú hodnotu 2,20.

Pre  $\varnothing 10$  pri tlaku (obr. 13b) je dominantný faktor *A*, pričom významnú úlohu zohráva aj interakcia *AC*. Ostatné faktory a interakcie nedosahujú kritickú hodnotu 2,18, a preto ich vplyv na výsledok možno považovať za nevýznamný.



a)



b)

**Obr. 14. Pareto graf štandardizovaných efektov pre: a) sila  $\varnothing 12$ , b) tlak  $\varnothing 12$**

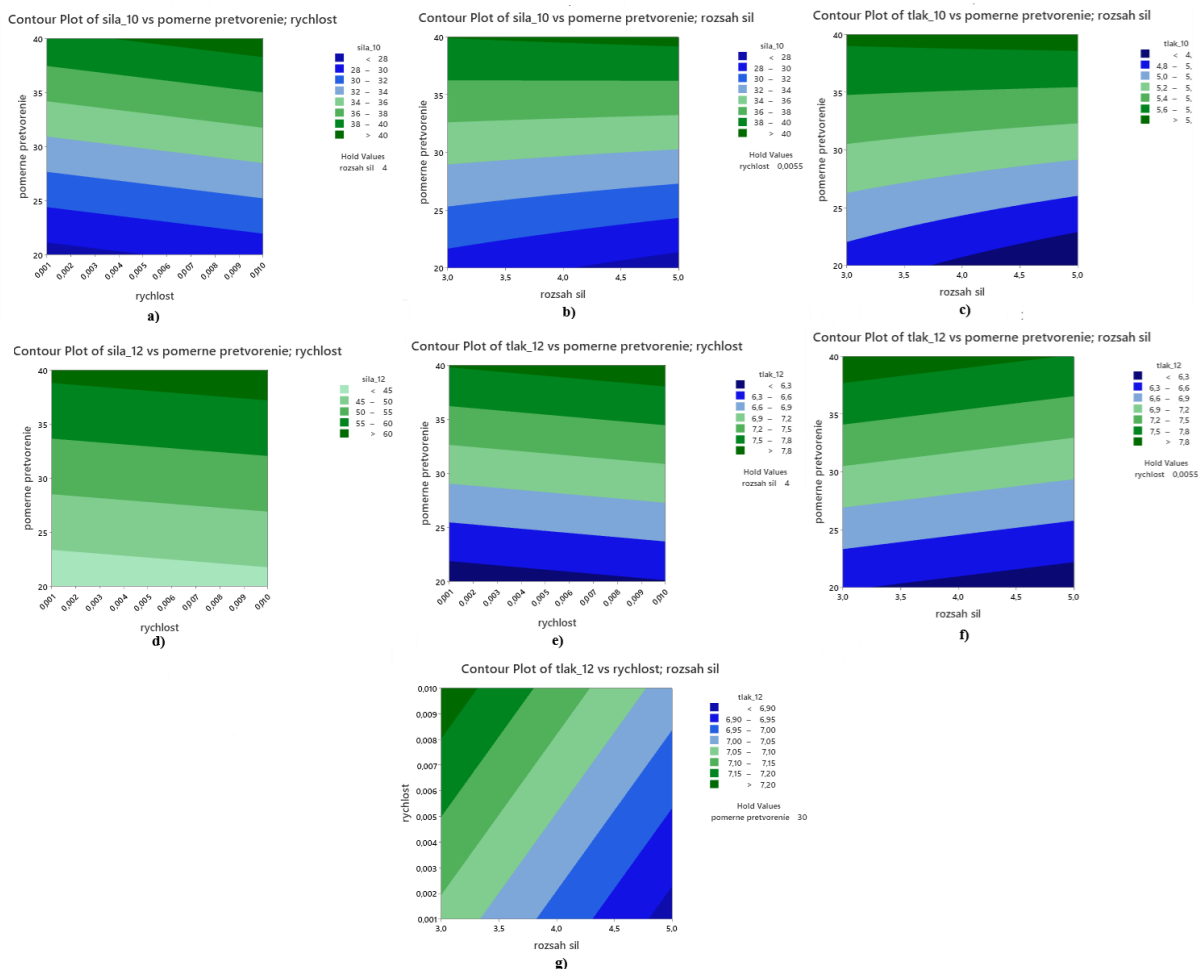
Pre  $\varnothing 12$  pri sile (obr. 14a) má najväčší vplyv faktor *A*, pomerné pretvorenie, ktorý výrazne prevyšuje ostatné faktory. Faktor *B*, rýchlosť stláčania, má menší, ale stále významný vplyv. Ostatné faktory a interakcie, vrátane *AC*, *AB*, *ABC* a *BC*, neprekračujú kritickú hodnotu 2,18 a ich vplyv možno považovať za zanedbateľný.

Pre  $\varnothing 12$  (obr. 14b) pri tlaku je dominantným faktorom opäť *A*, pomerné pretvorenie, pričom určitý vplyv má aj faktor *C*, rozsah síl. Ostatné faktory a interakcie, ako sú *B*, *AC*, *AB*, *BC* a *ABC*, nedosahujú kritickú hodnotu 2,18, a preto ich vplyv na výsledok možno považovať za nevýznamný.

Na základe dosiahnutých výsledkov možno konštatovať, že pre skúšobné vzorky  $\varnothing 10$  a  $\varnothing 12$  a sledované parametre: sila a tlak. Faktor *A* má dominantný vplyv na výsledky a výrazne prevyšuje ostatné faktory. Pri sile  $\varnothing 10$  aj  $\varnothing 12$  zohráva faktor *B*, sekundárnu, ale stále významnú úlohu. V prípade tlaku  $\varnothing 10$  je interakcia *AC* na hranici významnosti, zatiaľ čo pri tlaku  $\varnothing 12$  má určitý vplyv faktor *C*. Ostatné faktory a interakcie nedosahujú kritické hodnoty a ich vplyv na výsledok možno považovať za nevýznamný.

### 1.4.5 Vrstevnicové grafy

Vrstevnicové grafy predstavujú vizualizačnú metódu, ktorá zobrazuje trojrozmerné údaje na dvojrozmernej rovine pomocou *izolinií*, ktoré spájajú body so zhodnými hodnotami závislej premennej. Táto technika umožňuje identifikovať oblasti s podobnými charakteristikami, ale aj optimalizovať



Obr. 15. Vrstevnivé grafy interakcií faktorov A, B a C

experimentálne podmienky tým, že ukazuje optimálne hodnoty vstupných premenných, kde sa závislá premenná maximalizuje alebo minimalizuje [9].

V našom prípade sme pre interpretáciu výsledkov zvolili rezy vrstevnivých grafov na základe štatisticky významných faktorov a interakcií, ktoré boli identifikované pomocou *Pareto grafu* štandardizovaných efektov.

Pri nastavovaní fixných hodnôt (*hold values*) sme využili stredné hodnoty príslušných rozsahov, čím sme zabezpečili jednotný prístup k analýze. Napríklad, pre faktor A, ktorý predstavuje pomerne pretvorenie, sme vybrali strednú hodnotu 30, pričom rozsah bol stanovený od 20 do 40. Podobne, pre faktor B, definovaný ako rýchlosť stláčania, sme zvolili hodnotu 0,0055 v intervale od 0,001 do 0,01 a pre rozsah síl sme určili hodnotu 4 s rozsahom od 3 do 5.

Pri  $\phi 10$  vrstevnivé grafy naznačujú, že pri interakcii faktorov A a B dochádza k poklesu sily pri nižšej rýchlosti a väčšom pretvorení. Tento jav sa prejavuje poklesom hodnoty výslednej sily. Naopak, pri vyššej rýchlosti a menšom pretvorení sa sila výrazne zvyšuje (obr. 15a).

Pri interakcii medzi A a C je viditeľné, že pri väčšom pretvorení a menšej sile je výsledný parameter nižší. Tento trend sa obracia v situáciách s menším pretvorením a väčšou silou, kedy dochádza k nárastu výsledných veličín (obr. 15b a obr. 15c).

Pri  $\phi 12$  interakcie AB (obr. 15d a obr. 15e) ukazujú, že nižšia rýchlosť a väčšie pretvorenie spôsobujú pokles sily aj tlaku. Opačne, pri vyššej rýchlosti a menšom pretvorení obe hodnoty narastajú.

V interakcii medzi A a C (obr. 15f) tlak klesá, keď dochádza k väčšiemu pretvorení a menšej sile. Naopak, nárast tlaku je zaznamenaný pri menšom pretvorení a väčšej sile.

Interakcia medzi B a C (obr. 15g) potvrdzuje, že tlak stúpa so zvyšujúcou sa rýchlosťou a silou súčasne. Tento jav zdôrazňuje význam rovnováhy medzi týmito dvoma faktormi pri riadení tlaku počas procesu.

#### 1.4.6 Regresná rovnica v pôvodných jednotkách

Výstupom viacnásobnej regresie je získanie regresného modelu, ktorý vyjadruje závislosť odozvy od viacerých zvolených nezávislých premenných. Regresná rovnica v nekódovaných jednotkách opisuje

vzťah medzi odozvou a premennými v pôvodných jednotkách. Kódované hodnoty vstupov, ktoré boli použité pri analýze ANOVA sú spätne vyjadrené v pôvodne meraných jednotkách [10].

Hlavným prínosom je schopnosť predikcie výstupov na základe vstupných hodnôt, čím umožňuje optimalizáciu procesov, zlepšovanie rozhodovania a efektívnejšie riadenie systémov [11].

Štatistickou analýzou nameraných hodnôt odozvy boli po vylúčení *nesignifikantných* členov získané rovnice regresných modelov:

$$\text{Sila pre } \phi_{10} = 23,91 + 0,363 \cdot A + 166,7 \cdot B - 2,250 \cdot C + 0,0625 \cdot A \cdot C, \quad (2)$$

$$\text{Tlak pre } \phi_{10} = 22,139 + 0,9719 \cdot A + 173,6 \cdot B, \quad (3)$$

$$\text{Sila pre } \phi_{12} = 4,893 + 0,0222 \cdot A - 0,311 \cdot C + 0,00833 \cdot A \cdot C, \quad (4)$$

$$\text{Tlak pre } \phi_{12} = 4,865 + 0,08368 \cdot A + 16,46 \cdot B - 0,1026 \cdot C. \quad (5)$$

## ZÁVER

Po prvé, je možné konštatovať, že výsledky experimentu potvrdili, že *FFE* je efektívnou metódou na analýzu vzťahov medzi faktormi a ich interakcií pri skúmaní síl a tlakov pri tlakovej skúške. Grafy hlavných účinkov a interakcií a *Pareto analýza* jasne ukázali, že v niektorých prípadoch sa faktory prejavujú samostatne, zatiaľ čo v iných dochádza k interakcii.

Oproti sile je tlak objektívnejšou hodnotou na popis tlakovej skúšky, pretože hodnoty *S* v *Model Summary* ukazujú nižšiu variabilitu modelu s tlakom. Navyše, *Residual Plots* naznačujú lepšiu distribúciu zvyškov, čo znamená, že model s tlakom vykazuje menšiu systematickú chybu a lepšiu prediktívnu schopnosť v porovnaní so silou.

Uvedené rovnice regresných modelov (2, 3, 4, 5) spĺňajú podmienku hierarchie. Analytické vyjadrenie závislostí odozvy od skúmaných faktorov môže byť použité na predikciu hodnôt odozvy (sily a tlaku). V prípade potreby rovnice regresných modelov slúžia na účely nájdenia konkrétnej hodnoty optimálneho riešenia, t. j. vieme nastaviť úroveň sledovaných faktorov tak, aby sledovaná odozva spĺňala požadované hodnoty optima.

Celkovo možno konštatovať, že uplatnenie plánovaného experimentu počas realizácie tlakovej skúšky prinieslo cenné poznatky a poskytlo pevný základ pre ďalší výskum v oblasti tvárnenia a *FFE*. Budúce experimenty by mohli nadviazať na tieto zistenia a rozšíriť *Kudovu skúšku* o ďalšie faktory alebo kombinácie parametrov. Overenie získaných výsledkov pomocou alternatívnych experimentálnych metód alebo pokročilých simulačných techník by zároveň zvýšilo spoľahlivosť záverov tejto štúdie.

## Pod'akovanie

*Túto prácu podporila Slovenská kultúrno-vzdelávacia grantová agentúra KEGA v rámci projektu č.009STU-4/2023. Taktiež článok vznikol s podporou grantovej úlohy KEGA 026STU-4/2023.*

## LITERATÚRA

[1] BÍLIK, J. - KAPUSTOVÁ, M. - RIDZOŇ, M. (2015): *Teória tvárnenia/Theory of Forming*. Trnava: Materiálovotechnologická fakulta STU, ISBN 978-80-8096-215-9.

[2] PRESNELL, M. L. - PAIK, H. Y. (2023): *Design of Experiments for Engineers and Scientists* (Third Edition) Názov kapitoly: "Full factorial designs", s. 65-87, ISBN 978-0-443-15173-6. Dostupné na internete:

<https://www.sciencedirect.com/book/9780443151736/design-of-experiments-for-engineers-and-scientists>

[3] TÓTHOVÁ, M. - KOTIANOVÁ, J. (2015): *Matematické metódy plánovania a vyhodnocovania experimentu*. Materiálovotechnologická fakulta STU, Trnava, ISBN 978-80-8096-227-2.

[4] ATREON (2025): [cit. 2025-02-04] <https://www.atreon.sk/zliatina-en-aw-6060/>

[5] MINITAB SUPPORT (2024): [cit. 2025-02-04] <https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/fit-regression-model/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/model-summary-table/>

[6] THE PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY (2018): [cit. 2025-02-04] <https://online.stat.psu.edu/stat462/node/227/>

[7] FIDELIS, C. L. B. et al. (2023): *Mesoporous Silica Decorated with Silver Nanoparticles – An Investigation of the Radiolytic Synthesis Parameters Through Factorial Experiments*. In: *Química Nova*, DOI: 10.21577/0100-4042.20170969. [https://www.researchgate.net/figure/Minitab-factorial-design-plots-A-Pareto-Chart-B-Normal-Plot-C-Main-Effect-Plot-and\\_fig3\\_366769334](https://www.researchgate.net/figure/Minitab-factorial-design-plots-A-Pareto-Chart-B-Normal-Plot-C-Main-Effect-Plot-and_fig3_366769334)

[8] MONTGOMERY, D. C. (2016): *Design and Analysis of Experiments*. New York: Wiley, ISBN-13: 978-1118-14692-7.

[9] KENETT, R. S. - ZACKS, S. - AMBERTI, D. (2014): *Modern Industrial Statistics with applications in R, MINITAB and JMP*. *Modern Industrial Statistics*. Wiley, ISBN: 978-1-118-45606-4.

[10] BERGER, P. D. - MAURER, R. E. - CELLI, G. B. (2018): *Experimental Design With Applications in Management, Engineering, and the Sciences*. Springer, ISBN 978-3-319-64583-4.

[11] TOŠENOVSKÝ, J. (2012): *Plánování experimentu*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, ISBN 978-80-248-2592-2.

---

# Analysis of the use of agile project methodology

---

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

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.  
E-mail: vladimira.binasova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2727

## Peter Bubeník, doc. Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.  
E-mail: peter.bubenik@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2711

## Martin Buzalka, Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.  
E-mail: martin.buzalka@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2713

## Marta Kasajová, Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.  
E-mail: marta.kasajova@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2707

**Abstract:** From the perspective of the main goal, the real use of agile project methodology was analyzed, and then the levels of knowledge and use of the mentioned methodology were evaluated. Areas for potential improvement were identified and proposals for measures were created to increase the efficiency of future project implementation. Most companies today focus on delivering quality and gaining customer satisfaction and in order to accomplish this, the challenge lies in choosing between traditional development methodologies and agile development methodologies. However, both these approaches have positives and negatives, making the right choice plays a crucial role while starting a new project.

**Keywords:** agile project, process improvement, industrial engineering, methodology.

---

## INTRODUCTION

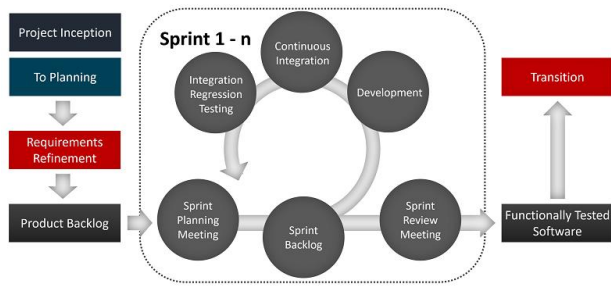
*Agile* project management is an interactive way of managing projects. It is the opposite of traditional project management, the so-called waterfall approach. The agile approach to project management is applied in projects where there is a clear framework goal, but for various reasons it is impossible to precisely define all long-term requirements without continuous prototypes. It is therefore used when a detailed project plan including detailed requirements cannot be determined (which is typical of the traditional, waterfall approach). The agile approach to project management is interactive, flexible and incremental. In practice, this means close and constant (incremental) cooperation between the project team, which creates continuous prototypes, and the customer, who provides feedback on the basis of which the assignment is specified. *Agile* project management is therefore applied to very complex

systems where detailed requirements are created or specified continuously based on experience with prototypes from individual iterations. In agile work methods, small portions of results (prototypes) are implemented in each development cycle in close cooperation with the customer.

The diagram (Fig. 1) illustrates the lifecycle process in *Agile* methodologies.

Internal documentation should be concise and provide key information. It is applied where the project is highly innovative, requires ongoing corrections and ideas, and everything can be continuously communicated with the customer. The agile approach to project management is close to lean techniques and approaches such as *Kaizen* or *Six Sigma*, because it has a strongly customer-oriented nature, all activities during development are purposefully focused on achieving the desired result, and thus waste is

minimized more significantly than in traditional procedures.



**Fig. 1. The lifecycle process in Agile methodologies [14]**

*Scrum* is a lightweight process framework for agile development, using a specific set of procedures that must be followed to ensure that the process is consistent with the framework. (Example: The *Scrum* process framework requires the use of development cycles called Sprints). “*Lightweight*” means that the overhead of the process is kept as low as possible to maximize the amount of production time available to produce useful work. *Scrum* processes enable organizations to smoothly adapt to rapidly changing requirements and produce a product that meets evolving business goals, which in turn benefits the organization by helping it increase the quality of its deliverables, better tolerate and respond to change, and keep the project plan and status under control [11].

The product backlog is the heart of *Scrum*. The backlog is essentially a prioritized list of requirements, stories, features, or whatever. Things that the customer wants, described in customer terminology. We call them stories or sometimes simply backlog items. Then, the backlog items are selected by priority into the sprint backlog and a *Sprint*, a development cycle, begins, resulting in the first prototype. Based on customer feedback, the requirements are refined and another *Sprint* occurs, resulting in another new prototype (Fig. 1). *Stories* contain the following items:

- *ID* - a unique identification, a simple automatically incrementing number,
- *Title* - a short, descriptive name for the story. For example, “See my transaction history”,
- *Importance* - the importance of the story according to the product owner. For example, 10 or 150. The higher the number, the more important the story,
- *Baseline* - an initial estimate of the workload of implementing the task compared to other stories done by the team. The unit is story points, which usually roughly correspond to “*ideal man-days*”,
- *How to demo* - a simple test specification of how this story will be demonstrated during the sprint demo,

- *Notes* - any additional information, explanations, references to other sources [13].

The waterfall approach is an approach to development or project management that assumes a clearly defined plan in advance, i. e. sequential procedures from analysis. It emphasizes planning, deadlines and a work schedule. It involves detailed planning of individual steps and subsequent adherence to the procedure for developing or implementing the project. The project team is given minimal room for changes during implementation, which is necessary for some projects. It is suitable and useful in projects that have a clear goal and a clearly definable procedure and division of work.

A *Gantt chart* is often used for their planning. The waterfall model is in contrast to the so-called *Agile* approaches, which are, on the contrary, more suitable for development projects that need a high degree of innovation and refinement during development [12].

Waterfall project management is carried out using five phases (Fig. 2) for *IT* projects: process changes related to changes in the information system, software, interfaces, etc.

- *Collection and consolidation of process requirements and their documentation (creation of the task)*. Definition of *Scope* and project. In this phase, comprehensive information should be obtained about what this project requires. This information can be collected in various ways, from interviews to questionnaires to interactive brainstorming. By the end of this phase, the project requirements should be clear and there should be a requirements document that has been distributed to the project team,
- *Analysis and design of the solution (Business Blue Print)*. Based on the task, the project team designs a comprehensive and integrated technical solution. The solution is described at the level of process changes, organizational changes, creation or changes to system settings, creation or changes to programs requiring development, etc. The subject of this phase is not the recording of coding. Software and hardware specifications are defined,
- *Implementation and testing (in the test environment)*. A setup and test environment is created in which system settings, program development by coding, interface settings, reporting creation, etc. are carried out. After the setup and coding are completed, internal integration tests are performed by the implementers and the necessary corrections are incorporated. Subsequently, an official data sample for integration tests is defined and test scenarios for integration tests are developed. Subsequently, key users are trained by the

implementer. The final step of this phase is comprehensive integration tests performed by key users using the prepared integration scenarios and test data sample. If necessary (comments or errors from integration tests, corrections are made and the relevant part or the entire integration tests are repeated),

- *Preparation for productive operation.* A productive environment is created into which settings and programs from the test (development) environment are transferred after approved integration tests. Key users create training documentation for end users and then train them in the full specified scope according to the focus. According to the results of integration tests, master data is prepared and transferred to the productive environment. Subsequently, defined movement data is also transferred,
- *Go – live and support of productive operation.* The start of productive operation of the use of the system or software in a productive environment by key or end users. In the initial periods (months) from the start of productive operation, the implementer team usually provides the customer with ongoing support in a defined scope, which gradually decreases until it transitions to standard system (software) maintenance.

## 1 DIFFERENCES BETWEEN AGILE AND WATERFALL PROJECT MANAGEMENT APPROACHES

The waterfall (traditional) approach to project management takes functionality into account as a fixed quantity. This means that at the start of the project it is possible to define a complete detailed task (determine a detailed project plan) and the implementation is carried out by delivering only one prototype with complete functionality. To achieve acceptance of the resulting product, time and resources are variables that can be adjusted (Fig. 3, triangle - right).

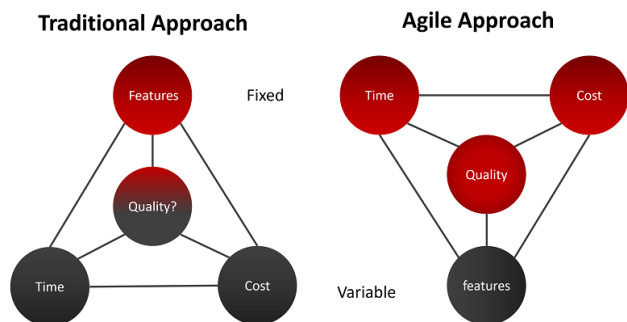


Fig. 2. Approaches [14]

Agile methodologies have the opposite approach, i.e. time and resources are set as fixed at the beginning of

the project and functionality is variable, i.e. there is a constant ongoing refinement of the task. The delivery date of the first prototype is a priority, although the scope of functionality contained in it is only partial compared to the functionality of the final prototype. (Continuous creation of prototypes is necessary). The difference between agile and traditional software development concepts can be seen in the following Fig. 2.

After balancing the line and distributing the workstations among the workers, it was possible to plan and carry out a test of adding a worker to the line.

## CONCLUSIONS

The choice of the topic of "analysis of the use of agile methodology" seems to be extremely relevant in today's project-saturated times (in industrial joint ventures). This topic is all the more important in the environment of a company that annually implements a number of projects of various sizes (including medium and large) with a high degree of complexity, integration and complexity, with project teams also consisting of customer representatives (*Japan, Europe, Taiwan*), who are world leaders in their specialization. The results of our work fully confirmed that *SteCo*, as the highest management body of *FSK* projects, fully competently, with knowledge of all the details related to project methodologies, decides before the start of each project (when defining it) on the use of a specific project methodology. The above eliminates the risks of possible increased planned costs, failure to meet planned costs, unjustified longer project duration, larger scope of ongoing project documentation (for example, when using agile project methodologies for a project with a clear need for a waterfall methodology solution), etc. It also manages all projects at the highest level.

The above results from many years of international experience in managing projects of various types.

The results of our work also made it possible to identify areas for improvement in project implementation and propose corrective measures: Based on the evaluation of the questionnaire in question, it appears appropriate to preventively retrain all members of project teams of current and planned projects on the topic of project methodologies.

Targeted control questions for comparing agile and waterfall project methodologies significantly contributed to the above knowledge. By "control" we mean verification of the correct understanding of the principles and aspects of the project methodology. The aim of the aforementioned training is not to interfere with the project methodology by key users, but to become more familiar with the methodology

used and thus provide increased support during the implementation of projects.

## Acknowledgement

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

*This work was supported by the Slovak Research and Development Agency under the contract No. APVV-19-0305.*

## REFERENCES

- [1] ANTONIUK, I. - SVITEK, R. - KRAJČOVIČ, 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-Humanistycznej.
- [3] BURGANOVA, N. - GRZNAR, 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, N. - STAFFENOVA, K. (2022): *Designing of machine backups in reconfigurable manufacturing systems*. In: Applied Sciences, 12(5), pp. 1-27, ISSN 2076-3417.
- [5] FILIPOVA, I. - DULINA, L. - BIGOSOVA, E. - PLINTA, D. (2021): *Modern Possibilities of Patient Transport Aids*. In: Transcom 2021. Virtual conference 26 May – 28 May, Slovakia. Transportation Research Procedia, 55, pp. 510-517.
- [6] SUKALOVA, V. - STOFKOVA, Z. - STOFKOVA, J. (2022): *Human Resource Management in Sustainable Development*. In: Sustainability, 14(21), 142.
- [7] BEREŽNÝ, Š. - KRAVECOVÁ, D. (2012): *Lineárne programovanie*. [cit. 2019-12-20]. Dostupné na internete.
- [8] GANTTOV DIAGRAM (2016): [cit. 2019-11-15]. Available on: <https://managementmania.com/sk/ganttov-diagram-gantt-chart>
- [9] LINEÁRNE PROGRAMOVANIE 1 (2019): [online], [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] WHAT IS AGILE? WHAT IS SCRUM? (2018): [online]. [cit. 2018-05-04]. Available on : <https://www.cprime.com/resources/what-is-agile-what-is-scrum/>
- [12] VODOPÁDOVÝ MODEL (Waterfall) (2018): *ManagementMania.com* [online]. Wilmington [cit. 07-01-2018]. Available on: <https://managementmania.com/sk/vodopadovy-model-waterfall>
- [13] KNIBERG, H. - SCRUM and XP zo zákopov (2007): *Ako robíme Scrum* [online] 2007, [cit. 2018-05-04]. Available on: [internete:http://www.wis.win.tue.nl/2R690/doc/ScrumAndXpFromTheTrenchesonline07-31.pdf](http://www.wis.win.tue.nl/2R690/doc/ScrumAndXpFromTheTrenchesonline07-31.pdf)
- [14] <https://www.kpipartners.com/>

---

# Systèmes de traction électrique modernes: avantages des moteurs PMSM dans le transport ferroviaire

---

## Vladimír Samaš, Ing.\*

Département des transports et des engins de manutention, Faculté de génie mécanique,  
l'Université de Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, République slovaque.  
E-mail: vladimir.samas@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2557

## Martin Bučko, Ing.

Département des transports et des engins de manutention, Faculté de génie mécanique,  
l'Université de Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, République slovaque.  
E-mail: vladimir.samas@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2557

## Juraj Gerlici, prof. Dr. Ing., prof. h. c.

Département des transports et des engins de manutention, Faculté de génie mécanique,  
l'Université de Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, République slovaque.  
E-mail: juraj.gerlici@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2550

## Ján Dižo, doc. Ing., PhD.

Département des transports et des engins de manutention, Faculté de génie mécanique,  
l'Université de Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, République slovaque.  
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2560

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

Département des transports et des engins de manutention, Faculté de génie mécanique,  
l'Université de Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, République slovaque.  
E-mail: miroslav.blatnický@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2659

## Modern electric traction systems: advantages of PMSM motors in railway transport

**Abstract:** Currently, there is a growing global emphasis on environmentally friendly transportation, with railway transport being one of the most efficient and sustainable modes of travel. This form of transport is distinguished by low rolling resistance, which leads to reduced energy consumption for both passenger and freight transport. Electric traction, widely used in railway vehicles, can be categorized as either dependent or independent. Dependent electric traction represents an environmentally friendly solution, as it eliminates the need for petroleum-based fuels and instead utilizes electricity drawn from the grid. However, this approach is truly ecological only when the electricity is generated from renewable and sustainable sources. Modern electric traction systems rely on electric motors, and this article aims to provide a detailed analysis of the application of *permanent magnet synchronous motors (PMSM)* in railway transport, particularly in the context of electric traction. *PMSM* motors are characterized by high efficiency and excellent controllability, making them well-suited for extensive use in railway applications. Their significant potential in this field positions them as a promising solution for future sustainable and efficient transport systems.

**Keywords:** electric traction, *PMSM*, electric motors, railway transport, ecology.

---

## INTRODUCTION

Les moteurs électriques représentent une composante clé, voire la plus importante, de la traction électrique des véhicules ferroviaires. Actuellement, plusieurs technologies de propulsion électrique sont utilisées dans le transport ferroviaire, l'un des candidats prometteurs étant le moteur synchrone à aimants permanents (*PMSM*). Le développement des normes écologiques et le renforcement constant des exigences environnementales entraînent la nécessité de rechercher des solutions plus efficaces et écologiques pour la traction ferroviaire (*UIC Low Carbon Rail Challenge*) [1].

Les moteurs électriques traditionnels, utilisant des balais et des collecteurs, génèrent des particules fines en raison de l'usure mécanique de ces composants. L'usure se produit en raison du contact continu entre les balais en charbon et le collecteur sur le rotor du moteur électrique. Ce mécanisme provoque non seulement la pollution de l'environnement, mais aussi des pertes d'énergie accrues sous forme de pertes thermiques et mécaniques. Bien que les balais puissent être remplacés, l'usure du collecteur est plus grave, car cette pièce est solidement attachée au rotor, et sa dégradation réduit la durée de vie globale du moteur. La Fig. 1 montre un moteur de traction électrique à collecteur.



Fig. 1. Moteur de traction électrique à collecteur

Dans le cas de la traction indépendante, qui utilise des générateurs diesel pour produire de l'énergie électrique, des émissions de gaz à effet de serre et d'autres formes de pollution environnementale se produisent. La puissance de ces générateurs est dimensionnée en fonction des besoins énergétiques de l'ensemble de la rame, et ces besoins peuvent être réduits jusqu'à 12.96 % grâce à l'utilisation de moteurs *PMSM* décrite par l'étude de Peng, Y [2]. L'implémentation de moteurs *PMSM* permet ainsi d'utiliser des moteurs à combustion plus petits et moins polluants, réduisant non seulement la consommation énergétique du système de propulsion, mais aussi optimisant l'utilisation du carburant dans

les groupes électrogènes. Le schéma de la traction indépendante est présenté sur la Fig. 2.

De plus, dans le domaine de la traction indépendante, des sources d'énergie alternatives telles que les batteries ou les piles à hydrogène sont de plus en plus explorées. Ces technologies peuvent grandement bénéficier de l'utilisation de moteurs *PMSM*, qui, grâce à leur haute efficacité, permettent d'étendre l'autonomie des véhicules et d'optimiser l'utilisation de l'énergie disponible.

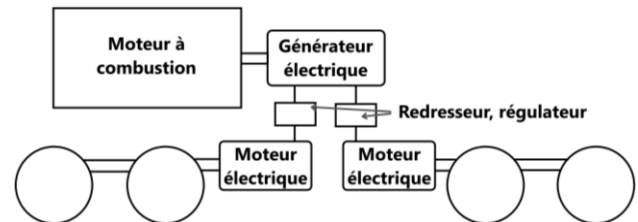


Fig. 2. Schéma de la traction indépendante

Les moteurs *PMSM* utilisent des aimants permanents sur le rotor, ce qui élimine la nécessité d'un collecteur et de balais en charbon. Cela réduit considérablement les pertes mécaniques et élimine la principale pièce sujette à l'usure par friction. Bien entendu, d'autres composants des moteurs *PMSM* sont également soumis à l'usure, mais ces derniers ont généralement une durée de vie plus longue et nécessitent moins de maintenance par rapport aux moteurs classiques. L'une des caractéristiques les plus importantes des moteurs *PMSM* est leur haute efficacité, illustrée sur la carte d'efficacité de la Fig. 3 [3].

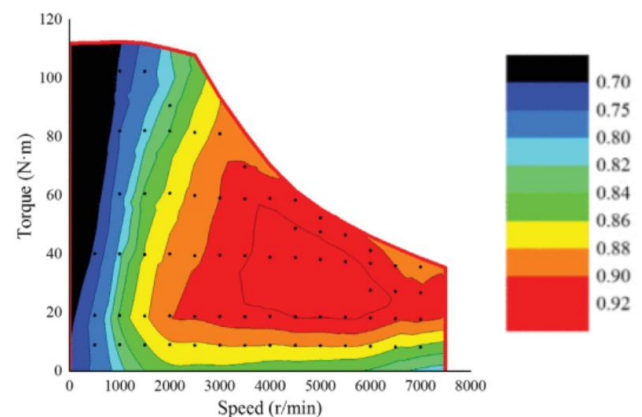


Fig. 3. Carte d'efficacité du moteur *PMSM*

Cette efficacité élevée se traduit non seulement par des pertes d'énergie réduites, mais aussi par une moindre charge thermique du moteur. La réduction des pertes thermiques permet une plus grande concentration de puissance par unité de poids, ce qui améliore le rendement spécifique. En pratique, cela signifie que les moteurs *PMSM* peuvent être plus petits et plus légers que les entraînements traditionnels pour une même puissance de traction, réduisant ainsi le poids total du véhicule ferroviaire. Un poids plus faible a un impact positif sur l'efficacité énergétique et les coûts d'exploitation des véhicules

ferroviaires, faisant des moteurs *PMSM* une solution attrayante pour le transport ferroviaire moderne et écologique.

Il existe plusieurs types de moteurs synchrones à aimants permanents (*PMSM*), qui peuvent être divisés en deux architectures principales en fonction de l'orientation du champ magnétique : les moteurs à champ magnétique radial et les moteurs à champ magnétique axial. Chacun de ces types présente des caractéristiques spécifiques, des avantages et des inconvénients, qui déterminent leur adéquation pour des applications spécifiques dans le domaine des transports, en particulier dans la traction ferroviaire.

## 1 MOTEURS PMSM RADIAUX

Les moteurs *PMSM* radiaux sont actuellement couramment utilisés dans le transport routier et apparaissent de plus en plus dans le transport ferroviaire. Leur fabrication est technologiquement moins exigeante, car leur conception s'inspire des moteurs électriques à courant continu plus anciens. L'un des principaux avantages de ces moteurs est leur capacité à atteindre des vitesses de rotation élevées, souvent supérieures à 20 000 tours par minute. Cette caractéristique les rend adaptés aux applications nécessitant une grande vitesse de rotation.

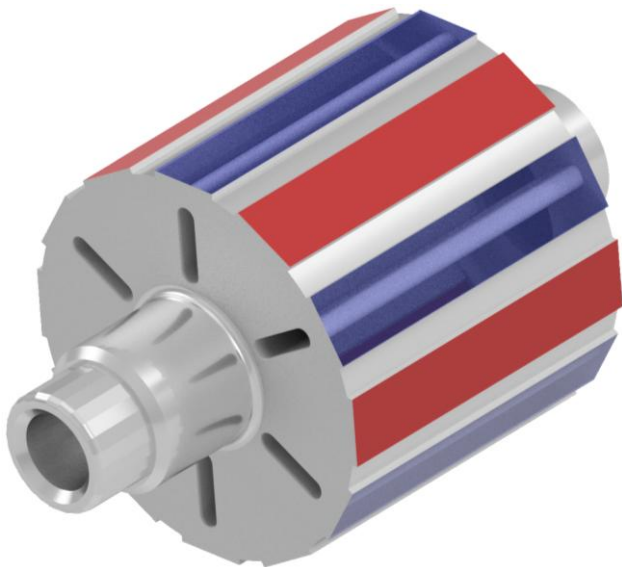


Fig. 4. Rotor d'un moteur *PMSM* radial

L'inconvénient des moteurs *PMSM* radiaux est leur capacité limitée à générer un couple élevé. Dans les cas où un couple élevé est nécessaire, il est nécessaire d'utiliser un mécanisme de transmission avec un rapport de transmission élevé, ce qui entraîne des pertes mécaniques accrues, une réduction de l'efficacité globale et une augmentation du moment d'inertie du système. Malgré ces inconvénients, les moteurs *PMSM* radiaux sont les moteurs de type *PMSM* les plus couramment utilisés dans le transport ferroviaire en raison de leurs coûts de fabrication plus

bas et de la bonne disponibilité des solutions technologiques.

Du point de vue de la conception, les moteurs *PMSM* radiaux ont un rotor en forme de disque, avec des aimants permanents placés sur la surface du rotor ou encastrés dans sa structure. Le rotor tourne dans le champ magnétique créé par le stator, ce qui permet le transfert mécanique d'énergie. La Fig. 4 montre le rotor d'un moteur *PMSM* radial.

## 2 MOTEURS PMSM AXIAUX

Les moteurs *PMSM* axiaux représentent une technologie plus récente, dont l'application pratique dans le transport ferroviaire en est encore à un stade précoce de développement. Contrairement aux moteurs radiaux, les moteurs *PMSM* axiaux génèrent un couple beaucoup plus élevé, ce qui est obtenu grâce à un bras magnétique plus grand. Cette différence de conception permet un transfert de puissance plus efficace à faibles vitesses, ce qui est particulièrement avantageux pour les applications de traction ferroviaire, où un fort tirant est nécessaire à faibles vitesses.

Les vitesses maximales des moteurs *PMSM* axiaux sont généralement inférieures à celles des moteurs radiaux, mais grâce à leur couple élevé, leur puissance spécifique (puissance par rapport au poids du moteur) est comparable et, dans certains cas, même plus élevée. Cette caractéristique permet leur utilisation dans le transport ferroviaire avec un rapport de transmission plus faible, voire sans mécanisme de transmission.

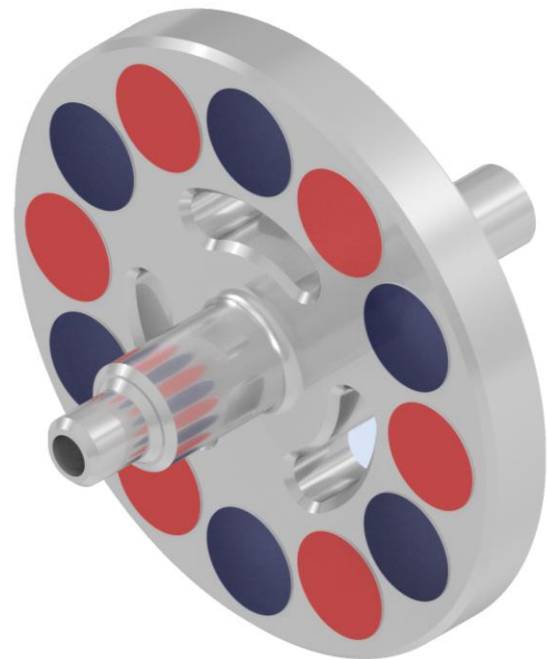


Fig. 5. Rotor d'un moteur *PMSM* axial

Dans le concept de traction directe (sans boîte de vitesses), le rotor du moteur *PMSM* axial peut être

directement intégré sur l'axe des roues du véhicule ferroviaire. Cette intégration réduit le besoin de transmissions supplémentaires, minimisant ainsi les pertes mécaniques et améliorant la fiabilité globale du système de traction. De plus, les moteurs *PMSM* axiaux sont conceptuellement plus simples à connecter entre eux par rapport aux moteurs radiaux, ce qui permet la conception de solutions modulaires.

Du point de vue de la conception, les moteurs *PMSM* axiaux ont un rotor en forme de disque, avec un champ magnétique orienté dans le sens axial (c'est-à-dire le long de l'axe du rotor). Cette conception permet une utilisation plus efficace de l'espace et améliore le refroidissement du moteur, contribuant ainsi à une meilleure efficacité. La Fig. 5 montre le rotor d'un moteur *PMSM* axial.

## CONCLUSION

Cet article présente un aperçu des solutions possibles pour la traction électrique utilisant des moteurs à aimants permanents (*PMSM*). Il se concentre principalement sur les avantages de cette technologie moderne dans le transport ferroviaire, son apport à la mobilité écologique et à la réduction des émissions.

L'objectif de l'article est de démontrer que l'utilisation des moteurs *PMSM* offre une efficacité supérieure par rapport aux moteurs électriques standards et permet également une réduction significative des exigences mécaniques. Cet effet est obtenu par l'intégration directe des moteurs dans le bogie, éliminant ainsi la nécessité d'un mécanisme de transmission. Un autre avantage est la réduction du poids des moteurs et de leurs pertes thermiques en raison de leur haute efficacité, ce qui conduit à une diminution de la consommation énergétique des trains.

Selon les sources disponibles, l'utilisation des moteurs *PMSM* peut améliorer l'efficacité de 12,96 %. Cette valeur peut être encore plus élevée dans le cas des locomotives diesel-électriques, où une efficacité accrue permet l'utilisation de générateurs plus petits, réduisant ainsi le poids de la locomotive et diminuant sa consommation de carburant. L'économie d'énergie directe conduit ensuite à une réduction des émissions.

L'article compare également les moteurs *PMSM* radiaux et axiaux, et il a été présenté que les moteurs axiaux sont plus avantageux pour le transport ferroviaire. Ils offrent une meilleure efficacité, une construction plus compacte et une meilleure répartition du couple, ce qui les rend plus adaptés aux applications ferroviaires.

## Remerciements

*Táto práca vznikla vďaka podpore projektu KEGA 024ŽU-4/2024: „Prehľadovanie vedomostí študentov univerzitného štúdia v oblasti konštrukcie dopravných*

*prostriedkov realizáciou odborných a vedeckovýskumných aktivít v odbore.“*

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

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] GOOLAK, S. - GERLICI, J. - TKACHENKO, V. - SAPRONOVA, S. - LACK, T. - KRAVCHENKO, K. (2019): *Determination of parameters of asynchronous electric machines with asymmetrical windings of electric locomotives*. In: *Communications - Scientific Letters of the University of Žilina*, Vol. 21, No. 2, 24-31. DOI: 10.26552/com.c.2019.2.24-31.
- [2] CRAVEN, N. (2014): *Low Carbon Rail Challenge*. *International Union of Railways (UIC), Fundamental Values Department, with technical support from the Sustainable Development Foundation (Raimondo Orsini, Massimo Ciuffini, Daniele Arena)*. [Online], Available at: [https://uic.org/IMG/pdf/low\\_carbon\\_rail\\_challenge\\_technical\\_report.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/low_carbon_rail_challenge_technical_report.pdf)
- [3] PENG, Y. - CHEN, F. - CHEN, F. - WU, C. - WANG, Q. - HE, Z. (2024): *Energy-Efficient Train Control: A Comparative Study Based on Permanent Magnet Synchronous Motor and Induction Motor*. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 73, No. 11, 16148-16159. [Online], Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10570070>
- [4] WU, J. - WANG, J. - GAN, C. - SUN, Q. - KONG, W. (2018): *Efficiency Optimization of PMSM Drives Using Field-Circuit Coupled FEM for EV/HEV Applications*. In: *IEEE Access*, 6, 15192-15201. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2813987.
- [5] XU, X. - WU, S. - CHEN, Y. - ZHANG, J. - LI, G. - YAN, C. - TAN, Z. - PENG, D. (2024): *Heat dissipation design and performance optimization of high-speed train PMSM based on coupled electromagnetic-thermal field*. In: *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 61, 104904. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104904.
- [6] BLANKEN, N. - PONICK, B. (2023): *Preferable PMSM rotor geometry for reduced axial flux components in the stator core*. In: *Elektrotechnik und Informationstechnik*, Vol. 140, No. 3-4, 382-390. DOI: 10.1007/s00502-023-01137-1
- [7] BOUAZIZ, O. - JAAFAR, I. - BEN AMMAR, F. (2018): *Performance analysis of radial and axial flux PMSM based on 3D FEM modeling*. In: *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, Vol. 26, No. 3, 1587-1598. DOI: 10.3906/elk-1708-68.

## 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.2025.1>