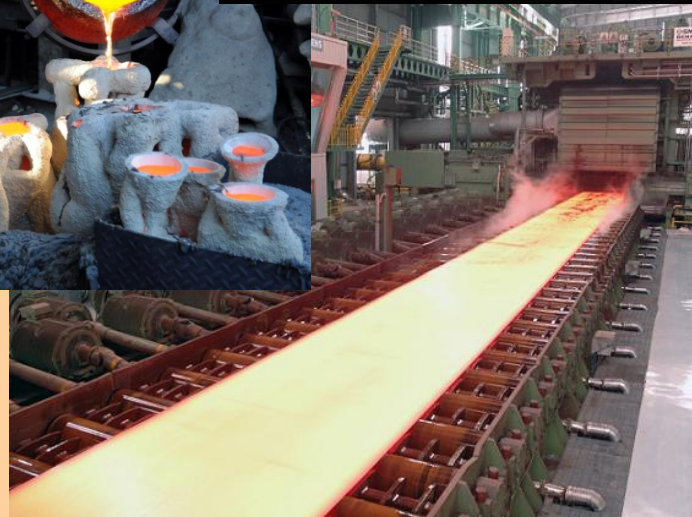
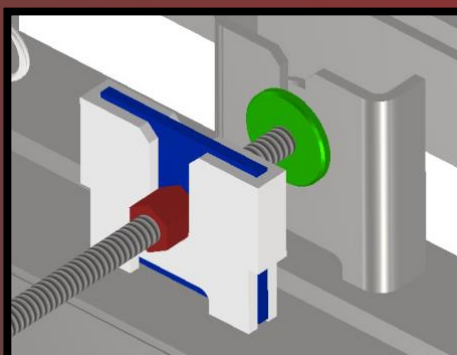
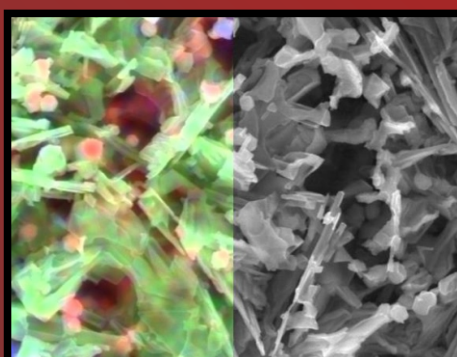
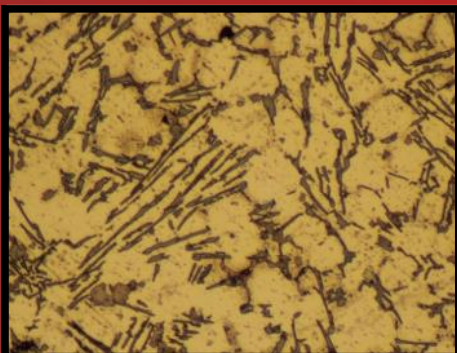




ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

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

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 Kantoriková, 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. Ľudmila 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.

prof. Ing. Jozef PILC, CSc.

Dr.h.c. prof. Ing. Karol VASILKO, DrSc.

prof. Ing. Eva TILLOVÁ, PhD.

prof. Ing. Peter DEMEČ, CSc.

prof. Ing. Jan SUCHÁNEK, CSc.

prof. Dr. Ing. Milan SÁGA

prof. Ing. Oleksandr KRAVCHENKO, Dr.Tech.Sc.

prof. Dr. Ing. Miroslav NESLUŠAN

prof. Ing. Danka BOLIBRUCHOVÁ, PhD.

prof. Ing. Emil EVIN, CSc.

prof. Ing. Alžbeta SAPIETOVÁ, PhD.

(SK)

(SK)

(SK)

(SK)

(SK)

(CZ)

(SK)

(UA)

(SK)

(SK)

(SK)

(SK)

OBSAH

ZOZNAM RECENZENTOV	5
EDITORIÁL	6
JOHANNES KEPLER	7
ŽELEZO A POČIATKY JEHO VÝROBY A SPRACOVANIA <i>Ján Moravec</i>	10
JÁN HARMATTA	15
STANOVENIE ÚNAVOVEJ PEVNOSTI ZVAROVÝCH SPOJOV OCELE S960MC ZVÁRANÝCH LASEROVÝM LÚČOM <i>Martin Frátrik, Miloš Mičian</i>	17
POROVNANIE GEOMETRICKEJ PRESNOSTI OBROBKOV PO TVRDOM FRÉZOVANÍ A BRÚSENÍ <i>Mária Čilliková, Anna Mičietová, Miroslav Neslušán</i>	21
NÁVRH ELEKTRICKÉHO MECHANIZMU OTÁČANIA VÝLOŽNÍKA STĹPOVÉHO ŽERIAVA PRE MANIPULÁCIU S KALOVÝMI ČERPADLAMI <i>Miroslav Blatnický, Ján Dižo, Denis Molnár, Vadym Ishchuk</i>	27
ROVNANIE PLECHU BODOVÝM OHREVOM <i>Ján Moravec</i>	32
HODNOTENIE VPLYVU TECHNOLOGICKÝCH PARAMETROV NA MIKROŠTRUTÚRU VYSOKOTLAKOVÝCH ODLIATKOV <i>Martin Medňanský, Marek Brůna, Marek Matejka</i>	36
OPTIMÁLNY NÁVRH VÝROBY NEŠTANDARDNÉHO OZUBENÉHO SÚKOLESIA <i>Silvia Maláková, Samuel Sivák</i>	42
KONŠTRUKCIA STRIŽNÉHO NÁSTROJA PRE PRISTRIOVANIE ČINNÝCH PLÔCH <i>Borislav Melo, Robert Dostál</i>	47
VPLYV Sr, Zr A Mo NA VYBRANÉ VLASTNOSTI AISi5Cu2Mg ZLIATINY <i>Martina Sýkorová, Dana Bolibruchová, Lukáš Širanec</i>	52
TVÁRNENIE SKLA V JEDNODUCHOM TVÁRNIACOM NÁSTROJI <i>Ján Moravec</i>	58
OXIDICKÉ VRSTVY A BIFILMY V ODLIATKOCH HLINÍKOVÝCH ZLIATIN <i>Marek Galčík, Marek Brůna</i>	62
DISPERZNE SPEVNENÉ MATERIÁLY <i>Elena Kantoríková</i>	66
KONŠTRUKČNÝ NÁVRH MECHANIZMU SKRUTKOVÉHO MANIPULÁTORA TURNIKETU SYPKÝCH MATERIÁLOV <i>Denis Molnár, Miroslav Blatnický, Ján Dižo, Vadym Ishchuk</i>	70

SKÚMANIE JAZDNÝCH VLASTNOSTÍ KOĽAJOVÉHO VOZIDLA A VZÁJOMNÉHO PÔSOBENIA KONTAKTU KOLESO/KOĽAJNICA POMOCOU SIMULAČNÝCH VÝPOČTOV	75
<i>Pavol Šťastniak, Juraj Gerlici, Ján Dižo, Miroslav Blatnický, Kateryna Kravchenko</i>	
INDUSTRY 4.0 IN MANUFACTURING ENTERPRISES	83
<i>Vladimíra Biňasová, Peter Bubeník, Miroslav Rakyta, Marta Kasajová, Katarína Štaffenová</i>	
EXPERIMENTÁLNA ANALÝZA TRIBOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ POVRCHOV KONŠTRUKČNÝCH MATERIÁLOV	87
<i>Jozef Bronček, Martin Vicen, Norbert Radek, Tomáš Bulko</i>	
STRATÉGIA ÚDRŽBY A EFEKTÍVNY VÝROBNÝ SYSTÉM	91
<i>Miroslav Rakyta, Peter Bubeník</i>	
SYNTECKÉ PALIVÁ A UHLÍKOVÁ NEUTRALITA	97
<i>Matúš Lavčák, Michal Puškár</i>	
HODNOTENIE TRIBOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ DLC POVLAKOV VYBRANÝCH TRIBOLOGICKÝCH DVOJÍC	100
<i>Matúš Čuchor, Jozef Ondriga</i>	
STANOVENIE ÚSPORY ENERGETICKÝCH NÁKLADOV NA POHON VLAKU ZNÍŽENÍM JAZDNÉHO ODPORU	104
<i>Sergii Panchenko, Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Vasyl Ravlyuk, Ján Dižo</i>	
PROGRAMMABLE MODEL OF AN AUTOMATED WAREHOUSE	110
<i>Vladimíra Biňasová, Peter Bubeník, Miroslav Rakyta, Marta Kasajová, Katarína Štaffenová</i>	
КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ГОРНЫХ ВЕЛОСИПЕДОВ, ЧАСТЬ 3.	114
<i>Ян Диžo, Мирослав Блатницький, Вадим Васильевич Ищук, Денис Молнар, Себастьян Солчанский, Борис Плайдичко</i>	
POROVNANIE DEFORMAČNÝCH CHARAKTERISTÍK VYSOKOPEVNÝCH OCELÍ POUŽÍVANÝCH V AUTOMOTIVE	120
<i>Emil Evin, Miroslav Tomáš, Vladimír Kokarda, Juliy Martyn Kulya</i>	
KONCEPCIA, BEZPEČNOSŤ A SÚVISIACI PRIEMYSELNÝ VÝSKUM NÁHRADY DIESELOVÉHO POHONU ZA POHON S VODÍKOVÝM PALIVOVÝM ČLÁNKOM V DIESEL MOTOROVÝCH JEDNOTKÁCH RADU 861	127
<i>Pavol Šťastniak, Juraj Gerlici, Dušan Cesnek, Peter Golian</i>	
DIŠTANČNÉ VZDELÁVANIE V TECHNIKE	133
<i>Dana Stančeková</i>	
RECENZIA	135
<i>Ján Moravec</i>	

ZOZNAM RECENZENTOV PRÍSPEVKOV

doc. Ing. **Dalibor BARTA**, PhD.
doc. Ing. **Jozef BILÍK**, PhD.
Ing. **Vladimíra BIŇASOVÁ**, PhD., DiS.
doc. Ing. **Miroslav BLATNICKÝ**, PhD.
doc. Ing. **Marek BRŮNA**, PhD.
doc. Ing. **Mária ČILLIKOVÁ**, PhD.
doc. Ing. **Ján DIŽO**, PhD.
Ing. **Elena KANTORÍKOVÁ**, PhD.
Ing. **Radoslav KOŇÁR**, PhD.
Ing. **Peter KOPAS**, PhD.
prof. Ing. **Alyona LOVSKA**, Dr.Sc. Tech.
doc. Ing. **Ján MORAVEC**, PhD.

EDITORIÁL

Motto: “Nijaká kniha nie je taká zlá, aby nemohla byť niekomu na osoh.”

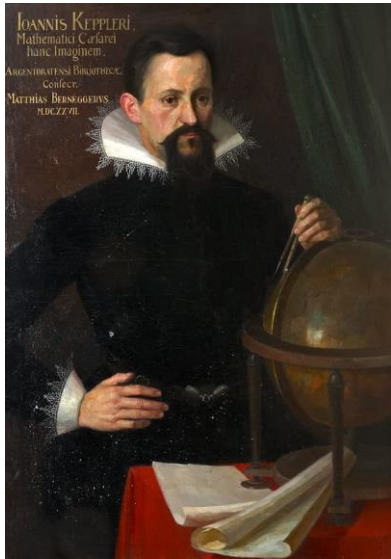
M. Plinius Secundus

Vážení autori, čitatelia a priaznivci, dovoľte mi v prvom rade pozdraviť vás ako prispievateľov do časopisu *Technológ*. V tomto čísle sú zaradené rozličné príspevky z oblastí vedy a výskumu. Tieto príspevky určite majú čo povedať a veľmi dobré je, že sa dajú príspevky a potrebné informácie z publikovaných článkov vedeckého časopisu *Technológ* ľahko vyhľadať v elektronickej verzii. Týmto sa ľahko uľahčí prístup k potrebným informáciám. *Technológ* sa týmto zaradil medzi ostatné časopisy, kde je aplikované takéto riešenie. Publikované príspevky sú podrobené odbornej kontrole a recenzované anonymne dvomi recenzentmi.

Do tohto čísla, ako je zaužívané, sú v úvode zaradené príspevky o *Jánovi Keplerovi*, výrobe železa v praveku a medailón *Jána Harmattu*, vynálezcu bodového zvarania. Potom nasledujú vedecké príspevky, ktoré, ako dúfam, poskytnú mnoho zdrojov, poznatkov a poučení pre nasledujúce využitie.

Všetkým prajem veľa zdravia a úspechov.

Ján Moravec
šéfredaktor a editor



Johannes KEPLER (*27. december 1571, *Weil der Stadt*
– †15. november 1630 *Regensburg*)

Johannes Kepler bol jeden z najvýznamnejších nemeckých astronómov, optikov a najmä matematikov. Sformuloval tri základné zákony pohybu nebeských telies.

Jeho otec Heinrich bol vojak - žoldnier, ktorý sa veľmi staral o rodinu a manželku Katarínu. Matka bola dcérou hostinského a Johannes bol prvorodené dieťa z ich manželstva. Otec sa pohyboval na vtedajších rozličných európskych frontoch a nedával o sebe rodine vedieť. Napokon sa matka rozhodla a išla muža a otca svojich detí vyhľadať na bojisko do Holandska. Tam ho skutočne aj našla a doviedla domov. Na vtedajšie pomery to bol zo strany Kataríny priam heroický výkon. Je o nej známe, že mala guráž a nebála sa vydať na viac ako tristo kilometrovú cestu plnú nebezpečenstva. Snáď už vtedy bolo dané, že Johannes bude tiež putovať krížom-krážom po strednej Európe a spozná viac krajín ako hocikto iný z jeho učiteľov a profesorov, či známych.

Štúdium

Vyštudoval na univerzite v *Tübingene*, kde u významného astronóma tej doby *Michaela Mästlina*, ktorý svojho žiaka dokonca prežil (1550 - 1631) študoval astronómiu. Cesta k vede nešla priamočiario. *Johannes* pôvodne študoval teológiu a iba pol roka pred skončením štúdia sa dal na cestu matematiky a astronómie. Je potrebné povedať, že v tom čase sa matematika delila na dve veľké skupiny na matematiku, ktorá zhrňala aritmetiku a geometriu a vyššiu matematiku, čo bola vlastne vtedy astronómia. Vojvodské štipendium bolo *Keplerovi* udelené ako dobrému žiakovi a vďaka tejto podpore vyštudoval a netrpel hmotnými nedostatkami.

V roku 1601 *Kepler* zaujal po smrti *Tycha Brahe* pozíciu kráľovského matematika v *Prahe*, kde vtedy sídlil cisár *Rudolf II.*, jeho mecenáš a ochranca. Na základe dát získaných *Braham* určil eliptickú dráhu planéty *Mars*.

Po smrti cisára *Rudolfa II.* v roku 1612 *Kepler* opúšťa *Prahu* a odchádza do *Linz*. Jeho žena a dvaja synovia umierajú. Znova sa žení, ale prenasledujú ho osobné a finančné problémy. Zomierajú mu dve malé dcéry. Vracia sa do *Württembergu*. 31.7.1619 bol *Kepler* exkomunikovaný z evanjelickej cirkvi pastorom *Danielom Hitzlerom* z dôvodu, že vraj skrytý kalvinista. *Kepler* sa často angažoval v cirkevných otázkach, kde na rozdiel oficiálnych veličín zaujímal veľakrát odlišné stanoviská v teologických otázkach. Z tohto dôvodu nebol obľúbený na svojej *Alma mater* v *Tübingene* a práve preto ho tu odmietli ako učiteľa, hoci o jeho odborných schopnostiach v matematike nebolo pochyb.

Astrológ

Keďže ako otec rodiny sa musel o jej členov takisto starať a mzda z cisárskej pokladnice tiekla slabým prúdom, aby zarobil na denné výdavky, zostavoval horoskopy pre vplyvných a bohatých ľudí. Našťastie sa stretol s vtedy stúpajúcim po spoločenskom rebríčku významným českým šľachticom *Albrechtom Valdštejn*om, *frýdlantským* vojvodom, neskôr ríšskym kniežaťom. Tento sa stal počas začínajúcej tridsaťročnej vojny generálom a vrchným veliteľom (*generalissimom*) cisárskej armády. Pre tohto šľachtica vypracoval dva horoskopy. Prvý v roku 1605.

Dôležitejší je ten druhý z roku 1621, ktorý veľmi presne opisuje *Valdštejnove* úspechy a kariéru, a dokonca predpovedal jeho smrť v apríli 1634. Tu sa *Kepler* trochu zmýlil, v skutočnosti *Valdštejna* zavraždili 25. februára 1634.

Čarodejnický proces

Johannes Kepler zomrel po krátkej chorobe v *Regensburgu*. Jeho hrob nejestvuje, pretože počas storočí sa cez *Regensburg* prehnala nielen *tridsaťročná vojna*, *napoleonské vojny* a najmä bombardovanie počas druhej svetovej vojny. Pamätník, ktorý jestvuje dnes, je iba symbolický, niečo ako *kenotaf* v antickom *Grécku*. Hoci hrob nepoznáme, jeho odkaz, dielo a myšlienky žijú ďalej.

Po celý svoj život bol *Kepler* veľmi silne nábožensky založený. Vo svojich dielach sa často odvoláva na Boha, čo nie je nič prekvapujúce, keďže sa chcel stať pastorom. Tu musím niečo povedať o jeho náboženskom presvedčení, pretože bolo veľmi významné v *Keplerovom* živote. Každý deň čítal bibliu (ako v *Anglicku Newton*). V živote sa *Kepler* stretol s ťažkosťami vo veľkom meradle a dá sa povedať, že žil skôr ustarane ako bezstarostne. Jeho matku *Katarínu* obvinili z čarodejníctva, takže musel vynaložiť ohromné úsilie a veľké množstvo peňazí, aby ju neupálili. Bola obvinená v 49 článkoch a za každý jeden bol trest smrti. Pre zaujímavosť v článku 19. jej dávali za vinu, že požadovala aby hrobár vykopal telo jej otca a vybral lebku. V článkoch 21 a 22 bolo uvedené, že podala čarovný nápoj v cínovom pohári a dotýčný veľmi ochorel (vysvetlenie: kto vtedy dbal na hygienu a umýval poháre?).

Keplerove zákony sú tri pravidlá týkajúce sa pohybov telies v slnečnej sústave, ktoré na základe astronomických pozorovaní formuloval *Johannes Kepler*. Rovnako ako platia pre planéty v slnečnej sústave ich môžeme použiť aj pre ľubovoľne iné sústavy obiehajúcich telies (napr. pre mesiace *Jupitera*). Tieto zákony boli dôležitým východiskom pre *Isaaca Newtona* pri jeho formulovaní zákonov gravitácie a z *Newtonovho* gravitačného zákona je možné všetky tri *Keplerove zákony* odvodiť pomocou diferenciálneho počtu. Pri ich definovaní a hľadaní boli pre *Keplera* dôležité pozorovania *Tycha Braheho*, ktoré mu tento odkázal po svojej smrti (spolu totiž predtým spolupracovali). Prvé dva zákony publikoval *Kepler* v roku 1609 v diele *Astronomia Nova (Nová astronómia)*, tretí zákon pridal v roku 1619 v diele *Harmonices Mundi (Harmónie sveta)*.

Definovaním tzv. *Keplerových* zákonov sa rozriešil definitívne spor medzi heliocentrizmom a geocentrizmom v prospech *Kopernikovej teórie*. *Keplerove zákony* sa dajú použiť i na popis ďalších telies, ktoré sa pohybujú v gravitačnom poli *Slnka*, napr. umelých družíc. *Kepler* nepovažoval *Slnko* za jednu z mnohých stálic. Pokiaľ ide o styky s učencami zo *Slovenska*, tak na prvom mieste je jeho vzťah s vtedajším profesorom a neskôr rektorom *Karlovej univerzity Jánom Jesseniom*, ktorý bol takisto ako *Kepler* členom úzkeho spolku vzdelancov obklopujúcich cisára *Rudolfa II.* S takmer istotou možno povedať, že sa určite poznal aj s profesormi z *Karlovej univerzity* ako boli *Vavrínek Benedikti z Nedožier*, *Peter Fradelius*, *Daniel Basilius* a možno aj *Juraj Mollerus*. Prečo teda neučil na *Karlovej univerzite*? Na to jestvuje možná odpoveď: tam mohol učiť iba slobodný učiteľ, nie ženatý, takže tu cesta neviedla a napokon ani nevieme, či mal *Kepler* záujem o tamojšiu profesúru.

Kepler písal svoje diela najmä *latinsky* a *nemecky* písal osobné listy priateľom a známym. Jeho štýl v *latinčine* bol veľmi vybrúsený a vynikajúci. V texte používal množstvo výrazov a dá sa povedať, že jeho slovná zásoba z *latinčiny* bola ohromná. Kde nemal poruke vhodné *latinské* slovo aplikoval *grécky* výraz.

Na obrázku je *Keplerov* podpis.



Pred smrťou (iba niekoľko týždňov) napísal krátku básň:

*Mensus eram coelos,
nunc terrae metior umbras.
Mens coelestis erat,
corporis umbra jacet.*

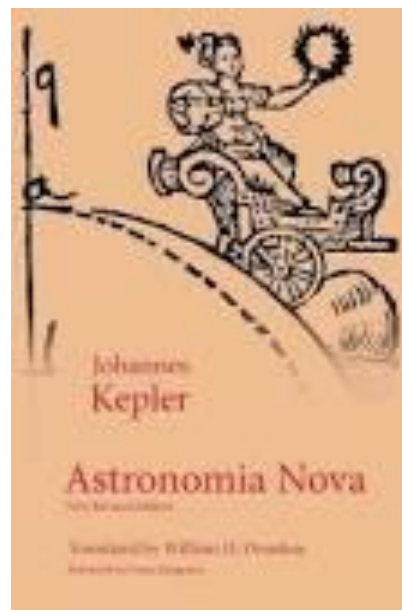
V preklade: Meriaval som nebesá,
ale teraz meriam tieň zeme.
Hoc moja duša bola z neba,
tieň môjho tela spočíva tu.

Jednotlivé diela (boli vydané v *latinčine*, aby boli prístupné pre všetkých učencov vo vtedajšej *Európe*.):

- *Mysterium cosmographicum* (*Záhada sveta*) (1596),
- *Astronomiae Pars Optica* (*Optická časť astronómie*) (1604),
- *De Stella nova in pede Serpentarii* (*O novej hviezde v nohe Hadonosa*) (1604),
- *Astronomia nova* (*Nová astronómia*) (1609) - Kepler tu publikoval svoje prvé dva zákony, ktorými sa riadi pohyb planét,
- *Dioptrice* (*Dioptrika*) (1611),
- *Epitome astronomiae Copernicanae* (sedem dielov, 1618 a 1621) - tu podrobne preberá heliocentrickú astronómiu,
- *Harmonices Mundi* (*Harmónia sveta*) (1619)- v texte publikuje Kepler svoj tretí zákon,
- *Tabulae Rudolphinae* (1627),
- *Somnium* (*Sen*) (1624) - prvý predchodca vedeckej fantastiky.

LITERATÚRA

- [1] CONNOR, J.A. (2005): *Keplerova čarodějnice*. Pragma, Praha ISBN 80-7205-176-8.
- [2] HORSKÝ, Z. (1980): *Kepler v Praze*. Mladá fronta, Praha.
- [3] FERGUSONOVÁ, K. (2009): *Tycho a Kepler*. Academia Praha, ISBN 978-80200-1713-0.
- [4] KEPLER, J. (2011): *Dioptrika*. Vydavatelství R. Chlup, Olomouc, ISBN 978-80-903958-3-1 preklad lat. originálu M. Petráň.



Tituly Keplerových vedeckých prác

ŽELEZO A POČIATKY JEHO VÝROBY A SPRACOVANIA

Ján Moravec

ÚVOD

Predložený príspevok je pokračovaním mojich predošlých článkov uvedených v zozname literatúry [1, 2, 5-11]. O dejinách a vývine starých technologických postupov v oblasti mechanických technológií bolo publikovaných značné množstvo príspevkov, odborných prác aj monografií. Na tomto mieste musím pripomenúť bazálne diela R. Pleinera [3, 4] Nasledujúci text je teda pokračovaním a doplnením spomenutých prác a ponúka niekoľko postrehov z predmetnej oblasti.

VŠEOBECNE

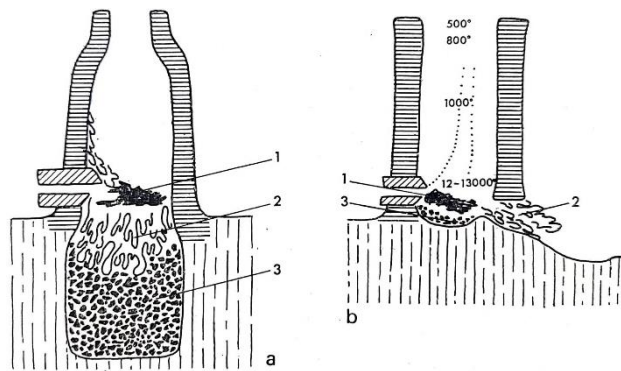
V tzv. *halštatskej* dobe (prvá polovica 1. tisícročia pred n. l.) sa dostáva prvé železo na územie strednej Európy, zrejme importom (bez kuriózneho nálezu zo staršej doby bronzovej v *Gánovciach*). Na sklonku *halštatského obdobia* sa však v zemi už značne rozvíja hutníctvo železa. Redukcia rudy sa vykonávala v plochých vyhniach (*Králová*); pozoruhodné je, že sa hneď z počiatku používali pomerne ťažko tavitelné krveľové rudy. Prvý rozvoj kováčskeho spracovania nového kovu je možné pozorovať v našich mlado *halštatských* kultúrach: *bylanská, sliezsko-plátenická, horákovská, chotínska*. Plastické tvárnenie za tepla bolo už takmer dokonalé (zložité zákolníky, sekery, nože, hroty kopijí) aj napriek tomu, že tvar bol závislý od liatych predlôh. Železo čepelí sa tvrdilo niekedy kovaním za studena alebo cementovaním uhlíka v ostří (najmä dýky); výsledky rozboru z inej časti Európy ukazujú že išlo o málo používanú techniku výroby. Poznávanie vlastností ocele (nauhličovaného železa) bolo v počiatkoch náhodné.

VÝROBA ŽELEZA

Z technického hľadiska malo najväčší význam hutníctvo železa, ktoré sa v priebehu *laténskeho* obdobia rozvinulo natoľko, že túto epochu možno nazvať dobou železnou. Ešte v strednom *laténskom* období sa vyskytujú malé huty s jamovými pecami, možno ani nie plne špecializované (*Mšecké Žehrovice*, chata s výrobou švartňového šperku a so železiarskou pieckou), hoci hrobový inventár *keltských* bojovníkov tej doby už eviduje množstvo železných zbraní (dlhé meče, kopije, kované štíty). Zato v mladej *laténskej* fáze už boli zakladané celé hutnícke dielne s niekoľkými redukčnými pecami a vyhrievačmi. Tieto huty pracovali v otvorených osadách len v menšom meradle sa železo produkovalo priamo v mestských aglomeráciách - oppidách (keltské sídlo mestského charakteru napr. *Bratislava hrad, Pohanská Smolenice, Divinka*).

Východokeltské pece

Mladolátenske železiarske pece mali svojráznu charakteristickú konštrukciu, ktorá bola zrejme dielom východných alebo severovýchodných *keltských* hutníkov. V západoeurópskych *keltských* krajoch sa totiž stavali úplne iné hutnícke pece. *Východokeltská* redukčná pec mala nadzemnú šachtu tvorenú zo žiaruvzdornej hliny (výška asi 50-60 cm), na ktorej úpäti pri zemi bol umiestnený otvor na vsadenie hlinenej tehly (do ktorej sa zasúvalo ústie dúchacieho mechu). Tento otvor však čnel do pece zhruba v polovici výšky tavného priestoru, pretože celá spodná časť s nístejou bola zahĺbená do zeme. Tento kotlovitý útvar slúžil ako recipient trosky, pretože pece tohto typu neboli opatrené výpustom. Pri redukcii železnej rudy dreveným uhlím sa rozložila teplota v peci od niekoľkých stoviek stupňov v kychte až do 1300-1350 °C okolo úrovne vzduchovej formy. Železo vznikalo v podobe kryštálov, ale jeho podstatná časť prešla do trosky, bohatej na kysličník železnatý. Zvyšok (asi 20 %) prišiel do ústí nístejte tesne pod úroveň dúchania ako tzv. železná huba, zatiaľ čo troska pretiekla jej pórmi a vytvorila v nej charakteristický ťažký troskový zliatok. Po prelomení časti šachty sa huba odsekla, troska sa buď odstránila alebo sa v ňom ponechala, ak pec už doslúžila. Tento princíp sa označuje ako priama výroba železa. Je to pôvodný spôsob hutnenia železa z rúd, keď redukčné teploty nepresahujú asi 1400 °C. Konečným produktom, ktorý sa vylamuje z pece, je železo (príp. rôzne druhy ocelí) v cestovitom stave, ktoré je kujné. Železná huba plná trosky a zvyškov paliva sa musela znovu rozžeraviť (ohrev do bieleho žiaru) a dôkladne prekovať v hutnejšej, relatívne trosky zbavenej hrudy kujného železa. Tento pochod sa vykonával v tzv. vyhrievačkách, buď peciach alebo otvorených vyhniach, ktoré bývajú zaistiťované priamo v hutách. Výroba železa bola práca ťažká, plná nebezpečia z nepodarkov (prerušenie chodu pece, stuhnutie trosky, strata metalického železa v troske). Mohli ju vykonávať iba skúsený metalurgovia.



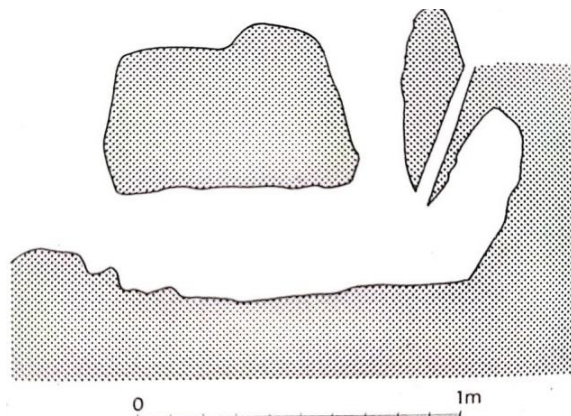
Obr. 1. Železiarske pece: a) princíp východokeltskej železiarskej pece so zahĺbenou nistejou, b) nízka železiarska pec

KOVÁČSTVO

Pomerne chemicky veľmi čisté zvarkové železo bolo spracované na hotové výrobky v kováčskych dielňach, v tej dobe oddelených od hút a umiestnených v značnom počte na území *oppid*. Z nášho územia nie sú známe nálezy polotovarov, tzv. dvojhrotových ťažkých hrivien, nájdených v západnej Európe. Jedine pod *Novým Smokovcom* v *podtatranskej oblasti* bolo v troskových haldách z prelomu letopočtu nájdených kedysi niekoľko železných hrúd a v *Plaveckom Podhradí* depot železných hrivien vo forme tyčí, ktoré sa *západoeurópskym* podobajú len čiastočne.

Keltské kováčstvo možno hodnotiť ako vyspelé a produktívne. Remeselníci mali k dispozícii pomerne dokonalé pracovné náradie, ktoré *Kelti* poznali u *Grékov* a *Etruskov* (nákovy, kladiva, pilníky, sekáče, kliešte, nitovačky na ubíjanie hláv nitov) a jeho formy sa veľmi rýchlo zdokonalili. Kováči ovládali všetky operácie tvárnenia za tepla a boli schopní produkovať všetky druhy poľnohospodárskeho náradia, remeselníckych nástrojov, domácich potrieb a konštrukčných súčastí (70 druhov), vedeli taktiež zhotoviť umeleckú razbu. Výrazne zdokonalili rôzne techniky tvrdenia: cementovania, kalenia (ktoré bolo zámerne vykonávané s väčším, či menším úspechom) a začali s ťažšími praktikami v konštrukcii čepelí - zváranie mäkkších železných plátok s tvrdšími oceľovými. To znamená, že sa naučili oba druhy technického kovu rozlišovať a tvrdší z nich - oceľ - taktiež získavať nauhličovaním menšieho množstva zváraného železa. Mnoho nástrojov a mnoho zbraní (kopije, meče) sa aj naďalej kuli z pomerne mäkkého železa s feritickou štruktúrou.

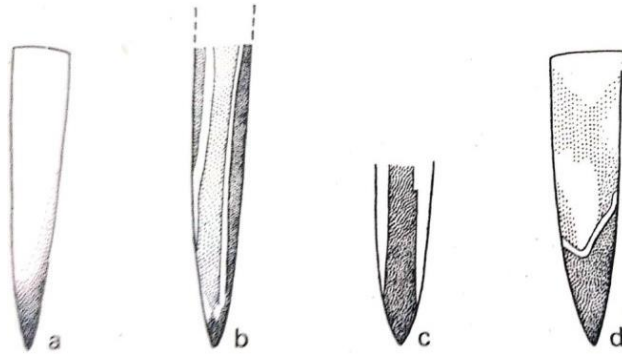
Kováčska výroba bola odlúčená od hutníckej prvovýroby a z veľkej časti sa presunula do sídlisk mestského typu. V poslednej dobe boli objavené kováčne buď priamo na hradiskách (*Mikulčice*) alebo v podhradí (*Nitra-Kasárne*), či v špecializovaných dedinách blízko hradísk (*Pobedim III*).



Obr. 2. Schéma slovenskej železiarskej pece z 8. st.

Z kováčskeho náradia boli nájdené nákovy, kliešte, kladiva, pilníky a sekáče, ďalej na niekoľkých miestach rotačné brúsky so štvorcovým otvorom pre os. Detailný pohľad na kováčske techniky prináša metalografický výskum výrobkov. Ukazuje sa, že asi tretina produkcie bola vyhotovená nenáročnými technikami (plastické tvárnenie, pakety z mäkkšieho železa). Väčšia časť nesie stopy techník, vedúcich ku skvalitneniu technických vlastností výrobkov: húževnatosť, pevnosť, pružnosť a tvrdosť. Cementácia (nauhličovanie) ustupuje výrazne rýchlejšim, ale náročnejším spôsobom konštrukcie nástrojov cestou zvárania mäkkších železných častí s tvrdšími oceľovými. Tento princíp sa aplikoval i na výrobu oceľok, ktorých navarené oceľové hrany poskytovali iskry s dostatočnou tepelnou energiou k zapáleniu trúdu. Boli zistené železoocelové pakety, ďalej čepele so stredovou oceľovou lamelou a už medzi výkovkami z 9. st. je mnoho vecí s navarenými oceľovými hrotmi. Táto posledná

technika, príznačná pre zvýšenú produkciu čepelí (nože, kosy atď.), je vo východnej Európe obvyklá až od 10. st. Pre západnú Európu zatiaľ chýbajú potrebné analýzy. Hotové výrobky, ktoré mali hrot, sa tepelne spracovávali. Kalenie a popúšťanie bolo celkom bežné. O rozsiahlej a intenzívnej výrobe svedčí taktiež bohatý sortiment kováčskych výrobkov, ktoré zahŕňa cez 90 základných druhov, a v neposlednom rade fakt, že kov dodávaný hutami nebol všetok spotrebovaný na hotové výrobky. Boli nimi tzv. sekerovité hrivny, kované v štyroch veľkostiach od niekoľko centimetrových po polmetrové. Bol objavený celý rad depotov hrivien na veľkomoravských náleziskách. Celková situácia a početné obdoby v iných prostrediach ukazujú, že sa tieto predmety používali zároveň ako platidlá. Z ich tenkých listov bolo taktiež možné vysekávať tenké lamely pre cementovanie. Vysekané miesta boli zaistené na mnohých kusoch. Nálezy tzv. kováčskej trosky dokazujú, že kováčstvo sa vyvíjalo na dedinách ale aj na mestských sídliskách; naopak hutníctvo železa zostalo pri zdrojoch rudy a paliva a nemalo už miesto v normálnom hospodárskom živote ani v hradnom meste.



Obr. 3. Ukážky veľkomoravských kováčskych techník pri konštrukcii nástrojov:

- a) rez čepeľou noža z dolného Petra, Slovensko, doba veľkomoravská. Zámerne nauhličené ostrie,
- b) rez ostrím miniatúrnej sekery zo Starého Mesta, Morava, d. veľkomoravská. Zváranie niekoľkými plechmi mäkkého železa a rôzne tvrdej uhlíkovej ocele,
- c) rez jednou z ostria radlic z Ivanovic, Morava, d. veľkomoravská. Oceľový plát medzi dvoma plechmi,
- d) rez čepeľou noža zo Starého Mesta, Morava, d. veľkomoravská. Navarenie oceľového ostria na železný chrbát.

Pretože výroba sa rozšírila do malých hút, ktoré zásobovali spravidla len feudálne dvory alebo hradiská, nebolo zaobstaranie rudy problém. Jej získavanie sa obmedzilo len na zber či kopanie, kde bola ruda zvetraná na ľahko tavitelné hneделе. Ako ukázali archeologické nálezy, uplatňovali sa v období od 11. do 13. storočia u nás jamové vyhne s umelým dúchaním vetra a troskovou výpusťou. Vzduch sa vháňal do pece mechmi, ústiacimi do dýzy, ktoré boli zasadené do steny pece, alebo opreté o kraj jamy smerom do vnútra pece. Pece boli jamovité rôznych rozmerov, dosahujúce hĺbku až 1 meter a priemeru až 3 metre, výnimočne aj viac. Neskôr používali naši hutníci aj šachtovité pece, čo dokladá aj pec z 13. st. Táto pec mala vnútorný priemer 30 cm, vonkajší priemer 130 cm a výšku 100 cm ÷ 130 cm a mala kamennú výmurovku šachty, nebolo to však ešte pravá kusová pec. To sa posudzuje na základe nálezov, že sa niekedy v tejto dobe ruda upravovala pražením a že sa používal snáď aj vápenec ako troskotvorná prísada, ktorý znižoval bod tavenia trosky a zvyšoval teda jej tekutosť. Jamová pec tejto doby pracovala pri nízkej teplote (asi do 1300°C), takže redukcia rudy bola nedostatočná a polovica železa zostala v troske. Zato bolo železo čisté, pretože kremík sa prakticky neredukoval, fosfor prešiel z časti do trosky a mangán sa redukoval len nepatrne. Produktom pece bola zvarená hruda, ktorá sa zbavovala zbytkov trosky vyhrievaním a vykutím. Vyhrievanie sa vykonávalo v zvláštnych hutách - vyhrievačkách. Získavalo sa tak zvarové železo s rôznym obsahom uhlíka.

ZÁVER

Výroba železa mala zásadný význam, pretože vyrobený kov slúžil na produkciu obrábacích nástrojov pre všetky remeslá na zhotovenie konštrukčných častí a mnohých potrieb i k výrobe zbraní. O počiatkoch slovanského železiarstva toho nevieme mnoho, isté však je že v 8. st. sa objavujú veľké huty s batériami dva až 24 s výborne konštruovanými redukčnými pecami svojrázneho typu, zabudovaného do zeme. Výskum huty ukázal, že v peciach tepelne výborne izolovaných, opatrených až tromi druhmi žiaruvzdorného materiálu (najlepší z nich mal výdrž až 1700 °C) a prispôbenému umelému dúchaniu šikmou veternou formou, sa mohli s úspechom spracovávať pomerne ťažko tavitelné hematitové magnetitové rudy. Troska sa v peci vypúšťala a hubovitá lupa sa mohla zasunúť v niektorých prípadoch do zvláštnej dutiny v zadnej stene pece a tam sa v prostredí žeravého dreveného uhlia a stranou vzdušného prúdu povrchovo nauhličovať. Nožík, ktorý bol pri týchto peciach nájdený, bol celý z ocele.

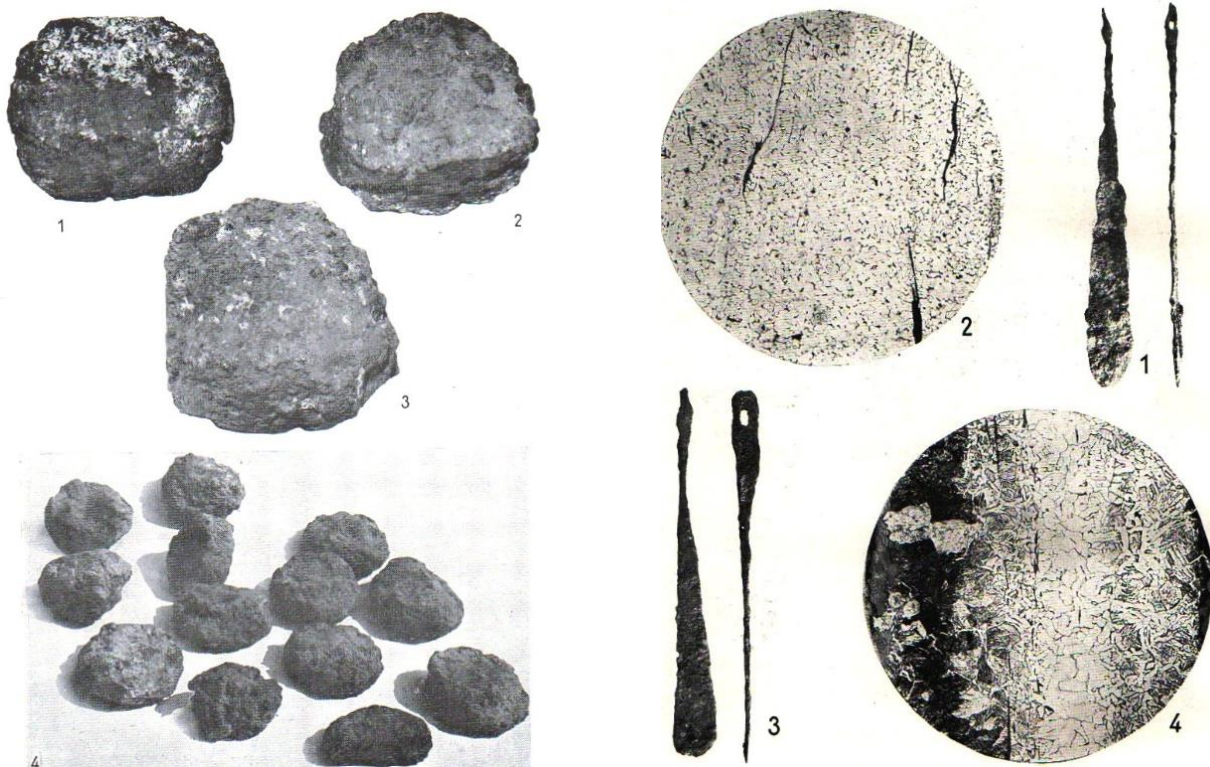
Hutníci tejto doby, zvaní rudníci a železníci, neboli neslobodnými, ktorí patrili panovníkovi alebo kláštoru, pre ktorý pracovali na ich dvore alebo v dedine. Pramene uvádzajú, že v 12. st. sa niekedy mohli vytvoriť i väčšie

strediská výroby, obzvlášť keď bol v blízkosti dostatok rudy a vyrobené železo sa mohlo dostať na trh, kam prichádzali obchodníci, ako tomu bolo napr. v *pražskom podhradí*. Títo väčší hutníci sa časom stali slobodnými hutníkmi, ako je známe z ďalšieho obdobia.

LITERATÚRA

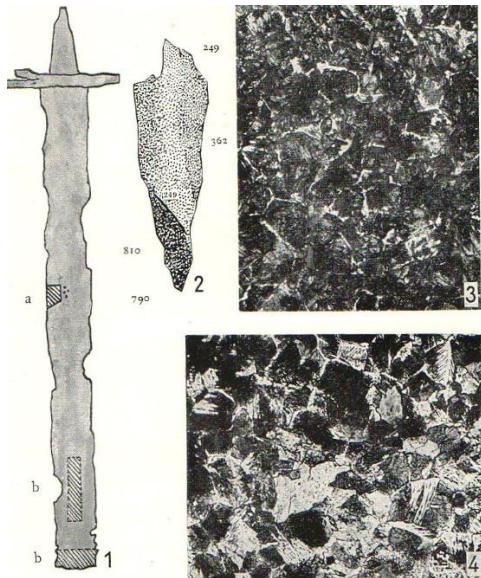
- [1] MORAVEC, J. (2010): *Počiatky metalurgie na území Slobodnej Germánie*. ŽU Žilina, EDIS vyd., Žilina, 72 strán, ISBN 978-80-554-0238-8.
- [2] MORAVEC, J. (2010): *Prehľad vývoja kovania od jeho počiatkov do začiatku novoveku*. ŽU Žilina EDIS, 98 s. ISBN 978- 80-8070-554-0, 2. doplnené a opravené vydanie.
- [3] PLEINER, R. (1962): *Staré evropské kováčstvá*. NČSAV Praha, s. 102-112.
- [4] PLEINER, R. (1958): *Základy slovanského železárskeho hutníctví v českých zemích*. Praha.
- [5] MORAVEC, J.(2009): *Kovy zo Slovenska a ich vývoz*. In: Technológ roč. I., č.1/2009, str. 15-19, ISSN 1337-8996.
- [6] MORAVEC, J. (2010): *Postavenie kováča v rámci spoločnosti a vývin jeho pracovného náradia*. In: Technológ, roč. II. č. 1/2010, str. 50-68, ISSN 1337-8996.
- [7] MORAVEC, J. (2011): *Príspevok k historickým počiatkom metalurgie a kováčstva*. Ročenka Katedry technologického inžinierstva č. 4 EDIS vyd. ŽU Žilina, str. 66-71, ISBN 978-80- 554-0335-9.
- [8] MORAVEC, J. (2012): *Sekerovité hrivny ako produkt kováčskej výroby*. Ročenka Katedry technologického inžinierstva č. 5, EDIS vyd. ŽU Žilina, s. 38-41, ISBN 978-80- 554-0496-7.
- [9] MORAVEC, J. (2012): *Vývoj kováčskeho náradia*. In: Technológ, roč. IV., č. 2, str. 41-44, ISSN 1337-8996.
- [10] MORAVEC, J. (2013): *Hutníctvo a kováčske remeslo v ranom stredoveku*. In: Ročenka KTI 6, s. 47-50, ISBN 978-80554-0647-3.
- [11] MORAVEC, J. (2014): *Východiská zvýšenia produkcie železných výrobkov v stredoveku*. In: Ročenka KTI 7, s. 46-50, ISBN 978-80554-0842-2.

PRÍLOHY

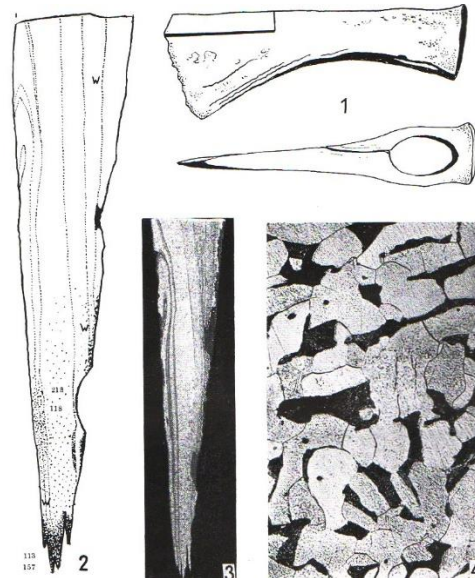


Železné lupy z doby halštatskej
(*Krásna hôrka Medvedzie*)

Sekerovité hrivny z doby hradištnej, 1- Nejdek, 2- jemnozrnná feriticko-perlitická oceľ (zv. 200x), 3- Mikulčice, 4- rôzne nauhličená oceľ; tmavo perlit, bielo ferit, ihlice W. štruktúry (zv. 200 x)



Kolín, CZ, karolínsky meč 10. stor.:
 1 - meč s vyznačenými výbrusmi, a) profil ostria,
 b) povrchové naostrenie,
 2 - prehľad výbrusu a; navarené ocel'ové ostrie,
 3 - ostrie; martenzit so stopami feritu (zv. 200x),
 4- štruktúra ocele so zvarom; perlit s feritickou sieťkou (zv. 200x)



Pečky, CZ sekera z doby rímskej:
 1 - sekera so zakresleným výbrusom,
 2, 3 - prehľad výbrusu (paketové železo, nauhličené ostrie)



Vľavo kováčska dielňa, vpravo obchod s výrobkami (Vatikán)



Ján HARMATTA (*25. december 1862, *Dobšiná*
– †3. január 1930 *Budapešť*)

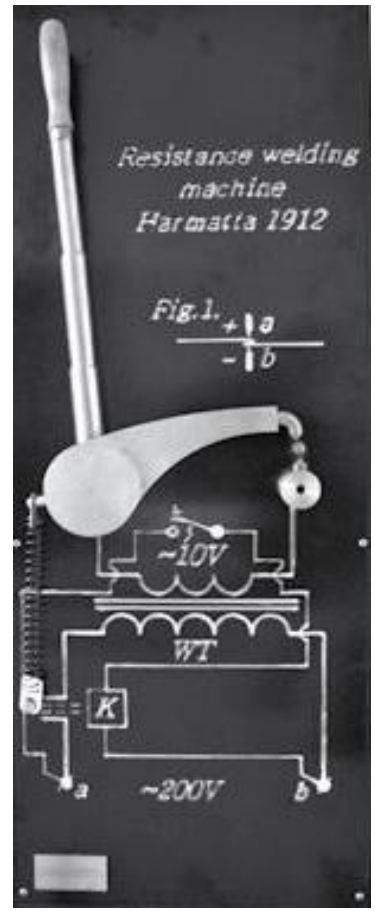
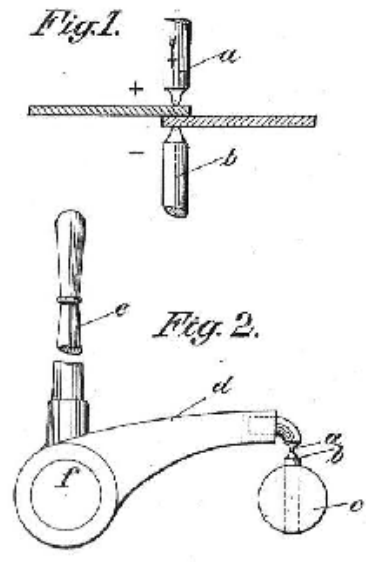
Ján Harmatta - vynálezca, konštruktér a priemyselník zhmotňujúci svojimi technologickými inováciami bohaté železiarske tradície *Spišsko-gemerského rudohoria*, *spišskopodhradský* filantrop s početnými verejnoprospešnými aktivitami. Bol autorom 55 doposiaľ známych patentov z oblasti zvárania a spracovania kovov rozšírených po celom svete. Svojím patentom na bodové odporové zváranie umožnil prvú výrobu zváraných autokarosérií najmodernejšou technológiou, na ktorej *Henry Ford* postavil základy sériovej produkcie automobilov. Tento princíp sa dodnes využíva vo všetkých automobilkách sveta, vrátane tých našich. Podobne stále aktuálne sú vynálezy nášho technického génia uplatnené vo výrobe kovových barelov, reťazí a pri zváraní plynových potrubí priebežným švovým odporovým spôsobom, či jeho patent na upevňovanie koľajníc na podvaly. Cech zvaračských odborníkov v *Trnave* ho nazval *slovenským Edisonom*. Svojou invenciou je porovnateľný s takými osobnosťami svetového významu, akými sú, pôvodcom zo *Slovenska*, *Jozef Murgáš*, *Ján A. Segner*, *Aurel Stodola*. Napriek tomu je život Ing. *Jána Harmattu* ešte veľmi málo preskúmaný a jeho dielo takmer zabudnuté.

Ján Harmatta sa narodil na Vianoce 25. 12. 1862 v *Dobšinej*. Pochádzal zo starej remeselníckej rodiny. Vie sa, že *Harmattovci* pochádzali z vetvy *nemeckých* hostí, ktorí prišli v 14. storočí do *Dobšinej*. V rokoch 1881-1882 študoval na *Banskej univerzite* v *štajerskom Leobene*. V roku 1888 pôsobil v akciovej spoločnosti *Krompašské železiarske ťažiarstvo na Starej Maši v Krompachoch*, ktoré bolo v tých časoch najväčším producentom železa v *Uhorsku*. Onedlho zbieral skúsenosti v železiarňach vo *Weissenfelse* (doposiaľ prosperujúce ako *KITO Weissenfels*) v južnom *Tirolsku* (v tej dobe patrilo *Rakúsku*), odkiaľ podával od roku 1896 (ako 34-ročný) svoje prvé patenty na výrobu reťazí z drôtu a na výrobu kovových sudov. Len čo získal primeranú prax, a podanými patentmi, vynálezmi, či zváraním nadobudol finančné prostriedky, založil svoju v roku 1901 v *Spišskom Podhradí* svoju vlastnú továreň s názvom *Akciová spoločnosť JÁN HARMATTA, Tovarňa pre elektrické svarovania*. Dôvod založenia firmy v tejto lokalite nie je náležite osvetlený, možno to bolo preto, že tam pôsobil jeho priateľ – secesný sochár *Andrej Lux*. Už v roku 1912 v nej zamestnával 200 pracovníkov pri výrobe klinec, reťazí, kovových barelov a nádrží, drôtených matracov, rúr, ale aj zvaracích strojov potrebných pre ich výrobu, a to za použitia najmodernejšej technológie svojej doby. V *Spišskom Podhradí* tak vzniklo najsilnejšie centrum súdobého elektrického zvárania v *Európe*, ktoré sa postupne vyvinulo na modernú továreň. Svetoznáma sa stala najmä potom, keď jej majiteľ zaviedol výrobu elektrických zvaracích strojov vlastnej konštrukcie, ktoré mali takú vysokú úroveň, že ich vyvážali do *Rakúska*, *Ruska* a *Nemecka*. Do *Spišského Podhradia* chodili odborníci z *Ameriky*, *Anglicka*, *Japonska*, kde sa oboznamovali s touto technológiou. Ťažisko života i práce *Jána Harmattu* bolo v *Spišskom Podhradí*, ale presah jeho prínosov pre priemyselnú revolúciu v *Rakúsko-Uhorsku* je priam celosvetový. Inicioval zdokonalenie výroby reťazí zváraním na blízkom *Spiši*, v *Gelnici*, ktorá bola ich hlavným výrobcom. V roku 1914 založil továreň v *Spišských Vlachoch*. Pôsobil však pri zakladaní závodov, inovovaní a modernizácii výroby v omnoho širokom priestore: v *Budapešti*, vo *Vítkoviciach*, dnes sa už nevie kde inde. V rokoch 1922 - 1923 sa zaslúžil o verejné elektrické osvetlenie na jednosmerný prúd z dynamo poháňaného parným strojom v jeho továrni v *Spišskom Podhradí*.

Harmattova továreň stála neďaleko jeho bydliska - secesnej vily (starší miestni obyvatelia ju nazývali *Harmatovec*), kde žil so svojou manželkou *Rozáliou* (1873 - 1926), pochádzajúcou z rodiny modrotlačiaru

Alfréda Steller. Po smrti manželky jeho úspešná firma pôsobila ešte do roku 1928. O ďalšie dva roky, dňa 3. januára 1930, v Budapešti umrel i sám vynálezca.

J. HARMATTA.
ELECTRO WELDING.
APPLICATION FILED DEC. 3, 1911. Patented Dec 3, 1913.
1,046,066.



Príloha k patentu na bodové zváranie z roku 1912

Stanovenie únavovej pevnosti zvarových spojov ocele S960MC zváraných laserovým lúčom

Martin Frátrik, Ing.*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: martin.fratrik@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2771

Miloš Mičian, doc. Ing., PhD.

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: milos.mician@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2768

Determination of fatigue strength of S960MC laser welded joints

Abstract: The work deals with determining the fatigue strength of butt-welded joints of S960MC steel. The fatigue strength of two versions of laser beam welded joints as well as the base material was assessed. To reduce the notch effect of the weld beam, the assessed weld joints were produced in a variety of methods utilizing filler material and additional dressing of the weld beam. The measurements determined variations in each type. The value of the fatigue strength decreased by 50 % to 67 % with respect to the base material, indicating that the notch effect of the weld joint had an impact on the value of the fatigue limit. Despite having relatively low fatigue strengths, both values meet normative standards and can be used in practical circumstances.

Keywords: S960MC; fatigue strength; laser beam welding.

ÚVOD

Nezanedbateľný podiel zváraných konštrukcií z HSLA ocelí je počas svojej životnosti vystavený dynamickému namáhaniu. Poruchy spôsobené únavou vo zváraných konštrukciách sú aj preto naďalej témou, ktorá si zasluhuje pozornosť odbornej verejnosti vzhľadom k ich príspevku k priemyselným haváriám, k stratám na životoch a značným finančným nákladom spôsobených opravami poškodených konštrukcií. Únava je stále hlavnou príčinou porúch zváraných konštrukcií v ocelových mostoch, lodných konštrukciách a v dopravných prostriedkoch. Z tohto dôvodu je nevyhnutné navrhovať zvárané konštrukcie s cieľom zvýšiť únavovú životnosť, pričom metódy navrhovania musia byť spojené s požiadavkami na kvalitu, ktoré bude možné sledovať a riadiť počas výrobného procesu.

Ako je všeobecne známe, s cieľom znížiť hmotnosť zváraných konštrukcií je výber materiálu optimalizovaný výberom materiálu so zvýšenou medzou klzu, aby sa umožnilo vyššie namáhanie. Z praktických skúseností však vyplýva, že voľba vysokopevnej ocele nemá vo väčšej miere vplyv na celkovú únavovú životnosť zváraných konštrukcií. Aj z tohto dôvodu, súčasne smernice pre návrh cyklicky namáhaných zváraných konštrukcií, ako sú [1] a [2], nezohľadňujú vplyv medze klzu základného materiálu na medzu

únavy zvarového spoja. Konzervatívnym spôsobom sa predpokladá, že aj dobre vyrobené zvarové húsenice majú počiatkové trhliny.

Na základe poznatkov z teórie lomovej mechaniky je taktiež možné predpokladať, že všetky konštrukčné ocele budú vykazovať podobné správanie pri šírení trhlín. V prípade zvarových spojov je možné fázu iniciácie trhlín považovať za zanedbateľnú, čo vedie k rovnakému únavovému správaniu zvarových spojov nezávisle od triedy ocele základného materiálu. Protikladom k týmto tvrdeniam sú viaceré publikácie, ktoré potvrdili, že použitie vysokopevných materiálov môže viesť k zvýšeniu únavovej pevnosti zvarových spojov [3,4]. Takéto navýšenie je možné v praxi dosiahnuť iba predĺžením fázy iniciácie trhliny. Prakticky je to možné zabezpečiť výrobou vysokokvalitných zvarových spojov, ktoré zaisťujú hladký prechod medzi zvarom a základným materiálom a vylúčenie akýchkoľvek vážnych koncentrátorov napätia, ako sú zápaly, prevýšenia, póry alebo chyby natevenia. Spomenuté opatrenia sú obzvlášť dôležité pre zvarové spoje vyhotovené bez použitia prídavného materiálu (napr. laserové zváranie, zváranie elektrónovým lúčom), ktoré sú náchylnejšie na prítomnosť zápalov, pórov, prípadne neprievarov. Skúmaním zvyšovania únavovej životnosti laserových zvarových spojov HSLA ocelí sa zaoberali napríklad Fuštar et al.

[5] alebo Karakas et al. [6]. Tieto štúdie boli zamerané na zvýšenie únavovej životnosti predovšetkým prostredníctvom metódy HFMI (High Frequency Mechanical Impact). Okrem spomenutých metód existujú aj ďalšie perspektívne metódy na zvýšenie únavovej životnosti, ako napríklad dodatočné pretavenie povrchu zvarovej húsenice (tzv. dressing) laserovým lúčom, prípadne vyhotovenie zvarových spojov s použitím prídavného materiálu. Vzhľadom k nedostatočnému pokrytiu problematiky únavových vlastností laserom zváraných zvarových spojov sa daná práca bude zaoberať stanovením únavovej pevnosti daných zvarových spojov. Cieľom práce bude porovnanie únavovej pevnosti dvoch variant laserom zváraných zvarových spojov. Prvý posudzovaný variant bude vyhotovený zváraním bez použitia prídavného materiálu s dodatočným pretavením (tzv. dressingom). Druhý variant bude zváraný s použitím prídavného materiálu. Spôsob vyhotovenia oboch variantov je zvolený s cieľom minimalizovania možných koncentrátorov napätia vo zvarových spojoch. Výber zvolených variant spočíva v predpoklade stanovenia medze únavy na vzorkách s minimalizovaným vrubovým účinkom. Na základe toho je možné získať medzu únavy považovať za hornú medzu únavy pre daný typ zvarových spojov. Pri praktickej aplikácii je však nutné počítať s prítomnosťou chýb zvárania tvoriacich vrubový účinok. Preto je pri dielensky vyhotovených tupých zvarových spojoch možné predpokladať s nižšou hodnotou medze únavy ako je experimentálne stanovená medza únavy. Pre účely porovnávania bola únavová skúška vyhotovená aj na základnom materiáli.

1 MATERIÁLY A METÓDY

1.1 Základný materiál

Základným materiálom pre oba zvarové spoje bola nízkolegovaná vysokopevná konštrukčná oceľ S960MC vo forme plechu hrúbky 3 mm. Oceľ je v praxi používaná vo zváraných konštrukciách v automobilovom priemysle, v lodnom priemysle, pri výrobe žeriavov, ťažiarenských zariadení a pod. V tab. 1 je uvedené chemické zloženie ocele podľa inšpekčného certifikátu a v tab. 2 sú uvedené minimálne mechanické vlastnosti ocele deklarované výrobcom (SSAB AB, Švédsko).

Tab. 1. Chemické zloženie ocele S960MC (hm.%)

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V
0,085	0,18	1,06	0,01	0,003	0,036	0,002	0,007
Ti	Cu	Cr	Ni	Mo	N	B	
0,026	0,01	1,08	0,07	0,109	0,005	0,0015	

Tab. 1 Mechanické vlastnosti ocele S960MC.

$R_{p0,2}$	R_m	A_{min}	CET/CEV	KV -40°C
[MPa]	[MPa]	[%]		[J]
min. 960	980-1250	7	0,28/0,51	min. 27

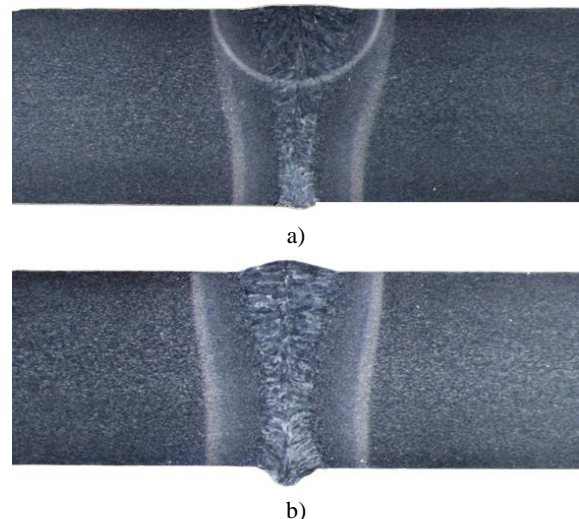
1.2 Experimentálne zvarové spoje

Oba zvarové spoje boli zvárané laserovým lúčom ako tupé I-zvarové spoje s nulovou reznou medzerou. Rozmery zváraných plechov boli 200 mm × 150 mm × 3 mm. Zvarové hrany boli pred zváraním dôkladne očistené a odmastené. Zvarový spoj zváraný s dodatočným pretavením (vz. 1) bol zváraný na dva prechody s časovým rozstupom cca 30 s. Pre zvarový spoj s použitím prídavného materiálu (vz.2) bol použitý prídavný materiál *Union X96* s priemerom $\phi 1$ mm klasifikovaný ako *G89 5 M21 Mn4Ni2.5CrMo* podľa *STN EN ISO 16834-A*. Rýchlosť podávania drôtu v danom variante bola $0,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Pre oba varianty bol ako ochranný plyn použitý argón 4.6 (podľa *STN EN ISO 14175*). V tab. 3 sú uvedené parametre zvárania použité pri vyhotovení experimentálnych zvarových spojov.

Tab. 3. Parametre zvárania laserovým lúčom

Zvar	Výkon lasera [W]	Rýchlosť zvárania [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	Fokus [mm]	Prietok plynu [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	Tepelný príkon [$\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$]
vz.1	2000	20	-1,0	30	1,00
vz.1*	2000	20	+10,0	30	1,00
vz.2	2000	18	-1,0	30	1,11

* - parametre dodatočného pretavenia (dressingu).



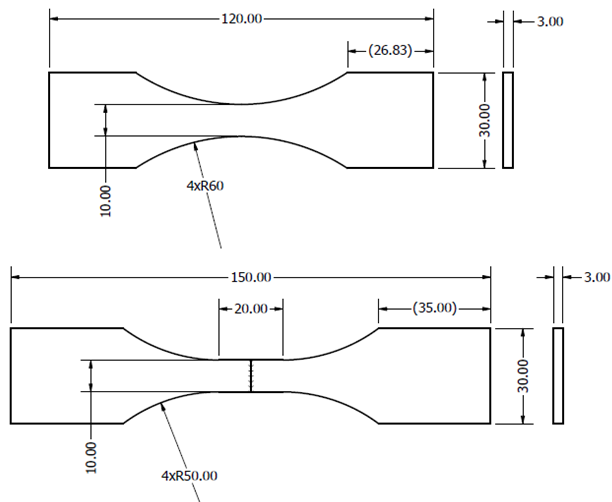
Obr. 1. Pričný rez experimentálnymi zvarovými spojmi: a) vz. 1; b) vz. 2

Na obr. 1 je možné pozorovať makroskopickú snímku vyhotovenú v priečnom reze zvarovými spojmi. Na základe uvedených snímok je možné posudzovať zvarové spoje považovať za vyhovujúce vzhľadom k

požiadavkám stanovených normou *STN EN ISO 13919-1* (stupeň kvality *B*).

1.3 Únavové skúšky zvarových spojov

Skúška bola vykonaná na plochých vzorkách (obr. 2). Vzorky boli delené vodným lúčom, pričom rezné hrany boli upravené brúsením a leštením, tak aby sa vylúčil vplyv nežiadúcich vrubov pochádzajúcich z delenia. Zvarové spoje a povrch vzoriek neboli žiadnym spôsobom mechanicky upravované s cieľom zachovať vplyv povrchu materiálu a zvarového spoja na únavovú pevnosť.



Obr. 2. Rozmery vzoriek použitých na únavové skúšky základného materiálu (hore) a zvarových spojov (dole)

Vzorky základného materiálu boli cyklicky namáhané na zariadení *INOVA FU-O-160-1600-V* (*Inova GmbH, SRN*). Vzorky boli striedavo symetricky zaťažované spôsobom ťah-tlak ($R = -1$) frekvenciou 30 Hz. Pre základný materiál boli zvolené hladiny zaťaženia 800; 700; 600; 500; 412,5; 400; 387,5; 350; 337,5; 325; 312,5; 300; 275 MPa. Vzorky boli cyklicky namáhané do momentu pretrhnutia, resp. do dosiahnutia počtu cyklov $N = 10^7$.

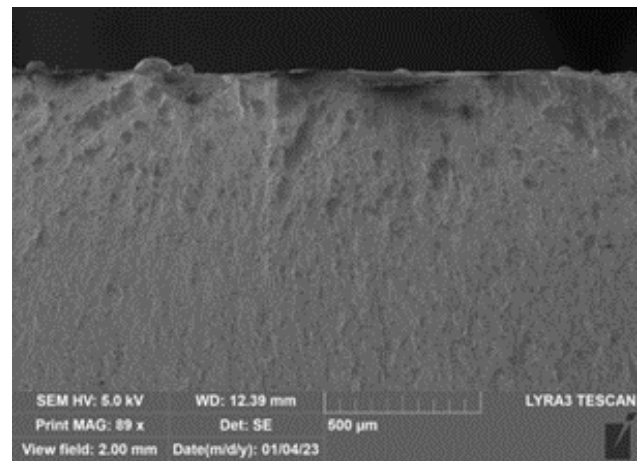
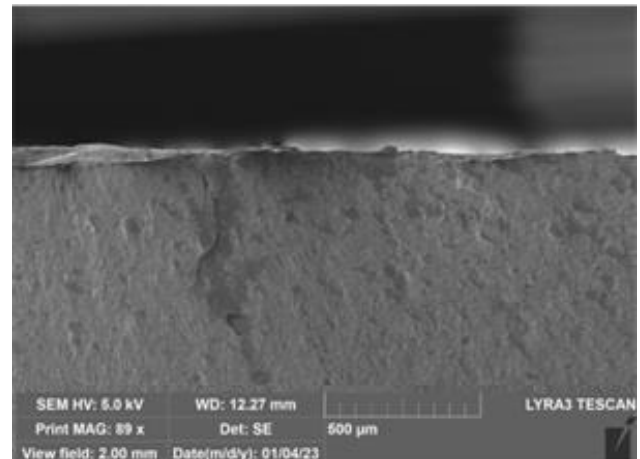
Vzorky zvarových spojov boli cyklicky namáhané na zariadení *MTS Acumen 12* (*MTS Systems Corporation, USA*). Vzorky boli striedavo symetricky zaťažované spôsobom ťah-tlak ($R = -1$) frekvenciou 20 Hz. Zvarové spoje boli zaťažované na hladinách 312,5; 300; 287,5; 275; 250; 225; 200; 187,5; 175; 150; 137,5; 125; 115 MPa do momentu pretrhnutia, resp. do dosiahnutia počtu cyklov $N = 10^7$.

Na základe nameraných dát bola stanovená medza únavy pre základný materiál a zvarové spoje. Medza únavy je definovaná zaťažovacím napätím, pri ktorom počet cyklov do pretrhnutia prevyšuje hodnotu 10^7 . V prípade dosiahnutia takejto hodnoty bol pri danom zaťažení zopakovaný cyklus za účelom potvrdenia hodnoty medze únavy.

Na základe nameraných dát bola stanovená únavová pevnosť pre základný materiál na úrovni

$\sigma_c = 350$ MPa, pre zvarový spoj vz. 1 na úrovni $\sigma_c = 175$ MPa a pre zvarový spoj vz. 2 na úrovni $\sigma_c = 115$ MPa.

Po pretrhnutí boli na vybraných vzorkách urobené *SEM* snímky lomových plôch. Účelom snímok bolo lokalizovanie iniciácie únavovej trhliny. Na obr. 3 sú zobrazené *SEM* snímky lomových plôch vzoriek zvarových spojov, ktoré vo všetkých prípadoch preukázali umiestnenie iniciácie trhliny ku koreňu zvaru.



Obr. 3. Snímky lomových plôch zvarových spojov po únavovej skúške: a) vz. 1 b) vz. 2

2 DISKUSIA K VÝSLEDKOM

Analýza únavových vlastností vybraných zvarových spojov ocele *S960MC* preukázala výrazný pokles únavovej pevnosti voči základnému materiálu. Hodnota medze únavy základného materiálu meraná na plochých vzorkách bez mechanickej úpravy povrchu dosiahla hodnotu 350 MPa. Táto hodnota predstavuje približne 30 % z hodnoty medze pevnosti základného materiálu. Na zvarovom spoji vz. 1 bola nameraná medza únavy na úrovni 175 MPa. V prípade variantu vz. 2 bola stanovená medza únavy na úrovni 115 MPa. Na všetkých vzorkách, u ktorých počas cyklického namáhania došlo k dolomeniu bol počiatok únavovej trhliny lokalizovaný do oblasti koreňa zvarového spoja.

Namerané hodnoty sú vzhľadom na mechanické vlastnosti základného materiálu a mechanické vlastnosti staticky namáhaných zvarových spojov výrazne nižšie. Danú skutočnosť je potrebné zohľadniť pri konštrukčnom návrhu dynamicky zaťažovaných zvarovaných konštrukcií z ocele S960MC. Vzhľadom k nameraným hodnotám medze únavy sa v prípade aplikácie odporúča preferovať variant s dodatočným pretavením lícnej strany zvarového spoja, t. j. vz. 1. Zároveň je možné predpokladať, že medza únavy zvarového spoja bez prídavného materiálu, resp. dodatočného pretavenia by dosiahla výrazne nižších hodnôt ako boli namerané v danom experimente.

Z hľadiska normatívnych požiadaviek je možné namerané hodnoty medze únavy posudzovať podľa dokumentu EN 1993-1-9 Eurocode 3: Konštrukcia oceľových konštrukcií - Časť 1-9: Únava [2]. V danom dokumente sú na základe praktických skúseností a experimentálnych meraní stanovené dolné hranice medze únavy na hodnote $2 \cdot 10^6$ cyklov. Pre základný materiál vo forme valcovaného plechu bez povrchovej úpravy, ktorý zodpovedal experimentálnym podmienkam je spodná hranica stanovená na 140 MPa. Experimentom bola táto hodnota stanovená na 450 MPa. V prípade tupých zvarových spojov zvarovaných jedným prechodom z jednej strany je spodná hodnota medze únavy zodpovedajúca $2 \cdot 10^6$ cyklov stanovená na 36 MPa. Experimentálne boli namerané hodnoty 275 MPa pre variant vz. 1 a 235 MPa pre variant vz. 2. Z tohto hľadiska je preto možné experimentálne zvarované zvarové spoje považovať za spôsobilé a vhodné pre cyklicky namáhané konštrukcie.

ZÁVER

Pri skúmaní únavových vlastností zvarových spojov sa preukázal pokles medze únavy voči základnému materiálu na úrovni 50 % až 67 %. Daný pokles nastal aj napriek úprave povrchu zvarovej húsenice s cieľom zabezpečiť čo najmenšiu koncentráciu napätia v prechode medzi základným materiálom a zvarovou húse-

nicou. Aj napriek relatívne nízkym hodnotám medze únavy je však možné konštatovať, že posudzované zvarové spoje spĺňajú požiadavky stanovené v príslušných technických normách pre výrobu oceľových konštrukcií (Eurokód 3).

Pod'akovanie

Výskum bol podporený grantovými systémami APVV-20-0427; VEGA 1/0044/22; KEGA 008ŽU-4/2022 a GS UNIZA 17326.

LITERATÚRA

- [1] HOBACHER, A. (2009): *The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded joints and components – A comprehensive code recently updated*. In: International Journal of Fatigue, Vol. 31 (2009), No. 1, 50–58.
- [2] STN EN ISO 1993-1-9. (2007): *Eurokód 3. Navrhovanie oceľových konštrukcií. Časť 1-9: Únava*.
- [3] OTTERSBBÖCK, M. J. - LEITNER, M. - STOSCHKA, M. - MAURER, W. (2016): *Effect of weld defects on the fatigue strength of ultra high-strength steels. XVIII International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals (ICMFM XVIII)*. In: Procedia Engineering, Vol. 160 (2016), 214-222.
- [4] ŠLEZAK, T. (2020): *Fatigue Examination of HSLA Steel with Yield Strength of 960 MPa and Its Welded Joints under Strain Mode*. In: Metals, Vol. 10 (2020), 228.
- [5] FUŠTAR, B. - LUKAČEVIĆ, I. - SKEJIC, D. - GASPAROVIC, M. (2022): *Fatigue tests of as-welded and HFMI treated S355 details with longitudinal and transverse attachments*. In: Welding in the World, Vol. 66 (2022), No. 2, 2549-2561.
- [6] KARAKAS, Ö. - LEITNER, M. - TUZUN, N. (2021): *Application of critical distance approach for fatigue assessment of welded and HFMI-treated steel joints*. In: International Journal of Fatigue, Vol. 154 (2021), No. 7-8, 106534.

Porovnanie geometrickej presnosti obrobkov po tvrdom frézovaní a brúsení

Mária Čilliková, doc. Ing., PhD.*

Katedra obrábania a výrobnjej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: maria.cillikova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2784

Anna Mičietová, prof. Ing., PhD.

Katedra obrábania a výrobnjej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: anna.micietova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2781

Miroslav Neslušán, prof. Dr. Ing.

Katedra obrábania a výrobnjej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: miroslav.neslusan@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2785

Comparison of geometrical precision of machined components after hard milling and grinding

Abstract: This paper deals with surface integrity after hard milling of bearing steel 100Cr6. Surface integrity is expressed in terms of shape deviation as well as *Barkhausen* noise emission. Furthermore, components of cutting forces are also measured as a function of tool wear. Non homogeneity of cutting force distribution within the contact between the milling cutter and workpiece is discussed. The results of measurements indicate that the shape as well as structure remarkable non homogeneity should be expected after hard milling due to missing full contact between milling cutter and workpiece. This non homogeneity can be monitored via *Barkhausen* noise technique. On the other hand, the competitive grinding cycles produced more homogenous surface and surface state is a function of infeed speed.

Keywords: milling, grinding, geometrical precision, machined

ÚVOD

Cyklické premagnetovávanie feromagnetických materiálov inicializuje nevratné a nekontinuálne pohyby *Blochových stien* (*BWs*). Táto diskontinuita je spôsobená interferenciou *BWs* s defektmi kryštalografickej mriežky ako sú precipitáty, dislokácie a iné. Tento jav sa nazýva magnetický *Barkhausenov* šum (*MBN*). *MBN* sa vyžíva v priemysle predovšetkým pri monitorizácii komponentov po brúsení. *MBN* je citlivý na zmenu napätového stavu, zmeny štruktúry, distribúcie karbidov, dislokačnej hustoty a podobne. Pri brúsení sa využíva efekt tepelného popustenia povrchu, ktorý vedie v znížení dislokačnej hustoty a zmeny stavu karbidov čo sa následne premieta do nárastu *MBN* [1-4].

Už niekoľko rokov sa operácie tvrdého obrábania (sústruženia a frézovania) využívajú ako náhrada brúsenia. Avšak operácie tvrdého obrábania inicializujú

vznik bielych vrstiev (*white layers* - *WL*), ktoré sa vytvárajú aj pri nižších hodnotách opotrebenia nástroja. Obrobený povrch je veľmi ovplyvnený práve opotrebením nástroja a čiastočne aj reznými podmienkami. S nárastom *VB* rastie aj hrúbka *WL* ako aj tepelne ovplyvnenej vrstvy [5, 6]. Na druhej strane proces brúsenia môže spôsobiť tepelné popustenie a brúsené povrchy niekedy vykazujú tepelne popustené zóny (*TOZ*). Avšak hrúbka *WL* a aj *TOZ* je po tvrdom obrábaní oveľa menšia v porovnaní s brúsením. Aj pomer medzi hrúbkou *WL* a *TOZ* je odlišný [5, 7, 8].

Tvrde obrábanie aj z hľadiska *MBN* už bolo v literatúre prezentované [5, 7-9]. Avšak dôležitý aspekt súvisiaci s nehomogenitou povrchu v súvislosti s meniacim sa kontaktom nástroja a obrobku zatiaľ nie. Tento článok je venovaný práve tejto problematike.

1 PODMIENKY EXPERIMENTOV

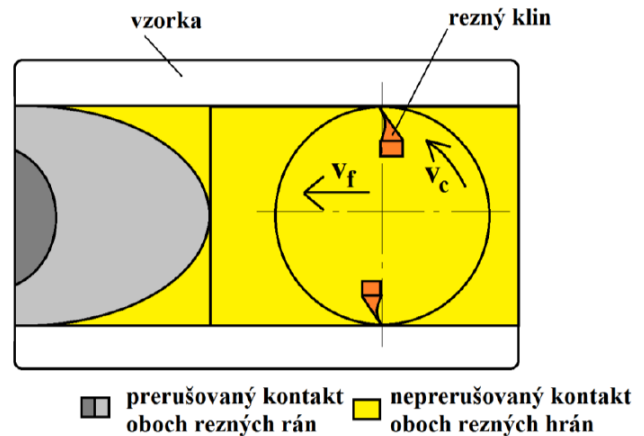
Experimenty boli realizované na ložiskovej oceli 100Cr6. Vzorky rozmeru 100 x 70 x 5 mm boli tepelne spracované na tvrdosť 62 HRC (austenitizačná teplota 830 °C - olej 62 °C, s nasledujúcim popúšťaním počas 2 hodín pri teplote 160 °C). Tvrdé frézovanie bolo analyzované ako funkcia opotrebenia nástroja VB. Rezné podmienky: FA4 AV, za sucha, R300-1240E-PM, R300-050Q22 – 12M 262489 osadená 2 platničkami s vopred pripraveným opotrebením VB (v rozsahu od 0,05 mm do 0,8 mm), $a_p = 0,25$ mm, $v_f = 112$ mm·min⁻¹, $n = 500$ min⁻¹. Na porovnanie boli pripravené aj vzorky procesom brúsenia za nasledovných podmienok: BPH 20, A9860J9V, diamantový orovnávač, $a_p = 0,005$ mm ÷ 0,04 mm (10 prechodov), $v_f = 8$ m·min⁻¹, $v_c = 25$ m·s⁻¹.

MBN merania boli realizované na prístroji RollScan 350 v softvéri ViewScan. MBN pulzy boli merané vo frekvenčnej oblasti od 70 kHz do 200 kHz (magnetizačná frekvencia 125 Hz, magnetizačné napätie 10 V). MBN signál bol meraný v smere reznej rýchlosti a MBN hodnota predstavuje efektívnu hodnotu signálu. MBN meranie bolo realizované v dynamickom móde, čo znamená, že počas merania sa vzorka pohybovala rýchlosťou 5 mm·s⁻¹. Zložky reznej sily boli merané prostredníctvom dynamometra KISTLER. Signál bol vzorkovaný frekvenciou 10 kHz. Priamosť povrchu bola meraná na prístroji MP 60.

2 VÝSLEDKY EXPERIMENTOV

Obrázok 1 a 2 ukazujú typický povrch po frézovaní. Hlavným aspektom je prerušenie plného kontaktu medzi reznou hranou a obrobkom. Ako ukazujú obr. 1 a obr. 2, v istej pozícii rezná platnička vybieha z kontaktu s obrobenou plochou a charakter povrchu je od tejto polohy odlišný od stavu, keď je tento kontakt plný. Táto poloha je indikovaná sivou farbou na obr. 1 a korešponduje s priemerom nástroja - teda 50 mm. V dôsledku limitovanej tuhosti sústavy sa frézovacia hlava nakloní pod istým uhlom voči obrobenému povrchu, čo vedie k viditeľne odlišnému stavu povrchu, ako to ukazuje obr. 2. Takýto charakter povrchu môže byť zaznamenaný pre všetky VB, ako aj pre rôzne tvrdosti vzoriek. Na obr. 3 je úplný záznam pasívnej zložky reznej sily, ktorá má rozhodujúci vplyv na priamosť povrchu po frézovaní. Na tomto obrázku vidieť kumulatívne všetky fázy kontaktu, ako je nábeh nástroja na obrobok, počiatkové štádium prerušovaného kontaktu, plný kontakt medzi nástrojom a obrobkom a aj rôzne štádiá prerušenia kontaktu medzi nástrojom a obrobkom pri výbehu nástroja (až po stav, kedy sa kontakt medzi nástrojom a obrobkom preruší úplne). Obrázok 4 ukazuje len druhú polovicu frézovacieho cyklu a obr. 5 až obr. 8 detaily jednotlivých štádií kontaktu, vyextrahované zo záznamu, tak ako ich ukazuje

obr. 3, resp. obr. 4. V prípade úplného kontaktu F_p zložka osciluje v rozsahu od 310 N do 1000 N. V okamihu prvého prerušenia kontaktu medzi reznou hranou a obrobkom klesá hodnota F_p k nulovej hodnote. V ďalšom priebehu F_p postupne ďalej klesá aj v dôsledku toho, že sa postupne skracuje dráha, počas ktorej je rezná hrana a obrobok v kontakte.

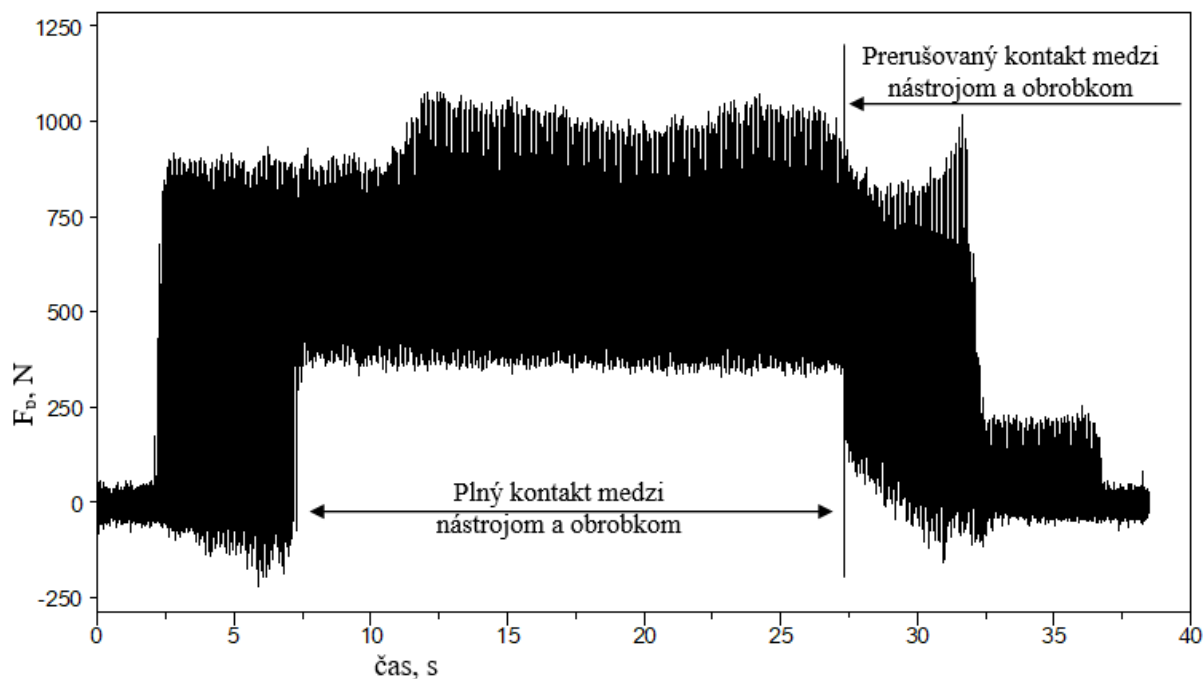


Obr. 1. Prerušenie kontaktu medzi reznou hranou a obrobkom počas frézovania

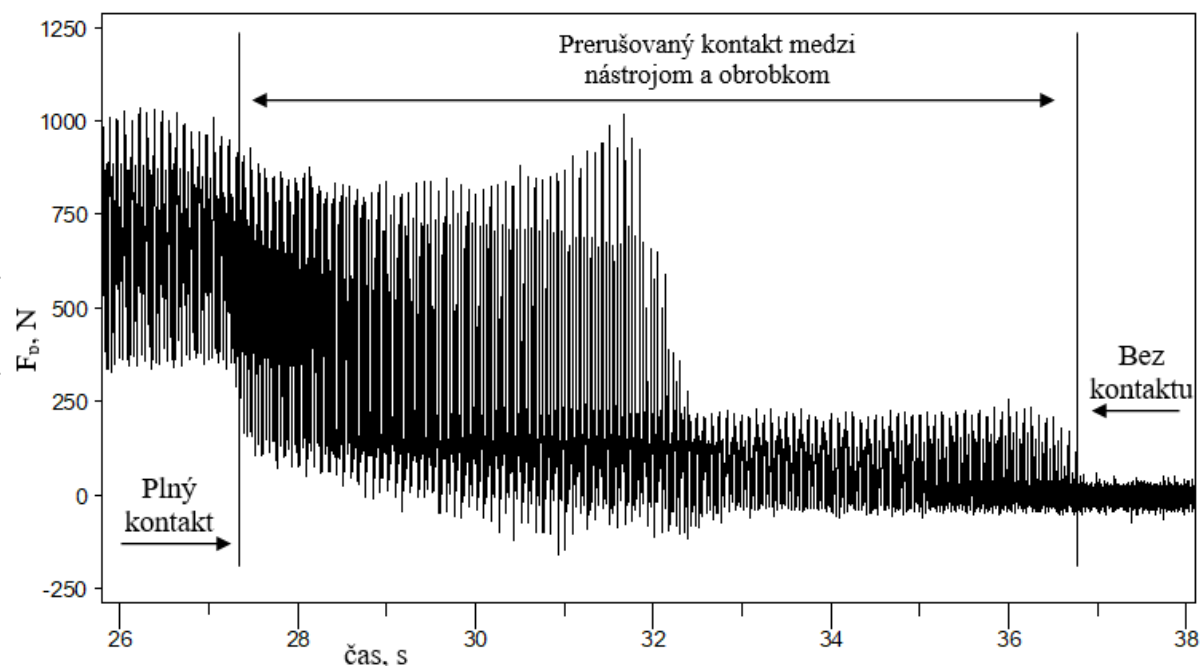


Obr. 2. Fotografia povrchu po tvrdom frézovaní, šírka vzorky 70 mm

Ďalšie merania tvrdo frézovaného povrchu po frézovaní nástrojom s rôznymi stupňom opotrebenia VB poukazujú tak na tvarovú, ako aj štruktúrnú nehomogenitu povrchu. Obrázok 9 ukazuje záznamy profilu povrchu po tvrdom frézovaní, kde je možné jednoznačne rozpoznať jednotlivé fázy frézovania. Pre úplný kontakt je charakteristické, že výška profilu je viac menej obdobná, nasledovaná oblasťou prudkého poklesu výšky profilu v oblasti prerušenia kontaktu. Ako ukazuje obr. 9, je oblasť, v ktorej dochádza k prudkému poklesu výšky profilu v podstate rovnaká, pretože je daná priemerom frézy. Pomerne veľké rozdiely v stave povrchu pri rôznych režimoch (fázach) frézovania sú spôsobené veľkou pasívnou zložkou reznej sily F_p , ktorá je typická pre operácie tvrdého frézovania a ktorá sa následne negatívne premietá do presnosti súčiastok.



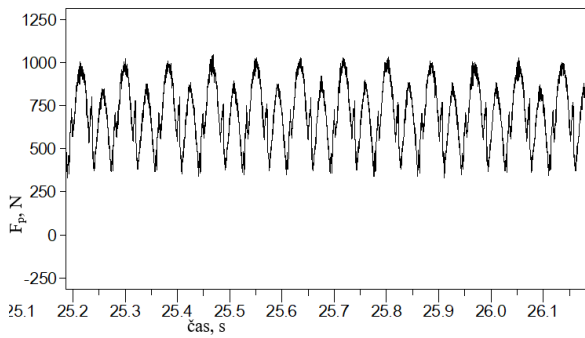
Obr. 3. Úplný záznam pasívnej zložky reznej sily



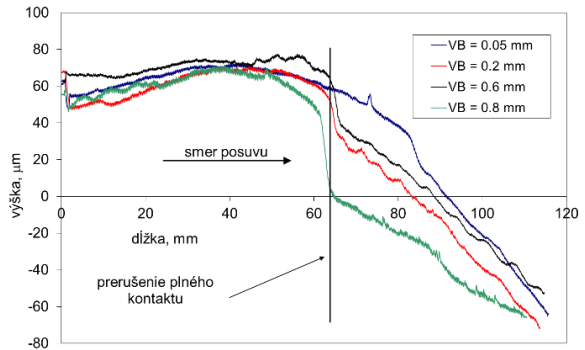
Obr. 4. Časť záznamu pasívnej zložky reznej sily, kde sa plný kontakt medzi nástrojom a obrobkom mení na prerušovaný - rôzne stupne prerušenia kontaktu

Obrázok 9 tiež ukazuje, že do profilu povrchu po tvrdom frézovaní sa premieta aj veľkosť opotrebenia nástroja, keďže predovšetkým veľkosť pasívnej zložky s VB prudko rastie. Veľké rozdiely vo výške profilu v rôznych miestach majú zásadný vplyv na nasledujúcu operáciu brúsenia. Tvrdé frézovanie sa obvykle využíva ako hrubovací operácia pred dokončovacím brúsením. Aj napriek tomu, že nasledovné brúsenie odstráni nedostatky dané hrubovacím frézovaním veľké rozdiely vo výške profilu výrazne zvyšujú prídavky na brúsenie

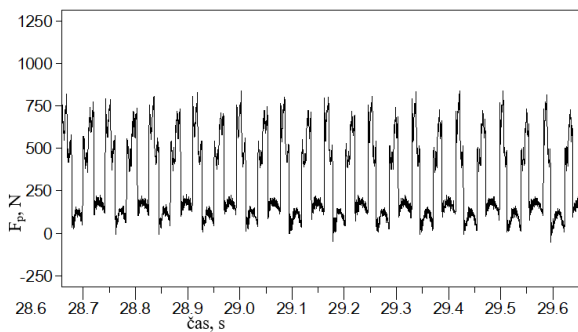
a zbytočne tento proces predlžujú a predražujú. Obrázky 10 až 12 ukazujú, že výška profilu rastie s veľkosťou prísuvu do rezu, čo je dané vyššou pasívnou zložkou reznej sily. Tieto obrázky však predovšetkým ukazujú, že po brúsení výška profilu a s tým súvisiaca odchýlka priamosti je rádovo nižšia v porovnaní s frézovaním. Obrázok 13 ukazuje, že nehomogenita povrchu po tvrdom frézovaní nie je zjavná len čo sa týka tvarovej a rozmerovej presnosti, ale má aj výrazný vplyv na nehomogenitu stavu štruktúry a zvyškových napätí po frézovaní. Tento as-



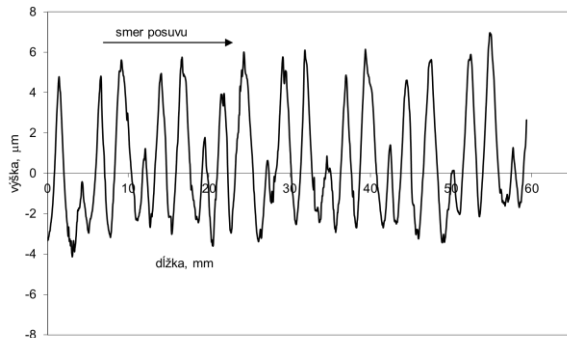
Obr. 5. Záznam pasívnej zložky reznej sily, detail - fáza plného kontaktu medzi nástrojom a obrobkom



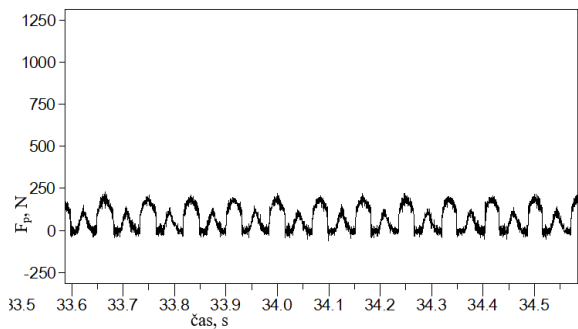
Obr. 9. Záznam profilu povrchu po tvrdom frézovaní - vplyv opotrebenia nástroja VB



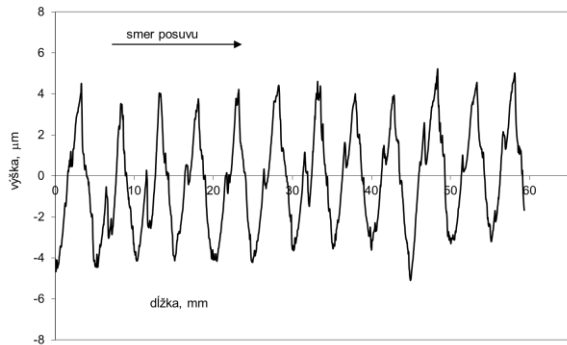
Obr. 6. Záznam pasívnej zložky reznej sily, detail - počiatočná fáza prerušenia kontaktu medzi nástrojom a obrobkom



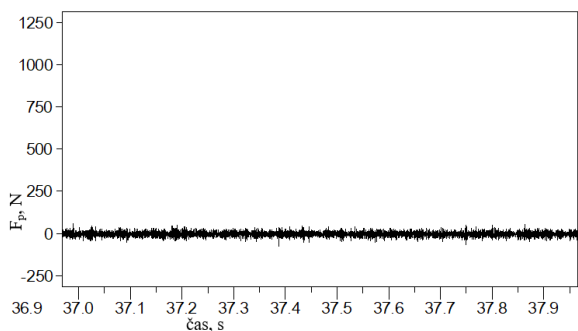
Obr. 10. Záznam profilu povrchu po rovinnom brúsení - $a_p = 0,04$ mm



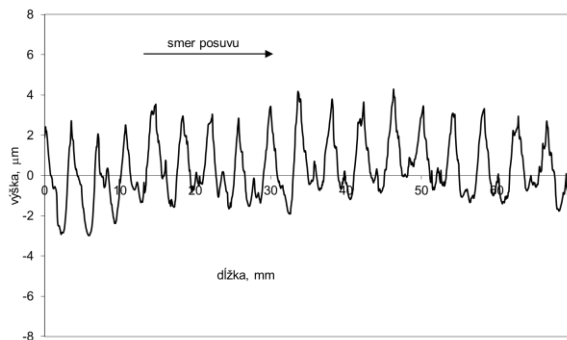
Obr. 7. Záznam pasívnej zložky reznej sily, detail - záverečná fáza prerušenia kontaktu medzi nástrojom a obrobkom



Obr. 11. Záznam profilu povrchu po rovinnom brúsení - $a_p = 0,02$ mm

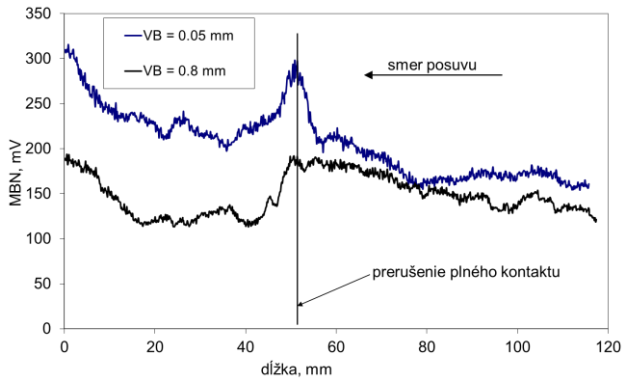


Obr. 9. Záznam profilu povrchu po tvrdom frézovaní - vplyv opotrebenia nástroja VB



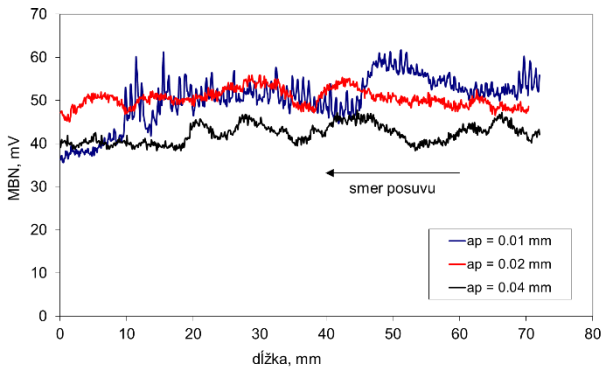
Obr. 12. Záznam profilu povrchu po rovinnom brúsení - $a_p = 0,01$ mm

pekt potvrdzujú *MBN* záznamy tak, ako ich ukazuje obr. 13.



Obr. 13. Dynamický záznam *MBN* po frézovaní - vplyv *VB*

Ako už bolo uvedené, *MBN* je citlivý na zmeny štruktúry a napätový stav. Vzhľadom na to aj obr. 13 poukazuje na to, že charakter povrchu v oblasti úplného kontaktu je z tohto hľadiska odlišný od oblasti, kde je kontakt medzi reznou hranou a obrobkom prerušovaný.



Obr. 14. Dynamický záznam *MBN* po brúsení - vplyv prísuvu do rezu a_p

V podstate obdobné *MBN* hodnoty (berúc do úvahy 1 vzorku) je možné vidieť v oblasti plného kontaktu nástroja a obrobku. Na druhej strane v oblasti prerušovaného kontaktu je možné vidieť zmenu vo vývoji *MBN* hodnôt v závislosti od opotrebenia nástroja. V porovnaní obr. 9 a obr. 13 je možné vidieť, že tak ako klesá výška profilu kontinuálne, tak v tejto oblasti dochádza k nemonotónnej, ale zjavnej zmene hodnôt *MBN*. Rozdiely v charaktere zmien *MBN* hodnôt sú dané odlišným stavom povrchu pre rôzne stupne opotrebenia nástroja. V prípade nízkych *VB* hodnôt sa na povrchu ložiskovej ocele tvrdosti 62 HRC vytvára veľmi tenká *WL*, ktorá nie je kontinuálna a aj tenká tepelne popustená oblasť. V prípade rastúceho *VB* sa na povrchu vytvorí tenká kontinuálna *WL*, ktorej hrúbka s *VB* postupne rastie. To isté je možné konštatovať aj o charaktere a hrúbke tepelne ovplyvnenej oblasti. V súvislosti s tým je odlišný aj charakter zmien *MBN* hodnôt v oblasti prerušovaného kontaktu.

Obrázok 14 ukazuje, že *MBN* a s tým súvisiaci stav povrchu je oveľa homogénnejší po brúsení

v porovnaní s frézovaním. *MBN* hodnoty sú oveľa nižšie pre všetky prísuvy do rezu. Na druhej strane s narastajúcim prísuvom do rezu môže dôjsť výraznejšiemu tepelnému popusteniu brúsenému povrchu alebo dokonca k jeho sekundárnemu zakaleniu, ktorý je sprevádzaný výraznou oxidáciou ako to ukazuje obr. 15. Je známe, že sekundárne zakalenie prispieva k znižovaniu *MBN* hodnôt po brúsení, keďže vedie k vytvoreniu *WL*, ktorá je mechanicky, a preto aj magneticky tvrdšia ako hlbšie vrstvy pod povrchom [3].

Je treba dodať, že charakter *WL* po brúsení a frézovaní je odlišný. V prípade tenkej *WL* po frézovaní sú charakteristické zvýšené *MBN* hodnoty v súvislosti s preferenčným usporiadaním matrice do smeru reznej rýchlosti [9]. Ak však hrúbka *WL* s rastúcim *VB* rastie, tak *MBN* klesá, vzhľadom na to, že v obrobenom povrchu prudko rastie podiel zvyškového austenitu, ktorý veľmi blokuje pohyb *BWs*.



Obr. 15. Fotografia povrchu po brúsení - vplyv prísuvu do rezu, šírka vzorky 70 mm

ZÁVER

Táto štúdia poukazuje na niektoré nevýhody tvrdého frézovania. Výrazná nehomogenita povrchu komplikuje, resp. predlžuje následné dokončovacie brúsenie. Okrem toho sa môže negatívne premietnuť aj do monitorovania povrchov po brúsení prostredníctvom *MBN*. Po brúsení zvýšené *MBN* hodnoty indikujú tepelné popustenie povrchov.

Typické hodnoty prídavkov na dokončovacie brúsenie sú 0,2 mm ÷ 0,3 mm. Avšak v prípade veľkých komponentov sa v praxi stáva, že proces brúsenia v niektorých miestach neodstráni preferenčné usmernenie povrchu po tvrdom obrábaní. Potom je obvykle príliš zložité odlišiť, či zvýšené MBN hodnoty pochádzajú z tepelného popustenia inicializovaného brúsením, alebo pochádza ešte z predchádzajúceho hrubovacieho cyklu tvrdého obrábania. Následkom toho môžu byť niektoré komponenty detegované ako nevyhovujúce (tepelne poškodené) aj napriek tomu, že proces brúsenia bol realizovaný korektne.

Pod'akovanie

Táto štúdia vznikla s finančnou podporou KEGA projektu č. 010ŽU-4/2021 a VEGA projektu č. 1/0052/22.

LITERATÚRA

[1] KARPUCHEWSKI, B. (1998): *Introduction to micro magnetic techniques*. ICBM conference 01, Hanover.

[2] MIČÚCH, M. et al. (2014): *Micro magnetic study of cutting conditions and grinding wheel wear influence on surface integrity*. Manufacturing Technology, Vol. 14, p. 66-71.

[3] MOORTHY, V. et al. (2001): *Evaluation of heat treatment and deformation induced changes in material properties in gear steels using magnetic Barkhausen noise analysis*. ICBM conference 03, Tampere.

[4] NESLUŠAN, M. et al. (2017): *Monitoring of grinding burn via Barkhausen noise emission in case-hardened steel in large-bearing production*. J. Mater. Proc. Technol., Vol. 240, p.104-117.

[5] GUO, Y.B. - SAHNI, J. (2004): *A comparative study of hard turned and cylindrical ground white layers*. Int. J. of Mach. Tool & Manuf., Vol. 44, p. 135-145.

[6] BRANDT, D. (1995): *Randzonenbeeinflussung beim Hartdrehen*. PhD. Dissertation, Universität Hannover.

Návrh elektrického mechanizmu otáčania výložníka stĺpového žeriava pre manipuláciu s kalovými čerpadlami

Miroslav Blatnický, doc. Ing., PhD.*

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: miroslav.blatnicky@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2659

Ján Dižo, doc. Ing., PhD.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2560

Denis Molnár, Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: denis.molnar@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2659

Vadym Ishchuk, Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: vadym.ishchuk@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2563

A design of an electric rotating mechanism of a pillar jib crane for manipulation with sludge pumps

Abstract: The article is a continuation of the issue of the technical solution of the hinge for handling sludge pumps in the *Jaslovské Bohunice* nuclear power plant. The main goal is the design of the electric jib rotating mechanism. It was based on the previous proposal for placing the boom consisting of a dimensional calculation of the new support column and the proposal for placing the boom on this column. The save consisted of two bonds. The upper support of the boom was solved using a rolling bearing fixed in the upper part of the column. The bottom bearing contains an axial plain bearing and a fixed gear as part of the rotating mechanism. In the next step, it is necessary to design the attachment of the selected electric motor with a planetary gearbox and a pinion for this construction. The priority in the design will be mainly to observe the axial distance of the gears, but also to consider the mounting method given by the manufacturer and the torque generated by the engine. A holder in which the motor is attached and then attached to the structure will be designed. Thanks to this, the axial distance will be fulfilled. In addition to supporting the motor, the holder also serves as a radial bearing lock, preventing the bearing from being accidentally pulled out. The result of calculations and designs will be 2D diagrams and 3D visualization of the new construction.

Keywords: pillar crane, manipulation, design, functional calculation, loading capacity

ÚVOD

V prevažnej väčšine pracovných oborov, hlavne technických, je nutné v menšej či väčšej miere premiestňovať materiál rozličného charakteru, značne rozdielnej hmotnosti, prepravnej vzdialenosti, pohybujúcej sa od najmenších, približne centimetrových, až do značne veľkých. Zdvíhanie alebo spúšťanie uvažujeme, pokiaľ je smer dopravy

bremien zvislý.

V raných dobách vývoja ľudskej spoločnosti boli tieto práce vykonávané len ľudskou silou, a to spravidla priamym pôsobením. Postupom času so vzostupom požiadaviek vznikali pomocné prostriedky a zariadenia, hlavne na premiestňovanie ťažších bremien, ktorými si človek prácu značne uľahčoval alebo vôbec umožňoval. Týmto zariadeniam dodávali hnaciu silu spočiatku ľudia alebo ťažné zvieratá a to

ešte v dobe, kedy už bola známa možnosť využitia veternej energie alebo energie vody.



Obr. 1. 3D CAD model pôvodného závesu (vľavo) a po úprave s elektrickým otáčaním (vpravo)

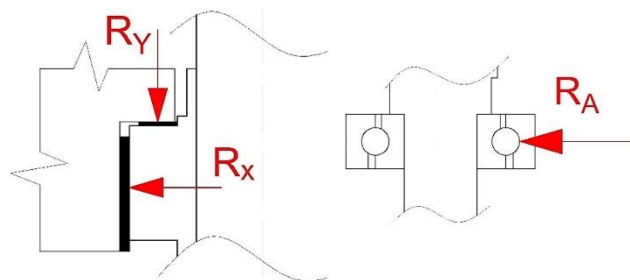
Dnes je situácia pochopiteľne iná. Od ľudí a zvieratami poháňaných zariadení, cez vodou poháňané navijaky, parné pohony až po elektrické pohony sme dnes svedkami obrovského rozmachu a rýchleho technického vývoja týchto zariadení. Jeden z najdôležitejších prvkov, ktoré tento vývoj výrazne posunuli vpred, je elektrický pohon. Boli skonštruované výkonné stroje pre najrôznejšie využitie; nosnosť niekoľko sto ton nie je dnes žiadnou zvláštnosťou. Dá sa povedať, že dodnes nie je vývoj zdvíhacích zariadení ukončený, pokiaľ ide o nové typy a druhy strojov, prispôbované novovznikajúcim úkonom transportnej techniky alebo ak ide o spôsob ich obsluhy a vzájomnú koordináciu práce jednotlivých zdvíhacích, resp. dopravných zariadení, ktoré na seba pracovne nadväzujú.

Vertikálna doprava, čiže aj zdvíhacie zariadenia majú v oblasti dopravnej techniky mimoriadny význam. Prudký rozvoj jednotlivých vedných disciplín, výrobných technológií a ich široké uplatnenie v priemysle sa musí nutne prejavovať v koncepcii technického riešenia žeriavov. Všeobecnou snahou je tento rozvoj rešpektovať a vytvárať podmienky pre racionálnu konštrukciu a hospodárnu výrobu žeriavov, rešpektujúcu nové smery v technológii žeriavov a taktiež nové požiadavky na bezpečnosť, estetiku a hygienu práce. Preto je celá konštrukcia výložníka (obr. 1) navrhovaná v duchu šetrenia financií, technologickej nenáročnosti výroby či následnej údržby a taktiež s možnosťou ďalších zmien. Nová konštrukcia by sa po návrhu elektrického navijacieho mechanizmu a ovládania mohla používať napríklad ako diaľkovo ovládaný, jednoúčelový záves na zavádzanie manipulátorov slúžiacich ku kontrole jednotlivých častí parogenerátorov v prostredí s vysokým stupňom rádioaktívneho zamorenia.

Riešený záves kalového čerpadla je navrhnutý pre nosnosť 250 kg (obr. 1 vpravo). To je z dôvodu, aby nebol v prevádzke poškodený ako súčasný s nosnosťou 120 kg (obr. 1 vľavo).

1 NÁVRH ELEKTROMOTORA

Zo známych zaťažení, ktoré boli predstavené v [1] pôsobiacich v oboch ulohzeniach výložníka a účinností boli vypočítané trecie sily a následne moment, ktorý musí elektromotor prekonať.



Obr. 2. Normálové sily v klznom ulohzení (vľavo) a normálová sila vo valivom ulohzení (vpravo)

Ako prvé boli vypočítané trecie sily v klznom a valivom ulohzení (1) (obr. 2):

$$T = R \cdot f, \quad (1)$$

kde T [N] je trecia sila,

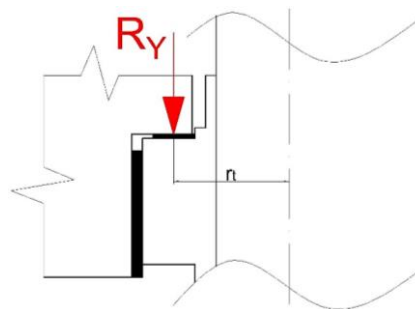
R [N] je normálová sila,

f [-] je súčiniteľ trenia.

Pre klzné ložiská je možné uvažovať súčiniteľ trenia $f_k = 0,04$, pre valivé ložiská $f_v = 0,02$. Dosadením príslušných veličín do vzťahu (1) dostávame:

$$\begin{aligned} T_Y &= R_Y \cdot f_k = 2452,5 \cdot 0,04 = 98,1 \text{ N}, \\ T_X &= R_X \cdot f_k = 3322 \cdot 0,04 = 132,88 \text{ N}, \\ T_A &= R_A \cdot f_v = 3322 \cdot 0,02 = 66,44 \text{ N}. \end{aligned} \quad (2)$$

Ďalším krokom potrebným na výpočet momentu bolo zistiť trecí polomer axiálneho klzného ložiska (obr. 3).



Obr. 3. Zobrazenie trecieho polomeru axiálneho ložiska

Použil sa vzťah (3):

$$r_{ty} = \frac{r_v + r_m}{2}, \quad (3)$$

kde r_{ty} [mm] je hľadaný trecí polomer,

r_v [mm] je veľký polomer ložiska (vonkajší),

r_m [mm] je malý polomer ložiska (vnútorný).

Po dosadení príslušných hodnôt do vzťahu (3) dostávame:

$$r_{ty} = \frac{r_v + r_m}{2} = \frac{65 - 45}{2} = 55 \text{ mm} . \quad (4)$$

Trečí polomer radiálneho ložiska (pre silu R_v) je $r_{rx} = 67,5$ mm a valivého ložiska (pre silu R_A) je $r_{ra} = 18$ mm. Na určenie momentov sa použil vzťah (5):

$$M = T \cdot r_t, \quad (5)$$

kde M [Nm] je hľadaný trečí moment,

T [N] je trecia sila,

r_t [mm] je trečí polomer, na ktorom pôsobí trecia sila.

Dosadením príslušných hodnôt do vzťahu (5) dostávame:

$$M_Y = T_Y \cdot r_{ty} = 98,1 \cdot 0,055 = 5,4 \text{ Nm},$$

$$M_X = T_X \cdot r_{rx} = 132,88 \cdot 0,0675 = 8,97 \text{ Nm}, \quad (6)$$

$$M_A = T_A \cdot r_{ra} = 66,44 \cdot 0,018 = 1,2 \text{ Nm}.$$

Celkový moment M_t [Nm], ktorý treba pri otáčaní prekonať, sa potom rovná (7):

$$M_t = \sum M,$$

$$M_t = M_z + M_x + M_A, \quad (7)$$

$$M_t = 5,4 + 8,97 + 1,2 = 15,57 \text{ Nm}.$$

Vďaka vypočítanému momentu M_t sa mohol ďalej vypočítať výkon P (W), ktorý motor musí mať (8):

$$P = M_t \cdot \omega, \quad (8)$$

kde P [W] je nutný výkon motora otáčacieho ústrojenstva,

ω ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) je uhlová rýchlosť motora.

Na výpočet vzťahu (8) bolo potrebné vedieť veľkosť uhlovej rýchlosti ω . Tá bola vypočítaná pomocou vzťahu (9). Ešte pred tým však boli zvolené maximálne otáčky výložníka $n = 1,5 \text{ min}^{-1}$:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}, \quad (9)$$

kde n (min^{-1}) sú maximálne dovolené otáčky výložníka s kalovým čerpadlom.

Po dosadení príslušných hodnôt do vzťahu (9) a (8) dostávame:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1,5}{60} = 0,157 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (10)$$

$$P = M_t \cdot \omega = 15,57 \cdot 0,157 = 2,5 \text{ W}.$$

Na základe vypočítaných hodnôt sa vybral z katalógu firmy RAVEO [4] jednosmerný motor typu DC s planétovou prevodovkou PM32 LN EC.016.240. Parametre motora s prevodovkou sú uvedené v tab. 1.



Obr. 4. Rôzne pohľady na uchytenie elektromotora do držiaka



Obr. 5. 3D CAD model mechanizmu otáčania výložníka

Tab. 1. Parametre vybraného motora s prevodovkou

DC motor			Planétová prevodovka PM32 LN EC.016.240		
Výkon P_m [W]	Otáčky n_m [min^{-1}]	Výstupný moment motora M_m [Nm]	Prevodový pomer [-]	Výstupné otáčky prevodovky n_p [min^{-1}]	Výstupný moment prevodovky M_p [Nm]
16	3000	35	720,98	4	16,4

Po vytypovaní elektromotora bolo možné zhotoviť jeho 3D vizualizáciu spolu s komponentami potrebnými na jeho uchytenie o konštrukciu výložníka (obr. 4) a tiež model zostavy s predbežným počtom zubov ozubených kolies (obr. 5).

2 NÁVRH OZUBENÉHO PREVODU

Keďže výstupné otáčky z motora s prevodovkou boli $n_p = 4 \text{ min}^{-1}$ a požadované otáčky výložníka boli $n = 1,5 \text{ min}^{-1}$, bola potreba ich dodatočne upraviť pomocou ozubeného súkolesia s určitým prevodovým pomerom. Požadovaný prevodový pomer sa vypočítal pomocou vzťahu (11):

$$i = \frac{n_p}{n}, \quad (11)$$

kde i je potrebný prevodový pomer navrhovaného súkolesia,

n [min^{-1}] sú požadované otáčky výložníka,

n_p [min^{-1}] sú otáčky na výstupe prevodovky.

Po dosadení do vzťahu (12) dostávame:

$$i = \frac{n_p}{n} = \frac{4}{1,5} = 2,666. \quad (12)$$

Pre návrh ozubeného súkolesia bolo potrebné najskôr zistiť veľkosť sily potrebnej na otáčanie výložníka zo vzťahu (13):

$$F_o = \frac{M_t}{r_o}, \quad (13)$$

kde M_t [Nm] je celkový trecí moment, ktorý treba prekonať,

r_o [mm] je rameno na ktorom pôsobí potrebná otáčacia sila,

F_o [N] je sila potrebná na otočenie naloženého výložníka v uvažovanom pôsobisku sily.

Veľkosť ramena z navrhovanej konštrukcie vychádza s hodnotou $r_o = 60 \text{ mm}$. Potom dostávame:

$$F_o = \frac{M_t}{r_o} = \frac{15,57}{0,06} = 259,5 \text{ N}. \quad (14)$$

Modul zubov určíme z podmienky podľa Bacha (15):

$$m = \sqrt{\frac{3 \cdot 74 \cdot F_o}{\Psi_m \cdot \sigma_{oD}}}, \quad (15)$$

kde m [mm] je potrebný modul použitých ozubených kolies,

Ψ_m je koeficient šírky zuba,

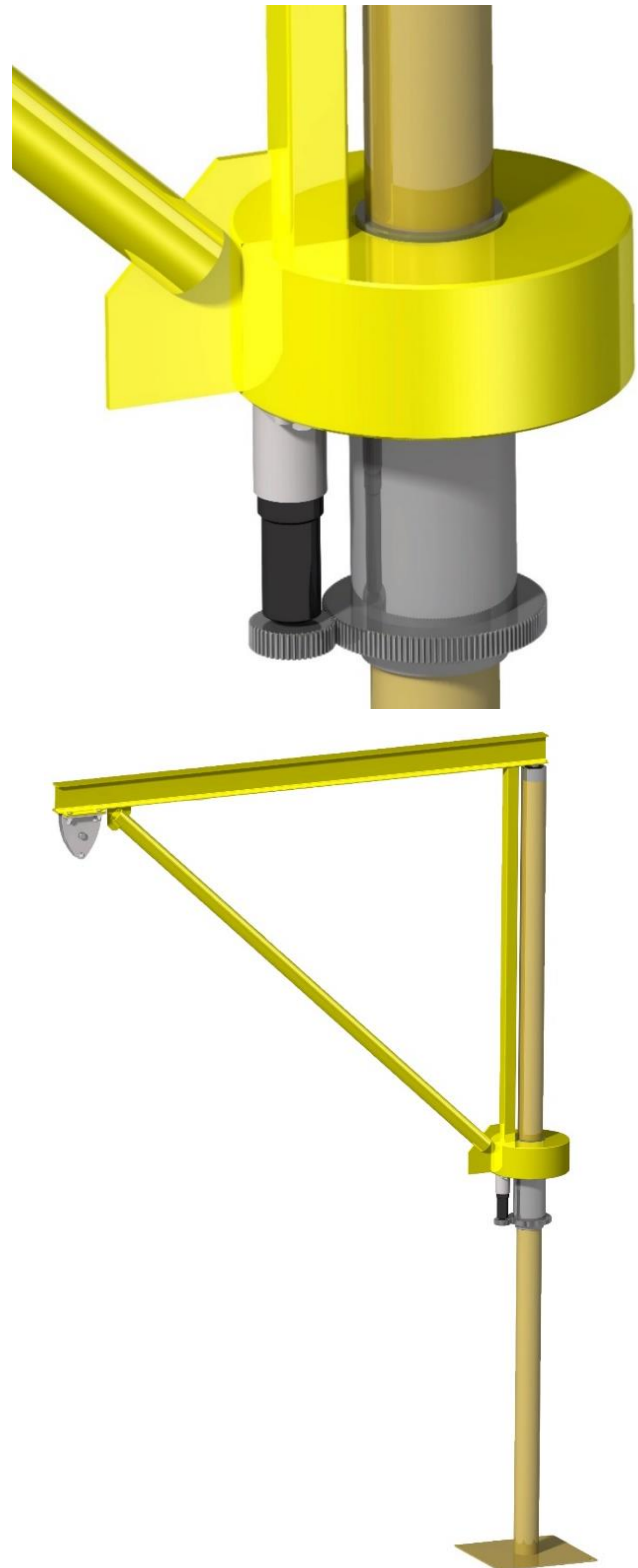
F_o [N] je sila potrebná na otočenie naloženého výložníka v uvažovanom pôsobisku sily,

σ_{oD} [MPa] je dovolené ohybové napätie materiálu ozubených kolies.

Hodnota koeficienta šírky zuba $\Psi_m = 10$ bola volená z intervalu $\Psi_m = \langle 10 \div 30 \rangle$. Dovoľené ohybové

napätie bolo volené podľa materiálu ozubených kolies, t. j. oceľ C45 (STN 12 500), $\sigma_{oD} = 110 \text{ MPa}$. Dosadením príslušných hodnôt do vzťahu (15) vyšiel modul:

$$m = \sqrt{\frac{3 \cdot 74 \cdot F_o}{\Psi_m \cdot \sigma_{oD}}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 74 \cdot 259,5}{10 \cdot 110}} = 0,93 \text{ mm}. \quad (16)$$



Obr. 6. Detail klzného uloženia spolu s mechanizmom otáčania výložníka (hore) a celkový pohľad na navrhnutú konštrukciu (dole)

Zvolený bol modul $m = 1$ mm. Z technologického hľadiska prípevnosti ozubeného kolesa o nosnú časť (lisovanie, zváranie) bolo vybrané koleso z katalógu firmy FISATECH [5] s počtom zubov $z_1 = 120$. Pastorok z hľadiska dodržania požadovaného prevodového pomeru $i = 2,666$ vyšiel s počtom zubov $z_2 = 45$. Posledným výpočtom dôležitým pre umiestnenie elektromotora s pastorkom bola osová vzdialenosť a (17):

$$a = \frac{(z_1 - z_2) \cdot m}{2}, \quad (17)$$

kde a (mm) je navrhovaná osová vzdialenosť ozubených kolies,

z_1, z_2 sú počty zubov jednotlivých kolies.

Dosadením príslušných hodnôt do vzťahu (17) dostávame:

$$a = \frac{(z_1 - z_2) \cdot m}{2} = \frac{(120 - 45) \cdot 1}{2} = 82,5 \text{ mm}. \quad (18)$$

Po výpočtoch bolo možné uskutočniť 3D vizualizácie konštrukčného návrhu (obr. 6).

ZÁVER

Článok je pokračovaním výskumu a návrhu optimálneho závesného a manipulačného prostriedku použitého v jadrovej elektrárni *Jaslovské Bohunice*. Tento prostriedok slúžil a bude slúžiť pre manipuláciu s kalovými čerpadlami. Doteraz bol vykonaný opis pôvodného riešenia a boli definované problémy vzniknuté v praxi. Bol uskutočnený výpočet sily na kľuke navijacieho zariadenia potrebnej na zdvih bremena. Pretože je požiadavka daný záves navrhnuť s elektrickým otáčaním, bolo v tomto článku potrebné v prvom rade navrhnuť uloženie výložníka. To je jednak aj z dôvodu nevyhovujúceho stavu pôvodnej konštrukcie. Problém s nosnosťou žeriava, ktorý sa objavil v praxi počas riešenia práce, poskytol možnosť zakomponovať riešenie tohto problému do obsahu práce. Riešenie pozostávalo z dimenzionálneho návrhu nového nosného stĺpa, keďže sa logicky uvažilo, že chybou pôvodnej

konštrukcie bolo hlavne nadmerné namáhanie na ohyb práve v miestach vertikálnych častí konštrukcie. Konštrukcia pôvodného výložníka ostala rovnaká. Po nadimenzovaní nového nosného stĺpu sa pokračovalo v návrhu uložení. Horné uloženie výložníka bolo vyriešené prostredníctvom valivého uloženia, ktoré predstavovalo valivé ložisko vložené spolu s poistným krúžkom a tesnením v ložiskovom bloku prichytenom na vrhnej časti stĺpa. Spodné uloženie bolo navrhované s cieľom vytvoriť spoločný blok obsahujúci jednak samotné uloženie výložníka a taktiež mechanizmus otáčania výložníka. Výsledkom návrhu bola nosná neotočná konštrukcia pripevnená z vonkajšej časti o stĺp, schopná prenášať sily od výložníka do stĺpu, ktorá obsahuje axiálne klzné ložisko a pevné ozubené koleso. Druhú časť bloku tvorí otočná časť spojená s výložníkom, nesúca radiálne, klzné ložisko. Návrh ozubeného kolesa bol cieľom daného príspevku. Cieľ možno považovať za splnený.

Pod'akovanie

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

LITERATÚRA

- [1] BLATNICKÝ, M. (2015): *Dopravné a manipulačné zariadenia: riešené príklady*. 1. vyd., Žilina: Žilinská univerzita, 120 s. ISBN 978-80-554-1625-0.
- [2] REMTA, F. - KUPKA, L. - DRAŽAN, F. a kol. (1974): *Jeřáby*, 1. díl. Praha: SNTL, 645 s.
- [3] REMTA, F. - KUPKA, L. - DRAŽAN, F. a kol. (1975): *Jeřáby*, 2. díl, Praha: SNTL, 562 s.
- [4] RAVEO (2023): *Elektromotory*. Online: <https://www.raveo.cz/motory>.
- [5] FISATECH (2023): *Ozubené diely*. Online: <https://www.fisatech.sk/kategorie-produktu/ozubene-kolesa-ozubene-tyce/>.

Rovnanie plechu bodovým ohrevom

Ján Moravec, doc. Ing., PhD.*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1/8215 010 26 Žilina.

E-mail: jan.moravec@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2764, Fax.: + 421 41 525 2541

Straightening the sheet by spot heating

Abstract: The contribution is devoted to the issue of material alignment. The theoretical description and essence of straightening by local heating is presented. Mechanical methods of leveling the material are also covered. In the experimental part, an experiment is described, which is based precisely on the theoretical analysis of the process of straightening by local heating.

Keywords: sheet metal, straightening, material, forming, heating

ÚVOD

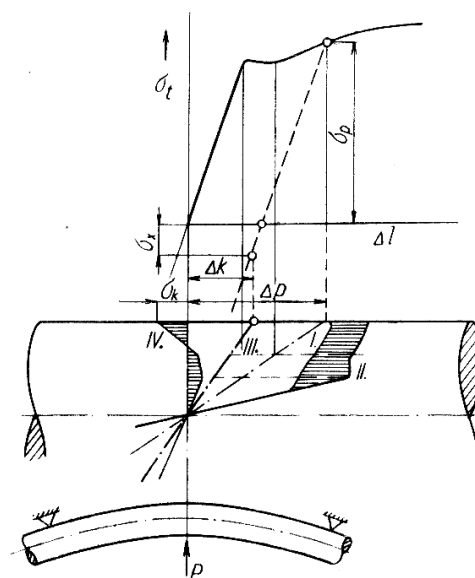
Všeobecne súčiastky a diely vyrobené niektorou z mechanických technológií a ktoré sú zhotovené podľa výrobných dokumentácií, môžu svoju úlohu plniť iba vtedy, ak zabezpečujú všetky potrebné charakteristiky, spravidla prezentované geometrickými danosťami. Svoju úlohu zohrávajú aj vnútorné pnutia v materiáli. Pnutie v materiáli vzniká liatím, tvárnením za tepla i studena, zvarovaním a tepelným spracovaním. Aby sa dali súčiastky napriek vzniknutým deformáciám použiť, musia sa upraviť. Takýmto úpravám sa vzhľadom k prevládajúcim priehybom hovorí rovnanie. Rovnať sa dá mechanicky a tepelne. Náplňou príspevku je rovnanie teplom, tak je potrebné poukázať na to, že pri rovaní teplom dochádza v zásade k použitiu dvoch javov. Predovšetkým je to odstránenie vnútorného pnutia v obmedzenej oblasti dielca, čo má za následok porušenie rovnováhy vnútorných síl a súčiastka alebo konštrukcia sa môžu vyrovnáť. Miestnym ohrevom sa dá dosiahnuť miestna plastická deformácia, čím sa do materiálu vnesú nové vnútorné pnutia, výlučne ťahové, čím sa opäť poruší rovnováha vnútorných síl a diel sa môže vyrovnáť.

1 ROVNANIE

1.1 Rovnanie mechanické

Ak je pri rovaní hriadeľ podľa obr. 1 prehnutý v smere šípky, je materiál v hornej časti namáhaný ťahom, v dolnej časti tlakom. Veľkosť natiahnutia (stlačenia) je v jednotlivých miestach úmerná ich vzdialenosti od osi hriadeľa. V osi namáhanie nevzniká. Pri väčšom priehybe dosiahne predĺženie horného krajného vlákna hodnotu Δp . Z ťahového

diagramu rovaného materiálu sa dá pre každé predĺženie odčítať napätie vzniknuté počas rovania.



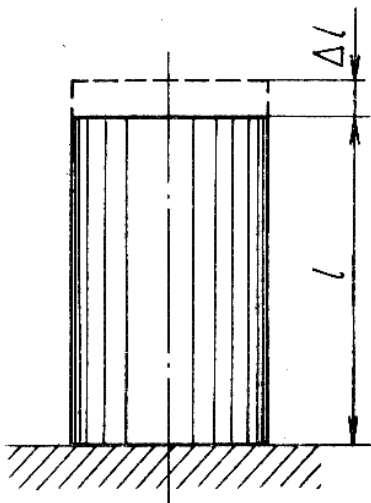
Obr. 1. Priebeh napätí v priereze prehnutého hriadeľa: I - priebeh deformácie, Δl po zaťažení tlakom P ; II - priebeh napätí odvodený z ťahového diagramu; III - deformácia po odľahčení hriadeľa; IV - priebeh napätí v hriadeľi po odľahčení hriadeľa

Predĺženie (skrátene) prebieha od neutrálnej osi podľa priamky I, napätie podľa krivky II odvodené z ťahového diagramu. Ak sa hriadeľ odľahčí, nevráti sa do pôvodného stavu, pretože okrajové časti boli pri prenutí deformované plasticky (na strane ťahových napätí predĺžené a na strane tlakových napätí skrátene). Trvalá deformácia krajných vlákien je teda príčinou prenutia príp. vyrovnania celého hriadeľa. Pôsobením jadra dôjde však po odľahčení ku zmenšeniu prihybu vyvolaného silou P . Konečný stav predĺženia jednotlivých vlákien je znázornený krivkou III. Jadro a jeho blízke okolie, aj keď nebolo pri rovaní plasticky pretvorené, nemôže

sa vrátiť do svojej pôvodnej polohy. Preto vznikajú v tejto oblasti ťahové (v dolnej časti tlakové) napätia, ktoré prechádzajú pri povrchu do tlakových napätí σ_K (ťahové v dolnej časti). Priebeh pnutí po skončení rovnania je naznačený krivkou IV. Vzhľadom k neutrálnej osi sú tieto pnutia (ich krútiace momenty) v rovnováhe.

1.2 Teoretické základy procesu rovnania nekalených súčiastok ohrevom

Rovnanie ohrevom prebieha oproti mechanickému rovnaniu odlišne. Napätia vyvolávajúce plastické deformácie a spôsobujúce narovnanie sa vytvárajú prudkým ohrevom, ktorý väčšinou zasahuje iba povrchové časti prierezu.



Obr. 2. Voľný valec z ocele (predĺženie pri ohreve Δl)

Všetky telesá sa pri ohreve rozťahujú a pri ochladzovaní sa sťahujú. Ocelový valec (obr. 2) s dĺžkou l a teplotou T_1 položený na pevnom základe rovnomerne na teplotu nižšiu ako $500\text{ }^\circ\text{C}$, predĺži sa o Δl :

$$\Delta l = l \cdot (T_2 - T_1) \cdot \alpha, \quad (1)$$

kde T_2 je teplota ohrevu,

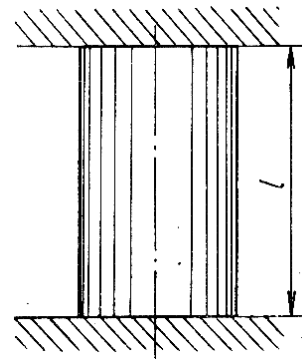
α - koeficient tepelnej rozťažnosti.

V skutočnosti sa ale s teplotou mení. Pre zjednodušenie predpokladáme, že koeficient je konštantný. Pomerné predĺženie valca je:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \alpha \cdot (T_2 - T_1) = \alpha \cdot \Delta T. \quad (2)$$

Jednoduchým postavením valca nevzniknú v ňom napätia; a preto po ochladení na pôvodnú teplotu bude mať pôvodné rozmery.

Ak sa vloží studený valec medzi dve pevné steny (obr. 3) a opäť sa ohreje na teplotu T_2 nebude mať možnosť sa predĺžiť, preto v ňom budú počas ohrevu vznikáť tlakové pnutia. V prípade ak teplota valca neprekročí teplotu $500\text{ }^\circ\text{C}$ a pnutia budú nižšie ako medza klzu, tieto budú priamo úmerné pomernému predĺženiu ε , ktoré by mal voľne postavený valec.

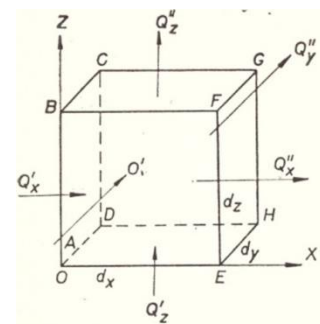


Obr. 3. Zovretý valec z ocele

Pri ohrevu o $200\text{ }^\circ\text{C}$ vznikajú už také vysoké napätia, že presahujú medzu priťažnosti ocele s nižším obsahom uhlíka, čím dochádza v zovretom valci ku plastickej deformácii tlakom. Valec po vychladení na svoju pôvodnú teplotu má menšiu dĺžku a o niečo väčší priemer. Vnútorne napätia sa však v ňom nenachádzajú.

1.3 Základná diferenciálna rovnica tepelnej vodivosti

Rozdelenie tepla v materiáli opisuje základná diferenciálna rovnica tepelnej vodivosti, ktorá sa dá odvodiť zo zákona zachovania energie. Dá sa vybrať zo základného materiálu element tvaru kocky so stranami d_x , d_y , d_z (obr. 4). Fyzikálne parametre skúmaného materiálu sa považujú za konštantné.



Obr. 4. Rozdelenie tepla v elementárnom objeme

Podľa *Fourierovho zákona*, množstvo tepla, ktoré prejde stenou A, B, C, D pri teplote steny T v smere osi x za čas dt :

$$Q'_x = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dy \cdot dz \cdot dt. \quad (3)$$

Stenou E, F, G, H , ktorej teplota je $T + \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dx$ a ktorej argument pre x je $x + dx$, pretečie za tú istú dobu takéto množstvo tepla:

$$Q''_x = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot (x + dx) \cdot dy \cdot dz \cdot dt. \quad (4)$$

Odčítaním rovnice (2) od rovnice (1) a aplikovaním vety o strednej hodnote diferenciálneho počtu bude:

$$dQ_x = Q'_x - Q''_x = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt. \quad (4)$$

Zhodné rovnice vyjdú aj v smeroch osi y:

$$dQ_x = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt. \quad (5)$$

a v smere osi z:

$$dQ_z = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt. \quad (6)$$

Celkový prírastok tepla v elemente dx , dy , dz , za čas dt bude:

$$\begin{aligned} dQ &= dQ_x + dQ_y + dQ_z = \\ &= \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt. \end{aligned} \quad (7)$$

Prírastkom tepla sa zmení teplota elementu za čas dt o $\frac{\partial T}{\partial t} \cdot dt$, a preto sa tepelná energia zvýši o hodnotu:

$$dQ = c \cdot \gamma \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt. \quad (8)$$

Ak sa porovnajú pravé strany rovníc (7) a (8) bude:

$$\begin{aligned} c \cdot \gamma \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt &= \\ &= \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt, \end{aligned} \quad (9)$$

a po úprave napokon:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \cdot \nabla^2 \cdot T. \quad (10)$$

Rovnica (10) je základná rovnica vodivosti tepla. Výraz (11) je koeficient tepelnej vodivosti:

$$\frac{\lambda}{c \cdot \gamma} = a. \quad (11)$$

kde c je špecifické teplo,

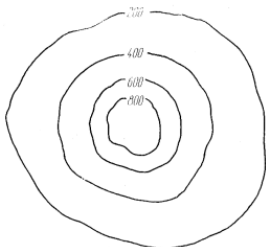
γ je merná hmotnosť materiálu,

λ je tepelná vodivosť.

Uvedený koeficient charakterizuje rýchlosť vyrovnávania teploty pri meniacej sa tepelnej vodivosti.

2 ROVNANIE TECHNOLOGICKÝ POHĽAD BODOVÝ OHREV

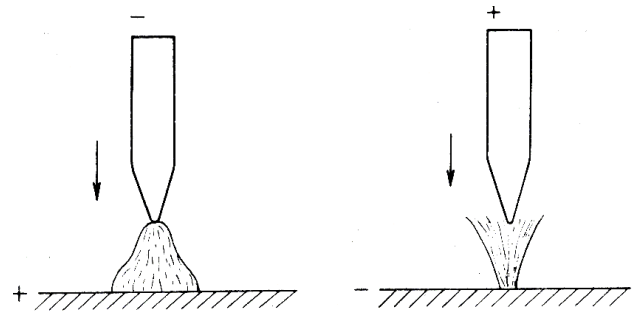
Na obr. 5 je schematicky zobrazený tvar teplotných polí (vrstiev) pri ohreve pomocou bodového ohrevu.



Obr. 5. Rozloženie maximálnych teplôt, ku ktorému dochádza pri bodovom ohreve plechov plameňom

Schéma veľmi vhodne ilustruje spôsob vnášania tepelného zdroja do procesu rovnania lokálnym ohrevom materiálu.

Na obr. 6 je zobrazený správny a nesprávny spôsob zapojenia uhlíkovej elektródy pre ohrev lokálnym spôsobom.



Obr. 6. Vplyv zapojenie uhlíka na tvar oblúka; vľavo- správne horenie oblúka; vpravo- nesprávne horenie oblúka

Technológia rovnania bodovým ohrevom je odlišná od rovnania pásovým ohrevom. Princíp bodového ohrevu spočíva v tom, že pri tomto procese bude ohriaty bod pôsobením odporu studeného okolia (zásobník) podliehať skrátaniu. Ubitie ohriateho bodu spôsobí vplyvom tepelnej dilatácie okrem iného aj čiastočné zvýšenie ohriateho bodu. Z tohto dôvodu sa k zvýšeniu účinnosti rovnania ohriate body mechanicky sklepkávajú (týka sa najmä hrubších plechov). Po vychladnutí má ohriaty bod v celom priereze menší objem ako pred ohrevom, čiže do svojho stredu sťahuje celé okolie. Následkom tohto tieto ťahové pnutia vyvolávajú vyrovnanie deformovaného plechu.

3 EXPERIMENT

Plech hrúbky 2 mm z ocele STN 11 375 s rozmermi 200 x 450 mm sa nahrieval „koksovou“ bodovým ohrevom súvisle po vyznačených miestach. Tento spôsob spočíva v aplikovaní špicatého segmentu koksu, ktorý je upnutý v zvaračských kliešťach. Elektróda sa nakrátko pritlačí k plechu. V miestach dotyku sa vytvoria malé body zahrievané prechodom prúdu s vysokou intenzitou.



Obr. 7. Experimentálne pracovisko



Obr. 8. Postup vykonania rovnania bodovým ohrevom

Vplyvom vedenia tepla sa vytvorí súvisle ohriata ploška. Časový interval v rozmedzí približne jedna až jeden a pol sekundy. Elektróda sa potom oddialí a priloží na ďalšie miesto. Koks nemožno máčať, aby nepraskol. Podľa obr. 7 a obr. 8 vidno experimentálne pracovisko a spôsob práce.

Použitie takéhoto spôsobu rovnania je vhodné z dôvodu, že ohrev je rýchly, technicky nenáročný a aplikované prostriedky sú bežne a ľahko dostupné. Na základe uskutočneného experimentu sa dá konštatovať, že použitý spôsob rovnania sa na piatich vzorkách ukázal ako dobrý a vhodný pre prípadné použitie.

ZÁVER

V príspevku bola pozornosť zameraná na problematiku rovnania deformovaného plechu pomocou bodového ohrevu. Uvedené boli dva pohľady: teoretický a technologický, čiže bol vykonaný experimentálny pokus, ako sa správa plech

pri takomto spôsobe rovnania. Získané výsledky potvrdzujú, že táto oblasť by si zaslúžila hlbšiu pozornosť a záujem, hoci sa vo výrobnej praxi aplikujú tieto spôsoby na vyrovnávanie deformovaných zvarencov. Iste bude len k prospechu, ak táto metóda nájde opäť uplatnenie vo výrobe. V dobe, kedy musíme počítať s obmedzenými zdrojmi a najmä s prihliadnutím na ekologickú stránku procesov je použitie metódy založenej na jednoduchom postupe určite žiaduce.

LITERATÚRA

- [1] ENGLÁRT, A. - MORAVEC, J. - PILC, J. (2002): *Rovnanie tenkých plechov bodovým ohrevom*. Náradie, ISBN 80-227-1683-9.
- [2] ČERMÁK, J. - DVOŘÁKOVÁ, J. (1980): *Vybrané metody tváření*. ČVUT Praha.
- [3] ELFMARK, J. (1986): *Plasticita kovů*. Ostrava HF VŠB.
- [4] HOSFORD, W. F. - CADDEL, R. M. (2011): *Metal Forming, Mechanics and Metallurgy*. Cambridge University Press, ISBN 978-1-107-00452-8.
- [5] HRIVŇÁK, A. - POLÁK, K. (1989): *Teória tvárnenia a nástroje*. Bratislava.
- [6] JOHNSON, W. - MAMALIS, A. G. (1998): *Plasticity and metal forming*. Cambridge.
- [7] KUMAR, S. (2008): *Technology of Metall Forming Processes*, New Delhi, India, p. 358, ISBN 978-81-208-3425-0.
- [8] VINCZE, K. (1983): *Tvárnění místným ohrevom*. Strojírnoství 33, č. 5 s. 309-311.

Hodnotenie vplyvu technologických parametrov na mikroštruktúru vysokotlakových odliatkov

Martin Medňanský, Ing. *

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: martin.mednansky@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2771

Marek Brůna, doc. Ing., PhD.

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: marek.bruna@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2756

Marek Matejka, Ing., PhD.

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: marek.matejka@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2756

Evaluation of the effect of technological parameters on high pressure die casting microstructure

Abstract: A number of technological parameters influence the mechanical properties of a high pressure die casting. The aim of the presented paper was to perform microstructural analysis of *AlSi9Cu3(Fe)* alloy casting fabricated with high-pressure die casting (HPDC) technology. Several castings with varying casting parameter – maximum plunger speed v_{max} were cast. In pre-selected critical spots, the effect of v_{max} was observed on the shape and size of the structural components, where at lower v_{max} the eutectic *Si* shortened in length and thickened. EDS analysis determined found intermetallic phases to be α -*Al(Fe,Mn,Cr)Si* in the shape of a rhombic dodecahedron with sizes as small as 2 μm and *Al₂Cu* being present in both modifications – oblong grains and globular ternary eutectic. There was no significant change in microhardness of α (*Al*) phase found, that would be caused by the varying v_{max} .

Keywords: HPDC, *Al-Si* alloy, microstructure, microhardness

ÚVOD

Súčasný výskum technológie vysokotlakového odlievania sa zameriava na zlepšenie kvality odliatkov optimalizáciou technologických parametrov vstupujúcich do procesu odlievania. Na mechanické vlastnosti priamo vplyva mikroštruktúra odliatku, preto je predmetom skúmania tohto článku.

Medzi najdôležitejšie technologické parametre patrí dotlak - tlak v konečnej fáze vysokotlakového odlievania. Umožňuje jemnozrnnú štruktúru špecifickú pre vysokotlakové odlievania, pretože existuje priama závislosť medzi tlakom v tavenine a kritickou veľkosťou nukleovaného zárodka. V dôsledku jemnejšej štruktúry sú dosahované vyššie mechanické vlastnosti [1-3].

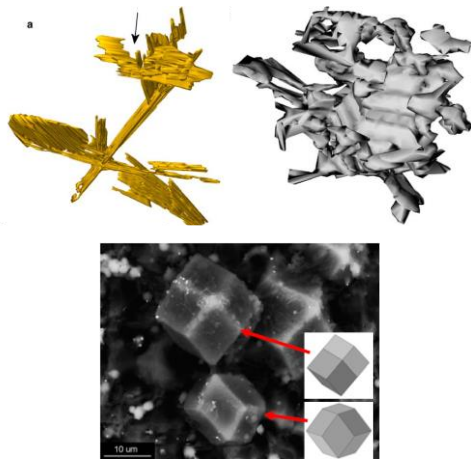
Rýchlosť plnenia dutiny formy ovplyvňuje kvalitu výsledného odliatku. Rýchlosť taveniny v záreze menšia ako optimálna spôsobuje nezabehtnutie formy, nedoliatie odliatku, rozmerové nepresnosti a studené spoje. Naopak vyššia ako optimálna rýchlosť taveniny v záreze spôsobí náraz prúdu taveniny na steny dutiny formy s vysokou kinetickou energiou, čom má za následok odplavenie vznikajúcej kôry do vnútra odliatku, ďalej nalepovanie zliatiny na stenu formy, dôsledkom čoho je mapovitý povrch odliatku [4].

Zavedením predhrevu plniacej komory a kovovej formy pred začatím procesu odlievania je zamedzené znižovanie teploty odlievanej zliatiny a zabraňuje sa jej predčasnej kryštalizácii. Výber teploty predhrevu je dôležitý, nakoľko príliš vysoká teplota povrchu dutiny formy spôsobuje nepriľnutie mazadla na

povrch, čím je spôsobená tvorba pľuzgierov. Pri použití príliš nízkej teploty nie je dosiahnuté odstránenie všetkej zvyškovej vlhkosti, v dutine formy, ktorá býva zdrojom pórovitosti a bublín [5, 6]. Zliatiny *Al-Si*, tzv. silumíny, sú najčastejšie používaným typom zliatin pre vysokotlakové odlievanie. Podstatná časť produkcie hliníkových odliatkov je tvorená silumínmi, a to vďaka svojim výborným zlievarenským a dobrým mechanickým vlastnostiam. Hlavnými štruktúrnymi zložkami silumínov sú jemné dendrity $\alpha(Al)$ fázy a eutektický kremík, ktorý sa v procese vysokotlakového odlievania vylučuje prednostne v zrnitej a lamelárnej morfológii. [2, 3, 7] Okrem týchto je častá prítomnosť fáz bohatých na železo a meď.

Špecifikom vysokotlakového odlievania je, že *Fe*, ktoré je obvykle považované za nečistotu, je v tomto prípade pri jeho obsahu do 1 hm. % prijateľné až výhodné, nakoľko zabraňuje priváraniu odliatkov na kovové formy [3]. Prídavok *Fe* môže znížiť ťažnosť materiálu odliatku, ale zvýšiť medzu klzu a tvrdosť odliatku [8]. *Fe* sa v štruktúre môže vyskytovať vo fázach rôznych tvarov. Z hľadiska vplyvu na mechanické vlastnosti je najmenej výhodná morfológia dlhých a hrubých dosiek fázy $\beta-Al_3FeSi$. Jej prítomnosť znižuje ťažnosť, pevnosť a lomová húževnatosť. Pridaním dostatočného množstva *Mn* vzniká intermetalická fáza $\alpha-Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ v tvare čínskeho písma. [9] Experimentálne bola v zliatine *AlSi9Cu3(Fe)* odliatej vysokotlakovým odlievaním zistená prítomnosť *Fe* fázy vo forme polyedrických zrn v tvare rombického dvanásťstenu (obr. 1) [10].

Meď sa v mikroštruktúrach odliatych technológiou vysokotlakového liatia vyskytuje v dvoch modifikáciách fázy Al_2Cu – samostatne ako drobné oválne zrno s vysokou koncentráciou meďi, alebo ako ternárne eutektikum $Al-Al_2Cu-Si$, ktoré možno pozorovať v tepelne nespracovaných zliatinách ako kompaktné oválne útvary z množstva guľových častíc [6].



Obr. 1. 3D zobrazenie *Fe* intermetalických fáz v tvare dosiek, čínskeho písma a dvanásťstenných častíc [9, 10]

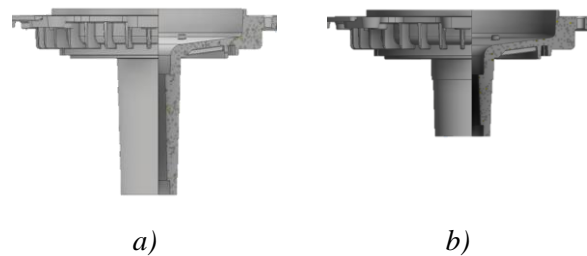
1 METODIKA EXPERIMENTU

Úlohou experimentu bolo porovnať mikroštruktúry plášťov elektromotora, tlakovo odliatych zo zliatiny *AlSi9Cu3(Fe)* vo firme *Rosenberg Slovakia s.r.o., Medzev*. Obsah prísadových prvkov v experimentálnej zliatine je uvedený v tab. 1.

Tab. 1. Obsah prísadových prvkov v zliatine *AlSi9Cu3(Fe)*

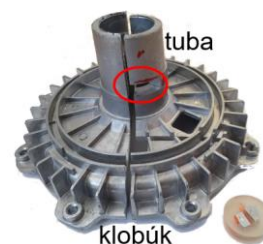
Chemické zloženie [hm. %]						
<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>
10,30	0,72	2,10	0,16	0,13	0,02	0,07

Experimentálne odliatky dvoch geometrických variantov (obr. 2) boli odliate v štyroch variáciách, pričom menený technologický parameter bola maximálna rýchlosť lisovacieho piesta v plniacej komore $v_{max} = 2, 3, 3,6$ a $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Odlievanie bolo po natavení vsádzky a odplynení taveniny vykonané na tlakovom lejacom stroji s horizontálnou studenou komorou *CLH 630.02P*.



Obr. 2. Geometrické varianty odliatku: a) *SB120*, b) *SB55*

Na základe vykonanej numerickej simulácie priebehu tuhnutia taveniny a mikropórovitosti bolo z odliatkov zvolené kritické miesto určené na pozorovanie - vzorka z tubovej časti vzhľadom na to, že v danom mieste bol predikovaný najvýraznejší tepelný uzol. Vzorky boli preparované, brúsené brúsnymi papiermi so zrnitosťou 100 až 1000 a leštené použitím $1 \mu\text{m}$ diamantovej pasty. Ako leptadlo pre pozorovanie na svetelnom mikroskope bola použitá kyselina *HF* v koncentrácii 0,5 % po dobu 15 sekúnd. Po pozorovaní svetelnou mikroskopiou boli vzorky prebrúsené a hlboko leptané po dobu 2 minút namáčaním a miešaním v zmesi 36 ml *HCl* a 100 ml *H₂O*, ďalej určené na pozorovanie *REM* a *EDS* analýzu.

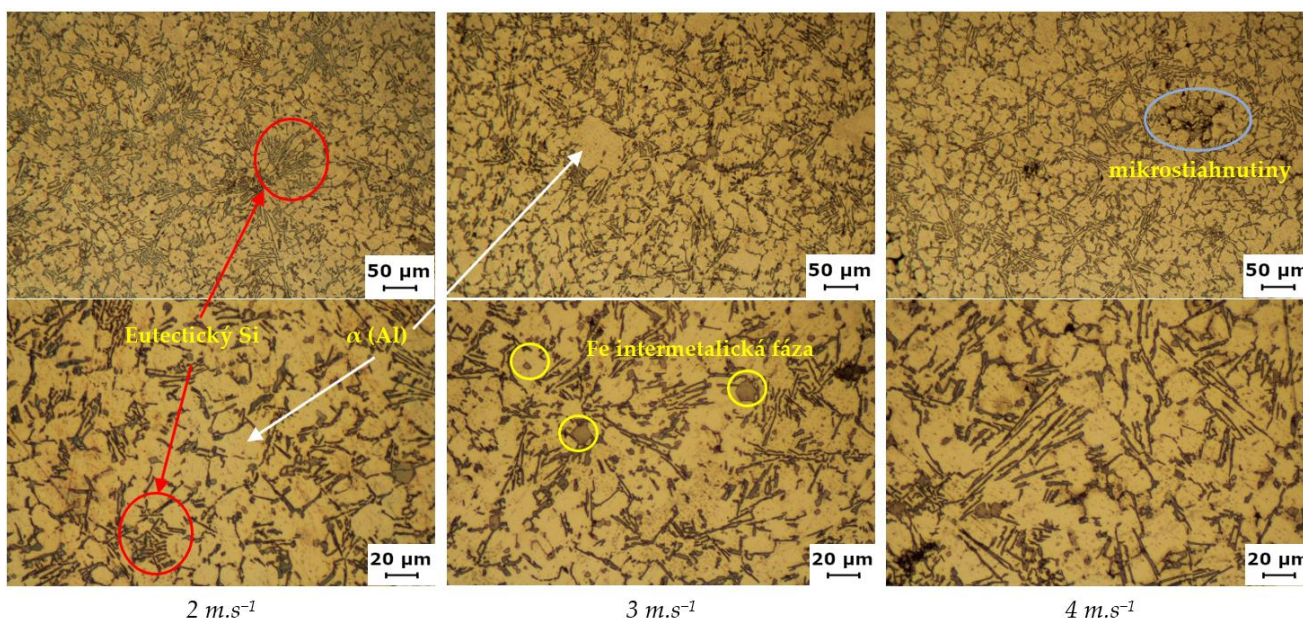


Obr. 3. Odliatok plášťa elektromotora s vyznačenými kritickými miestami

2 VÝSLEDKY A DISKUSIA

2.1 Pozorovanie mikroštruktúry

Pozorovanie mikroštruktúry bolo vykonané na svetelnom mikroskope Neophot 2 v svetlom poli pri 200- a 500-násobnom zväčšení. So zmenou maximálnej rýchlosti pohybu piesta možno pozorovať zmenu veľkosti eutektického Si a dendritov $\alpha(Al)$ fázy. Eutektikum má v oboch geometrických variantoch odliatku nemodifikovanú morfológiu vo forme hexagonálnych lamiel, v rovine sa prejavujúcej ako tmavé ihlice (obr. 5). S vyššou použitou rýchlosťou v_{max} sa ihlice predlžujú a stenčujú. Možno sledovať prítomnosť mikrostriahnutí kopírujúcej dendritickú stavbu zliatiny. Na snímkach so zv. 500 x možno pozorovať prítomnosť polyedrických intermetalických fáz



Obr. 4. Mikroštruktúra tubových častí odliatkov SB120 pri 200- a 500-násobnom zväčšení.

v odliatku SB120. Podobný trend stenčovania a predlžovania ihlic Si pri vyšších zvolených v_{max} bol pozorovaný aj pri odliatku SB55 s kratšou tubovou časťou, avšak v menšej miere.

Na kvantifikáciu výsledkov pozorovania svetelnou mikroskopiou boli z mikrosnímkov manuálne merané priemerné dĺžky ihlic eutektického Si a $SDAS$ index (obr. 6).

Namerané dĺžkové rozmery určitého počtu ihlic eutektického Si a prerátané hodnoty $SDAS$ indexu boli aritmeticky sprimerované.

Namerané výsledky kvantitatívne potvrdili nárast dĺžky ihlic eutektického Si , a to vo väčšej miere v odliatku SB120 s nárastom o 91 %. $SDAS$ index prejavil väčšiu zmenu rovnako v odliatku SB120, a to pokles o 8,5 %.

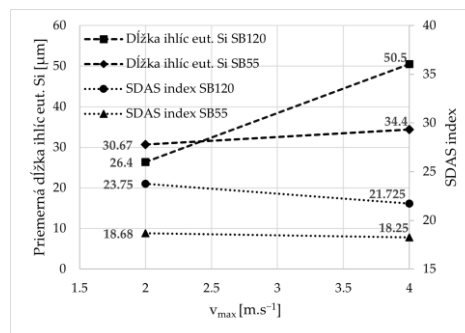
Menšia hodnota $SDAS$ indexu v odliatku SB55 je dôsledkom kratšieho času tuhnutia podľa vzťahu:

$$SDAS = a \cdot t_f^n, \quad (1)$$

kde a je konštanta závislá od zliatiny,

n je konštanta v rozsahu 0,3 ÷ 0,5,

t_f je miestny čas tuhnutia [3].



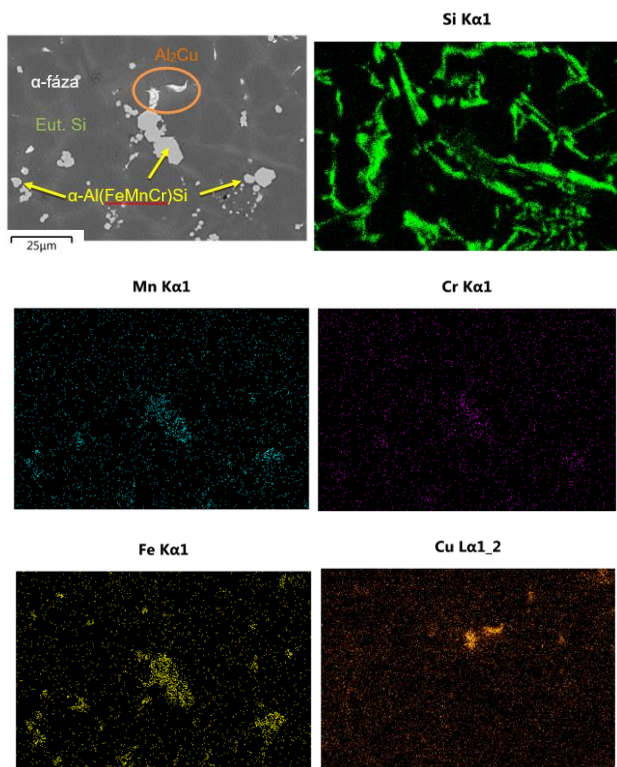
Obr. 5. Vplyv rýchlosti piesta na dĺžku ihlic eutektického Si na $SDAS$ index

Výsledky merania korešponujú s výsledkami numerických simulácií, ktoré predikovali menší tepelný uzol v dôsledku menšieho rozmeru tubovej časti odliatku SB55.

2.2 EDS analýza

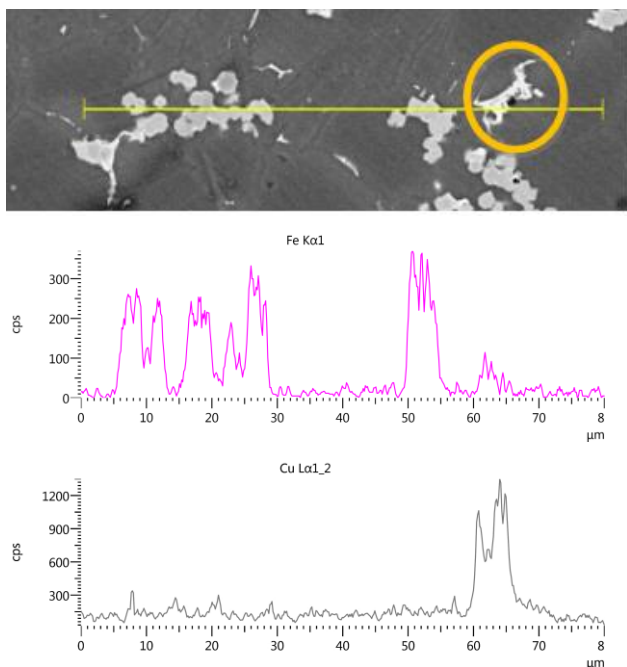
Výsledky EDS analýzy potvrdzujú výskyt prvkov Fe , Cr a Mn majoritne v polyedrickej fáze (obr. 6), rovnako aj v menších fázach. Malé polyedrické intermetalické fázy s veľkosťou už od 2 μm vyskytujúce sa aj v snímkach svetelnej mikroskopie teda možno považovať za dvanásťstennú fázu $\alpha-Al(Fe,Mn,Cr)Si$, čo korešponduje s výsledkami iného experimentu [10].

Výskyt Cu je dominantný vo fáze pravdepodobne Al_2Cu , v snímke zakrúžkovaná a označená oranžovou farbou.



Obr. 6. EDS analýza Fe intermetallickej fázy – vzorka SB120 4 m·s⁻¹

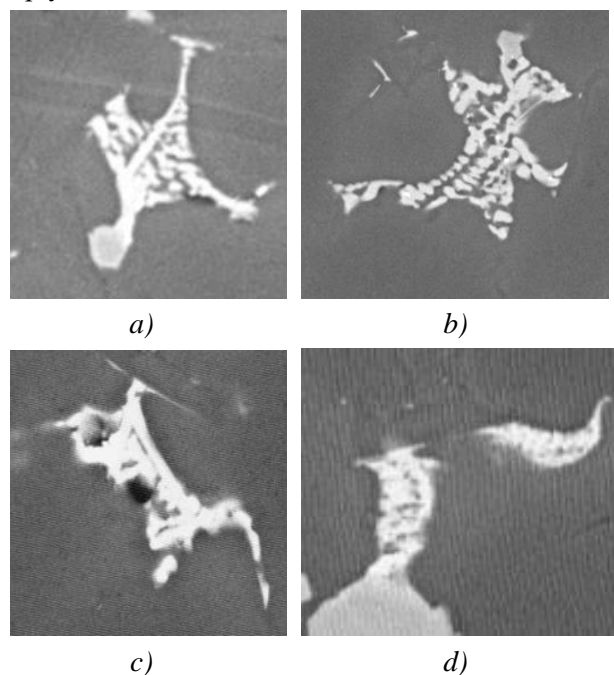
Čiarová EDS analýza umožnila určiť zakrúžkovanú kompaktnú fázu ako Al₂Cu, ako aj železité fázy polyedrického charakteru s rozmermi od 2 μm ÷ 3 μm.



Obr. 7. Čiarová EDS analýza Cu fázy zo vzorky SB55 4 m·s⁻¹

Na obr. 8 sú zobrazené vybrané medené fázy z odlievok s rôznymi v_{max} , pričom pri rýchlosti 3,6 m·s⁻¹ možno najjasnejšie pozorovať eutektický charakter fázy vo forme množstva guľovitých častíc. Nakoľko však na snímkach z rovnakej vzorky možno pozorovať obe modifikácie (obr. 8c, d), nemožno

tvrdiť, že by v_{max} bol parameter, ktorý by tvar modifikácie medenej fázy zásadným spôsobom ovplyvňoval.

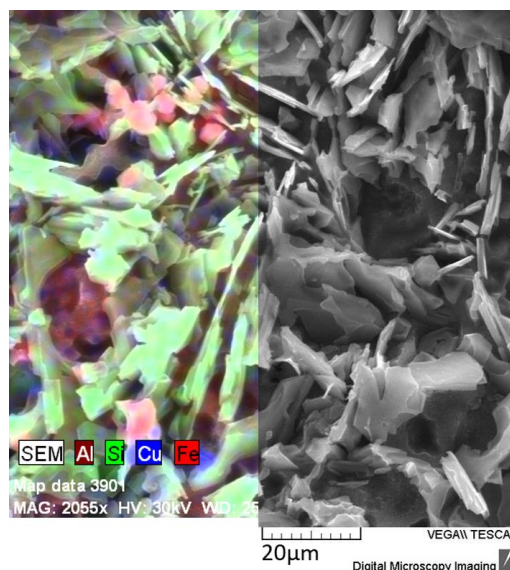


Obr. 8. Intermetalické fázy na báze Cu. Vzorka SB 120: a) 3 m·s⁻¹, b) 3,6 m·s⁻¹, c), d) 4 m·s⁻¹

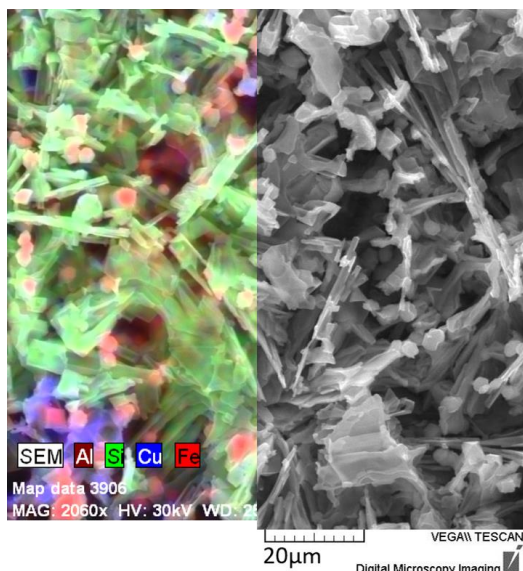
2.3 Elektrónová mikroskopia

Rastrovacím elektrónovým mikroskopom TESCAN LMU II boli pozorované vzorky z tubových častí odlievok. Hlbokým leptaním bola z pozorovanej roviny vzoriek odstránená matrica $\alpha(Al)$ fázy.

Vo všetkých vzorkách možno pozorovať drobné polyedrické častice spomínanej železitej fázy $\alpha-Al(Fe,Mn,Cr)Si$ červenou farbou (obr. 8). Rozdielne použité rýchlosti piesta v_{max} pri odlievaní sa neprejavila rozdielom veľkosti či tvaru tejto fázy. Bola zaznamenaná prítomnosť fáz so zvýšeným podielom Cu modrou farbou (obr. 9).



Obr. 8. REM snímka a EDS mapping - SB55 2 m·s⁻¹



Obr. 9. REM snímka a EDS mapping - SB55 4 m·s⁻¹

2.4 Meranie mikrotvrdości

Posledným krokom experimentu bolo meranie mikrotvrdości. Bola meraná mikrotvrdość $\alpha(Al)$ fázy zariadením Hanemann typ Mod 32 s ihlanovým diamantovým indentorom na optickom mikroskope Carl Zeiss Neophot 2, pri zaťažení 10 p po dobu 10 s. Bolo vykonaných 10 vtláčkov na každom z dvoch kritických miest zo všetkých kombinácií geometrických a rýchlostných variantov. Výsledky boli aritmeticky spriemerované, bola vypočítaná smerodajná odchýlka merania a výsledky boli spracované v tab. 2 a v grafe (obr. 10).

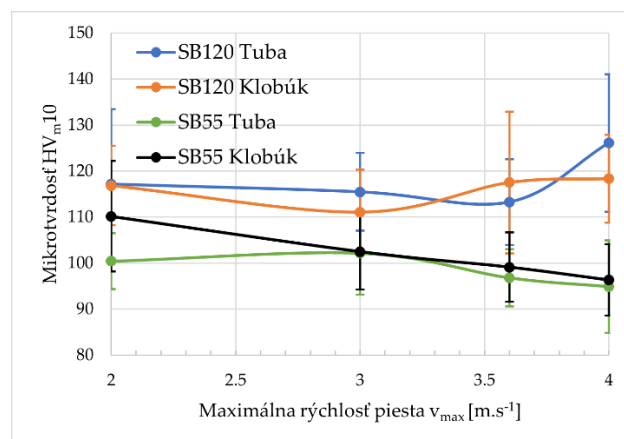
Tab. 2. Priemerné hodnoty mikrotvrdości a smerodajné odchýlky merania

Variant	Mikrotvrdość HV_{m10}				Hodnoty smerodajnej odchýlky merania			
	v_{max} [m·s ⁻¹]				v_{max} [m·s ⁻¹]			
	2	3	3,6	4	2	3	3,6	4
SB 120 Tuba	117,2	115,5	113,3	126,1	16,3	8,5	9,3	15
SB 120 Klobúk	116,9	111,1	117,5	118,3	8,6	9,2	15,4	9,6
SB 55 Tuba	100,4	102,2	96,8	94,9	6,1	9,1	6,2	10,1
SB 55 Klobúk	110,2	102,5	99,1	96,3	12	8,3	7,6	7,8

Možno konštatovať, že vyššie hodnoty mikrotvrdości sú dosahované v odliatkoch SB 120. Rovnako však výsledky boli najviac variabilné s najväčšími hodnotami smerodajnej odchýlky.

Pri zanedbaní extrémov spriemerovaných hodnôt mikrotvrdości s najvyššími smerodajnými odchýlkami, nemožno povedať, že by rýchlosť

pohybu piesta mala výrazný vplyv na mikrotvrdość $\alpha(Al)$ fázy.



Obr. 10. Závislosť priemernej hodnoty mikrotvrdości od maximálnej rýchlosti posuvu piesta

ZÁVER

Cieľom predloženého príspevku bolo experimentálne vykonať štruktúrnú analýzu zliatiny $AlSi9Cu3(Fe)$, z ktorej boli vysokotlakovým odlievaním zhotovené odliatky, ktoré sa líšili maximálnou rýchlosťou piesta v_{max} použitou pri odlievaní. Vo vopred vybraných kritických miestach odliatkov bol pozorovaný vplyv v_{max} na tvare a veľkosti štruktúrnych zložiek, kde pri vyšších v_{max} eutektický Si rástol do dĺžky a znižoval svoju hrúbku. Miera tohto javu bola ovplyvnená geometriou tubovej časti odliatku. EDS analýzou boli skúmané neznáme intermetalické fázy a bolo určené, že ide o fázu $\alpha-Al(Fe,Mn,Cr)Si$ v tvare romboického dvanásťstenu s veľkosťou už od 2 μm a Al_2Cu vyskytujúcu sa v oboch modifikáciách. Výber maximálnej rýchlosti piesta nemal merateľný vplyv na mikrotvrdość $\alpha(Al)$ fázy. Mikrotvrdość bola ovplyvnená najmä geometriou odliatku tak, že väčší tepelný uzol v rozmernejšej tubovej časti odliatku SB 120 znižuje rýchlosť ochladzovania.

Pod'akovanie

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia grantového projektu VEGA 1/0241/23: „Vývoj a výskum inovatívnej metodiky pri výrobe konštrukcií z hliníkových zliatin za účelom zvýšenia stability procesu ich vzájomného spájania.“

LITERATÚRA

- [1] RAGAN, E. a iní. (2007): *Liatie kovov pod tlakom*. Prešov : s.n., ISBN 978-80-8073-979-9.
- [2] TALANDA, I. (2010): *Studium hlavných faktorů, které ovlyvňují jakost u technologických procesu*. Brno: Vysoké učení technické, Závěrečná práce.
- [3] BOLIBRUCHOVÁ, D. - PASTIRČÁK, R. (2018): *Zlievarenská metalurgia nezelezných kovov*.

Žilina: EDIS – vydavateľské centrum ŽU, ISBN 978-80-554-1463-8.

[4] GAŠPÁR, Š. (2013): *Technologické parametre v procese tlakového liatia a kvalitatívne vlastnosti hliníkových odliatkov*. Prešov: Technická univerzita v Košiciach, habilitačná práca.

[5] ŠTIPL, P. (2014): *Technologie lití vysokotlakových odliatku a vlivy působící na jejich kvalitu*. Brno: Vysoké učení technické Brno, Diplomová práca.

[6] TILLOVÁ, E. - CHALUPOVÁ, M. (2009): *Štruktúrna analýza zliatin Al-Si*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, ISBN 978-80-554-0088-4.

[7] OUTMANI, I. - FOUILLAND-PAILLE, L. - ISSELIN, J. (2017): *Effect of Si, Cu and processing parameters on Al-Si-Cu HPDC castings*. s.l.: Elsevier, 249, 559–569. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2017.06.043.

[8] JIAO X.Y. - LIU, Y.X. - WANG, J. - LIU, W.N. - WAN, A.X. - WIESNER, S. - XIONG, S.M. (2022): *The microstructure characteristics and fracture behavior of the polyhedral primary iron-rich phase and plate-shaped eutectic iron-rich phase in a high-pressure die-cast AlSi10MnMg alloy*. In: Journal of Materials Science & Technology, DOI: 10.1016/j.jmst.2022.09.014.

[9] DINNIS, C. M. - TAYLOR, J. A. - DAHLE, A. K. (2005): *As-Cast morphology of iron-intermetallics in Al-Si foundry alloys*. In: Scripta Materialia, 53 955-958.

[10] FABRIZI, A. - FERRARO, S. - TIMELLI, G. (2014): *The Influence of Fe, Mn and Cr Additions on the Formation of Iron-rich Intermetallic Phases in an Al-Si Die-casting Alloy*. In: Shape Casting: 5th International Symposium, DOI: 10.1007/978-3-319-48130-2_34.

Optimálny návrh výroby neštandardného ozubeného súkolesia

Silvia Maláková, doc. Ing., PhD.*

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 9, 042 00 Košice.
E-mail: silvia.malakova@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 2372

Samuel Sivák, Ing.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 9, 042 00 Košice.
E-mail: samuel.sivak@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 2355

Optimal proposal of production of a non-standard gearing transmission

Abstract: Gears are among the most widely used transmission mechanisms, and the gear wheel has become a symbol of mechanical engineering. In operation, high demands are placed on the function of the gears. To achieve them, the production of gears plays an important role. Closely related to the production of gears are the specific questions of manufacturers, which method of gear production to choose. Consideration of economic initial costs, serial production, shape requirements of the gear ring and, last but not least, accuracy also led to the decision. The paper is devoted to the issue of manufacturing an elliptical gear with an asymmetric shape of the tooth profile.

Keywords: gearing, production, asymmetric tooth profile, electrospark cutting.

ÚVOD

Ozubené kolesá predstavujú dôležitý a nenahraditeľný prvok v základných zložkách mechanizmov. V súčasnosti sa okolo nás nachádzajú na každom kroku a sú neoddeliteľnou súčasťou nášho života a majú obrovské spektrum možností využitia. Najčastejšie sa však vyskytujú vo forme ozubeného prevodu [1-4]. Ozubené kolesá patria vďaka svojmu špecifickému tvaru medzi jedny z najzložitejších a technologicky najnáročnejších strojových súčiastky. Špecifický tvar ozubeného kolesa môžeme označiť ako ozubenie, ktoré je tvorené zubami. Zuby majú presne zadefinované rozmery, tvar, vlastnosti, rozloženie po obvode kolesa a sú na ich výrobu kladené veľmi veľké nároky [5]. Či už z hľadiska presnosti, výkonu, hlučnosti, životnosti a hlavne rýchlosti ich vyhotovenia [6-9]. Tieto neustále zvyšujúce sa nároky je možné ovplyvniť pomocou dokončovacích metód, primárne brúsením.

Oblasť výroby ozubenia napreduje vo vývoji rýchlym tempom a prešla za svojej existencie veľkým množstvom premien. Je to relatívne náročný technologický proces, pretože tvar zubov je zložitý a je presne definovaný jeho veľkosťou a funkciou [10]. Pred niekoľkými rokmi bola možná produkcia ozubenia iba základnými – konvenčnými metódami. Výroba ozubenia prebieha najčastejšie obrábaním.

Zuby vznikajú odoberaním zubovej medzere medzi jednotlivými zubami. Ozubenie sa získava frézovaním, obrázaním, preťahovaním alebo tvárnením. Na dosiahnutie čo najlepších stupňov presnosti povrchu sa použijú dokončovacie metódy obrábania ako je brúsenie, ševingovanie, lapovanie a zabiehanie.

V praxi čoraz častejšie nachádzajú uplatnenie aj neštandardné - atypické tvary ozubenia, pre výrobu ktorých nie je možné použiť tieto konvenčné metódy výroby ozubenia [11, 12]. Aj preto sa do povedomia v súčasnosti dostávajú aj nekonvenčné spôsoby výroby ozubenia, z ktorých je možné spomenúť napríklad rezanie plazmovým oblúkom, odoberanie laserom, prúdom vody alebo päťosovým obrábacím centrom.

Príspevok je venovaný výrobe neštandardného ozubeného kolesa, kde použitie konvenčných metód na výrobu ozubenia nie je vhodné a je potrebné použiť iný, nekonvenčný spôsob výroby.

1 NEŠTANDARDNÝ OZUBENÝ PREVOD

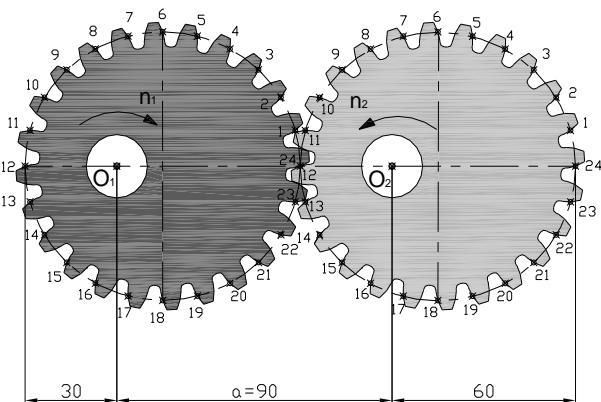
Najčastejšie sa v praxi používajú „štandardné“ ozubené prevody, ktoré môžeme charakterizovať konštantným prevodovým číslom. To znamená, že pri otáčaní hnacieho kolesa sa aj hnané koleso otáča rovnomerne, teda prevodové číslo musí byť počas

jednej otáčky konštantné. Zuby týchto „štandardných“ ozubených kolies na jednom ozubenom kolese majú rovnaký tvar a sú to zuby so symetrickým profilom (vo výnimočných prípadoch i s nesymetrickým profilom).

V praxi nachádzajú svoje uplatnenie aj ozubené prevody, ktorých prevodové číslo počas jednej otáčky nie je konštantné. Na základe požiadaviek z praxe bol vytvorený geometrický model ozubeného prevodu s plynule sa meniacim prevodovým číslom tak, aby daný prevod spĺňal podmienky správneho záberu. Ozubený prevod bol navrhnutý pre tieto konkrétne parametre:

- ozubené súkolesie tvorené dvoma identickými ozubenými kolesami,
- harmonicky sa opakujúce prevodové číslo v rozsahu u = od 0,5 cez 1,0 do 2,0 a späť na jedno otočenie spolu zaberajúcich ozubených kolies,
- počet zubov ozubených kolies $z_1 = z_2 = 24$,
- normalizovaná hodnota modulu ozubenia $m_n = 3,75$ mm,
- osová vzdialenosť $a = 90$ mm,
- určené pre jeden zmysel otáčania.

Súkolesie s plynule sa meniacim prevodovým číslom tvoria dve identické eliptické kolesá s excentricky uloženým stredom otáčania. Výsledný model tohto súkolesia vytvorený v programe *AutoCAD* je zobrazený na obr. 1.



Obr. 1. Model eliptického súkolesia

Ozubené súkolesie je tvorené dvojicou identických eliptických ozubených kolies, pričom stred otáčania je v jednom z ohnísk rozstupovej elipsy, teda jedná sa o excentricky uložené ozubené kolesá. Aktívna krivka profilu zubov je evolventa, kde na rozdiel od evolventnej časti boku zubov u „štandardných“ kruhových ozubených kolies, kde evolventou evolventy je základná kružnica, a tomto prípade je evolventou evolventy elipsa. Každý z dvanástich zubov ozubeného koleša je iný, ďalších dvanásť zubov toho istého koleša je rovnakých. Bočná krivka je evolventa, a je odlišná pre aktívnu a pasívnu stranu zuba. Jedná sa o ozubené kolesá s asymetrickým

profilom zubov, preto výroba takéhoto ozubenia nie je možná štandardnými výrobnými postupmi určenými pre čelné ozubené kolesá.

2 NEKONVENČNÉ SPÔSOBY VÝROBY OZUBENIA

Čelné ozubené koleso, ktorého každý zub je iný a profil zubov je asymetrický je nemožné vyrobiť štandardnými výrobnými postupmi. Tu prichádza so úvahy výroba ozubenia, kde sa použije *CAD* model navrhnutého ozubenia.

2.1 Výroba vodným lúčom

Tento spôsob výroby je známy aj ako *Water Jet (WJ)* - vodný lúč, *Water Jet Machining (WJM)* ako obrábanie vodným lúčom a *Abrasive Water Jet Machining (AWJM)* ako obrábanie vodným lúčom s abrazívom.

V procese *WJM* a *AWJM* sa využíva mechanická energia vody aj abrazívnych častíc na obrábanie. Typická hodnota veľkosti tlaku pre aplikáciu vodného lúča je 205 MPa ÷ 600 MPa. Pri dodaní vody s týmto tlakom prostredníctvom dýz, dochádza k transformácii potenciálnej energie na energiu kinematickú a zvyšuje sa rýchlosť vody až na 100 m·s⁻¹ a voda sa správa ako pevné teleso.

Ak sa použije čistá voda, vodný lúč zvykne naberat atmosférický vzduch a to znižuje reznú schopnosť. Preto sa pridávajú do vody chemické stabilizátory. Technológia sa využíva najmä pri rezaní mäkkých materiálov, ako sú plechy malých hrúbok, plasty, fólie [13, 14]. Pre odstránenie tohto nedostatku sa do vody pridávajú abrazívne častice, najčastejšie zrná oxidu hliníka, piesok alebo sklené guľôčky. Preto *AWJM* je určená na obrábanie tvrdších materiálov (obr. 2). Pri prekročení pevnosti materiálu tlakom čela lúča, lúč navodí v obrobní materiálu erózný proces.



Obr. 2. Príklad použitia výroby ozubenia vodným lúčom

Prednosťou využitia je vysoká účinnosť energie - až 85 %, možnosť využitia vo výbušných prostrediach, materiál stačí upínať len letmo, v materiály nedochádza k vzniku prasklín, kvôli malému počtu rezných hrán. Nedochádza k vzniku prachu, takže sa zaraďuje medzi ekologické technológie. Možná je zmena výroby za veľmi krátky čas, vysoká spoľahlivosť pri prevádzke a presnosť daného rozmeru (0,13 mm, opakovaná 0,025 mm). Najväčšou výhodou je neovplyvňovanie teploty rezaného materiálu.

Medzi nedostatky tejto technológie patrí kolísanie kvality rezu po reznej ploche a na mieste výstupu rezného vodného lúča. Je potrebné zabezpečiť ochranu oceľových polovýrobov pred koróziou.

2.2 Výroba plazmovým oblúkom

Táto metóda patrí v dnešnej dobe medzi najrozšírenejšie metódy tepelného delenia kovových materiálov. Používa sa plazma s hustotou $5 \cdot 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ a teplota plazmy dosahuje teplotu až $30 \cdot 10^3 \text{ K}$. Plazmové rezanie sa používalo na rezanie nerezových ocelí s využitím interného plynu. Na delenie konštrukčných ocelí sa používa s pridaním kyslíka, ako ochranného plynu.

Plazma je tvorená elektrickým výbojom medzi anódou a katódou, teda nutnou podmienkou je ionizované médium. Tým môže byť plyn, ktorý je v podobe vodíka, kyslíka, argónu a podobne.

Pomocou plazmy a prúdenia plynu v dýze horáka sa táto energia presúva k povrchu deleného materiálu. Plazma vráza do materiálu a nastáva miestne natavovanie a čiastočné vyparovanie roztaveného kovu z povrchu materiálu a vzniká rezná stopa. Rezanie plazmou je veľmi rýchle.

Výroba ozubenia plazmovým oblúkom (obr. 3) má pozitívne ohlasy v strojárskych praxi. Prerezanie možné použiť rôzne druhy konštrukčných materiálov. Dôležité je si uvedomiť, že po výrobe ozubenia plazmovým oblúkom vznikne na povrchu ozubenia tepelne ovplyvnená oblasť, ktorá sa mení pôsobením plazmového lúča z hora nadol. Na začiatku hrúbky rezania je tepelné ovplyvnenie intenzívnejšie ako na konci, kde je pôsobenie tepla menšie.



Obr. 3. Časť ozubenia vyrobená plazmovým lúčom pri rôznej hrúbke ozubenia

K výhodám tejto metódy patrí vysoká rýchlosť rezania, možnosť rezania všetkých materiálov

a vysoká presnosť pri opakovaných rezoch. K nevýhodám patrí obmedzenie hrúbky rezaného materiálu, zošikmenie reznej plochy a vysoké náklady na diely pri plynovom chladení horáku.

2.3 Výroba laserovým zväzkom

Podstata tejto technológie delenia materiálu spočíva na energii, ktorá je dodávaná svetelným lúčom. V mieste dopadu na nepriehľadný materiál sa táto energia mení na energiu tepelnú, ktorá roztaví materiál v oblasti reznej roviny. Hustota reznej energie je okolo $105 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$ a priemer rezného lúča lasera je $1 \mu\text{m}$.



Obr. 4. Výroba ozubenia laserom

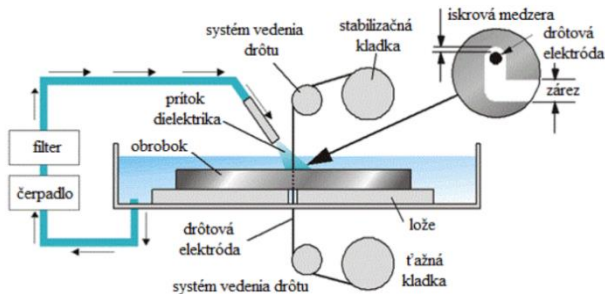
Pri použití na výrobu ozubenia (obr. 4) je dôležité pôsobenie energie lasera a materiálu deleného obrobku. Pohltenie energie absorpciou nastáva v dôsledku čiastočného odrazu lúča od deleného materiálu. Ukladanie absorbovanej energie je asi v $0,1 \mu\text{m}$ vrstve, ktoré neskôr z dôvodu tepelnej vodivosti vnika do deleného materiálu. Šírenie tekutého rozhrania do materiálu začína, ak je absorbovaná energia dosť vysoká na roztavenie materiálu.

2.4 Elektroiskrové obrábanie

Elektroiskrové obrábanie je spôsob *elektroerozívneho* obrábania elektricky vodivého materiálu. K odoberaniu materiálu dochádza pôsobením elektrickej iskry. Pri tomto spôsobe sa nástroj (elektroda) priblíži k obrobku na takú vzdialenosť, aby preskočila iskra medzi elektrodou a obrobkom. Iskra vytrhne z povrchu obrobku malú čiastočku roztaveného kovu. Pre zvýšenie účinku, zabráneniu elektrického oblúka, lokálnemu chladeniu sa celý tento proces odohráva v kvapaline (*dielektrikum*). Veľkosť a rýchlosť odoberania materiálu závisí od veľkosti medzery, a taktiež od vlastností materiálu obrobku a elektrody. Touto metódou možno obrábať každý vodivý materiál.

K *elektroerozívnemu* obrábaniu patrí *elektroerozívne* hĺbenie, *elektroerozívne* mikrodierovanie, *elektroerozívne* drôtové rezanie, *anodomechanické* rezanie a *elektrokontaktné* rezanie.

Elektroiskrové drôtové rezanie je progresívnou modifikáciou elektroiskrového obrábania. S prvým strojom pre drôtové rezanie prišla švajčiarska firma AGIE, ktorá použila ako prvá NC riadenie, tým sa proces zrýchlil a dosiahol presnejšie hodnoty. Dnes sa používa CNC riadiaci systém. Tato metóda umožňuje riadenie smeru, rýchlosti pohybu, rýchlosť odvíjania drôtu, sledovanie fyzikálnych vlastností a kontrolu prebiehajúcej elektroerózie.



Obr. 5. Princíp elektroiskrového drôtového rezania

Nástrojom drôtovej rezačky je tenký drôt, ktorý sa počas rezania neustále odvíja z cievky v zásobníku za pomoci špeciálneho podávacieho zariadenia, ktoré má taktiež funkciu šponovania drôtu, aby nedošlo k roztrhnutiu drôtu. Aby nedošlo k nepresnostiam, je drôt stále napínaný konštantnou ťahovou silou pomocou kladiek. Drôt sa pohybuje pomaly, v rozmedzí $2,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ až $300 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, je riadený systémom stroja. Nástrojový drôt v priebehu procesu rezania môže byť použitý iba jedenkrát, následne po použití končí v zbernom mieste.

3 VÝROBA NEŠTANDARDNÉHO OZUBENIA

Pre technickú prípravu výroby je potrebné, aby ju zabezpečovala firma, ktorá sa špecializuje na vývoj a distribúciu CAM systémov a systémov pre automatizáciu programovania NC a CNC strojov. Voľba optimálneho spôsobu výroby je limitovaná podmienkami, ako je počet vyrobených kusov (bol vyrobený len jeden pár ozubených kolies), výroba mala byť zabezpečená technológiou bežne dostupnou v blízkom okolí a bez použitia prípadných nákladných prípravkov a náklady na technickú prípravu výroby a na výrobu funkčného modelu mali byť čo najmenšie.

Na základe uvedených podmienok bol vytypovaný NC stroj pre elektroiskrové rezania (tzv. drôtiková rezačka) EIR 005 B s riadením RS-ER5. Aj keď ide o starší stroj výrobného zariadenia, predmetný stroj umožňuje vytvorenie skonštruovaného tvaru ozubených kolies s dodržaním predpokladanej potrebnej presnosti $0,01 \text{ mm}$ a drsnosti $R_a 1,6 \mu\text{m}$.

Základným problémom bolo vygenerovanie NC kódu zložitého tvaru ozubených kolies, ktorý nedovoľoval použiť bežný prístup pri tvorbe NC programov

ozubených kolies, keď sa popíše tvar jedného zuba a tento sa opakuje podľa požadovaného počtu zubov. Prichádzali do úvahy tri spôsoby prípravy NC kódu.

Prvým spôsobom je programovanie v NC kóde stroja. Vzhľadom na zložitosť tvaru vyžadujúceho si ako 300 blokov je tento spôsob komplikovaný a neprehľadný a pre predmetný stroj táto možnosť prakticky neprichádzala do úvahy.

Druhý spôsob vychádzal z využitia už existujúcej softvérovej podpory stroja. Opis vyrábaného eliptického kola obsahuje 48 priamkových častí a 192 kruhových oblúkov, ktoré by pri tomto spôsobe bolo nutné pracne zadefinovať (stred kružnice, polomer, počiatočný a koncový bod kružnicového oblúka, atď.), preto tento spôsob je časovo náročný na prípravu.

Posledný spôsob je založený na vytvorení postprocesora (prekladača) pre daný stroj v systéme CAM2000, ktorý je určený pre automatizáciu programovania NC strojov. Táto možnosť sa ukázala ako jednoznačne najefektívnejšia a technicky ďaleko najefektívnejšia. Bol vytvorený postprocesor pre elektroiskrové rezanie EIR 005 B s riadiacim systémom RS-ER5. Jeho úlohou bolo automatické vygenerovanie NC kódu pre navrhnutý tvar ozubených kolies. Takýmto spôsobom je možné počas niekoľkých minút vytvoriť veľmi komfortným spôsobom NC program pre ľubovoľný tvar požadovaného profilu.

Keďže dĺžka rezu každého ozubeného kola bola približne 532 mm , výroba každého kusa trvala 8 hodín pri odporúčanej hrúbke rezacieho drôtu $0,02 \text{ mm}$ a hrúbke skúšobných kolies 3 mm . Pri predpokladanom zväčšení hrúbky ozubených kolies na 15 mm by sa mohol tento čas zvýšiť až na 40 hodín. Takýto spôsob opakovanej výroby (či už kusovej alebo sériovej) samozrejme nie je dostatočne produktívny a v prípade, že bude definovaný predpokladaný počet požadovaných kolies, bude nutné zvoliť vhodnejšiu technológiu výroby.

Pri výrobe daného eliptického ozubeného kola sa môže použiť metóda práškovej metalurgie. Výrobky práškovej metalurgie patria v súčasnosti k tzv. „ekonomicky efektívnym“ výrobkom, pretože ich cena v porovnaní so súčiastkami vyrábanými napr. trieskovým obrábaním, môže byť až o $25\% \div 50\%$ nižšia. Pre práškovú metalurgiu je totiž charakteristické až 95% využitie materiálu dané výrobou súčiastky "na - hotovo" bez nákladov na opracovanie. Prášková metalurgia patrí medzi bezodpadové technológie, má charakter uzavretého cyklu a výstupom je už hotový výrobok pripravený na montáž. Je pre ňu charakteristická až 50% úspora energie a až 75% úspora na mzdách. Táto metóda je vhodná pri obrovských sériách, hromadnej výrobe.

ZÁVER

Samotné ozubené kolesá prešli od svojho vzniku obrovským vývojom. Došlo k zmene ich tvarov, druhu použitých materiálov a podobne. Svoje uplatnenie nachádzajú ako štandardné tak aj neštandardné ozubené prevody v automobilovom, lodnom, leteckom či potravinárskom priemysle, ako i v ďalších odvetviach strojného priemyslu. Toto všestranné využitie ozubených kolies v každodennom živote viedlo k tvorbe veľkého množstva rôznych postupov a metód ich výroby. Každá použitá technológia a spôsob výroby odpovedá požiadavkám a nárokom na presnosť ozubenia a je závislá od parametrov a tvaru ozubenia.

Pod'akovanie

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia grantových projektov KEGA 029TUKE-4/2021 „Implementácia moderných edukačných prístupov pri konštruovaní prevodových mechanizmov“ a VEGA 1/0528/20 „Riešenie nových prvkov ladenia mechanických sústav.“

LITERATÚRA

- [1] ZHANG, Y. - MAO, K. - LEIGH, S. - SHAH, A. - CHAO, Z. (2020): *A parametric study of 3D printed polymer gears*. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 107, pp. 4481-4492.
- [2] CZECH, P. (2018): *Autonomous vehicles: basic issues*. In: Scientific Journal of Silesian University of Technology = Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej: Series Transport: Seria Transport., 100, pp. 15-22.
- [3] KOPAS, P. et al., (2019): *Fatigue characteristics of welded high strength steel in the low cycle region of loading*. In: MATEC Web of Conferences, Volume: 254, p. 1-10.
- [4] GREGA, R. - KRAJŇÁK, J. - MORAVIČ, M. (2018): *Experimental verification of the impact of a technical gas-using pneumatic coupling on torsional oscillation*. In: Scientific Journal of Silesian University of Technology = Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej: Series Transport: Seria Transport., č. 99, pp. 55-63.
- [5] SAPIETOVÁ, A. (2018) *Simplified computation methodology for contact forces on tapered rolling bearing with flexible parts*. In: Scientific Journal of Silesian University of Technology, Volume 99, pp. 177-182.

- [6] KULKA, J. a kol. (2018): *Failure analysis of the foundry crane to increase its working parameters*. In: Engineering Failure Analysis. No. 88, pp. 25-34.
- [7] MORAVEC, J. - KOPAS, P. - JAKUBOVIČOVÁ, L. - LEITNER, B. (2018): *Experimental casting of forging ingots from model material*. In: MMS 2017 MATEC Web of Conference, pp. 157.
- [8] CZECH, P. - ŁAZARZ, B. - TUROŇ, K. (2017): *Influence of conditions of vehicle motion on its economy*. In: Autobusy, No. 6, p. 136-142 ISSN: 1509-5878.
- [9] SÁGA, M. - MAJKO, J. - HANDRIK, M. - VAŠKO, M. - SAPIETOVÁ, A. (2020): *Proposal of Physical Model for Damage Simulation of Composite Structures Produced by 3D Printing*. In: ACTA PHYSICA POLONICA A, No. 2, Vol. 138 p. 245-248.
- [10] BUKOVSKÁ, Š. - MORAVEC, J. - SOLFRONK, P. - PEKÁREK, M. (2022): *Assessment of the Effect of Residual Stresses Arising in the HAZ of Welds on the Fatigue Life of S700MC Steel*. In: Metals, 12, 1890.
- [11] KRAJŇÁK, J. - URBANSKÝ, M. - ŽULOVÁ, L. (2022): *Investigation of air temperature change in the flexible element depending on connecting holes number during compressing of this element*. In: Projektowanie, badania i eksploatacja. - Bielsko-Biala (Poľsko): Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Białej p. 299-306.
- [12] MANTIČ, M. - KULKA, J. (2022): *Effect of notch geometry change on draw rod durability*. In: Engineering Failure Analysis. Amsterdam (Nemecko): Elsevier, Roč. 141, p. 1-12.
- [13] KUCZAJ, M. - WIECZOREK, A. N. - KONIECZNY, Ł. - BURDZIK, R. - WOJNAR, G. - FILIPOWICZ, K. - GŁUSZEK, G. (2023): *Research on Vibroactivity of Toothed Gears with Highly Flexible Metal Clutch under Variable Load Conditions*. In: Sensors, 23, 287.
- [14] HARACHOVÁ, D. - MALÁKOVÁ, S. (2022): *Possibilities of use and characteristics of high-precision transmissions in machinery*. In: MM Science Journal. - Praha (Česko): MM Publishing Roč. 2022, November, s. 6014-6019.

Konštrukcia strižného nástroja pre pristrihovanie činných plôch

Borislav Melo, Ing. PhD.*

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

Robert Dostál, Ing.

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

Construction of a cutting tool for cutting active surfaces

Abstract: Cutting technology is one of the basic and supporting methods, preferably of dividing materials. The preparation of material for further processing cannot be imagined without the use of cutting technology. The text of the contribution describes the geometric solution of the cutter and also the construction of the used tool for the area of trimming sheet metal and creating qualitatively more suitable cutting surfaces. The goal of the contribution was the design of a tool for the application of sheet metal trimming.

Keywords: sheet metal, cutting tool, cutter, roughness, construction

ÚVOD

Strihanie je základnou prácou delenia materiálov strihom. Pri kovocho začína elasticou, potom plastickou deformáciou a po lokálnom vyčerpaní plasticity končí porušením - lomom.

Pri strihaní sa dajú pozorovať tri základné fázy:

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

Na vzhľade strižnej plochy sú obe posledné fázy zrejme. Tvárna deformácia vytvára nízku, kovovo lesklú plôšku. Ušmyknutie spôsobí šikmú matnú plochu, niekedy aj s viditeľnými trhlinami.

O technológii strihania a jeho nosných aj okrajových problémoch jestvujú tisícky príspevkov. V nasledujúcom príspevku je pozornosť zameraná na problematiku tzv. integrovaného strihania.

V súčasnosti sa pre strihanie plechových dielov aplikujú klasické konštrukcie strižných nástrojov. Konštrukčné riešenie strižných nástrojov umožňuje jednoduchý aj kombinovaný strih, ale ukazuje sa, že bude potrebné v praxi aplikovať nielen klasické

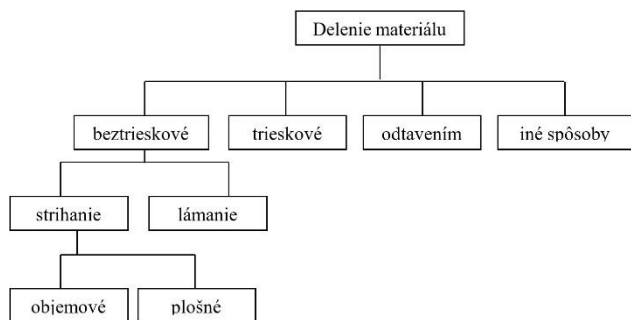
metódy prezentované tzv. celokovovými tvárniacimi nástrojmi. Potrebné je zrejme pre každý plechový diel a strih používať jednoúčelový nástroj, resp. iný spôsob prezentovaný nekonvenčnou konštrukciou nástrojov. V malej miere sa v praxi používajú netradičné metódy, ktoré v niektorých prípadoch prevyšujú bežné technické riešenia. Tento jav je spôsobený aj finančnými možnosťami výrobných firiem. Práca s takýmto nástrojom je rýchla a relatívne jednoduchá pre hociktorého aj iba zaučeného pracovníka a zvýšila by sa aj bezpečnosť pri práci. Samozrejme, že takýto nástroj by mal byť zaradený do širšej linky, kde sú aj ďalšie tvárniace nástroje, čo by sa dalo dosiahnuť automatizáciou procesu, pretože ako je známe tvárniace procesy sa dajú veľmi ľahko automatizovať.

1 TEORETICKÁ ČASŤ

Strihanie a delenie materiálu v strojárskej výrobe patrí medzi primárne technológie. Proces strihania patrí do veľkej skupiny príbuzných procesov, ktoré stoja na počiatku výrobného cyklu. Podstatou strihania je oddelenie materiálu (plechu, polovýrobku) činnými časťami (nožmi, strižníkmi) a výsledkom je vznik dvoch povrchov. V odbornej literatúre sa stretávame aj so striktno oddeleným strihaním od ďalších technológií tvárnenia [1-5].

V prevažnej miere pri tvárnení kovov sa plocha povrchu polovýrobku následkom kontaktu s nástrojom zväčšuje. Pri ťahaní je to cca 40 %, pri

pretláčaní až o 95 %. Percentuálne vyjadrené pri strihaní je to 100 %. Schéma ilustruje postavenie strihania medzi ďalšími spôsobmi delenia materiálov [6-8].



Obr. 1. Schéma spôsobov delenia materiálu

Delenie strihania [9-10]:

- strihanie*, pri ktorom sa materiál úplne oddelí pozdĺž uzavretej krivky strihu,
- strihanie*, pri ktorom sa materiál úplne oddelí pozdĺž neuzavretej krivky strihu,
- strihanie rovnobežnými strižnými hranami* - vzdialenosť medzi strižnými hranami je stále rovnaká,
- strihanie šikmými strižnými hranami* zvierajúcimi určitý uhol.

Z konštrukčného hľadiska sa najčastejšie používa delenie strižných nástrojov podľa:

- spôsobu vedenia funkčných častí nástroja, a to na strižné nástroje:
 - bez vedenia (otvorené),
 - s vedením:
 - priamym v strižnici alebo vodiacej doske,
 - nepriamym s vodiacimi stĺpkami alebo vodiacim valcom,
- vymedzenia posuvu pásu v nástroji na strižné nástroje s:
 - vymedzením dorazmi,
 - vymedzením hľadáčikmi,
 - vymedzením podávacím zariadením,
 - kombináciou predchádzajúcich spôsobov.

Z prevádzkového hľadiska sa strižné nástroje delia podľa:

- spôsobu podávania pásu alebo zakladania kusových polovýrobov na nástroje s:
 - ručným podávaním,
 - mechanizovaným podávaním,
 - automatickým podávaním,
- spôsobu odoberania výstrižkov alebo polovýrobov na nástroje:

- s prepadávaním výstrižkov otvorom v strižnici a v základovej doske,
- s pretláčaním výstrižkov otvorom v strižnici, ktorý je vzdialený o krok podania,
- so zotretím výstrižkov na hornú plochu pásu, ktorý ich vynáša z nástroja,
- výstrižok zostáva počas celého pracovného cyklu spojený s pásom až do poslednej operácie, keď sa od pásu oddelí.

1.1 Konštrukčné systémy strižných nástrojov

Z tohto hľadiska možno strižné nástroje začleniť do týchto skupín:

- otvorené strižné nástroje,
- strižné nástroje s vedením vo vodiacej doske,
- strižné nástroje s vedením vodiacimi stĺpkami,
- strižné nástroje s vedením vodiacim valcom,
- strižné nástroje s vedením v strižnici,
- strižné nástroje s kombinovaným vedením.

2 KONŠTRUKCIA STRIŽNÉHO NÁSTROJA

Vychádzajúc z podstaty strižného procesu boli hľadané metódy umožňujúce pri minimálnych nákladoch dosiahnuť dobrú kvalitu povrchu a rozmerovú presnosť výstrižku. Riešenie sa našlo v kombinovanom nástroji. Podstata úpravy nástroja spočíva v tom, že za strižným klinom je vytvorený ďalší klin, ktorý zarovnáva vzniknutú nerovnosť. Princíp usporiadania je na obr. 2. Druhý klin je upravený do formy zuba preťahovacieho trňa a je umiestnený paralelne so strižnou hranou, vysunutý o veľkosť strižnej vôle, t. j. vzhľadom na teoreticky nulovú vôľu medzi rezným klinom a strižnicou je vhodné, ak je to konštrukčne možné, zabezpečiť súčasný záber strižného a rezného klina, teda používať nástroje so sklonenou reznou hranou o uhol λ .

Výhoda strihania sklonenými strižnými hranami oproti strihaniu rovnobežnými hranami vyplýva z porovnania priebehov strižnej sily. Pri strihaní rovnakého materiálu sklonenými strižnými hranami je potrebná podstatne nižšia strižná sila ako pri použití rovnobežných strižných hrán. Pri strihaní sklonenými strižnými hranami však vzniká deformácia nepridrživanej časti materiálu. Veľkosť deformácie odstrihutej časti materiálu závisí od vlastností a rozmerov materiálu a od uhla sklonu strižných hrán λ . V prípade, ak je uhol λ malý a strihaný materiál tenký a pružný, deformácia odstrihutej časti je malá a často zanedbateľná. Ak je uhol λ väčší, strihaný materiál má väčšiu hrúbku a zároveň je mäkký, deformácia odstrihovanej časti je väčšia.

2.1 Geometrické parametre nástroja

Na dosiahnutie kvality povrchu porovnateľnej s jemným obrábaním je vhodné, aby pri strihaní väčších prierezov bol prídavok na obrábanie rozdelený na časť hrubovaciú a hladiacu. Týmto riešením je možné dosiahnuť drsnosť strižnej (obrábanej) plochy rádo $R_a = 0,4 \div 0,75$. Pre praktické prípady strihania plechu do hrúbky 4 mm postačuje jeden rezný klin, vo zvlášť určených prípadoch dva, ktoré sú usporiadané podľa obr. 2. Na obr. 3 je zobrazená konštrukčná dokumentácia strižného nástroja.

Teoretická strižná sila F_S sa dá vyjadriť vzorcami:

- pre strihanie rovnobežnými strižnými hranami:

$$F_S = l_S \cdot a \cdot \tau_m, \quad (1)$$

kde l_S - dĺžka strihu [mm],

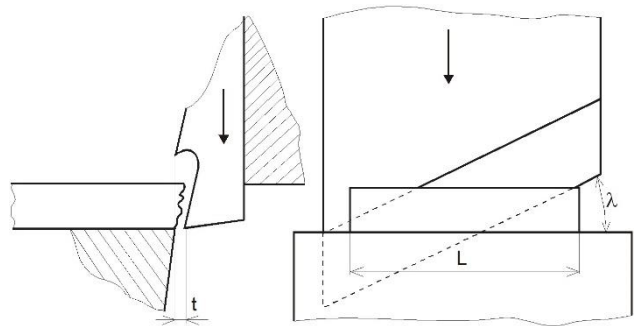
a - hrúbka strihaného materiálu [mm],

τ_m - pevnosť materiálu s strihu [MPa],

- pre strihanie sklonenými strižnými hranami:

$$F_S = \frac{a^2}{\operatorname{tg} \lambda} \cdot \tau_m. \quad (2)$$

Je zrejmé, že pri prekrytí záberu strižného a rezného klina bude sa sčítavať strižná sila F_S s reznou silou F_Z . Preto na posúdenie veľkosti vzrastu sily je potrebné kvantifikovať obe zložky.



Obr. 2. Schéma úpravy nástroja so strižným a rezným klinom

Pri stanovení veľkosti rezného sily je možné vychádzať zo vzťahov známych z teórie obrábania rezaním rezným klinom. Pretože proces rezania je v tomto prípade blízky preťahovaniu, môžeme uplatniť nasledovné vzťahy:

$$F_{Z_{\max}} = k_S \cdot a \cdot b, \quad (3)$$

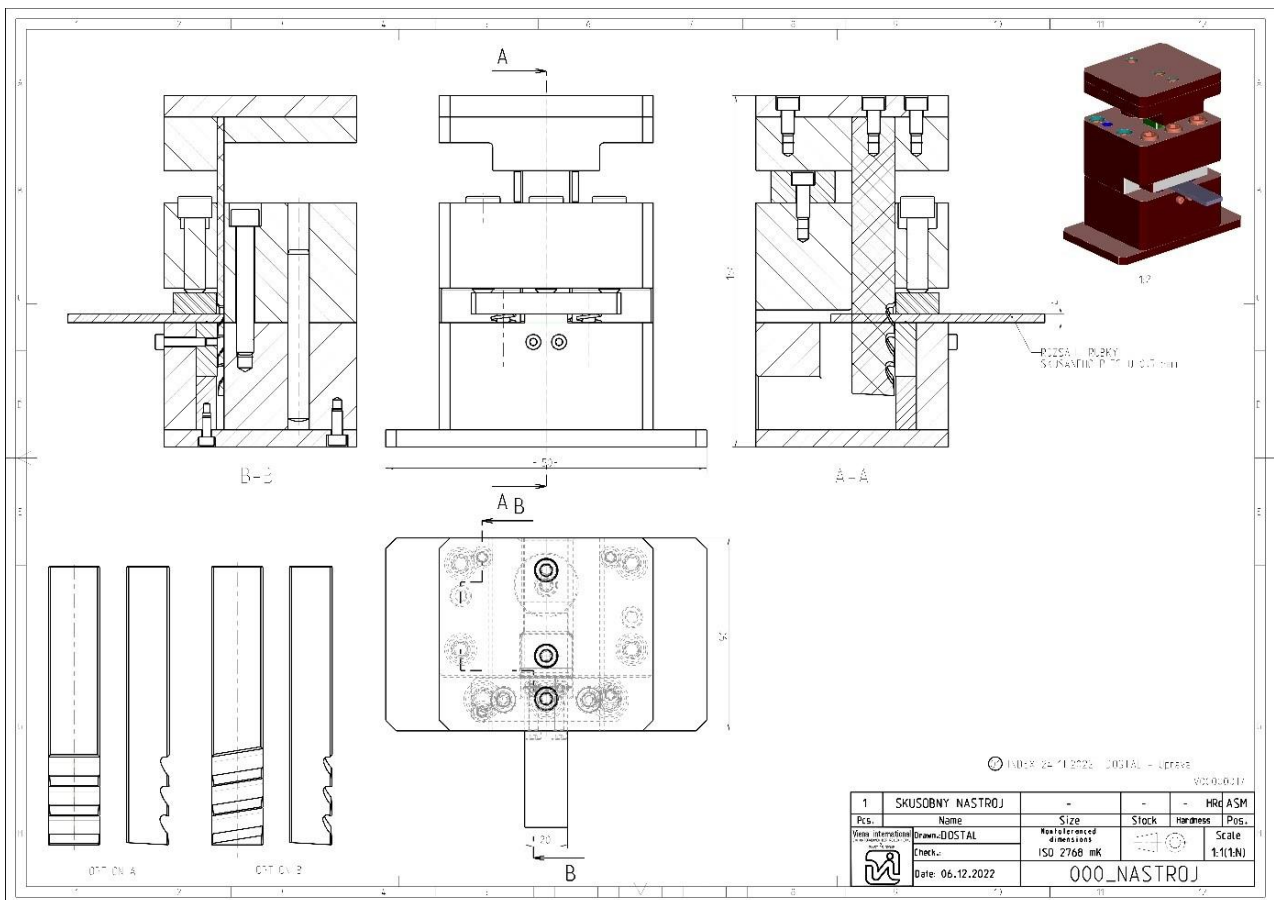
kde k_S - merný odpor materiálu [Pa],

a - hĺbka rezu [mm],

b - šírka triesky [mm], teda

$$b = \frac{L}{\cos \lambda}. \quad (4)$$

Pre k_S platí:



Obr. 3. Konštrukčná dokumentácia strižného nástroja

$$k_s = \frac{C_{Fz}}{a^n} \quad (5)$$

alebo po dosadení $(1-n) = Y_{Fz}$ platí:

$$F_z = C_{Fz} ab. \quad (6)$$

Stredné hodnoty pre oceľ pevnosti $\sigma_p < 700$ MPa sú nasledovné: $C_{Fz} = 1700$, $Y_{Fz} = 0,85$.

Teda po dosadení:

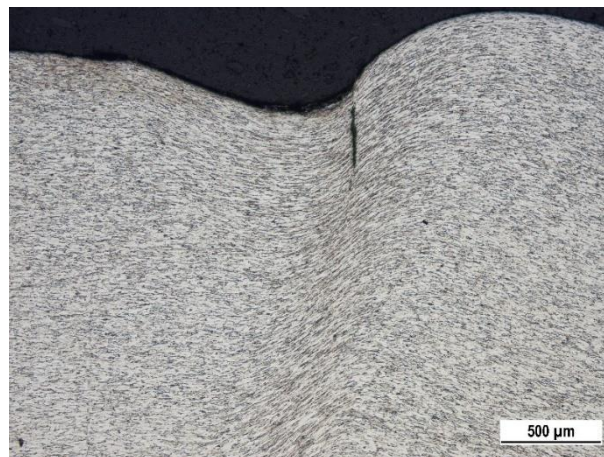
$$F_z = 1700 \cdot a^{0,85} \cdot \frac{L}{\cos \lambda}. \quad (7)$$

3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

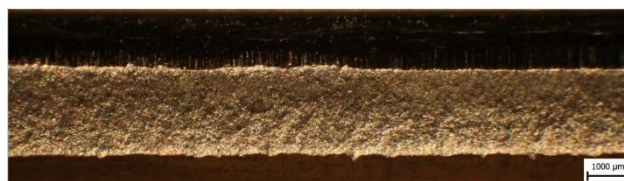
S navrhnutou konštrukciou nástroja podľa obr. 3 boli vykonané experimentálne práce s materiálom - plech S235 so zložením: (%) C 0,13 %, Mn 0,44 %, Si 0,023 %, P 0,007 %, S 0,008 %, Cu 0,03 %, Cr 0,01 %, Ni 0,014 %, Al 0,040 %. Na obr. 4 je zobrazené experimentálne pracovisko.



Obr. 4. Experimentálne pracovisko



Obr. 5. Začiatok strižného procesu



Obr. 6. Strižná plocha vzorky pri bežnom strihaní



Obr. 7. Meranie drsnosti plochy vzorky po integrovanom strihaní

Tab. 1. Drsnosť výsledných plôch po integrovanom strihaní sklonenou hranou

Drsnosť [µm]	Oceľ					
	Š1		Š2		Š3	
	Norm.	Integr.	Norm.	Integr.	Norm.	Integr.
R_a	5,067	0,443	4,244	0,400	4,244	0,400
R_z	28,486	2,687	23,573	2,820	23,573	2,820
R_p	13,425	1,240	11,644	1,647	11,644	1,647
R_t	38,751	3,468	38,125	4,268	38,125	4,268
R_{z1max}	35,123	3,444	38,125	3,965	38,125	3,965
R_{pk}	5,703	0,410	7,102	0,612	7,102	0,612

Tab. 2. Drsnosť výsledných plôch po integrovanom strihaní rovnobežnou hranou

Drsnosť [μm]	Oceľ					
	R1		R2		R3	
	Norm.	Integr.	Norm.	Integr.	Norm.	Integr.
R_a	4,169	0,300	3,887	0,444	4,410	0,319
R_z	23,732	2,117	22,064	3,884	25,336	2,281
R_p	11,524	0,944	11,202	1,584	11,362	0,962
R_t	39,225	2,723	32,057	7,957	48,445	4,545
R_{z1max}	35,578	2,715	29,352	7,421	48,445	4,172
R_{pk}	6,020	0,328	4,427	0,881	5,628	0,385

Ako dôležitý parameter bola vyhodnotená drsnosť plôch po integrovanom strihaní. Spôsob merania je na obr. 7. Meranie a vyhodnotenie bolo urobené podľa Normy EN ISO 4287.

Z nameraných výsledkov je zrejmé, že druhý klin na strižníku spoľahlivo zabezpečil dôkladné obrobenie výslednej plochy strihu, čo bolo cieľom príspevku.

ZÁVER

Možno zhrnúť, že v príspevku išlo o pohyb medzi klasickými technológiami tvárnenia a novými možnosťami aplikácie iných spôsobov tvárnenia, ktoré sa dali realizovať v konkrétnych podmienkach. Cieľom bolo prednostne overiť vhodnosť uvedeného riešenia v oblasti plošného tvárnenia kovov, čím je presne vymedzená oblasť nášho výskumu.

LITERATÚRA

[1] MARCINIAK, Z. - DUNCAN, J. L. - HU, S. J. (2004): *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Butterworth-Heinemann Jordan Hill, Oxford, 211 p., ISBN 0-7506-5600-0.

[2] HRIVŇÁK, A. - EVIN, E. - SPIŠÁK, E. (1985): *Technológia plošného tvárnenia*. Bratislava.

[3] MORAVEC, J. (2015): *Teória tvárnenia kovov*. EDIS - vyd. UNIZA, ISBN 978-80-554-1095-1, Žilina.

[4] MORAVEC, J. (2000) :*Strihanie technických materiálov*. EDIS – vyd. UNIZA, ISBN 80-7100-705-6, Žilina.

[5] BOLJANOVIC, V. (2005): *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. ISBN 0-8311-3182-9.

[6] *Metal Forming, Mechanics and Metallurgy*, Cambridge: University Press, ISBN 978-1-107-00452-8.

[7] KUNDAR, S. (2004): *Technology of Metal Forming Processes*. ISBN 978-81-203-3425-0.

[8] LANGE, K. (2004): *Lehrbuch der Umformtechnik*. Berlin: Springer- Verlag Berlin, 496 p. ISBN 978-35400-5197-8.

[9] MARCINIAK, Z. (1984): *Theorie der Blechformung*. Praha: STNL.

[10] PEARCE, R. (2010): *Sheet Metal Forming*. ISBN 0-7503-0101-5.

Vplyv Sr, Zr a Mo na vybrané vlastnosti AlSi5Cu2Mg zliatiny

Martina Sýkorová, Ing.*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: martina.sykorova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2771

Dana Bolibruchová, prof. Ing., PhD.

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: danka.bolibruchova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2772

Lukáš Širanec, Ing.

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: lukas.siranec@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2771

Effect of Sr, Zr, and Mo addition on selected properties of AlSi5Cu2Mg alloy

Abstract: Hypoeutectic *AlSi5Cu2Mg* alloy is a relatively new alloy that finds application in the production of high-stress cylinder head castings. This work focuses on the investigation of the solubility of the additive elements *Sr*, *Zr*, and *Mo* in *AlSi5Cu2Mg* alloy. The main objective of the work was to characterize the influence of the additive elements on selected properties of the experimental alloy *AlSi5Cu2Mg* with respect to the melting method of the additive elements. The additive elements *Sr*, *Zr*, and *Mo* were introduced into the melt in the form of *AlSr10*, *AlZr20*, and *AlMo10* master alloys were melted in 2 ways in an electric resistance furnace and an electric induction furnace. Depending on the melting method, the experimental alloys were designated *Sr-Z*, *Zr-Z*, *Mo-Z* (electric resistance furnace), and *Sr-I*, *Zr-I*, and *Mo-I* (electric induction furnace). The results showed that the presence of *Sr*, *Zr*, and *Mo* in the *AlSi5Cu2Mg* alloy led to a negative increase in the area fraction of porosity and a decrease in the physical properties, regardless of the melting method of the master alloys. Based on the summarized results, it was shown that the experimental alloys *Sr-I*, and *Sr-Z* did not show a significant increase in mechanical properties. A negative effect on the selected mechanical properties was noted by the experimental alloy *Zr-Z*. The most favourable combination of mechanical properties was obtained by the experimental alloys *Mo-I* and *Zr-I*.

Keywords: *AlSi5Cu2Mg*, solubility, zirconium, strontium, molybdenum.

ÚVOD

Al-Si-Cu-Mg zliatiny tvoria takmer 90 % z celkového množstva odliatkov používaných v automobilovom priemysle. Špecifická pevnosť, dobré zlievarenské vlastnosti a výhodná kombinácia mechanických a fyzikálnych vlastností umožňujú ich rozsiahle použitie v automobilovom priemysle. Významné uplatnenie nachádzajú v oblasti v produkcie odliatkov hláv valcov. Hliníkové zliatiny na báze *Al-Si-Cu-Mg*, ktoré sú konvenčne používané pre výrobu vysokonamáhaných odliatkov pre automobilový priemysel sú však výrazne limitované prevádzkovou teplotou 200 °C. Vo všeobecnosti sú mechanické a fyzikálne vlastnosti *Al-Si-Cu-Mg* zliatin limitované tepelnou stabilitou fáz bohatých na *Cu* a *Mg*. [1-2]

Nenormalizovaná *AlSi5Cu2Mg* zliatina nachádza významné uplatnenie v oblasti produkcie odliatkov hláv valcov. Zliatina *AlSi5Cu2Mg* je pomerne nová zliatina, ktorá sa vo výrobe uplatnenie relatívne krátky čas. V porovnaní s konvenčne používanými zliatinami *Al-Si-Cu-Mg* na odliatky hláv valcov je *AlSi5Cu2Mg* významná nízkym hm. % *Si* a *Ti*. Pre efektívne očkovanie podeutektických hliníkových zliatin je nutné pridať 0,04 až 0,1 hm. % *Ti*. V dôsledku limitovaného obsah *Ti* (max. 0.03 hm. % *Ti*) nedochádza k dostatočnému očkovaciemu účinku. [3] Cieľom výskumu bolo analyzovať rozpustnosť prísadových prvkov *Sr*, *Zr* a *Mo* na plošný podiel pórovitosti, mikroštruktúru, mechanické a fyzikálne vlastností podeutektickej zliatiny *AlSi5Cu2Mg*.

V práci bola skúmaná rozpustnosť prísadových prvkov *Sr*, *Zr* a *Mo* v zliatine *AlSi5Cu2Mg* vzhľadom na vopred zvolený spôsob tavenia. Experimentálna práca bola uskutočnená s cieľom rozšíriť poznatky o zliatine *AlSi5Cu2Mg*, ktorá sa vo výrobe uplatňuje relatívne krátky čas a dostupné informácie o nej sú len minimálne.

1 METODIKA A REALIZÁCIA EXPERIMENTOV

Pre experimentálnu prácu bola zvolená podeutektická hliníková zliatina *AlSi5Cu2Mg*, ktorá nachádza uplatnenie v oblasti produkcie vysoko namáhaných odliatkov hláv valcov. Chemické zloženie experimentálnej zliatiny *AlSi5Cu2Mg* je uvedené v Tab.1. Na základe chemického zloženia zliatiny *AlSi5Cu2Mg* možno deklarovať, že zliatina bola výrobcom dodávaná v predmodifikovanom stave, o čom svedčí prítomnosť *Sr*.

Tab. 1. Chemické zloženie experimentálnej zliatiny *AlSi5Cu2Mg*

Chemické zloženie [hm. %]		
<i>Si</i>	<i>Cu</i>	<i>Mg</i>
5,400	1,850	0,290
<i>Mn</i>	<i>Sr</i>	<i>Mo</i>
0,030	0,008	0,0006
<i>Ti</i>	<i>Mn/Fe</i>	<i>Al</i>
0,010	0,090	zvyšok

Zliatina *AlSi5Cu2Mg* bola roztavená v elektrickej odporovej peci. Experimentálne zliatiny boli získané legovaním 0,12 hm. % *Sr*, 0,20 hm. % *Zr* a 0,15 hm. % *Mo*. Prísadové prvky *Sr*, *Zr* a *Mo* boli vnášané do taveniny pri teplote $770\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ vo forme predzliatin *AlSr10*, *AlZr20* a *AlMo10*. Predzliatiny *AlSr10*, *AlZr20* a *AlMo10* boli tavené 2 rôznymi spôsobmi. Prvý spôsob spočíval v pridaní predzliatiny do taveniny roztavenej v elektrickej odporovej peci pri teplote tavenia. Experimentálne zliatiny boli v tomto prípade označené nasledovne *Sr-Z*, *Zr-Z* a *Mo-Z*. Druhý spôsob pozostával z roztavenia predzliatiny v elektrickej indukčnej peci a následnom

vnášaní roztavenej predzliatiny do taveniny. V druhom prípade boli experimentálne zliatiny označené *Sr-I*, *Zr-I* a *Mo-I*. Chemické zloženie experimentálnych zliatin je uvedené v tab. 2. Experimentálne vzorky boli odlievané technológiou gravitačného odlievania do kovovej formy. Teplota odlievania bola stanovená na $740\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Experimentálna zliatina nebola v procese prípravy ďalej modifikovaná a odplynená.

Experimentálne vzorky boli podrobené hodnoteniu plošného podielu pórovitosti. Plošný podiel pórovitosti bol hodnotený grafickým softvérom *Quick Photo Industrial 3.1*. Na každej experimentálnej vzorke bolo hodnotených 5 náhodných miest.

Metodika stanovenia tepelnej vodivosti experimentálnych vzoriek bola založená na hodnotení konduktivity experimentálnych zliatin prostredníctvom meracieho zariadenia *Sigma Check 2*. Výpočet tepelnej vodivosti (λ) experimentálnych vzoriek bol uskutočnený dosadením hodnôt elektrickej vodivosti (σ) do empirického vzorca (1):

$$\lambda = 4,29 \cdot \sigma - 13,321 \left[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \right]. \quad (1)$$

Mechanické vlastnosti experimentálnych zliatin boli stanovené statickou skúškou ťahom. Skúška ťahom bola uskutočnená univerzálnym trhacím zariadením Inspekt desk 50 kN podľa normy *EN ISO 6892-1*. Pre každý experimentálny variant bola vyhotovená sada 5 skúšobných kruhových tyčí s priemerom drieku 8 mm.

Tvrdosť experimentálnych zliatin bola stanovená skúškou tvrdosti podľa Brinella podľa normy *STN EN ISO 6506-1*. Tvrdosť bola meraná tvrdomerom *Brinell Innovatest Nexus 3000* podľa predpisu *HBW 5/250/10* (vtlačacie teliesko - guľôčka z tvrdokovu o priemere 5 mm/veľkosť zaťaženia 250 kp/doba zaťaženia 10 s). Pre každý experimentálny variant bolo vykonaných 5 meraní.

Mikroštruktúra experimentálnych zliatin bola hodnotená optickým mikroskopom *Neophot 32*. Experimentálne vzorky boli pripravené ručným brúsením za mokra, leštením na leštiacich kotúčoch napustených diamantovou pastou a zvlhčovaných liehom a následne doleštené prostredníctvom plno

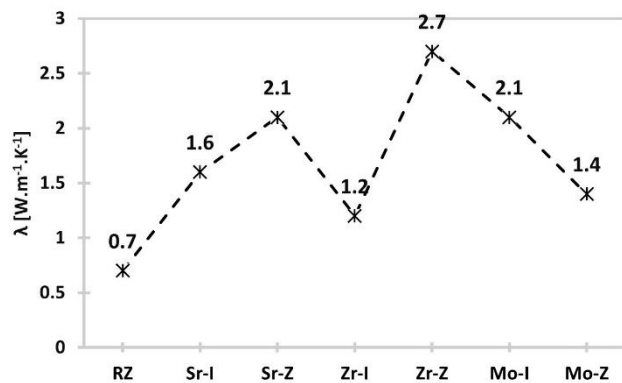
Tab. 2. Chemické zloženie experimentálnych zliatin

Exp. variant [hm.%]	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Sr</i>	<i>Zr</i>	<i>Mo</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>
<i>Sr-I</i>	5,74	0,11	1,89	0,13	0,0006	0,0006	0,01	zvyšok
<i>Zr-I</i>	5,59	0,12	1,89	0,008	0,18	0,0006	0,01	zvyšok
<i>Mo-I</i>	5,73	0,13	1,90	0,008	0,0006	0,12	0,01	zvyšok
<i>Sr-Z</i>	5,76	0,11	1,89	0,13	0,0006	0,0006	0,01	zvyšok
<i>Zr-Z</i>	5,43	0,13	1,88	0,009	0,19	0,0007	0,01	zvyšok
<i>Mo-Z</i>	5,70	0,12	1,99	0,007	0,0006	0,12	0,01	zvyšok

automatického leštiaceho zariadenia. Experimentálne vzorky určené na pozorovanie optickým mikroskopom boli leptané 0,5 % HF.

2 PLOŠNÝ PODIEL PÓROVISTI

Vplyv prísadových prvkov *Sr*, *Zr* a *Mo* na pórovitosť experimentálnej zliatiny *AlSi5Cu2Mg* bol definovaný plošným podielom pórovitosti. Plošný podiel pórovitosti experimentálnych zliatin bol vyhodnotený softvérom *Quick Photo Industrial 3.1*. Hodnoty plošnej pórovitosti experimentálnych zliatin v závislosti od prísadového prvku a spôsobu tavenia a vnášania prísadových prvkov do taveniny sú spracované do grafickej závislosti obr. 1. Hodnoty plošnej pórovitosti experimentálnych zliatin predstavujú priemer z 5 meraní uskutočnených v rôznych miestach metalografického výbrusu vzorky.



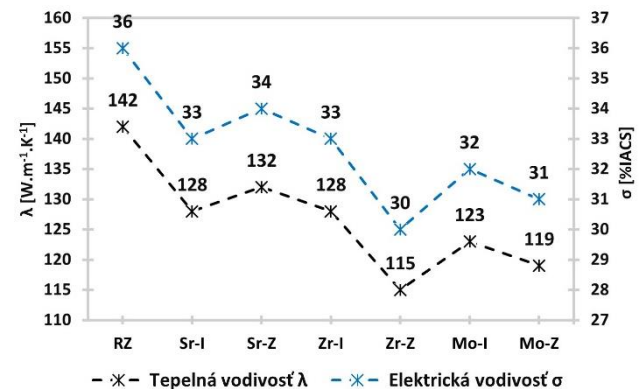
Obr. 1. Plošný podiel pórovitosti experimentálnych zliatin

Plošný podiel pórovitosti experimentálnych zliatin s prídavkom *Sr*, *Zr* a *Mo* podstatne vzrástol v porovnaní s referenčnou zliatinou *AlSi5Cu2Mg*. Najväčší nárast plošnej pórovitosti 285 % bol v porovnaní s referenčnou zliatinou zaznamenaný zliatinou *Zr-Z*. Naopak najmenší nárast plošnej pórovitosti 71 % bol zaznamenaný zliatinou *Zr-I* v porovnaní s referenčnou zliatinou. Plošná pórovitosť experimentálnych zliatin sa významne líši aj vzhľadom na spôsob tavenia a vnášania prísadových prvkov do taveniny. Plošná pórovitosť *Sr-I* a *Zr-I* podstatne klesla v porovnaní s plošnou pórovitosťou *Sr-Z* o 24 % a s *Zr-Z* takmer o 56 %. Pri hodnotení experimentálnej zliatiny s prídavkom *Mo* bol zaznamenaný opačný jav. Plošná pórovitosť *Mo-I* stúpla v porovnaní s *Mo-Z* približne o 34 %. Zvýšená pórovitosť zliatin *Sr-Z*, *Zr-Z* s *Mo-I* mohla byť vo významnej miere ovplyvnená metalurgickým procesom prípravy taveniny. Teplota tavenia a doba výdrže na danej teplote bola mierne zvýšená s cieľom zabezpečiť úplne roztavenie predzliatiny *AlSr10* a *AlZr20*. V prípade experimentálnej zliatiny *Mo-I* bola zvýšená doba výdrže taveniny na danej teplote s cieľom zabezpečiť úplne rozpustenie predzliatiny *AlMo10* v indukčnej odporovej peci. Tieto faktory mohli významne ovplyvniť hodnoty plošnej

pórovitosti experimentálnych zliatin. Pórovitosť negatívne ovplyvňuje výsledné mechanické a fyzikálne vlastnosti *Al-Si-Cu-Mg* odliatkov. Prítomnosť pórov blokuje prenos elektrónov prostredím. V dôsledku toho dochádza k nepriaznivému poklesu fyzikálnych vlastností odliatku a tým spojeným poklesom výkonu vysoko-namáhaných odliatkov hláv valcov.

3 FYZIKÁLNE VLASTNOSTI

Elektrická a tepelná vodivosť experimentálnych zliatin bola spracovaná do grafickej závislosti obr. 2.



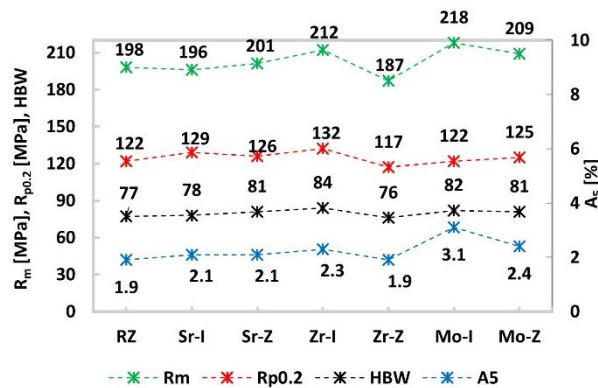
Obr. 2. Fyzikálne vlastnosti experimentálnych zliatin

Na základe zosumarizovaných výsledkov, možno preukázať, že vplyvom legujúcich prvkov *Sr*, *Zr* a *Mo* dochádza k poklesu fyzikálnych vlastností. Najväčší pokles fyzikálnych vlastností v priemere 18 % bol zaznamenaný *Zr-Z* v porovnaní s referenčnou zliatinou. Najmenší pokles približne 7 % v porovnaní s referenčnou zliatinou bol zaznamenaný *Sr-Z*. Elektrická a tepelná vodivosť experimentálnych zliatin s prídavkom *Sr* a *Mo* sa zásadne nemení v závislosti od spôsobu tavenia a vnášania prísadového prvku do taveniny. Naopak fyzikálne vlastnosti experimentálnej zliatiny *Zr-Z* klesli v porovnaní s *Zr-I* v priemere o 10 %.

Vo všeobecnosti platí, že každý legujúci prvok pridaný do hliníkovej zliatiny nepriaznivo vplyva na výsledné fyzikálne vlastnosti. Legujúce prvky blokujú pohyb elektrónov čím dochádza k poklesu fyzikálnych a elektrických vlastností hliníkovej zliatiny. Fyzikálne vlastnosti experimentálnych zliatin boli taktiež významne ovplyvnené prítomnou pórovitosťou. Pórovitosť odliatku závisí ako od množstva prítomného vodíka v tavenine tak od metalurgického procesu prípravy taveniny. Pre úplné roztavenie predzliatin *AlSr10*, *AlZr20* a *AlMo10* bolo nevyhnutné zvýšiť teplotu tavenia a predĺžiť dobu výdrže na danej teplote. Vykonané zmeny metalurgického procesu viedli k zvýšeniu pórovitosti experimentálnych zliatin. Póry pôsobia ako nečistoty a zamedzujú voľnému prestupu elektrónov prostredím, čím dochádza k poklesu fyzikálnych vlastností [4].

4 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Výsledné hodnoty mechanických vlastností sú znázornené na obr. 3 a predstavujú priemer z 5 meraní.



Obr. 3. Mechanické vlastnosti experimentálnych zliatin

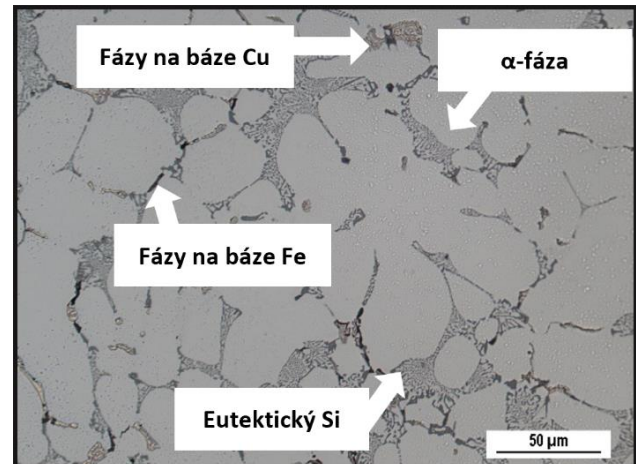
Hodnotenie mechanických vlastností bolo založené na porovnávaní mechanických vlastností experimentálnych zliatin *Sr-I*, *Sr-Z*, *Zr-I*, *Zr-Z*, *Mo-I* a *Mo-Z* s referenčnou zliatinou *AlSi5Cu2Mg*. Mechanické vlastnosti experimentálnych zliatin s prídavkom *Sr*, *Zr* a *Mo* boli taktiež hodnotené vzhľadom na spôsob tavenia a vnášania predzliatiny do taveniny.

Zliatiny s prídavkom *Sr* nevykazujú v porovnaní s referenčnou zliatinou významne zmeny mechanických vlastností. *Sr-I* vykazuje v porovnaní s *Sr-Z* zanedbateľný pokles R_m a HBW . Hodnota $R_{p0.2}$ naopak mierne vzrástla v porovnaní so zliatinou *Sr-Z*. Ťažnosť experimentálnych zliatin s prídavkom *Sr* bola totožná. Prídavok *Zr* do referenčnej zliatiny *AlSi5Cu2Mg* mal významnejší vplyv na výsledné mechanické vlastnosti. Mechanické vlastnosti *Zr-I* mierne vzrástli v porovnaní s referenčnou zliatinou, *Sr-Z*, *Sr-I*. Zliatinou *Zr-I* boli dosiahnuté najvyššie hodnoty $R_{p0.2}$ a HBW . V porovnaní s referenčnou zliatinou $R_{p0.2}$ a HBW vzrástla približne o 9%. Mechanické vlastnosti *Zr-Z* naopak klesli v porovnaní s referenčnou zliatinou *AlSi5Cu2Mg*, *Sr-Z*, *Sr-I* a zároveň došlo k významnému poklesu v porovnaní s *Zr-I*. Zliatinou *Zr-Z* boli zaznamenané najnižšie hodnoty R_m a $R_{p0.2}$, ktoré v porovnaní so zliatinou *Zr-I* klesli približne o 12%. Pokles mechanických vlastností *Zr-Z* zliatiny mohol byť zapríčinený zvýšenou mierou pórovitosti. Zliatiny s prídavkom *Mo* dosahovali najlepšie mechanické vlastnosti. Najväčší nárast R_m a A_5 bol v porovnaní s referenčnou zliatinou zaznamenaný *Mo-I*.

5 MIKROŠTRUKTÚRNA ANALÝZA

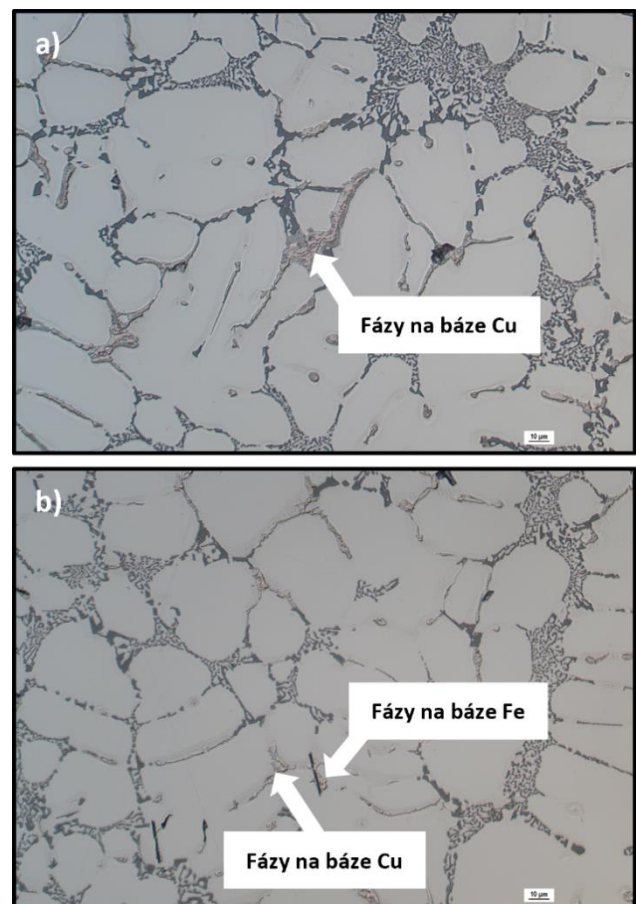
Mikroštruktúrna analýza vzoriek bola hodnotená prostredníctvom metódy optickej mikroskopie. Mikroštruktúra *AlSi5Cu2Mg* zliatiny je v liatom stave tvorená α -fázou, eutektickým *Si* a intermetalickými fázami na báze *Cu* a *Fe* ako možno vidieť na obr. 4.

V rovine metalografického výbrusu možno eutektický *Si* pozorovať vo forme nedokonale oblých zrn. Morfológia eutektického *Si* v liatom stave nemá v tomto prípade typický doskovitý tvar v dôsledku toho, že zliatina bola dodávaná v predmodifikovanom stave. Železité fázy boli vylúčené vo forme šedých dosiek s rozštiepeným zakončením. Intermetalické fázy bohaté na *Cu* boli v rovine metalografického výbrusu pozorované vo forme ternárneho eutektika kompaktnej morfológie [5, 6].



Obr. 4. Mikroštruktúra *AlSi5Cu2Mg* zliatiny v liatom stave

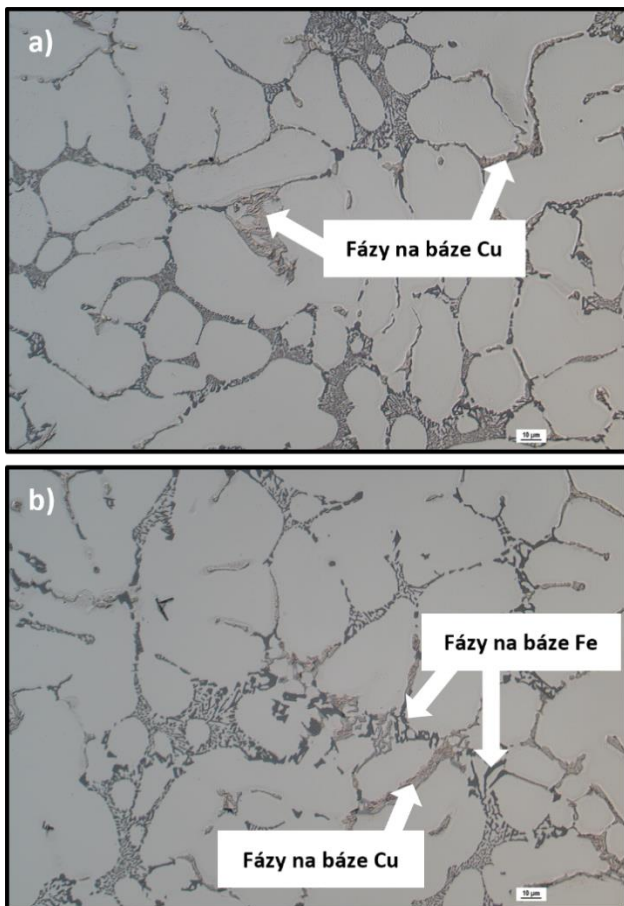
Mikroštruktúry experimentálnych zliatin *Sr-I* a *Sr-Z* v liatom stave možno vidieť na obr. 5.



Obr. 5. Mikroštruktúra experimentálnych zliatin: a) *Sr-I*, b) *Sr-Z*, lept. 0,5 % HF

V rovine metalografického výbrusu experimentálnych zliatin *Sr-Z* a *Sr-I* možno pozorovať zvýšenú koncentráciu intermetalických fáz bohatých na *Cu*. Eutektický *Si* je vylúčený vo forme takmer dokonale oblých zŕn v dôsledku modifikačného účinku *Sr*. V rovine metalografického výbrusu oboch experimentálnych zliatin boli prítomné intermetalické fázy na báze *Fe*.

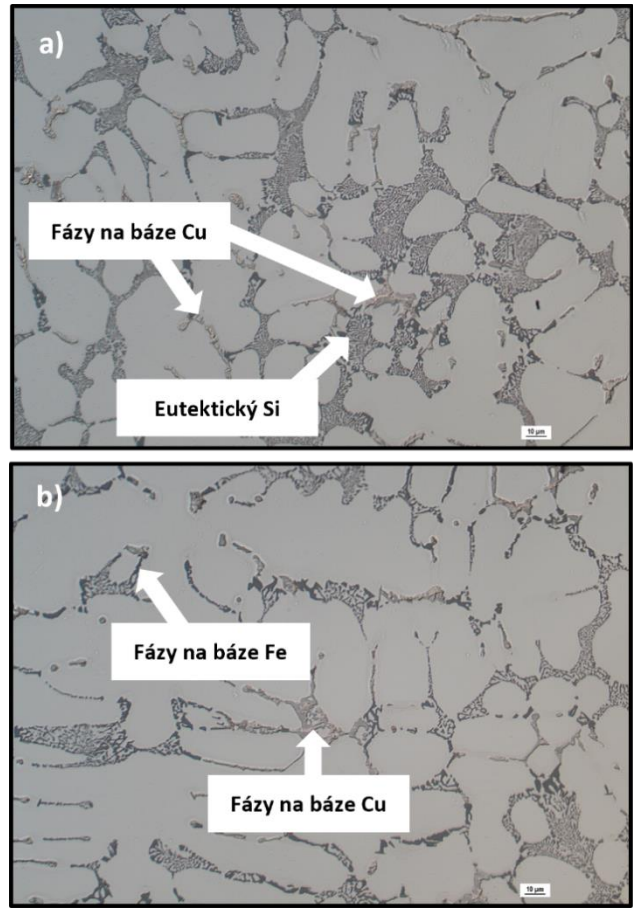
Mikroštruktúra experimentálnych zliatin *Zr-I* a *Zr-Z* je v liatom stave tvorená α -fázou, eutektickým *Si* a intermetalickými fázami bohatými na *Cu* a *Fe* ako možno vidieť na obr. 6. V rovine metalografického výbrusu experimentálnej zliatin *Zr-I* bola zaznamenaná zvýšená koncentrácia *Cu*. Naopak v rovine metalografického výbrusu *Zr-Z* zliatin prevládala prítomnosť tvrdých a krehkých intermetalických fáz na báze *Fe*. Intermetalické fázy na báze *Fe* je možné v rovine metalografického výbrusu pozorovať vo forme hrubých šedých dosiek. Zvýšená koncentrácia *Fe* mohla viesť k poklesu mechanických vlastností experimentálnej zliatin *Zr-Z*. Intermetalické fázy na báze *Zr* neboli prítomné v rovine metalografického výbrusu [7].



Obr. 6. Mikroštruktúra experimentálnych zliatin: a) *Zr-I*, b) *Zr-Z*, lept. 0,5 % HF

Mikroštruktúry experimentálnych zliatin *Mo-I* a *Mo-Z* v liatom stave sú zobrazené na obr. 7. V rovine metalografického výbrusu možno pozorovať intermetalické fázy na báze *Fe* a *Cu*. Experimentálna

zliatina *Mo-I* sa vyznačuje lokálnym zhrubnutím eutektického *Si*.



Obr. 7. Mikroštruktúra experimentálnych zliatin: a) *Mo-I*, b) *Mo-Z*, lept. 0,5 % HF

ZÁVER

Cieľom práce bolo rozšíriť poznatky o nenormalizovanej *AlSi5Cu2Mg* zliatine, ktoré sa v oblasti produkcie vysokonamáhaných automobilových komponentov používa relatívne krátky čas. Na základe nadobudnutých výsledkov možno konštatovať, že:

- pórovitosť experimentálnych zliatin *Sr-I*, *Sr-Z*, *Zr-I*, *Zr-Z*, *Mo-I* a *Mo-Z* v porovnaní s referenčnou zliatinou *AlSi5Cu2Mg* podstatne vzrástla v dôsledku zmeny metalurgického procesu prípravy taveniny s cieľom zabezpečiť úplne rozpustenie predzliatin *AlSr10*, *AlZr20* a *AlMo10*,
- fyzikálne vlastnosti experimentálnych zliatin klesajú v dôsledku prítomnosti prísadových prvkov *Sr*, *Zr* a *Mo*, taktiež mohli byť fyzikálne vlastnosti významne ovplyvnené zvýšenou pórovitosťou. Priaznivejšie fyzikálne vlastnosti boli dosiahnuté experimentálnymi variantmi *Sr-I* a *Zr-I*,
- výhodnejšia kombinácia mechanických vlastností bola dosiahnutá experimentálnymi variantmi *Sr-I*, *Zr-I* a *Mo-I*,

- mikroštruktúra experimentálnych zliatin v liatom stave bola tvorená α -fázou, eutektickým Si a intermetalickými fázami na báze Cu a Fe. Mikroštruktúrna analýza experimentálnych zliatin nepreukázala významne štruktúrne zmeny v závislosti od spôsobu tavenia predzliatin AlSr10, AlZr20 a AlMo10.

Pod'akovanie

Článok bol vytvorený v rámci projektu grantovej spoločnosti VEGA 1/0160/22. Autori ďakujú agentúre za podporu.

LITERATÚRA

- [1] JESIK, S. - TAEHYEONG, K. - DONGEUNG, K. - KITAE, K. (2017): *Castability and mechanical properties of new 7xxx aluminum alloys for automotive chassis/body applications*. In: Journal of Alloys and Compounds, Vol. 698, pp. 577-590, ISSN 0925-8388.
- [2] CZERWINSKI, F. (2020): *Thermal Stability of Aluminum Alloy*. In: Materials, 13(15), DOI: 10.3390/ma1315344.
- [3] BEROUAL, S. - BOUMERZOUG, Z. - PAILLARD, P. - BORJON-PIRON, Y. (2019):

Effects of Heat treatment and Addition of Small Amounts of Cu and Mg on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si-Cu and Al-Si-Mg Cast Alloys. In: Journal of Alloys and Compounds, Vol. 784, pp. 1026-1035, ISSN 0925-8388.

[4] VANDERSLUIJ, E. - EMADI, P. - ANDILAB, B. - RAVINDRAN, C. (2020): *The Role of Silicon Morphology in the Electrical Conductivity and Mechanical Properties of As-Cast B319 Aluminum Alloy*. In: Metallurgical and Materials Transactions, 51, pp. 1874-1886, DOI: 10.1007/s11661-020-05650-2.

[5] TILLOVÁ, E. - CHALUPOVÁ, M. (2009): *Štruktúrna analýza zliatin Al-Si*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, ISBN 978-80-554-0088-4.

[6] BOLIBRUCHOVÁ, D. - PASTIRČÁK, R. (2018): *Zlievarenská metalurgia neželezných kovov*. Žilina: EDIS – vydavateľské centrum ŽU, ISBN 978-80-554-1463-8.

[7] MOROZOVA, A. - MOGUCHEVA, A. - BUKIN, D. - LUKIANOVA, O. - KOROTKOVA, N. - BELOV, N. - KAIBYSHEV, R. (2017): *Effect of Si and Zr on Microstructure and Properties of Al-Fe-Si-Zr Alloys*. In: Metals, 7(11), DOI: 10.3390/met7110495.

Tvárnenie skla v jednoduchom tvárniacom nástroji

Ján Moravec, doc. Ing. PhD.

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1/8215 010 26 Žilina.

E-mail: jan.moravec@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2764, Fax.: + 421 41 525 2541

Glass forming in a simple forming tool

Abstract: The contribution presents the analysis and issues of glass forming in a forming tool with external heating. The necessary theoretical knowledge and properties of glass, which are necessary for solving the design of the forming tool, are listed. technological methods of glass forming are mainly press-blowing and forming with a double-blowing system. With the help of the described tool, glass can be relatively successfully shaped, which is inserted into the tool in the shape of a plate. The glass plate, which is bent into a cylindrical or hemispherical shape, is placed on the press and heated with a flame until the glass is sufficiently soft to work with.

Keywords: glass, forming tool, heating, construction, technology

ÚVOD

Pod pojmom tvárnenie skla sa rozumie jeho spracovanie v tepelnom intervale, kedy je sklo tvárne, teda má takú viskozitu, že je natoľko tekuté, že sa dá tvarovať do kvapky, a také tuhé, že ho už nemožno tvarovať bez mechanického poškodenia. Tento rozdiel viskozít je *interval spracovateľnosti* [1-4].

Pri tvárnení sa sklu súčasne odoberá teplo, čím jeho viskozita rastie tak, že tvarovaný predmet si ponechá konečný tvar. Pri obalovom skle je daný tento tvar ústnou a konečnou formou.

Najdôležitejšími faktormi pri tvarovaní z fyzikálneho hľadiska sú zmeny viskozity v závislosti od teploty a prestupu tepla v sklovine ako i prestupu tepla z nej do okolia (forma, voľná atmosféra).

Nasledujúci text sa zaoberá tvárnením skla v klasickom celokovovom nástroji pri použití vonkajšieho ohrevu. Tento spôsob tvárnenia skla sa dá použiť najmä v prevádzkach ktoré produkujú malé série sklenených výrobkov.

1 TEORETICKÁ ČASŤ

Sklo je anorganická hmota vyznačujúca sa svojimi osobitnými vlastnosťami, ktorá sa pri normálnej teplote javí ako tuhá látka. Je amorfná, tzn., že nemá kryštalickú štruktúru ako väčšina tuhých látok a k prechádzajúcemu svetlu sa správa vo všetkých smeroch rovnako (na rozdiel od kryštalických látok). Vo všeobecnosti sa sklo pokladá za podchladenú

kvapalinu. Základný skelet skla tvorí sieť atómov kremíka (*Si*) pospájaná kyslíkom (*O*).

Vo vnútri nepravidelných agregátov SiO_2 – oxidu kremičitého môžu byť atómy sodíka (*Na*), draslíka (*K*), vápnika (*Ca*), horčíka (*Mg*), atď. [4-6].

Sklo sa používa vo viacerých odvetviach priemyslu, napr. :

- v chemickom priemysle na chemické aparatúry, laboratórne pomôcky a pod.,
- v optickom priemysle na prizmy, šošovky a pod.,
- v elektrotechnickom a elektronickom priemysle na izolanty, lampy, elektrónky a špeciálne prvky,
- pri stavbe strojov a budov ako nosné prvky.

Laboratórne sklo, ako aj sklo na chemické armatúry má mať veľkú odolnosť proti chemikáliám a má byť tepelne odolné proti rýchlym zmenám teploty. Všeobecne sa rozdeľuje sklo do troch skupín v závislosti od koeficienta lineárnej rozťažnosti α :

- $\alpha = 70 \div 90 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ sklo odolné proti chemickým látkam,
- $\alpha < 50 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ sklo odolné proti zmenám teplot,
- $\alpha < 35 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ špeciálne sklá.

1.1 Vlastnosti skla

Podľa účelu použitia výrobkov zo skla je nutné zvoliť vhodné chemické zloženie skla, aby sa zvýraznili požadované tepelné, chemické a mechanické vlastnosti vyrábaného skla.

Vlastnosti skla sa delia na:

1. *Tepelné.*

2. *Mechanické.*
3. *Chemické.*
4. *Elektrické.*
5. *Optické.*

1.1.1 Tepelné vlastnosti

Najdôležitejšie tepelné vlastnosti sú:

- *viskozita,*
- *teplotná odolnosť.*

1.1.2 Viskozita

Rozlišuje sa dynamická a kinetická viskozita. Pre výrobu je dôležitejšia dynamická viskozita, ktorá je základnou vlastnosťou skiel a prejavuje sa pri všetkých štádiách výroby skla, t. j. pri tavení, čírení, spracovaní - tvarovaní a chladení.

Všeobecne je viskozita vnútorný odpor tekutín, ktorý bráni jednotlivým vrstvám v pohybe. :

Rozmerovou jednotkou pre η je dPa·s (dekapascalsekunda).

Viskozita skla sa v závislosti od teploty zobrazí viskóznou krivkou, ktorá je charakteristická pre každé sklo. Sklo je v určitom teplotnom intervale tvárne. Ak sa mu odoberá teplo, sklo tuhne, stúpa odpor voči pohybu vrstiev, jeho viskozita stúpa - zvyšuje sa, až tvarovaný predmet si uchová svoj konečný tvar. Závislosť viskozity na teplote je nepriamoúmerná, t. j. čím je vyššia teplota, tým nižšia je viskozita a opačne.

Rozdiel, resp. zmena viskozity, keď je sklo tak tekuté, že ho možno tvarovať do kvapky a keď sklo je už také tuhé, že ho nemožno tvarovať bez mechanického poškodenia sa nazýva „*interval spracovateľnosti.*“

Interval spracovateľnosti je veľmi dôležitým parametrom každého skla.

1.1.3 Teplotná odolnosť

Teplotná odolnosť sa udáva rozdielom teplôt - maximálnej, na ktorú sa výrobok vyhreje a minimálnej, na ktorú sa výrobok schladí (prudko). Označuje sa Δt (°C).

Na teplotnú odolnosť vplýva viacero činiteľov. Závisí jednak od vlastností skla ako materiálu, ale tiež od vlastného výrobku (tvar, hrúbka steny, stav povrchu, veľkosť výrobku). Tiež od výrobných podmienok (vychladenie homogenita, kvalita povrchu). Chemické zloženie, resp. jeho zmena nemá podstatný vplyv na teplotnú odolnosť.

1.1.4 Mechanické vlastnosti skla

Medzi mechanické vlastnosti skla patria:

- a) mechanická pevnosť v ťahu a tlaku,
- b) mechanická pevnosť v ohybe - pružnosť,
- c) tvrdosť,

- d) krehkosť,
- e) odolnosť voči vnútornému pretlaku,
- f) odolnosť voči nárazu.

1.1.5 Chemické vlastnosti

Pre obalové sklo je dôležitá odolnosť voči vode. Vo všeobecnosti sklá sa zatriedujú do päť hydrolytických tried. Obalové sklo musí vyhovovať podmienkam tretej hydrolytickej triedy. Pôsobením vody, atmosférickej vlhkosti, kyselín a zásad dochádza k rozrušovaniu povrchových vrstiev skla a tým k zhoršovaniu pevnosti, resp. za určitých okolností až k znehodnoteniu obsahu. Pre dosiahnutie požadovanej 3. hydrolytickej triedy je nutné dodržiavať určité chemické zloženie skla a hlavne udržiavať minimálne 1,4 % Al_2O_3 v skle.

1.1.6 Elektrické vlastnosti skla

Sklo je v tuhom stave nevodič a správa sa ako izolant. V roztavenom stave vedie elektrický prúd a má vlastnosti elektrického vodiča. Toto sa využíva pri celoelektrickom tavení alebo na tzv. elektrické príhrevy, ktorými sa zvyšuje výkon taviacich agregátov a zabezpečuje sa homogenizácia skloviny [3].

1.1.7 Optické vlastnosti skla

V podmienkach výroby skla ide o farebnosť jednotlivých druhov skiel. Farebnosť odtieňov skla sa porovnáva voči referenčným vzorkám alebo sa vyhodnocuje na spektrofotometri.

2 TVÁRNENIE SKLA

2.1 Prestup tepla pri tvarovaní

Odoberaním tepla sklu pri jeho súčasnom tvarovaní sa zvyšuje jeho viskozita natoľko, že si predmet zachová svoj konečný tvar. Na rýchlosť chladnutia, teda i tvarovania, má preto značný vplyv práve prestup tepla zo skla do tvarovacích foriem. Prestup tepla je vedením a sálaním. Na prestup tepla má veľký vplyv tepelná vodivosť daného skla a táto je určovaná jeho chemickým zložením. Podiel zložky SiO_2 (piesok) zvyšuje tepelnú vodivosť, podiel zložiek Na_2O , K_2O (alkálie) túto znižuje.

2.2 Tvarovanie skla lisofúkaním

Podstatou tohoto systému tvarovania spočíva v tom, že tvarovanie ústia sa robí v prvej operácii lisovaním pri súčasnom vylisovaní tzv. banky predného tvaru. Prenesením tohoto predného tvaru s už hotovým vylisovaným ústím sa v druhej operácii tlakom vzduchu vyfukuje konečný tvar. Banka predného tvaru pri vyfukovaní v konečnej forme je zavesená pritom za už hotové ústie. Ďalšou operáciou je odnímanie výrobku z konečnej formy na odkládku,

kde dochádza k ochladeniu tak, aby sa tento pri doprave do chladiacej pece už nedeformoval. Takto je možné tvarovať obalové sklo buď v jedno alebo dvojkvapke, v zahraničí pracujú už stroje v trojkvapke. Lisofúkacím systémom sa zväčša vyrába širokohrdlové sklo, no vyrábajú sa i fľaše. Oproti dvakrát fúkaciemu systému je pri fľašiach vyrábaných lisofúkacím spôsobom dosiahnuté lepšie rozdelenie skloviny.

Tvarovanie lisofúkacím spôsobom je náročnejšie ako dvakrát fúkacím a preto musia byť dodržiavané najmä tieto zásady:

- optimálny tvar kvapky,
- správna konštrukcia foriem,
- bezchybná doprava kvapiek po sklloch,
- stabilita teploty kvapky,
- optimálne mazanie foriem,
- vhodné chladenie foriem, najmä ústnej formy a tvárnika.

2.2 Tvarovanie dvakrát fúkacím systémom

Pri tomto systéme tvarovania na rozdiel od lisofúkacieho, sa ústne v prvej operácii tvaruje pôsobením tlaku vzduchu priamo. Kvapka dopadá do prednej formy na ústnik, pričom vzápätí na to pôsobí záfukom a tlakom na sklovinu vytvára ústie. Takto je možné tvarovať iba tzv. úzkohrdlové sklo (fľaše). Ďalší proces tvarovania je zhodný s lisofúkacím.

2.3 Povrchové javy pri tvarovaní

Pri tvarovaní sa vytvára povrch skla, ktorý je najdôležitejšou časťou výrobku. Pri technológii pracujúcich bez tvarovacieho nástroja sú problémy s kvalitou povrchu podstatne menšie a majú špecifický charakter, ako pri technológii používanej tvarovacím nástrojom.

Mikro-geometria povrchu skla, alebo primárna geometria povrchu skla je jemná štruktúra povrchu, ktorá vznikla priamym otláčkam povrchu tvarovacieho nástroja. Dá sa pozorovať lupou alebo mikroskopom, možno ju merať ako drsnosť povrchu a hodnotiť ako strednú drsnosť R_a , možno snímať profilogramom povrchu.

Pri kontakte skla a formy dochádza k otláčku drsnosti formy do povrchu skla, v ideálnom prípade je drsnosť skla rovnaká, ako drsnosť formy. V praxi je ale menší, lebo nemusí dôjsť k dokonalému kontaktu (vplyv viskozity, pracovného tlaku a prípadného vyhladenia formy vrstvou mazadiel) a po skončení kontaktu skla a kovu môže dôjsť k termickej nivelizácii povrchu skla. Rozdiel nie je podstatný, pri väčšine výrobkov tvarovaných v dotyku s kovom zostáva na povrchu veľmi jemný otlak nástroja, ktorý dovolí napr. spôsob čistenia formy a v mnohých prípadoch a ich materiál

(oceľ alebo liatina). Pri lisovaných, nepálených výrobkoch je drsnosť skla asi 70 % ÷ 100 % drsnosti formy, pri fľašiach a liateho skla asi 10 % ÷ 30 %.

Dôležitou hodnotou je požiadavka na povrchovú drsnosť výrobku. Pri úžitkovom skle (lisované sklo a podobne), ktoré môže bez ďalšieho mechanického alebo chemického opracovania napodobniť brúsené sklo sa vyžaduje lepšia drsnosť ako $R_a = 0,1 \mu\text{m}$. To znamená, že i tvarovacie nástroje musia byť leštené na drsnosť neprekračujúcu $R_a = 0,1 \mu\text{m}$. Bežné lisovacie výrobky majú povrchovú drsnosť okolo 0,2 μm , hodnotu $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ a sú teda nevyhovujúce.

2.3.1 Druhy skla a prísady

Portachróm sa používa do zeleného skla. Služi ako surovina na vnášanie farbiacej zložky do skla, oxidu chromitého (Cr_2O_3).

Sklo pre elektrotechnický a elektronický priemysel sa vyhodnocuje podľa koeficienta lineárnej rozťažnosti, izolačných vlastností a konštanty dielektrickosti.

Kremičité sklá sú vyhotovované z čistého SiO_2 a majú veľmi malý koeficient lineárnej rozťažnosti $\alpha = 5 \cdot 10^{-7} \cdot \text{K}^{-1}$, dobrú prenikavosť svetelných lúčov a sú vysoko odolné proti lúhom a kyselinám. Používajú sa na optické prístroje a v laboratóriách.

Optické sklo sa vyznačuje optickou homogénnosťou a má rovnaký súčiniteľ lámavosti svetla. Mechanické vlastnosti spomínaných hmôt sú relatívne nízke.

Napríklad hranica pevnosti: $R_m = 30 \text{ MPa} \div 60 \text{ MPa}$.

Špeciálne druhy skla tvoria - kryštalické sklá, sitaly. Sitaly sú kremičité sklá s drobnou kryštalickou štruktúrou, ktorá od základu mení ich vlastnosti. Majú zvýšenú pevnosť, nie sú krehké ako sklo ani za tepla a sú schopné vydržať nárazové zaťaženie.

Na rozdiel od skla, ktoré so vzrastajúcou teplotou mäkne, sitaly si zachovávajú tvrdosť a pevnosť do teploty približne 600 °C. Podobne ako kovy majú zreteľný bod tavenia, kolísajúci podľa druhu sitalov v rozmedzí od 1200 °C do 144 °C.

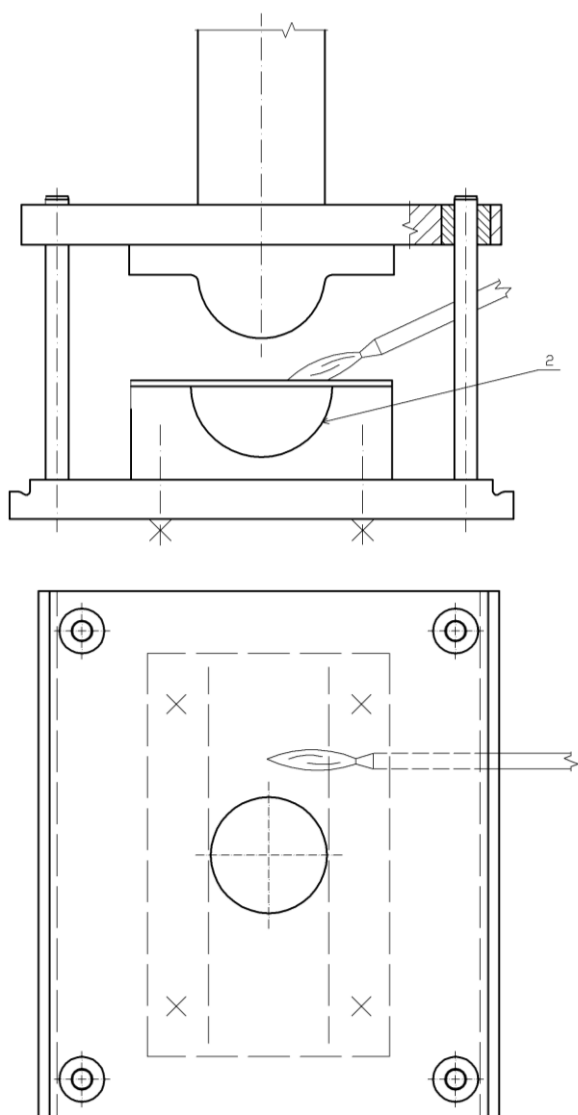
Hranica pevnosti v ťahu je $R_m = 400 \text{ až } 800 \text{ MPa}$, čo približne zodpovedá pevnosti uhlíkových ocelí a vysokopevných liatin. V laboratórnych podmienkach boli vyhotovené sitaly s pevnosťou v ťahu 1 GPa a 1,5 GPa.

Spájanie skla s kovovým materiálom prináša niektoré problémy - najmä v elektrotechnike. Pri spojení skla s kovom je žiaduce, aby sa koeficient lineárnej rozťažnosti kovu α_k veľmi nelíšil od skla α_s , pričom sa vyžaduje, aby v mieste spoja nevznikli v skle veľké napätia. Pevnosť skla v tlaku je podstatne vyššia ako v ťahu, musia sa dodržať tieto nerovnosti:

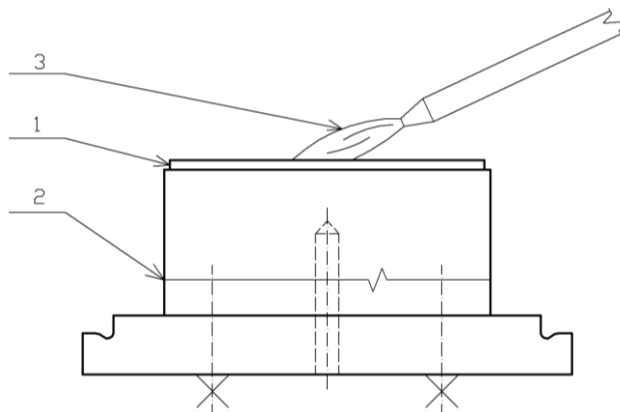
- a) keď sklo obopína kov, platí $\alpha_s > \alpha_k$,
- b) keď kov obopína sklo, platí $\alpha_s < \alpha_k$,
- c) keď sa sklo spája s kovom natupo $\alpha_s < \alpha_k$.

3 TVÁRNIENIE SKLA V NÁSTROJI

Pomocou nástroja na obr. 1 sa dá vhodne tvárniť sklo, ktoré sa vkladá do nástroja v tvare platničky. *Sklená doska* 1 ktorá sa ohýba do valcového alebo polguľového tvaru (za istých podmienok sa dá v nástroji urobiť aj hlboké ťahanie nádoby zo skla), sa položí na *lisovnicu* 2 a zahrieva plameňom zo zdroja 3 do stavu, kedy je sklo primerane mäkké na prácu [2, 3]. Po tvárnení skla do požadovaného tvaru za niekoľko sekúnd po jeho stvrdnutí sa *výtvarok* opatrne vyberie (*prísavkou*) a pomaly sa chladí voľne na vzduchu. Tento spôsob možno hodnotiť ako návrat k tzv. zabudnutým technológiám, ktoré niekedy môžu pomôcť preklenúť obdobie výpadku primárnej technológie a dokážu určitý čas pracovať ako náhradná technológia. Ekonomický rozbor a porovnanie jednoznačne ukáže vhodnosť použitia tohto krátkodobého spôsobu tvárnenie skla, najmä pri malosériových objednávkach [3].



Obr. 1. Tvárniaci nástroj na tvárnenie skla s pomocou vonkajšieho ohrevu



Obr. 2. Tvárnenie skla v nástroji: 1 – sklo, 2 – lisovnica, 3 –vonkajší ohrev horákom

ZÁVER

V príspevku bolo poukázané na problematiku tvárnenia skla v malej firme produkujúcej nízke série sklenených výrobkov. Prínosom riešenia je jeho nenáročnosť a operatívnosť možnosti jeho aplikácie ako náhradnej technológie.

LITERATÚRA

- [1] MORAVEC, J. - BILÍK, J. (2016): *Tvárniace stroje a nástroje*. EDIS vydavateľstvo ŽU v Žiline, ISBN 978-80-8070-812-2.
- [2] MORAVEC, J. (2006): *Prúdenie a hydrodynamika toku skloviny*. In: *Hydraulika a pneumatika*, roč. VIII., číslo 3-4/,str.27-29, ISSN 1335-5171.
- [3] Kolektiv: *250 technologických novinek*, svazek 12. Práce, Praha.
- [4] SMETANA, J. (1977): *Hydraulika 1*. Nakladatelství ČSAV Praha.
- [5] SKARBINSI, M. - SKARBINSKI, J. (1982): *Technologickosť konštrukcie strojov*. Alfa Bratislava.
- [6] MAŠTOVSKÝ, O. (1974): *Hydromechanika*. SNTL, SVTU Bratislava.

Oxidické vrstvy a bifilmy v odliatkoch hliníkových zliatin

Marek Galčík, Ing.*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: marek.galcik@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2771

Marek Brúna, doc. Ing., PhD.

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: marek.bruna@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2756

Oxide layers and bifilms in aluminium alloy castings

Abstract: Surface of aluminium alloy melt is covered by an oxide layer when it is in contact with the surrounding atmosphere. When the oxide layer is retained on the surface of the melt it prevents the melt by hydrogen saturation. The oxide layer is harmful when it is submerged into the melt. The work focuses on the influence of the melt velocity on the bifilm formation, morphology of oxide layers and their influence on the porosity and filling the mold cavity.

Keywords: oxide layer, bifilm, aluminium alloy casting

ÚVOD

Kvalita použitého vstupného materiálu ako aj kvalita pripravenej taveniny významne vplýva na kvalitu odliatkov. Tesne pred odliavaním sa musí pripravená tavenina skontrolovať a v prípade potreby upraviť tak, aby spĺňala aspoň minimálne požiadavky na jej kvalitu a malo by sa z nej odstrániť čo najviac nečistôt. S cieľom minimalizovať množstvo vnútorných chýb v odliatkoch, je potrebné pripraviť vysokokvalitný tekutý kov. Za vysokokvalitný tekutý kov sa považuje kov, ktorý neobsahuje nečistoty. Predovšetkým ide o dvojité oxidické vrstvy, ako aj o prvky roztvárajúce tieto vrstvy. V zliatinách hliníka sú takýmito prvkami železo, vodík a iné plyny. Východiskom na dosiahnutie čistej a kvalitnej taveniny je kvalita vstupného materiálu, z ktorého sa tavenina pripravuje. Keďže sa na tavenie používa kombinácia primárnych zlievarenských zliatin a sekundárnych zlievarenských zliatin vyrobených pretavením materiálu, treba dbať na zvýšenie obsahu železa v tavenine, čo vedie k zvýšenému množstvu škodlivých intermetalických fáz. Z výskumov posledných rokov vyplýva, že prítomnosť reoxidačných procesov a tvorba dvojitých oxidických vrstiev sa považuje za kľúčový problém ovplyvňujúci konečnú kvalitu odliatkov z hliníkových zliatin. Preto je dôležité pochopiť príčiny a mechanizmy ich vzniku, čo umožní eliminovať ich určité množstvo

počas procesu odliavania pomocou vhodného technologického riešenia [1-3].

1 VPLYV RÝCHLOSTI TAVENINY NA VZNIK DVOJITÝCH OXIDICKÝCH VRSTIEV

Rýchlosť prúdenia taveniny patrí medzi najdôležitejšie parametre počas plnenia vtokovej sústavy, ktoré vplývajú na výslednú kvalitu odliatku. Čelo prúdu taveniny nesmie mať príliš veľkú rýchlosť. Kritická rýchlosť čela prúdu pre väčšinu kovov používaných v strojárskom priemysle (ako oceľ, Mg, Cu, Zn, Al a Ni zliatiny) je v rozsahu 0,4 až 0,6 m·s⁻¹ (tab. 1). Výskumy ukázali, že pre každý tekutý kov existuje jeho kritická rýchlosť, nad ktorou bude dochádzať na povrchu taveniny k turbulenciám, čoho výsledkom bude prekladanie oxidických vrstiev na seba a ich následné strhávanie do objemu taveniny. Pre výpočet kritickej rýchlosti možno použiť vzťah 1 [3]:

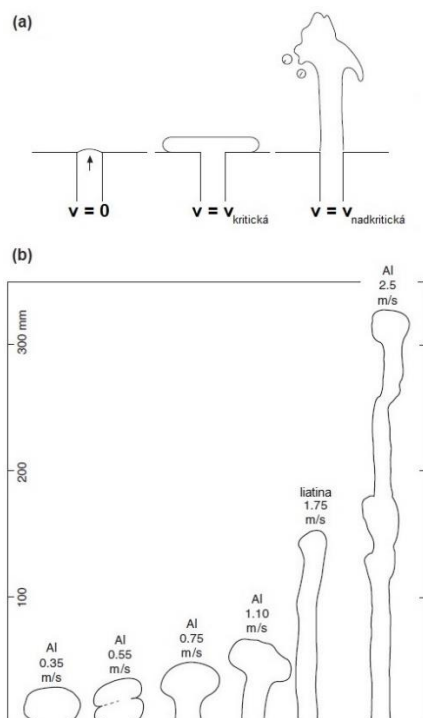
$$v_{krit} \approx 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{\gamma \cdot g}{\rho}} \approx 3,54 \cdot \sqrt[4]{\frac{\gamma}{\rho}}, \quad (1)$$

kde γ je povrchové napätie [N·m⁻¹],
 g je gravitačné zrýchlenie [m·s⁻²],
 ρ je hustota taveniny [kg·m⁻³] [3].

Hodnota rýchlosti $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pre taveninu hliníkovej zliatiny sa považuje za kritickú rýchlosť, čo bolo dokázané experimentálne Runyorom a kol. v roku 1992, kedy pozorovali rýchlosť taveniny hliníkovej zliatiny vystupujúcu zo zárezu. Už pri rýchlosti $0,55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ kov vstupujúci do dutiny formy vystrekol do malej výšky, padal a vytvoril prvý záhyb. Vyššie rýchlosti taveniny dosahovali veľkej výšky rozstreku (obr. 1), čo viedlo k pádu taveniny z tejto výšky a následnému prekladaniu a strhávaniu veľkého množstva oxidických vrstiev do objemu taveniny [2, 4, 5].

Tab. 1. Kritické rýchlosti niektorých tekutých kovov [2]

Tavenina	Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Povrchové napätie [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]	Kritická rýchlosť [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
Ti	4110	1.65	0,5
Al	2385	0.914	0,5
Mg	1590	0.559	0,42
Fe	7015	1.872	0,45
Ni	7905	1.778	0,43
Cu	8000	1.285	0,4
Zn	6575	0.782	0,37



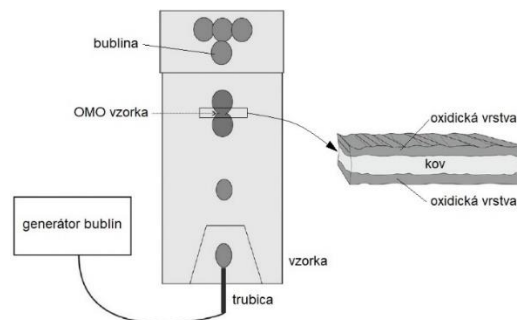
Obr. 1. Rýchlosť taveniny vstupujúcej do dutiny formy: a) pri nulovej, kritickej a nadkritickej rýchlosti, b) experimentálne pozorovanie taveniny vstupujúcej do dutiny formy rôznymi rýchlosťami [2]

Ak sa predpokladá kritická rýchlosť $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tak výška odlievania taveniny, pri ktorej tavenina dosiahne kritickú rýchlosť je 12,7 mm. Vystupujúca tavenina cez zárez s hodnotou rýchlosti menšou ako $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ naplní dutinu formy pokojne bez prekladania

povrchových oxidických vrstiev. Tieto turbulencie by sa nemali zamieňať s objemovými turbulenciami, pretože pri väčšine metód odlievania sa dosahuje *Reynoldsove číslo* omnoho väčšie ako 2000, aj keď nedôjde k rozbitiu povrchu turbulentným prúdením [3].

2 MORFOLÓGIA OXIDICKÝCH VRSTIEV

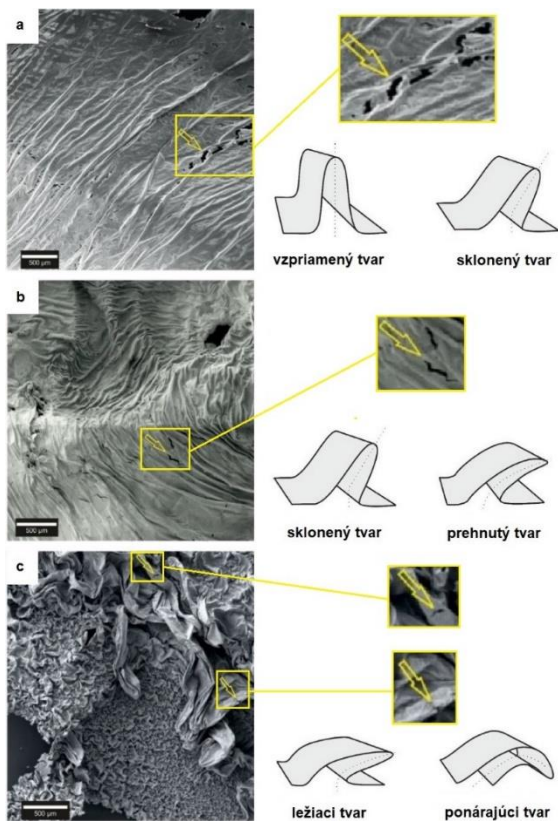
Povrch oxidickej vrstvy obsahuje množstvo záhybov, ktoré sú charakteristickým morfológickým znakom prítomnosti oxidickej vrstvy. Spôsob prekladania vrstiev bol pozorovaný v závislosti od chemického zloženia na zliatine horčička s hliníkom pomocou techniky založenej na uvoľňovaní umelých bublín do roztaveného kovu, ktorá bola navrhnutá Divandrim a Campbellom. Zrážkou a uviaznutím uvoľnených bublín v dutine formy sa vytvorí vrstva medzi dvoma susednými bublinami, ktorá sa nazýva *oxid/kov/oxid* sendvičová vrstva, resp. sendvičová *OMO* (*oxide/metal/oxide*) vrstva. Podľa toho sa táto metóda nazýva *OMO* sendvičová metóda, ktorej princíp je znázornený na obr. 2. Vzhľadom na obmedzené množstvo kyslíka v bublinách sa oxidické vrstvy tvorené okolo nich považujú za mladé oxidy. Sendvičová metóda poskytuje jedinečné informácie o dynamicky sa formujúcich oxidických vrstvách. Pomocou tejto metódy sa dajú získať informácie o morfológii, hrúbke a zložení týchto oxidických vrstiev [6-8].



Obr. 2. *OMO* sendvičová metóda [7, 8]

Bolo pozorované, že povrchy oxidických vrstiev obsahujú veľké množstvo záhybov. Obrázok 3 schematicky zobrazuje rôzne typy záhybov v závislosti od chemického zloženia. Morfológia povrchu oxidických vrstiev bola pozorovaná na vzorkách čistého horčička a na zliatinách horčička s 3 hm. % a 6 hm. % hliníka. Oxidická vrstva čistého horčička sa prekladá hlavne vo vzpriamenom a sklonenom tvare (obr. 3a), zliatina horčička s 3 hm. % Al má tvar záhybov v sklonenom tvare, v niektorých oblastiach v prehnutom tvare (obr. 3b). V zliatine Mg so 6 hm. % hliníka bol zaznamenaný ležiaci až ponárajúci sa tvar záhybov oxidickej vrstvy (obr. 3c) a počet záhybov a ich veľkosť je väčšia ako u čistého horčička. Z pozorovaní vyplýva, že prídavok hliníka významne mení morfológiu oxidických vrstiev, kedy so zvyšujúcim sa jeho obsahom dochádza k väčšiemu

zvrásneniu vrstiev. To autori príspevku pripisujú tomu, že prídavok *Al* znižuje tuhosť oxidickej vrstvy a preto sa dá ľahšie poskladať. Na vzorkách je možné pozorovať aj trhliny, ktoré sú naznačené žltými šípkami. Počas tuhnutia kov uzavretý medzi dvoma vrstvami oxidu sa zmršťuje, čo spôsobuje ťahové napätia. Keďže pevnosť v ťahu oxidickej vrstvy je nižšia ako základného kovu, dochádza k trhaniu oxidickej vrstvy v oblastiach, kde kov nie je zachytený alebo v oblastiach, kde je množstvo zachyteného kovu nízke. Vo vzorkách *Mg* zliatiny so 6 hm. % hliníka sa trhliny spôsobené zmršťovaním vyskytujú zriedka. To možno pripísať zväčšeniu pevnosti a odolnosti voči trhaniu oxidickej vrstvy účinkom prídavku hliníka [7, 9, 10].

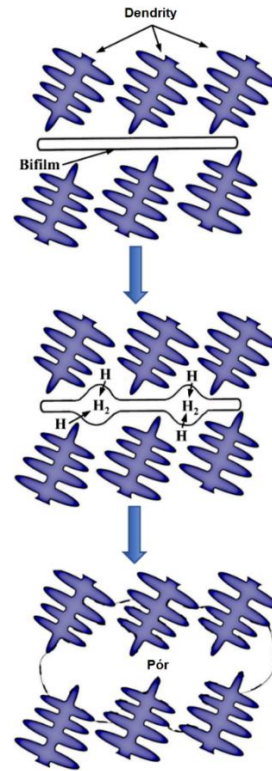


Obr. 3. Skladanie oxidických vrstiev: a) čistý *Mg*, b) *Mg* + 3 hm. % *Al*, c) *Mg* + 6 hm. % *Al* [7]

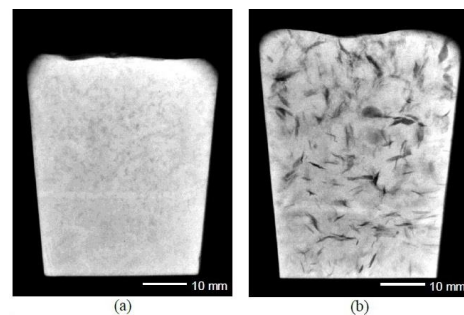
3 VPLYV DVOJITÝCH OXIDICKÝCH VRSTVIEV NA PÓROVITOSŤ

Pórovitosť je jednou z najbežnejších chýb v odliatkoch, ktorá môže viesť k zníženiu mechanických vlastností. V prípade zliatin hliníka sa tvorba pórov asociuje najmä s zmršťovaním pri tuhnutí a znižovaním rozpustnosti vodíka počas tuhnutia s klesajúcou teplotou. Výskumy posledných rokov však ukazujú, že dvojité oxidické vrstvy fungujú ako iniciátori pórovitosti, zatiaľ čo vodík len prispieva k tvorbe pórov, pričom v minulosti sa za hlavného činiteľa pórovitosti a iných chýb v odliatkoch považoval práve vodík. Vodík nachádzajúci sa v odliatku pri tuhnutí nad úroveň jeho

rozpustnosti difunduje medzi vrstvy bifilmu, čím dochádza k rozšíreniu pórov ako je znázornené na obr. 4. Ak počas procesu plnenia dutiny formy vzniká viac bifilmov, tak sa dá očakávať aj väčšie množstvo pórov v stuhnutom odliatku, čo výrazne znižuje jeho kvalitu. Použitie vákuua počas tuhnutia pomáha pórům sa rozširovať ešte viac, ako je vidieť na röntgenových snímkach ukazujúcich vznik pórov pri zníženom tlaku (obr. 5) [4, 11-13].



Obr. 4. Schematické znázornenie vzniku póru iniciovaného bifilmom [14]



Obr. 5. Röntgenové snímky vzoriek: a) tlak 1 atm., b) 0,1 atm. [15]

4 VPLYV OXIDICKEJ VRSTVY NA PLNENIE DUTINY FORMY

Prítomnosť oxidickej vrstvy má vplyv nielen pri tuhnutí odliatku, ale aj v priebehu plnenia dutiny formy. Jej prítomnosť zásadným spôsobom zhoršuje schopnosť vyplňania dutiny formy, najmä do úzkych oblastí a malých otvorov. Účinkom povrchového napätia je tavenina zadržovaná pri vstupe do užších častí. *Meniskus* (zakrivenie hladiny taveniny v dôsledku interakcie so stenou formy) vytvára

hrubnúcu oxidickú vrstvu, ktorá pôsobí ako bariéra pre ďalší posun taveniny. Po zaplnení rozvádzacieho kanála vytvorí tavenina tlak na zosilnenú oxidickú vrstvu, ktorý je potrebný pre jej pretrhnutie a pre ďalší pohyb tekutého kovu. Pohybom taveniny sa na jej čele neustále vytvára nový povrch a starý (s oxidmi) je prtláčaný na steny formy vplyvom trenia [2].

Pri odliatkoch, pri ktorých môže dôjsť k pomalému plneniu dutiny formy, môžu byť pozorované chyby typu zavalenina. Predpokladá sa, že zavalenina môže byť spôsobená tým, že sa horná vrstva taveniny valí po vodorovnom, zoxidovanom povrchu, čím vytvára rozsiahlu horizontálnu oxidickú vrstvu. Väčšina experimentálnych prác tento jav nepotvrďuje. Možno predpokladať, že valivá vlna môže vznikáť iba pri podmienkach kedy má povrch dostatočnú pevnosť (v dôsledku tuhnutia) pre udržanie jej hmotnosti. Hoci Loper a Newby (1994) vo svojom výskume tvrdia, že tento jav je pozorovateľný, ich práca však nie je jednoznačná a potvrdená, a je možné že došlo k pozorovaniu rozpínajúcej sa vlny [2].

Približovaním zakriveného čela prúdu taveniny ku vrchu formy sa plnenie spomaľuje a nastáva nekontinuálny priebeh plnenia. Tento jav bol pozorovaný Evansom v roku 1997. Čelo taveniny ostáva nehybné a plnenie dutiny formy sa uskutočňovalo horizontálne, do strán, oddelenými vlnami. Vlna sa šírila po dĺžke čela prúdu taveniny až pokým nedosiahla najvzdialenejší bod. Pri strete so stenou formy sa vlna odrazila späť. Namiesto prerazenia a valenia sa ponad zoxidovaný povrch, vlna prenikla pod oxid a šírila sa oddelením povrchu oxidu. Tento jav vzniká lokálne iba v miestach, kde sa vlna zvyšuje. Na iných miestach pred a za čelom vlny bol povrch zachytený oxidickou vrstvou a nemohol postupovať vertikálne. Rozpínajúce vlny spôsobujú kontúry na povrchu odliatku, ktoré indikujú výšku meniskusu taveniny priebežne počas plnenia formy [2].

ZÁVER

Práca zhrňa teoretické poznatky o vplyve rýchlosti taveniny na vznik bifilmov, morfológii oxidických vrstiev a vplyve bifilmov na pórovitosť a plnenie dutiny formy.

Pod'akovanie

Tento článok bol podporený Grantovým systémom UNIZA 01/2022 (17375) a vznikol v rámci projektu KEGA: 022ŽU-4/2021.

LITERATÚRA

[1] BRŮNA, M. - BOLIBRUCHOVÁ, D. - PASTIRČÁK, R. (2017): *Analýza reoxidačných procesov vo vtokovej sústave pri odliavaní Al zliatin*. In: Slévárnství, s. 300-303, ISSN 0037-6825.

[2] CAMPBELL, J. (2015): *Complete Casting Handbook 2nd edition*. Oxford: Elsevier Ltd. 1054 pp. ISBN 978-0-444-63509-9.

[3] JOLLY, M. (2005): *Prof. John Campbell's Ten Rules for Making Reliable Castings*. Oxford: Elsevier Ltd. 2015. pp. 1054. ISBN 978-0-444-63509-9.

[4] DISPINAR, D. - CAMPBELL, J. (2004): *Metal Quality in Secondary Remelting of Aluminium*. In: Foundry Trade J. Vol. 178. pp. 78-81.

[5] CAMPBELL, J. (2004): *Castings Practice, the 10 Rules of Castings*. 1st ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-7506-4791-5.

[6] PARK, J. M. (2009). *Behaviours of Bifilms in A356 Alloy during Solidification: Developing Observation Techniques with 3-D Micro X-ray Tomography*. Ph.D. Thesis, University of Birmingham, UK, 2009. p. 98.

[7] JALILVAND, M. M. et al. (2021): *Surface oxidation study of molten Mg-Al alloys by oxide/metal/oxide sandwich method*. In: Journal of Magnesium and Alloys. ISSN 2213-9567. DOI: 10.1016/j.jma.2020.10.004.

[8] JALILVAND, M. M. et al. (2020): *On the dynamically formed oxide films in molten Mg*. In: Journal of Magnesium and Alloys. Vol. 8, pp. 219-230. ISSN 2213-9567. DOI: 10.1016/j.jma.2019.12.003.

[9] POLMEAR, I. J. (2017): *Light Alloys*. In: Metallurgy of the Light Metals, 5nd Ed, Elsevier Ltd, ISBN: 978-0-08-099431-4.

[10] NOURI, M. et al. (2016): *Thin Solid Films*. pp. 29-37.

[11] GYARMATI, G. et al. (2020): *Investigation on Double Oxide Film Initiated Pore Formation in Aluminum Casting Alloys*. In: International Journal of Engineering and Management Sciences. Vol. 5, pp. 141-153. DOI: 10.21791/IJEMS.2020.2.18.

[12] EL-SAYED, M. A. (2016): *The Behaviour of Bifilm Defects in Cast Al-7Si-Mg Alloy*. In: PLOS ONE. DOI: 10.1371/journal.pone.0160633.

[13] EL-SAYED, M. A. (2019): *Double oxide film defects and the properties of aluminum castings. A review*. In: Global Journal of Material Science & Engineering. Vol. 01, pp. 5-12. DOI: 10.37516/global.j.mater.sci.eng.2019.0053.

[14] GYARMATI, G. (2019): *Characterization of the double oxide film content of liquid aluminum alloys by computed tomography*. In: Materials Characterization, Vol. 157. DOI: 10.1016/j.matchar.2019.109925.

[15] CAMPBELL, J. (2012): *Stop Pouring, Start Casting*. In: International Journal of Metalcasting, Vol. 6, pp. 7-18. DOI: 10.1007/BF03355529.

Disperzne spevnené materiály

Elena Kantoríková, Ing., PhD.*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,

Univerzitná 1, 010 26 Žilina.

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

Dispersion reinforced materials

Abstract: Dispersion reinforced systems are composites with a matrix reinforced with a dispersive discontinuous phase. They are mainly produced by powder metallurgy technologies. Dispersion-strengthened materials have a polycrystalline matrix, into which dispersed particles are introduced, most often of the type of oxides, carbides and nitrides. The essence of the strengthening effect of dispersoids is both direct and consists in inhibiting the movement of dislocations of the matrix, as well as indirect in that, during the formation of the system, dispersoids increase the density of dislocations and refine the grain and subgrain structure.

Keywords: dispersion, powder metallurgy, materials.

ÚVOD

Základným princípom spevňovania je rozptýlenie spevňujúcej fázy - disperzoidu do kovovej matrice. Disperzoid musí byť nekoherentný s matricou. Stredná vzdialenosť medzi časticami má byť minimálna. Disperzoid je inertný voči matrici v celom rozsahu teplôt, teda aj pri dlhodobom žíhaní, v blízkosti bodu tavenia matrice nemá dochádzať k výraznejšej koagulácii disperzoidu. Voľná entalpia disperzoidu má mať vysoké záporné hodnoty. Bod tavenia disperzoidu má byť vysoký, rozpustnosť v matrici nepatrná a koeficient teplotnej rozťažnosti matrice je spravidla o jeden rad väčší ako pri disperzoide.

Z teoretických úvah a experimentov vyplynulo, že maximálny efekt spevnenia sa dosiahne pri nasledovných štruktúrnych parametroch:

- rozmer spevňujúcich častíc sekundárnych fáz (disperzoidov) nemá presahovať 50 nm,
- stredná vzdialenosť medzi spevňujúcimi časticami má byť v rozmedzí 0,1 μm ÷ 0,5 μm a ich rozloženie má byť rovnomerné.

Pri príprave disperzne spevnených kovových materiálov je problémom dokonalé rozptýlenie jemných spevňujúcich fáz v kovovej matrici. Homogénne rozloženie je dôležité, nakoľko ovplyvňuje mechanické a fyzikálne vlastnosti materiálov. Príprava disperzne spevnených materiálov obsahuje:

- výber spevňujúcej fázy a voľbu jej objemového podielu pre danú matricu,
- návrh optimálnej metódy pridávania spevňujúcej fázy do matrice,

- výber spôsobu kompaktizácie,
- rozpracovanie racionálnych režimov deformácie a tepelného spracovania polotovarov.

Voľba spevňujúcej fázy sa zvyčajne odvíja od jej termodynamických vlastností, difúznej pohyblivosti, ekonomie a náročnosti prípravy, ako aj od iných faktorov. Na základe vlastností daného materiálu sa určuje technologický postup a objemový podiel spevňujúcej fázy tak, aby sa zachovali požadované vlastnosti. Spôsob zavádzania spevňujúcej fázy do matrice sa realizuje v určitom štádiu prípravy zmesi [1]. Používané metódy prípravy disperzne spevnených materiálov:

- mechanická homogenizácia kovov a disperzoidu,
- mechanická homogenizácia kysličníka kovov, a disperzoidu s nasledujúcou redukciou, kysličníka základného kovu,
- povrchová oxidácia,
- interná oxidácia,
- elektrolytický rozklad,
- rozstrekovanie taveniny,
- reakčné mletie.

Cieľom disperzných spevnených materiálov je zlepšiť mechanické vlastnosti matrice. Disperzné častice môžu zvýšiť tuhosť, pevnosť, odolnosť voči opotrebeniu, únavovú životnosť alebo iné mechanické vlastnosti. Tento typ materiálu sa často používa na výrobu odolných a ľahkých konštrukčných materiálov v rôznych odvetviach.

Príklady disperzne spevnených materiálov zahŕňajú kovové matrice s keramickými disperznými

časticami, polymérne matrice s kovovými alebo keramickými disperznými časticami a keramické matrice s kovovými alebo polymérnymi disperznými časticami [2].

Okrem toho že sú tieto materiály pevné aj tuhé, sú aj veľmi ľahké. Vďaka prítomnosti disperzných častíc môžu byť disperzne spevnené materiály výrazne ľahšie než ich monolitické prototypy. To z nich robí ideálne materiály pre aplikácie, kde je nízka hmotnosť kritická, ako napríklad v leteectve alebo automobilovom priemysle.

Takisto majú tendenciu byť odolnejšie voči únavovému namáhaniu a lepšie udržiavajú svoje mechanické vlastnosti pri cyklickom zaťažení, čo ich robí vhodnými pre aplikácie, ktoré vyžadujú vysokú životnosť materiálu. Umožňujú prispôbienie ich vlastností na základe požiadaviek konkrétnej aplikácie. Možno meniť typ, tvar a obsah disperzných častíc, ako aj vlastnosti matrice, aby sa dosiahli požadované mechanické a funkčné vlastnosti materiálu.

Môžu byť navrhnuté s vlastnosťami, ktoré zahŕňajú vysokú tepelnú a elektrickú vodivosť alebo izoláciu, v závislosti od potreby. Tieto materiály majú širokú škálu aplikácií v elektronike, energetike a ďalších oblastiach [7].

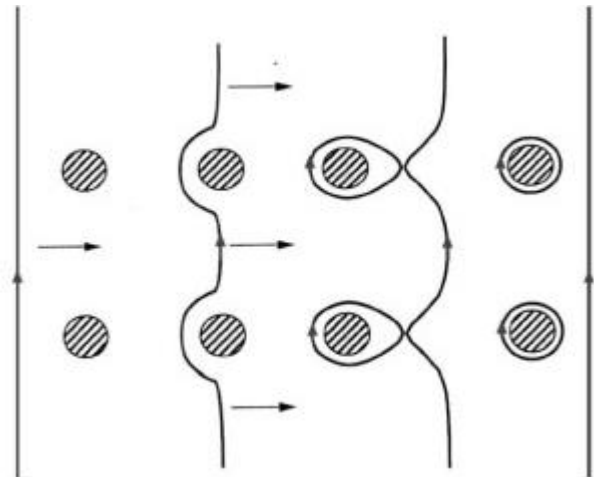
1 ZÁKLADNÉ MECHANIZMY SPEVNENIA V DISPERZNE SPEVNENÝCH SÚSTAVÁCH

V disperzne spevnených (DS) kovových sústavách existujú zvyškové napätia, ktorých vznik je podmienený prítomnosťou sekundárnych častíc spevňujúcej fázy, najmä rozdielnymi koeficientami teplotnej rozťažnosti matrice a častice. K zvyškovým napätiam prispievajú fázové premeny častice, resp. matrice počas prípravy a tepelného spracovania, atď. Tieto napätia dosahujú maximálne hodnoty na medzifázovej hranici a môžu spôsobovať plastickú deformáciu v okolí častice. Hodnota zvyškových napätí však s rastúcou vzdialenosťou od častíc prudko klesá a tak výsledná hodnota zvyškových napätí v materiáli je malá a vo väčšine disperzne spevnených zliatin je rádovo menšia ako medza klzu. Ak priložené napätie je o niečo menšie ako medza klzu, potom v dôsledku rozdielnosti pružných konštánt matrice a častice sa v dvojfázových štruktúrach pod napätím vytvárajú lokálne koncentrácie napätí. Hodnoty maximálnych ťahových a šmykových napätí na medzifázovom rozhraní môžu byť až dvakrát väčšie ako priložené vonkajšie napätie, ale s rastúcou vzdialenosťou od rozhrania tiež silne klesajú. Ani lokálne, ani zvyškové napätia nezvyšujú hodnotu napätia na medzi klzu, avšak majú značný význam pri ponímaní mnohých javov prebiehajúcich počas

plastickej deformácie a porušovaní disperzne spevnených kompozitov [8, 9].

1.1 Disperzné spevnenie

Disperzné častice, ktoré sú v rovine klzu, brzdia pohyb dislokácií, a tým vyvolávajú spevnenie. Plastická deformácia prebieha dovtedy, kým je nenarušená činnosť dislokačných zdrojov. Princíp *Orowanovho* spevnenia sa deje v dôsledku pohybujúcej sa dislokácie okolo pevnej častice a vytváraním dislokačnej slučky okolo nej. Podľa *Orowana* sa dislokácia v rovine klzu prehýba do polomeru rovnému polovici vzdialenosti medzi časticami.



Obr. 1. Princíp *Orowanovho* spevnenia.

Nasledujúco sa môže dislokačný segment ďalej pohybovať, zanechajúc okolo častíc dislokačnú slučku (Obr.1) a dochádza k zmenšovaniu efektívnej vzdialenosti medzi časticami.

Lokálne napätie potrebné na ohyb dislokačného segmentu je:

$$\Delta R = \frac{2 \cdot T}{b \times L} \quad (1)$$

kde T – lineárne ťahové napätie,

b – Burgersov vektor,

L – vzdialenosť medzi časticami.

Modifikáciu *Orowanovho* mechanizmu predstavuje model *Fisher-Hart-Pry*. Dislokačné slučky zanechané okolo častíc, pôsobia na *Frank-Readove* zdroje spätným napätím, čím rastie efektívne napätie *F-R* zdrojov v rovine klzu. Ak okolo každej častice, ktorá vytína v rovine klzu kruh s priemerom r , sa vytvorí n dislokačných slučiek, potom pri strednej vzdialenosti stredov častíc v klzovej rovine, zvýšenie klzového napätia je rovné:

$$\Delta R = \frac{k \times f^{\frac{3}{2}}}{r} \quad (2)$$

kde k je konštanta, $k = 3 \cdot n \cdot G \cdot b$,

f je objemový podiel častíc,

r je polomer častíc,

n je počet dislokačných slučiek.

Na podstatu disperzného spevňovania existuje široká škála názorov. Najčastejšie sa vychádza z *Orowanovho* modelu a jeho modifikovaním s ohľadom na morfológiu a fyzikálne charakteristiky a chemickú povahu disperznej fázy a matrice. Je však potrebné uviesť, že v reálnych polykryštalických materiáloch okrem priamej interakcie dislokácií s časticami podstatnú úlohu zohrávajú tiež efekty vyplývajúce z vplyvu disperzných častíc na formovanie štruktúry a jej parametre. Dá sa konštatovať, že rovnaký efekt ako bariéry pre pohyb dislokácií, vykazujú aj hranice zŕn v deformovaných, resp. rekryštalizovaných *DS* kompozitoch [3, 4].

1.2 Spevnenie od hraníc zŕn

Prírastok spevnenia, resp. tvrdosti s výrazne zvyšuje so znižovaním priemernej veľkosti zrna. Veľkosť zrna pohybujúca sa v nanoškále produkuje veľmi vysoký nárast pevnosti. Tento vzťah bol formulovaný *Hallom* a *Petchom*, ktorý sa označuje ako *Hall-Petchov* vzťah:

$$\Delta R = k \times D^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\Delta H_v = k \times D^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

kde k je materiálová konštanta, označujúca *Hall-Petchov* sklon,

D stredná hodnota prierezu zrna,

ΔH_v príspevok tvrdosti podľa *Vickersa*.

1.3 Dislokačné spevnenie

Rozdielne konštanty teplotnej rozťažnosti disperzných častíc a matrice môžu iniciovať vznik vnútorných napätí počas ohrevu a deformácie za studena. Matematický model vyjadrujúci vzťah hustoty a dislokácií a medze klzu je:

$$\Delta R = k \cdot G \cdot b \cdot \rho^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\rho = \frac{12 \times \Delta T \times \Delta \alpha \times f_v}{b \times d} \quad (6)$$

kde k je konštanta (0,3 ÷ 0,6),

ρ je hustota dislokácií,

f_v je objemový podiel častíc,

d je stredný priemer sekundárnych častíc,

$\Delta \alpha$ je rozdiel koeficientov teplotnej rozťažnosti častice a matrice,

ΔT je rozdiel teplôt.

1.4 Spevnenie od kryštalografickej textúry

V priebehu konsolidácie práškových kompozitov dochádza zvyčajne k vytváraniu prednostnej

kryštalografickej orientácie, textúry. Vplyv textúry na medzu klzu vyjadruje vzťah:

$$\Delta R_T = M \times \tau \quad (7)$$

kde M je *Taylorov faktor*,

τ je kritické šmykové napätie.

Vplyvom prítomnosti sekundárnych častíc je vznik prednostnej orientácie v značnej miere potlačený.

1.5 Superpozícia príspevkov spevnenia na medzu klzu

Medza klzu je zvyčajne vyjadrená ako lineárna kombinácia príspevkov z množstva mechanizmov, ktoré sa nemusia vždy medzi sebou ovplyvňovať:

$$R_{p0,2} = R_M + \Delta R_P + \Delta R_G + \Delta R_D \quad (8)$$

Pri posudzovaní príspevkov spevnenia treba mať na zreteli, že v disperzne spevnených materiáloch dominantnú úlohu má podiel a veľkosť disperzných častíc a ich rozloženie v matrici. Docieľiť ideálne rozloženie je veľmi náročné. V reálnych materiáloch sa vytvárajú zhluky častíc, čím sa znižuje ich efektívny podiel, a tým aj efektívna medzičasticová vzdialenosť, ktorá ovplyvňuje formovanie optimálnych štruktúrnych parametrov [5].

Hranice zŕn predstavujú prekážky pre pohyb dislokácií. Príspevok spevnenia od veľkosti zrna sa určuje *Hall-Petchov* vzťahom, ktorý má svoje obmedzenie a platí len pre nadkritické veľkosti zrna, teda také, v ktorých sa môže vyskytovať aspoň jedna dislokácia. V štruktúrach sa podkritickou veľkosťou zŕn vplyvom deformačných odpevňovacích mechanizmov dochádza k znižovaniu medze klzu.

1.6 Spevnenie legovaním

Ak matrica kompozitného materiálu je legovaná prísadami, ktoré vytvárajú substitučný alebo intersticiálny tuhý roztok, dochádza k interakcii atómov prísad rozpustených v mriežke matrice s napätovými poľami rohových dislokácií, čoho dôsledkom je znížená pohyblivosť dislokácií [6]. Vyjadriť sa to dá rovnicou (9):

$$\Delta R_S = k_S \cdot C_S^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

kde C_S je koncentrácia prísady v at. %.

2 DISPERZNE SPEVNEŇÉ MATERIÁLY

Hliník SAP - je označenie pre hliník spevnený časticami *Al2O3*. Ide o najstarší disperzne spevnený materiál. Pri jeho príprave sa využíva povrchová oxidácia hliníkového prášku počas mlecieho procesu. Tvrdé oxidy, vznikajúce na povrchu hliníkových častíc praskajú, odlupujú sa a kovovo čisté zrná sa zväzujú. Konečným výsledkom opakovania týchto procesov je vznik hliníkových zŕn, vo vnútri

spevnených oxidickými časticami. Takto upravený hliníkový prášok sa lisuje, speká a pretlačuje za tepla. Prednosťou SAP sú veľmi dobré mechanické vlastnosti za tepla, nízka hustota, dobrá odolnosť proti korózii a dobrá tepelná vodivosť [10].

Dispál - hliník spevnený časticami Al_4C_3 . Je to novší materiál s podobnými vlastnosťami ako SAP. Pripravuje sa mechanickým legovaním zmesi hliníkového a grafitového prášku. *Dispál* (podobne ako SAP) je používaný ako konštrukčný materiál, najmä v automobilovej a leteckej technike. Vyznačuje sa vysokou odolnosťou voči rekryštalizácii a vysokou žiarupevnosťou pri teplotách $300^{\circ}C \div 500^{\circ}C$.

TD Nickel - disperzne spevnená žiarupevná zliatina, kde je nikel spevnený oxidom thoričitým (98 % Ni, 2 % ThO_2), čo je popri SAP ďalší, dnes už klasický disperzne spevnený materiál, ktorý sa vyznačuje vysokou pevnosťou za tepla a je vhodný pre aplikácie pri teplotách $1100^{\circ}C$, príp. vyššie. Superzliatiny typu $NiCrAl-Y_2O_3$ sú spevňované Y_2O_3 , nakoľko ThO_2 je rádioaktívny. Používajú sa pri stavbe plynových turbín leteckých motorov. Vyznačujú sa vysokou žiarupevnosťou do teploty $1200^{\circ}C$.

Disperzne spevnené antikoročné a žiaruvzdorné ocele - austenitické a feritické ocele (spevnené oxidmi Al, Ti, príp. Th) majú zvýšenú odolnosť voči krehnutiu pri rádiácii a používajú sa preto pri stavbe reaktorov. Pre svoju vysokú pevnosť (aj za tepla, krátkodobo použiteľné až do $1200^{\circ}C$) pri prijateľnej húževnatosti a koročnej odolnosti sa používajú aj v leteckom priemysle a raketovej technike. Ich nevýhody sú vysoká cena, náchylnosť na tepelné krehnutie, problematickosť dodržovania vysokej pevnosti vo zvaroch, častá anizotropia vlastností a náchylnosť ku koročnému praskaniu pod napätím [11].

ZÁVER

Disperzne spevnené materiály patria medzi progresívne materiály, pripravené prevažne práškovou metalúgiou. Disperzné spevňovanie je jeden z najefektívnejších spôsobov spevňovania kovov a zliatin. Primárnou charakteristikou je stabilita mechanických vlastností materiálov pri zvýšených teplotách. Jedná sa o kompozity s rozličnými fyzikálno-mechanickými vlastnosťami, ktoré sú využívané nie len v automobilovom priemysle, ale aplikujú sa aj pri vysoko teplotných zaťaženiach.

Pod'akovanie

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

LITERATÚRA

- [1] SZABA, J. (2017): *Teplotná stabilita štruktúry práškových kompozitov na báze medi*. Dizertačná práca, TU Košice.
- [2] MATTHEWS, F. L. - RAWLINGS, R. D. (1994): London, *Composite materials: engineering and science*. Chapman and Hall.
- [3] CESAR, A. C. - BERNANDES, A. M. - KLEIN, C. (1999): *Study of Leachability of Aluminium Salt Cake*, In: REWAS 99, Global Symposium on Recycling, Waste treatment and Clean Technology, Volume II, Spain, Sept. 5-9, pp. 1094-1105.
- [4] HOSFORD, W. F. (2005): *Mechanical behavior of materials*. New York, USA: Cambridge University Press, s. 425. ISBN 0-521-84670-6.
- [5] VELGOSOVÁ, O. - MIŠKUFOVÁ, A. - LAUBERTOVÁ, M. (2008): Košice, *príprava kompozitov na báze AL*. In: Acta Metallurgica Slovaca 14, p. 103 – 112.
- [6] THÜMMLER, F. - OBERACKER, R. (1993): *Introduction to powder metallurgy*. 1st ed. Cambridge: The University Press, 332 p. ISBN 0-901716-26-X.
- [7] SCHATT, W. - WIETERS, K. P. - KIEBACK, B. (2007): *Pulvermetallurgie: Technologien und Werkstoffe*. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, 552 p. ISBN 978-3-540-23652-8.
- [8] NEIKOV, O. D. - NABOYCHENKO, S. S. - MURASHOVA, I. V. - GOPIENKO. (2009): *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders - Technologies and Applications*. 1st ed., Philadelphia: Elsevier, 671 p. ISBN 978-1-85617-422-0.
- [9] ASM Handbook, Volume 7 (1998): *Powder Metal Technologies and Applications*. Ed. Peter W. Lee. 1st. ed. Materials Park: ASM International, 1147 p. ISBN 978-0871703873.
- [10] ANGELO, P. (2008): *PHI Learning Pvt. C., SUBRAMANIAN, R. Powder metallurgy: science, technology and applications*. 1st.ed. Delhi: PHI Learning Pvt. 312 p. ISBN 9788120332812.
- [11] LUKÁČ, I. (1990): *Prášková metalúgia*. 1. vyd., Alfa, Vysoká škola technická v Košiciach, ISBN 80-05-00422-2.

Konstrukčný návrh mechanizmu skrutkového manipulátora turniketu sypkých materiálov

Denis Molnár, Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: denis.molnar@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2659

Miroslav Blatnický, doc. Ing., PhD.*

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: miroslav.blatnicky@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2659

Ján Dižo, doc. Ing., PhD.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2560

Vadym Ishchuk, Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: vadym.ishchuk@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2563

A design of the mechanism of the screw manipulator of the bulk materials turnstile

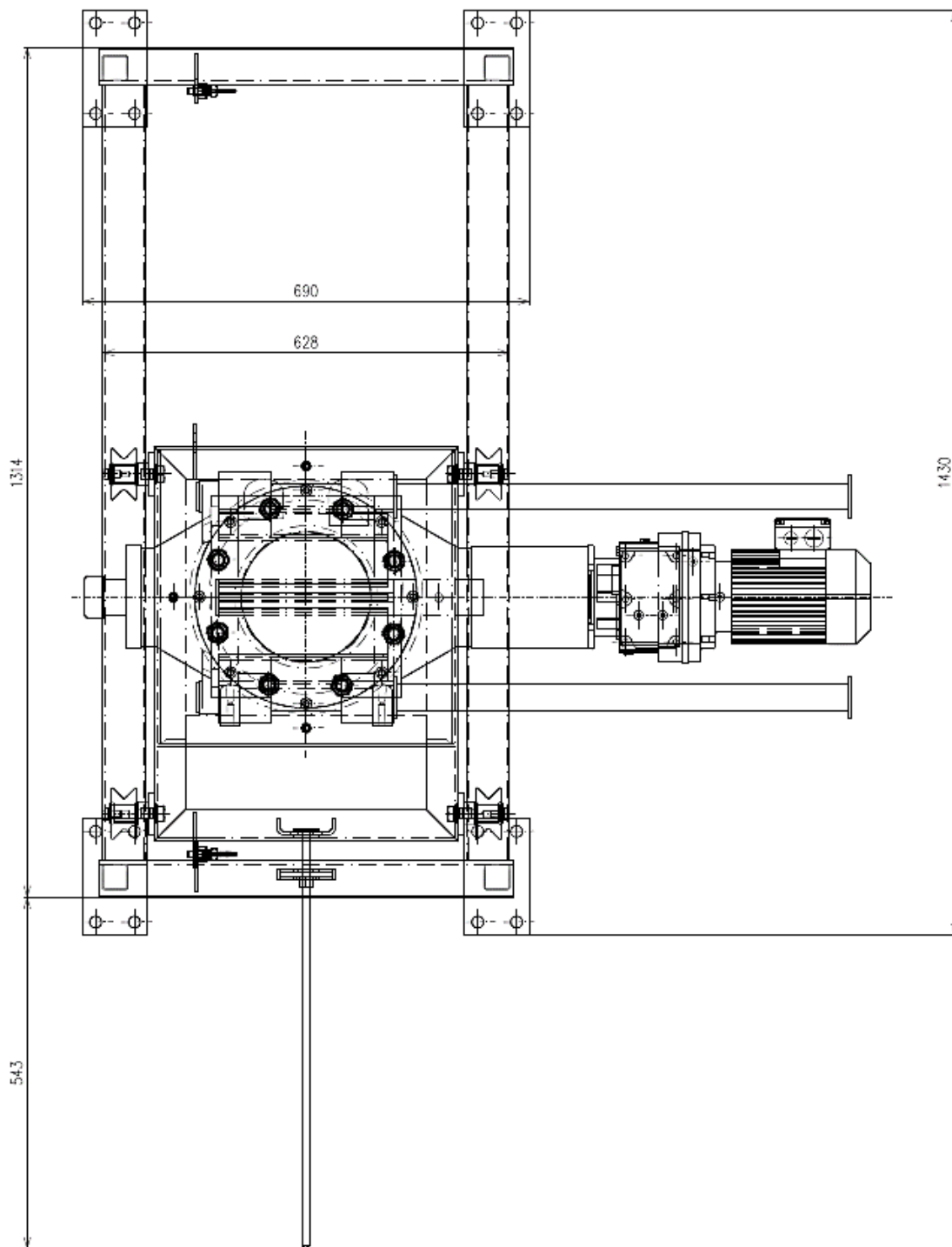
Abstract: The article is the next step in the ongoing research regarding the incorporation of the proposed bulk material turnstile assembly into an existing production line serving the food industry for bagging powdered milk. The main goal of this contribution is the presentation of the structural design and related technical calculations of the screw manipulator as part of the turnstile for loose materials. The proposed mechanism will enable precise manipulation of the turnstile, especially when it is necessary to clean the pipe connected to the turnstile. Such handling is relevant nowadays due to increasing the safety of maintenance of machines and equipment and due to reducing the physical load of maintenance workers. The results prove the appropriateness of the use of the given structural design and are the basis for further research in the given area. The results will be implemented in the form of boundary conditions for the numerical analyses of the connecting elements of the frame carrying the entire carriage with the turnstile (the frame forms a path for the carriage) and also for numerical calculations of the frame itself. The goal is to achieve a state where the entire structure is safe for the operator during maintenance and also for its surroundings during normal operation.

Keywords: design, manipulator, dimensional calculation, material, mechanism.

ÚVOD

Mechanizmus je sústava telies, spojených navzájom väzbami a slúži k prenosu síl v súčinnosti s transformáciou pohybu. Vo všeobecnosti, za mechanizmus sa považuje také zariadenie, ktoré umožňuje zmenu rotačného pohybu hriadeľa pohonného motora na pohyb pracovný. V problematike manipulačných zariadení pracovným pohybom môže byť napr. zdvih a spúšťanie bremena, sklápanie, prípadne teleskopické predĺžovanie

výložníka, pojazd žeriavu ako celku, alebo jeho časti (pojazd mačky, atď.) a u otočných žeriavov otáčanie. V prípade navrhovaného manipulátora je pre zmenu rotačného pohybu na posuvný využitý mechanizmus skrutkový. Daný mechanizmus bude slúžiť k prenosu energie a umožňovať manipuláciu s turniketom sypkých materiálov. Manipulácia je požadovaná v čase, keď je nutné vyčistiť potrubie pripojené k turniket. Preto je potrebné turniket polohovať. Okamžitá poloha všeobecného mechanizmu je jedno-



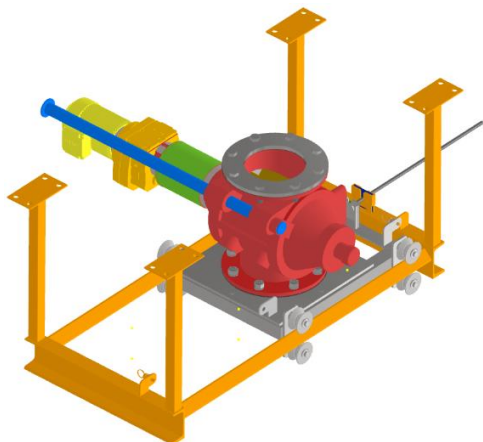
Obr. 1. Pôdorys (geometria) turnketu sypkých materiálov spolu s vozíkom, kotviacim rámom a manipulátorom

značne určená toľkými nezávislými súradnicami, koľko stupňov voľnosti mechanizmus má. Alebo inak, mechanizmus má toľko stupňov voľnosti, koľko nezávislých súradníc je potrebných k jednoznačnému určeniu jeho okamžitej polohy.

Navrhovaný konštrukčný celok je určený pre implementáciu do výrobnéj baliacej linky sušeného mlieka. Pretože konštrukcia nesmie prekážať obsluhu, je zvolené jej kotvenie do stropu vo výške 4,2 metra nad podlahou. Mechanizmus skrutkového manipulátora je potom navrhovaný z dôvodu

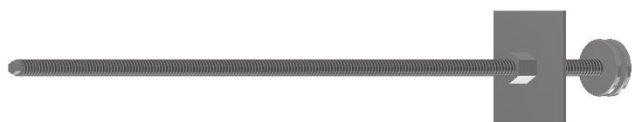
zvyšovania efektivity a znižovania fyzickej záťaže pracovníkov počas servisných úkonov pre dve krajné polohy (pracovná a servisná). Vzhľadom na všetky vstupné rozmerové (obr. 1) a hmotnostné parametre opísané v [1] bol spracovaný konštrukčný návrh ručne poháňaného manipulátora turnketu sypkých materiálov. Ručný pohon sa vzhľadom na potravinársku prevádzku (a z nej vyplývajúce vysoké nároky na čistotu), hmotnosť samotného turnketu spolu s jeho pohonom približne 230 kg, ako aj ekonomickosť samotného návrhu, javí ako optimálne

riešenie. Berúc do úvahy relatívne nízke pasívne odpory pôsobiace pri pohybe lôžka turniketu (vozíka) po dráhe, bude ním manipulované pomocou otáčania obsluhou (kľúčom, AKU-skrutkovačom a pod.). Konštrukčný celok je zobrazený na obr. 2.



Obr. 2. CAD model turniketu sypkých materiálov spolu s vozíkom, kotviacim rámom a manipulátorom

V práci [1] autori vykonali určenie ťažísk turniketu za účelom kvantifikácie záťaže pojazďových koliesok vozíka. Toto zaťaženie bolo následne v práci [2] použité na výpočet ohybových momentov nosnej konštrukcie (dráhy) pojazdu pri určenej najúčinnejšej polohe bremena. Rovnako sa tu autori venovali aj výpočtu odporov obmedzujúcich pohyb vozíka. Súčasná práca opisuje konštrukčný návrh jednoduchého odnímateľného skrutkového manipulátora turniketu (obr. 3).



Obr. 3. 3D CAD model konštrukčného návrhu skrutkového manipulátora turniketu

Manipulátoru je potrebné sa venovať aj z výpočtového hľadiska, aby vyhovoval všetkým naň kladeným nárokom. Výpočet mechanizmov pozostáva bežne z funkčného a pevnostného výpočtu. Pri funkčnom výpočte určujeme potrebný výkon hnacích motorov, kinematické veličiny ústrojenstva a jeho jednotlivých prvkov tak, aby sme zistili žiadané pracovné rýchlosti, prípadne doby rozbehov a tiež dráhy jednotlivých pracovných pohybov. Pri pevnostnom výpočte určujeme rozmery jednotlivých častí.

1 FUNKČNÝ A DIMENZIONÁLNY VÝPOČET SKRUTKOVÉHO MANIPULÁTORA

Najskôr bol výpočet orientovaný na pohybovú skrutku manipulátora. V jej prípade bolo rozhodnuté, že bude vyrobená z bežne dodávanej závitovej tyče s lichobežníkovým (trapézovým) závitom a vyrobená

z ocele *EN X5CrNi18-10* (*DIN 1.4301*), ktorej medza klzu dosahuje $R_e = 195$ MPa. Potom dovolené zaťaženie skrutky v ťahu (tlaku) σ_D pri uvažovanej bezpečnosti $k = 2$ bude (1):

$$\sigma_D = \frac{R_e}{k}, \quad (1)$$

$$\sigma_D = \frac{195}{2} = 97,5 \text{ MPa.}$$

Z rovnice (1) vyplýva, že napätie, na základe ktorého je dimenzované jadro pohybovej skrutky, dosahuje pre nehrdzavejúcu ocel *EN X5CrNi18-10* pri koeficiente bezpečnosti $k = 2$ hodnotu $\sigma_D = 97,5$ MPa. Na základe tejto hodnoty v rovnici (2) na výpočet napätia v ťahu resp. v tlaku dostávame hodnotu minimálneho prierezu jadra S :

$$\sigma_D \geq \frac{F}{S}, \quad (2)$$

$$S \geq \frac{F}{\sigma_D} \geq \frac{307,07}{97,5} \geq 3,15 \text{ mm}^2,$$

kde $F = 307,07$ N je ťažná sila potrebná pre rovnomerný pohyb pojazdu turniketu (vozíka spolu s turniketom) po dráhe.

Z tejto určenej plochy $S = 3,15 \text{ mm}^2$ je možné vypočítať priemer jadra d_j závitovej tyče pomocou vzťahu (3):

$$S = \frac{\pi \cdot d_j^2}{4}, \quad (3)$$

$$d_j = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,15}{\pi}} = 2 \text{ mm.}$$

Na základe bežne používaných závitových tyčí a ďalších namáhání zaťažujúcich skrutku v prevádzke (krut, vzper) bola predbežne zvolená závitová tyč s označením *Tr. 12x3*, ktorej prierez jadra je $d_j = 8,5$ mm. Vzhľadom na fakt, že táto pohybová skrutka bude namáhaná buď na ťah alebo na tlak, je potrebné overiť jej odolnosť voči strate stability, t. j. je potrebné ju skontrolovať na vzper podľa *Eulerovej teórie vzperu* pre pružnú oblasť (4):

$$\lambda_m = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{R_e}}, \quad (4)$$

$$\lambda_m = \pi \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5}{195}} = 103,096,$$

kde E značí *Youngov modul pružnosti v ťahu* použitej ocele s hodnotou $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa. Dĺžka skrutky L je rovná $L = 594$ mm. Po vypočítaní medznej hodnoty súčiniteľa λ_m je možné vypočítať konkrétnu hodnotu štíhlostného pomeru λ_1 pre daný profil (5):

$$\lambda_1 = \frac{L}{\sqrt{\frac{J_y}{S}}}, \quad (5)$$

$$\lambda_1 = \frac{594}{\sqrt{\frac{256,239}{56,75}}} = 279,54,$$

kde J_y je minimálny moment zotrvačnosti k hlavnej centrálnej osi kruhového prierezu skrutky s priemerom jadra $d_j = 8,5$ mm, t. j. $J_y = 256,239$ mm⁴,

S je plocha jadra skrutky, t. j. $S = 56,75$ mm².

Na základe výsledku je možné určiť ďalší postup.

Keďže platí $\lambda_1 \geq \lambda_m$ ($279,54 \geq 103,096$), je možné pristúpiť k výpočtu kritickej sily F_{kr} podľa rovnice (6):

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_y}{L^2}, \quad (6)$$

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 256,239}{594^2} = 1505,19 \text{ N}.$$

Táto sila výrazne presahuje reálnu silu ($F = 307,07$ N), ktorá bude pôsobiť na mechanizmus [2]. Rovnicou (7) je určený koeficient vzpernej bezpečnosti k_1 :

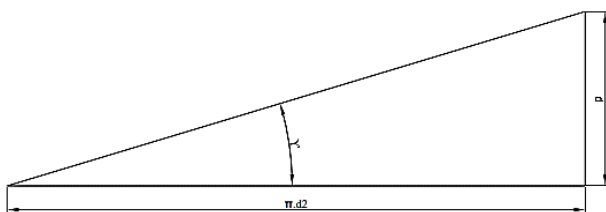
$$k_1 = \frac{F_{kr}}{F}, \quad (7)$$

$$k_1 = \frac{1505,19}{307,07} = 4,9.$$

Na základe rovnice (7) je možné dôjsť k záveru, že bezpečnosť proti vzperu je v tomto prípade značná a za bežných prevádzkových podmienok nedôjde ku strate stability pohybovej skrutky pri namáhaní osovou silou na tlak. Preto je v ďalšom možné sa zamerať na výpočet krútiaceho momentu, ktorý je potrebný na prevádzkovanie tohto manipulátora. Najprv bol určený krútiaci moment M_k , ktorý vyplýva z kontaktu pohybovej matice so skrutkou. Vychádza sa z rovnice (8):

$$M_k = \frac{d_2}{2} \cdot F \cdot \text{tg}(\gamma + \varphi). \quad (8)$$

Uhol stúpania γ (9) a uhol trenia φ (10) a (11) boli určené z geometrických a materiálových parametrov rozvinutého závitu podľa obr. 4.



Obr. 4. Rozvin jedného závitu pohybovej skrutky

$$\gamma = \arctg\left(\frac{p}{\pi \cdot d_2}\right), \quad (9)$$

$$\gamma = \arctg\left(\frac{2}{\pi \cdot 10,5}\right) = 5,197^\circ,$$

$$f' = a \cdot \frac{f}{\cos \frac{\alpha_1}{2}}, \quad (10)$$

$$\varphi = \arctg f',$$

$$\varphi = \arctg \frac{0,1}{\cos \frac{30}{2}} = 5,91^\circ, \quad (11)$$

kde $p = 3$ mm je stúpanie závitu vybranej skrutky Tr12x3,

f je koeficient trenia v plochom závite s uvažovanou hodnotou $f = 0,1$ (ocel o ocel)

f' je prídavné trenie vplyvom odklonu trecej plochy lichobežníkového závitu o uhol $\frac{\alpha_1}{2} = 30^\circ$ voči trecej ploche plochého závitu.

Na základe parametrov vypočítaných v rovniciach (9) (10) a (11) bola podľa rovnice (8) určená hodnota krútiaceho momentu M_k , ktorý vzniká kontaktom matice a skrutky pri ich vzájomnom pohybe:

$$M_k = \frac{10,5}{2} \cdot 307,07 \cdot \text{tg}(5,197^\circ + 5,91^\circ) = 0,317 \text{ Nm}. \quad (12)$$

Ďalšia zložka krútiaceho momentu vyplýva z trenia kruhového dorazu závitovej tyče o konzolu umiestnenú na vozíku (13):

$$M_k = \frac{D_{d1} + D_{d2}}{2} \cdot \frac{F}{2} \cdot f, \quad (13)$$

$$M_k = \frac{40 + 12}{2} \cdot \frac{307,07}{2} \cdot 0,1 = 0,4 \text{ Nm},$$

kde D_{d1} je veľký priemer kruhového dorazu závitovej tyče (obr. 5 – zeleným), t. j. $D_{d1} = 40$ mm,

D_{d2} je priemer otvoru kruhového dorazu závitovej tyče rovnajúci sa priemeru použitej lichobežníkovej skrutky, t. j. $D_{d2} = 12$ mm.

Celkový krútiaci moment, ktorým je potrebné poháňať mechanizmus, je určený ako suma parciálnych krútiacich momentov (14):

$$M_c = M_k + M_t, \quad (14)$$

$$M_c = 0,317 + 0,4 = 0,717 \text{ Nm}.$$

Na základe výsledkov je možné určiť hodnotu napätia v jadre skrutky pri jej otáčaní (15):

$$\tau = \frac{M_c}{W_k}, \quad (15)$$

$$\tau = \frac{0,717}{120,583} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ MPa},$$

kde W_k je prierezový modul v krútení kruhového prierezu pohybovej skrutky, t. j. $W_k = 120,583$ mm³.

Nakoniec je možné určiť hodnotu napätia v ťahu σ , (tlaku) zvolenej závitovej tyče (16):

$$\sigma = \frac{F}{S_j},$$

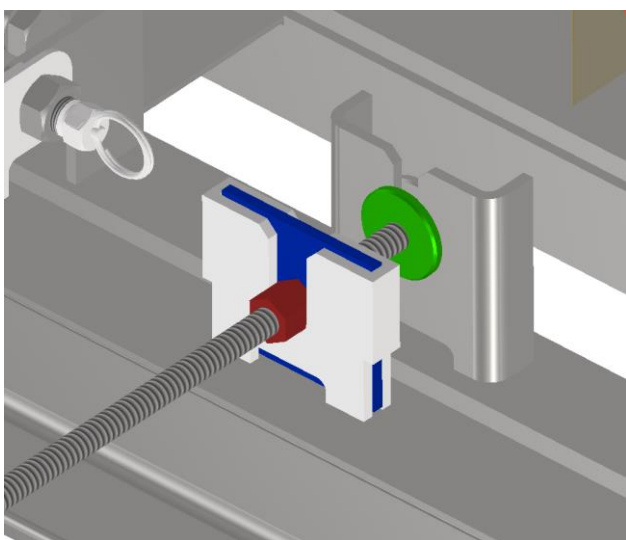
$$\sigma = \frac{F}{\frac{\pi \cdot d_j^2}{4}} = \frac{307,07}{\frac{\pi \cdot 8,5^2}{4}} = 5,41 \text{ MPa.} \quad (16)$$

Redukované napätie σ_{red} podľa teórie *HMH* bude (17):

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_i^2 + 3 \cdot \tau^2},$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{5,41^2 + 3 \cdot (4,29 \cdot 10^{-3})^2} = 5,41 \text{ MPa.} \quad (17)$$

Na obr. 5 je možné vidieť finálne konštrukčné vyhotovenie skrutkového manipulátora a realizáciu jeho fixácie k rámu a vozíku.



Obr. 5. Detail 3D CAD modelu uchytenia manipulátora k rámu a vozíku

ZÁVER

Cieľom príspevku bol konštrukčný návrh a s ním spojené technické výpočty skrutkového manipulátora turniketu sypkých materiálov. Toto zariadenie slúži v potravinárskom priemysle s podmienkou vlastníctva certifikátu *ATEX*, t.j. garancie použiteľnosti rotačného podávača oddeľujúceho dva priestory v prípade výbuchu práškového materiálu (sušené mlieko). Navrhnutým skrutkovým manipulátorom je celá zostava zobrazená na obr. 1 (teleso turniketu, spojka, prevodovka, elektromotor, vodiace tyče, pojazd) tlačaná resp. ťahaná. Hlavnou podmienkou bolo dosiahnutie stavu, kedy je celá konštrukcia bezpečná pre obsluhu počas servisných úkonov na turnikete. Zároveň musí byť konštrukcia bezpečná pre svoje okolie počas bežnej prevádzky rotačného podávača.

Doposiaľ bol vykonaný výpočet ťažísk, ktoré budú

tvoriť významnú okrajovú podmienku pri aplikácii síl v rámci budúcej *MKP* analýzy. Vychádzajúc z ťažísk boli ďalej určené kolesové sily vozíka a pomocou metódy vplyvových čiar bola stanovená najúčinnejšia poloha vozíka na dráhe pojazdu. Kolesové sily boli následne využité pri určovaní ťažnej sily, ktorá je potrebná na pohyb pojazdu. A práve pojazdom manipuluje v článku navrhnutý skrutkový manipulátor.

Výsledky uvedené v práci sú významným podkladom pre ďalší výskum v danej oblasti. Všetky doposiaľ určené parametre konštrukcie budú implementované do okrajových podmienok pri *MKP* analýze v prostredí programu *Ansys*. Dôležité bude sa zamerať na pevnostný návrh spojovacích prvkov rámu nesúceho celý pojazd s turniketom (rám tvorí dráhu pre pojazd podľa obr. 1) a tiež numerické výpočty samotného rámu.

Pod'akovanie

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

LITERATÚRA

- [1] BLATNICKÝ, M. - DIŽO, J. - MOLNÁR, D. - DROŽDZIEL, P. (2022): *Design of a manipulator of a conveyor for bulk materials – calculation of the center of gravity of the conveyor*. In: Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 117, 43-56, ISSN 0209-3324, DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.117.3>.
- [2] BLATNICKÝ, M. - DIŽO, J. - MOLNÁR, D. - ISHCHUK, V. (2023): *Structural design of the manipulator of the rotary valve for bulk materials – calculation of loads acting on individual wheels and analysis of resistances against motion*. In: XI International Scientific Congress Agricultural Machinery, 28. jún - 1. júl, Varna, Bulharsko. V tlači.
- [3] BLATNICKÝ, M. (2015): *Dopravné a manipulačné zariadenia: riešené príklady*. 1. vyd., Žilina: Žilinská univerzita, 120 s. ISBN 978-80-554-1625-0.
- [4] REMTA, F. - KUPKA, L. - DRAŽAN, F. a kol. (1974): *Jeřáby*, 1. díl, Praha: SNTL, 645 s.
- [5] REMTA, F. - KUPKA, L. - DRAŽAN, F. a kol. (1975): *Jeřáby*, 2. díl, Praha: SNTL, 562 s.
- [6] BAJLA, J. - BRONČEK, J. - ANTALA, J. - SEKEREŠOVÁ, D. (2014): *Strojárske tabuľky: výber noriem*. Úrad pre normalizáciu, metodológiu a skúšobníctvo SR, Bratislava, 488 s., sch., tab., ISBN 978-80-8130-039-4.

Skúmanie jazdných vlastností koľajového vozidla a vzájomného pôsobenia kontaktu koleso/koľajnica pomocou simulačných výpočtov

Pavol Šťastniak, Ing., PhD.*

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: juraj.gerlici@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2562

Juraj Gerlici, prof. Dr. Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: juraj.gerlici@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2550

Ján Dižo, doc. Ing., PhD.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: juraj.gerlici@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 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: juraj.gerlici@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2659

Kateryna Kravchenko, doc. Ing., PhD.

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

Railway vehicle ride properties investigation and influencing the wheel/rail contact interaction by means of simulation computations

Abstract: The paper deals with the dynamic analysis and evaluation of the driving characteristics of the selected railway vehicle through computer simulations on virtual and mathematical models. Approaches and methodology from the point of view of creating a virtual model of a railway vehicle as a multi-body system are described in detail., its components and their interrelationships, with the help of which it is possible to obtain the results of a simulated driving of a vehicle with specified parameters of the mechanical system of the vehicle and the track. Practical calculations are performed using the *Simpack* computer program.

Keywords: railway vehicle, dynamic analysis, ride properties, computer simulation, *Simpack*.

ÚVOD

Problematika kontaktu železničného kolesa a koľajnice často tvorí základ analýzy súvisiacej s pohybom koľajového vozidla po koľaji, bezpečnosťou, rýchlosťou, pohodlím prepravy ľudí a

tovarov. Súvisí s konštrukciou nových koľajových vozidiel, rekonštrukciou starých, schvaľovaním (odmietnutím) vozidiel do prevádzky, ich hodnotením, ale aj hodnotením kvality tratí a ich údržbou, má priamy vplyv na pozíciu koľajovej

dopravy v rámci celého dopravného systému na ekonomiku a ekológiu.

V kontakte železničných kolies a koľajníc pôsobia sily, ktoré majú svojim účinkom v dotykovej ploche vplyv na veľkosť normálového a tangenciálneho napätia, opotrebenie povrchov kolesa a koľajnice, alebo priamo na veľkosť bezpečnosti proti vykoľajeniu.

Na veľkosť síl pôsobiacich v kontakte kolesa a koľajnice pri prechode oblúkom koľaje má významný vplyv postavenie dvojkolesia v koľaji. V prípade radiálneho postavenia dvojkolesia (os dvojkolesia je kolmá na os koľaje) pri minimálnom, v ideálnom prípade nulovom uhle nábehu sa prejavujú vodiace sily tiež minimálnym účinkom. Táto skutočnosť má pozitívny vplyv na hodnotu koeficientu bezpečnosti proti vykoľajeniu aj na vznik a účinok tangenciálnych napätí v priečnom smere (y) v kontakte kolesa a koľajnice.

Geometrické charakteristiky dvojkolesia a koľaje pomáhajú špecifikovať geometrickú väzbu dvojkolesia a koľaje. Pomocou nich je možné relatívne rýchlo vyhodnotiť niektoré parametre tejto väzby, ktoré pomáhajú odhadnúť, ako sa vozidlo či presnejšie dvojkolesie môže správať v reálnej prevádzke.

1 VÝPOČTOVÝ MODEL VOZIDLA

V nasledujúcom texte je spracovaný postup vytvorenia matematického modelu (pohybových rovníc) koľajového vozidla, ktoré popisujú jeho pohyb v priamej trati a v oblúkoch.

Výpočtový model je charakterizovaný parametrami vozidla, jeho geometrickými a hmotnostnými parametrami, parametrami pružných väzieb, tlmičov. Ďalej sú to parametre kontaktnej väzby dvojkolesia a koľaje a parametre trate.

Postup bol algoritmizovaný a zapísaný do programovacieho jazyka. Predstavuje ucelené softvérové riešenie, pomocou ktorého je možné získať výsledky simulovanej jazdy koľajového vozidla so špecifikovanými parametrami mechanického systému vozidla a trate. Kontaktné elipsy a priebeh normálového napätia sa počíta pomocou *Hertzovej metódy*.

Pre stredný polomer dvojkolesia, strednú hodnotu kontaktného uhla, krivosť trate a uhlovú rýchlosť otáčania dvojkolesia platí:

$$r_0 = \frac{r_l + r_r}{2}, \quad \delta_0 = \frac{\delta_l + \delta_r}{2}, \quad P = \frac{\delta_0 \cdot r_0}{a}, \quad (1)$$

$$C = \pm \frac{1}{R}, \quad \gamma_0 = \pm b \cdot C, \quad \Omega = \frac{v_0}{r_0},$$

kde r_0 [m] je priemerný polomer kolies,

r_l [m] je okamžitý polomer ľavého kolesa,

r_r [m] je okamžitý polomer pravého kolesa,

δ_0 [rad] je stredný uhol dotykových rovín,

δ_l [rad] je uhol dotykovej roviny ľavého kolesa,

δ_r [rad] je uhol dotykovej roviny pravého kolesa,

P je pomocná premenná,

a [m] je polovičná vzdialenosť styčných kružníc,

C [m^{-1}] je krivosť oblúka koľaje. V prípade, že sa jedná o pravý oblúk, tak platí znamienko „+“, ak sa jedná o ľavý oblúk, platí znamienko „-“,

R [m] je polomer oblúka koľaje,

γ_0 [rad] je uhol nábehu kolesa v tetivovej polohe podvozka v koľaji. Pre predné dvojkolesie platí znamienko „-“, pre zadné dvojkolesia platí znamienko „+“,

Ω [$rad \cdot s^{-1}$] je uhlová rýchlosť dvojkolesia,

v_0 [$m \cdot s^{-1}$] je rýchlosť vozidla.

Vozidlo nabieha na koľajnicové pásy trate v oblúku pod uhlom nábehu.

Pre vektor pomerných sklzov platí:

$$\begin{bmatrix} s_{i,1} \\ s_{i,2} \\ s_{i,3} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_0} \begin{bmatrix} v_0 \cdot \left(1 - \frac{r_i}{r_0} \pm a \cdot C \right) \pm a \cdot \dot{\gamma} \\ \dot{\gamma} - v_0 \cdot (\gamma_0 + \gamma) - \dot{\alpha} \cdot r_i \\ \dot{\gamma} \pm \Omega \cdot \delta_i + v_0 \cdot C \end{bmatrix}; \quad i = (l, r) \quad (2)$$

kde $s_{i,1}$ [-] je sklz v dotykovom bode ľavého, alebo pravého kolesa v smere 1 (= x), 2 (= v priečnom smere dotykovej roviny) a 3 (smer kolmý na dotykovú rovínu),

$\dot{\gamma}$ [$rad \cdot s^{-1}$] je uhlová rýchlosť nabiehajúceho kolesa prvej nápravy pri rotácii okolo osi z ,

γ [rad] je natočenie dvojkolesia,

$\dot{\alpha}$ [$rad \cdot s^{-1}$] je uhlová rýchlosť dvojkolesia pri rotácii okolo osi x .

Pre kombinovaný modul pružnosti v šmyku platí:

$$G = \frac{2 \cdot G_W \cdot G_R}{G_W + G_R}, \quad (3)$$

kde G [Pa] je kombinovaný modul pružnosti v šmyku,

G_W [Pa] je modul pružnosti v šmyku kolesa,

G_R [Pa] je modul pružnosti v šmyku koľajnice.

Pre kontaktné sily v dotykových bodoch platí:

$$f_{11} = (a_e \cdot b_e) \cdot G \cdot C_{11}, \quad f_{22} = (a_e \cdot b_e) \cdot G \cdot C_{22}, \quad (4)$$

$$f_{33} = (a_e \cdot b_e)^2 \cdot G \cdot C_{33}, \quad f_{23} = (a_e \cdot b_e)^3 \cdot G \cdot C_{23},$$

kde f_{11}, f_{22} majú rozmer sily [N],

f_{33} [$N \cdot m^2$] a f_{23} [$N \cdot m$] podľa *Kalkerovej metódy* výpočtu,

a_e, b_e [m] sú hlavná a vedľajšia polos kontaktnej elipsy v mieste dotyku kolesa a koľajnice,

$C_{11}, C_{22}, C_{33}, C_{23}$ sú *Kalkerove* koeficienty [2].

Pre tangenciálne sily a momenty v dotykových bodoch platí:

$$\begin{bmatrix} f_{ti,1} \\ f_{ti,2} \\ l_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & 0 & 0 \\ 0 & f_{22} & f_{23} \\ 0 & -f_{23} & f_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_{i,1} \\ s_{i,2} \\ s_{i,3} \end{bmatrix}; \quad i = (l, r) \quad (5)$$

kde $f_{ti,1}$ [N] je tangenciálna sila v dotykovom bode ľavého, alebo pravého kolesa, v (pozdĺžnom) smere osi 1 dotykovvej roviny,

$f_{ti,2}$ [N] je tangenciálna sila v dotykovom bode ľavého, alebo pravého kolesa, v (pričnom) smere osi 2 dotykovvej roviny,

l_i [N.m] je spinový moment ľavého alebo pravého kolesa okolo osi 3 kolmej na dotykovú rovinu kolesa a koľajnice.

Pre normálové sily platí:

$$f_{nl} = \frac{1}{2 \cdot a} \cdot I_2 \cdot \dot{\gamma} \cdot \Omega - \frac{1}{2 \cdot a} \cdot (r_l \cdot f_{tl,2} + r_r \cdot f_{tr,2}) + \frac{1}{2} \cdot (Q_l + Q_r), \quad (6)$$

kde f_{nl} [N] je normálová sila v kontaktnom bode ľavého kolesa,

I_2 [kg·m²] je moment zotrvačnosti dvojkoľesia pri otáčaní okolo osi rotácie,

Q_l [N] je kolesová sila na ľavom kolese,

Q_r [N] je kolesová sila na pravom kolese,

$$f_{nr} = -\frac{1}{2 \cdot a} \cdot I_2 \cdot \dot{\gamma} \cdot \Omega + \frac{1}{2 \cdot a} \cdot (r_l \cdot f_{tl,2} + r_r \cdot f_{tr,2}) + \frac{1}{2} \cdot (Q_l + Q_r), \quad (7)$$

kde f_{nr} [N] je normálová sila v kontaktnom bode pravého kolesa.

Pre ľavú kolesovú silu platí:

$$Q_l = \frac{m \cdot g \cdot (y_r - y) + F_{zpl} \cdot (y_r - y + a_p) + F_{zpr} \cdot (y_r - y - a_p)}{y_l + y_r} \quad (8)$$

kde Q_l [N] je kolesová sila na ľavom kolese,

y_r [m] je súradnica dotykového bodu pravého kolesa a koľajnice,

y [m] je prične posunutie dvojkoľesia,

F_{zpl} [N] je sila v mieste ložiskovej skrine (primárneho vypruženia) ľavého kolesa,

F_{zpr} [N] je sila v mieste ložiskovej skrine (primárneho vypruženia) pravého kolesa,

a_p [m] je polovičná vzdialenosť ložiskových skriň (primárneho vypruženia na jednom dvojkoľesí),

$$Q_r = \frac{m \cdot g \cdot (y_l + y) + F_{zpl} \cdot (y_l + y - a_p) + F_{zpr} \cdot (y_l + y + a_p)}{y_l + y_r}, \quad (9)$$

kde Q_r [N] je kolesová sila na pravom kolese,

y_l [m] je súradnica dotykového bodu ľavého kolesa a koľajnice.

1.1 Pohybové rovnice dvojkoľesia

Pohybová rovnica dvojkoľesia v smere osi x :

$$m \cdot \ddot{x} = -(f_{tl,1} + f_{tr,1}) + \gamma \cdot (f_{tl,2} + f_{tr,2}). \quad (10)$$

Pohybová rovnica dvojkoľesia v smere osi y :

$$m \cdot \ddot{y} = -\gamma \cdot (f_{tl,1} + f_{tr,1}) - (f_{tl,2} + f_{tr,2}) + (\alpha + \delta_l) \cdot f_{nl} + (\alpha - \delta_r) \cdot f_{nr}. \quad (11)$$

Pohybová rovnica dvojkoľesia pre rotáciu okolo osi z :

$$I_1 \cdot \ddot{\gamma} - I_2 \cdot \dot{\alpha} \cdot \Omega = -a \cdot (f_{tl,1} - f_{tr,1}) - (l_l + l_r), \quad (12)$$

kde I_l je kvadratický moment zotrvačnosti dvojkoľesia pre rotáciu okolo osi x alebo osi z .

Posunutie dvojkoľesia v smere osi z je funkciou posunutia dvojkoľesia v smere osi x a y , a z -tových súradníc dotykových bodoch ľavého a pravého kolesa dvojkoľesia:

$$z = f(x, y, z_l, z_r). \quad (13)$$

Uhlovú rýchlosť otáčania sa dvojkoľesia β môžeme vyjadriť nasledujúcou rovnicou:

$$\dot{\beta} = -\frac{v_0}{r_0}. \quad (14)$$

Po dosadení do pohybových rovníc (10), (11) a (12) dostaneme vyjadrenia (15), (16) a (17):

$$m \cdot \ddot{x} = -f_{11} \cdot \left(2 - \frac{r_l + r_r}{r_0}\right) + 2 \cdot \frac{f_{11}}{v_0} a \cdot \dot{\gamma} + \frac{f_{23}}{v_0} \cdot [\Omega \cdot (\delta_l - \delta_r) + 2 \cdot v_0 \cdot C] \cdot \gamma, \quad (15)$$

$$m \cdot \ddot{y} + 2 \cdot \frac{f_{22}}{v_0} \cdot \left[\dot{y} - v_0 \cdot (\gamma_0 + \gamma) - \dot{\alpha} \cdot \frac{r_l + r_r}{2}\right] + 2 \cdot \frac{f_{23}}{v_0} \cdot \left[\dot{\gamma} + \Omega \cdot \frac{\delta_l - \delta_r}{2} + v_0 \cdot C\right] + 2 \cdot \gamma \cdot f_{11} \cdot \left(1 - \frac{r_l + r_r}{2 \cdot r_0}\right) - (Q_l + Q_r) \cdot \left(\alpha + \frac{\delta_l - \delta_r}{2}\right) - \frac{\delta_l + \delta_r}{2 \cdot a} \cdot I_2 \cdot \dot{\gamma} \cdot \Omega + \left. \begin{aligned} &+ \frac{\delta_l + \delta_r}{2 \cdot a} \cdot \left\{ \frac{f_{22}}{v_0} \cdot (r_l + r_r) \cdot [\dot{y} - v_0 \cdot (\gamma_0 + \gamma)] - \frac{f_{22}}{v_0} \cdot (r_l^2 + r_r^2) \cdot \dot{\alpha} \right. \\ &\left. + \frac{f_{23}}{v_0} \cdot (r_l + r_r) \cdot \gamma + \frac{f_{23}}{v_0} \cdot (r_l \cdot \delta_l - r_r \cdot \delta_r) \cdot \Omega + f_{23} \cdot (r_l + r_r) \cdot C \right\} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$I_1 \cdot \ddot{\gamma} - I_2 \cdot \dot{\alpha} - 2 \cdot \frac{f_{23}}{v_0} \cdot \left[\dot{y} - v_0 \cdot (\gamma_0 + \gamma) - \dot{\alpha} \cdot \frac{r_l + r_r}{2}\right] + 2 \cdot \frac{f_{23}}{v_0} \cdot \left[\dot{\gamma} + \Omega \cdot \frac{\delta_l - \delta_r}{2} + v_0 \cdot C\right] + 2 \cdot a \cdot \frac{f_{11}}{v_0} \cdot \left(-\frac{v_0}{r_0} \cdot \frac{r_l - r_r}{2} + a \cdot (v_0 \cdot C + \dot{\gamma})\right) = 0 \quad (17)$$

Pre uhol α ktorý vyjadruje natočenie dvojkolesia okolo osi x a uhlovú rýchlosť $\dot{\alpha}$ platia nasledujúce vzťahy:

$$\alpha \approx -\frac{\delta_0}{a} \cdot y, \quad \dot{\alpha} \approx -\frac{\delta_0}{a} \cdot \dot{y}. \quad (18)$$

Polovičnú hodnotu rozdielu okamžitých polomerov kolies vyjadríme ako súčin stredného uhla dotykových rovín a záporného priečného posunutia dvojkolesia v koľaji:

$$\frac{1}{2}(r_l - r_r) \approx -\delta_0 \cdot y. \quad (19)$$

Po dosadení vzťahov (18), (19) do rovníc (15), (16), (17) dostaneme pohybové rovnice v nasledujúcom tvare (20), (21), (22):

Pre posuvný pohyb dvojkolesia v smere osi x :

$$m \cdot \ddot{x} - 2 \cdot \frac{f_{11}}{v_0} a \cdot \dot{y} - f_{23} \cdot \left[\frac{(\delta_l - \delta_r)}{r_0} + 2 \cdot C \right] \cdot \gamma = 0. \quad (20)$$

Pre posuvný pohyb dvojkolesia v smere osi y :

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{y} + 2 \cdot \frac{f_{22}}{v_0} \cdot \left[\dot{y} \cdot \left(1 + \frac{\delta_0 \cdot r_0}{a} \right) - v_0 \cdot (\gamma_0 + \gamma) \right] + \\ + 2 \cdot \frac{f_{23}}{v_0} \cdot \dot{\gamma} + f_{23} \cdot \left(\frac{\delta_l - \delta_r}{r_0} + 2 \cdot C \right) + \\ + (Q_l + Q_r) \cdot \left(\frac{\delta_0}{a} \cdot y - \frac{\delta_l - \delta_r}{2} \right) - I_2 \cdot \frac{\delta_0 \cdot v_0}{a \cdot r_0} \cdot \dot{\gamma} + \\ + \frac{\delta_0}{a} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \frac{f_{22}}{v_0} \cdot 2 \cdot r_0 \cdot [\dot{y} - v_0 \cdot (\gamma_0 + \gamma)] + \frac{f_{22}}{v_0} \cdot (r_l^2 + r_r^2) \cdot \frac{\delta_0}{a} \cdot \dot{y} \\ & + \frac{f_{23}}{v_0} \cdot 2 \cdot r_0 \cdot \dot{\gamma} + f_{23} \cdot \left(\frac{r_l \cdot \delta_l - r_r \cdot \delta_r}{r_0} + 2 \cdot r_0 \cdot C \right) \end{aligned} \right\} = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

Pre rotačný pohyb dvojkolesia okolo osi z :

$$\begin{aligned} I_1 \cdot \ddot{\gamma} + I_2 \cdot \frac{\delta_0 \cdot v_0}{a \cdot r_0} \dot{\gamma} - 2 \cdot \frac{f_{23}}{v_0} \cdot \left[\dot{y} \cdot \left(1 + \frac{\delta_0 \cdot r_0}{a} \right) - v_0 \cdot (\gamma_0 + \gamma) \right] + \\ + 2 \cdot \frac{f_{33}}{v_0} \cdot \dot{\gamma} + f_{33} \cdot \left(\frac{\delta_l - \delta_r}{r_0} + 2 \cdot C \right) + \\ + 2 \cdot a \cdot \frac{f_{11}}{v_0} \cdot \left(\frac{\delta_0 \cdot v_0}{r_0} \cdot y + a \cdot \dot{\gamma} \right) + 2 \cdot a^2 \cdot f_{11} \cdot C = 0. \quad (22) \end{aligned}$$

Okrem síl pôsobiacich na dvojkolesie, pôsobí pri prechode vozidla oblúkom v dôsledku účinkov gravitačného a dostredivého zrýchlenia na každé teleso sila (23):

$$F_{y_i} = m_i \cdot (-g \cdot \sin \alpha_R + v_0^2 \cdot C \cdot \cos \alpha_R), \quad (23)$$

$$F_{z_i} = m_i \cdot (g \cdot \cos \alpha_R + v_0^2 \cdot C \cdot \sin \alpha_R).$$

kde U [m] je prevýšenie vonkajšieho koľajnicového pásu na trati v oblúku,

$2 \cdot a$ [m] je vzdialenosť styčných kružníc.

1.2 Pohybové rovnice vozidla

V nasledujúcom predpokladáme, že model vozidla je zložený výhradne z tuhých telies spojených pružnými väzbami. Tuhé telesá charakterizujeme maticou hmotnosti a pružné väzby maticou tuhosti a tlmenia.

Pohybovú rovnicu vozidla v maticovom tvare môžeme vyjadriť:

$$[M] \cdot \{\ddot{q}\} + [B] \cdot \{\dot{q}\} + [K] \cdot \{q\} = \{f\}, \quad (24)$$

kde $[M]$ je matica hmotnosti,

$[B]$ je matica tlmenia,

$[K]$ je matica tuhosti,

$\{\ddot{q}\}$ je vektor zrýchlení,

$\{\dot{q}\}$ je vektor rýchlostí,

$\{q\}$ je vektor posunutí,

$\{f\}$ je vektor vonkajších zaťažení.

Pre výpočet metódou *Runge-Kutta* si vyjadríme vektor $\{y\}$ a $\{\dot{y}\}$ v tvare:

$$\begin{Bmatrix} \{\ddot{q}\} \\ \{\dot{q}\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -[M]^{-1} \cdot [B] & -[M]^{-1} \cdot [K] \\ [I] & [0] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{\dot{q}\} \\ \{q\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} [M]^{-1} \cdot \{f\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (25)$$

$$\{y\} = \begin{Bmatrix} \{\dot{q}\} \\ \{q\} \end{Bmatrix}, \quad \{\dot{y}\} = \begin{Bmatrix} \{\ddot{q}\} \\ \{\dot{q}\} \end{Bmatrix}, \quad \{N\} = \begin{Bmatrix} [M]^{-1} \cdot \{f\} \\ \{0\} \end{Bmatrix},$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -[M]^{-1} \cdot [B] & -[M]^{-1} \cdot [K] \\ [I] & [0] \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\{\dot{y}\} = [A] \cdot \{y\} + \{N\} \quad (27)$$

$$\{\dot{y}\} = f(t, \{y\}, \{N\}) \quad (28)$$

Pre získanie výsledkov sme v tomto prípade použili metódu *Runge-Kutta* 4. stupňa.

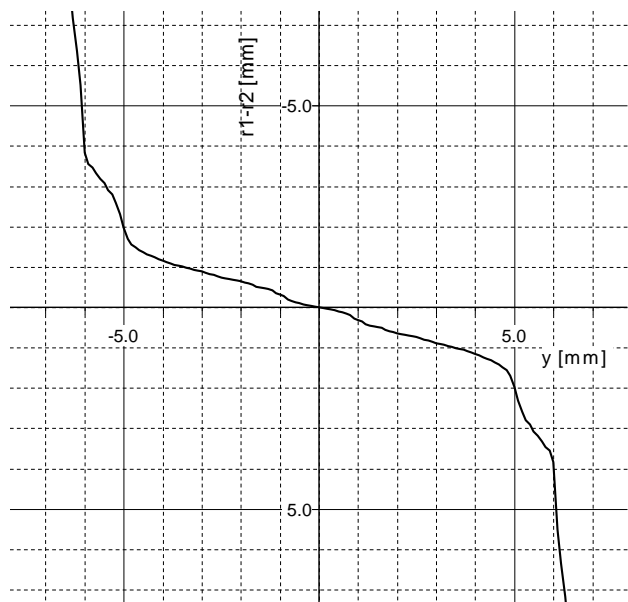
1.3 Geometrické charakteristiky dvojkolesia a koľaje

Geometrické charakteristiky dvojkolesia a koľaje pomáhajú predikovať pohyb dvojkolesia v koľaji. Zároveň zobrazujú charakteristiky vzájomného vzťahu geometrie jazdného profilu kolesa a profilu hlavy koľajnice, ktoré sú dôležitým vstupným parametrom pre budenie mechanického systému vozidla v dôsledku odval'ovania sa kolies dvojkolesí po koľajniciach železničnej koľaje. Obidve funkcie priamo vstupujú do výpočtu.

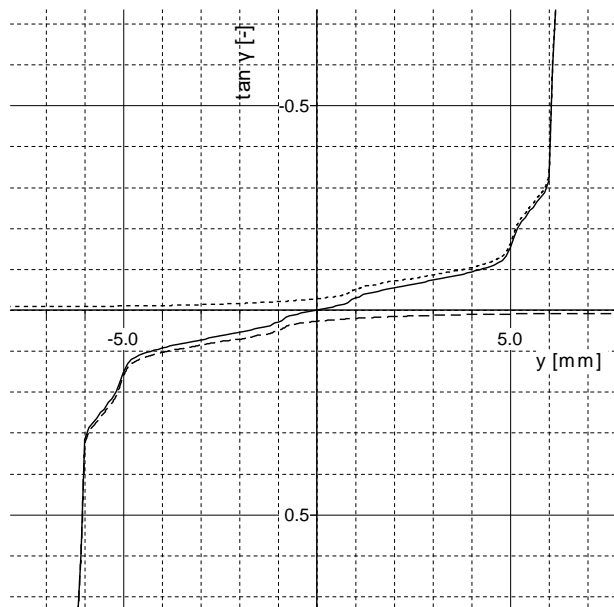
Zo všetkých geometrických charakteristík tu uvádzame len *Delta R* funkciu a funkciu tangens gama. Z obr. 1 a obr. 2 vidieť, že ku najvýznamnejšej zmene priebehu dochádza pri dosiahnutí priečného posunutia profilu kolesa o cca 5 mm po profile hlavy koľajnice. V tomto mieste je vyčerpaný kanál rozchodu koľaje a koleso svojím okolesníkom šplhá na bok hlavy koľajnice. Na *funkcii tangens gama* sa táto oblasť tiež vyznačuje prudkou zmenou priebehu.

Modelová trať pozostáva z na seba nadväzujúcich úsekov priamej trate, prechodníc, vzostupníc a trate v oblúkoch.

Geometria trate (obr. 3) v horizontálnej rovine je znázornená v grafe hrubšou čiarou, prináleží jej popis vertikálnej osi na ľavej strane. Z toho vyplýva, že trať tvoria oblúky s polomerom $R = 293$ metrov (ľavé aj pravé). V spodnej polovici grafu sú zobrazené prevýšenia vonkajšieho koľajnicového pásu 0,144 m.



Obr. 1. Zobrazenie závislosti priebehu *Delta R* funkcie na priečnom posunutí profilu kolesa po profile koľajnice

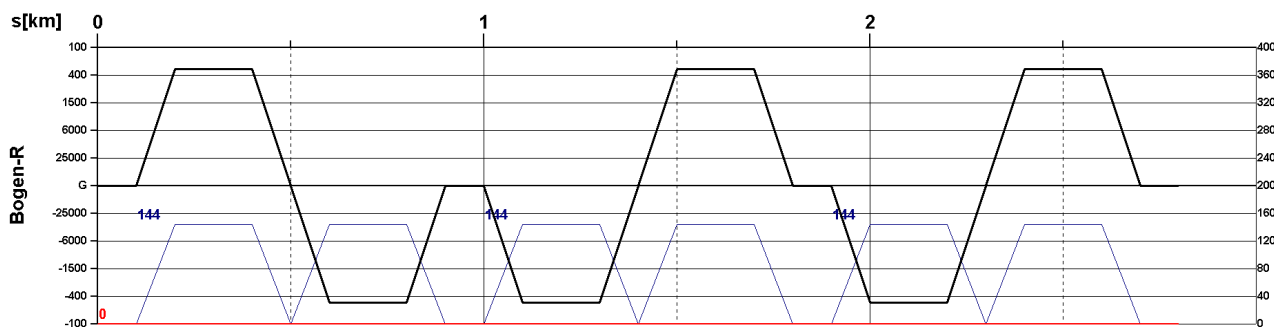


Obr. 2. Zobrazenie závislosti priebehu funkcie *tangens gamma* na priečnom posunutí profilu kolesa po profile koľajnice

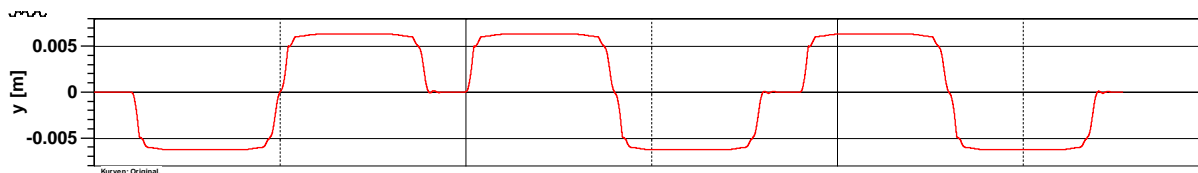
Vertikálna os, ktorá prináleží k tomuto grafu je na pravej strane. Vo výpočte boli použité prechodnice a vzostupnice typu *Bloss*.

2 VÝSLEDKY SIMULAČNÝCH ANALÝZ

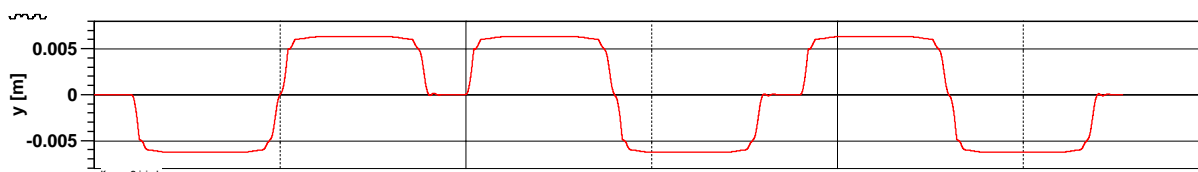
V nasledujúcich grafoch je možné vidieť priebeh posunutia dvojkolesia v priečnom smere (y), vodiacich síl (Y), kolesových síl (Q), suma vodiacich síl (SY). Zároveň sú vyhodnotené a graficky zobrazené sily v dotykovovej rovine kolesa a koľajnice:



Obr. 3. Špecifikácia trate



Obr. 4. Posunutie dvojkolesia v smere osi y



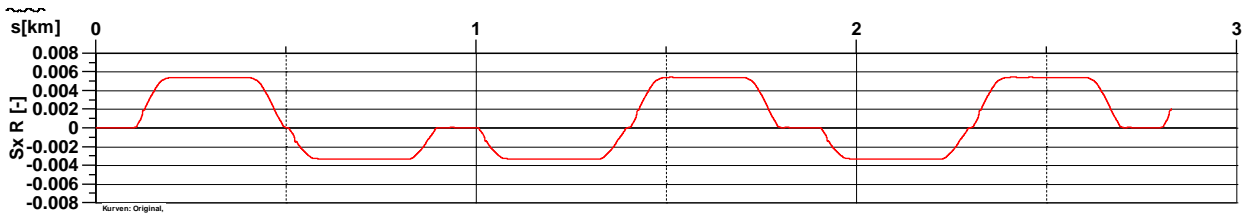
Obr. 5. Otočenie dvojkolesia okolo osi z

normálová (N), (T) a sklzy (S) v jednotlivých smeroch.

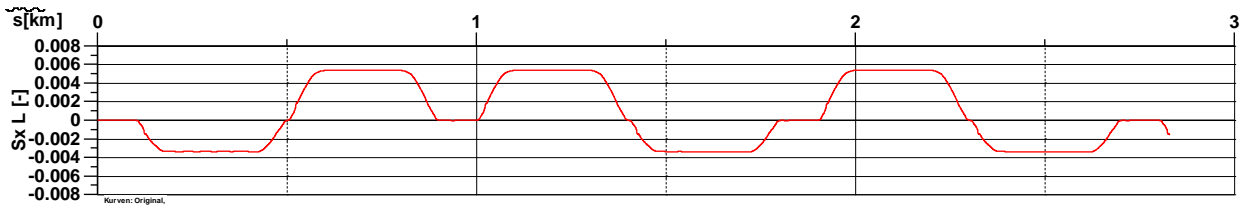
V grafoch sú vynesené výsledky z výpočtov, v ktorom sú implementované algoritimizované pohybové rovnice a dopĺňujúce vzťahy uvedené v tomto článku.

2.1 Posunutie a natočenie dvojkolesia

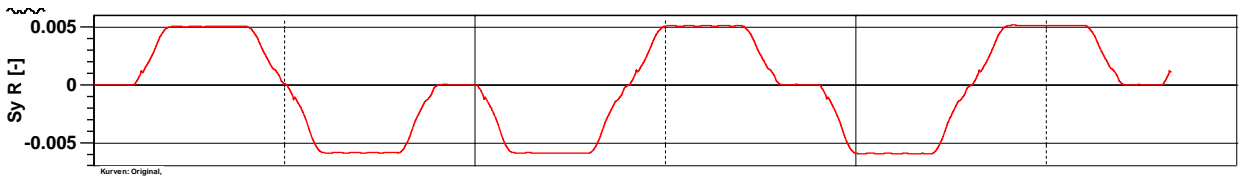
Natočenie dvojkolesia okolo osi z (obr. 5) môžeme považovať za veľmi podobné. Malé odchýlky sa objavujú pri prechodoch z jedného oblúka do druhého.



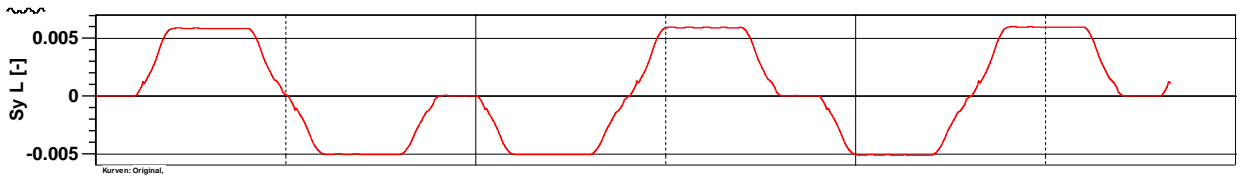
Obr. 6. Sklz v smere x na pravom kolese prvého dvojkolesia



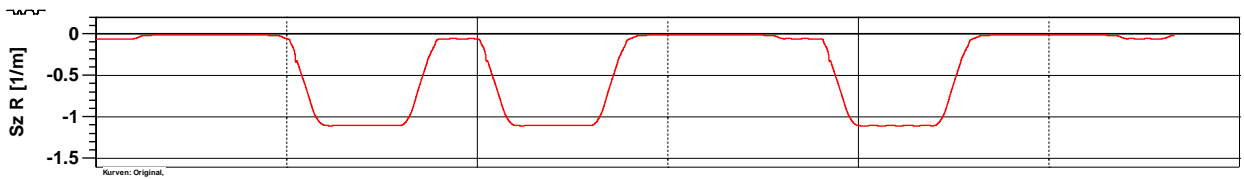
Obr. 7. Sklz v smere x na ľavom kolese prvého dvojkolesia



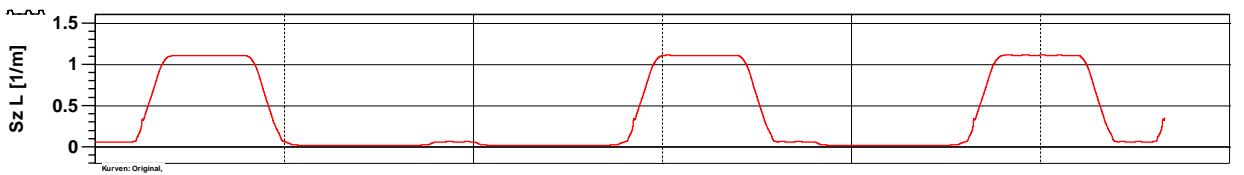
Obr. 8. Sklz v smere y na pravom kolese prvého dvojkolesia



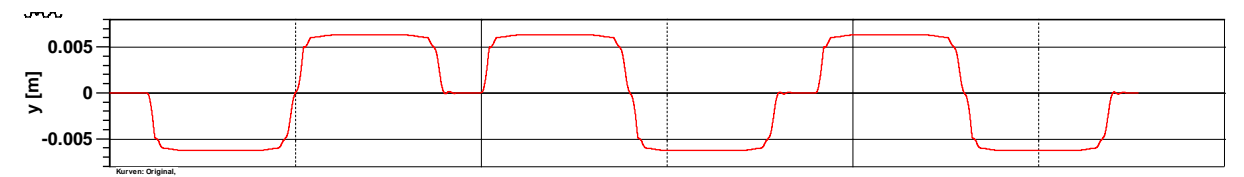
Obr. 9. Sklz v smere y na ľavom kolese prvého dvojkolesia



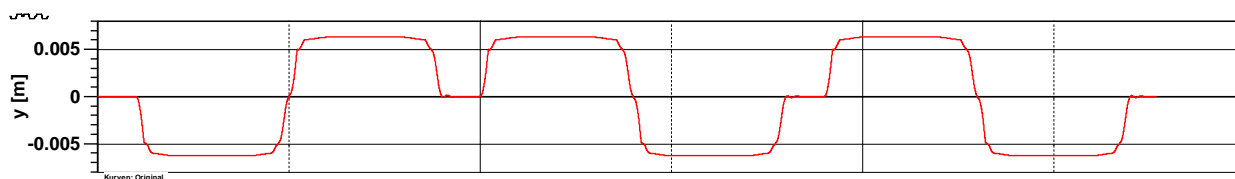
Obr. 10. Spinový sklz na pravom kolese



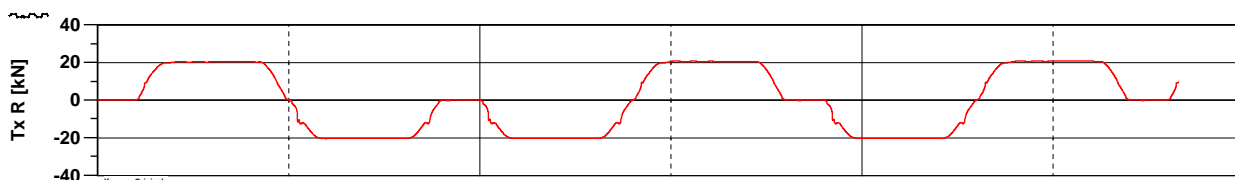
Obr. 11. Spinový sklz na ľavom kolese



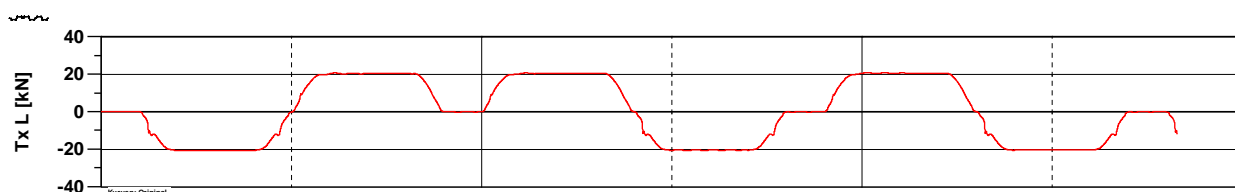
Obr. 12. Normálová sila na pravom kolese prvého dvojkolesia



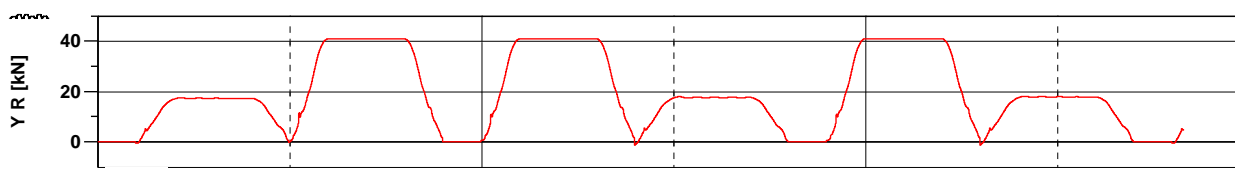
Obr. 13. Normálová sila na ľavom kolese prvého dvojkoľesia



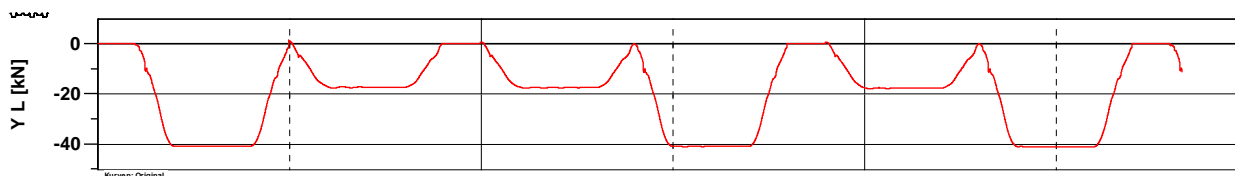
Obr. 14. Tangenciálna sila v smere x na pravom kolese prvého dvojkoľesia



Obr. 15. Tangenciálna sila v smere x na ľavom kolese prvého dvojkoľesia



Obr. 16. Vodiaca sila na pravom kolese prvého dvojkoľesia



Obr. 17. Vodiaca sila na ľavom kolese prvého dvojkoľesia

2.2 Sklzy

V obr. 6 až obr. 11 sú vynesené priebehy sklzov v kontakte pravého a ľavého kolesa s koľajnicami.

Sklzové parametre sú dôležité pri výpočte tangenciálnych síl, takže „výkmity“ pri prechode priebehu kriviek ktoré sú vidieť na sklzoch v smere x pravého (obr. 6) a ľavého kolesa (obr. 7) a prejavili aj pri výpočte tangenciálnych síl na obr. 14. a obr. 15.

Priebeh spinových sklzov na obidvoch kolesách je tiež podobný. Maximálny rozdiel v ustálených polohách pri prechode oblúkom je cca 0,1.

2.3 Normálové sily

Normálové sily (obr. 12 a obr. 13) predstavujú výsledky silového pôsobenia v smere normály na dotykovú rovinu kolesa a koľajnice v kontaktnom bode.

2.4 Tangenciálne sily

Pri vyhodnotení tangenciálnych síl sa objavili rozdiely v miestach prechodov vozidla z jednej geometrie trate (priama, prechodnica, oblúk) do inej geometrie trate (obr. 14 a obr. 15). Priebeh tangenciálnej sily v pozdĺžnom smere x má prudší sklon prechodov a do ustáleného rovnobežného priebehu pri jazde v priamej trati alebo oblúku sa dostáva cez „výkmit“, v ktorom sú evidované krátkodobo vyššie hodnoty síl. „Výkmity“ pri priebehoch síl vyplývajú z „výkmitov“ priebehov sklzov. Tangenciálne sily v smere osi y sú pri prebehom podobné.

2.5 Vodiace sily

Priebeh vodiacich síl je dôležitým parametrom výsledkov. Svedčí nielen o tom, aké je priečne silové pôsobenie kolesa na koľajnicu, ale v tomto prípade

dáva obraz aj o výsledku spracovania kontaktných parametrov dvojkolesia a koľaje, kontaktných plôch a napätí a predpokladoch silového pôsobenia medzi vozidlom a traťou. V skúmanom prípade dosahujú vhodné priebehy.

ZÁVER

Blízky priebeh jednotlivých síl verifikuje navrhnuté matematické vyjadrenia skúmaného pohybového stavu vozidla na základe získaných výsledkov.

Na obrázkoch s grafickým zobrazením priebehov posunutia dvojkolesia v priečnom smere (y), natočenia dvojkolesia, sklzov (S), síl v dotykovej rovine kolesa a koľajnice: normálových (N), tangenciálnych (T), vodiacich síl (Y), sumy vodiacich síl (SY), kolesových síl (Q) vidieť veľmi dobrú zhodu.

V ďalšom období nám to umožní vyšetrovať pružné väzby a tlmiče s charakteristikami, ktoré program SIMPACK priamo neumožňuje a tiež použiť iné kontaktné teórie styku kolesa s koľajnicou.

PodĎakovanie

„Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Konceptia, bezpečnosť a súvisiaci priemyselný výskum náhrady dieselového pohonu za pohon s vodíkovým palivovým článkom v diesel motorových jednotkách radu 861 (kód projektu v ITMS2014+: 313011BVC2), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.“

LITERATÚRA

[1] POPP, K. - SCHIEHLEN, W. (2010): *Ground vehicle dynamics*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, s. 357, ISBN 978-3-540-24038-9.

[2] KALKER, J. J. (1990): *Three-dimensional elastic bodies in rolling contact*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, Netherlands, s. 314, ISBN 0-7923-0712-7.

[3] DUKKIPATI, R. V. - AMYOT, J. R. (1988): *Computer-aided Simulation in Railway Dynamics*. Marcel Dekker, New York, USA, s. 423, ISBN 0-8247-7787-5.

[4] IWNIICKI, S. (2006): *Handbook of Railway Vehicles Dynamics*. Boca Raton: CRC Press, Taylor&Francis Group, ISBN-13: 978-0-8493-3321-7.

[5] GERLICI, J. - LACK T. (2004) *Kontakt železničného dvojkolesia a koľaje*. Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, ISBN 80-8070-317-5.

[6] DIŽO, J. - BLATNICKÝ, M. (2017): *Analýza dynamickej odozvy jazdy podvozka koľajového vozidla s poddajným členom*. In: *Železničná doprava a logistika: vedecko-odborný časopis o železničnej doprave a preprave, logistike a manažmente*, Vol. 13, No. 1, s. 17-20, ISSN 1336-7943.

[7] DIŽO, J. - BLATNICKÝ, M. (2020): *Tvorba MBS modelu koľajového vozidla v komerčnom výpočtovom programme*. In: 46. Medzinárodná vedecká konferencia katedier dopravných, manipulačných, stavebných a poľnohospodárskych strojov, 1. vyd., Žilina: Vedeckotechnická spoločnosť pri Žilinskej univerzite, s. 6-11, ISBN 978-80-89276-60-8.

[8] DIŽO, J. - BLATNICKÝ, M. (2017): *Assessment of dynamic properties of a carriage using multibody simulation considering rigid and flexible track*. In: IRMES 2019, 9th international scientific conference: research and development of mechanical elements and systems: book of abstracts, Kragujevac: Univerzitetu u Kragujevcu, s. 214-215, ISBN 978-86-6335-061-8.

[9] DIŽO, J. - BLATNICKÝ, M. - PAVLÍK, A. (2018): *Analysis of dynamic impacts of a rail vehicle running with a damaged wheel*. In: *Dynamical problems in rail vehicles 2018: proceedings of the workshop*, Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, s. 14-19, ISBN 978-80-554-1458-4.

Industry 4.0 in manufacturing enterprises

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 2719

Miroslav Rakyta, doc. Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: miroslav.rakyta@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2737

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

Katarína Štaffenová, Ing.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: katarina.staffenova@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2740

Abstract: The paper deals with the analysis the options available to companies for improving the production enterprises as part of the transformation to *Industry 4.0*. Digital transformation involves the integration of digital technologies and solutions into every area of business. This is a cultural change rather than a technological one, requiring organizations to make fundamental changes in the way they operate and how they deliver experiences and benefits to customers. Digital solutions also help expand the workforce and can lead to the transformation of business processes and business models.

Keywords: Industry 4.0, digital transformation, digital solutions, business models.

INTRODUCTION

Businesses should consider steps and have a discussion with a software vendor to help begin creating a strategic transformation, plan, and learning which solutions are best for unique business needs.

The meaning of the individual steps is as follows:

- a) Determining the starting point: In order to give the project an initial head start, it is necessary to first search within the company for processes that have a high operational priority and have the least complicated path to transformation.
- b) Defining priorities: Digital transformation does not have to happen all at once. Like building

elements, smart technologies are designed to evolve, expand and integrate.

- c) Inventory building: A significant benefit of smart technologies lies in their enormous scalability and ability to quickly adapt and reconfigure. A great transformation plan should allow for agility and growth, but you need to start with a plan that has some strong and achievable goals. It is necessary to seek support from specialized professionals who understand unique needs and they can help chart the best course for the business.
- d) Preparing teams: Smart technologies can help reduce the number of repetitive and time-

consuming tasks, improve employee engagement and promote collaboration. However, these benefits can only be realized when everyone on the team agrees to the transformation. There is no need to mislead the teams with news. It is necessary to learn from their input and ideas, openly address their concerns and give them time to change.

When examining the issue more deeply, it is found that it is not actually the new technologies or business innovations that are at fault. The weaknesses were poor planning, poor communication and change strategies, and a general failure of executives and project managers to involve and seek to involve all teams affected by the change.

1 DIGITAL TRANSFORMATION ON THE TERRITORY OF THE SLOVAK REPUBLIC

The results of the survey on the level of digitization and implementation of *Industry 4.0* in *slovak* companies show that only 8 % of companies are currently preparing an implementation strategy. A third of companies are still only collecting information about digitization and trying to find their way around the issue (35 %). Despite the still low share of digitizing companies, 58 % of the total number of businesses surveyed consider it important for their future. Of those that have not yet started with the *Industry 4.0* application, up to 86 % of businesses see the need to digitize. As part of internal processes, companies plan to digitize primarily production (66 %) and logistics (46 %). Regarding external processes, they see the digitalization of communication with customers (68 %) and communication with the supply chain (52 %) as the most urgent. Today, 23 % of enterprises in *Slovakia* are undergoing digital transformation. In a three-year view of the share of digitizing companies, a continuous decrease is recorded [1].

The pace of transformation is hindered by rising inflation, rising prices of materials, energy and fuel, as well as uncertainty associated with domestic political turbulence and the war conflict in *Ukraine*. These circumstances determine companies' priorities, influence the attitude towards digitization and the pace of *Industry 4.0* application. Despite the difficult situation, almost two-thirds of companies already digitizing continue to do so, 11 % of companies even intensified their application activities this year. Conversely, 14 % of companies stopped transformational changes due to unfavorable global circumstances. Almost half of all respondents (49 %) claim that digitization would help them in current situations associated with crises [6-7].

One of the fundamental problems that the survey re-

peatedly names is building a corporate culture supporting the digital transformation of businesses. Companies lack strategic and application teams, do not build an environment for the development of innovations, do not properly understand the role of management in connection with the preparation and management of a digital strategy. The survey showed that only 10 % of companies have established a separate department or a special team tasked with creating a strategy and dealing with the *Industry 4.0* application. Today, only 15 % of companies have an innovation management system. "The values in these parameters have been very low for a long time. Businesses still do not realize that it is innovations that drive industrial production and strengthen them against the competition [2-5].

The basic obstacle to the development of digitalization is the lack of knowledge about digitalization in industry. Businesses want to digitize, but don't know how. Despite this, almost half of the companies (43 %) confirmed the leadership of employees to learn and develop in the field of digitization and digital skills. This fact can be a promise for solving the persistent lack of experts with skills corresponding to the demands of current digitization trends. The need for a constant influx of information related to digitization remains urgent. More than half of the companies (55 %) lack the information needed to apply digital solutions, do not know where to get them, do not have an opinion on their availability or cannot comment on the issue. Only more than a quarter of enterprises (28 %) have the necessary information for their development [3].

2 SURVEY ON THE STATE OF PROGRESS IN THE FIELD OF INDUSTRY 4.0 IN THE WORLD

Molex, a global leader in electronics and connectivity innovator, a *US*-based company, announced the results of a global survey of stakeholders in *Industry 4.0* manufacturing that drives advances in robotics, complex machines and devices or control systems. The findings reflect steady progress in the development of *Industry* initiatives 4.0 across the entire industrial automation ecosystem, including intelligent automation, connectivity and analytics that increase efficiency and intelligence throughout the manufacturing lifecycle. *Molex* commissioned a third-party research firm, *Dimensional Research*, to conduct a June 2021 *State of Industry 4.0* survey with 216 qualified participants in various roles such as *R&D*, engineering, manufacturing, strategy, innovation and supply chain management [9]. Key findings from the survey are that 51 % of respondents' report having a well-defined *Industry 4.0* corporate priority with executive sponsorship; 49 % have already achieved success, while 21 % are still in the

investment stage. More than half of respondents expect to meet their *Industry 4.0* goals within two years, while a third believe it will take three to five years to reach this milestone. 58 % of respondents say investments in digital transformation have accelerated *Industry 4.0* efforts. 44 % of respondents consider organizational and cultural barriers to adoption to be the most difficult to overcome [9].

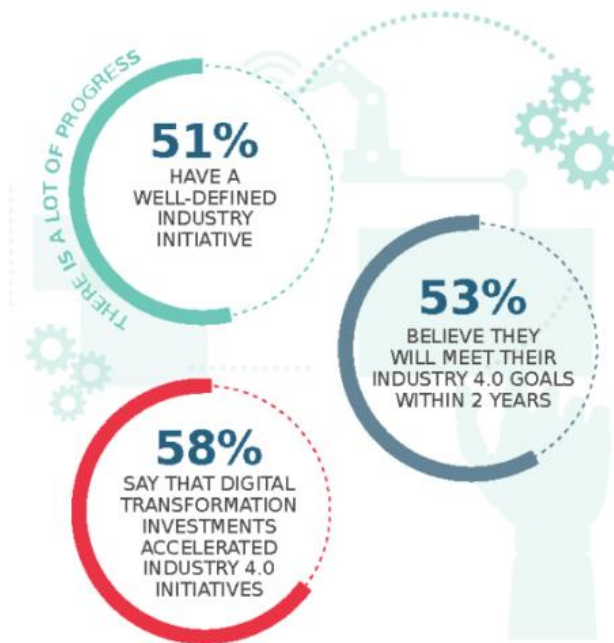


Fig. 1. Progress of Industry 4.0 in enterprises

According to the survey, among the most influential business results are the ability to create better products (69 %), reduce total production costs (58 %), increase revenues (53 %), offer products at lower prices (35 %) and reduce time to market for new solutions (35 %). For machine designers, robot manufacturers and system integrators, the opportunity to expand automation and intelligence at the factory level is expected to bring significant gains [9].

CONCLUSIONS

The following results were found from the analysis:

- Most of the world's enterprises and companies are already digitally transforming their production facilities [10-11].
- Digital transformation will pay off for companies, the cultural area of the company will take the most work during the transformation.
- Enterprises during the transformation should pay attention to better planning, better communication and change strategy, and in general senior staff and project managers should.
- Involve all teams that influence the change.
- The share of digitizing companies in *Slovakia* is continuously decreasing in a three-year perspective.

- Businesses in *Slovakia* want to digitize, but do not know how.
- Companies lack experts and teams that would plan and implement digital transformation in the company.
- Businesses in *Slovakia* consider digital transformation to be important and necessary for implementation.
- The transformation to *Industry 4.0* in the world is continuously progressing, more than half.
- Enterprises fulfill their transformation goals within two years.
- Companies in the world list organizational and cultural barriers to acceptance as the most difficult to overcome.
- Companies in the world have announced, thanks to the transformation to *Industry 4.0*, the creation of better products, production efficiency, reduction of production costs.
- Companies that upgraded their businesses to *Industry 4.0* managed the *COVID-19* pandemic.
- Businesses that did not innovate their businesses to *Industry 4.0* had major problems during the pandemic, and will also have problems with digital transformation after the pandemic.
- The *COVID-19* pandemic has significantly reduced the spread of *Industry 4.0* businesses around the world.

To make businesses more flexible, cheaper, faster and more responsive to business trends, *Industry 4.0* provides solutions and ways for businesses to meet these challenges through digital connectivity that will improve efficiency and accelerate innovation and introduce new business models. Today, customers demand individually tailored products and services, and smart objects, products and machines allow manufacturers to produce original products without increased costs. As machines gradually improve, work in production lines becomes more and more humanized, and workers will operate the machines and intervene only when the machines ask them to take action. Workers will be assigned where human intervention is needed.

Acknowledgements

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

REFERENCES

- Digitálne sa transformuje len štvrtina podnikov* (2022): [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://industry4um.sk/digitalne-sa-transformuje-len-štvrtina-podnikov-napriek-zlozitejhospodarskej-situacii-je-vacsina-odhodlana-digitalizovat/>

- [2] ELIAČIK, E. (2022): *AI in the manufacturing market will rise by 14 billion dollars in 5 years (learn why)* [online], [cit. 2022-07-06]. Dostupné z: <https://dataconomy.com/2022/08/artificial-intelligence-in-manufacturing/>
- [3] ANTONIUK, I. - SVITEK, R. - KRAJČOVIC, 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.
- [4] BUCKOVA, M. - GASO, M. - PEKARCIKOVA, M. (2020): Reverse logistic. *InvEnt 2020: Industrial engineering – Invention for enterprise - proceedings*. In: Bielsko-Biała: Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humnistycznej.
- [5] BENES, P. et al. (2014): *Automatizace a automatizační technika 3*. Bmo: Computer Press, 304 s., ISBN 978-80-251-2523-6.
- [6] BURGANOVA, N. - GRZNAR, P. - MOZOL, S. (2020): *Design of logistics system in production*. In: Technologie, procesy i systemy produkcyjne Bielsko-Biała : Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Białej, ISBN 978-83-66249-56-1, p. 11-18.
- [7] VAVRIK, V. - FUSKO, M. - BUČKOVÁ, M. - GASO, M. - FURMANNOVÁ, B. - STAFFENOVA, K. (2022): *Designing of machine backups in reconfigurable manufacturing systems*. In: Applied sciences, ISSN 2076-3417, Vol. 12, No. 5, p. 1-27.
- [8] FILIPOVA, I. - DULINA, L. - BIGOSOVA, E. - PLINTA, D. (2021): *Modern Possibilities of Patient Transport Aids*. In: 14th International scientific conference on sustainable, modern and safe transport (Transcom 2021). Virtual conference 26-28 May, Slovakia, Transportation Research Procedia, 55, pp. 510-517.
- [9] PASINI, R. (2021): *The state of Industry 4.0, survey says* [online], [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: <https://www.designworldonline.com/the-state-of-industry-4-0-surveysays/>
- [10] SUKALOVA, V. - STOFKOVA, Z. - STOFKOVA, J. (2022): *Human Resource Management in Sustainable Development*. In: Sustainability, Vol. 14, No. 21, 14258.

Experimentálna analýza tribologických vlastností povrchov konštrukčných materiálov

Jozef Bronček, doc. Ing., PhD.*

Katedra konštruovania a častí strojov, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: jozef.broncek@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2929

Martin Vicen, Ing. PhD.

Katedra materiálového inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: martin.vicen@fstroj.uniza.sk

Norbert Radek, doc. Ing, PhD.

Kielce University of Technology,
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, Kielce 25-314, Poľsko.
E-mail: norrad@tu.kielce.pl

Tomáš Bulko, Bc.

Katedra konštruovania a častí strojov, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: jozef.broncek@fstroj.uniza.sk

Experimental analysis of the tribological properties of the surfaces of structural materials

Abstract: The presented article deals with the tribological properties of the surfaces of structural materials. Comparing the results of experimental measurements of three different surfaces (chrome steel 100CrMnMoSi8-4-6, blackened steel surface, DLC coating) and three different balls (chrome steel 100Cr6, silicon carbide, tungsten carbide) made it possible to observe the influence of the materials of the friction pair on the tribological properties.

Keywords: coefficient of friction, tribology experiment, DLC coating, tribology.

ÚVOD

K treniu dochádza v miestach, kde sa voči sebe pohybujú a navzájom otierajú dve alebo viaceré súčiastky. Trenie je fenomén, ktorý nie je možné odstrániť, no je možné ho eliminovať.

Väčšina degraččných mechanizmov materiálov vzniká a šíri sa z porúch vzniknutých práve na povrchu súčiastok. Pre zvýšenie trvanlivosti a prevádzkovej bezpečnosti súčiastok je preto dôležité vyvíjať alternatívne povrchové vrstvy, resp. nové povlaky povrchových vrstiev súčiastok trecích uzlov [1, 2, 3].

Jednou z možností úpravy povrchu súčastí trecích uzlov je povlakovanie. Od povlaku sú pritom požadované vlastnosti ako vysoká tvrdosť, odolnosť voči opotrebeniu a nízky koeficient trenia.

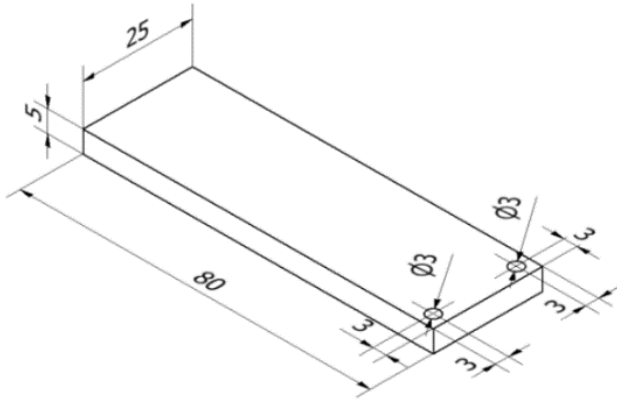
Ideálnym riešením pre mnoho aplikácií sa stali DLC povlaky. Jedná sa o ich použitie v prípadoch, kde sú súčasti trecieho uzla vystavené extrémnemu treniu, opotrebeniu a vysokému zaťaženiu [4, 5].

1 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Experimentálna časť príspevku sa zaoberá tribologickými vlastnosťami kalenej ložiskovej ocele 100CrMnMoSi8-4-6 pred a po povlakovaní.

Jednotlivé vzorky sa líšili povrchovou úpravou. Vzorka Sa1 mala nepovlakovaný leštený oceľový povrch, Sa2 bola povlakovaná DLC povlakom a Sa3 mala čierneny povrch. Pre každú vzorku sa ako protikus použili tri rôzne typy guľičiek z rôznych materiálov – chrómovej ocele 100Cr6, karbidu kremíka SiC a karbidu volfrámu WC.

Prehľad kombinácií tribologických dvojíc sa uvádza v tab. 1. Tvar a rozmery skúšobnej vzorky sú zobrazené na obr. 1. Tvrdosť povrchu vzoriek sa pohybovala v rozsahu 58,5 HRC až 60 HRC. Skúšobné telieska mali priemer $\varnothing 4$ mm. Skúška prebiehala v atmosférických podmienkach a bez prítomnosti maziva. Teplota prostredia bola 20 °C.



Obr. 1. Rozmery a tvar skúšobnej vzorky

Tab. 1. Prehľad kombinácií tribologických dvojíc

Vzorka	Substrát	Povlak	Gul'ôčka
Sa1	100CrMnMoSi8-4-6	Bez povlaku	100Cr6
			SiC
			WC
Sa2	100CrMnMoSi8-4-6	DLC povlak	100Cr6
			SiC
			WC
Sa3	100CrMnMoSi8-4-6	Čiernenie	100Cr6
			SiC
			WC

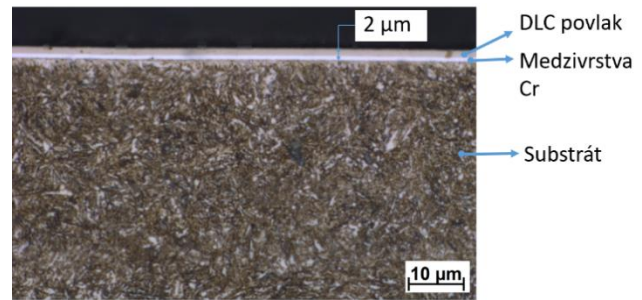
2 MATERIÁL POVLAČOV

Vzorky s označením Sa2 boli povlakované PVD technológiou metódou magnetronového naprašovania v spoločnosti STATON s. r. o. Povlakovanie prebiehalo vo vákuovej komore. Povlakovacia komora má po obvode 6 katód (terčov). V tomto prípade sa použili katódy z materiálu WC. Do katód sa privádzalo napätie zo zdroja. Štartovací tlak v komore bol 10^{-3} Pa. Pracovný tlak v procese povlakovania bol od 0,1 Pa do 1 Pa. Do komory bol privádzaný pracovný odprašovací plyn argón Ar a reaktívny plyn acetylén C_2H_2 . Substrát v držiaku vykonával rotačný pohyb, pričom prechádzal popri katódach a pri každom prechode pred katódu sa na substráte vytvorila jedna vrstva povlaku.

Samotný proces povlakovania trval cca 1 hodinu. Celý výrobný proces trval celkovo 6 hodín. Priečny rez vzorky s povlakom je zobrazený na obr. 2.

Povrch vzoriek s označením Sa3 bol upravený metódou čiernenia. Metódou sa vytvorila na povrchu

materiálu čierna matná alebo tmavomodrá vrstva oxidu železato-železitého $Fe + Fe_2O_4$ (magnetit). Pri používaní v kombinácii s konzervačnými olejmi vrstva má antikoročné vlastnosti.

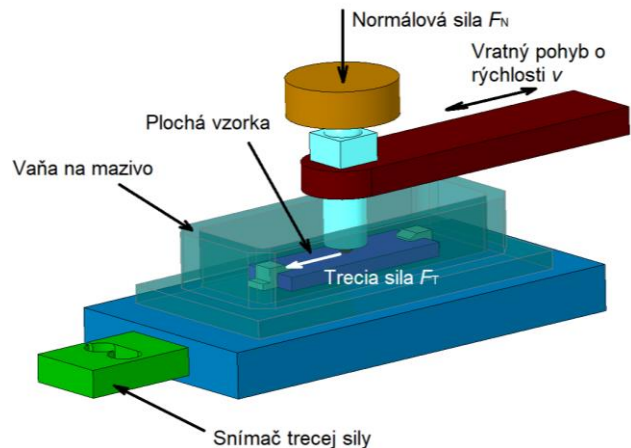


Obr. 2. Priečny rez vzorkou

3 METODIKA EXPERIMENTU

Tribologické skúšky sa vykonali na špeciálnom testovacom lineárnom mikrotribometri (obr. 3). Testovacie zariadenie pracuje na princípe metódy Ball On Disk podľa normy ASTM G133-05 2022.

Gul'ôčka vykonávala recipročný priamočiary pohyb po povrchu vzorky. Priebeh rýchlosti pohybu gul'ôčky mal sínusový charakter. Rýchlosť sa pohybovala v rozsahu hodnôt $v = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ až $0,02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Na gul'ôčku pôsobila prítlačná normálová sila $F_N = 10 \text{ N}$. Čas experimentu bol stanovený na 17500 s. Dĺžka dráhy s trecej dvojice bola 350 m. Podmienky skúšky pri všetkých meraniach boli rovnaké.



Obr. 3. Zjednodušené zobrazenie princípu činnosti skúšobného lineárneho mikrotribometra

4 VÝSLEDKY EXPERIENTU

Do vyhodnotenia experimentu boli zahrnuté namerané hodnoty získané pri skúške. Prehľad dosiahnutých hodnôt koeficientov trenia sa uvádzajú v tab. 2.

Z hodnôt uvedených v tabuľke možno konštatovať, že najvyššie hodnoty koeficienta trenia sa dosiahli pri vzorke Sa3 s čierneným povrchom.

Na obr. 4 sú zobrazené jednotlivé vzorky po skúške. Na povrchu vzoriek vidieť stopy po skúškach: a) Sa1:

stopa I – guľôčka *Cr*, stopa II – *SiC*, stopa III – *WC*.
 b) *Sa2*: stopa I – *Cr*, stopa II – *SiC*, stopa III – *WC*. c)
Sa3: stopa I – *Cr*, stopa II – *SiC*, stopa III – *WC*.

Tab. 2. Prehľad dosiahnutých hodnôt koeficientov trenia

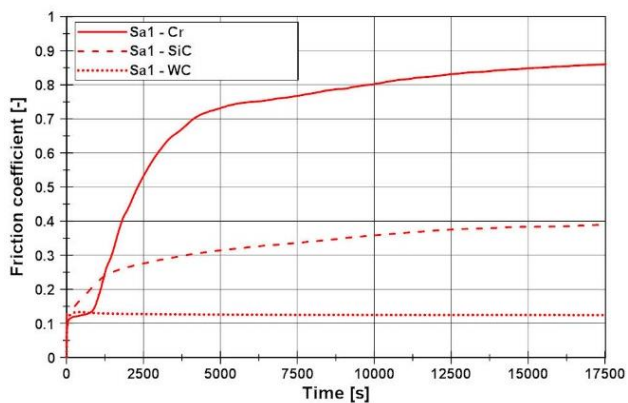
Vzorka	Substrát	Povlak	Guľôčka	Koeficient trenia (-)
<i>Sa1</i>	100CrMn MoSi8-4-6	Bez povlaku	100Cr6	0,86
			<i>SiC</i>	0,39
			<i>WC</i>	0,12
<i>Sa2</i>	100CrMn MoSi8-4-6	DLC povlak	100Cr6	0,36
			<i>SiC</i>	0,23
			<i>WC</i>	0,16
<i>Sa3</i>	100CrMn MoSi8-4- 6	Čiernenie	100Cr6	0,82
			<i>SiC</i>	0,82
			<i>WC</i>	0,34



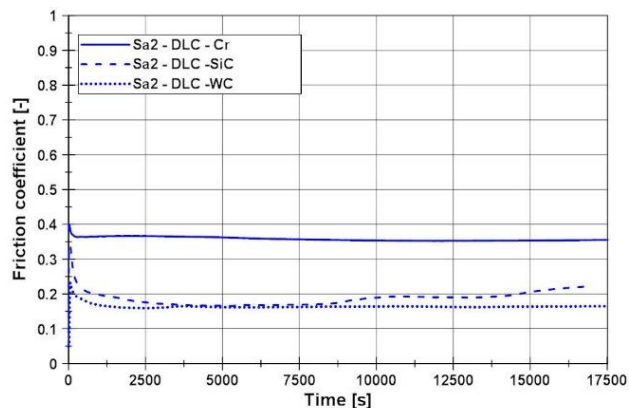
Obr.4 Vizuálne zobrazenie vzoriek po skúške

Priebeh koeficientov trenia pre vzorky *Sa1* bez povlaku, *Sa2* s *DLC* povlakom, a *Sa3* s čiernym povlakom a pre jednotlivé typy guľôčok (*Cr*, *SiC* a *WC*) v závislosti na čase sa uvádzajú v diagramoch na obr. 5 až obr. 7.

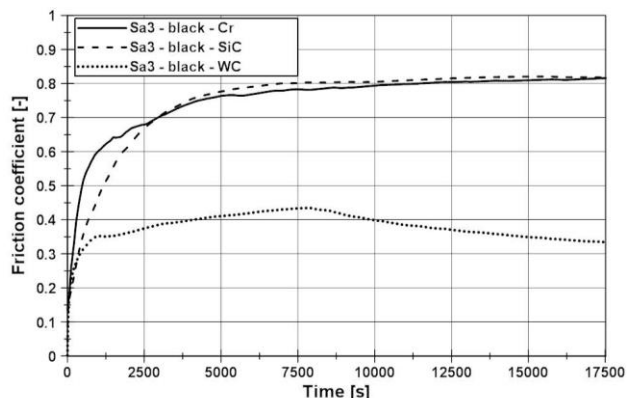
Priebeh koeficientov trenia pre materiál guľôčok *Cr*, *SiC* a *WC* a vzorky bez povlaku *Sa1*, *Sa2* s *DLC* povlakom, a *Sa3* s čiernym povlakom sa uvádzajú v diagramoch na obr. 8 až obr. 10.



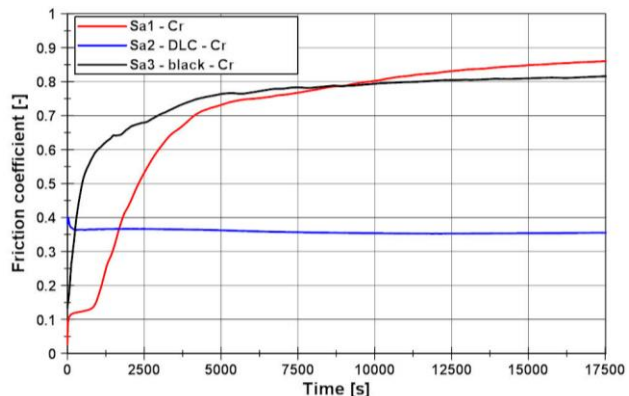
Obr. 5. Priebeh koeficientu trenia na vzorke *Sa1*



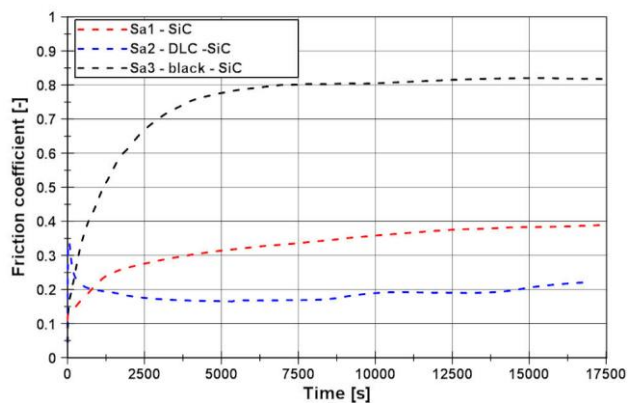
Obr. 6. Priebeh koeficientu trenia na vzorke *Sa2*



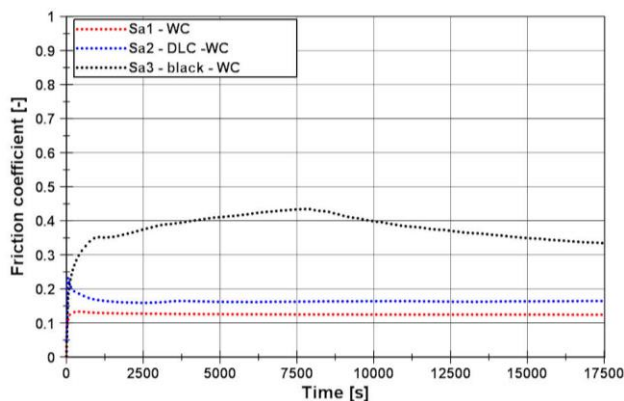
Obr. 7. Priebeh koeficientu trenia na vzorke *Sa3*



Obr. 8. Priebeh koeficientu trenia pre guľôčku *Cr* a hodnotené substráty



Obr. 9. Priebeh koeficientu trenia pre guľôčku *SiC* a hodnotené substráty



Obr. 10. Priebek koeficientu trenia pre guľôčku WC a hodnotené substráty

ZÁVER

Porovnanie výsledkov experimentálnych meraní troch rôznych povrchov (chrómová oceľ 100CrMnMoSi8-4-6, čiernený oceľový povrch, DLC povlak) a troch rôznych guľôčok (chrómová oceľ 100Cr6, karbid kremíka, karbid volfrámu) umožnilo vyhodnotiť vplyv materiálov trecej dvojice na tribologické vlastnosti súčiastok trecieho uzla. Z analýzy priebehov hodnôt súčiniteľa trenia sa zistilo nasledovné:

- materiál s čierneným povrchom vykazoval vysoké hodnoty koeficienta trenia v rozsahu hodnôt 0,34 až 0,82. Pri tejto vzorke bolo taktiež pozorované predratie povlaku,
- hodnoty koeficienta trenia pri použití vzorky z chrómovej ocele 100CrMnMoSi8-4-6 mali najvyššiu variabilitu, v závislosti od materiálu guľôčky 0,12 až 0,86 (-),
- vzorka povlakovaná DLC povlakom vykazovala nízke hodnoty súčiniteľa šmykového trenia 0,16 až 0,36. Pozorované priebehy majú odlišný tvar ako pri ostatných vzorkách. Predratie povlaku na tejto vzorke nebolo pozorované,

Z analýzy priebehov hodnôt súčiniteľa trenia v závislosti na materiáli guľôčky Cr, SiC a WC sa zistilo:

- pri použití guľôčky z chrómovej ocele sa pozorovali konzistentne najvyššie hodnoty súčiniteľa trenia,
- najnižšie hodnoty súčiniteľa trenia sa zistili pri guľôčke z materiálu karbidu volfrámu WC,

- z porovnania trecích dvojíc je zrejmé, že najvhodnejšou tribologickou dvojicou je vzorka s povlakom DLC a guľôčka z materiálu karbidu volfrámu WC.

Pod'akovanie

Tento článok bol vypracovaný v rámci riešenia projektu s názvom Implementácia jazyka geometrickej špecifikácie výrobkov do oblasti súradnicovej 3D metrologie KEGA 033 ŽU-4/2022.

LITERATÚRA

- [1] KOVALÍČEK, M. - BRONČEK, J. - FABIAN, P. - BALLO, V. (2015): *Výskum trecích vlastností povlaku WC/C na ložiskovej oceli*. In: Technológ, 172-175 s., ISSN 1337-8996.
- [2] HAZLINGER, M. - MORAVČÍK, R. (2013): *Chemicko-tepelné spracovanie materiálov*. 1. vydanie, Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave, 171 s., ISBN 978-80-227-3924-5.
- [3] VICEN, M. - FABIAN, P. - BRONČEK, J. - RADEK, N. (2018): *Hodnotenie tribologických vlastností nitridovanej vrstvy na tepelne spracovanej oceli 100Cr6*. In: Technológ, roč. 10, č. 2, s. 80-85, ISSN 1337-8996.
- [4] DRABIK, M. - TRUCHLY, M. - BALLO, V. et al. (2018): *Influence of substrate material and its plasma pretreatment on adhesion and properties of WC/a-C:H nanocomposite coatings deposited at low temperature*. In: Surface and coatings technology, 333, 138-147.
- [5] ČUCHOR, M. - ONDRIGA, J. (2023): *Porovnanie koeficientov trenia povlaku DLC pri vybraných tribologických dvojiciach*. In: Technológ - 02/2023.
- [6] PETRŮ, M. a kol. (2014): *Experimental and numerical analysis of crack propagation in ligh composite materials under dynamic fracturing*. In: Communications, Vol. 16, No. 3a, pp. 82-89.
- [7] NESLUŠAN, M. - BRONČEK, J. - MINÁRIK, P. - ČAPEK, J. - VICEN, M. - DRBUL, M. (2022): *Friction and wear of AlSi 304 by the SiC ball and its monitoring via Barkhausen noise emission*. In: Wear, 0222, 510-511, 204492.
- [8] ASTM G133-05 (2016): *Standard Test Method for Reciprocating Ball-on-flat Sliding*. In: Wear.

Stratégia údržby a efektívny výrobný systém

Miroslav Rakyta, doc. Ing., PhD.

Katedra priemyselného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,

Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

E-mail: miroslav.rakyta@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2737, Fax.: + 421 41 525 2541

Peter Bubeník, doc. Ing., PhD.*

Katedra priemyselného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,

Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

E-mail: peter.bubenik@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2719, Fax.: + 421 41 525 2541

Maintenance strategy and efficient production system

Abstract: In industrial areas, key maintenance tasks have become an essential part of an organization's overall profitability. Maintenance techniques currently have the ability to significantly increase an organization's competitive advantage in the global marketplace. The first important step is to correctly set up a suitable maintenance strategy. The maintenance strategy of the production support process must, as part of the company's strategy, be based on and support its goals and strategy, perspectives and starting points. Choosing the right maintenance strategy is important for every business. He must determine which strategy will be advantageous for him from the point of view of costs, downtime and other important factors.

Keywords: maintenance strategy, maintenance processes, maintenance system, corrective maintenance, maintenance optimization.

ÚLOHY ÚDRŽBY

V posledných rokoch zažívame ohromný rozmach digitalizácie procesov, ktoré urýchľujú rozhodovacie procesy vo výrobných spoločnostiach. Podniky [1] musia identifikovať nástroje a technológie pre plánovanie a riadenie údržby v súlade s prístupmi *Industry 4.0*. Hlavný dôraz je kladený na aplikáciu programu predikcie údržby, implementáciu zariadenia technickej diagnostiky, implementáciu inteligentných senzorov, prepojenie zariadení pomocou internetu vecí a používanie mobilných aplikácií v údržbe.

Koncept *Industry 4.0* pomáha priemyselným podnikom dosiahnuť rýchlu adaptáciu novej výroby a umožniť včasne reagovať voči vyskytujúcim sa chybám spôsobených nábehom novej výroby a vznikajúcimi poruchami výrobného zariadenia pomocou inteligentného údržbového systému integrovaného do digitálneho dvojčata. Manažér údržby využíva pri svojom rozhodovaní štandardné ukazovatele ako *OEE (Overall Equipment Effectiveness)*, *MTTR (Mean Time to Repair)*, *MTBF (Mean Time Between Failure)*, *R(t) (Probability of trouble free operation)*, *F(t) (Probability of Failure)*, *A (Availability)*, dostupnosť a spoľahlivosť strojov a zariadení, ktoré sú obrazom stavu prevádzky detailne výrobných a montážnych liniek.

Výkony údržby sa zameriavajú v zásade na štyri oblasti: udržiavanie kritických systémov, rýchlejšie odstránenie problému ako predtým, určovanie príčin častého zlyhania a napokon identifikácia 20 % porúch, ktoré zaberajú 80 % dostupných zdrojov.

Medzi najbežnejšie kroky riešenia problémov v údržbe patria: identifikácia porúch a miesto vzniku výpadku stroja, analýza porúch, definícia vzťahov príčin, definícia cieľov a plánovanie prostriedkov na odstránenie a predchádzanie porúch.

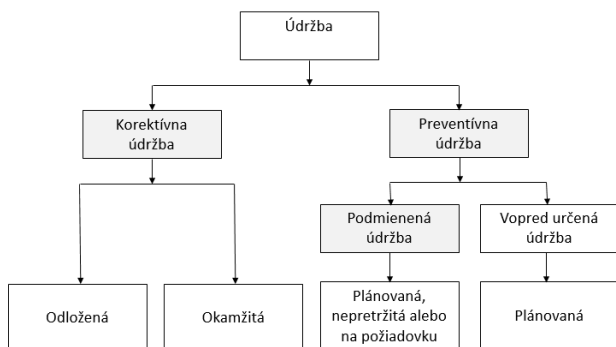
Uvedené kroky sú súčasťou postupu pre naplnenie vybranej stratégie riadenia údržby. Dynamický vývoj núti stratégiu pravidelne prehodnocovať v závislosti na plnení kľúčových ukazovateľov výrobného systému akými je efektivita a kvalita výroby [2].

1 ÚDRŽBA A JEJ VPLYV NA VÝROBNÝ SYSTÉM

Údržba je kombináciou všetkých praktických, riadiacich a administratívnych činností počas celého životného cyklu zariadenia na jeho udržiavanie alebo obnovenie do stavu, v ktorom môže vykonávať požadovanú funkciu (*EN*, 2001). Je tiež definovaný ako všetky potrebné a kľúčové činnosti, ktoré sú potrebné na udržanie systému počas jeho životného cyklu v prevádzkovom a funkčnom stave alebo na jeho obnovenie do stavu, v ktorom môže vykonávať

svoju zamýšľanú funkciu [12]. Dôležitosť funkcie údržby sa postupom času zvyšovala v dôsledku jej úlohy a vplyvu na ostatné pracovné prostredie v organizácii, t.j. zvyšovaním kvality produktov a dostupnosti strojov. Efektívna údržba prispieva k zvýšeniu hodnoty prostredníctvom výhodnejšieho využitia zdrojov, zlepšenia kvality produktu, ako aj zníženia prepracovania a zmätkov [13].

Údržba je kategorizovaná do dvoch hlavných oblastí, t.j. preventívna údržba, ktorá zahŕňa všetky plánované činnosti údržby, ako napr. monitorovanie stavu a pravidelná kontrola, zatiaľ čo opravná údržba má čo do činenia so všetkými neplánovanými činnosťami údržby na obnovenie zlyhania podľa normy *STN 13306* (obr. 1).



Obr. 1. Kategorizácia údržby

Základným záväzkom výroby je dodať tovar, efektívna stratégia údržby však ovplyvňuje výrobnú kapacitu strojov používaných na výrobu týchto produktov [14]. Preto možno údržbu považovať za organizačný účel, ktorý funguje v súlade s výrobou. Keď ostatní opakujú, že výroba vyrába produkty, iní tiež hovoria, že údržba produkuje kapacitu na výrobu. Týmto spôsobom možno konštatovať, že údržba narúša výrobu tým, že zvyšuje kapacitu výroby a zároveň kontroluje kvalitu výstupu a kvalitu. Nižšie je uvedený graf, ktorý ilustruje vplyv údržby na výrobu.

Ziskovosť a prežitie výrobnej spoločnosti sa nemusia udržať bez udržania kvality produktu. Vysoká kvalita môže slúžiť ako hlavná hrana konkurenčnej výhody spoločnosti a dlhodobej ziskovosti v modernej globálnej ekonomike. Totálne produktívna údržba *TPM (Total Productive Maintenance)* môže byť jediným primeraným modelom, ktorý identifikuje vzťah medzi údržbou a kvalitou. Normálne hovoria, že zariadenia/stroje, ktorým chýba údržba a ktoré sa pokazia, často strácajú rýchlosť, a preto spôsobujú chyby a poruchy. Tieto zariadenia zvyčajne vymknú spod kontroly výrobné procesy. Je zrejmé, že proces, ktorý je mimo kontroly, vedie k výrobe chybných produktov a tiež k zvýšeniu výrobných nákladov, čo minimalizuje zisk [15].

Ziskovosť je výsledkom oživenia cien a produktivity. V dôsledku toho je produktivita tá, ktorá určuje efektívnosť a efektívnosť výrobného procesu. Podľa

APQC (American Productivity & Quality Center) citovaného v [13], pri analýze ziskovosti údržby sa meria sa aj vplyv pracovnej oblasti, napríklad zaručením úlohy údržby v rámci životného cyklu stroja. Zlepšenie údržby má vo všeobecnosti za cieľ znížiť prevádzkové náklady a zvýšiť kvalitu produktov. Iste, v prípade, že existuje spojenie alebo skôr spojenie medzi údržbou a ziskovosťou.

2 ČINNOSTI ÚDRŽBY

Činnosť údržby je zabezpečovaná jej riadením v súlade so stanovenou politikou údržby a so zámerom dosiahnuť požadované ciele. Stratégia údržby podporného procesu výroby musí, ako súčasť stratégie podniku, vychádzať z jeho cieľov a stratégie, perspektív a východísk a musí ich podporovať.

Stratégia údržby je podľa *STN 13306* definovaná ako metódu manažmentu použitú na dosiahnutie cieľov údržby.

Na stratégii údržby závisia dosahované výsledky v stredne a dlhodobom horizonte. Jedná sa najmä o efektívnosť, produktivitu, ekonomickú efektívnosť a o plnenie základných požiadaviek na údržbu, najmä:

- udržiavanie majetku v prevádzkyschopnom a primeranom stave,
- predchádzanie vzniku porúch,
- operatívne odstraňovanie porúch,
- znižovanie environmentálnych vplyvov prevádzky zariadenia,
- zaistenie bezpečnosti prevádzky,
- vynakladanie optimálnych nákladov na údržbu.

Ciele by mali byť hierarchické, kvantifikované, reálne a vzájomne zladené. Ak si podnik zvolí určitú stratégiu, musí ju, ak má byť úspešná, realizovať dôsledne.

Stratégie môžu byť zamerané napríklad na:

- vyhľadávanie príležitosti, ktoré najviac využívajú silné stránky,
- prekonávanie slabých stránok s využitím príležitosti,
- využitie silných stránok na elimináciu rizík,
- zabránenie napadnutia slabých stránok a pod.

Všeobecne sa hovorí o niekoľkých základných typoch stratégií alebo politikách údržby. Ide o členenie údržby na základe typov, ktoré boli formulované už aj v minulosti [4], no pretrvávajú doteraz (tab. 1).

Požadovaná úroveň údržby dlhodobého majetku tzv. model excelentnosti vychádza:

- zo skúsenosti „svetovej úrovne najlepšej praxe v oblasti údržby, ale pre konkrétne organizácie musí byť prispôbená na ich vnútorné a externé podmienky,

- z metodického hľadiska je účinnejšie a praktickejšie určiť úroveň excelencie priamo podľa jednotlivých kritérií auditu a pre jednotlivé otázky auditu manažmentu,
- tento proces je mimoriadne náročný, často chýbajú objektívne informácie, je potrebné pristupovať k expertnému až intuitívnemu stanoveniu úrovne excelencie,
- veľkým pomocníkom môže byť *benchmarking*, ak sa podarí získať požadované údaje.

Tab. 1. Politiky údržbovej stratégie

Stratégia	Organizácia má vypracovanú perfektnú stratégiu manažmentu výrobných zariadení a iného HIM a ich údržby
Personálny manažment	Organizácia má široko kvalifikovaných a lojálnych údržbárov a operátorov zvládajúcich samostatne pridelené údržbárske procesy
Plánovanie a rozvrhovanie	Organizácia má projekty na zlepšovanie údržby, úplne ich realizuje a má perfektný systém plánovania a rozvrhovania údržby
Koncepcia (systémy údržby)	Všetky koncepcie (systémy) údržby v organizácii vychádzajú z dôkladných analýz spoľahlivosti a prevádzky výrobných zariadení a iného HIM
Meranie výkonnosti údržby	V organizácii je úplne uplatnené meranie efektívnosti výrobných zariadení, je podrobné sledovanie a vyhodnotenie nákladov na údržbu a benchmarking na základe starostlivosti vybraných indikátorov
Informačné technológie	V organizácii je uplatňovaný úplne integrovaný a funkčný systém počítačovej podpory riadenia údržby so všetkými požadovanými databázami
Zapojenie zamestnancov	V organizácii sú ustanovené úplne funkčné autonómne tímy pre zlepšovanie a zabezpečovanie údržby
Analýza bezporuchovosti, udržiavateľnosti a zabezpečenia údržby	V organizácii sú uplatňované programy analýzy bezporuchovosti, udržiavateľnosti a zabezpečenia údržby a ich výsledky sú úplne využívané pre tvorbu koncepcie (systémov) údržby HIM
Procesné analýzy	V organizácii je uplatňované pravidelné preskúvanie nákladov na jednotlivé údržbárske procesy, ich časové charakteristiky (Prácnosti, priebežné doby) a plnenie požadovaných znakov kvality

Výber správnej stratégie údržby je dôležitý pre každý podnik. Musí si určiť, ktorá stratégia bude preňho výhodná z pohľadu nákladov, prestojov a ostatných dôležitých faktorov. Záleží aj od druhu výroby, resp. priemyslu. Bežne sa využívajú viaceré stratégie súčasne, napr. korektívna a preventívna údržba, v závislosti od kategorizácie strojných zariadení [7].

Údržba má čo do činenia s vývojom úloh a činností na predĺženie schopnosti zariadenia fungovať po dlhú dobu počas jeho produktívnej životnosti [8]. Plány údržby sa skôr vykonávajú na pravidelnej (plánovanej) dennej báze, aby sa zabezpečilo, že zariadenie je k dispozícii na splnenie výrobných špecifikácií a požiadaviek. Základným významom údržby sú funkčné a prevádzkové kontroly, servis, výmena potrebných zariadení, zariadení, strojov, infraštruktúry budov a podporných inžinierskych sietí v priemyselných oblastiach. Je to práca na udržiavaní niečoho v pôvodnom stave. To vždy zahŕňa vypracovanie dokumentu, ktorý zabezpečí, že tieto úlohy sa budú vykonávať správnym a konzistentným spôsobom.

Existuje mnoho rôznych dôvodov, prečo by sa mala údržba vykonávať v závode alebo zariadení procesu. Význam údržby ale nemôže byť prehliadaný vo svetle

skutočnosti, že má významnú úlohu v štihlej montáži [9]. Je potrebné primerane obmedziť plytvanie a vykonávať efektívnu a trvalú montážnu činnosť alebo administratívnu úlohu. Pravidelná údržba je oveľa menej nákladná v porovnaní s nákladmi na vážne poruchy, keď sa nevyrába. Najdôležitejším účelom častej údržby je zabezpečiť, aby všetky zariadenia potrebné na výrobu vždy fungovali so 100% účinnosťou. Hoci dennodenné kontroly, mazanie, čistenie a vykonávanie malých zmien, malé problémy sa dajú rozpoznať a zvládnuť skôr, ako sa zmenia na kolosálny problém, ktorý môže skončiť uzavretím celej línie tvorby.

Vybraná stratégia údržby potrebuje plnú podporu od spodného manažmentu až po vrcholový manažment, od najvyššieho výkonného pracovníka až po personál dielne. Údržba sa vykonáva v súlade so zákonnými požiadavkami zákona o bezpečnosti a ochrane zdravia pri práci. Cieľom je poskytnúť podriadeným bezpečné pracovné prostredie. Aj keď tak zamestnávateľ, ako aj organizácia sú spoločensky zodpovední za poskytovanie bezpečného pracovného prostredia pre podriadených spoločnosti. Toto všetko je možné archivovať pomocou vhodného využitia techník údržby a implementácie programu údržby navrhnutého na odstránenie porúch, ktoré môžu mať dôsledky na bezpečnosť [10].

Ďalším dôležitým dôvodom na vykonávanie údržby je, že sa zariadenie a vybavenie, ktoré nie je riadne udržiavané, opotrebovávajú príliš skoro. Toto skoré zhoršenie má vplyv na náklady, ktoré sú spojené s výmenou zariadenia. Zavedenie programu starostlivej údržby môže viesť k zvýšeniu životnosti zariadenia, čím sa minimalizujú náklady na opravy. Efektívne činnosti údržby umožňujú opravu zariadenia pred jeho zlyhaním, čím sa vyhne nákladom na nekontrolovateľné poruchy a možnej strate výnosov.

3 STRATÉGIA ÚDRŽBY

Ciele a stratégie údržby majú určovať hlavné smery manažmentu údržby na dosiahnutie „excelentnosti“ v oblasti údržby hmotného majetku. Spracovaná stratégia vyžaduje na svoju realizáciu vypracovanie podporných programov. Formou tohto výstupu by mali byť témy projektor na zlepšovanie údržby s časovým horizontom riešenia spravidla do jedného roku (výnimočne aj dlhšie) s definovanou zodpovednosťou riešiteľov a realizátorov, zdrojmi a jednotlivými míľnikmi realizácie. Rovnakú pozornosť ako tvorbe podporných programov je nutné venovať aj ich realizáciu.

Realizované projekty na zlepšovanie údržby a ich výsledky sa musia merať a vyhodnocovať a pritom zbierať podklady (údaje a informácie pre existujúce, stratégie údržby. Má sa vykonávať každoročne (rolovacím, kĺzavým spôsobom), ale vždy aspoň s trojročným horizontom.

Očakávaným prínosom, za predpokladu správneho zapracovania stratégie organizácie do riadenia údržby, je výrazné zlepšenie jej výkonnosti, účinnosti a celkovej ekonomickej efektívnosti. Ak má byť realizácia stratégie úspešná, musí byť v organizácii známa a podporovaná aj riadením údržby. Ide o vytvorenie spolupatričnosti pracovníkov s firmou a pracoviskom. Motiváciou by mal byť pocit, že ich práca má zmysel.

V procese vypracovania stratégie sa vytvára dlhodobý program zlepšenia a zmien vrátane zmeny štýlu práce. Pre ich pružné dosiahnutie je z dlhodobého pohľadu najvhodnejšia plochá organizačná štruktúra a využívanie malých, samostatných a flexibilných skupín.

Častým javom býva zmena organizačnej štruktúry so zmenou manažmentu. A tak ak je údržba centralizovaná, je zmenená na decentralizovanú a naopak. Podobne býva trendom v podnikoch zamerať sa na „*core business*“ a ostatné činnosti odčleniť - v prípade údržby ju nešíť dodávateľsky - outsourcingom.

V súčasnosti nie je ucelený názor na jednotlivé organizačné štruktúry a ich modely pre podniky a v zásade ani nemá byť prečo. Každá forma organizácie údržby má svoje plusy a mínusy [3]. Podobne aj vlastná údržba neznamená automaticky lepšia či horšia ako dodávateľská. Je na manažmente podniku, aby zväzil konkrétne podmienky a využil čo najviac prednosti a potlačil nedostatky každého systému.

Stratégia údržby by mala obsahovať požiadavky na:

- podiel *outsourcovanej* údržby v organizácii ako celku,
- podiely pre jednotlivé údržbárske procesy a výrobné zariadenia,
- vyjadrené pomerom nákladov na *outsourcovanú* údržbu k celkovým nákladom na údržbu.

Vypracovanie stratégie podniku ale aj údržby je tímová práca spolupracou oddelení, ktorých sa procesy priamo alebo nepriamo dotýkajú. Pred uvoľnením musia byť dokumenty preskúmané a schválené vrcholovým vedením podniku, predovšetkým vzhľadom na realizovateľnosť a zabezpečenosť požadovaných zdrojov.

Stratégia údržby vychádza z obecnej podnikateľskej stratégie organizácie, ktorá popisuje organizáciu a poskytovaných služieb, kľúčový zákazníci a stupeň ich uspokojenia. Popisuje analýzu finančnej výkonnosti a prieskum konkurenčného a tržného prostredia plus silné, slabé stránky a kľúčové podnikateľské konkurenčné faktory. Stratégiu organizácie poskytuje podnikateľskú víziu organizácie ako celku, špecifiká poslania, hlavné ciele a podnikateľský plán k ich dosiahnutiu.

Charakteristika výrobných zariadení a iného dlhodo-

bého majetku vyplýva z podnikateľskej stratégie:

- štruktúra a počty výrobných zariadení,
- údaje o ich spoľahlivosti, životnosti, udržateľnosti, zabezpečenie údržby a pohotovosti, najmä požiadavky na objem preventívnej údržby a úd v normohodinách, údržby po poruche, v normohodinách, prípadne i finančne vyjadrených objemoch,
- požiadavky na strojnú, elektroúdržbu a inú údržbu,
- očakávanú štruktúru internej a externej údržby, servisné zabezpečenie,
- kritickosti zariadení do výrobných liniek a strojov,
- dopadoch prestojov na výrobu.

Okamžitý prehľad o slabých miestach manažerstva údržby poskytujú kvantitatívne výsledky získané auditom. Nevyhnutnou a najdôležitejšou časťou auditu sú kvalitatívne odpovede na jednotlivé otázky a ich dôkladné vyhodnotenie. Súbor otázok (indikátorov) je nutné považovať za otvorený systém, ktorý je možné na základe skúsenosti ďalej rozširovať a spresňovať. Výsledkom auditu údržby musí byť návrh na prijatie nápravných opatrení za účelom odstránenia príčin identifikovaných nezhôd a na prevenciu ich opakovaného výskytu.

Kritériá auditu predstavuje súbor politík, postupov alebo požiadaviek, ktoré sa používajú ako dôkazy, oproti ktorým sa porovnávajú objektívne dôkazy [5]. Ako dôkaz auditu možno považovať záznamy, správy, konštatovania skutočností alebo ďalšie informácie, ktoré sa týkajú kritérií auditu a sú verifikovateľné. Zistením z auditu môže byť:

- a) zhoda alebo nezhoda (s kritériami auditu),
- b) súlad alebo nesúlad (s požiadavkami predpisov alebo s regulačnými požiadavkami),
- c) príležitosť na zlepšovanie,
- d) zaznamenanie dobrej praxe.

Na základe kritérií auditu údržby je potrebné navrhnúť systém otázok (indikátorov) a ich hodnotenie, ktoré by umožnili prakticky vykonávať audit manažerstva údržby v organizáciách rôzneho typu a zamerania.

Za účelom zabezpečenia spôsobilých a spoľahlivých výrobných zariadení pri eliminácii materiálu a ľudského faktoru, na udržanie absolútnej kvality (100%-tný stav výrobkov), je potrebné implementovať kvalitu údržby [6] pre ktorú je potrebné určiť:

- podmienky pre zoradenie a nastavenie na prvýkrát,
- podmienky pre preventívnu údržbu na dosiahnutie stavu nulových porúch,

- určiť príčiny a dôsledky, ktoré vplývajú na veľkosť odchýlky od menovitej hodnoty,
- určiť kontrolu a meranie definovaných prevádzkových a technických podmienok zariadenia v časových intervaloch,
- určiť na základe veľkosti odchýlok plán údržby strojov a zariadení.

4 HODNOTENIE ALTERNATÍV VOĽBY ÚDRŽBY

Cieľom hodnotenia alternatív je vybrať systém zabezpečovania údržby. Analýza optimalizačného postupu prevádzky a zabezpečovania údržby je súčasťou obsiahnutou v systéme vývoja. Optimálne výhody sa získavajú, keď tieto analýzy zohľadnia všetky faktory systému (náklady, program, prevádzkové vlastnosti a zabezpečovanie údržby) pred skončením tvorby systému.

Pri hodnotení a analýze optimalizačného postupu sa majú vykonať nasledujúce kroky:

- identifikovať kritéria, ktoré súvisia s požiadavkami na zabezpečovanie údržby, s nákladmi a pohotovosťou,
- vybrať alebo vytvoriť modely alebo analytické vzťahy medzi návrhom zabezpečovania údržby a prevádzkovými alebo akýmkoľvek inými identifikovanými kritériami hodnotenia,
- vykonať optimalizačný postup alebo hodnotenie, ktoré využíva vytvorené vzťahy alebo modely, a vybrať najlepšiu alternatívu (alternatívy) založenú na vytvorených kritériách,
- vykonať analýzy citlivosti tých premenných, ktoré majú vysoký stupeň rizika alebo významný vplyv na zabezpečovanie údržby, náklady alebo pohotovosť nového systému,
- zdokumentovať výsledky optimalizačného postupu a hodnotenia vrátane akýchkoľvek zahrnutých rizík a domnienok.

ZÁVER

Prebiehajúci výskum v oblasti stratégie údržby a postupu zlepšovania procesov údržby za účelom zvýšenie efektivity a kvality výrobného systému vychádza z realizovaných auditov v slovenských podnikoch, kde boli realizované projekty tvorby stratégie údržby bolo potrebné pre dosiahnutie „Zero failures - 0 porúch“ v rámci PPM:

1. Klasifikovať poruchové stavy.
2. Analyzovať poruchové stavy.
3. Pripravovať údržbárske zásahy - príprava (plánovanie a rozvrhovanie) je základom kvality údržby.
4. Dodržiavať medze opotrebenia.
5. Detekovať opotrebenia.

6. Navrhovať nové intervaly výmeny a kontroly stavu zariadení (dynamický systém preventívnej údržby).
7. Zlepšovať funkčnosť strojov s využitím metód a nástrojov ako: 5x prečo, strom porúch (FTA), analýza príčin, dôsledkov a kritickosti porúch (FMECA) RCMA, PM analýza, atď.

Dosiahnutý dopad zmeny stratégie údržby na efektívnosť výroby bol hodnotený pomocou celkovej efektívnosti zariadenia CEZ (OEE - Overall Equipment Effectiveness), ktorá predstavuje funkciu strát spôsobenú poruchami (prerušeniami), stratami výkonu vplyvom redukovanej rýchlosti a zoraďovacími časmi a tiež nízkou kvalitou vyrábaných výrobkov.

Maximalizáciu efektívnosti činností zariadení a minimalizáciu nákladov v priebehu ich životného cyklu bolo možné zaistiť elimináciou "šiestich hlavných strát", ktoré podstatne ovplyvňujú efektívnosť zariadení:

1. Poruchy vyplývajúce z chýb na zariadení.
2. Zoraďovanie a ustavovanie (výmena prípravku, nástroja a pod.).
3. Straty rýchlosti.
4. Nečinnosť, beh naprázdno a malé prestávky (abnormálna činnosť senzorov, blokovanie v sklzoch a pod.).
5. Redukcia rýchlosti (nesúlad medzi navrhnutou a skutočnou rýchlosťou zariadení).
6. Chyby v procesoch a opravy (nepodarky a nedostatky v kvalite, ktoré potrebujú opravu).
7. Redukcia času medzi štartom stroja a stabilnou prevádzkou.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporená: VEGA 1/0524/22 – Výskum proaktívneho prístupu udržateľnosti výrobných systémov v krízových podmienkach v kontexte zelenej ekonomiky. VEGA 1/0248/21 - Výskum inovatívnych riešení pre segmentáciu a udržateľnosť produktu z hľadiska montážnych operácií.

LITERATÚRA

- [1] RAKYTA, M. - FUSKO, M. (2016): *Manažment konfigurácie údržby pre "Priemysel 4.0"*. In: Údržba 2016 = Maintenance 2016: sborník mezinárodní odborné konference: 12. a 13. října, Konferenční centrum AV ČR - zámek Liblice. - Praha: Česká zemědělská univerzita, ISBN 978-80-213-2668-2, pp. 25-33.
- [2] RAKYTA, M. (2015): *Zvyšovanie kvality produkcie prognózovaním spoľahlivosti a spôsobilosti strojov = Increasing quality of*

- production forecasting reliability and capability equipment. In: Bezpečnosť. Kvalita. Spôľahlivosť [elektronický zdroj]: 6. medzinárodná vedecká konferencia: máj, Košice. - Košice: Technická univerzita, ISBN 978-80-553-2044-1, CD-ROM, pp. 223-230.
- [3] RAKYTA, M. - FUSKO, M. - HALUŠKA, M - GRZNÁR, P. (2016): *Maintenance support system for reconfigurable manufacturing systems [Systém podpory údržby pre rekonfigurovateľné výrobné systémy]*. In: Annals of DAAM [elektronický zdroj]: proceedings of the 26th DAAAM international symposium on intelligent manufacturing and automation. - ISSN 1726-9679. - Vienna: DAAAM International Vienna, ISBN 978-3-902734-07-5, online, pp. 1102-1108.
- [4] CAMPBELL, J. D. - REYES-PICKNELL, J. V. - KIM, H. S. (2015). *Uptime: Strategies for excellence in maintenance management*. CRC Press.
- [5] LEGÁT, V. (2016). *Management a inženýrství údržby*. Kamil Mařík-Professional Publishing.
- [6] RAKYTA, M. - GRZNÁR, P. - FUSKO, M. (2017): *Efektívne procesy údržby a ich digitalizácia v kontexte 4.0*. In: Manufacturing systems today and tomorrow 2017 [elektronický zdroj]: 10th annual international scientific conference: Liberec 9.11.-10.11., conference proceedings. - Liberec: Technická univerzita, ISBN 978-80-7494-370-6, CD-ROM.
- [7] MUSHAVHANAMADI, K. - MCGLOIN, K. (2018): *Investigating the Risk Management Systems in the South African Banking Industry*. In: Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Pretoria / Johannesburg, South Africa, October 29-November 1.
- [8] BUBENÍK, P. - RAKYTA, M. (2017): *Technológia dolovania dát a jej prínos v podnikovej praxi*. In: Manufacturing systems today and tomorrow [elektronický zdroj]: 8th annual international conference. - Liberec: Technická univerzita, ISBN 978-80-7494-150-4, CD-ROM, [6] s.
- [9] KRAR, S. F. - GILL, A. (2003): *Machine tool technology basics*. Industrial Press Inc.
- [10] MUSHAVHANAMADI, K. - SELOWA, T. B. (2018): *The impact of plant maintenance on quality productivity in Gauteng breweries*. In: Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, pp. 1743-1753.
- [11] DOWLER, P. (2012): *CAOM-2.0: the inevitable evolution of a data model*. In: Astronomical Data Analysis Software and Systems XXI, 461, 339.
- [12] BLANCHARD, B. S. - VERMA, D. C. - PETERSON, E. L. (1995): *Maintainability: a key to effective serviceability and maintenance management*. Vol. 13, John Wiley & Sons.
- [13] ALSYOUF, I. (2004): *Cost effective maintenance for competitive advantages*. Doctoral dissertation, Växjö university press.
- [14] AL-NAJJAR, B. (2007). *The lack of maintenance and not maintenance which costs: A model to describe and quantify the impact of vibration-based maintenance on company's business*. In: International Journal of Production Economics, 107, 1, 260-273.
- [15] DUFFUAA, S. O. - EL-GA'ALY, A. (2015): *Impact of inspection errors on the formulation of a multi-objective optimization process targeting model under inspection sampling plan*. In: Computers & Industrial Engineering, 80, 254-260.

Syntetické palivá a uhlíková neutralita

Matúš Lavčák, Ing.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 9, 042 00 Košice.
E-mail: matus.lavcak@tuke.sk, Tel.: +421 55 602 2355

Michal Puškár, doc. Ing., PhD.*

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 9, 042 00 Košice.
E-mail: michal.puskar@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 2360

Synthetic fuels and carbon neutrality

Abstract: The transportation sector is a significant contributor to global greenhouse gas (*GHG*) emissions, accounting for approximately 14 % of all anthropogenic *GHG* emissions. Despite the increasing popularity of electric vehicles, internal combustion engines (*ICEs*) continue to dominate the global vehicle fleet, making it essential to find a way to reduce *GHG* emissions from this sector. One potential solution is the use of *efuels*, also known as synthetic fuels, which can significantly reduce *GHG* emissions from transportation. While there are still several challenges associated with their production and use, the benefits of *efuels* make them a solution worth pursuing. Continued research and development are necessary to improve the efficiency and cost-effectiveness of *efuel* production and to ensure that they are a sustainable and environmentally responsible solution for the future of transportation. This paper will explore *efuels* and their potential to decarbonize the transportation sector.

Keywords: synthetic fuels, carbon, neutrality

ÚVOD

Syntetické kvapaliny alebo plyny vyrábané z obnoviteľných zdrojov energie sú označované ako *eFuels*. Výskum v oblasti *eFuels* sa zameriava na vývoj nových technológií a procesov výroby týchto palív s cieľom znížiť emisie skleníkových plynov a zároveň uspokojiť dopyt po energii v doprave, ktorá je jednou z hlavných oblastí spotreby energie.

V súčasnosti sa syntetické palivá vyrábajú najmä z vodíka a oxidu uhličitého, ktoré sa premieňajú na syntetickú naftu, motorovú naftu alebo benzín. Tieto palivá sa vyrábajú z obnoviteľných zdrojov energie, ako je slnečná alebo veterná energia, a preto sa považujú za potenciálne udržateľné zdroje energie.

Výskum v oblasti *eFuels* sa zameriava na riešenie viacerých technických výziev vrátane zlepšenia účinnosti výrobných procesov, zníženia výrobných nákladov a zlepšenia vlastností paliva, ako je cetánové číslo. Zároveň sa výskumníci snažia nájsť nové spôsoby využitia *eFuels* v praktických aplikáciách, ako je letecká a námorná doprava.

Výskum v oblasti *eFuels* je stále v počiatočnom štádiu, ale vzhľadom na rastúci záujem o obnoviteľné zdroje energie sa očakáva, že v budúcnosti bude viac financovaný a bude mať väčší vplyv na dopravu a energetickú bezpečnosť. Využitelnosť *eFuels* závisí

od mnohých faktorov, vrátane ceny, technológie výroby, environmentálnej udržateľnosti a účinnosti.

V súčasnosti sa *eFuels* nepoužívajú široko, pretože ich výroba je relatívne drahá v porovnaní s fosílnymi palivami. Avšak, ich použiteľnosť môže byť v budúcnosti zvýšená, ak budú výrobné technológie vylepšené a ich cena klesne na konkurencieschopnejšiu úroveň. Okrem toho, *eFuels* môžu byť použité ako alternatíva pre fosílna palivá v situáciách, kde je ťažké alebo nemožné nahradiť ich inými alternatívami, ako je napríklad v leteckej doprave alebo v niektorých priemyselných procesoch. V týchto prípadoch by *eFuels* mohli pomôcť znížiť emisie skleníkových plynov a zlepšiť environmentálnu udržateľnosť týchto odvetví [1, 5].

1 VÝROBA eFUELS

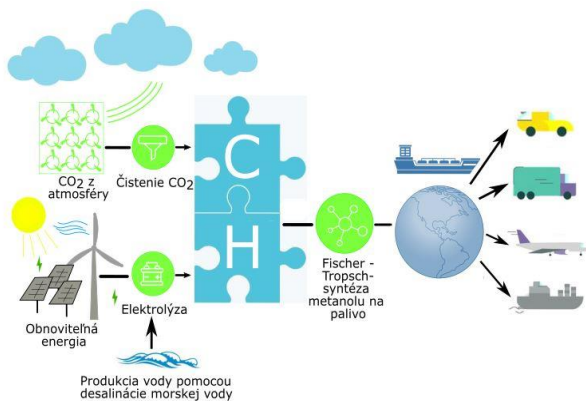
Syntetické palivá, sú umelé tekuté palivá vyrábané pomocou elektrickej energie a CO_2 z ovzdušia alebo priemyselných zdrojov. Výroba *eFuels* sa zvyčajne skladá z troch krokov: zachytenie CO_2 , výroba vodíka a syntéza paliva (obr. 1).

Zachytenie CO_2 je prvým krokom pri výrobe *eFuels*. CO_2 môže byť zachytené z ovzdušia pomocou rôznych technológií, ako sú napríklad adsorpčné procesy, absorpčné procesy a elektrochemické

procesy. CO_2 môže byť tiež zachytené priamo zo zdrojov ako napríklad priemyselné emisie alebo zemné plyny.

Druhým krokom je výroba vodíka. Vodík sa vyrába elektrolýzou vody, ktorá štiepi vodu na vodík a kyslík pomocou elektriny. Elektrina sa zvyčajne získava z obnoviteľných zdrojov, ako sú napríklad slnečné, veterné alebo vodné elektrárne.

Tretím krokom je syntéza paliva. Vodík sa zmieša s CO_2 a syntetizuje sa palivo, ktoré môže byť použité ako alternatíva k bežným fosílnym palivám. Výsledné palivo sa zvyčajne skladá z uhlíkovodíkov, ktoré sú chemicky podobné benzínu alebo naftovému palivu [2, 4].



Obr. 1. Produkcia eFuels

2 TYPY PALÍV eFUELS

Existujú rôzne typy palív eFuels v závislosti od suroviny, ktorá sa používa na ich výrobu. Medzi najbežnejšie typy ePalív patria:

Metanolové syntetické palivo; vyrába sa zo zdrojov uhlíka, ako je biomasa, drevný odpad a dokonca aj voda, pomocou elektrolytickej syntézy.

Etanolové syntetické palivo; podobne ako metanol sa etanolové palivo vyrába elektrolytickou syntézou, ale jeho vstupnými surovinami sú zvyčajne cukrová trstina, kukurica a iné rastlinné zdroje.

Dieselové syntetické palivo; vyrába sa z rastlinných olejov, tukov a mastných kyselín.

Petrolejové syntetické palivá vyrábajú sa z lignocelulóзовých zdrojov ako sú zvyšky dreva [4, 5].

3 VÝHODY eFUELS

Medzi hlavné výhody eFuels patrí:

- *obnoviteľnosť*; eFuels sú obnoviteľné palivá, čo znamená, že sa vyrábajú z obnoviteľných zdrojov energie, ako je veterná, solárna alebo vodná energia. To znamená, že sú menej škodlivé pre životné prostredie a pomáhajú znižovať závislosť od fosílnych palív,
- *vysoká energetická hustota*; ePalivá majú vysokú energetickú hustotu, čo znamená, že

dokážu uskladniť a uvoľniť veľké množstvo energie. To znamená, že sa môžu používať ako náhrada tradičných palív, ako je benzín a nafta, bez straty výkonu,

- *kompatibilita s existujúcimi vozidlami*; palivá eFuels sú navrhnuté tak, aby boli kompatibilné s existujúcimi spaľovacími motormi v automobiloch, lodiach a lietadlách. To znamená, že nemusia byť potrebné nákladné úpravy vozidiel,
- *nízke emisie*; ePalivá produkujú menej emisií ako tradičné palivá. Pri spaľovaní v motore sa produkuje len voda a oxid uhličitý, čím sa znižuje celková uhlíková stopa,
- *skladovanie*; ePalivá sa ľahko skladujú a majú dlhšiu životnosť ako tradičné palivá, čo znamená, že ich možno skladovať bez obáv zo zhoršenia kvality paliva [1-3].

4 NEVÝHODY eFUELS

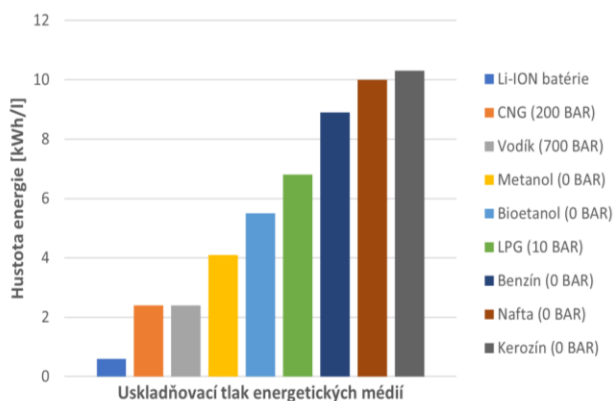
Palivá eFuels sú palivá vyrábané z elektrickej energie pomocou procesov, ako je elektrolýza vody a Fischerova-Tropschova syntéza, chemický proces, pri ktorom sa vodík a oxid uhličitý spájajú pri vysokých teplotách a tlakoch na vytvorenie kvapalných palív, ktoré sú podobné bežným ropným palivám. S používaním eFuels sú však spojené aj niektoré nevýhody:

- *výrobné náklady*; výroba eFuels je nákladná a stojí viac ako tradičné palivá na báze ropy. Proces výroby eFuels si vyžaduje veľké množstvo elektrickej energie a iných surovín, čo zvyšuje výrobné náklady,
- *energia*; výroba elektronickej palív spotrebúva veľké množstvo elektrickej energie, ktorá sa musí dodávať z elektrickej siete. Ak sa táto elektrická energia vyrába z fosílnych palív, prínosy eFuels pre životné prostredie sa znižujú,
- *účinnosť*; energia vložená do výroby ePalív je väčšia ako energia, ktorú tieto palivá poskytujú pri spaľovaní. To znamená, že výroba eFuels môže byť menej efektívna ako výroba tradičných palív,
- *objem*; ePalivá majú nižšiu energetickú hustotu ako tradičné palivá na báze ropy. To znamená, že na rovnakú vzdialenosť sa musí prepraviť viac paliva, čo zvyšuje náklady na dopravu,
- *konkurencieschopnosť*; ePalivá sú novou technológiou a sú stále menej konkurencieschopné ako tradičné palivá. Keďže sú ePalivá drahšie a menej účinné, môžu byť pre mnohých ľudí a podniky v súčasnosti nepraktické [2, 4].

Tieto, pomerne závažné nevýhody, môžu brániť rýchlejšiemu nástupu do reálneho použitia vo svete.

5 USKLADŇOVACÍ TLAK ENERAGONOSIČOV

V porovnaní s inými nosičmi energie majú kvapalné a plynné palivá obzvlášť vysokú hustotu energie. Najmä benzín, nafta a petrolej sa dajú skladovať aj pri izbovom tlaku a izbovej teplote. Vďaka týmto vlastnostiam je technicky možné prepravovať energetické nosiče - čo je jednoznačná výhoda oproti iným formám nosičov energie (obr. 2). Rovnaké chemické zloženie znamená, že všetky tieto výhody sa vzťahujú aj na produkty *eFuels* [3, 4].



Obr. 2. Uskladňovací tlak energetických médií

ZÁVER

Výskum a vývoj *eFuels* sa v súčasnosti aktívne rozvíja, ale stále zostáva pomerne drahou a energeticky náročnou možnosťou. Existujúce technológie ako napríklad elektromobilita, môžu byť ekonomickejšie a ekologickejšie alternatívy k bežným fosílnym palivám.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-19-0328.

Príspevok vznikol s podporou projektov: VEGA 1/0318/21 „Výskum a vývoj inovácií pre efektívnejšie využitie obnoviteľných zdrojov energie a znižovanie uhlíkovej stopy vozidiel.“ a KEGA 007TUKE-4/2023 „Transfer inovácií a pokročilých technológií pre ekologickejšie a efektívnejšie pohonné systémy vozidiel do edukačného procesu“.

LITERATÚRA

- [1] WAYLAND, M. (2022): *CNBC: Porsche begins production of 'e-fuel' that could provide gas alternative amid EV push.* [Online]. CNBC, 20.12., <https://www.cnbc.com/2022/12/20/porsche-starts-production-of-e-fuel-that-could-provide-gas-alternative.html>.
- [2] BLANCO, S. (2022): *Car and Driver. Porsche fires up production of eFuel, made from water in Chile.* [Online]. Car and Driver, 20.12., <https://www.caranddriver.com/news/a42295419/porsche-efuel-water-car-fuel-chile-production/>.
- [3] MOCK, P. - DORNOFF, J. (2022): *The international council on clean transportation: e-Fuels: The magic lollipop to keep combustion engines alive (or not).* [Online]. The international council on clean transportation, 30.6., <https://theicct.org/e-fuels-eu-co2-standards-jun22/>.
- [4] eFUEL ALLIANCE, eFUEL ALLIANCE E.V. (2022): *eFuels: sustainable in two ways.* [Online]. eFuel Alliance e.V., <https://www.efuel-alliance.eu/efuels>
- [5] WEHRMANN, B. (2023): *Journalism for the energy transition.* [Online]. Berlin: Clean Energy Wire CLEW. 28.2.: <https://www.cleanenergywire.org/news/german-transport-minister-insists-exception-e-fuels-eu-car-emissions-rules>.

Hodnotenie tribologických vlastností DLC povlakov vybraných tribologických dvojíc

Matúš Čuchor, Ing.*

Katedra konštruovania a častí strojov, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: matus.cuchor@fstroj.uniza.sk

Jozef Ondriga, Ing.

Katedra konštruovania a častí strojov, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: jozef.ondriga@fstroj.uniza.sk

Tribological evaluation of DLC coatings for specific tribological pairs

Abstract: *DLC* coatings have several characteristics that have industrial applications. Principal advantages include a low coefficient of friction, hardness, abrasion resistance, and corrosion resistance. Coatings are evaluated using a number of test procedures. The ball-on-flat method was used to conduct the tests that are the focus of this paper. The tribological pair consisted of a *DLC*-coated plate and test balls made from three different materials. Experiments provide the friction coefficient curves as well as an optical evaluation of the *DLC* coating's wear. In all three types of examined tribological pairings, the coating was worn, but the *DLC* coating on the plate was not completely removed. After the break-in phase, the coefficient of friction has approximately constant values.

Keywords: coefficient of friction, tribology experiment, *DLC* coating

ÚVOD

Trendom dnešnej doby je prinášať na trh produkty, ktoré majú minimálnu uhlíkovú stopu a zároveň sú ekologické. Kladené sú vysoké požiadavky na udržateľnosť a úsporu energie pri prevádzke takýchto zariadení. Jednou z možností ako zvýšiť úsporu energie je navrhovať strojné zariadenia tak, aby trenie medzi pohyblivými sa súčasťami zariadenia bolo minimálne. K treniu dochádza všade tam, kde sa voči sebe pohybujú dve telesá. Trenie je fenomén, ktorý nie je možné odstrániť, no dá sa regulovať. Úprava povrchu súčastí trecieho uzla umožňuje efektívnu reguláciu trenia. Povrch je možné upravovať viacerými možnosťami. Prax ukázala, že povlakovanie povrchu súčastí trecieho uzla je výhodné. Požadované vlastnosti na povlak sú vysoká tvrdosť, odolnosť voči opotrebeniu, nízky koeficient trenia. *DLC* povlaky sa ukázali ako ideálne riešenie pre mnoho aplikácií, najmä tam, kde sú súčasťami trecieho uzla vystavené extrémnemu treniu, opotrebeniu a vysokému zaťaženiu [1].

DLC povlak (*Diamond Like Carbon*) je nanokompozitný povlak, ktorý disponuje jedinečnými vlastnosťami prírodného diamantu. Uhlík sa vyskytuje v dvoch alotropných formách. Jedna je

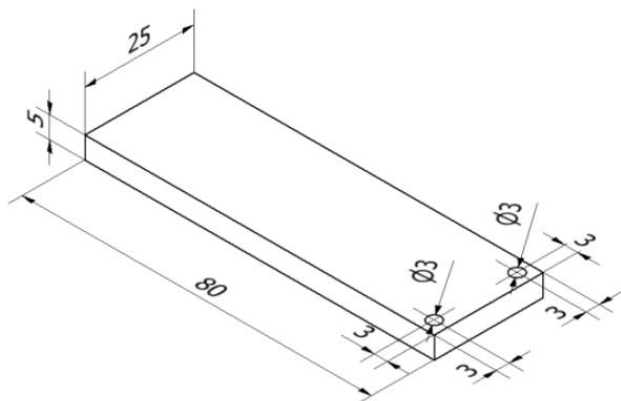
v štruktúre kryštálu diamantu a druhá v štruktúre kryštálu grafitu [2]. Tieto dve formy však vykazujú odlišné užitočné vlastnosti. Kryštalová štruktúra diamantu je najtvrdšou známou látkou a naopak štruktúra kryštálu grafitu je mäkká a klzná. Vlastnosti *DLC* povlaku sú kombináciou týchto vlastností. Vyznačujú sa vysokou tvrdosťou a zároveň nízkym koeficientom trenia v tribologických aplikáciách. Povlakovanie *DLC* je možné za nízkych teplôt (do 200 °C) a je možné ich nanášať na kovy, nekovy, sklo, plasty kremík a mnoho ďalších [3].

Pre experiment bol zvolený povlak *DLC*, ktorý bol nanosený na základnom materiáli 100CrMn6. Ide o ložiskovú ocel, ktorá bola pred povlakovaním zakalená. Vysoká tvrdosť substrátu je žiaduca. V prípade, že by bol substrát výrazne mäkkší ako povlak, mohlo by nastať prepadávanie povlaku do substrátu. Ideálny stav je, keď povlak a substrát majú rovnaké hodnoty tvrdosti. *DLC* povlak bol nanosený na substrát metódou *PVD*, ktorej výhodou takejto metódy depozície je nízka teplota povlakovania, teda nedochádza k tepelnému ovplyvneniu povlakovaného substrátu. Takto pripravené vzorky boli testované na tribometri metódou „*Ball on flat*“, kde sa zisťoval priebeh koeficientu trenia [4].

1 TRIBOLOGICKÝ EXPERIMENT

1.1 Príprava vzoriek

Vzorka má tvar platničky s rozmermi 80x25 mm. Rozmery vzorky sú uvedené na obr. 1. Materiál vzorky je ložisková ocel s označením 100CrMn6. Chemické zloženie je uvedené v tab. 1 podľa normy EN ISO 683-1. Vzorka bola prekalená v celom objeme a povrch dosahuje hodnotu tvrdosti 64 HRC. Pred samotným povlakovaním sa povrch brúsil a následne ručne vyleštil do zrkadlového lesku pomocou diamantovej pasty so zrnitosťou 3 μ m.



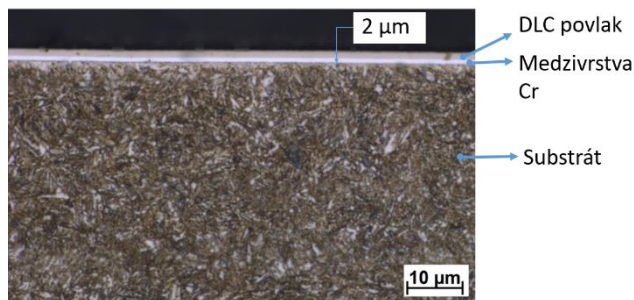
Obr. 1. Rozmery vzorky pre experiment

Tab. 1. Chemické zloženie substrátu v hmotnostných percentách

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.93 ÷ 1.05	0.45 ÷ 0.75	1.0 ÷ 1.2	max. 0.02	max. 0.015	1.4 ÷ 1.65	max. 0.1

1.2 DLC povlak

Nanometrický povlak bol nanosený na maticu technologickou metódou PVD-magnetronovým naprašovaním. Povlakovanie bolo realizované v spolupráci s firmou STATON-Turany. Pripravená nepovlakovaná vzorka sa umiestnila do vákuovej komory povlakovacieho zariadenia. Vákuová komora je evakuovaná na 10⁻⁴ Pa. Následne sa do komory doplní zmes inertného plynu Ar a reaktívneho plynu N, čím v tejto atmosfére dochádza v komore k chemickým reakciám, ktorých výsledkom sú chemické zlúčeniny deponované na povrch vzorky. Podmienkou naprašovania je prítomnosť ionizovaného prostredia-plazmy. To sa vytvorí tlecím výbojom, ktorý horí medzi katódou (terčom) a anódou. Napätie medzi nimi je od 200 V do 600 V. V oblasti tzv. katódového spádu sú ióny urýchľované smerom k terču (katóde). V prvom kroku depozície sa deponuje tenká vrstva Cr, ktorá zvyšuje príľnavosť DLC povlaku k substrátu. Vytvorený tenký povlak DLC je nanosený na povrchu vzorky o hrúbke priemerne 2 μ m [5,6]. Priečny rez vzorkou je znázornený na obr. 2.



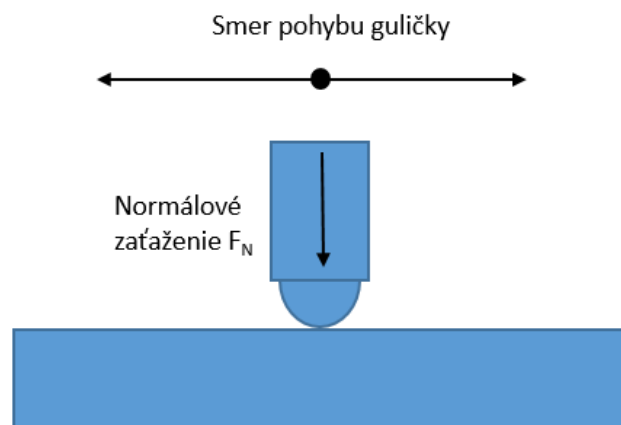
Obr. 2. Priečny rez vzorkou

1.3 Metodika experimentu

Experiment prebiehal v priestoroch tribologického laboratória na Katedre konštruovania a častí strojov na Žilinskej univerzite v Žiline. Hlavným cieľom bolo porovnanie priebehov koeficientov trenia pri použití rôznych tribologických dvojíc. Tribologická sústava bola tvorená dvomi členmi. Testovacia vzorka tvorila prvý člen sústavy a počas merania ostala nemenná. Druhý člen bola testovacia guľôčka s priemerom $d = 4$ mm. Na účely experimentu boli použité tri guľôčky, ktoré sa odlišovali svojím materiálovým zložením:

- guľôčka z ocele 100Cr6,
- guľôčka z SiC,
- guľôčka z DLC na báze WC.

Schéma priebehu merania je na obr. 3. Skúška prebiehala v atmosférických podmienkach bez prítomnosti maziva. Teplota prostredia bola 20 °C. Guľôčka mala recipročný pohyb po povrchu vzorky. Rýchlosť pohybu guľôčky mala sínusový charakter a pohybovala sa v rozsahu hodnôt $v = 0$ mm·s⁻¹ až 20 mm·s⁻¹. Na guľôčku bola vyvíjaná prítláčná sila $F_N = 10$ N. Čas experimentu bol stanovený na 6000 s. Podmienky pri všetkých meraniach boli rovnaké.

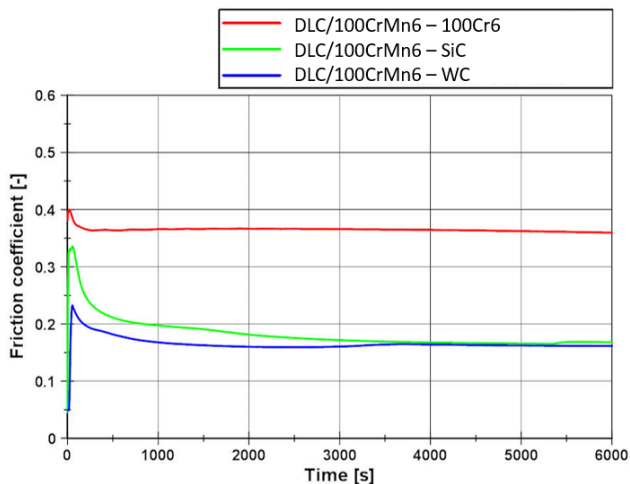


Obr. 3. Schematické znázornenie tribologického experimentu

2 VÝSLEDKY

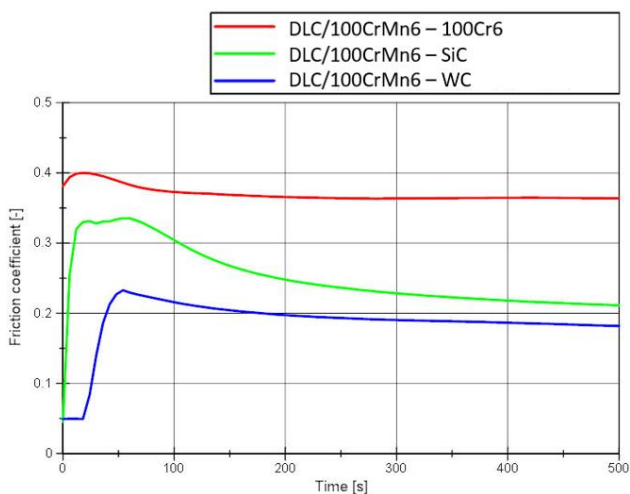
Výstupom meraní je priebeh koeficientu trenia v čase pri troch tribologických dvojiciach, pričom prvý člen

dvojice (povlakovaná vzorka) ostáva rovnaká a mení sa druhý člen (gul'ôčka). Priebehy koeficientov trenia sú uvedené v grafe na obr. 4. Ako bolo uvedené, meranie bolo vykonané pri rovnakých prevádzkových podmienkach.



Obr. 4. Priebeh koeficientov trenia jednotlivých tribologických dvojíc v závislosti od času

Koeficient trenia vo všetkých prípadoch v prvých sekundách experimentu rástol. Detail tohto priebehu je znázornený na obr. 5. Táto fáza sa nazýva zabiehacia fáza. Po čase dosiahol svoje maximum a od tohto maxima mal klesajúcu tendenciu až do momentu, keď sa ustálil na konštantnej hodnote.



Obr. 5. Priebeh koeficientov trenia v prvých 500 s experimentu

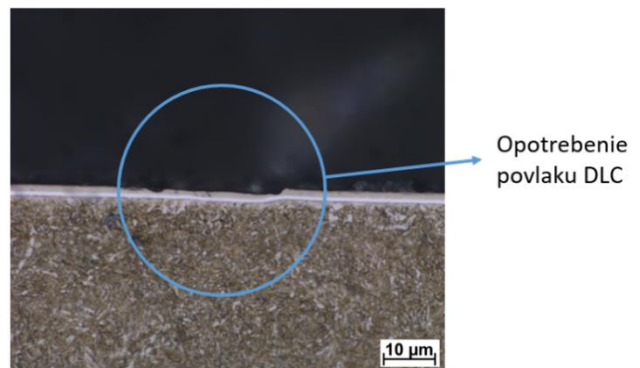
Na vzorke s gul'ôčkou z ocele 100Cr6 mal koeficient trenia na začiatku hodnotu $\mu = 0,38$ (-). V čase $t = 20$ s od začiatku merania dosiahol koeficient trenia svoju maximálnu hodnotu $\mu = 0,4$ (-). Od tohto momentu mal klesajúcu tendenciu až v čase na konci skúšky $t = 6000$ s dosiahol svoje minimum $\mu = 0,37$ (-). Pri meraniach s gul'ôčkou SiC a gul'ôčkou DLC/WC mali koeficienty trenia rovnaké hodnoty $\mu = 0,05$ (-) na začiatku merania. Meranie s gul'ôčkou SiC v čase $t = 50$ s dosiaholo svoju maximálnu hodnotu koeficientu trenia $\mu = 0,34$ (-). Na konci merania v čase $t = 6000$ s mal koeficient trenia svoju minimálnu hodnotu $\mu = 0,16$ (-). Meranie s gul'ôčkou DLC/WC

malo podobný priebeh ako s gul'ôčkou SiC. Rozdiel bol v dosiahnutej maximálnej hodnote koeficientu trenia $\mu = 0,24$ (-). Minimálna hodnota na konci merania bola $\mu = 0,17$ (-).

2.1 Vizuálne vyhodnotenie

Po vykonaní experimentu bol povlak vyhodnocovaný pomocou svetelného mikroskopu od firmy ZEISS. Cieľom bolo pozorovať miesto kontaktu povlaku vzorky s testovacou gul'ôčkou. Pozorovaním bolo možné určiť mieru poškodenia povlaku. Vzorka sa pred samotným pozorovaním musela prispôbiť tak, aby bolo možné takéto opotrebovanie vyhodnotiť. V mieste s najväčším predpokladaným opotrebením sa vykonal priečný rez. Takto upravená vzorka bola vyčistená od prípadných nečistôt a zároveň zbavená mastnoty. Nasledovalo lisovanie vzorky za tepla do bakelitu. Po brúsení a leštení bola vzorka pripravená na pozorovanie pomocou svetelného metalografického mikroskopu.

Na vzorke po vykonaní experimentu boli tri stopy, viditeľné voľným okom. Opotrebenie povlaku bolo možné pozorovať pod mikroskopom. Vo všetkých troch prípadoch došlo k opotrebeniu povlaku, ale nie jeho úplnému zničeniu. Na obr. 6. je znázornená stopa tribologickej dvojice DLC povlaku a gul'ôčky z materiálu 100Cr6. Nakoľko pri tejto tribologickej dvojici bol nameraný najvyšší koeficient trenia, je možné pozorovať najhlbšiu stopu.



Obr. 6. Opotrebenie povlaku na vzorke v priečnom reze

ZÁVER

Všetky tribologické dvojice majú podobný charakter priebehu koeficientov trenia. V prvých sekundách merania sa koeficient trenia zvýšil. Tento jav sa pozoruje v dôsledku trenia medzi gul'ôčkou a skúšobnou vzorkou. Toto trenie vo svojej dvojakej podobe pozostáva z deformačnej a adhéznej alebo mechanickej a molekulárnej zložky trenia. V prvých sekundách pohybu gul'ôčky po vzorke bola prítomná dominantná deformačná časť. Koeficient trenia narástol na maximum a po tejto fáze sa deformácia postupne eliminovala. Prejavilo sa to poklesom hodnôt koeficientu trenia, až kým sa nestabilizoval na konštantnej hodnote. V tejto fáze boli časti

mikrodrsnosti povlaku vzorky plasticky deformované. Celkové trenie ovplyvňovala len adhezívna zložka trenia, ktorá sa prejavila ako konštantná hodnota koeficientu trenia.

Na základe výsledkov meraní možno konštatovať, že najnižšia hodnota súčiniteľa trenia bola nameraná pre tribologickú dvojicu zloženú z DLC povlaku naneseného na doske a guľôčky z materiálu WC. Pri všetkých troch meraniach došlo k opotrebovaniu povlaku, ale nedošlo k jeho úplnému zničeniu.

Koeficient trenia mal v počiatočnej fáze klesajúci charakter a v hlavnej fáze vykazoval vo všetkých skúmaných prípadoch konštantný priebeh.

LITERATÚRA

- [1] VICEN, M. - BRONCEK, J. - BOKUVKA, O. - NIKOLIC, R. - RADEK, N. (2021): *Tribological behaviour of the susa slide diamond-like carbon coating*. In: Transactions of Famena, Vol., 45, No. 2.
- [2] VICEN, M. - BOKUVKA, O. - TRSKO, L. - DRBUL, M. - NIKOLIC, R. - NOVY, F. (2021): *Influence of Shot Peening on the Wear Behaviour of*

Medium Carbon Steel. In: Production Engineering Archives, 28(3), 241-245.

[3] DRABIK, M. - TRUCHLY, M. - BALLO, V. et al. (2018): *Influence of substrate material and its plasma pretreatment on adhesion and properties of WC/a-C:H nanocomposite coatings deposited at low temperature*. In: Surface and coatings technology, 333, 138-147.

[4] BRONCEK, J. - DZIMKO, M. - HADZIMA, B. (2014): *Experimental investigations of aluminium alloys 2024-T 3 form in terms of tribocorrosion characteristics*. In: Acta Metallurgica Slovaca, Vol. 20, No. 1, pp. 97-104.

[5] DZIMKO, M. - KOVALICEK, M - GAJDOSOVA, E. (2020): *Experimental Verification of Tribological Properties of Thin Coatings for Artificial Human Joints*. In: Current Methods of Construction Design: Proceedings of the ICMD, Springer International Publishing, pp. 473-480.

[6] HOLLECK, H. - SCHIER, V. (1995): *Multilayer PVD coatings for wear protection*. In: Surf. Coat. Technol. 76, 328-336.

Stanovenie úspory energetických nákladov na pohon vlaku znížením jazdného odporu

Sergii Panchenko, prof., Dr.Sc. Tech.

Katedra automatizácie a počítačového riadenia vlakov, Fakulta informačných a riadiacich systémov a technológií, Ukrajinská štátna univerzita železničnej dopravy, Feuerbakh sq., 7, 61050, Charkov, Ukrajina.
E-mail: panchenko074@ukr.net

Juraj Gerlici, prof. Dr. Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika.
E-mail: juraj.gerlici@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2550

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

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika.
E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com

Vasyl Ravlyuk, doc. Ing., PhD.

Katedra konštrukcie vagónov a kvality produktov, Strojnícka a energetická fakulta, Ukrajinská štátna univerzita železničnej dopravy, Feuerbakh sq., 7, 61050, Charkov, Ukrajina.
E-mail: panchenko074@ukr.net

Ján Dižo, doc. Ing., PhD.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika.
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Tel: +421 41 513 2560

Determination of savings of the energy costs to power a train by reducing the running resistance

Abstract: Examining the mechanical part of the braking systems of railway vehicles allowed us to find out that the brake blocks of the most freight cars are pressed by their upper ends against certain wheel surfaces when the brakes are released. This causes additional resistance to the movement of the train and also causes significant damage to the railway infrastructure of *Ukraine* in the case of freight traffic. To eliminate the friction between the brake block and the wheel when the train moves in the traction mode and when using inertia, it is advisable to use a modernized device developed according to the *UkrDAZT* technology, which allows to reduce the running resistance of the train. This leads to a reduction in the consumption of fuel and electricity for the propulsion of trains and at the same time allows to reduce the operating costs of rail transport for energy consumption.

Keywords: freight wagon, brake blocks, wear of blocks, efficiency of operation

ÚVOD

Potreba znižovania prevádzkových nákladov v podmienkach konkurencie na trhu dopravných služieb kladie požiadavky na organizáciu systému údržby a opráv nákladných koľajových vozidiel na základe skutočného stavu ich komponentov [1, 2]. Preto na základe analýzy štatistických údajov o počte

výskytov dopravných nehôd v dôsledku neuspokojivej činnosti brzdného systému nákladných vagónov boli zistené dva hlavné dôvody, ktoré vedú k výraznému zhoršeniu činnosti brzdného zariadenia:

- v pneumatickej časti dochádza k výraznému zhoršeniu kvality brzdného potrubia

- a v mechanickej časti je pozorované klinové dvojité opotrebovanie kompozitných brzdových klátikov.

Problém klinového opotrebovania brzdových klátikov vznikol už dávno, niekoľko desaťročí ho riešili vedci a odborníci z rôznych krajín. Uskutočnilo sa veľké množstvo štúdií a vyvinulo sa veľké množstvo rôznych zariadení na elimináciu javu abnormálneho opotrebovania brzdových klátikov. Medzi nimi však nie je dostatočne účinný.

V dôsledku nedokonalosti konštrukcie pákového prevodu nákladných vozňov sa pri odbrzdení podložky nakláňajú a dosadajú hornými koncami na valivú plochu kolies, čím pri pohybe vlaku vzniká škodlivé trenie, ktoré vedie k vzniku klinovo-dvojitého opotrebovania podložiek (obr. 1). To je spojené s výraznými nadmernými nákladmi na brzdové klátiky na železnici a zvýšenie trakčného odporu vo vlakoch v režime trakcie a dobehu vedie k nadmerným výdavkom nosičov energie na trakciu vlaku [3].



Obr. 1. Klinovité opotrebované brzdové klátiky vozňov

Pri brzdení čiastočne opotrebované klátiky sú v hornej časti deformované trením, výrazne zvyšujú tvorbu tepla a rapídne zvyšujú teplotu kovu na jazdnej ploche kolies. Z tohto dôvodu sa účinnosť brzdenia vlakov zhoršuje. Pohyb vlakov je preto v súčasnosti väčšinou sprevádzaný hlasným klepaním kolies, čím sa zvyšuje aj merný odpor pohybu a spotreba energie potrebnej na pohyb trakciu vlaku, poškodzuje sa trať, vozne, aj náklad.

V posledných rokoch sa počet odstavených nákladných vozňov zvýšil v dôsledku vytvárania podmienok pre vysokoteplotné poškodenie jazdných plôch kolies dvojkolesí v dôsledku takých porúch, ako sú zvary, prstencové útvary, odlupovanie kovu, sieť tepelných prasklín a pod. To priamo súvisí s fenoménom klinoduálneho opotrebovania brzdových klátikov, ktorého výsledkom je nadmerné zahrievanie jazdnej plochy kolies pri brzdení vlaku [4].

S cieľom znížiť počet dopravných nehôd na železničiach na *Ukrajine* sa každoročne vykonáva analýza [5], podľa ktorej je vypracovaných množstvo opatrení, ktoré poskytujú príležitosť na zlepšenie situácie na železnici. Príčinou dopravných udalostí je v mnohých prípadoch porucha mechanickej časti

brzdy, ktorú pri údržbe nákladných vozňov nie je možné vždy spoľahlivo predvídať a včas odhaliť, tak, aby sa zabránilo núdzovým situáciám počas ich prevádzky.

Mnoho vedeckých prác sa venovalo problematike zlepšenia prevodu brzdového pákovia nákladných vagónov, najmä určovaniu prenosu výkonu pri klinovom dvojitém opotrebovaní brzdových klátikov nákladných vagónov, jeho prevencii a zvýšeniu normatívneho zdroja brzdových klátikov. Najmä v práci [6] pri vývoji podvozka novej generácie pre nákladné vagóny bolo navrhnuté zariadenie na vyberanie klátikov s automatickým nastavením vzájomnej polohy brzdových klátikov a jazdnej plochy kolies. V čínskej brzdovej pákovej prevodovke má pôvodná konštrukcia podvozka ZK-1 trojuholníkové zavesenie [7]. Vyrába sa na ojnici neodpruženej časti, ktorá zasa spočíva na kužeľových puzdrách cez gumu a na zabránenie pádu trojuholníka na železničnú trať sa aktívne používajú bezpečnostné laná alebo konzoly.

Môžeme uviesť ďalšie príklady publikovaných vedeckých prác [8-10], kde sa osobitná pozornosť venuje vplyvu negatívnych faktorov brzdového systému nákladných vlakov, ktoré vedú k neželaným udalostiam kvôli vyššie spomínanému klinovému opotrebovaniu brzdových klátikov. To všetko opäť zdôrazňuje relevantnosť práce, ktorej výsledky sú prezentované v tejto štúdií.

1 METODOLÓGIA

Na zníženie pohybového odporu a elimináciu trenia medzi brzdovým klátikom a kolesom pri pohybe vlaku je potrebné v prípade nákladných vozňov použiť zariadenie vyvinuté podľa technológie *UkrDAZT*, ktoré umožní znížiť prevádzkové náklady železničnej dopravy na spotrebu energie, ako aj náklady na mazivá na prevádzku dieselových lokomotív.

Na zdôvodnenie takýchto rozhodnutí použijeme ustanovenia teórie trakcie lokomotívy [11], ako aj niektoré štúdie faktorov, ktoré ovplyvňujú spotrebu zdrojov energie [11-13].

Celkový odpor vlaku pozostáva z hlavného odporu w_o a prídavného odporu W_d .

Údaje o pôvode hlavných odporových síl naznačujú, že tento odpor závisí od mnohých faktorov, ktoré sú v zložitom a často vzájomne prepojenom vzťahu.

Pri výpočtoch uvažujeme nákladný vlak zložený z týchto vozidiel: dieselové lokomotívy radu *M62* a *2TE116*, elektrický elektrický rušeň *VL11* (jednosmerný), elektrický rušeň *VL80s* (striedavý), ako tie s najväčšou mernou hmotnosťou vo vozidlovom parku nákladných lokomotív na hlavných tratiach [14].

Je veľmi náročné nastaviť dostatočne presné hodnoty jednotlivých odporových prvkov a najmä také hodnoty, ktoré by boli vhodné pre rôzne prevádzkové podmienky koľajových vozidiel. Preto je v praxi pre výpočet hlavného odporu [15] potrebné použiť empirické vzorce získané ako výsledok značného počtu experimentálnych meraní odporu [11].

Základný odpor je určený vzorcom:

$$w_o = \frac{W_d}{(m_l + m_s) \cdot g}, \quad (1)$$

kde m_l je vypočítaná hmotnosť lokomotívy [t],

m_s je hmotnosť kompozície [t].

Dodatočný pohybový odpor W_d zahŕňa odporové sily z jazdy v stúpaní, pri pohybe v oblúkoch trate, pri pohybe z miesta, ako aj odporové sily vznikajúce pri nízkych teplotách vonkajšieho prostredia, pri pôsobení protismerného alebo bočného vetra.

Treba si uvedomiť, že v dôsledku nedokonalého vyhotovenia (spoje brzdové systému) podvozkov sa takmer v každom nákladnom vagóne pri uvoľnení brzd nakláňajú klátiky a dosadajú hornými koncami na jazdnú plochu kolies, čo vytvára dodatočné trenie pri pohybe vlaku pri jazde [16]. Hodnota tohto typu odporu koľajových vozidiel je určená vzorcom:

$$W_{dg} = 1000 \cdot \varphi_{kt} \cdot \sum K_{dg}, \quad (2)$$

kde 1000 je konverzný faktor [$\text{kN} \cdot \text{N}^{-1}$],

K_{dg} je vypočítaný prítlak brzdových klátikov z dôvodu nedokonalého vyhotovenia HVP podvozkov [$\text{kN} \cdot \text{nápr.}^{-1}$].

Vypočítaný koeficient trenia pre kompozitné brzdy je určený empirickým vzorcom [11, 17]:

$$\varphi_{kt} = 0,36 \cdot \frac{V + 150}{2 \cdot V + 150}, \quad (3)$$

kde V je rýchlosť [$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$].

Veľkosť vypočítaných prídavných tlakov brzdových klátikov v dôsledku nedokonalnej konštrukcie HVP podvozkov pri použití 4-nápravových nákladných vozňov ako súčasti vlaku je určená vzorcom:

$$\sum K_{dg} = K_{dg} \cdot 4 \cdot n_v, \quad (4)$$

kde K_{dg} je dodatočný vypočítaný tlak brzdových klátikov v dôsledku nedokonalnej konštrukcie HVP podvozkov, $K_{dg} = 0,36 \text{ kN} \cdot \text{nápr.}^{-1}$,

n_v je počet vozňov v nákladnom vlaku, hmotnosť.

Špecifická hodnota prídavného odporu od tlaku brzdových klátikov v dôsledku nedokonalého vyhotovenia HVP vozíkov pri pohybe vlaku v trakčnom režime a v režime bez pôsobenia trakčnej sily [$\text{N} \cdot \text{kN}^{-1}$] pri použití 4-nápravového nákladných vozňov vo vlaku sa určuje podľa vzorca:

$$w_{dg} = \frac{1000 \cdot \varphi_{kt} \cdot \sum K_{dg}}{m_s \cdot g} = \frac{1000 \cdot \varphi_{kt} \cdot K_{dg} \cdot n_v}{m_s \cdot g}, \quad (5)$$

kde m_s je hmotnosť vlaku [t],

g je zrýchlenie voľného pádu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

n_v je počet vozňov v nákladnom vlaku, hmotnosť.

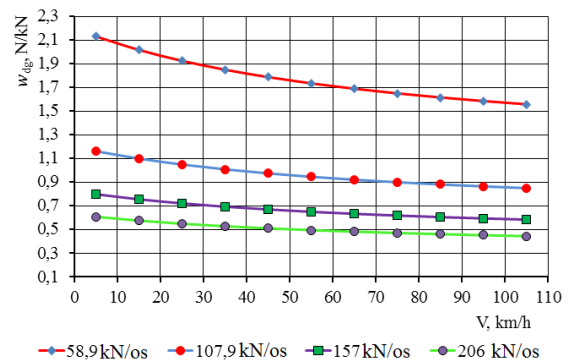
Vzhľadom na to, že zaťaženie nápravy vozňa je určené vzorcom:

$$q_v = \frac{m_s \cdot g}{4 \cdot n_v} \quad (6)$$

a berúc do úvahy vzorec (3), vzorec (5) má tvar:

$$w_{dg} = 360 \cdot \frac{V + 150}{2 \cdot V + 150} \cdot \frac{K_{dg}}{q_v}. \quad (7)$$

Závislosť špecifickej hodnoty prídavného odporu od tlaku brzdových klátikov v dôsledku nedokonalého vyhotovenia HVP podvozkov od rýchlosti vlaku a zaťaženia nápravy vozňa pri použití 4-nápravových nákladných vozňov vo vlaku je znázornené na obr. 2.



Obr. 2. Závislosť špecifickej hodnoty prídavného odporu pri stlačení brzdových klátikov v dôsledku nedokonalnej konštrukcie HVP podvozkov od rýchlosti vlaku a nápravového zaťaženia

Brzdňú silu nákladného vlaku tvorí:

- prítlak brzdových klátikov ku kolesu;
- premenou elektromotorov elektrických rušňov na generátory elektrického prúdu s návratom vyrobenej energie do siete trolejového vedenia (rekuperačné brzdenie).

Spotreba paliva na vlakovú prevádzku dieselového rušňa na úseku G_p je určená spotrebou paliva v párnom smere G_{pn} a nepárnom smere G_{np} .

Spotreba paliva podľa smerov sa určuje podľa vzorcov:

$$G_{pn} = \int_{\tau_s}^{\tau_s+1} G_{pn}(\tau) \cdot d\tau, \quad (8)$$

$$G_{np} = \int_{\tau_s}^{\tau_s+1} G_{np}(\tau) \cdot d\tau, \quad (9)$$

kde τ_s, τ_s+1 je čas pohybu nákladného vlaku na vybranom úseku trate so špecifickým profilom.

Merná spotreba paliva na meter prevádzkovej práce (10 000 tkm) je určená vzorcom:

$$b_p = \frac{\int_{\tau_s}^{\tau_s+1} G_{pn}(\tau) \cdot d\tau + \int_{\tau_s}^{\tau_s+1} G_{np}(\tau) \cdot d\tau}{(Q_{pn}^{br} + Q_{np}^{br}) \cdot l_k} \cdot 10^4, \quad (10)$$

kde Q_{pn}^{br} , Q_{np}^{br} je hmotnosť vlaku v jednom smere a obidvoch smeroch [t], hrubá,

l_k je vzdialenosť, ktorú prejde lokomotíva na čele nákladného vlaku v obidvoch smeroch a v jednom smere [km].

Spotreba elektrickej energie na prevádzku elektrického rušňa na úseku A_e je určená spotrebou elektrickej energie v obidvoch smeroch A_{pn} a v jednom smere A_{np} .

Spotreba elektriny podľa smerov sa určuje podľa nasledujúcich vzorcov:

$$A_{pn} = \int_{\tau_s}^{\tau_s+1} A_{pn}(\tau) \cdot d\tau, \quad (11)$$

$$A_{np} = \int_{\tau_s}^{\tau_s+1} A_{np}(\tau) \cdot d\tau. \quad (12)$$

Špecifická spotreba elektrickej energie na prevádzkový meter (104 tkm brutto) sa určuje podľa vzorca:

$$a_e = \frac{\int_{\tau_s}^{\tau_s+1} A_{pn}(\tau) \cdot d\tau + \int_{\tau_s}^{\tau_s+1} A_{np}(\tau) \cdot d\tau}{(Q_{pn}^{br} + Q_{np}^{br}) \cdot l_k} \cdot 10^4. \quad (13)$$

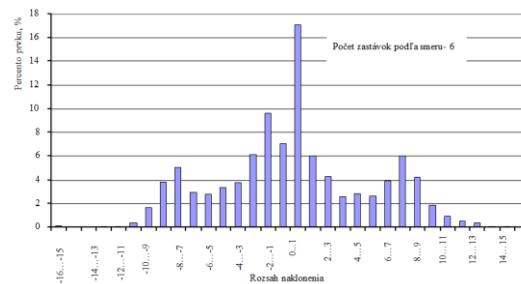
Na riešenie problémov súvisiacich s výpočtami ťahu použijeme metódu analytickej integrácie konečných rozdielov pomocou počítača.

2 VÝSLEDKY VÝSKUMU

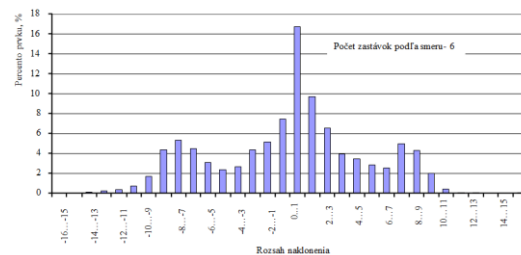
Hlavné trakčné výpočtov využijeme na určenie spotreby energie na pohyb nákladného vlaku za podmienok profilu reálneho úseku regionálnej pobočky „Pivdenna Zaliznytsia“ JSC „Ukrzaliznytsia“ pri použití naftového rušňa (rušeň radu M62, resp. radu 2TE116) a elektrického rušňa (VL11 elektrický rušeň pre jednosmernú trakciu a VL80s elektrický rušeň pre striedavú trakciu) so základným vyhotovením (s typovým zariadením HSV) a novou verziou (s modernizovaným zariadením HSV) nákladnými vozňami vo vlaku [16].

Charakteristika profilu úseku regionálnej pobočky "Pivdenna Zaliznytsia" as "Ukrzaliznytsia" je znázornená na obr. 3 a obr. 4 [12, 13, 19]. Ako vyplýva z uvedených údajov, v jednom smere je profil sklonu trate 0 ÷ 1 ‰, v párnom smere je to podobne sklon 0 ÷ 1 ‰. Celková dĺžka okruhu, ktorý

prekoná nákladný vlak, je 344,502 km. Vlak má na úseku 6 zastávok v oboch smeroch.



Obr. 3. Histogram rozloženia stúpaní na trati v jednom smere



Obr. 4. Histogram rozloženia stúpaní na trati v obidvoch smeroch

Aby bolo možné vykonať výpočty trakcie, musia byť okrem charakteristík profilu úseku špecifikované aj ďalšie údaje, a to ako pri použití dieselového rušňa, tak aj pri použití elektrického rušňa:

- hmotnosť vlaku v hrubých tonách,
- počet vozňov vo vlaku,
- nakladacie vozne,
- technická rýchlosť,
- počet náprav vozňa vo vlaku.

Na určenie týchto ukazovateľov použijeme referenčné ukazovatele železničnej prevádzky JSC "Ukrzaliznytsia" na rok 2021 [18].

Pomocou výkonových ukazovateľov železnice JSC "Ukrzaliznytsia" vygenerujeme začiatkové údaje pre realizáciu výpočtov trakcie [11, 19].

Ročný počet najazdených kilometrov nákladných vlakov $\sum NS$ pozostáva z najazdených kilometrov nákladných vlakov pri použití elektrickej lokomotívy $\sum NS_{et}$ a dieselovej lokomotívy $\sum NS_{dt}$.

Ročný počet najazdených kilometrov nákladných vlakov v tisícoch vlak-km podľa použitej trakcie sa určuje podľa vzorcov:

- závislá (elektrická) trakcia:

$$\sum NS_{et} = \frac{\sum Q_{br}^{et}}{Q_{br}^{et}} \cdot 1000, \quad (14)$$

- nezávislá trakcia:

$$\sum NS_{dt} = \frac{\sum Q_{br}^{dt}}{Q_{br}^{dt}} \cdot 1000, \quad (15)$$

kde $\sum Q_{br}^{et}$, $\sum Q_{br}^{dt}$ je ročný prevádzkový obrat nákladu v nákladnej doprave, ktorý je realizovaný závislou a nezávislou trakciou v mil. tkm brutto,

\bar{Q}_{br}^{et} , \bar{Q}_{br}^{dt} je priemerná hmotnosť nákladného vlaku závislej a nezávislej trakcie, t brutto.

Priemerná hmotnosť nákladného vlaku podľa typov trakcie je určená vzorcami:

- závislá trakcia:

$$\bar{Q}_{br}^{et} = \frac{P_l^{et}}{S_l^{et} \cdot (1 - \beta_{pc})}, \quad (16)$$

- nezávislá trakcia:

$$\bar{Q}_{br}^{dt} = \frac{P_l^{dt}}{S_l^{dt} \cdot (1 - \beta_{pc})}, \quad (17)$$

kde P_l^{et} , P_l^{dt} je priemerná denná produktivita elektrickej lokomotívy a dieselovej lokomotívy, brutto tisíc [tkm],

S_l^{et} , S_l^{dt} je priemerný denný počet najazdených kilometrov, elektrický rušeň a dieselový rušeň, [km],

β_{pc} je koeficient pomocného kilometrového výkonu lokomotívy.

Koeficient pomocného kilometrového výkonu lokomotívy je určený vzorcom

$$\beta_{pc} = 1 - \frac{P_l}{S_l \cdot \bar{Q}_{br}^l}, \quad (18)$$

kde \bar{Q}_{br}^l je priemerná hmotnosť nákladného vlaku, [t] hrubá,

P_l je priemerná denná produktivita lokomotívy, [tkm] hrubá,

S_l je priemerný denný počet najazdených kilometrov lokomotívy [km].

Priemerný počet vozňov vo vlaku je určený vzorcom:

$$\bar{n} = \frac{\sum nS}{\sum NS} = \frac{\sum nS}{\sum NS_{et} + \sum NS_{dt}}, \quad (19)$$

kde $\sum nS$ je ročný celkový počet najazdených kilometrov nákladných vagónov, [tis. voz.km].

Priemerné zaťaženie nápravy nákladného automobilu podľa typov trakcie je určené vzorcami:

- nezávislá trakcia:

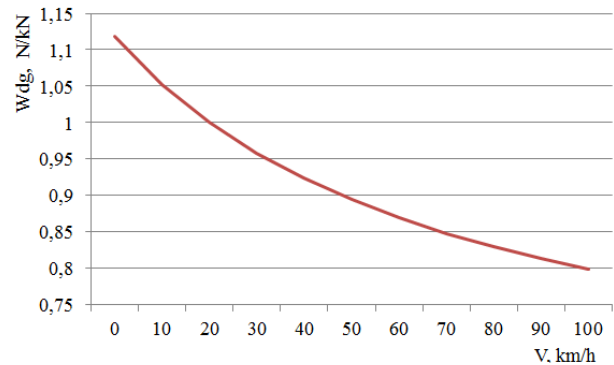
$$\bar{q}_{br}^{et} = \frac{Q_{br}^{et}}{4 \cdot \bar{n}}, \quad (20)$$

- závislá trakcia:

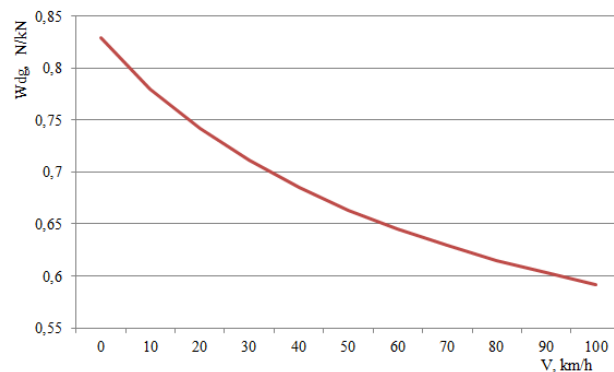
$$\bar{q}_{br}^{dt} = \frac{Q_{br}^{dt}}{4 \cdot \bar{n}}. \quad (21)$$

Výsledky stanovenia počiatočných údajov na vykonanie výpočtov trakcie sú uvedené v [18].

Výsledky výpočtu merného odporu z prídavného trenia horných častí kompozitných brzdových klátikov o valivý povrch kolies pri pohybe vlaku s rušňami rôznych typov v trakčnom režime a vo voľnobehu sú vypočítané podľa vzorca (5) a výsledky výpočtu sú znázornené na obr. 5 a obr. 6.



Obr. 5. Závislosť hodnoty prídavného merného odporu od prídavného trenia pri jazde vlaku s hmotnosťou 2505 t brutto s dieselovým rušňom 2TE116 v trakčnom režime a v režime voľnobehu



Obr. 6. Závislosť hodnoty merného odporu od prídavného trenia pri pohybe vlaku s hmotnosťou 3378 t brutto s elektrickými rušňami VL11 a VL80s v trakčnom režime a v režime naprázdno

ZÁVER

Použitie modernizovaného zariadenia vyvinutého pomocou technológie UkrDAZT v nákladných vozňoch umožňuje znížiť jazdný odpor vlakov v dôsledku absencie dodatočného trenia medzi brzdovým klátikom a kolesom pri jazde vlaku v režime trakcie a voľnobehu. Táto okolnosť vedie k zníženiu spotreby paliva a elektrickej energie potrebnej na pohyb vlaku, čo umožňuje znížiť prevádzkové náklady železničnej dopravy na spotrebu energie, ako aj náklady na mazivá na prevádzku dieselových rušňov.

Výsledky výpočtov trakcie týkajúce sa stanovenia mernej spotreby energie s rôznymi typmi trakčných koľajových vozidiel pri používaní modernizovaného zariadenia na rovnomerné opotrebenie brzdových klátikov vyvinutého podľa technológie UkrDAZT

zabezpečujú zníženie mernej spotreby paliva na meter prevádzky-práce (104 tkm brutto) pri použití:

- dieselovej lokomotívy radu M62 o 8,9 %,
- dieselovej lokomotívy radu 2TE116 o 19,7 %,
- jednosmernej elektrickej lokomotívy o 8,0 %,
- striedavej elektrickej lokomotívy o 7,25 %.

Pod'akovanie

Tento výskum podporil projekt VEGA 1/0513/22: *Výskum vlastností železničných brzdových komponentov v simulovaných prevádzkových podmienkach na zotrvačnikovom brzdovom stave. Tento výskum podporila Kultúrna a vzdelávacia grantová agentúra MŠ SR v projekte č. KEGA 031ŽU-4/2023: „Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného programu Vozidlá a motory.“*

LITERATÚRA

- [1] FOMIN, O. - GERLICI, J. - GORBUNOV, M. - VATULIA, G. - LOVSKA, A. - KRAVCHENKO, K. (2021): *Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam*. In: *Materials*, 14 (12), 3420.
- [2] PANCHENKO, S. - VATULIA, G. - LOVSKA, A. - RAVLYUK, V. - ELYAZOV, I. - HUSEYNOV, I. (2022): *Influence of structural solutions of an improved brake cylinder of a freight car of railway transport on its load in operation*. In: *EUREKA: Physics and Engineering*, 6. pp. 45–55.
- [3] NECHVOLODA, S. I. - ROMANYUKHA, M. O. - NECHVOLODA, K. S. (2007): *Problems of uneven wear of brake pads in freight cars*. In: *Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport*, 86. pp. 50-56.
- [4] LOVSKA, A. O. - RAVLYUK, V. G. (2022): *Study of non-normative wear of brake pads and its effect on the braking efficiency of freight trains*. In: *Collection of scientific works "Rail Rolling Stock"*, 25. pp. 30-50.
- [5] *Analysis of the state of traffic safety in the structure of JSC "Ukrzaliznytsia" in 2019*. Joint-stock company "Ukrainian railway" Department of traffic safety. 198 p.
- [6] RADZYHOVSKY, A. A. - OMEL'YANENKO, I. A. - TYMOSHINA, L. A. (2008): *System approach to the design of trolleys for cars with increased axial loads*. In: *Wagon park*, 8. pp. 10-16.
- [7] BLOKHIN, E.P. - ALPYSBAEV, K.T. - PANASENKO, V.YA. - GARKAVI, N.YA. - KLIMENKO, I.V. - GRANOVSKY, R.B. - FEDOROV E.F. (2012): *Bogies ZK1 of gondola cars built in China*. In: *Wagon park*, 9. pp. 12-14.
- [8] MARTYNOV, I. E. - NECHVOLODA, K. S. (2020): *On the method of complete elimination of*

wedge-shaped wear of brake pads of freight cars. In: *Wagon park*, 4. pp. 36-39.

- [9] VAKKALAGADDA, M. R. K. - SRIVASTAVA, D. K. - MISHRA, A. - RACHERLA, V. (2015): *Performance analyses of brake blocks used by Indian Railways*. In: *Original Research Article*, 328-329. pp. 64-76.
- [10] VERNERSSON, T. (1999): *Thermally induced roughness of tread braked railway wheels. Part 1: Brake rig experiments*. In: *Wear*, 99. pp. 96-105.
- [11] BOBIR, D. V. - KAPITSA, M. I. - SERDYUK, V. N. (2022): *Theory of locomotive traction. Traction calculations for industrial railway transport: a study guide*. Dnipro, 113 p.
- [12] KALABUKHIN, YU. E. (2009): *Methodology and results of evaluation of technical and economic performance indicators of the mainline locomotive when moving a freight train*. In: *Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after V. Dalya*, 2(132). pp.157-163.
- [13] KALABUKHIN, YU. E. (2011): *Results of the study of the influence of operational factors on the traction and energy indicators of the use of locomotive traction in freight traffic*. In: *Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport*, 122. pp. 66-75.
- [14] TARTAKOVSKY E. D. - AGULOV A. F. - FALENDYSH, A. P. (2009): *Theory and design of locomotives. Selection and calculation of the main components of locomotives: a study guide*. Kharkiv, Part 2, 150 p.
- [15] BABAEV, A. M. - DMYTRIEV, D. V. (2007): *Principle of operation, calculations and basics of operation of railway rolling stock brakes*. Kyiv, 176 p.
- [16] RAVLYUK, V. G. (2019): *Study of the features of dual wear of pads in the brake system of freight cars. Science and progress of transport*. In: *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 2 (80). pp. 111–126.
- [17] RAVLYUK V. G. - LOVSKA A. O. - DEREVYANCHUK Y. V. - AFANASENKO I. M. (2016): *Tasks and methodical recommendations for the course project in the discipline "Automatic rolling stock brakes"*. Kharkiv, 48 p.
- [18] *Integrated report of JSC "Ukrzaliznytsia" (management report) for 2020*. URL: <https://www.uz.gov.ua/files/file/about/investors/UZ%20Integrated%20Report%202020%20>
- [19] KALABUKHIN, YU. E. (2010): *Improvement of the methodology for determining the technical and economic indicators of the operation of traction rolling stock taking into account the life cycle*. Diss. Dr. Tech. Sciences: 05.22.07. Kharkiv, 420 p.

Programmable model of an automated warehouse

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 2719

Miroslav Rakyta, doc. Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: miroslav.rakyta@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2737

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

Katarína Štaffenová, Ing.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: katarina.staffenova@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2740

Abstract: The paper deals with the multifunctional kit is a robust training model that simulates and demonstrates warehouse automation in the world's most advanced enterprises. Programming takes place in the *Siemens TIA Portal* software, which is then loaded into a *Programmable Logic Automator* which is interconnected with the source *Siemens SITOP PSU100S*. The main objective of the paper was to provide an overview of the current state-of-the-art in automated manufacturing and to create an example of an automated warehouse that can be used in teaching as an ideal simulation and demonstration model for training and industrial automation.

Keywords: transport station, programmable model, *PLC Simatic S7-1200*.

INTRODUCTION

The main objective of this paper was to provide an overview of the current state of the art in automated manufacturing and to create an example of an automated warehouse that can be used in *Department of Industrial Engineering* training, simulation and demonstration model for training and industrial automation. The automated warehouse model example offers the opportunity to continue developing and extending the model and creating an experimental manufacturing system in a selected laboratory at the *Department of Industrial*

Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, at University of Zilina.

The vision of *Industry 4.0* [1-2] is to achieve a highly automated and autonomous manufacturing environment in which decision-making processes are provided by a variety of technologies that rely on the collection and subsequent analysis of input data performed in real time. Newly explored technologies can often transform entire industries. The expansion of the engineering industry increasingly requires the use of state-of-the-art technologies in the field of production in order to achieve significant labour

productivity and optimisation of the production in question. At the same time, with the increase in higher demands on the products or services produced, there is a need to speed up the production process as much as possible, but at a cost, that maximises the quality of the product. This is why automation is also being used. [3]

The efficiency of production is constantly conditioned by the work of pre-production components (construction, technology, design). [4] The role of the engineer is to analyse the already used, but also newly created working procedures [5-6], to discover the best method to perform the work (optimal working method). The best working method is generally considered to be the one in which the cost of performance is minimised as much as possible [7-8]. An effort is to make each work operation as short and simple as possible, so that it can be more easily learnt and at the same time require a minimum of human effort to perform.

1 METHODS

As an example, a *Programmable Automated Warehouse Model* was created (Fig. 1). This multifunctional kit from *Fischertechnik* [9] is a complete, stable training model that is used to simulate and demonstrate warehouse automation in the world's most advanced companies. A transfer/transport station with conveyor belt, a shelf stacker (3-axis robot) for stacking and retrieving special workpiece carriers, storage rack with nine storage slots.

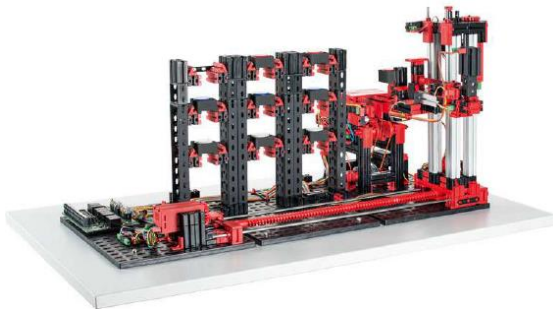


Fig. 1. Transport station with conveyor belt

The procedure for running the automated model:

- acquisition of the kit and subsequent repair of components that have been damaged repairing the components damaged during transport,
- installing the *Siemens TIA Portal* software to verify the functionality individual components,
- connecting the power supply to the network,
- connect the commissioned power supply to the *PLC*,
- interconnect the *PLC* to the kit, via the circuit board with the change relay direction of rotation of the motors,

- checking the wiring and subsequent rewiring to make the individual components work correctly,
- familiarization with the programming language, the individual parts of the block programming,
- programming a particular part of the model, using individual inputs and outputs,
- loading a given program into a *Programmable Logic Automata*,
- subsequently running the program and monitoring the individual components in motion,
- redesign/Improvement of programmed block,
- printed circuit board with relay,
- connecting the *PLC* to the kit and the power supply.

In order to be able to work with the automated warehouse model further it is necessary to connect it with a *PLC Programmable logic controller (Programmable logic automation) + Siemens SITOP PSU100S 24 V/5 A* power supply for mounting rail (*DIN rail*) 24 V/DC 5 A 120 W.

A programmable logic controller or *PLC* can be described as a relatively small industrial computer used to control a variety of industrial processes. The control takes place in real time. A *PLC* is also typical in that the program that controls it is loaded in cycles, unlike everyday computers, *PLCs* are designed to be directly integrated into the manufacturing process and because of this have customized peripherals. Such computers have a standardized construction, according to the *IEC-1131-(x)* standard. In terms of design, *PLCs* can be divided into the following groups:

- compact,
- modular.

The compact *PLC* has a fixed and immutable structure that cannot be modified or extended. Everything that the *PLC* needs to function, such as the *CPU* and other input/output peripherals, is combined in one unit.

A modular *PLC* is a *PLC* that can be modified or expanded. Such a design allows almost unlimited modification of the input-output peripherals [6]. The program processed by the *PLC* is mostly subject to the *IEC 1131-3* standard, which defines programming languages such as:

- *Instruction List IL*,
- *Structured Text ST*,
- *Contact Diagram Language (Ladder Diagram LD)*,
- *Function Block Diagram (FBD)* [10-11].

Connection to *PLC* control: The model has a relay to change the direction of rotation of the motors. All inputs and outputs can be connected to a jack

connector (26-pin, 2.54 mm pitch) or to serial terminals with socket clamps.

The *Simatic S7-1200 Basic Controller PLC* product is shown in Fig. 2. This product is described as The *Simatic S7-1200 Siemens PLC Basic Controller* is a high-performance system with a compact and space-saving design. This *CPU PLC* has 2 integrated analog inputs, 6 integrated digital inputs and 4 integrated digital transistor outputs. It comes with integrated *IO* and communication interfaces to meet the highest industrial requirements. This is also made possible by a range of powerful integrated technology features that make this controller an integral part of a complete automation solution. The controller is at the heart of a new offering for simple but high-precision automation tasks.

It is the ideal choice when it comes to performing automation tasks for a range of applications in the low to medium power range with maximum flexibility and efficiency [12-14].

Thanks to standardized remote control protocols, you can connect the controller directly to your control to your control centre without any programming. The *Siemens SITOP PSU100S 24 V/5 A DIN rail mount power supply 24 V/DC 5 A 120 W*.



Fig. 2. *PLC Simatic S7-1200*

The *SITOP* smart power supply is one-third smaller but has more power is one of the narrowest *DIN* rail power supplies and has excellent overload behavior. Even high loads can be switched on without problems. Rated outputs of 120% consistently make the power supplies the most reliable of their kind. Numerous certifications facilitate universal and worldwide use as well as use in potentially explosive areas. Overview of benefits:

- rounded power range from 60 to 960 W for universal use,
- compact design from 32.5 to 150 mm wide for small mounting area,

- easy *DIN* rail mounting,
- extra power: 150% of rated power for 5 seconds as reliable protection against,
- overload protection - for trouble-free switching of *DC/DC* converters, motors and loads with high surge currents,
- more power through sustained 120% of rated output up to 45°C,
- large output voltage adjustment range up to 28 V, easily accessible from the front by potentiometer,
- parallel connection to increase power output is possible,
- input voltage 120 V (85 - 132 V) / 230 V (170 - 264 V).

2 RESULTS

SIEMENS TIA Portal (Totally Integrated Automation) gives the possibility to write a program for control elements such as *PLCs* but also *HMI* panels, essentially integrating all design processes for automation in 1 software. Historically this has been divided into 2 non-core software but today *TIA Portal* allows programming of *PLCs*, *HMI* panels but also different peripherals. This makes the work easier but mostly saves time and money in the programming stations or different industrial machines.

Programming takes place in the *Siemens TIA Portal* program, as the 1200 series module is used in the work, moreover, the *TIA Portal* is used not only for programming *PLCs*, *HMI* panels but also various other peripherals provided by *Siemens*. Therefore it can be defined in 2 big groups namely *PLC* programming and programming resp. Animation of the *HMI* interface for the user. The *TIA Portal* program has these two groups integrated in one program and hence it makes the job of the programmer easier. Since some projects may involve many inputs, outputs or different variables that may not only be input/output but also in a version processed internally by the *PLC* processor.

PLC programming is carried out in the following way and that is that the programmer has to clarify the subsequent sequence of steps that lead to the solution of the problem and when the next step should occur. Subsequently, the task, i.e. if it is complex and large, has to be divided into smaller subgroups and chronologically these subgroups have to be set up in such a way that they are correct. We can make such a division by assigning all the action members to one group but in principle, the division is a matter of the programmer and his habits.

The program is uploaded to the *PLC* via the *TIAPORTAL* program (*TIA Portal V17*) as follows. It is necessary to select the *PLC* in my case (*PLC_1 [CPU 1214C DC/DC/Rly]*), right click and select the

option (Download to device) and then (Hardware and software). The next step is to check if the program has been loaded correctly, you need to mark *Go* online in the top bar and check if there are green balls everywhere in the (*Project tree*). This indicates whether the program in the *PLC* matches the program that is currently loaded in *TIAPORTAL*. If the color orange is present, this indicates that the block at which the orange ball is located is different. If the ball happens to be red, an error has occurred, but this condition usually only occurs on the physical *PLC*.

CONCLUSIONS

The work focused on new trends in the field of automated production. Automation nowadays is an essential part of a mature enterprise on an international level. The introduction includes a study dealing with the current state of automation in the world, and then the advantages and disadvantages of automation are mentioned, with the advantages outweighing the disadvantages.

The third chapter provides a graphical representation of the importance of mechanization and automation, followed by an example of automation technology on a programmable model of an automated warehouse, along with the various points of how I went about running the model. The programming is done in the *Siemens TIA Portal* software, which is then uploaded to the Programmable Logic Automat or, which is interconnected with the Siemens *SITOP PSU100S* power supply. The main objective of the paper was to provide an overview of the current state of the art in automated manufacturing and to create an example of an automated warehouse that can be used in teaching in the *Department of Industrial Engineering* as a training, simulation and demonstration model for training and industrial automation. The automated warehouse model example offers the opportunity to continue to develop and extend the model and create an experimental manufacturing system in a selected laboratory.

Acknowledgement

This work was supported by the Slovak Research and Development Agency under 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-Humnistycznej, pp. 36-39, ISBN 978-83-66249-48-6.
- [3] BENES, P. et al. (2014): *Automatizace a automatizační technika 3*. In: Bmo: Computer Press 304 s., ISBN 978-80-251-2523-6. 2014.
- [4] 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-Białej, p. 11-18, ISBN 978-83-66249-56-1.
- [5] GIRMAN (2015): *Programovanie PLC podľa normy IEC 1131-1*. Available: <https://qip-journal.eu/files/2000/1/girman/girman.html>.
- [6] Kovac, J. (2004): *Medzioperačná manipulácia a skladovanie v montáži*. Available: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/7-2004/pdf/169-173.pdf>.
- [7] LACKO, B. (2000): *Automatizace a automatizační technika: Systémové pojetí automatizace*. In: Computer Press, EAN: 9788072262465
- [8] OPLATEK, F. et al. (2000): *Automatizace a automatizační technika 4*. In: Computer Press, Praha, ISBN: 80-7226-249-1.
- [9] FISCHERTECHNIK (2020): *Automated High-Bay Warehouse*, Available: <https://www.fischertechnik.de/en/service/elearning/simulating/automatisierteshochregallager24v2020>.
- [10] POPPEOVA, V. (2002): *Automatizácia strojárskej výroby*. 1. vyd. Žilina : EDIS – vydavateľstvo ŽU v Žiline, 230 s, ISBN 80-8070-009-5.
- [11] VAVRIK, V. - FUSKO, M. - BUČKOVÁ, M. - GASO, M. - FURMANNOVÁ, B. - STAFFENOVA, K. (2022): *Designing of machine backups in reconfigurable manufacturing systems*. In: *Applied sciences*, 12(5), pp. 1-27, ISSN 2076-3417.
- [12] FILIPOVA, I. - DULINA, L. - BIGOSOVA, E. - PLINTA, D. (2021): *Modern Possibilities of Patient Transport Aids*. In: 14th International scientific conference on sustainable, modern and safe transport (Transcom 2021). Virtual conference 26–28 May 2021, Slovakia. *Transportation Research Procedia*, 55, pp. 510-517.
- [13] BUCKOVA, M. - GASO, M. - PEKARCIKOVA, M. (2020): *Reverse logistic*. In: *InvEnt: Industrial engineering – Invention for enterprise: proceedings*. Bielsko-Biala: Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humnistycznej, pp. 36-39, ISBN 978-83-66249-48-6.
- [14] SUKALOVA, V. - STOFKOVA, Z. - STOFKOVA, J. (2022): *Human Resource Management in Sustainable Development*. In: *Sustainability*, 14(21), 14258.

Конструктивные особенности современных горных велосипедов, часть 3.

Ян Дижо, к.т.н., доц.*

Кафедра транспорта и подъёмно-транспортных машин, Машиностроительный факультет, Жилинский университет в Жилине, Универзитна 1, 010 26 Жилина.
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Тел.: + 421 41 513 2560

Мирослав Блатницкий, к.т.н., доц.

Кафедра транспорта и подъёмно-транспортных машин, Машиностроительный факультет, Жилинский университет в Жилине, Универзитна 1, 010 26 Жилина.
E-mail: miroslav.blatnicky@fstroj.uniza.sk, Тел.: + 421 41 513 2659

Вадим Васильевич Ищук, Инж.

Кафедра транспорта и подъёмно-транспортных машин, Машиностроительный факультет, Жилинский университет в Жилине, Универзитна 1, 010 26 Жилина.
E-mail: vadym.ishchuk@fstroj.uniza.sk, Тел.: + 421 41 513 2563

Денис Молнар, Инж.

Кафедра транспорта и подъёмно-транспортных машин, Машиностроительный факультет, Жилинский университет в Жилине, Универзитна 1, 010 26 Жилина.
E-mail: denis.molnar@fstroj.uniza.sk, Тел.: + 421 41 513 2659

Себастьян Солчанский, Инж.

Кафедра транспорта и подъёмно-транспортных машин, Машиностроительный факультет, Жилинский университет в Жилине, Универзитна 1, 010 26 Жилина.
E-mail: sebastian.solcansky@fstroj.uniza.sk, Тел.: + 421 41 513 2563

Борис Плайдичко, Бц.

Кафедра транспорта и подъёмно-транспортных машин, Машиностроительный факультет, Жилинский университет в Жилине, Универзитна 1, 010 26 Жилина.

Design solutions of modern terrain bikes, the 3rd part

Abstract: MBT bikes (or mountain bikes) are widely used bikes, which serve the most often for sport purposes. These bikes are produced in more variants and they differ by several signs. There are dimensions, weight categories, used accessories and others. Together with this, there are different technical solutions, which make them different to each other. Usually, it refers to technical solutions of suspension system of a rear wheel of also a front wheel. A rear wheel can be suspended by different systems, which lead to different characteristics are provide different riding properties. This contribution presents an overview current technical solutions of these systems.

Keywords: terrain bike, design, suspension system.

ВВЕДЕНИЕ

Основным конструктивным элементом горных велосипедов является велосипедная рама. Геометрия

рамы и ее структурная компоновка влияют на ездовые характеристики велосипеда.

Горные велосипеды в большинстве случаев оснащены передней амортизационной вилкой

различных конструкций. Подвеска заднего колеса велосипеда может быть двух разных конструкций, либо амортизационной (в таком случае говорим о велосипеде с полной подвеской), либо жесткой (если велосипед не оборудован системой подвески, так называемые хардтейлы).

Для характеристики явлений, происходящих в подвеске внедорожных велосипедов, используются термины: прогрессивность подвески, эффективная передача усилия на педали (*anti-squat*), блокировка подвески при торможении (*anti-rise*) и отдача педали (*pedal kick*).

1 ПРОГРЕССИВНОСТЬ ПОДВЕСКИ

Прогрессивность подвески велосипеда присутствует во всех типах систем подвески, кроме однорычажной. В системе с одним рычагом (шарниром) сжатие амортизатора происходит линейно, подвеска сохраняет ту же линейную прогрессию на протяжении всего хода амортизатора. Таким образом, величина усилия, необходимого для сжатия подвески в разных точках хода амортизатора, зависит от жесткости самого амортизатора и от коэффициента предварительной нагрузки. При линейной характеристике во всем диапазоне сохраняется равномерное соотношение шарнирного соединения, которое можно выразить формулой [1]:

$$PP = \frac{z}{t}, \quad (1)$$

где z [мм] - ход заднего колеса,

t [мм] - длина штока поршня амортизатора.

Прогрессивная подвеска характеризуется увеличением сопротивлением на втягивание амортизатора во время хода амортизатора, даже если жесткость амортизатора остается неизменной. Различные типы систем подвески демонстрируют разную прогрессивность. При прогрессивной характеристике соотношение шарнирного соединения уменьшается в зависимости от сжатия амортизатора. В этом случае можно определить только среднее значение соотношения шарнирного соединения. Тип прогрессивности определяется по разности соотношений шарнирного соединения в начале и конце хода подвески в соответствии с формулой (2), а затем сравнивается со значениями, приведенными в Таблице 1:

$$RPP = PP_1 - PP_2, \quad (2)$$

где PP_1 соотношение шарнирного соединения в начале хода колеса,

PP_2 соотношение шарнирного соединения в конце хода колеса.

Амортизаторы также отличаются прогрессивностью. Характеристика амортизаторов с металлической пружиной имеет более линейную прогрессию, характеристика амортизаторов с воздушной системой более прогрессивная. На

степень прогрессивности воздушного амортизатора можно влиять, изменяя объем воздуха в камере амортизатора [2]. Значения RPP в соответствии с соотношением (2) для различных характеристик приведены в Таблице 1.

Таб. 1. Значения для определения типа прогрессивности

Тип характеристики	Значение RPP в соответствии с (2)
Регрессивная	менее чем -0,5
Линейная	-0,5 ÷ 0,5
Прогрессивная	0,5 ÷ 1,0
Суперпрогрессивная	более чем 1,0

1.1 Эффективная передача усилия на педали (*anti-squat*)

Характеристика подвески, называемая «*anti-squat*» помогает максимально повысить эффективность передачи мощности от велосипедиста к велосипеду и ограничивает раскачивание задней его части при педалировании, которое наблюдается при пересечении пересеченной местности или препятствий. Это значение может быть выражено в процентах и указывает на сопротивление сжатию амортизатора при педалировании. В тот момент, когда задняя конструкция велосипеда должна сдвинуться в результате педалирования и вызвать сжатие амортизатора, сила от системы передачи усилия начинает действовать на амортизатор в обратном направлении и помогает сместить его шток и вернуть его в исходное положение. 100% «*anti-squat*» говорит о полной нейтрализации силы, возникающей при нажатии на педали. В этом случае сила, возникающая при педалировании, действуя через цепь, будет смещать амортизатор. 0% «*anti-squat*» означает нулевое воздействие на амортизацию, и сила, возникающая при нажатии на педали, приводит к сжатию амортизатора и перемещению велосипедиста [2, 3].

1.2 Блокировка подвески при торможении (*anti-rise*)

Параметр «*anti-rise*» оценивает влияние заднего тормоза на работу подвески при его применении. При торможении центр тяжести велосипедиста перемещается вперед под действием инерционной силы, что вызывает поднятие задней подвески (от англ. *rise*). «*Anti-rise*» представляет собой блокировку движения задней части велосипеда во время торможения, в результате чего она остается в своем основном положении и может поглотить следующую возможную неровность рельефа без потери амортизационных свойств [2]. Чем выше значение «*anti-rise*», тем выше безопасность передвижения по пересеченной местности. Это

становится особенно важным при прохождении спусков.

1.3 Отдача педалей (pedal kickback)

Нежелательный эффект отдачи педалей (*pedal kickback*) важно учитывать при проектировании механизма подвески велосипеда, и его следует устранять по мере возможности или исключить совсем. Его величина определяет конструкцию итоговой системы подвески. Отдача на педали возникает из-за того, что задний рычаг удлиняется во время работы подвески, при этом необходимо обеспечить удлинение цепи. Цепь удлиняется простым поворотом кассеты переключателя. Но если кассета не может вращаться вперед, потому что заднее колесо заблокировано или вращается медленнее, ее нужно вращать назад. Это движение шатунов в случае не вращающейся кассеты называется отдачей. Значение «anti-squat» также важно в этом контексте, чем выше значение «anti-squat», тем больше отдача, которую производит педаль [4].

2 ВЕЛОСИПЕДНЫЕ АМОРТИЗАТОРЫ

Каждый из типов горных велосипедов имеет свои специфические требования к системе подвески, а именно, к амортизаторам. В некоторых случаях необходимо сохранить как можно меньший вес амортизатора наряду с высокой выносливостью или производительностью (например, на тяжелом техническом рельефе, при быстрой езде), иногда важнее гасить большие отскоки.

Основными типами амортизаторов являются (рис. 1) [5]:

- пневматические амортизаторы без расширительного бачка,
- пневматические амортизаторы с расширительным бачком,
- пружинные амортизаторы.



Рис. 1. Типы задних амортизаторов: 1 - воздушный без расширительного бака, 2, 3 - воздушный с расширительным баком, 4 - пружинный [5]

3 ЗАДНЯЯ ВЕЛОСИПЕДНАЯ ПОДВЕСКА

Подвеску заднего колеса можно описать как механизм с одной степенью свободы, состоящий из системы двух взаимосвязанных частей, которые работают вместе. Первая часть - это способ соединения заднего колеса с рамой, вторая часть - способ установки и крепления амортизатора по отношению к первой части подвески, т.е. соединение с подвижной частью рычага механизма треугольного рычага рамы.

Исходя из статической оценки механизма, степени свободы могут быть определены следующим расчетом:

$$n = 3 \cdot (u - 1) - 2 \cdot (r + p + v) - 1 \cdot o, \quad (3)$$

где n - итоговое число степеней свободы,

u - количество тел системы,

r - количество поворотных связей,

p - количество скользящих связей,

v - количество связей качения,

o - количество общих связей.

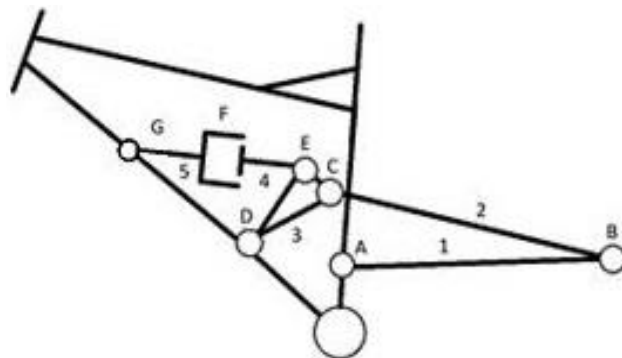


Рис. 2. Схематический чертеж механизма подвески рамы в виде шарнирно-рычажной системы

На рис. 2 рама велосипеда перерисована в статическую схему в виде шарнирно-рычажной системы, где буквы обозначают звенья, а цифры - тела, составляющие механизм. Это наиболее часто используемый механизм подвески, для которого степени свободы могут быть рассчитаны путем подстановки в соотношение (3) следующим образом:

$$n = 3 \cdot (6 - 1) - 2 \cdot (6 + 1 + 0) - 1 \cdot 0, \quad (4)$$

$$n = 1.$$

3.1 Одношарнирная система (Linear Direct Link)

В одношарнирной подвеске механизм состоит из одного рычага и одного вращающегося звена. Они соединены с амортизатором. Таким образом, задняя часть конструкции соединяется с передней только в одной точке, и амортизатор сжимается напрямую, без каких-либо дополнительных вспомогательных компонентов [2]. Особенности этого типа

являются чувствительная и быстрая реакция на любой толчок благодаря единой поворотной тяге, которая обеспечивает низкое трение в шарнире, а также высокая чувствительность задней конструкции к изменениям настроек амортизации. Движение рычага задней подвески постоянно, ось заднего колеса движется по круговой траектории, благодаря чему достигается линейная реакция подвески. Преимуществом этой системы подвески является низкое давление, необходимое в амортизаторе, поэтому отсутствует быстрый износ амортизатора [6]. Кинематическое представление системы подвески велосипеда Orange с одним шарниром, созданной в программном обеспечении *Linkage X3*, показано на рис. 3.

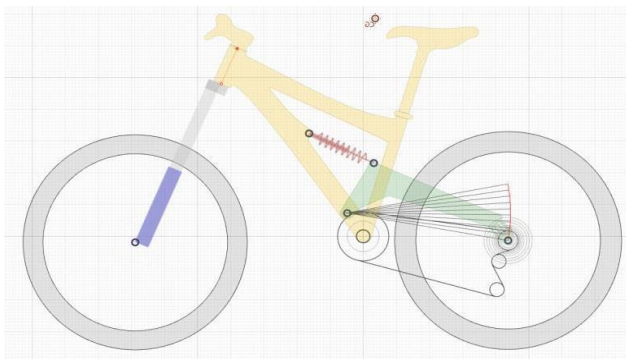


Рис. 3. Кинематическое изображение одношарнирной системы подвески

3.2 Одношарнирная система с дополнительной кулисой (Low Ratio - System)

Как и в случае с одношарнирной подвеской, задняя конструкция соединена с передним треугольником рамы одним шарниром. Разница заключается в системе сжатия амортизатора, который сжимается не напрямую, а через кулисы или систему кулисных рычагов, так что соотношение шарнирного соединения изменяется во время движения задней конструкции [2].

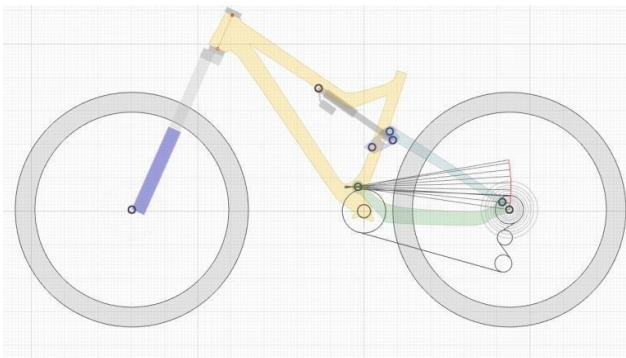


Рис. 4. Кинематическая схема одношарнирной системы подвески с дополнительной кулисой

Таким образом, достигается прогрессивность хода задней подвески, и система гораздо менее чувствительна к раскачиванию. Система гарантирует высокую чувствительность к любым раздражителям без нежелательного раскачивания при педалировании.

Преимуществом этой системы является возможность использования низкого давления в амортизаторе, что уменьшает износ амортизатора и, следовательно, снижает необходимость частого обслуживания амортизатора и нагруженных подшипников. Кинематическая схема одношарнирной подвески велосипеда изображена на рис. 4.

3.3 Четырехшарнирная система (Horst Link)

Четырехшарнирная система подвески представляет собой независимую рычажную систему, в которой верхний рычаг заднего треугольника отделен от нижнего рычага шарниром. Она характеризуется тем, что шарнир расположен на нижнем рычаге заднего треугольника, перед точкой крепления колеса. Поскольку задняя ось колеса не соединена непосредственно с передним треугольником рамы, она не движется по идеальной окружности [2]. Колесо может двигаться по эллиптической или неравномерной траектории. Оно описывает кривую вокруг виртуальной точки, называемой мгновенным центром, обозначаемым *IC*. Проблема с этой системой подвески может заключаться в том, что она слишком мягко реагирует на торможение, создавая впечатление "плавания" [6]. Кинематическая схема четырехшарнирной системы подвески изображена на рис. 5.

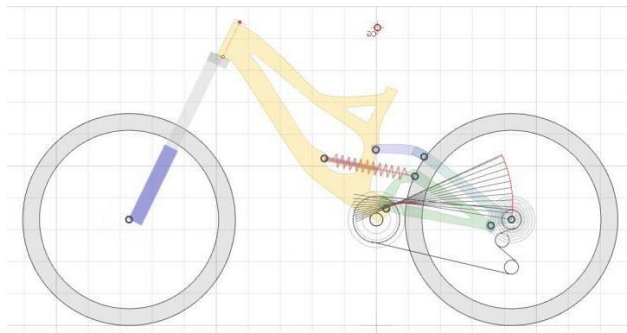


Рис. 5. Кинематическое изображение четырехшарнирной системы подвески

3.4 Twin Link

Система *Twin Link*, как и одношарнирная, имеет конструкцию заднего треугольника, которая не разделена шарниром. В отличие от одношарнирной системы, он крепится к переднему треугольнику рамы не напрямую, а через систему двойных звеньев. Система подвески балансирует силы, возникающие при движении велосипеда, устраняя нежелательное раскачивание при педалировании и обеспечивая полностью плавную езду по неровной поверхности трассы. Этот баланс может быть эффективным только при правильной настройке амортизатора. Кинематическое изображение системы подвески *Twin Link* велосипеда *Santa Cruz* типа *VPP* показано на рис. 6.

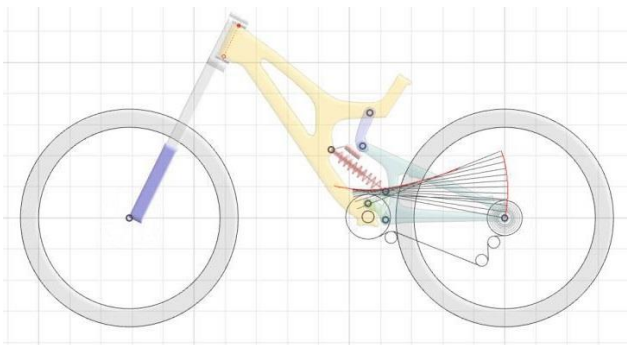


Рис. 6. Кинематическое изображение системы подвески Twin Link типа VPP Santa Cruz

3.5 Система с высоким шарниром (High Pivot Point)

Велосипеды с системой подвески с высоким шарниром обычно используют одношарнирную конструкцию подвески, но точка шарнира расположена высоко над шатунными подшипниками. Для устранения неприятно сильной отдачи от педалей используется дополнительный натяжной ролик, который направляет цепь вверх через точку вращения [4].

Преимущество этой системы заключается в том, что задняя ось смещается назад, что помогает заднему колесу лучше поглощать большие удары и справляться с угловыми неровностями. Это также способствует повышению общей эффективности педалирования. Недостатком этой конструкции является повышение потребности в обслуживании трансмиссии из-за натяжного ролика. Эту систему можно встретить почти исключительно на даунхильных велосипедах, например, *Commencal* или *Norco* [2]. Кинематическое изображение системы подвески велосипеда с высоким шарниром показано на рис. 7.

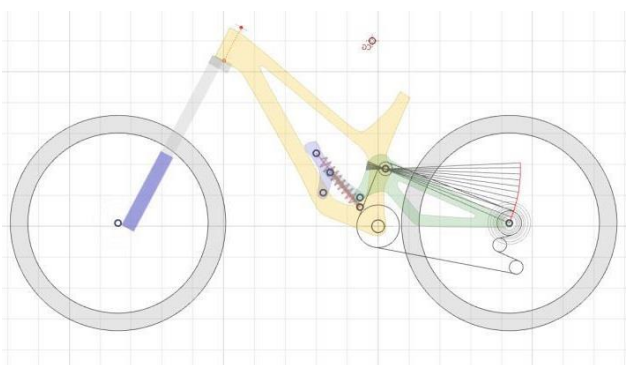


Рис. 7. Кинематическое изображение системы подвески с высоким шарниром

4 СИСТЕМЫ ПОДВЕСКИ ПЕРЕДНЕГО КОЛЕСА

Подвеска переднего колеса обеспечивается передней вилкой. Подвеска вилки обеспечивается двумя основными упругими элементами - пружиной или воздухом. Пружинящие свойства должны быть

сбалансированы амортизирующей средой, которая в самых простых пружинных вилках может быть на основе масла, а в более совершенных с воздушным поршнем или эластомером. Наилучшие амортизационные свойства имеют пружинные вилки на масляной основе. В воздушных вилках в качестве амортизирующей среды может использоваться масляная или воздушная система.

4.1 Передняя пружинная вилка

В пружинных вилках пружинящим элементом является стальная или титановая пружина. Она имеет линейную форму волны амортизации во всем диапазоне от начала до конца хода. Преимуществом является более быстрая и чувствительная реакция на неровности по сравнению с воздушной вилкой и постоянная реакция, не зависящая от температуры окружающей среды. Жесткость пружины следует выбирать в зависимости от веса велосипедиста и стиля езды. Недостатком этого типа амортизации является склонность к сжатию поршня до упора при внезапном и сильном ударе, что может привести к повреждению штока поршня. Чтобы устранить возможность повреждения при полной остановке, в пружинные амортизаторы обычно вставляют резиновые стопорные кольца [7]. Еще одним недостатком является большой вес вилки, что не является препятствием для более тяжелых типов велосипедов, таких как велосипеды для даунхилла.

4.2 Predná vzduchová vidlica

В пневматических вилках воздух является амортизирующей средой. Он имеет нелинейную, прогрессирующую форму волны амортизации. По мере углубления штока поршня сопротивление воздуха увеличивается. Таким образом, сжатие поршня до упора происходит не так быстро, как в пружинных вилках. С помощью специального насоса возможна точная регулировка давления в подвеске. Преимуществом пневматических вилок является меньший вес по сравнению с пружинными вилками. Однако на пневматические амортизаторы влияют температура окружающей среды, влажность и высота над уровнем моря. Таким образом, эффективность их работы не является постоянной при любых условиях окружающей среды. Недостатком воздушных вилок также является изменение реакции на неровности при длительных нагрузках, когда сжатый воздух перегревается и подвеска становится более жесткой [7].

ВЫВОДЫ

Как видно из представленных технических решений, конструкция подвески горного велосипеда не является однозначно данной, а различается в зависимости от предназначения и от требований к характеристикам подвески.

Зависит также, какой именно тип подвески будет использоваться от пользователя и от условий езды, для которых предназначен велосипед. Они различаются по сложности и, соответственно, по цене, поэтому при выборе конкретного типа необходимо учесть все условия и выбрать наиболее подходящую систему.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Tento výskum podporila Kultúrna a vzdelávacia grantová agentúra MŠ SR v projekte č. KEGA 036ŽU-4/2021: „Implementácia moderných metód počítačovej a experimentálnej analýzy vlastností komponentov vozidiel do vzdelávania konštruktérov dopravných prostriedkov budúcnosti.“

Tento výskum podporila Kultúrna a vzdelávacia grantová agentúra MŠ SR v projekte č. KEGA 031ŽU-4/2023: „Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného programu Vozidlá a motory.“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ANDREXTR (2016): *MTB rear suspension (Ep. 1): Fundamentals*. [cit. 2020-05-29]. Dostupné na: <https://youtu.be/A1dUV6pYztg>.
- [2] STOTT, S. (2019): *Zadné odpruženie*.

Kompletný sprievodca. In: *Biker*. 11(1), 90-93. ISSN 1337-981X EV 3231/09.

[3] FELT (2015): *FELT Decree. Technické vlastnosti* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné na: http://www.feltbicykle.sk/data/technologie/26/decree_sk.pdf

[4] KOBIDA, T. (2017): *Typy odpruženia horských bicyklov a základné pojmy* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné na: <https://kubicaspport.eu/clanok/typy-odpruzenia-horskych-bicyklov-a-zakladne-pojmy>

[5] MARTINUX (2013): *Prehľad systémov pruženia* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné na: <https://www.mtbiker.sk/clanky/5790/prehľad-systemov-pruzenia.html>

[6] WARZONE (2018): *Tlmiče – základné rozdelenie* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné na: <https://www.mtbiker.sk/clanky/10570/tlmice-zakladne-rozdelenie.html>

[7] STANK, K. (2019): *Spoznaj svoje tlmenie a konečne ho vylad' ako pán* [online]. 2020 [cit. 2020-05-28]. Dostupné na: <https://www.redbull.com/sk-sk/mtb-bike-tlmenie-odpruzenie-slovník-local-pojmy-vysvetlene>.

Porovnanie deformačných charakteristík vysokopevných ocelí používaných v automotive

Emil Evin, prof. Ing., CSc.*

Katedra automobilovej výroby, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Mäsiarska 74, 040 01 Košice.
E-mail: emil.evin@tuke.sk, Tel.: + 421 41 556 023 547

Miroslav Tomáš, doc. Ing., PhD.

Katedra automobilovej výroby, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Mäsiarska 74, 040 01 Košice.
E-mail: miroslav.tomas@tuke.sk, Tel.: +421 556 023 524

Vladimír Kokarda, Ing.

Katedra automobilovej výroby, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Mäsiarska 74, 040 01 Košice.
E-mail: vladimir.kokarda@tuke.sk, Tel.: + 421 41 556 023 547

Juliy Martyn Kulya, Ing.

Katedra automobilovej výroby, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Mäsiarska 74, 040 01 Košice.
E-mail: juliy.martyn.kulya@tuke.sk, Tel.: +421 41 556 023 528

Comparison of deformation characteristics of high-strength steels used in automotive

Abstract: The goal of the research was to compare the deformation properties such as absorption capacity, resistance to deformation, stiffness of high-strength steels with the properties of microalloyed steel based on the results of the tensile test and the three-point bending test. *HTC 590X* dual-phase steel and *RAK 40/70* steel have the potential to reduce intrusion into the passenger compartment, as the maximum deformation resistance, stiffness and energy absorbed in the three-point bending test were greater compared to *H220PD* microalloy steel reinforcement.

Keywords: high-strength steels, deformation resistance, stiffness, energy absorbed, three-point bending test.

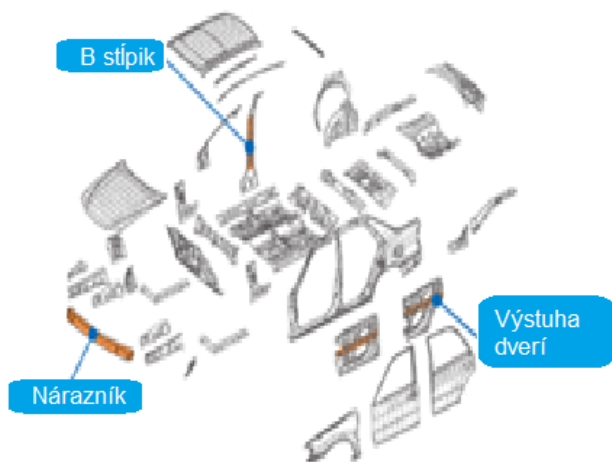
ÚVOD

V automobilovom priemysle sa kladie veľký dôraz na vytváranie ucelených a vyvážených konceptov automobilov, v ktorých sú sklbené požiadavky na: bezpečnosť, emisie a cenovú dostupnosť. Cieľom je dosiahnuť vysoký stupeň pridanej úžitkovej hodnoty. Kombinácia týchto faktorov však musí byť dosiahnuteľná reálnymi, technologicky a cenovo dostupnými metódami výroby, ktoré pritom nadmerne nezaťažia životné prostredie. Jedným z faktorov, ktorý v značnej miere rozhoduje o úspechu či neúspechu daného konceptu automobilu je bezpečnosť. Z hľadiska pasívnej bezpečnosti kľúčovú úlohu plní konštrukcia karosérie vozidla, ktorá

pozostáva z prednej deformačnej zóny, z bezpečnej zóny pre pasažierov (bezpečnostnej kľetky) a zadnej deformačnej zóny. V prípade kolízie deformačná štruktúra karosérie v prednej a zadnej časti karosérie má za úlohu pohltiť také množstvo kinetickej energie, aby spomalenie neprekročilo prípustnú biomechanickú hranicu preťaženia ľudského organizmu. To znamená, že deformácia štruktúry v prednej a zadnej časti automobilu musí byť riadená. Kinetická energia razu sa premení (transformuje) na deformačnú prácu štruktúry prednej a zadnej časti karosérie. Sily, ktoré vzniknú pri náraze v priečniku nárazníka sa rozdelia do pozdĺžnych nosníkov. Z pozdĺžnych nosníkov sa zaťaženie prenáša do tunela, prahov, podlahy, do nosnej konštrukcie dverí

a cez stĺpik dverí do nosníkov strešnej konštrukcie. Pritom sú pozdĺžne nosníky namáhané tlakovou silou a priečne nosníky a výstuhy ohybovou silou (obr. 1).

Následky dopravnej nehody pri bočnom náraze sú často krát závažnejšie ako pri čelnom náraze. Riziko preťaženia cestujúcich pri bočnom náraze môže presiahnuť biomechanické limity, pretože deformačná štruktúra musí absorbovať energiu rázu na kratšej dráhe ako pri čelnom náraze vozidla.



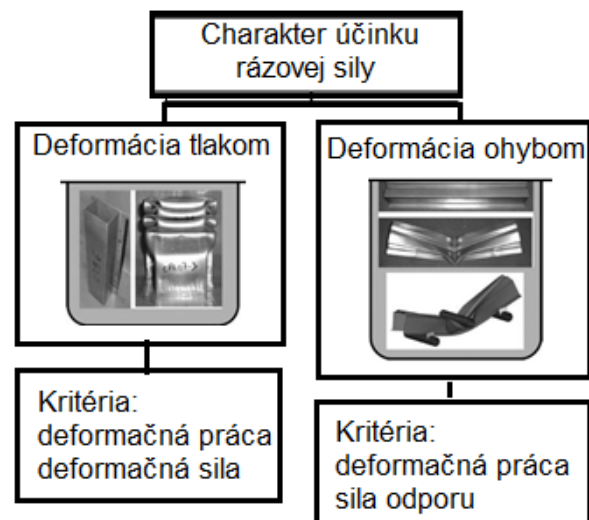
Obr. 1. Diely namáhané ohybovou silou

Absorpčná schopnosť deformačnej štruktúry závisí od použitého materiálu, geometrie dielov deformačných zón a charakteru pôsobenia zaťažujúcej sily. Pri stavbe karosérie sa používajú rôzne druhy ocelí, zliatin hliníka, zliatiny horčíka a kompozitné materiály. Mechanizmy rozptylu rázovej energie kovových a kompozitných štruktúr sú značné odlišné. Konštrukcie vyrobené z kompozitných materiálov sú krehké a rozptyľujú energiu prostredníctvom rôznych kombinovaných lomových mechanizmov (delaminácia, lámanie vlákien a praskanie matrice). Zatiaľ čo štruktúry z kovov umožňujú rozptýliť energiu riadenou elasto-plastickou deformáciou dielov deformačnej štruktúry. Ako už bolo uvedené vyššie, karoséria automobilu pozostáva z prednej deformačnej zóny, bezpečnej zóny pasažierov a zadnej deformačnej zóny.

Vzhľadom na požadovanú funkcionálnu jednotlivých deformačných zón sa aj použité materiály dielov jednotlivých zón líšia. Pre prednú a zadnú deformačnú zónu sa používajú dvoj- a viacfázové

ociele (*DP* ocele, *Dual-Phase Steels*), *CP* ocele (*Complex-Phase Steels*), *TRIP* ocele (*Transformation Induced Plasticity Steels*) *TWIP* ocele (*Twinning Induced Plasticity Steels*), ktoré majú veľmi dobrú absorpčnú schopnosť. Pre bezpečnú zónu (bezpečnostnú kľetku) sa používajú *MS* Martenzitické ocele (*Martensitic Steels*) *HF* ocele (*Hot Formed Steels*), *DP* ocele (*Dualphase Steels* >1000 MPa), ktoré sa vyznačujú vysokou pevnosťou [1-4].

Pre predikciu kľúčových ukazovateľov odolnosti deformačnej štruktúry proti nárazu pri namáhaní tlakovou alebo ohybovou silou dizajnéri využívajú výsledky ťahovej skúšky, skúšky trojbodovým ohybom a skúšky tlakom (obr. 2) [5].



Obr. 2. Princiálne schémy skúšok

Cieľom tohto príspevku je porovnať deformačné charakteristiky plechov z mikrolegovanej ocele *H220PD*, dvojfázovej ocele *HTC 590X* a viacfázovej ocele *RAK 40/70*.

1 METODIKA EXPERIMENTÁLNEHO VÝSKUMU

Experimentálny výskum deformačných charakteristík bol realizovaný na plechoch z mikrolegovanej ocele *H220PD*, dvojfázovej ocele *HTC 590X* a viacfázovej ocele *RAK 40/70*, ktoré sa používajú pri stavbe karosérií automobilov. Mechanické vlastnosti boli zisťované ťahovou skúškou na trhacom stroji

Tab. 1. Namerané hodnoty n a K vyhodnotené v intervale skutočnej deformácie $0,1 \div 0,2$

Materiál	Namerané údaje							Vypočítané EA_{True}/V_0 [N·mm ⁻²]
	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80} [%]	$K_{0,1-0,2}$ [MPa]	$n_{0,1-0,2}$	$EA_{m,t}/V_0$ [N·mm ⁻²]	
<i>H220PD</i>	388 ± 2	449 ± 1	17 ± 1	29 ± 1	719 ± 3	0,178 ± 0,002	104,593	104,92
<i>HTC 590X</i>	376 ± 4	632 ± 2	19 ± 0,5	28 ± 0,5	1059 ± 2	0,202 ± 0,001	144,390	145,246
<i>RAK 40/70</i>	440 ± 3	764 ± 2	25 ± 1	30 ± 2	1468 ± 6	0,287 ± 0,002	187,188	187,32

TIRATEST 2300 v zmysle ustanovení noriem ISO 6892-1: 2019 a ISO 10275: 2020. Namerané hodnoty mechanických vlastností: medze klzu R_e , pevnosti v ťahu R_m , rovnomernej ťažnosti A_g , ťažnosti A_{80} , materiálovej konštanty $K_{0.1-0.2}$ a exponenta deformačného spevnenia $n_{0.1-0.2}$ boli zisťované ťahovou skúškou (tab. 1).

Základnou deformačnou charakteristikou je absorpčná schopnosť (*Energy Absorption - EA*), t. j. množstvo *EA* do porušenia materiálu. Množstvo *EA* závisí od húževnatosti materiálu, ktorá vyplýva z fyzikálno-metalurgickej podstaty pevnosti a plasticity. V podstate sa jedná o mechanickú prácu, ktorá je vzťahovaná na jednotku objemu do porušenia materiálu. Táto mechanická práca sa určí z plochy pod krivkou závislosti skutočného napätia na skutočnej deformácii [6, 7]. Skutočná pevnosť bola vypočítaná z nameraných hodnôt síl a predĺženia vzorky podľa vzťahu (1) [8-10]:

$$\sigma_{True} = \frac{F_i}{S_0} \cdot \left(1 + \frac{A_{g,i}}{100}\right) \quad (1)$$

a skutočná deformácia podľa vzťahu (2):

$$\varphi_{True} = \ln\left(1 + \frac{A_{g,i}}{100}\right), \quad (2)$$

kde F_i je skutočná okamžitá sila,

S_0 je východiskový prierez vzorky,

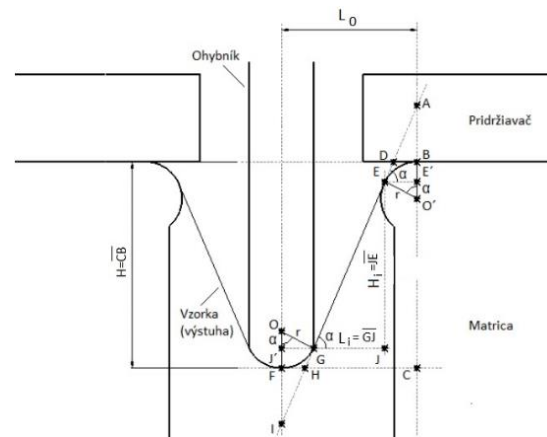
$A_{g,i}$ je rovnomerná ťažnosť.

Zo závislosti skutočného napätia na skutočnej bola vyhodnotená deformačná práca $EA_{m,t}/V_0$, ako plocha

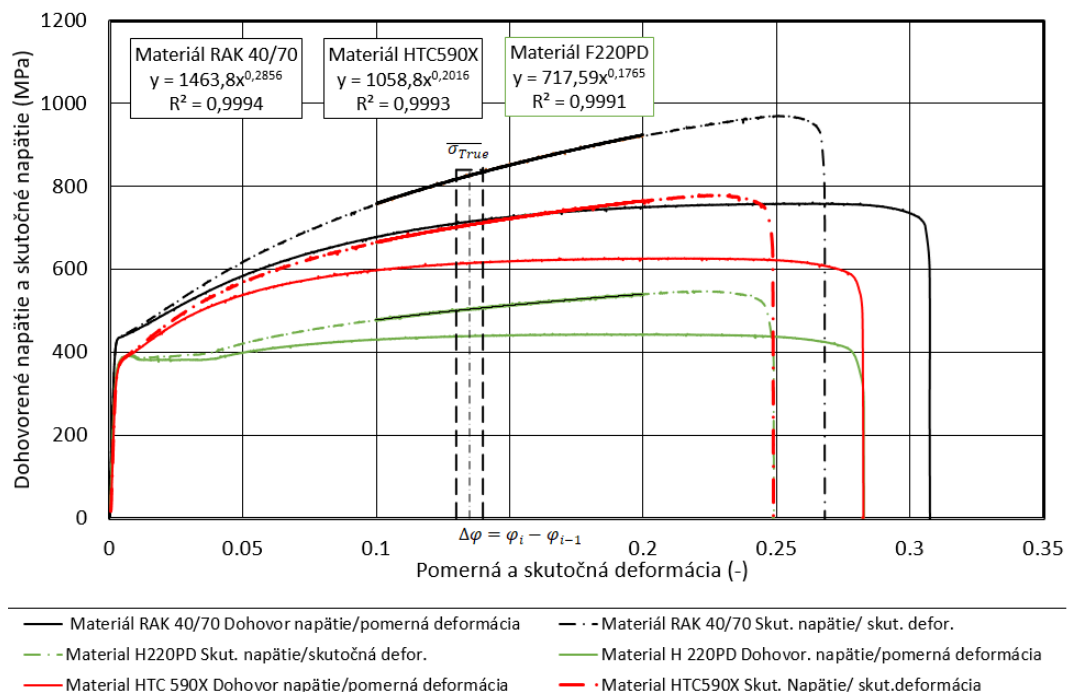
pod krivkou závislosti skutočného napätia na deformácii pomocou vzťahu (3) (obr. 2):

$$EA_{m,t} = \sum_{i=1}^n \left(\overline{\sigma_{True}(\varphi_i)}\right) \cdot \Delta\varphi. \quad (3)$$

Ako bolo vyššie uvedené pri kolíziách automobilov sú nárazník, priečne nosníky, prah, B stĺpik výstupy dverí a strechy namáhané ohybovou silou. Tieto diely sú spojené s rámovou konštrukciou karosérie. Namáhanie ohybovou silou bolo modelované skúškou trojbodovým ohybom, pričom konce vzoriek boli mechanicky pridržiavané (obr. 3). Pre experimentálny výskum boli použité vzorky o šírke 26 mm a s dĺžkou $L = 300$ mm. Rýchlosť pohybu ohýbacieho nástroja bola nastavená na $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Vzorky boli deformované do porušenia. Ohybník s telesom nástroja a tenzometrickým snímačom boli pripojené k pohyblivému priečniku ťhacieho stroja TIRATEST 2300, ktorý umožňuje zaznamenávať ohýbaciú silu aj dráhu priečnika do PC (obr. 4).



Obr. 3. Principiálna schéma skúšky trojbodovým ohybom



Obr. 4. Závislosť skutočného napätia od deformácie

Zo záznamu deformačnej sily a dráhy boli vytvorené závislosti (obr. 4). Z týchto závislostí bola vypočítaná $EA_{m,bt}$ pomocou vzťahu (4):

$$EA_{m,bt} = \int_0^{h_{\max}} \overline{F_b}(h_i) \cdot dh \approx \sum_{i=1}^n \left(\overline{F_b}(h_i) \right) \cdot \Delta h, \quad (4)$$

kde $\overline{F_b}(h_i)$ je priemerná hodnota sily vo zvolenom intervale,

$\overline{h_i}$ je stred zvoleného intervalu $[h_{i-1}, h_i]$,

$$\Delta h = h_i - h_{i-1}.$$

Hodnoty absorbovanej energie $EA_{m,bt}$ vypočítané pomocou vzťahu (4) sú uvedené v tab. 2.

0,973, t. j. 97,3 % zhodu a pri modeli zistenom zo závislosti skutočného napätia na deformácii $EA_{True} = f(\sigma_{True}, \varphi_{True})$ nadobúda hodnotu 0,9998, t. j. 99,98 % zhodu. To znamená, že naposledy menovaný model závislosti skutočného napätia na deformácii je schopný skoro dokonale predikovať hodnoty závislej premennej. Menšia predikčná schopnosť modelov vzťahovaných k medzi kĺzu a pevnosti v ťahu súvisí s tým, že tieto materiálové charakteristiky sú vzťahované k prierezu pred deformáciou a nie k skutočnému prierezu. V oblasti rovnomernej deformácie dochádza k intenzívnemu deformačnému spevňovaniu. Z obr. 2 vyplýva, že sploštenie krivky

Tab. 2. Namerané hodnoty deformácií na vzorkách pred porušením pri skúške trojbodovým ohybom

Materiál	Namerané údaje					
	Dráha H_{max} [mm]	$EA_{m,bt}$ [Nm]	$EA_{c,bt}$ [Nm]	$F_{b,max}$ [kN]	CS_{bt} [kN]	$CS_{reg..bt}$
H220PD	41,1	285,431	318,688	13,888	0,338	0,361
HTC590X	41,2	374,374	365,644	17,760	0,431	0,482
RAK 40/70	43,3	535,052	529,6	24,446	0,564	0,607

2 DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY A ICH DISKUSIA

Základnou deformačnou charakteristikou je absorpčná schopnosť EA , t. j. množstvo EA do porušenia materiálu. EA je vzťahovaná na jednotku objemu do porušenia materiálu. Na obr. 5 sú uvedené závislosti EA vypočítaných na základe dohovorených mechanických vlastností (medze kĺzu R_e , pevnosti v ťahu R_m , rovnomernej ťažnosti A_g a celkovej ťažnosti A_{80}), ktoré boli vypočítané podľa nasledujúcich vzťahov (5) a (6):

$$EA_{A_g} = \frac{(R_e + R_m) \cdot A_g}{2 \cdot 100}, \quad (5)$$

$$EA_{A_{80}} = \frac{(R_e + R_m) \cdot A_{80}}{2 \cdot 100}. \quad (6)$$

Deformačná práca bola tiež vypočítaná na základe skutočných hodnôt napätí a skutočných hodnôt deformácií podľa vzťahov (1) a (2).

Mieru kvality regresného modelu v štatistike vyjadruje koeficient determinácie R^2 . Tento koeficient vyjadruje podiel variability závisle premennej. Z obr. 5 vyplýva, že R^2 pri modeli zistenom zo

závislosti $EA_{A_g} = \frac{(R_e + R_m) \cdot A_g}{2 \cdot 100}$ nadobúda hodnotu

0,964, t. j. 96,4 % zhodu, pri modeli zistenom zo

závislosti $EA_{A_{80}} = \frac{(R_e + R_m) \cdot A_{80}}{2 \cdot 100}$ nadobúda hodnotu

v oblasti maximálnej pevnosti vypočítanej zo skutočnej sily a prierezu pred deformáciou S_0 . Sploštenie je spôsobené tým, že nie je uvažované so zmenšením prierezu vzorky, v okamihu tvorby krčka dochádza k rýchlejšiemu poklesu sily. Tento stav je možné pozorovať na závislosti skutočného napätia na skutočnej deformácii, kde až pri tvorbe krčka dochádza k intenzívnemu poklesu skutočného napätia. Deformačné správanie sa kovových materiálov je možné popísať *Hollomanovou* rovnicou (7):

$$\sigma_{True} = K \cdot \varphi_{True,i}^n, \quad (7)$$

kde K je materiálová konštanta,

n je exponent deformačného spevnenia,

$\varphi_{True,f}$ je skutočná deformácia pred porušením vzorky.

V závislosti od mikroštruktúry (jednofázová alebo viacfázová, veľkosti zrna a pod.) a fázových transformácií počas deformácie dochádza k určitým zmenám, ktoré *Hollomanova* rovnica nemusí vždy presne vyjadriť. Predikčná schopnosť *Hollomanovej* rovnice bola overovaná pri nasledujúcich intervaloch: φ_{True} od 0,1 do zúženia (pred porušením). Tento výber intervalu deformácii bol volený vzhľadom na definíciu húževnatosti, ktorá je definovaná mechanická práca potrebná na deformácie určitého objemu do porušenia. Pri namáhaní jednoosovým ťahom je deformačnú prácu vzťahovanú k určitému objemu možné určiť podľa vzťahu (8):

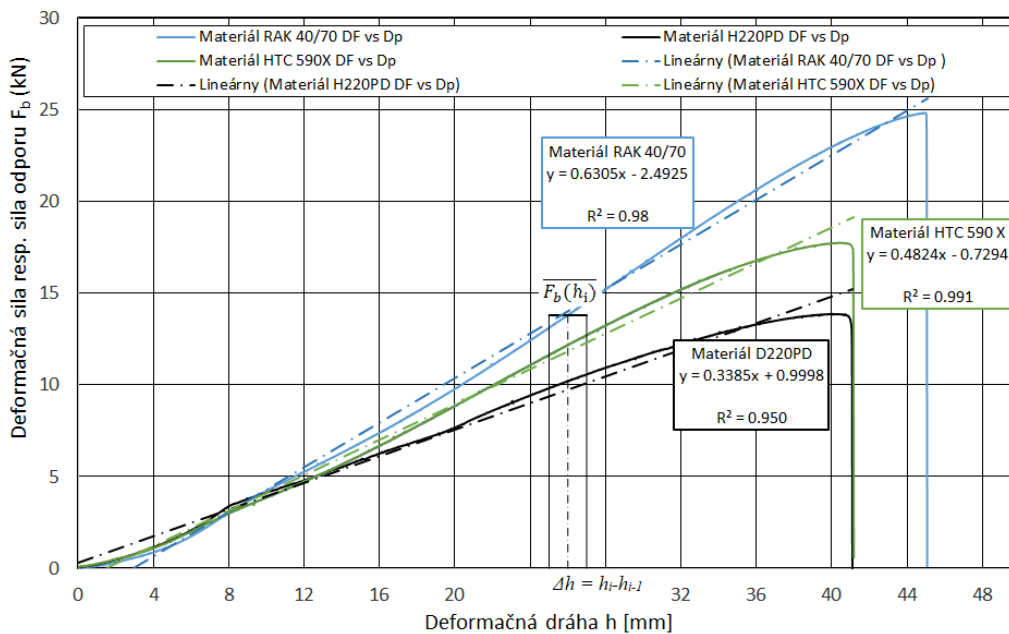
$$\frac{EA}{V_0} = \int_0^{\varphi_f} \sigma_{true} \cdot d\varphi = \int_0^{\varphi_f} K \cdot \varphi_{i,true,f}^n \cdot d\varphi =$$

$$= K \cdot \frac{[\varphi_{i,true,f}^{n+1} + 0,002^{n+1}]}{n+1}, \quad (8)$$

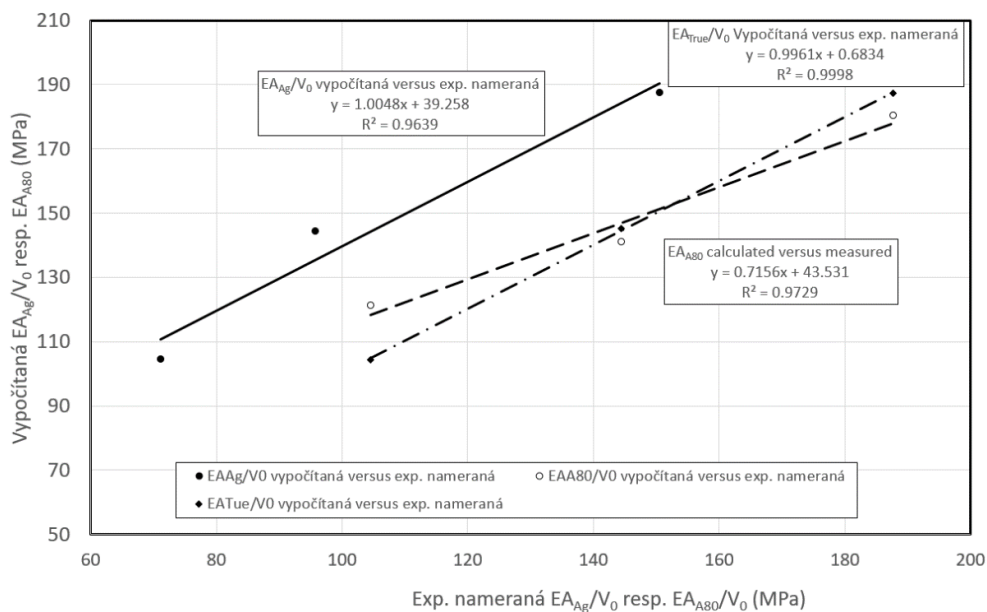
Zo vzťahu (8) a tab. 1 vyplýva, že veľmi vysoký potenciál absorpcie energie majú materiály s kombináciou vyšších hodnôt materiálovej konštanty (pevnosti), väčších deformácií do porušenia a vyšších hodnôt exponentov deformačného spevnenia. Z tab. 2 a obr. 3 vyplýva, že dvojfázová oceľ *HTC 590X* a oceľ s transformačne indukovanou plasticitou *TRIP RAK 40/70* vykazujú väčší absorpčný potenciál ako mikrolegovaná oceľ *H220PD*.

Výstuhy z dvojfázovej ocele *HTC 590X* vykázali väčší odpor proti deformácii o ~28 % a z ocele *TRIP RAK 40/70* ~76 % v porovnaní s mikrolegovanou oceľou *H220HD*. Tieto ocele je vhodné použiť pri stavbe karosérie pre nárazníky, priečne nosníky, výstuhy dverí a strechy, *B* stĺpiky a pod., ktoré sú pri kolízii namáhané ohybovou silou.

Zvlášť pri bočnom náraze výstuhy dverí, *B* stĺpik spolu s ďalšími dielmi karosérie rozptyľujú energiu tak, aby zostal dostatočný priestor pre prežitie pasažierov pri náraze. Tento priestor je daný tuhosťou dielov, resp. celej bočnej konštrukcie karosérie pri zaťažení ohybovou v oblasti plastickej deformácie. Tuhosť dielov CS_{pb} alebo celej deformačnej štruktúry je možné vyjadriť pomerom



Obr. 4. Záznam ohybovej sily od dráhy



Obr. 5. Závislosť deformačnej práce vypočítanej na základe regresných modulov od nameraných hodnôt deformačnej práce

maximálnej ohybovej sily $F_{b,max}$ a hĺbkou vniknutia h resp. dráhou telesa (9):

$$CS_{pb} = \frac{F_{B_{max}}}{h_{max}}, \quad (9)$$

obr. 4 a tab. 3. Smernica preloženej priamky znázorňuje tuhosť materiálu - $CS_{b,reg}$. Hodnoty koeficientov tuhosti jednotlivých materiálov boli vypočítané pomocou vzťahu (9) a regresnou analýzou, že čím je vyššia tuhosť deformačnej zóny, tým je väčšia sila odporu voči deformácii. Tuhosť výstuhu $CS_{reg., pb}$ pri aplikácii *HTC 590X* vzrástla o 34 % a pri aplikácii *TRIP RAK 40/70* vzrástla o 68 % v porovnaní s mikrolegovanou oceľou *P220HD*. V prípade havárie by absorpcia energie mala byť taká, aby sa znížilo riziko zranenie cestujúcich na prijateľnú úroveň. Pri kolíznych situáciách vyššie úrovne spomalenia spôsobujú vyššie riziko prekročenia biomechanickým limitov, t. j. preťaženie $\approx 20g$ [11].

Zmenu preťaženia pri kolíznej situácie pri zámene materiálu je možné vyjadriť v podmienky rovnováhy energie vozidla o hmotnosti m pri rovnomernom zrýchlení (spomalení) a vykoná prácu:

$$WK = F \cdot h = m \cdot a \cdot h, \quad (10)$$

ktorá je absorbovaná deformačným členom:

$$EA_{bt} = \int_0^{h_{max}} F_b \cdot dh. \quad (11)$$

Predpokladáme, že pri namáhaní deformačného člena ohybovou silou je závislosť deformačnej sily (sily deformačného odpor) na dráhe lineárna, potom EA_{bt} bude:

$$EA_{bt} = \frac{F_b \cdot h_{max}}{2}. \quad (12)$$

Ak si z rovnice (9) vyjadríme silu odporu F_b ako funkciu tuhosti dielu resp. deformačnej štruktúry a dosadíme do podmienky rovnováhy energií:

$$WK = EA_{bt}, \quad (13)$$

potom po úprave dostaneme:

$$a = \frac{c_{psb} \cdot h_{max}}{m}. \quad (14)$$

Efekt inovácie zámene materiálu *H220PD* materiálom *HTC590X* alebo *RAK40/70* je možné vyjadriť indexom zmeny spomalenia I_a nasledovne:

$$I_a = \frac{a_i}{a_{ref}}. \quad (15)$$

Potom po dosadení spomalenia za jednotlivé materiály dostaneme:

$$I_{a, HTC590} = \frac{c_{psb, HTC590X}}{c_{psb, HD220PD}} = \frac{0,482}{0,361} = 1,33, \quad (15)$$

$$I_{a, HTC590} = \frac{c_{psb, RAK 40/70}}{c_{psb, HD220PD}} = \frac{0,607}{0,361} = 1,68. \quad (16)$$

ZÁVER

Na základe analýzy skúmaných materiálov je možné konštatovať:

- pre predikciu absorpčnej schopnosti materiálov na základe výsledkov ťahovej skúšky odporúčame používať regresný model stanovený zo závislosti skutočného napätia na deformácii, pretože tento model vykazoval až 99.98 % zhodu medzi nameranými a vypočítanými hodnotami EA ,
- celková absorpčná schopnosť, tuhosť majú silnú koreláciu s materiálovou konštantou K a exponent deformačného spevnenia n ,
- na základe vyššie uvedených experimentov môžeme predpovedať, že výstuhu z materiálu *HTC 590X* a z *TRI RAK 40/70* ocele majú potenciál znížiť vniknutie do priestoru pre cestujúcich, pretože maximálna sila odporu proti deformácii, tuhosť aj absorbovaná energia pri skúške trojbodovým ohybom absorbovaním nárazovej energie v porovnaní s výstuhou z mikrolegovanej *H220PD* boli väčšie,
- získané výsledky naznačujú, že potenciál absorpcie energie majú materiály s kombináciou vyšších hodnôt materiálovej konštanty (pevnosti), väčších deformácii do porušenia a vyšších hodnôt exponentov deformačného spevnenia.

PodĎakovanie

Príspevok bol realizovaný v rámci grantového projektu VEGA 1/0238/23 Implementácia CAx systémov a techník virtuálneho inžinierstva pri redizajne dielov deformačných zón karosérie automobilov.

LITERATÚRA

- [1] YOON, T. - KIM, H. - HEO, C. (2016): *An experiment and FE simulation for the development of a SPFC1180 AHSS one-body door impact beam about a car side impact collision*. In: Int. J. Precis. Eng. Manuf. 17–1, pp. 81–89.
- [2] BILLUR, E. - ALTAN, T. (2010): *Challenges in Forming Advanced High Strength Steels*. In: Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing (ERC/NSM), 9, pp.2-7.
- [3] KIRAN MORE, C. - GIRISH PATIL, M. - AKASH BELKHEDE, A. (2020): *Design and analysis of side door intrusion beam for automotive safety*. In: Thin-Walled Structures, 153, 106788.

- [4] BEER, F. - JOHNSTON, R. - DEWOLF, J.-MAZUREK, D. (2020): *Mechanics of Materials*. New York. 8th Edition. McGraw-Hill.
- [5] BOUAZIZ, O. - HATEM ZUROB, H. - HUANG, M. (2013): *Driving Force and Logic of Development of Advanced High Strength Steels for Automotive Applications*. In: *Steel research international* [online], n/a-n/a [cit. 2018-02-19]. DOI: 10.1002/srin.201200288. ISSN 16113683. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/srin.201200288>.
- [6] XU, P. et al. (2016): *Crash performance and multi-objective optimization of a gradual energy absorbing structure for subway vehicles*. In: *Int J Mech Sci*. 107, 1–12.
- [7] BAROUTAJI, A. - SAJJIA, M. - OLABI, A.G. (2017): *On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: recent advances and future developments*. In: *Thin-Walled Struct*. 118, 137–163.
- [8] MORAVEC, J. - GRYC, K. (2021): *Forming and Heat Treatment of Modern Metallic Materials*. In: *Metals*, 11, 1106. <https://doi.org/10.3390/met11071106>.
- [9] ČADA, R. (2001): *Tvářitelnost ocelových plechu*. 1st ed.; Ostrava: Repronis, Česko, pp. 345.
- [10] ČADA, R. (1997): *Formability of deep-drawing steel sheets*. In: *EUROMAT 97*, Apr.21-23, Maastricht, Netherlands, p. 463-466.
- [11] VLK, F. (2000): *Karosérie motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 243s.

Koncepcia, bezpečnosť a súvisiaci priemyselný výskum náhrady dieselového pohonu za pohon s vodíkovým palivovým článkom v diesel motorových jednotkách radu 861

Pavol Šťastniak, Ing., PhD.*

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline.

Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

E-mail: juraj.gerlici@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2562.

Juraj Gerlici, prof. Dr. Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline.

Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

E-mail: juraj.gerlici@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2550.

Dušan Cesnek, Ing.

ŽOS Vrútky a.s.,

Dielenská Kružná 2, 038 61 Vrútky.

E-mail: cesnekdu@zos-vrutky.sk

Peter Golian, Ing.

Železničná spoločnosť Slovensko, a. s.,

Rožňavská 1, 832 72 Bratislava 3.

E-mail: golian.peter@slovakrail.sk

Concept, safety and related industrial research for the replacement of diesel traction by hydrogen fuel cell traction in the railway vehicles series 861

Abstract: The subject of the research is the development of a technical feasibility study that will deal with the concept, safety and related industrial research for the replacement of diesel traction by hydrogen fuel cell traction in the railway vehicles series 861. Part of the research is also the operation of such a source of traction, the assessment and evaluation of risks, especially from the point of view of maintenance and operation. The research result will be a technical study based on numerical simulations of static and dynamic loads, energy management of the fuel cell traction and requirements for the inclusion of such vehicles in regular operation on non-electrified tracks of the *Slovak Republic*.

Keywords: railway vehicle, research and development, operation safety.

ÚVOD

Výskum je orientovaný na vytvorenie podmienok pre aplikáciu environmentálne ohľaduplných vodíkových technológií do prevádzky železničnej osobnej dopravy SR, čo významným spôsobom prispeje k naplneniu strategických cieľov *Európskej únie* a v rámci toho i *Slovenskej republiky* v oblasti zabezpečenia poklesu skleníkových plynov o 55 %, t. j. približne 11 mil. ton ročne, do roku 2030 v porovnaní s východiskovým rokom 1990 a dosiahnutia uhlíkovej neutrality do roku 2050. Jeden z možných prístupov smerujúcich k úspešnému

prispeniu plánovaného zníženia emisií skleníkových plynov v oblasti železničnej dopravy predstavuje úplná elektrifikácia železničných tratí do roku 2050 a výmena všetkých prevádzkovaných železničných koľajových vozidiel s dieselovým pohonom (vrátane posunovacích lokomotív) za vozidlá závislej trakcie využívajúce elektrický pohon. Vzhľadom na veľký podiel neelektrifikovaných železničných tratí v SR je tento náročný cieľ úplnej elektrifikácie v stanovenom disponibilnom období do roku 2050 prakticky nerealizovateľný. Pri súčasnej dĺžke 1992,5 km neelektrifikovaných železničných tratí by bolo

nevyhnutné v pomerne krátkom období počas 29 rokov elektrifikovať ročne približne 69 km, z ktorých veľký podiel predstavujú regionálne trate. To je mimoriadne náročná a ťažko uskutočniteľná úloha. Pritom investície do elektrifikácie a potrebnej obnovy niektorých regionálnych tratí nie sú dostatočne návratné z dôvodov ich relatívne nízkeho prevádzkového využitia v kombinácii s veľkými investičnými nákladmi na samotnú elektrifikáciu a udržiavanie tratí. Podľa expertných odhadov odborníkov na železničnú infraštruktúru predstavuje v súčasnom období elektrifikácia 1 km železničnej trate priemerné náklady v rozmedzí 1,0 ÷ 1,5 mil. Eur (v závislosti od technických parametrov a potrebného rozsahu rekonštrukcie trate, prispôsobenia/modernizácie potrebnej zabezpečovacej a oznamovacej techniky a pod.), čo je investične veľmi náročné. Úplná elektrifikácia železničných tratí SR by tak dosahovala predpokladané náklady v rozsahu približne 2 ÷ 3 mld. Eur. Problematickou sa v uvedenom časovom limite javí i disponibilná technická či dodávateľská kapacita pre výkon stavebných prác v procese elektrifikácie.

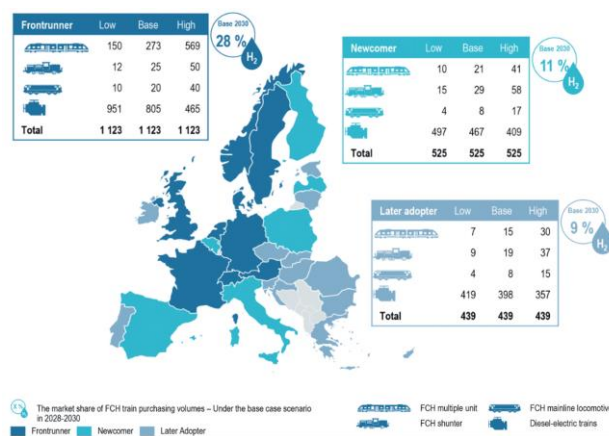
Z dôvodu prijatia ambiciózneho plánu EÚ a tiež SR redukcie skleníkových plynov a dosiahnutia uhlíkovej neutrality do roku 2050, vznikla požiadavka urýchleného nasadenia H₂ pohonu v regionálnej osobnej koľajovej doprave vo väčšom rozsahu. Potreba je determinovaná ekonomikou prevádzky a tiež z dôvodu údržby kritickej masy koľajových vozidiel. Preto je potreba najneskôr do roku 2030 zabezpečiť trakčnými jednotkami aspoň trať Nové Zámky - Prievidza v počte 12 kusov. Celkovo ZSSK prevádzkuje 230 ks diesel-motorových jednotiek (DMJ), z toho 53 radu 861, ktoré sú z dlhodobého hľadiska najperspektívnejšie. Na obr. 1 je ukážka v súčasnosti používanej DMJ radu 861.



Obr. 1. V súčasnosti používaná DMJ radu 861

Prijatím Európskej vodíkovej stratégie schválenej EK [1] dňa 8.7.2020 aj SR začala prípravou svojej stratégie využívania vodíka ako energetického nosiča, a to na konferencii konanej dňa 16.7.2020 [2] v Bratislave, ktorú organizovalo MH SR. V júni 2021 bola schválená Národná vodíková stratégia a následne sa začal pripravovať jej akčný plán. Súčasťou oboch dokumentov je aj nasadenie

osobných regionálnych vlakov s pohonom pomocou palivových článkov (FCHMU). ZSSK a.s bola členom konzorcia H2MUCTYNIC, v rámci ktorého bol vytvorený projektový zámer na inštaláciu 50 MW účelových obnoviteľných zdrojov energie na podporu prevádzky 20 MW elektrolyzéra v obci Močenok. Zariadenie sa bude používať na produkciu bez uhlíkového zeleného vodíku, ktorý nahradí fosilné palivá. Pomer produkovaného vodíka bude určený na použitie v doprave s cieľom demonštrovať technickú a obchodnú uskutočniteľnosť vodíkových čerpacích staníc a elektrických vozidiel s palivovými článkami. Štúdia s nasadzovaním vodíkoveho pohonu v železničnej doprave do roku 2030 v EÚ je uvedená v [3]. Predpokladané využitie v jednotlivých krajinách je zobrazené na obr. 2.



Obr. 2. Predpokladané využitie „vodíkových vlakov“ v jednotlivých krajinách EÚ

2 MIERA ORIGINÁLNOSTI A INOVATÍVNOSTI VÝSKUMU

Výskum je realizovaný v čase, kedy nie je v bežnej pravidelnej komerčnej prevádzke žiadna trakčná jednotka s pohonom na báze vodíkových palivových článkov s pôvodne inštalovaným hydrostatickým meničom a náhonom nápravy pomocou kardanového hriadeľa, ako je to v prípade DMJ 861 s dieselovým pohonom. Rozsiahle testovanie v komerčnej prevádzke prebehlo s dvoma jednotkami FCHMU v Dolnom Sasku a trojmesačné testovanie rovnakých jednotiek v Rakúsku ich operátorom OBB. Treba však zdôrazniť, že pilotné projekty uvedenia takýchto vlakov prebiehajú v rámci každého väčšieho členského štátu EÚ a každý relevantný výrobca a prevádzkovateľ koľajových vozidiel sa na prechod pripravuje z dôvodu mimoriadne ambiciózných záväzkov vyplývajúcich z Parížskej dohody a následných politik Green Deal. Predpokladáme, že jednotlivé riešenia sa budú líšiť v detailoch, avšak aj tieto môžu znamenať v prípade úspešného a rýchleho zvládnutia mimoriadnu konkurenčnú výhodu. Preto riešenie problematiku považujeme za vysoko aktuálnu, inovatívnu a vzhľadom na unikátnu konštrukciu DMJ 861 aj originálnu.

Dôvodom realizácie navrhovaného výskumu je predovšetkým celospoločenská naliehavosť žiaduceho zníženia škodlivých emisií skleníkových plynov vznikajúcich pri prevádzke železničnej osobnej dopravy a postupne do roku 2050 cieľovo dekarbonizácia jej prevádzky. Príspevok realizácie výskumu k naplneniu tejto náročnej výzvy predstavuje aplikácia technológií vodíkoveho pohonu do vlakových jednotiek, ktoré by mali postupne nahrádzať v súčasnom období využívaný dieselový pohon vo vlakoch prevádzkovaných na neelektrifikovaných železničných tratiach SR. Cieľovo by mali byť vodíkove vlakové jednotky využívané v prevádzke regionálnej železničnej osobnej dopravy v SR, nahradiť vlakové súpravy s dieselovým pohonom na nezávislej železničnej infraštruktúre. Popri významnom príspevku k naplneniu náročného cieľa dosiahnutia uhlíkovej neutrality a k poklesu negatívnych dopadov na životné prostredie, by mali zároveň prispieť aj k zlepšeniu podmienok pre žiaduci rast mobility obyvateľstva, k skvalitneniu ponuky komfortnej, rýchlej, bezpečnej a spoľahlivej prepravy osôb železnicou na úrovni 21. storočia a v dôsledku toho i k rastu počtu cestujúcich železničnou osobnou dopravou. To by sa premietlo aj do posilnenia konkurencieschopnosti environmentálne ohľaduplnej železničnej osobnej dopravy predovšetkým voči individuálnej automobilovej doprave.

Ako primárny zdroj paliva, ktorý bude poháňať trakčné jednotky rady 861 bude zelený vodík, ktorý sa vyrába elektrolýzou vody s použitím elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov. Emisie na výrobu takéhoto vodíku sú nulové, no v súčasnosti 96 % vodíka pochádza z fosílnych palív. Prínosom výskumu bude veľký krok k postupnému budovaniu vodíkovej infraštruktúry na Slovensku a zároveň motivácia výrobcov produkovať ekologicky hodnotný zelený vodík. Len prostredníctvom zabezpečenia trvalej a stabilnej spotreby zeleného vodíka sa môže vytvoriť potrebný hodnotový reťazec relevantného priemyslu a služieb. Železničná doprava v regióne bez elektrifikácie takúto spotrebu zabezpečuje.

3 SPÔSOB REALIZÁCIE

3.1 Návrh a overenie koncepcie výmeny pohonu z dieselového na elektrický s vodíkovými palivovými článkami prostredníctvom numerických simulačných analýz pre existujúce DMJ r. 861 - nezávislý výskum a vývoj

Na základe návrhov, ktoré postupne vyplynú z realizácie, budú konštrukcie overené prostredníctvom vhodných softvérových simulačných nástrojov. Budú vyhodnotené konštrukčné riešenia vo viacerých

variantoch. Simulované budú predovšetkým pevnostné namáhania zmenenej konštrukcie v porovnaní s pôvodným riešením DMJ 861, analýzy zmeny dynamiky (jazdných vlastností), návrh efektívnej kombinácie zdroja energie na báze vodíka s vhodným akumulátorom elektrickej energie, úlohy multikriteriálnej analýzy, teda kombinácie energetických, zástavbových a ekonomických kritérií.

Táto časť výskumu je náročná nielen z pohľadu objemu prác, ale najmä presná špecifikácia parametrov a faktorov, ktoré sa v reálnej prevádzke objavujú. Počas tejto fázy sa simulačnými analýzami overí celkový koncept zmeny pohonu trakčnej jednotky a jeho vplyv na základné statické a dynamické charakteristiky navrhovaného riešenia. Mimoriadny dôraz sa bude klásť na zmeny hmotnostných parametrov, účinnosti reostatických bŕzd, zmeny ťažiska a štrukturálne vlastnosti. Osobitnú pozornosť bude vyžadovať overenie konštrukčných úprav v časti strechy jednotky z dôvodu umiestnenia palivových článkov a nádrží stlačeného vodíka na nej. Taktiež budú simulované a počítané energetické bilancie v pomerne širokom pásme prevádzkových režimov.

3.2 Konštrukčný a parametrický návrh výmeny dieselového pohonu za elektrický s vodíkovými palivovými článkami v existujúcich DMJ r. 861 – priemyselný výskum

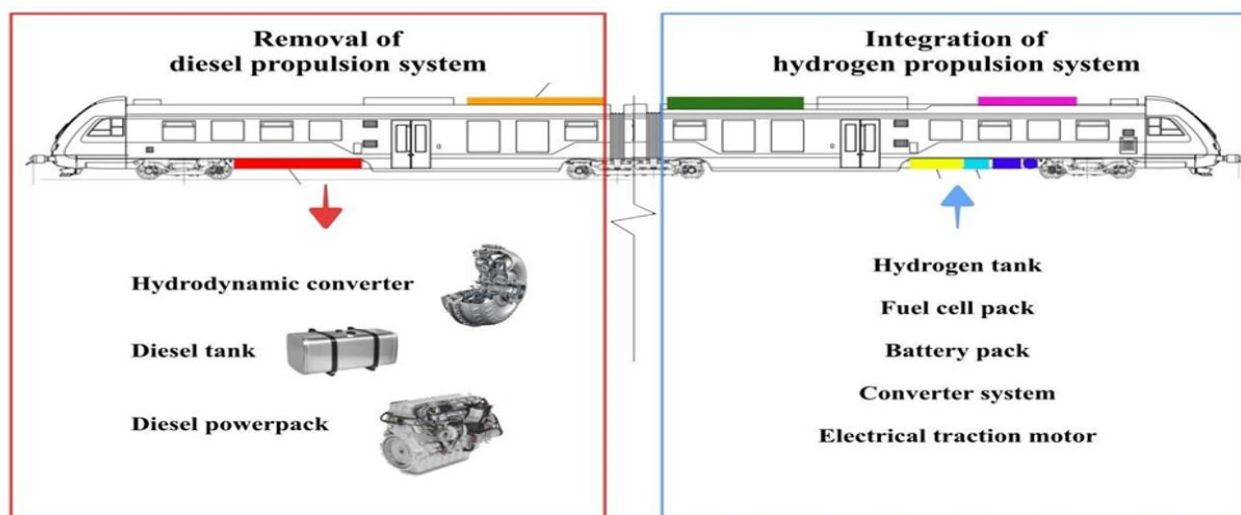
Na základe údajov z prevádzky vznikne parametrizovaný koncept zmeny pohonu DMJ 861 na pohon s vodíkovými palivovými článkami. Samotná koncepcia riešenia je vo svojej podstate hybridná. Hlavným zdrojom elektrickej energie sú palivové články umiestnené na streche trakčnej jednotky a batérie slúžia ako zdroj na rozbeh chemickej reakcie v článkoch a tiež na rekuperáciu energie počas brzdenia a tiež ako zdroj špičkového výkonu pri zrýchľovaní vlaku. V rámci tejto časti sa budú na základe predchádzajúcich analýz voliť konkrétne riešenia a umiestnenie jednotlivých uzlov nového pohonu. Bude treba vhodnými softvérovými prostriedkami navrhnuť výkonové a rozmerové parametre uzlov. Taktiež je potreba skúmať kompatibilitu jednotlivých uzlov a to najmä:

- Trakčného motora.
- Reostatického brzdneho systému.
- Jednosmerného meniča (DC/DC menič).
- Batériového bloku.
- Dodatočného meniča aj s elektronickým riadením pohonu.
- Bloku palivových článkov.
- Vodíkových zásobníkov (35 MPa).

Významný podiel na výskumných aktivitách bude venovaný energetickému manažmentu pohonnej sústavy v reťazci trakčný motor-batéria-palivový článok-reostatické brzdy-chladienie/ohrev.

V bežnej pravidelnej komerčnej prevádzke nie je žiadna trakčná jednotka s pohonom na báze vodíkových palivových článkov s pôvodne inštalovaným hydrostatickým meničom a náhonom nápravy pomocou kardanového hriadeľa ako je to v prípade *DMJ 861* s dieselovým pohonom.

nadväznej infraštruktúre. Analyzovať sa budú všetky svetové zdroje. Zabezpečenie týchto údajov bude zo strany ZSSK mimoriadne náročné a bude vyžadovať zapojenie množstva útvarov a najmä prevádzkových pracovníkov v regiónoch. Na zabezpečenie dostatku relevantných údajov z tratí budú zapojení aj rušňovodiči, ktorí budú vybavení špeciálnym *GPS* zariadením s akcelerometrami a ďalšími snímačmi, ktoré budú zbierať všetky potrebné informácie z neelektrifikovaných tratí nielen čo sa týka profilu, ale



Obr. 3. Schematický návrh výmeny pohonu *DMJ 861*

3.3 Priemyselný výskum prevádzkových požiadaviek operátora FCHMU z pohľadu spoľahlivosti, bezpečnosti a údržby - priemyselný výskum

Významným okruhom výskumu s dopadom na výstupy a ciele celého výskumu budú otázky spojené s bezpečnosťou prevádzkovania systému pohonu s vodíkovými palivovými článkami, posudzovanie a hodnotenie rizík a to najmä z pohľadu výroby, údržby a prevádzky. Musia byť identifikované a následne preskúmané všetky nové technické a bezpečnostné riziká/štandardy a požiadavky nielen na produkt, ale aj na personál, a to v celosvetovom meradle samozrejme s dôrazom na EÚ. V prípade identifikácie chýbajúcich štandardov navrhnuť riešenia pre technickú prax v rámci SR.

Bohatým zdrojom analytických dát budú priebežné výsledky už spomínaného projektu *FCH2RAIL*, v rámci ktorého sú niektoré pracovné balíky venované práve analýzám zozbieraných z tratí všetkých relevantných európskych operátorov. Taktiež budú poskytnuté technické dáta overených pohonných sústav s palivovými článkami. V rámci pracovného balíka tohto výskumu venovaného otázkam bezpečnosti, výroby, údržby a prevádzky sa budú analyzovať všetky dostupné normy, štandardy a smernice súvisiace s používaním vodíka v doprave a

najmä reálneho správania sa *DMJ* na trati počas roka.

4 PREDPOKLADANÉ VÝSLEDKY A VÝSTUPY

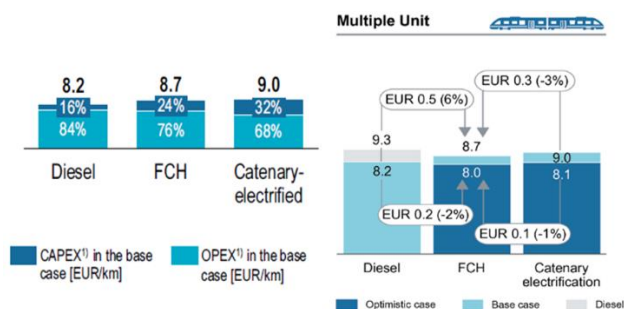
4.1 Spôsob a miera využiteľnosti deklarovaných výsledkov

ZSSK je prevádzkovateľom (užívateľom) *DMJ* jednotiek r. 681 v počte 53 ks a je jeho záujmom konvertovať túto flotilu na pohon bez uhlíkovej stopy. Samozrejme aj pri nákupe ďalších nových jednotiek bude obstarávať riešenia znižujúce celkový dopad produkcie *CO2* na životné prostredie. Pre spolu riešiteľskú organizáciu *ŽOS Vrútky*, ako výrobcu *DMJ* r. 861, je dopad zavedenia výroby a retrofitu dieselových jednotiek na vodíkový pohon mimoriadne významný. Ako každý z výrobcov si uvedomuje nevyhnutnosť ponúkať ekologické varianty svojich produktov z dôvodu neustále sa sprísňujúcej legislatívy a tiež celkového vnímania zákazníkov a cestujúcej verejnosti. Výrobca po zvládnutí technológie bude schopný umiestňovať svoje inovované produkty nielen v SR ale samozrejme aj na trhoch celej Európy. Tomu však bude ešte predchádzať pomerne náročná homologizácia produktu. Preto je nevyhnutné začať s riešením čo najskôr. Využitie výsledkov v oblasti výskumu v oblasti prevádzkovej bezpečnosti vodíkovej

technológie v koľajovej technike je taktiež zrejme a najmä vysoko aktuálne nielen pre prevádzkovateľov, ale aj výrobcov a údržbárske podniky. Všetky takto získané výstupy budú slúžiť ako vstupy do legislatívneho a normalizačného procesu v rámci SR a v nadväznosti na medzinárodnú štandardizáciu.

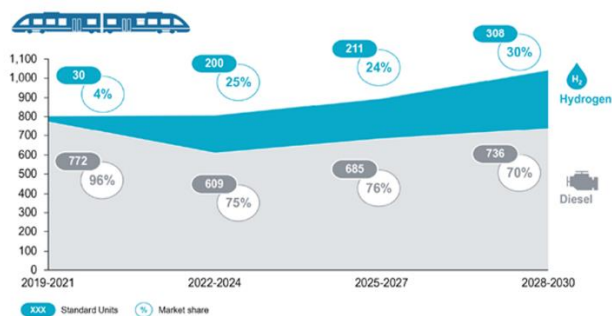
4.1 Ekonomický a environmentálny prínos

Výsledky spoločnej štúdie *Európskych výskumných partnerstiev Shift2Rail a FCH JU* ukazujú TCO parameter (*Total Cost of Ownership*) teda náklady na obstaranie a prevádzku trakčných jednotiek s dieselovým, vodíkovým a tiež trolejovým vedením. Jednotlivé podiely sú zobrazené na obr. 4 - Podiel obstarávacích a prevádzkových nákladov pre vybrané trakčné jednotky.



Obr. 4. Podiel obstarávacích a prevádzkových nákladov pre vybrané trakčné jednotky

Z uvedeného grafu je zrejme, že stále v prospech dieselového pohonu hrá nižšia obstarávací cena vlakov (CAPEX), kdežto prevádzkové náklady (OPEX) sú už dnes nižšie pre vodíkové vlaky. Elektrifikácia sa v tomto smere javí ako najnáročnejšia z pohľadu CAPEX. Táto štúdia predpokladá aj dva ekonomické scenáre TCO, základný a optimistický v závislosti na vývoji ceny nafty. Mohutným nástupom výskumu a vývoja vodíkových technológií ale najmä jeho masívnym dotovaním v programoch EÚ možno v krátkom čase očakávať významné zníženie CAPEX a teda rýchle nástup dostupnosti aj z pohľadu ekonomiky.

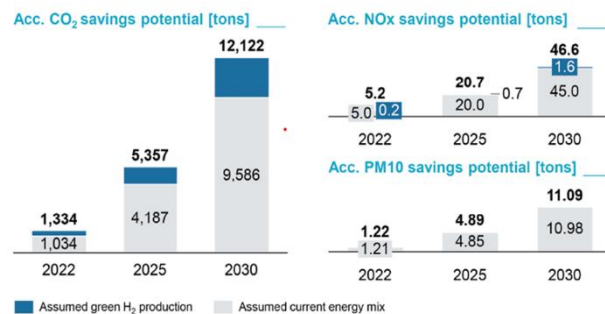


Obr. 5. Trhový potenciál FCH jednotiek do roku 2030

Pre výrobcu je podstatný trhový potenciál potreby FCH jednotiek v základnom scenári s výhľadom do roku 2030 zobrazený na obr. 5 - Trhový potenciál FCH jednotiek do roku 2030. Z takto popísanej

predikcie trhového vývoja možno predpokladať výrazné zvýšenie konkurencieschopnosti výrobcu ŽOS Vrútky a tiež príspevok k exportnej výkonnosti SR. Je to jeden z najdôležitejších dopadov tohto výskumu, ktorý má nadväzné dopady na zamestnanosť a zvyšovanie pridanej hodnoty, pretože trakčné jednotky sú finálnym výrobkom.

Mimoriadne zaujímavé vychádzajú aj výsledky pri zisťovaní vplyvov na životné prostredie (obr. 6). Štúdia uvádza pilotnú prevádzku 4 súprav vodíkových vlakov s denným obbehom (podobne ako je to na trati *Prievidza-Nové Zámky*) vo Francúzku, ktoré má podobný energetický mix ako SR.



Obr. 6. Predpokladaný vplyv vodíkových vlakov na životné prostredie

Zavedením environmentálne ohľaduplných vodíkových technológií výskum výrazne prispeje k naplneniu strategických cieľov *Európskej únie* a dosiahnutiu uhlíkovej neutrality do roku 2050. Zníženie emisií bude predstavovať 6000 ton CO₂ na celú trať za jeden rok. Výskum *Univerzity v Göteborgu* vo Švédsku o vplyve vibrácií vlaku na zdravie preukázal zníženie hluku a vibrácií po nahradení dieselového pohonu vodíkovým, čo môže viesť k zlepšeniu zdravia cestujúcich, zamestnancov železníc a ľudí žijúcich v blízkosti železničných tratí.

ZÁVER

Cieľom výskumu je komplexné vypracovanie technickej štúdie uskutočniteľnosti, ktorá bude riešiť samotnú koncepciu, bezpečnosť a súvisiaci priemyselný výskum náhrady dieselového pohonu za pohon s vodíkovým palivovým článkom v diesel-motorových jednotkách radu 861. V rámci výskumu je zámer identifikovať konštrukčné skupiny existujúcich DMJ r. 861, ktoré budú takouto prestavbou dotknuté a definovať rozsah konštrukčných zmien. Zároveň je cieľom definovať komplex požadovaných technických parametrov jednotlivých uzlov nového pohonu. Budú špecifikované výkonové, dimenzionálne, pevnostné, dynamické a ostatné súvisiace parametre, ktoré budú uplatňované v prípade ich obstarávania pri realizácii v podmienkach výrobcu. Ďalším významným okruhom výskumu je bezpečnosť a prevádzkovanie takéhoto systému pohonu, posudzovanie a hodnotenie rizík a to najmä z

pohľadu výroby, údržby a prevádzky. Musia byť identifikované a následne preskúmané všetky nové technické a bezpečnostné riziká/štandardy. V prípade identifikácie chýbajúcich štandardov navrhnúť riešenia. Všetky tieto ciele a ich dosiahnutie sú nevyhnutnou podmienkou zvládnutia vývoja trakčnej jednotky s vodíkovým pohonom, ktorý sa bude následne realizovať vo veľkom konzorciu (*IPCEI* projekt). Výsledkom výskumu bude podrobná technická štúdia s numerickými simuláciami statických a dynamických zaťažení, energetický manažment pohonu a požiadavky na zaradenie takýchto súprav do riadnej prevádzky na trase *SR*.

Pod'akovanie

„Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Koncepcia, bezpečnosť a súvisiaci priemyselný výskum náhrady dieselového pohonu za pohon s vodíkovým palivovým článkom v diesel motorových jednotkách radu 861 (kód projektu v ITMS2014+: 313011BVC2), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.“

LITERATÚRA

- [1] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS (2020): [online], Dostupné na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&from=EN>.
- [2] VODÍKOVÁ BUDÚCNOSŤ SLOVENSKA (2023): [online], Dostupné na: <https://nvas.sk/sk/2020/07/19/vodikova-buducnost-slovenska/>.
- [3] EUROPEAN HYDROGEN WEEK (2021): [online], Dostupné na: https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Study%20on%20the%20use%20of%20fuel%20cells%20and%20hydrogen%20in%20the%20railway%20environment_final.pdf.

Dištančné vzdelávanie v technike

Dana Stančeková, doc. Ing., PhD.*

Katedra obrábania a výrobnjej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,

Univerzitná 1, 010 26 Žilina.

E-mail: dana.stancekova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2787

Distance learning in technology

Abstract: In connection with the current situation of distance education, a project was implemented within the operational program *Interreg V-A Slovak Republic - Czech Republic 2014-2020* to develop knowledge outside the teaching process under the title "Support of distance methods in technical education", application code *NFP304010AYI2*. The project is aimed at creating distance learning materials for improving the quality of education of students and academic staff, by introducing technical webinars and online lectures for education in technical fields with a high proportion of examples of practical engineering production. An important activity of the project is the solution of *CASE STUDIES* - technical tasks from industrial practice, which lead to mutual transfer of experience between students and teachers and also experts from practice. The focus of the project thus leads to contact of students with important employers from the *Moravian-Silesian* and *Žilina* regions and thus helps their future employment on the labor market.

Keywords: project, distance learning, labor market.



INTERREG V-A
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA
SPOLOČNE BEZ HRANÍC

V súvislosti so súčasnou situáciou dištančného vzdelávania bol realizovaný projekt v rámci operačného programu *Interreg V-A Slovenská republika - Česká republika 2014-2020* na rozvíjanie vedomostí mimo výučbový proces pod názvom „Podpora dištančných metód v tech-nickém vzdělávání - Distanční vzdělávání v technice“, kód žiadosti *NFP304010AYI2*.

Realizácia projektu sa začala 1.9.2021. Vedúci partner projektu: *Vysoká škola banská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojnícka, Katedra obrábania, montáže a strojárskej metrológie*, hlavný cezhraničný partner projektu: *Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra obrábania a výrobnjej techniky*.

Projekt je zameraný na vytváranie dištančných vzdelávacích podkladov pre skvalitnenie vzdelávania študentov a akademických pracovníkov, zavádzaním technických webinárov a on-line prednášok do vzdelávania v technických odboroch s vysokým podielom ukážok praktickej strojárskej výroby. Významnou aktivitou projektu je riešenie *CASE STUDIES* - technických úloh z priemyselnej praxe, ktoré vedú k vzájomnému odovzdávaniu skúseností medzi študentmi a pedagógmi a aj odborníkmi z praxe. Zameranie projektu tak vedie ku

kontakto študentov s významnými zamestnávateľmi z *Moravskosliezského* a *Žilinského* kraja a napomáha tak ich budúcemu uplatneniu na trhu práce.



VŠB - Technická univerzita Ostrava a *Žilinská univerzita v Žiline* spoločne reagujú na dlhodobý nedostatok kvalifikovaných absolventov na trhu práce strojárskej výroby a kontroly kvality súčastí. Súčasným riešením projektu reagujú na potreby firiem *Moravskosliezského* a *Žilinského* kraja. *Moravskosliezsky* aj *Žilinský* kraj majú dlhodobú priemyselnú tradíciu, napriek tomu uvedené kraje nemajú dostatok absolventov technických odborov s praktickými skúsenosťami. Stále viac firiem a výrobných spoločností má problémy s nedostatkom

vzdelaných a prakticky pripravených študentov v konkrétnych oblastiach strojárkeho, automobilového, či energetického priemyslu.

V rámci projektu, ktorý je zameraný na podporu dištančných metód v technickom vzdelávaní, boli navrhnuté na realizáciu kľúčové aktivity (cyklus webinárov, on-line prednášky odborníkov z praxe, *CASE STUDIES* z praxe). Na príprave a realizácii kľúčových aktivít sa podieľajú dva vytvorené tímy odborníkov, aby došlo k vzájomnému prepojeniu oboch zapojených vysokých škôl a tiež firiem z regiónu. Úzka spolupráca zapojených strán a previazanosť medzi jednotlivými kľúčovými aktivitami viedla k zapojeniu študentov a pedagógov oboch vysokých škôl do realizácie spoločných aktivít a riešení úloh *CASE STUDIES*. Tieto aktivity mali za úlohu priblížiť cieľovej skupine reálne úlohy riešené v strojárkej praxi, zapojiť študentov a pedagogický personál do ich riešení, nadviazať priamy kontakt s významnými zamestnávateľmi v *slovensko-českom* pohraničí. Viac na <http://interovazil.vsb.cz/>.

AKTIVITY

Cyklus technických webinárov

Cieľom aktivity bolo skvalitniť existujúcu výučbu vybraných technických predmetov na zapojených univerzitách o vybrané ucelené odborné témy odrážajúce moderné trendy v strojárkej výrobe, pre prezentáciu ktorých v zodpovedajúcom rozsahu v bežnej výučbe bohužiaľ nie je dostatočný priestor (vzhľadom k osnovám a šírke všetkých vyučovaných tém).



V rámci projektovej aktivity boli pripravené odborné technické webináre, zamerané na odborné témy v odboroch obrábania, 3D tlače, montáže a metrologie.

Case studies z priemyselnej praxe

Aktivity *case studies* sú orientované na skvalitnenie výučby a praktickej pripravenosti študentov, a to formou riešenia praktických úloh vychádzajúcich zo zadania priemyselnej praxe. Počas tejto aktivity budú vytipovaný a oslovený zástupcovia firiem a výrobných spoločností pôsobiach na území *Moravskosliezského kraja v ČR a Žilinského kraja v*

SR za účelom nadviazania spolupráce pri riešení aktuálnych technických a technologických problémov, s ktorými sa stretávajú vo výrobe.



On-line prednášky odborníkov z praxe

Cieľom aktivity bolo skvalitniť existujúcu výučbu vybraných technických predmetov na zapojených univerzitách o vybrané on-line prezentácie z výrobných a iných súvisiacich prevádzok odrážajúce moderné trendy v strojárkej praxi. V rámci projektovej aktivity pripravili špecialisti firiem a subjektov z podnikovej a výskumnej praxe spolupracujúci s partnermi projektu niekoľko on-line odborných prednášok.

VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA

FAKULTA
STROJNÍ

KATEDRA OBRÁBĚNÍ, MONTÁŽE
A STROJÍRENSKÉ METROLOGIE



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Katedra obrábania
a výrobnéj techniky

RECENZIA

Poučení o zručnosti hornické: o teorii a užití včetně pojednání a principech hornické kamenární vedy. Do češtiny preložil J. Hlávka. Originál napísal *Christoph Traugott Delius*. Pôvodný názov diela vydaného v roku 1773 vo Viedni je *Anleitung zu der Bergbaukunst nach ihrer Theorie und Ausübung nebst einer Abhandlung von den Grundsätzen der Berg-Kammeralwissenschaft, Academia Praha 2012, ISBN 978-80-200-2106-9*. Počet strán 668, 24 celostránkových príloh.

Toto rozsiahle dielo je venované cisárovnjej *M. Terézii*. Obsah knihy je značne rozsiahly a autor preberá postupne tieto oblasti: Prvá časť *Popis horského masívu* (dve kapitoly ktoré majú 153 §).

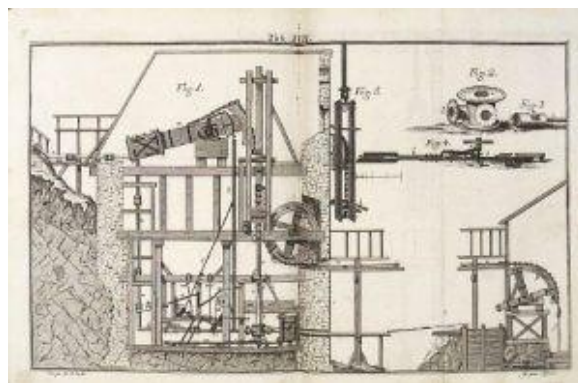
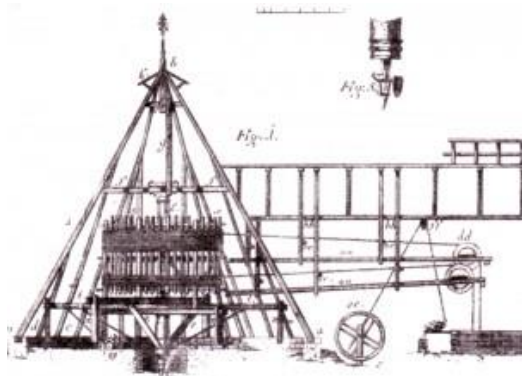
Druhá *O banských dielach* (desať kapitol ktoré majú 371 §).

Tretia časť *O úprave rudy na povrchu* (šesť kapitol ktoré majú 191 §).

Štvrtá časť *Banská ekonomika* (31 §).

Pojednanie o princípoch banskej kamenárnej vedy (67 §).

Pre nás je najpodnetnejšia časť *O banských dielach*, kde *Delius* preberá túto problematiku v kapitole 9 postupne takto: *O čerpaní banských vôd rôznymi strojmi*. Táto kapitola má šesť odstavcov: *Pumpy a ich sústavy, Vodné kolesá, Konské vodné kolesá, Ohňové stroje, Vodostlpcové stroje, Vzduchové stroje*. Všetky uvedené stroje sú zobrazené v texte knihy na prílohách.



Obr. 1. Ilustrácie z *Deliusovej knihy*

Zaujímavé je, čo *Delius* napísal v 66§ štvrtej časti: *Pokiaľ sú banické produkty vyrábané iba v takom množstve, ktoré postačujú pre potreby štátu, musí byť ich vývoz zakázaný. Mohol by vzniknúť problém a nepriaznivý nedostatok a potom by museli byť tieto produkty dovážané s omnoho vyššími nákladmi a za vyššiu cenu dovážaného tovaru zo zahraničia.*

V *Banskej Štiavnici* v rokoch 1790 - 1889 bolo vyprodukované 14 110 kg zlata, 656 580 kg striebra, 5 560 072 000 kg olova a 3 154 000 kg medi. Vyjadrené v peniazoch to bolo 91 miliónov zlatých dukátov.

Bane ležiace na terajšom území *Slovenska* boli organizačne zadené do:

1. *Dolnouhorského banského okrsku: Banská Štiavnica, Banská Belá, Kremnica, banská Bystrica, Lubietová, Nová Baňa, Pukanec.*
2. *Hornouhorského banského okrsku: Gelnica, Smolník, Rudník, Jasov, Rožňava, Spišská Nová Ves.*

Christoph Traugott Delius

1728 - 21. január 1779

Christoph Traugott Delius sa narodil v roku 1728 vo *Wallhausene* neďaleko *Erfurtu* v starej šľachtickej protestantskej rodine, ktorá v tridsaťročnej vojne prišla o svoje majetky. Po štúdiách na gymnáziách v *Quedlinburgu* a v *Magdeburgu* sa 17. marca 1749 zapísal na univerzitu vo *Wittenbergu*. Rozhodol sa pre matematiku a prírodné vedy, no kvôli nedostatku peňazí dočasne vstúpil do armády. Neskôr sa usadil vo *Viedni*, kde konvertoval na katolícku vieru. V roku 1751 odišiel do *Banskej Štiavnice*, aby tu študoval baníctvo, pričom mohol využiť aj svoje matematické vedomosti.

Svedomitá práca mu rýchlo priniesla úspech. V roku 1755 sa zúčastnil súťaže banských praktikantov, kde dostal vyznamenanie a získal jednu zlatú a dve strieborné medaily. *Ch.T. Delius* už počas štúdií prejavoval mimoriadne

nadanie nielen na pedagogickú, ale aj vedeckú prácu. V roku 1770 vyšlo jeho dielo *Abhandlung von dem Ursprunge der Gebirge (O vzniku hornín a rudných žíl)*. Podľa jeho názorov mali všetky horniny vznik len ako usadeniny z vody. *Ch. T. Delius* sa napriek mnohým omylom prejavil celkove ako technik a ako vedec s dobrým pozorovacím postrehom a v čiastkových otázkach so zmyslom pre zovšeobecnenie a pre závery. V roku 1756 dostal miesto banského merača v *Oravici v Banáte*. Od roku 1761 pôsobil na *Banskej akadémii v Banskej Štiavnici* najprv ako správca baní a od roku 1764 ako vrchný banský správca a člen banského kolégia. V roku 1770 ho panovníčka *Mária Terézia* povýšila na banského radcu a vymenovala ho za profesora na *Katedre baníctva Banskej akadémie v Banskej Štiavnici*. Túto katedru zriadili ako tretiu a jej zámerom bolo teoretické a praktické vyučovanie banského práva, banskej ekonomiky, lesníctva a baníctva. Zároveň sa stal cisárskym radcom a členom predsedníctva úradu komorného grófa. V roku 1772 ho povolali do *Viedne*, kde sa podieľal na zriaďovaní oddelenia baníctva a mincovníctva. Zároveň ho vymenovali za riadneho dvorného radcu pre otázky baníctva a mincovníctva. Ako profesor baníctva a banský radca *Ch. T. Delius* vyučoval baníctvo, banské právo, ekonomiku a štatistiku a kontroloval erárne bane. Podľa štatútu akadémie bol povinný vypracovať učebnicu predmetu, ktorý vyučoval. Vyzbrojený bohatými teoretickými i praktickými vedomosťami plnil všetky úlohy svedomito a zodpovedne. Vypracovaniu učebnice venoval mimoriadnu pozornosť. Táto učebnica vyšla v roku 1773 vo *Viedni*. Je to *Deliovo* najrozsiahlejšie a najvýznamnejšie dielo a na tie časy bolo na mimoriadne vysokej úrovni. V predhovore sa zaoberal vývojom baníctva a ťažkosťami pri prechode k podzemnému dobývaniu. Zdôraznil, že s rastúcou hĺbkou baní sa bude obohacovať aj geológia.

Po mimoriadne plodnom a náročnom živote sa pokúšal o zlepšenie svojho zdravotného stavu liečením. Na radu lekárov odišiel do *Talianska* k moru, kde mal zotrvať celý rok. Na ceste do *Pisy* však 21. januára 1779 vo *Florencii* zomrel.

JM

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, физических 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.2023.2>