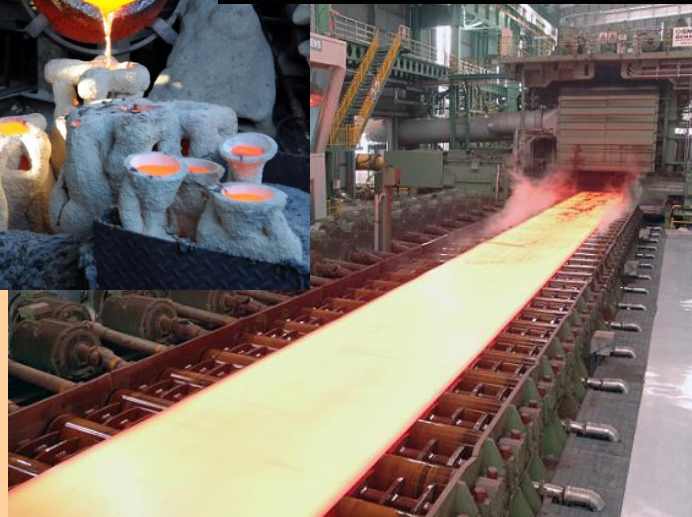
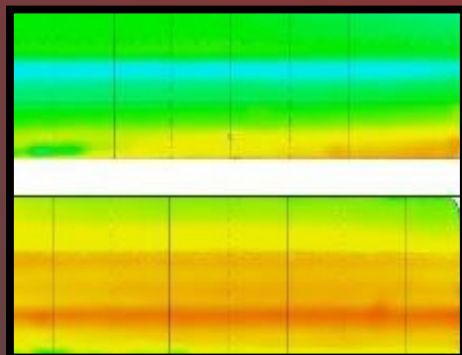
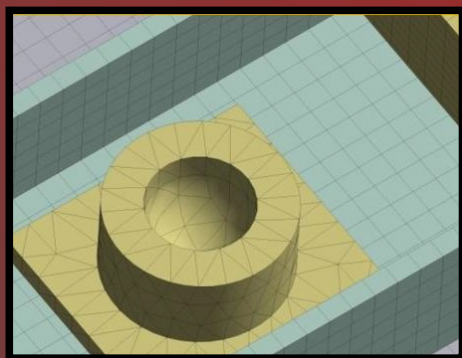
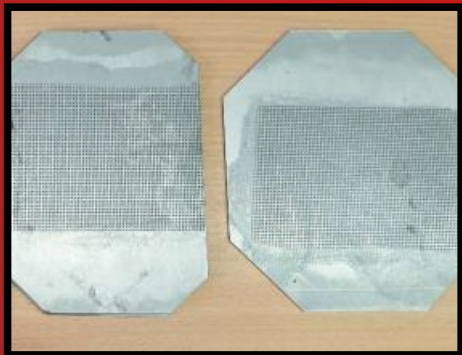




ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

Strojnícka
fakulta

TECHNOLÓG



Ročník 15
október 2023

3/2023

Magazin TECHNOLOG

Publiziert werden wissenschaftliche, fachliche und Forschungsbeiträge, theoretische Abhandlungen, Anleitungen, Studien, Rezensionen, Informationen über die Bearbeitung der technischen Materialien. Der Fokus liegt auf Beiträgen und Arbeiten, die sich mit den Fragen aus dem Gebiet der Span- und Spanlosen Technologien, der physikalischen Prinzipien der unkonventionellen Technologien, der technologischen Konstruktion der Werkzeuge, der wirtschaftlichen Seite des Herstellungsprozesses, der Ökologie, so wie der Abfallverwertung befassen. Genauso werden Beiträge über Maschinen, Werkzeuge, Vorrichtungen und Messtechnik für den Bereich der mechanischen Technologien, Untersuchungsergebnisse über die Informationstechnologie im technologischen Bereich publiziert. Des Weiterem werden Beiträge über die Geschichte und die Entwicklung der mechanischen Technologie veröffentlicht. Das Magazin TECHNOLOG publiziert Beiträge in folgenden Sprachen: Slowakisch, Tschechisch, Polnisch, Russisch, Englisch und Deutsch.

Alle Beiträge sind rezensiert und die Redaktion behält sich den Anspruch auf ihre Bearbeitung durch sie vor. Die Redaktion übernimmt keine Verantwortung für mögliche Schäden, die durch die Anwendung der Tätigkeiten, Methoden, Produkte, Ideen, Anleitungen etc. publiziert durch die Autoren der Beiträge verursacht werden.

Evidenznummer MK SR-2800/08.

ISSN 1337-8996

Adresse der Redaktion: Universität Žilina, Fakultät Maschinenbau, Univerzitná 1, 01026 Žilina

Telefon: +421 (0) 41-513 2764, 513 2814,

Fax: +421 (0) 41-513 1535

Email: jan.moravec@fstroj.uniza.sk

Журнал ТЕХНОЛОГ

Печатает научные, исследовательские, профессиональные, теоретические работы, инструкции, аналитические обзоры, рецензии, информации о переработке технических материалов. Направлен на печатание работ посвященных вопросам в области технологий обработки со стружкой и без, физикальных принципов нестандартных технологий, технологичности конструкции инструментов, экономики производственного процесса, экологизации, переработке отходов. Также публикует работы о машинах, инструментах, препаратах и измерительной технике для области механических технологий, результатов научных исследований в сфере информационных технологий в технологической области. Публикует статьи по истории и эволюции механических технологий. Журнал публикует статьи на языках: словацком, чешском, польском, русском, английском и немецком.

Все статьи рецензируются и редакция оставляет за собой право их редакционного корректирования. Редакция не несет никакой ответственности за возможные повреждения вызванные использованием операций, методов, продуктов, идей, инструкций и т.д. в опубликованных авторами статьях.

Регистрационный номер MK SR 2800 - /08.

ISSN 1337 – 8996

Адрес редакции: Žilinská univerzita, strojnica fakulta, Univerzitná 1, 01026 Žilina

Telefón: 041-513 2764, 513 2814

Fax: 041-513 1535

e-mail: jan.moravec@fstroj.uniza.sk

OBSAH	
ZOZNAM RECENZENTOV	4
EDITORIÁL	5
MICHELANGELO BUONARROTI	6
POROVNANIE CHARAKTERISTÍK TVÁRNITEĽNOSTI VYSOKOPEVNÝCH DVOJFÁZOVÝCH OCELÍ SKÚŠKOU ŤAHOM A LDH SKÚŠKOU	10
<i>Miroslav Tomáš, Julij Martyn Kulya, Vladimír Kokarda, Emil Evin</i>	
APLIKAČNÉ MOŽNOSTI HCCI TECHNOLOGIE	14
<i>Matúš Lavčák, Michal Puškár</i>	
OPOTREBOVANIE STRIŽNÍKOV V STRIHACOM NÁSTROJI	18
<i>Ján Moravec</i>	
MATEMATICKÝ MODEL POHONNEJ SÚSTAVY KOLAJOVÉHO VOZIDLA	21
<i>Ján Dižo, Miroslav Blatnický, Vadym Ishchuk, Denis Molnár, Sebastián Solčanský</i>	
STRATÉGIE FRÉZOVANIA TENKOSTENNÝCH KOMPONENTOV Z ŤAŽKOOBROBITEĽNÉHO MATERIÁLU	27
<i>Jakub Hrbál, Marek Vozár, Boris Pätoprstý, Ivan Buranský</i>	
VPLYV VYSOKEJ PREVÁDZKOVEJ TEPLoty NA FUNKČNOSŤ LOŽÍSK	33
<i>Elena Kantoríková</i>	
APLIKÁCIE DIFÚZIE V STROJÁRSKEJ VÝROBE	37
<i>Martin Jaššo, Richard Pastirčák</i>	
EVALUATION OF THE POSSIBILITIES OF USE OF INTERACTIVE TECHNOLOGY IN THE LABORATORY	43
<i>Vladimíra Biňasová, Peter Bubeník, Miroslav Rakyta, Marta Kasajová, Katarína Štaffenová</i>	
KONŠTRUKČNÝ NÁVRH RÁMU KORBY PRE JEDNONÁPRAVOVÝ PRÍVES ZA TRAKTOR	47
<i>Ján Dižo, Miroslav Blatnický, Vadym Ishchuk, Denis Molnár, Jakub Kurtulík</i>	
EVALUATION OF NEW TRENDS AND REASONS FOR ATTENDANCE ARTIFICIAL INTELLIGENCE AT THE OPERATIONAL LEVEL	53
<i>Vladimíra Biňasová, Peter Bubeník, Miroslav Rakyta, Marta Kasajová, Katarína Štaffenová</i>	
RECENZIA	57
<i>Ján Moravec</i>	
NEKROLÓG	58

ZOZNAM RECENZENTOV PRÍSPEVKOV

doc. Ing. **Dalibor BARTA**, PhD.
Ing. **Miloš BREZÁNI**, PhD.
doc. Ing. **Jozef BILÍK**, PhD.
Ing. **Vladimíra BIŇASOVÁ**, PhD., DiS.
doc. Ing. **Miroslav BLATNICKÝ**, PhD.
doc. Ing. **Ján DIŽO**, PhD.
doc. Ing. **Patrik GRZNÁR**, PhD.
prof. Ing. **Alyona LOVSKA**, Dr.Sc. Tech.
Ing. **Borislav MELO**, PhD.
doc. Ing. **Ján MORAVEC**, PhD.

EDITORIÁL

Motto: *“Negramotní v budúcnosti nebudú tí, ktorí nevedia čítať. Budú to tí, ktorí nevedia, ako sa učiť.”*

Alvin Toffler

Vážení autori, čitatelia a priaznivci, dostáva sa vám do rúk číslo 3 *Technológa* 2023. Publikované príspevky prinášajú (možno) nové riešenia, výsledky, resp. poznatky potrebné k riešeniu tej ktorej problematiky. Časopis ponúka už pätnásť rokov články z obrovského spektra sféry najmä strojárstva. Príspevky a potrebné informácie z publikovaných článkov vedeckého časopisu *Technológ* sa dajú pohodlne a ľahko vyhľadať aj v jeho elektronickej verzii. *Technológ* vychádza v tlačenej a elektronickej verzii. Týmto určite prišlo nesporne k skvalitneniu celého vydavateľského zámeru. Dôležitou snahou redakčného kolektívu je samozrejme kráčať s dobou a priniesť vylepšené publikácie pre čo najširšie spektrum záujemcov a čitateľov. Publikované príspevky sú podrobené odbornej kontrole a recenzované anonymne dvomi z uvedených recenzentov v každom konkrétnom čísle časopisu.

Všetkým prajem veľa zdravia a úspechov a verím, že náš časopis sa stane alebo už stal dôležitou súčasťou čitateľov a záujemcov pri ich odbornej práci.

Ján Moravec
šéfredaktor a editor



Michelangelo BUONARROTI (*6. marec 1475, *Caprese*
– †18. február 1564, *Rím*)

Michelagnuolo di Ludovico di Buonarroto Simoni alebo *Michelangelo Buonarroti* bol *taliansky* sochár, maliar, architekt a básnik, ktorého dielom vyvrcholila renesancia a začal sa barok. Je autorom freskovej výzdoby *Sixtínskej kaplnky* vo *Vatikáne* a slávnej mramorovej sochy *Dávida*.

Michelangelo svojim dielom predstihol nielen súdobých, ale aj antických majstrov. Svojim dielom vyjadril to, o čo sa usilovalo celé renesančné umenie. O jeho umeleckej genialite sa nepochybovalo v žiadnom období dejín umenia a jeho dielo bolo vzorom pre umelcov až do 18. storočia. Roky vzniku niektorých diel sú sporné.

Vybrané sochárske a maliarske diela

- *Maska Fauna* (socha, 1490)
- *Madona na schodoch a Zápas Kentaurov s Lapitmi* (reliéfy, *Florenca*, 1491-1492)
- *Pieta* (socha, *chrám sv. Petra, Vatikán*, 1498-1500)
- *Dávid* (mramorová socha, *Florenca*, 1501-1504)
- *Bronzová socha Dávida* (1502-1504? *Florenca*)
- *Bronzová socha Júlia II.* (socha, 1507-1508 (?))
- *Ukladanie do hrobu* (obraz, *Londýn, National Gallery*, 1511)
- *Sixtínska kaplnka* (fresky na stenách, *Vatikán*, 1509-1541)
- *mediciovské náhrobky v Kaplnke Mediciovcov* pri kostole *San Lorenzo*,
- *kamenné južné opevnenie Florencie* (architektúra, *Florenca*, asi okolo 1530)
- *Chrám sv. Petra* (vedúci stavby, *Vatikán*, 1546-1564)
- *Farneský palác (Palazzo Farnese)* (dokončenie, architektúra, *Rím*, 1546-1548)
- *mestská brána Porta Pia* (architektúra, *Rím*, 1561-1564).

Narodil sa v *Caprese* ako druhý z piatich synov *Florentána Lodovica di Leonardo Buonarroti* (v tej dobe starosta obcí *Chiusi* a *Caprese*) a *Francesky di Neri*. V roku jeho narodenia sa rodina presťahovala späť do *Florencie*.

Keď mal *Michelangelo* 6 rokov (1481), umrela mu matka a otec *Lodovico* žil celé štyri roky sám. *Michelangelo* bol v tejto dobe veľmi osamotený. Nevšimá si ho nikto, okrem starej matky a kamenárskej rodiny *Topolinovcov*, ktorí ho už ako malého chlapca naučili svojmu remeslu - práci s kameňom. Školu navštevoval *Michelangelo* vo *Florencii* a zaujímalo ho len kreslenie. Otcovi sa jeho rozhodnutie nepáčilo, nakoľko bolo umelecké povolanie podceňované a hanbil by sa za umelca v rodine. Po štyroch rokoch sa *Lodovico* znova oženil. Za manželku si vzal *Lucreziu da Gagliano*. *Michelangelo* sa v tejto dobe učil *latinčinu* a *gréčtinu*. V apríli roku 1488 ho *Michelangelov* priateľ, *Francesco Grancci*, priviedol do umeleckej dielne *Domenica Ghirlandaia*. *Michelangelov* otec nesúhlasil s tým, aby sa *Michelangelo* učil maľovať, chcel aby sa jeho syn stal obchodníkom, ale *Domenicovi Ghirlandaiovi* sa ho nakoniec podarilo presvedčiť. Učňov v dielni viedol *Sebastiano Mainardi*. *Michelangelo* podpísal zmluvu o svojom pôsobení v dielni. *Domenico* ho učil narábať s perom, miešať farby a

maľovať fresky. Mladý *Michelangelo* navštevoval kostoly a kreslil si podľa nástenných malieb *Giotta* a *Masaccia*, čo malo vplyv pre umelcov ďalší vývoj. K rozvoju nadania prispelo umelcove štúdium ľudského tela a až do neskorého veku sa venoval pitvaniu, čím získaval podrobné znalosti o skladbe ľudského tela a jeho proporciách.

Jedného dňa sa dostal *Michelangelo* do *Medicijského paláca s Mainardom*, ktorý mu ukázal novoobjaveného *Fauna* z čias antického *Grécka*. *Michelangelo* veľmi túžil začať pracovať s kameňom. V noci po svojej prvej návšteve paláca, keď od prežitých dojmov nemohol zaspáť, v *Sochárskej záhrade* vzal kus bieleho mramoru a začal z neho tesáť masku *Fauna*, na ktorej potom tajne pracoval tri noci. Keď *Lorenzo* videl *Michelangelovho Fauna*, dal si ho zavolať do paláca, povedal mu, že sa už dávno presvedčil o jeho veľkom sochárskom nadaní a na tom, že sa môže stať nástupcom umelcov *Orcagnu*, *Ghibertiho* a *Donatella*. Navrhol mu, aby ako člen rodiny býval v paláci. Dal si zavolať jeho otca, sľúbil mu, že sa o *Michelangela* postará a *Lodovicovi* zaobstaral miesto úradníka na colnici, o ktoré ho *Lodovico* požiadal. *Michelangelo* sa nasťahoval do *Medicejského paláca* a začal dostávať pravidelný plat, čo veľmi potešilo *Michelangelovho* otca. Po *Lorenzovej* smrti *Michelangelo* bez vyzvania odišiel z *Medicejského paláca* a vrátil sa do rodného domu. Po čase dostal ponuku od *Domenica Ghirlandaia*, aby sa vrátil do maliarskeho cechu. *Michelangelo* túto ponuku odmietol, pretože si uvedomil, že by to bol krok späť, že by mu požiadavky fresky zmenili kresbu a štýl a že by stratil všetko, čo sa za posledné tri roky naučil. Odišiel do Ríma, kde sa chcel presadiť ako význačný umelec. Po príchode do Ríma *Michelangela* prijal kardinál *Riario* a prikázal, aby *Michelangelovi* ukázali najkrajšie sochárske diela v meste.



Obr. 1. Pietá

Michelangelo podpísal zmluvu s kardinálom *Grosloyom* na mramorovú pietu, ktorú mal vytesať do roka a za ktorú mal dostať štyristopäťdesiat dukátov. V zmluve *Michelangela* po prvý raz titulovali *maestrom*, na čo bol mimoriadne pyšný.

V Ríme začala *Michelangelova* sláva rýchlo rásť. *Michelangelo* začal pracovať na hrubých náčrtoch *Piety*. Začiatkom roka 1500 *Michelangelo* dokončuje *Pietu*. Ako prvý videl jeho dielo hotové *Sangallo*, ktorý ocenil architektonickú stránku trojuholníkovej kompozície a rovnováhu línií a hmôt. Bola krátko po dokončení v tichosti, bez bohoslužieb a požehnaní inštalovaná v bazilike sv. *Petra*. O pár dní neskôr sa *Michelangelo* vrátil do chrámu a na šerpu prechádzajúcu *Márii* cez prsia vyryl ozdobnými písmenami: MICHELANGELUS BUONARROTUS FLORENT FACIEBANT - *Michelangelo Buonarroti z Florencie vyhotovil*. Na druhý deň sa vydal na cestu do *Florencie*, ktorej vtedy vládol (starosta mestského štátu) *Pierro Soderini*.

Do *Florencie* sa vrátil aj *Leonardo da Vinci*, ktorý si získal dobré meno jazdeckou sochou grófa *Sforzu* a milánskou freskou *Posledná večera*. *Michelangelo* sa s *Da Vincim*, ktorý odišiel z *Florencie* približne v roku 1482, nikdy nestretol. Keď počul, že sa o ňom hovorí ako o najlepšom *talianskom* maliarovi, išiel sa do kostola *Santissima Annunziata* pozrieť na *Leonardove* obrazy.

Florenca vyhlásila *Leonarda* za víťaza v súťaži o mramorový blok, ale *Leonardo* objednávku okamžite odmietol; sochárstvo považoval za nižšiu formu umenia, vhodnú iba pre remeselníkov. *Michelangelo* bol týmto výrokom veľmi pobúrený.

Vo *Florencii* vznikla v rokoch 1501 - 1504 ďalšia umelcova slávna socha *Dávida* s majstrovsky zvládnutou anatómiou, určená pre námestie *Piazza della Signoria*. Na soche začal pracovať štyridsať rokov pred *Michelangelom* *Agostino di Duccio*, ale nikto sa neodvážil v diele pokračovať. Je vytesaná z jedného kusa mramoru, má výšku cez štyri a pol metra a od čias *antiky* je najväčšou voľne stojacou mramorovou sochou. *Dávid* bol *Florent'anni* prijatý s nadšením a *Michelangelo* bol na svojho *Obra* právom pyšný. Krátko po dokončení kartónu, v dobe, keď sa ho *Michelangelo* chystal preniesť ako fresku na stenu vo veľkej sále vo *Florencii*, prišiel z Ríma odkaz, že pápež *Július II.* si želá, aby *Michelangelo* ihneď prišiel do Ríma.

Pápež prijal *Michelangela* a oznámil mu, že si želá, aby pre neho odlial bronzovú sochu s jeho podobizňou do vonkajšieho výklenku *Chrám sv. Petronia v Bologni*. *Michelangelo* sa pustil do návrhov na klenbu *Sixtínskej kaplnky*. Ako prvý začal maľovať potopu.

V júni 1510, približne rok a dva mesiace po začatí dokončil prvú polovicu klenby. Jediný, kto sa prišiel *Michelangelovi* pokloniť bol mladý vynikajúci maliar *Raffaello Santi*.

Michelangelo sa v *Sixtíne* snažil napredovať ešte rýchlejšie, pretože tušil, že sa blíži pápežov koniec. Pápež po svojom príchode zašiel do kaplnky a vyjadril spokojnosť s *Michelangelovou* prácou. V zime 1512 pápež opäť navštívil *Sixtínu* a oznámil *Michelangelovi*, že chce, aby bola klenba čo najskôr hotová, pretože na *Sviatok všetkých svätých* chce v kaplnke odslúžiť omšu. *Michelangelo* fresky urýchlene dokončil, dal sňať lešenie a v danom termíne bola klenba odhalená.

Radikálne rozhodnutie *Júlia II.* prebudovať chrám *sv. Petra* narazilo na odpor konzervatívnych cirkevných kruhov. Chrám bol vo veľmi zlom stave, ale pre svoj historický význam i svoj vek bol vysoko uznávaný. Na výstavbe nového chrámu *sv. Petra* sa podieľalo viacero významných architektov - *Bramante, Raffael, Maderno, A. da Sangallo* i *Michelangelo*. Umelec osobitý štýl sa prejavil počas tvorby modelov chrámu *sv. Petra*, v ktorých podstatne zmenil pôvodné plány a v roku 1546 navrhol posledný model kopuly. V roku 1549 bol menovaný hlavným architektom a staviteľom chrámu *sv. Petra v Ríme*. Celá vonkajšia podoba chrámu okrem priečelia je dielom *Michelangela* a väčšinu z nej stihol zrealizovať v rokoch 1558 - 1560. Táto architektonická objednávka bola jeho najvýznamnejšou a bola prirodzeným vyvrcholením *Michelangelovej* tvorby.

Niekoľko mesiacov po odhalení fresiek v *Sixtínskej kaplnke* pápež umrel. Novým pápežom sa stal *Giovanni de' Medici*, ktorý prijal meno *Lev X.*

Michelangelo si za peniaze, ktoré mu *Július II.* vyplatil tesne pred smrťou, kúpil nový dom a začal kresť tri gigantické bloky *carrarského* mramoru naraz - *Mojžiša* a dvoch heroických otrokov.



Obr. 2. Mojžiš

Raz pri večeri vo *Vatikáne*, mu pápež *Lev X.* oznámil, že by bol veľmi rád, keby sa *Michelangelo* podujal namaľovať na oltárnu stenu *Sixtínskej kaplnky* fresku *Posledný súd*. *Michelangelo* sa vrátil do *Florencie* a dokončil úpravy na alegorických postavách a na soche *Panny Márie*.

V júni, po oslavách otcových deväťdesiatych narodenín, *Lodovico* umrel. *Michelangelo* si zbalil svoje veci a odišiel do *Ríma*. Dva dni po *Michelangelovom* príchode pápež *Klement VII.* vo *Vatikáne* umrel.

Novým pápežom *Pavlom III.* sa stal *Alessandro Farnese*. Hneď po svojom inaugurovaní *Michelangelovi* oznámil, že chce, aby pracoval v jeho službách a vytvoril fresku posledného súdu.

Michelangelo znova navštívil svojho priateľa *Tomassa de' Cavalieri*, ktorý mu dodal silu a odvalu na to, aby sa pustil do práce na pätnásť metrov vysokej a dvanásť metrov širokej oltárnej stene *Sixtínskej kaplnky*. *Michelangelo* dokončoval kartón na *Posledný súd*. Freska mala obsahovať vyše tristo postáv v životnej a nadživotnej veľkosti. V tomto období vyhlásil pápež *Pavol Michelangela* za *Sochára, Maliara* a *Architekta* celého *Vatikánu* s doživotným dôchodkom sto dukátov mesačne. *Michelangelo* sa pustil do zväčšovania a prenášania kartónu na oltárnu stenu.

MICHELANGELO ARCHITEKT

Náhrobok bol v 15. storočí samostatným architektonickým útvarom, ktorý bol ako samostatný celok pristavený k chrámovej stene. Zákazkou od pápeža *Leva X.* bolo zhotovenie náhrobkov pre *medicejských* vojvodcov *Giuliana* a *Lorenza* (v *Capella Medicea*). *Michelangelo* na nich pracoval v rokoch 1520 – 34 a umelecký dojem ešte viac zvýšil vynaliezavým členením stien.

Po ukončení *Sixtínskej kaplnky*, ktorá slávila triumf, sa túžil *Michelangelo* vrátiť k sochárstvu. Veľmi si prial dokončiť náhrobok *Júliusa II.*, na ktorom začal robiť v roku 1505. Podľa závetu *Júliusa II.* mal byť náhrobok dokončený čoskoro po jeho smrti a pamätal na to i s peniazmi. Medzičasom sa však vystriedalo niekoľko pápežov a projekt bol niekoľkokrát pozmenený. Po desaťročiach márneho naliehania dedičov a prerušovanej práce ustúpil *Michelangelo* novému plánu. Realizácia trvala nakoniec 40 rokov a uskutočnená bola veľmi zredukovaná šiesta verzia. Jednou z mála plánovaných i dochovaných častí náhrobku je socha *Mojžiša* (1513-16), z pôvodného umelcovho plánu jediná socha, v ktorej sa skrýva idealizovaná podoba pápeža *Júliusa II.*

V roku 1524 realizoval *Michelangelo* projekt *florentskej* knižnice *Biblioteca Laurenziana* a o päť rokov neskôr prebral funkciu hlavného inšpektora nad stavbou *florentského* mestského opevnenia. Podľa jeho návrhov bolo postavené schodisko knižnice *Laurenziana* a postavil tiež *Novú sakristiu San Lorenzo* vo *Florencii*. K ďalším dôležitým projektom patrilo dokončenie *Farneského* paláca, kopuly chrámu sv. *Petra* - strecha baziliky obsahuje jedenásť malých kopúl a obnova *Kapitolu* - v staroveku náboženské centrum *Ríma*, kde bol poverený prebudovaním celého námestia.



Obr. 3. Kapitolské námestie (Piazza del Campidoglio, Rím)

Dva týždne po oslave *Michelangelových* osemdesiatych narodenín zomrel pápež *Július III.* Novým pápežom sa stal *Pius IV.*, ktorý potvrdil *Michelangela* vo funkcii architekta chrámu.

UMELCOVE POSLEDNÉ ROKY

Život *Michelangela* bol naplnený ťažkou robotou. Posledné roky sa venoval úvahám o viere, projektom kostolov a prácam na *Svätopeterskom chráme* v *Ríme*. Konštruoval plány drevenej kopule (podľa jeho návrhov ju dokončil umelcov žiak *della Porta* v roku 1590). *Michelangelo Buonarroti* pracoval až do svojich posledných dní a zomrel 18. februára 1564 v *Ríme*. Jeho telo bolo tajne prevezené do *Florencie*, kde je podľa jeho želania pochovaný v kostole *Santa Croce*. Slávnostný pohreb za účasti *florentských* umelcov mal 14. júla 1564 v kostole *San Lorenzo*. Obdiv a úctu mu prejavili vytvorením mnohých sôch a obrazov, ktorými bol ozdobený vysoký katafalk.

Michelangelo, ktorý bol často arogantný voči ostatným a stále nespokojný so sebou samým, sa domnieval, že umenie má pôvod vo vnútornej inšpirácii a v kultúre. V protiklade s názormi jeho rivala *Leonarda da Vinci* videl *Michelangelo* prírodu ako nepriateľa, ktorého treba prekonať.

Poznámka

Predložený príspevok o talianskom géniovi bol napísaný na podnet mojich kolegov, pri našej schôdzi interných auditorov Sjf. Vcelku ma prekvapilo, že vyslovili želanie, aby som napísal článok o Buonarottim. Rád som to vypočul a výsledok ste si mohli prečítať.

LITERATÚRA

PIJOAN, J. (1999): *Dejiny umenia 6*. Vydavateľstvo Ikar.

NÉRET (2003): *Michelangelo*. Taschen/Nakladatelství Slovart.

MICHELANGELO (2000): *Největší malíři. Život, inspirace a dílo*. No. 36, Praha.

PEČÍRKA, J. (1949): *Michelangelo Buonarroti*. Pražské nakladatelství.

HOLLINGSWORTHOVÁ, M. (1994): *Umenie v dejinách človeka*. Vydavateľstvo Obzor, Bratislava.

CHRISTOFANELLI, R. (1981): *Deník Michelangela blázna*. Práce Praha.

Porovnanie charakteristík tváriteľnosti vysokopevných dvojfázových ocelí skúškou ťahom a LDH skúškou

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 55 602 3524

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 55 602 3528

Vladimír Kokarda, Ing.

Carl Zeiss Slovakia, s.r.o - ZEISS Industrial Quality Solutions, Bratislava, Slovakia
Račianska 12481/77/A, 831 02 Bratislava
E-mail: vladimir.kokarda@zeiss.com, Tel.: + 421 2 554 226 61

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 55 602 3547

Comparison of the formability parameters of high-strength dual phase steels by tensile test and Limit Dome Height test

Abstract: The paper deals with the issue of formability evaluation of high-strength dual phase steels *DP800* and *DP1000* with a thickness of 1.6 mm. These steels are used for automotive body deformation zones. The material formability was evaluated by tensile testing with evaluation of mechanical properties, normal anisotropy ratio and strain hardening exponent. The process formability of steels was evaluated by *LDH* test, which is used for different deformation states modelled by the specimen width. The results of the *LDH* parameter achieved were correlated with the measured material formability parameters.

Keywords: formability, dual phase, *LDH* test, mechanical properties

ÚVOD

Použitie *AHSS* ocelí pre štrukturálne diely karosérie automobilov, najmä v ich deformačných zónach sa v poslednom desaťročí stáva štandardom. Je to vynútené aj požiadavkami na znižovanie hmotnosti automobilov s cieľom redukcie emisií pri súčasnom zvyšovaní bezpečnosti pasažierov. Z tohto dôvodu sa čoraz častejšie využívajú vyššie pevnosti *AHSS* ocelí. Zvýšenie pevnosti ocele umožňuje použitie menšej hrúbky plechu pre lisované diely. Dvojfázové ocele sa bežne používajú v niektorých častiach karosérie pre ich dobrú kombináciu pevnosti a ťažnosti a nízke výrobné náklady [1, 2].

Tváriteľnosť (lisovateľnosť), definovaná ako schopnosť zmeny tvaru plechu pri tvárnení (lisovaní) bez porušenia materiálu, závisí od niekoľkých vzájomne sa ovplyvňujúcich faktorov [3, 4]. *Mielnik* klasifikuje celkovú tváriteľnosť ako materiálovú a procesovú zložku [5]. Tváriteľnosť materiálu možno testovať skúškami, ktoré spočívajú v jednoduchej skúške ťahom alebo tlakom. Procesová tváriteľnosť zahŕňa niekoľko faktorov závislých od procesu (napätovo-deformačný stav) v kombinácii s vlastnosťami materiálu. Vzhľadom na rôzne rozloženie napätia a deformácie v každej oblasti lisovanej súčiastky neexistuje jednotný skúšobný postup, ktorý by testoval tváriteľnosť jednoduchým

spôsobom. Používajú rôzne skúšky - *Erichsenova*, *Engelhardtova*, skúška medznej výšky výťažku (*LDH test*), kalíškovacia skúška (*cup test*) a pod. [3-6].

Skúška medznej výšky výťažku - *Limit Dome Height (LDH)*, ktorú zaviedol *Ghosh* a modifikoval *Hecker*, bola vyvinutá na simuláciu podmienok porušenia pri rovinnnej deformácii, ktorú *Hecker* identifikoval ako príčinu viac ako 80 % porúch pri lisovaní [7, 8]. Okrem toho bola skúška modifikovaná tak, aby boli použité pásy plechu s rôznou šírkou, hrúbkou materiálu a laserom zvárané rôznorodé materiály (*TWB*). *Sahu* a kol. [9] použili *LDH* skúšku na štúdium deformačných vlastností veľmi tenkého mosadzného plechu. Modelovali dvojosový, rovinný a jednoosový priebeh deformácie zmenšením rozmerov nástroja a vzorky. *Kuramae* a kol. [10] vykonali modifikovanú *LDH* skúšku, kde porovnali výsledky *FE* predpovede lomu so skúškou *LDH* vykonanou pomocou ťažníka s plochou hlavou pre rôzne podmienky priebehu deformácie. *Katragadda* a kol. [11] vykonali *LDH* skúšku pre rôzne druhy ocele používané v automobilovom priemysle. Výsledky experimentov porovnali so simuláciami. *Bandyopadhyay* a kol. [12] vykonali skúšky tvárniteľnosti pre laserové zvárané polotovary na mieru z rôznorodých materiálov (*DP980/DP600* a *DP980/IFHS*). Zistili, že pokles tvárniteľnosti pri *LDH* skúške a *Erichsenovej* kalíškovacej skúške mal približne podobný trend, a preto veľkosť ťažníka mal menší vplyv.

Cieľom príspevku je porovnať výsledky skúšok *LDH* dosiahnutých experimentálne pri skúšaní dvoch akostí dvojfázovej ocele – *DP800* a *DP1000* a ich výsledok korelovať s hodnotami mechanických vlastností meraných skúškou ťahom.

1 METODIKA EXPERIMENTOV

1.1 Experimentálny materiál

Tvárniteľnosť dvojfázovej vysokopevnej ocele dvoch akostí *DP800* a *DP1000* o hrúbke 1,6 mm bola hodnotená skúškou *LDH*. Parametre materiálovej tvárniteľnosti - mechanické vlastnosti (medza klzu, pevnosť v ťahu, ťažnosť) experimentálneho materiálu boli testované podľa normy *ISO 6892-1*, súčiniteľ normálovej anizotropie podľa normy *ISO 10113* a exponent deformačného spevnenia podľa normy *ISO 10275* [4, 13]. Vzorky na mechanické skúšky boli odobrané v smere valcovania 0°, 45° a 90°. V každom smere boli merané tri vzorky a priemerné hodnoty sú uvedené v tab. 1 pre akosť *DP800* a v tab. 2 pre akosť *DP1000*. Skúšky boli realizované na skúšobnom stroji *TIRAtest 2300* vybavenom pozdĺžnym a priečnym extenzometrami s presnosťou 0,001 mm. Súčiniteľ normálovej anizotropie bol vyhodnotený pri hodnote rovnomerného predĺženia a exponent deformačného spevnenia bol

vyhodnocovaný v oblasti rovnomernej plastickej deformácie 5 % až po rovnomerné predĺženie.

Tab. 1. Parametre materiálovej tvárniteľnosti dvojfázovej ocele akosti *DP800*

	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r [-]	n [-]	K [MPa]
0°	527	828	19,9	0,873	0,126	1219
45°	508	830	18,2	0,907	0,125	1223
90°	496	838	18,4	0,979	0,123	1229

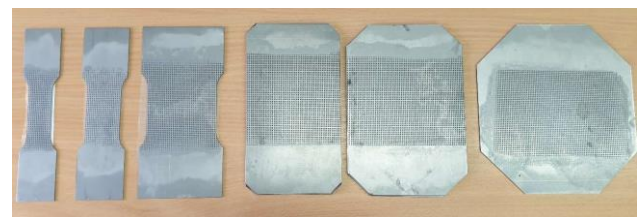
Tab. 2. Parametre materiálovej tvárniteľnosti dvojfázovej ocele akosti *DP1000*

	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r [-]	n [-]	K [MPa]
0°	740	1051	13,5	0,731	0,114	1525
45°	739	1033	13,2	0,859	0,113	1495
90°	765	1058	10,0	0,771	0,104	1496

Pozn: $R_{p0,2}$ – medza klzu, R_m – pevnosť v ťahu, A_{80} – rovnomerná ťažnosť, r – celková ťažnosť, r – súčiniteľ normálovej anizotropie, n – exponent deformačného spevnenia, K – pevnosť materiálu pri $\varphi = 1$.

1.2 LDH skúška

LDH skúška je metóda používaná na určenie tvárniacich vlastností plechu, resp. tvárniteľnosti plechov a je porovnateľná s *Nakajima* skúškou. Pologulový ťažník namáha upnutú vzorku až do porušenia. Skúška sa vykonáva na vzorkách s rôznou šírkou. Pre každú vzorku sa určí maximálna dosiahnuteľná dráha. Experimenty boli realizované na skúšobnom stroji *Erichsen 145-60* so súpravou nástrojov *Nakajima*. V rámci experimentov boli použité polotovary so šírkou 26, 39 (38), 70 (77), 108, 133 a 196 mm - obr. 1. Pre elimináciu trenia medzi ťažníkom a polotovarom bola použitá *PTFE* fólia a hrúbke 0,2 mm. Vzorky boli pridržiavané silou 300 kN.



Obr. 1. Tvar a rozmery polotovarov pre LDH skúšku

3 DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY A DISKUSIA

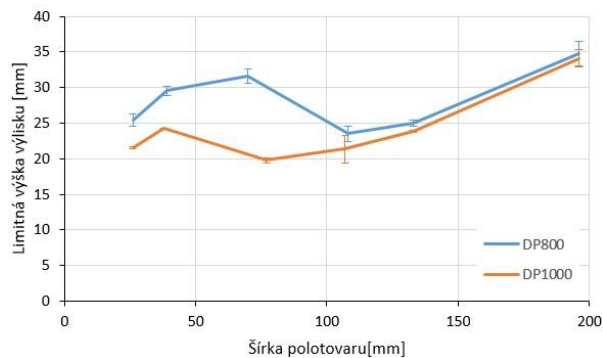
Výsledky merania maximálnych síl a dráhy do porušenia vzorky pre jednotlivé šírky vzoriek sú uvedené v tab. 3 pre materiál *DP800* a v tab. 4 pre materiál *DP1000*. Pre jednotlivé šírky boli vykonané 3 merania a bola vypočítaná priemerná hodnota maximálnej sily a priemerná hodnota dráhy pri porušení.

Tab. 3. Namerané hodnoty sily a dráhy pre materiál DP800

	Max. sila [kN]	Priemer ± štđ. odchýlka [kN]	Dráha ťažníka [mm]	Priemer ± štđ. odchýlka [mm]
196	211,31		34,44	
	205,68	211,4 ± 5,8	33,16	34,7 ± 1,7
	217,22		36,62	
133	133,88		25,40	
	127,39	131,3 ± 3,5	24,54	25,0 ± 0,4
	132,75		25,16	
108	97,53		23,40	
	92,67	97,9 ± 5,6	22,52	23,5 ± 1,0
	103,76		24,58	
70	110,11	112,3 ± 3,1	30,86	31,6 ± 1,0
	114,52		32,28	
	39	60,45		29,42
26	61,29	60,2 ± 1,2	30,16	29,5 ± 0,6
	58,86		28,98	
	37,91		26,16	
26	37,37	37,5 ± 0,3	24,46	25,5 ± 0,9
	37,36		25,74	

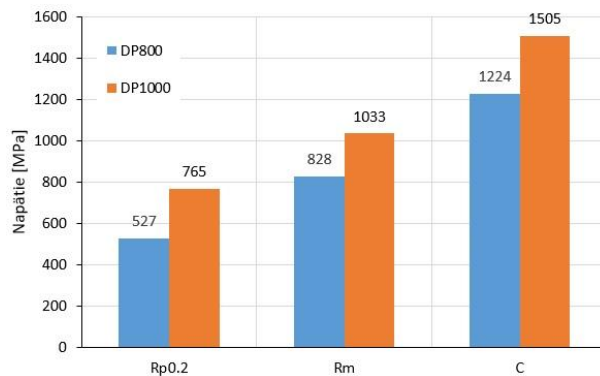
Tab. 4. Namerané hodnoty sily a dráhy pre materiál DP1000

	Max. sila [kN]	Priemer ± štđ. odchýlka [kN]	Dráha ťažníka [mm]	Priemer ± štđ. odchýlka [mm]
196	248,1		34,4	
	237,7	244,6 ± 6,0	32,7	34,1 ± 1,2
	248,1		35,1	
133	147,2		24,0	
	144,0	145,1 ± 1,8	23,8	23,9 ± 0,1
	144,2		23,8	
108	97,3		20,8	
	87,1	92,2 ± 5,1	23,5	21,4 ± 1,9
	92,1		19,8	
77	79,8	79,5 ± 2,0	19,9	19,8 ± 0,3
	81,3		20,0	
	77,4		19,4	
38	57,0	57,0	24,3	24,3
26	35,1	34,7 ± 0,6	21,6	21,5 ± 0,1
	34,3		21,4	



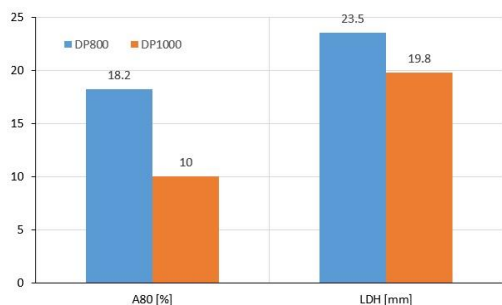
Obr. 2. Dosažené priemerné výšky výtlačkov pre jednotlivé šírky polotovaru

Na obr. 2 sú znázornené dosažené priemerné výšky výtlačkov pre jednotlivé šírky vzoriek vrátane štandardnej odchýlky v jednotlivých meraných bodoch. Pre materiál DP800 bola zistená medzná výška výlisku pre šírku vzorky 108 mm s hodnotou 23,5±1,0 mm. Pre materiál DP1000 bola zistená medzná výška výlisku pre šírku vzorky 77 mm s hodnotou 19,8±0,3 mm. S uvažovaním štandardnej chyby, resp. minimálnej dosiahnutej výšky výlisku boli dosažené hodnoty pre šírku 77 mm 19,5 mm a šírku 108 mm rovnako 19,5 mm. Je teda možné konštatovať medzný stav minimálnej výšky výlisku pre materiál DP800 šírku vzorky 108 mm a pre materiál DP1000 77 mm, resp. 108 mm. Výsledky sú v súlade s výsledkami Takahashiho [14,15], ktorý vykonal LDH skúšku na AHSS oceli.

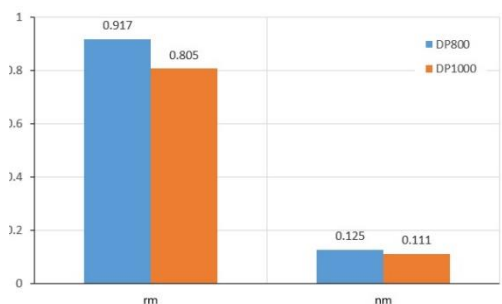


Obr. 1. Porovnanie napät'ových a pevnostných charakteristík

Porovnanie napät'ových charakteristík – medze klzu, pevnosti v ťahu a konštanty pevnosti K je uvedené na obr. 3. Zvýšením akostného stupňa materiálu z DP800 na DP1000 došlo k zvýšeniu medze klzu o 45,2 %, pevnosti v ťahu o 24,8 % a konštanty pevnosti K o 23 % pri súčasnom poklese ťažnosti o – 45,1 %. Výsledkom zvýšenia pevnostných charakteristík a poklesu ťažnosti je zníženie medznej výšky výlisku z 23,5 mm u materiálu DP800 na 19,8 mm pre materiál DP1000, čo predstavuje pokles o –18,9 %. Súčasne došlo k zníženiu súčiniteľa normálovej anizotropie r_m o –12,2 % a exponentu deformačného spevnenia n_m o –11,2 % - obr. 4 a obr. 5.



Obr. 4. Porovnanie ťažnosti a medznej výšky výťazku



Obr. 5. Porovnanie súčiniteľa normálovej anizotropie a exponentu deformačného spevnenia

ZÁVER

Článok prezentuje výsledky *LDH* skúšky realizovanej na dvoch akostiach dvojfázovej ocele - *DP800* a *DP1000*, ktoré sa používajú na výrobu lisovaných dielov pre zadnú deformačnú zónu automobilov. Cieľom bolo posúdiť zmenu materiálu zvýšením pevnostných charakteristík a jej vplyv na tvárnosť hodnotenú *LDH* skúškou. Minimálna dráha ťažníka, t. j. parameter *LDH* = 23,5±1,0 mm, bola dosiahnutá pre rovinný deformačný stav modelovaný vzorkou so šírkou 108 mm pre akostný stupeň *DP800*. Pre akostný stupeň *DP1000* bola dosiahnutá nižšia medzná výška výťazku, parameter *LDH* = 19,8±0,3 mm pre šírku vzorky 77 mm. Dosiahnutý výsledok je v korelácii s hodnotami materiálovej tvárnosti, kde zvýšením akostného stupňa došlo k zvýšeniu pevnostných charakteristík, a k zníženiu ťažnosti, čo sa prejavilo v nižších hodnotách súčiniteľa normálovej anizotropie a exponenta deformačného spevnenia. Ďalší výskum bude zameraný na vyhodnotenie rozloženia deformácií a ich koreláciu s výsledkami numerickej simulácie.

Podakovanie

Príspevok bol vypracovaný s podporou grantového projektu VEGA 1/0238/23 „Implementácia CAx systémov a techník virtuálneho inžinierstva pri redizajne dielov deformačných zón karosérie automobilov.“

LITERATÚRA

[1] OLIVER, S. - JONES, T. B. - FOURLARIS, G. (2007): *Dual phase versus TRIP strip steels:*

Microstructural changes as a consequence of quasi-static and dynamic tensile testing. In: *Materials Characterization*, Vol. 58, p. 390-400.

[2] MORAVEC, J. - GRYS, K. (2021): *Forming and Heat Treatment of Modern Metallic Materials.* In: *Metals*, 11, 1106. <https://doi.org/10.3390/met11071106>

[3] HRIVŇÁK, A. - EVIN E. (2004): *Formability of metal sheets.* 1st ed.; Košice: TU, Slovakia, pp. 223.

[4] ČADA, R. (2001): *Tváritelnosť ocelových plechu.* 1st ed.; Ostrava: Repronis, Česko, pp. 345.

[5] MIELNIK, E. M. (1991): *Metalworking Science and Engineering.* McGraw-Hill, p. 976.

[6] HOSFORD, W. F. - CADDELL, R. M. (2012): *Metal Forming, Mechanics and Metallurgy.* 3rd edition, Cambridge University Press.

[7] NARASIMHAN, K. - MILES, M. P. - WAGONER, R. H. (1995): *A better sheet-formability test.* In: *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 50, p. 385-394.

[8] MEULEMAN, D. - SILES, J. - ZOLDAK, J. (1985): *The Limiting Dome Height Test for Assessing the Formability of Sheet Steel.* In: *SAE Technical Paper 850005*, 1985, <https://doi.org/10.4271/850005>.

[9] SAHU, J. - MISHRA, S. (2016): *LDH test of very thin brass sheet considering the scaling effect.* In: *Journal of Physics Conference Series*, Vol. 734, p. 1-4.

[10] KURAMAE, H. et al (2010): *Multi-scale parallel FE analyses of LDH sheet formability tests based on crystallographic homogenization method.* In: *Int. Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 52, p. 183-197.

[11] KATRAGADDA, S. C. - RAMULU, P. (2014): *Investigation of forming behavior prediction of different steel grade materials using numerical simulation.* In: *5th Int.&26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference*, India.

[12] BANDYOPADHYAY, K. - PANDA, S. K. - SAHA, P. - PADMANABHAM, G. (2015). *Limiting drawing ratio and deep drawing behavior of dual phase steel tailor welded blanks: FE simulation and experimental validation.* In: *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 217, p. 48-64.

[13] ČADA, R. (1997): *Formability of deep-drawing steel sheets.* In: *EUROMAT 97*, Apr. 21-23, Maastricht, Netherlands, p. 463-466.

[14] *AHSS Guidelines*, Available online: <https://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/>

[15] TAKAHASHI, M. (2003): *Development of High Strength Steels for Automobiles.* In: *Nippon Steel Technical Report No. 88*.

Aplikačné možnosti HCCI technológie

Matúš Lavčák, Ing.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 9, 042 00 Košice, Slovensko.
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, Slovensko.
E-mail: michal.puskar@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 2360

Application possibilities of HCCI technology

Abstract: This text describes the current state of the art of *HCCI* technology, which is based on combining the characteristics of a petrol and diesel engine. *HCCI* engines offer higher fuel efficiency and lower nitrogen oxide emissions. However, they also have disadvantages such as limited load range, control complexity and cold weather starting problems. The next section of the text discusses hybrid propulsion, which uses a combination of an internal combustion engine and an electric motor. It describes the different types of hybrid powertrains such as soft hybrids, plug-in hybrids and full hybrids. Explains their advantages and possible applications. A solution is then proposed where the *HCCI* engine would serve as a generator in a series hybrid vehicle with an electric motor. Such an arrangement allows optimization of energy use and reduction of emissions. Finally, the relevance of *HCCI* technology for improving the efficiency of fuel engines and hybrid vehicle design is evaluated.

Keywords: *HCCI* engine, hybrid, *sHEV*, *PHEV*

ÚVOD

V súčasnosti je vyvíjaný značný tlak na automobilový priemysel, ktorého cieľom je neustále znižovanie emisií vozidiel, efektívnejšie využívanie energie paliva a aplikácia pokročilých technológií. Súčasné ale hlavne plánované emisné normy sú tak prísne, že automobilky musia hľadať alternatívy k súčasným spaľovacím motorom ako sú napr. elektropohony alebo vodíkové palivové články. Zároveň ale prebieha aj výskum a vývoj zameraný na pokročilé technológie spaľovania, ktoré by zachovali účinnosť aktuálnych spaľovacích motorov a výrazne znížili produkciu emisií. Takouto technológiou je *HCCI*, ktorá využíva princíp samovznietenia homogénnej palivovej zmesi pomocou kompresie. Spaľovanie homogénnej zmesi prebieha naraz v celom spaľovacom priestore valca, dochádza teda ku zhoreniu takmer všetkej zmesi. Využitie technológie *HCCI* doteraz bránilo niekoľko zásadných problémov, ako sú vysoké kompresné tlaky a značná miera uvoľňovania tepla. Ďalším vážnym problémom je, že proces samovznietenia zmesi je náročný na riadenie. Výskum a vývoj sa preto neustále zameriava na riešenie výziev spojených s riadením spaľovania, rozsahom záťaže a flexibilitou paliva. Implementácia *HCCI* motorov v hybridných vozidlách je jedným z najvhodnejších spôsobov využitia týchto technológií, čo umožňuje

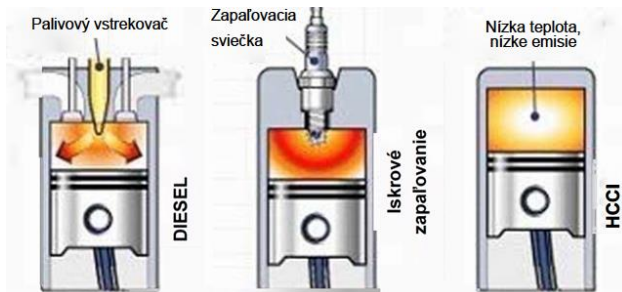
optimalizáciu využitia energie a zníženie emisií pri prevádzke vozidla. Súčasné a budúce vylepšenia týchto technológií budú prispievať k zlepšeniu udržateľnosti dopravy a ochrane životného prostredia.

1 AKTUÁLNY STAV RIEŠENIA HCCI TECHNOLOGIE

HCCI, čo je skratka pre *Homogeneous Charge Compression Ignition*, je typ spaľovacieho motora, ktorý kombinuje vlastnosti zážihového (*SI*) a naftového motora (obr. 1). V motore *HCCI* sa homogénna zmes vzduchu a paliva stlačí na vysoký tlak a teplotu, čo spôsobí jej samovoľné zapálenie bez iskry alebo plameňa, podobne ako u dieselových motorov. Avšak palivová zmes v *HCCI* motore sa zapáli pri nižšej teplote ako v dieselovom motore, čo znižuje emisie oxidov dusíka (NO_x).

Motory *HCCI* ponúkajú vyššiu palivovú účinnosť a nižšie emisie ako tradičné zážihové motory, pretože môžu pracovať s chudobnejšími zmesami vzduchu a paliva a majú nižšie čerpacie straty v dôsledku vyššieho kompresného pomeru. Avšak *HCCI* motory majú aj niektoré nevýhody, ako je obmedzený rozsah záťaže, komplexita riadenia, problémy so štartovaním v chladnom počasí, nestabilita spaľovania a obmedzená flexibilita paliva.

Hlavnou výhodou *HCCI* motora je, že vo vnútri spaľovacej komory nie je žiadny bod vznietenia, ako je vstrekač alebo zapaľovacia sviečka. Spaľovanie v *HCCI* motore prebieha pomocou samovznietenia celej zmesi vzduchu/paliva pri použití iba kompresie. To eliminuje vysoké teploty vo valci a takmer úplne redukuje emisie tepelných NO_x . Riadenie času spaľovania a rýchlosti spaľovania môže vyžadovať ďalšie technológie, ako je variabilné



Obr. 1. Schéma činnosti *CI*, *SI* a *HCCI* motora

časovanie ventilov a priame vstrekovanie.

Výskumy ukázali, že kombinácia pokročilých technológií ventilového rozvodu, ako je variabilné časovanie ventilov a variabilný zdvih ventilov, spolu s recirkuláciou výfukových plynov (*EGR*), umožňuje lepšiu reguláciu teploty vo valcoch a kontrolovanie spaľovania v *HCCI* motore. Výskumy tiež ukázali, že zvýšenie koncentrácie palivového oleja v palive vedie k zvýšeniu výkonu motora. Maximálny krútiaci moment motora *HCCI* bol pozorovaný pri otáčkach motora medzi 1200 min^{-1} a 1300 min^{-1} a pomeru prebytočného vzduchu medzi 1,8 a 2.

Tepelná účinnosť motora *HCCI*, definovaná ako pomer výkonu k množstvu tepelného príkonu paliva, sa zvyšuje s nárastom otáčok motora a pomeru prebytočného vzduchu. Výskumy taktiež ukázali, že zvýšenie oktánového čísla palivovej zmesi umožňuje kontrolovanie a pomalšie spaľovanie v *HCCI* motore.

Celkovo je *HCCI* technológia sľubnou voľbou pre zlepšenie účinnosti palivových motorov a zníženie emisií, ale stále existujú výzvy, ako je riadenie a stabilizácia spaľovania, a obmedzenia týkajúce sa rozsahu záťaže a flexibility paliva [1-4].

2 HYBRIDNÝ POHON

Hybridné vozidlo je automobil, ktorý využíva dva alebo viacero zdrojov energie, napríklad kombináciu bežného spaľovacieho motora a elektromotora. Tieto zdroje energie spolupracujú a umožňujú vozidlu dosahovať mimoriadne nízku spotrebu paliva a redukcii emisií, pričom poskytujú hladkú a tichú jazdu [3, 6].

2.1 Mild hybrid electric vehicle

Mäkké hybridné vozidlá predstavujú jednu z kategórií hybridných vozidiel, ktoré využívajú elektromotor ako dodatočný zdroj energie s cieľom znížiť spotrebu

paliva a emisie škodlivých látok. Na rozdiel od plnohodnotných hybridných systémov, mäkký hybridný systém zvyčajne neumožňuje pohyb vozidla výhradne na elektrickú energiu. Jeho hlavnou funkciou je poskytnúť dodatočný výkon benzínovému motoru vozidla, najmä pri zrýchlení z mŕtveho bodu, a zároveň pomáha zmierniť zaťaženie energeticky náročných systémov benzínového motora, ako je napríklad klimatizácia. Mäkké hybridy sú často vybavené 48-voltovými elektrickými systémami a nepotrebuje sa pripájať k elektrickej sieti. Ich batérie sa nabíjajú kombináciou energie z benzínového motora a energie získanej pri brzdení vozidla, čo sa nazýva rekuperatívne brzdenie. V porovnaní s plnohodnotnými hybridmi majú mäkké hybridy zvyčajne menšie batérie a elektromotory. Úspora paliva pomocou systému *MHEV* môže byť približne 0,4 litra na 100 kilometrov, pričom to umožňuje znížiť emisie *OEM* o 7 % až 15 %, čo predstavuje pokles o približne $20 \text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$ na kompaktnom vozidle.

2.2 Plug-in hybridné vozidlá

Plug-in hybridné vozidlá (PHEV) sú automobily, ktoré kombinujú spaľovací motor a elektromotor a majú schopnosť byť externým nabíjaním z elektrickej siete. Tieto vozidlá poskytujú flexibilitu a využívajú výhody elektrického aj spaľovacieho pohonu. *Plug-in hybridy* majú väčšiu batériu než bežné hybridné vozidlá a umožňujú dlhšie jazdy na elektrický pohon. Hlavnou výhodou *plug-in hybridných vozidiel* je ich nízka spotreba paliva a emisie. Vďaka väčšej batérii majú dlhší elektrický dojazd, čo umožňuje jazdu bez emisií na určitú vzdialenosť. To je veľmi výhodné pre mestské jazdy a krátke výlety, kde je možné využiť elektrický režim. Pri dlhších cestách, kedy je potrebná väčšia energia, sa zapína spaľovací motor, ktorý poskytuje pohon vozidla a batéria sa môže dobíjať pomocou rekuperácie brzdného energetického systému alebo prostredníctvom externého nabíjania [5, 6]. Flexibilita je ďalšou výhodou *plug-in hybridov*. Vodiči majú možnosť vybrať si medzi elektrickým režimom jazdy, hybridným režimom alebo režimom využívania iba spaľovacieho motora. Táto flexibilita umožňuje prispôbiť vozidlo rôznym jazdným podmienkam a potrebám vodiča (obr. 2a) [5-7].

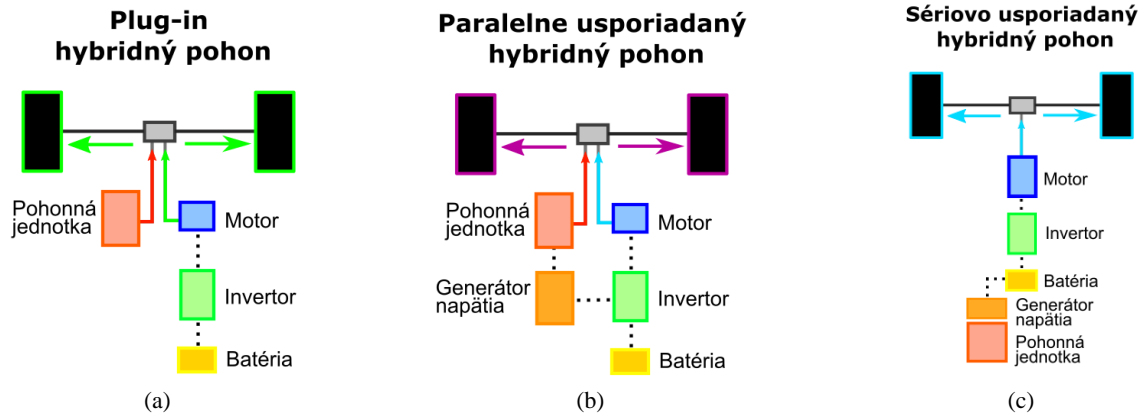
2.3 Plne hybridné vozidlá

Plne hybridné vozidlá predstavujú ďalšiu formu hybridných vozidiel, ktoré kombinujú benzínový motor s elektrickým komponentom. V porovnaní s mäkkými hybridmi má elektrický komponent v plných hybridoch schopnosť zvládať vyššie pracovné zaťaženie. *Plne hybridné vozidlá (FHEV)* disponujú elektrickým režimom, ktorý je aktívny iba pri nízkych rýchlostiach do 30 míľ za hodinu a s dojazdom 10-15 míľ. Spaľovací motor je zapojený pri vyšších rýchlostiach a zároveň slúži ako generátor pre

dobíjanie akumulátorov. Väčšina *plne hybridných vozidiel* dokáže prejsť určitú vzdialenosť výhradne na elektrinu. Toto sa zvyčajne dosahuje pri nižších rýchlostiach v mestských oblastiach. Jedným z dôvodov, prečo môžeme vidieť, že *plne hybridné vozidlá* majú vyššie hodnoty spotreby paliva v meste ako na diaľnici (v porovnaní so štandardnými

2.5 Sériovo usporiadaný hybridný pohon

Sériovo zapojené hybridné pohony predstavujú jednu z konfigurácií hybridných pohonových systémov. V tomto type systému je spaľovací motor pripojený k generátoru, ktorý slúži ako primárny zdroj elektrickej energie pre pohonný elektromotor vozidla. Tento



Obr. 2. Schéma *Plug-in hybridného pohonu* (a), Schéma *paralelne usporiadaného hybridného pohonu* (b), Schéma *sériovo usporiadaného hybridného pohonu* (c)

benzínovými vozidlami), je práve kvôli tomuto elektrickému režimu, ktorý využíva nízke rýchlosti a rekuperáciu energie [3, 5, 6].

2.4 Paralelne usporiadaný hybridný pohon

Paralelné zapojenie hybridných pohonov predstavuje jednu z najpoužívanejších konfigurácií hybridných vozidiel. V tomto type systému sú spaľovací motor a elektromotor pripojené paralelne a sú schopné spoločne poháňať vozidlo.

V *paralelnom hybridnom pohone* spaľovací motor a elektromotor majú možnosť nezávisle prispievať k pohybu vozidla. Spaľovací motor poskytuje pohon cez prevodovku kolesám vozidla, zatiaľ čo elektromotor je napájaný z batérie a dodáva dodatočný výkon pri potrebe väčšieho zrýchlenia alebo pri vyšších rýchlostiach.

Táto konfigurácia umožňuje optimalizáciu využitia spaľovacieho motora a elektromotora, čím sa dosahuje lepšia účinnosť a zníženie spotreby paliva. Pri nižších rýchlostiach alebo pri potrebe menšej sily na pohon vozidla môže elektromotor prevziať väčšiu časť zaťaženia, čo vedie k zníženiu spotreby paliva a emisií. Naopak, pri vyšších rýchlostiach alebo pri potrebe väčšieho výkonu sa zapája spaľovací motor a elektromotor pracuje súčasne, čo poskytuje dostatočný výkon pre pohon vozidla.

Vozidlá s *paralelnými hybridnými pohonmi* majú väčšiu flexibilitu vzhľadom na prevádzkové podmienky. Môžu prevádzkovať elektromotor, spaľovací motor alebo oboje súčasne podľa potreby. To umožňuje optimalizovať využitie energie a zároveň poskytuje jazdu s nižšími emisiami a lepšou účinnosťou (obr. 2b) [5, 7].

elektromotor je potom zodpovedný za pohyb vozidla a prenáša výkon na kolesá.

Pri *sériovo zapojených hybridných pohonoch* spaľovací motor funguje ako generátor a je poháňaný palivom. Jeho úlohou je generovať elektrickú energiu, ktorá je potom ukladaná do batérií. Táto elektrická energia je neskôr použitá na napájanie elektromotora vozidla. Spaľovací motor pracuje pri optimálnych podmienkach, kde môže dosiahnuť najvyššiu účinnosť paliva, pretože jeho hlavnou úlohou je generovanie elektrickej energie, a nie priame poháňanie kolies.

Výhodou *sériového hybridného systému* je, že spaľovací motor môže pracovať v optimálnom pracovnom bode a zároveň poskytovať energiu pre elektromotor, čo vedie k efektívnejšiemu využitiu paliva a nižším emisiám. *Sériové hybridné motory* sú obzvlášť vhodné pre jazdu v mestských oblastiach a pri nízkych rýchlostiach, kde elektromotor môže byť využitý na plno.

Sériovo zapojené hybridné motory majú svoje výhody, ale aj obmedzenia. Napríklad, pri dlhších jazdách na vyšších rýchlostiach môže spaľovací motor pracovať neefektívne, keďže nemá priamy mechanický vplyv na pohon kolies. Okrem toho, pri vyšších rýchlostiach elektromotor nemusí poskytovať dostatočný výkon na udržanie požadovanej rýchlosti.

V súčasnosti prebieha ďalší vývoj *sériovo zapojených hybridných motorov* s cieľom zlepšiť ich účinnosť a výkon. Tieto technológie zohrávajú dôležitú úlohu v snahe o zníženie spotreby paliva a emisií škodlivých látok v doprave a poskytujú užívateľom možnosť jazdy s nižšími nákladmi na palivo a s menším vplyvom na životné prostredie [4-7].

3 NÁVRH RIEŠENIA

Po zhodnotení všetkých výhod a nevýhod tohto typu motora možno konštatovať, že najvhodnejším spôsobom jeho využitia je v hybridných vozidlách, kde by *HCCI* motor pracoval v kombinácii s elektromotorom. V tomto prípade bude motor *HCCI* slúžiť ako generátor a bude slúžiť na nabíjanie batérie hybridného vozidla, zatiaľ čo elektromotor bude zabezpečovať pohon. Tento princíp je známy ako "sériový hybrid" alebo hybridný pohon so sériovým usporiadaním pohonnej jednotky. Táto konfigurácia umožňuje motoru *HCCI* pracovať v optimálnom rozsahu otáčok a pri konštantnej záťaži. S pomocou generátora, ktorý je spojený so motorom *HCCI* cez spojku, je zabezpečený stabilný prúd pre dobíjanie batérií. Vďaka tejto konfigurácii nie je potrebné mať príliš veľké batérie, keďže generátor je hlavným zdrojom energie a batérie slúžia iba na akumuláciu menšieho množstva energie. Tento hybridný pohon s kombináciou *HCCI* motora ako generátora a elektromotoru je výhodný pre prevádzku vo meste aj mimo neho.

Obrázok 2c znázorňuje sériový hybrid založený na *HCCI* motore. Generátor v tomto prípade zabezpečuje "studený štart" motora a plní tak aj úlohu štartéra. To znamená, že časť energie z batérie sa používa na naštartovanie spaľovacieho motora. Štartér pomáha prekonať "mŕtvu bod" motora a poskytuje impulz pre jeho ďalšiu prevádzku. Pôvodná konštrukcia motora totiž neobsahovala zariadenie na štartovanie pracovného procesu.

Pokiaľ ide o palivo, konštrukcia motora umožňuje používanie rôznych druhov paliva vrátane najnovších uhlíkovo neutrálnych palív, ako je napríklad *eFuel*, vodík a ďalšie. Princíp fungovania motora sa nemodifikuje, no výbuchový tlak jednotlivých palív sa môže líšiť. Pre predhrievanie zmesi možno využiť elektronické ohrievače zmesi, podobne ako je to v niektorých dieselových motoroch.

4 ZHODNOTENIE A ZÁVER

V závere možno konštatovať, že motor *HCCI* prináša viaceré výhody oproti bežným motorom. Jeho hlavnou silnou stránkou je nízka úroveň emisií škodlivých látok, čo je jedným z hlavných cieľov *Európskej únie*. Motor *HCCI* má tiež vysokú účinnosť v porovnaní s inými typmi motorov predstavenými v tejto práci, pričom sa môže pohybovať až na úrovni 55 %. Napriek tomu však existujú aj niektoré slabé stránky tohto typu motora. Napríklad jeho najvyššia účinnosť sa dosahuje v obmedzenom rozsahu otáčok medzi 1200 min⁻¹ a 1300 min⁻¹, čo znamená, že nie je vhodný ako priama náhrada za konvenčné spaľovacie motory. Najúspešnejšie uplatnenie motora *HCCI* je v konštrukcii hybridných vozidiel. Výber správneho hybridného pohonu umožňuje dosiahnuť maximálnu

účinnosť celej sústavy s motorom *HCCI* na čele. Konštrukcia motora *HCCI* umožňuje použitie rôznych druhov paliva, vrátane nafty a benzínu. Taktiež je možné využiť aj netradičné palivá, ako napríklad syntetické palivá alebo vodík, čo umožňuje dosiahnuť nulové emisie z motora.

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] RAC (2023): *Euro 1 to Euro 6 guide—findout your vehicle's emissions norm*. Dostupné na internete: <https://www.rac.co.uk/drive/advice/emissions/euro-emissions-standards/>

[2] DIESELNET (2022): *Emission Standards*. [online]. Dostupné na internete: <https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php>

[3] EUROPEAN COMMISSION (2023): *Commission proposes new Euro 7 standards to reduce pollutant emissions from vehicles and improve air quality* [online]. Dostupné na internete: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6495.

[4] ENGINELABS (2023): *Is HCCI The Future Of The Internal Combustion Engine?* Dostupné na internete: <https://www.engine-labs.com/news/video-hcci-future-internal-combustion-engine/>

[5] SAXENA, S. - VUILLEUMIER, D. - KOZARAC, D. - KRIECK, M. - DIBBLE, R. - ACEVES, S. (2014): *Optimal operating conditions for wet ethanol in a HCCI engine using exhaust gas heat recovery*. In: *Applied Energy*, Vol. 116, pp. 269-277.

[6] X-ENGINEER (2023): *Types of Hybrid Electric Vehicles (HEV)*. Dostupné na internete: <https://x-engineer.org/hybrid-electric-vehicle-hev/>

[7] DIFFERENCE BETWEEN (2023): *Difference Between Hybrid and Plug-in Hybrid Electric Vehicles*. [online]. Dostupné na internete: <http://www.differencebetween.net/technology/difference-between-hybrid-and-plug-in-hybrid-electric-vehicles/>

Opotrebovanie strižníkov v strihacom nástroji

Ján Moravec, doc. Ing., PhD.*

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

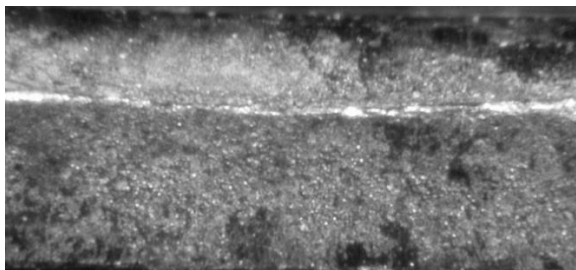
Wear of shears in the shearing tool

Abstract: The paper describes the issue of wear of shears in shearing tools. It is pointed out to theoretical knowledge from the issue and also in experimental, or the practical part contains specific knowledge about the wear of the active surfaces of shearers.

Keywords: shearing, wear, forming tools.

ÚVOD

Kvalitu strižnej plochy ovplyvňuje okrem miery otupenia aj vôľa medzi činnými dielmi - nožmi nožníc, strižníkom a strižnicou. Na obr. 1 je vzhľad strižnej plochy po klasickom strihaní. Všeobecne pri strihaní plechov sa vytvárajú dve nové plochy, čiže pôvodná plocha sa zväčší o 100 %. V nasledujúcom texte je poukázané na problematiku nesprávneho vyhotovenia strižného nástroja a problematiku ostrenia činných dielov.



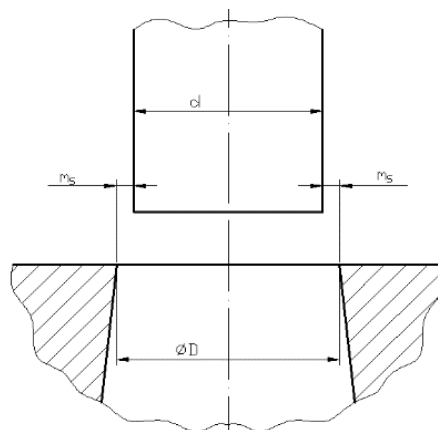
Obr. 1. Vzhľad strižnej plochy po strihaní

1 TEORETICKÉ POZNATKY

Optimálna strižná medzera je nosným meradlom kvality strižného nástroja a rozhodujúco vplýva na trvanlivosť strižnej hrany a na celkovú životnosť činných dielov nástroja. Pri určení strižnej medzery sa vychádza zo strižnej vôle. Strižná vôľa je rozdiel rozmerov strižnice a strižníka v zodpovedajúcom mieste prierezu, čiže je to v podstate vzdialenosť strižníka od hrany strižnice pri jeho zasunutí v ľubovoľnom mieste. Optimálna strižná medzera je rovnaká po celom obvode strižníka (strižnice) a podľa obr. 2 sa rovná polovici strižnej vôle [1].

Veľkosť strižnej medzery závisí najmä od hrúbky strihaného materiálu a jeho mechanických vlastností. Za optimálnu strižnú medzeru sa dá považovať medzera, ktorá je rovnomerná po celej dĺžke krivky strihu a docieli sa pri nej požadovaná kvalita strižnej

plochy pri vynaložení minimálnej sily a práce. Zmenšovaním strižnej medzery sa zväčšuje strižná sila a strižná práca, kde prírastok sily nie je veľký, ale prírastok práce môže dosiahnuť až plus 40%. Veľkosť strižnej medzery sa dá stanoviť podľa vzťahov overených a získaných experimentálne.



Obr. 2. Strižná medzera a strižná vôľa

Výpočtom sa dá veľkosť strižnej medzery určiť podľa vzťahu:

$$m_s = (t - h_v) \cdot \tan \alpha, \quad (1)$$

kde h_v - hĺbka vtlačenia strižníka do materiálu ($0,2 \div 0,35 \cdot t$),

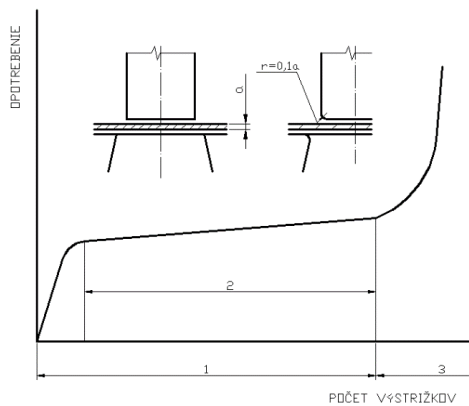
t - hrúbka plechu (mm),

α - uhol strižnej plochy vzhľadom na smer pôsobenia strižnej sily, $\alpha = 5^\circ$ až 6° mäkké, $\alpha = 4^\circ$ až 5° stredne tvrdé, $\alpha = 4^\circ$ tvrdé ocele.

2 PROBLÉM A JEHO RIEŠENIE

V technologickej praxi sa vyskytujú rôzne chyby strižných nástrojov. Môže ísť o deformácie činných dielov po tepelnom spracovaní, nerovnakú tvrdosť strižných hrán, nerovnaký úkos v strižnici. Ďalšia skupina sa týka vôle - nerovnaká strižná vôľa, voľne

zalicované vodidlo (vedenie vo vodiacej doske), veľká vôľa medzi vodiacou doskou a strižnicou - materiál sa pri práci deformuje, nadmerne veľká vôľa vo vodiacej doske a strižnici. Nedostatky a chyby na strižných nástrojoch môžu byť spôsobené nesprávnym spôsobom výroby, zlým zoradením, zlou kvalitou strihaného materiálu, opotrebovaním nástroja a zlým stavom tvárniaceho stroja. Predpokladom je, že konštrukčné riešenie nástroja je dobré. Je známym faktom, že napriek tomu, že nástroj je správne zoradený a kvalitne vyrobený prejaví sa po istom čase a počte strihov vplyv otupenia strižných hrán. Za tupé sa strižné nástroje považujú vtedy ak sú tupé ich strižné hrany. Otupenie sa zjednodušene predstavuje ako zaoblenie strižnej hrany, t. j. $r \geq 0,1 \cdot t$ (obr. 3) [2-5]. Na obr. 4 je pohľad na opotrebovanú činnú plochu strižníka. Je zrejmé, že v prevažnej miere ide v tomto prípade o opotrebovanie adhéziou.



Obr. 3. Kritérium opotrebovania strižnej hrany: 1 - ostrý nástroj, 2 - ekonomické opotrebovanie, 3 - nadkritické opotrebovanie

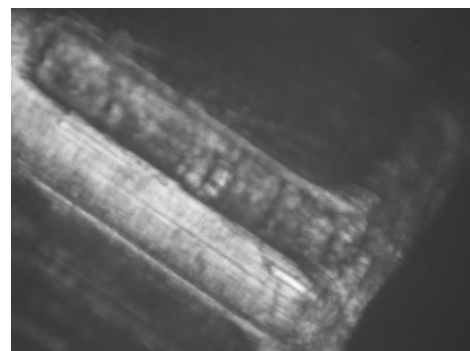
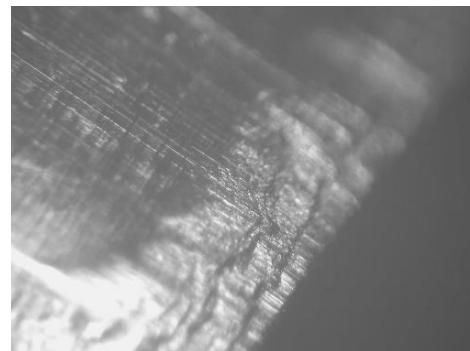
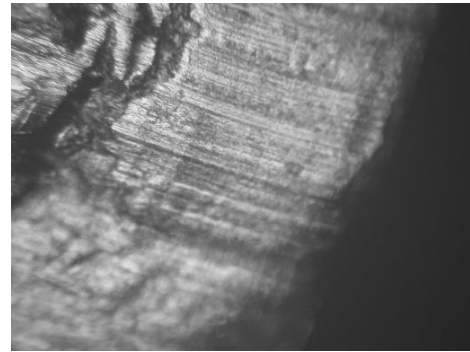
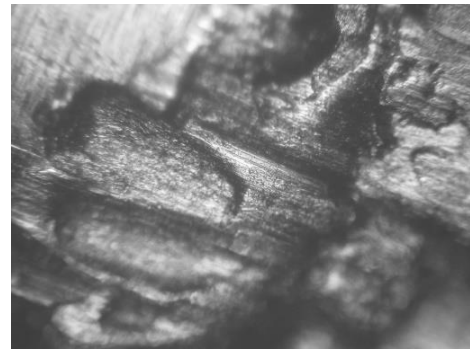
3 ANALÝZA

Príčinou takéhoto stavu činného dielu nástroja môže byť:

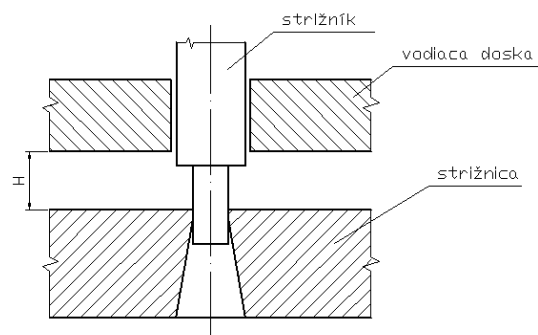
- nesprávne zoradenie na lise,
- nevhodné rozdelenie strižnej vôle po obvode strižníka (strižná medzera),
- nesprávna montáž nástroja po naostrení.

V opísanom prípade ale nešlo ani o jednu z týchto príčin. Po detailnom skúmaní sa zistilo pri meraní dielov strihacieho nástroja, že vedenie pre driek strižníka vo vodiacej doske je síce zhotovené presne z hľadiska rozmeru, ale z hľadiska jeho umiestnenia voči ostatným otvorom je posunutú v x-ovej osi o 0,067 mm. Vodiaca doska sa vyvolžkovala a opäťovne sa zhotovilo nové vedenie strižníka.

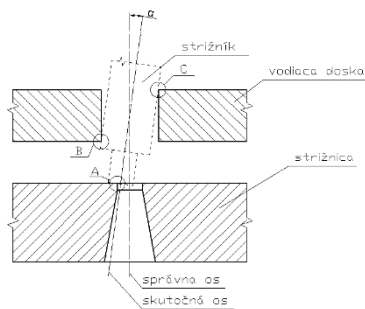
Na obr. 4 je zobrazený strižník po zhotovení 2 900 výstrižkov. Na rozdiel od obr. 4 hore je hrana opotrebovaná rovnomernejšie. Určenie chyby, jej analyzovanie a odstránenie spolu s úpravou bolo urobené správne. Obrázok 5 schematicky zachytáva optimálny stav nástroja a obr. 6 nevhodné pracovné podmienky procesu strihania.



Obr. 4. Makrosnímky činnej hrany strižníka (neleptané, zväčšenie 100x)



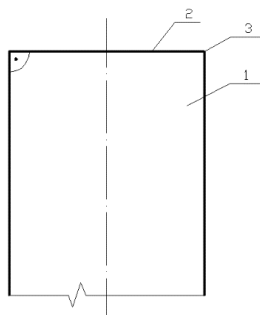
Obr. 5. Optimálny stav: strižník je v osi vodiacej dosky aj otvoru strižnice, H - vedenie materiálu/pásu plechu



Obr. 6. Schéma mechanizmu vzniku prídavných napätí a nadmerného jednostranného opotrebovania strižníka následkom nezhodnosti osí činných dielov, A - oblasť nadmerného opotrebovania strižnej hrany, α - uhol vychýlenia skutočnej osi od správnej osi, B, C - miesta nadmerného namáhania tela strižníka, vznik prídavných napätí

3.1 Geometrické parametre strižníkov a strižníc

Nástroj - v tomto prípade tvárniaci, konkrétne strižný, špeciálne strižník je potrebné chápať ako geometrické teleso v pokoji. Činná časť (časti) je tá časť, ktorá umožňuje proces strihania. Tvorí ju podľa obr. 7 - strižná hrana, os nástroja, základná plocha [6].



Obr. 7. Schéma strižníka: 1 - os nástroja, 2 - základná plocha, 3 - strižná hrana

Ostrenie nástrojov je obrábanie brúsnyim kotúčom, ktorého brúsne zrná majú definovanú veľkosť, ale nie sú orientované. Technologické charakteristiky takéhoto rezného nástroja (brúsneho kotúča) majú náhodný charakter. Výsledkom obrábania je obrobený povrch ako sústava rovnobežných stôp po jednotlivých zrnách. Zrná režu z povrchu brúsenej plochy materiál vo forme triesok. Brúsiace zrná majú záporné uhly čela a rezná rýchlosť je vysoká. Následkom je vznik intenzívnej plastickej deformácie a vyvíja sa značne vysoké množstvo tepla v zóne rezania. Pri nepriaznivej orientácii brúsiacich zrn sa trieska taví, čo svedčí o vysokých teplotách v oblasti rezania. Teplota rezania je dôležitou charakteristikou procesu ostrenia nástrojov. Jej veľkosť je závislá od rezných podmienok, druhu brusiva a chladiaceho média. Nástroje z rýchlorezných ocelí sa nachádzajú pri ostrení v metastabilnom stave, preto teplota v mieste styku s brúsiacim kotúčom môže ovplyvniť ich štruktúru. Odbrousí sa len hrúbka max. 0,3 mm. Zdôvodnenie je v [6] na strane 107. Pokiaľ ide

o ostrenie strižníkov z praktických poznatkov autora z prevádzky je potvrdené, že optimom je odbrúsenie iba 0,2 mm. Výdatné chladenie je nevyhnutné a tiež v prípade odstupňovaných strižníkov sa nesmie zabudnúť na to, že z každého strižníka sa musí odbrúsiť rovnaký rozmer. Platí zásada - viac ostrení je výhodnejšie ako odbrúsenie veľkej triesky na jeden raz. Pri väčšom počte ostrení sa skôr zachytí chyba nástroja ako vtedy, keď je značné opotrebovanie strižnej hrany [7-10].

ZÁVER

Príspevok sa zaoberal problematikou strihacích nástrojov. Nemožno podceňovať správne zoradenie nástroja a jeho nastavenie. Dôležité a žiaduce je preto strihací nástroj sledovať a zaznačovať jeho vonkajšie prejavy, t. j. rovnomernosť rozdelenia opotrebovania strižných hrán, sledovať jeho výkonnosť teda počet vyrobených výstrižkov do opotrebovania. V prípade nesprávneho vyhotovenia nástroja ako v ilustrovanom prípade nemožno nastaviť optimálnu strižnú medzeru.

LITERATÚRA

- [1] MORAVEC, J. (2020): *Analýza nadmerného opotrebovania strižníkov z nástroja WI-2025000-A-1*. Viena international spol. s r. o. Martin.
- [2] 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
- [3] HRIVŇÁK, A. - EVIN, E. - SPIŠÁK, E. (1985): *Technológia plošného tvárnenia*. Bratislava.
- [4] MORAVEC, J. (2015): *Teória tvárnenia kovov*. EDIS - vyd. UNIZA, ISBN 978-80-554-1095-1, Žilina.
- [5] POLLÁK, L. (1988): *Anizotropia a hĺbkoťažnosť ocelových plechov*. ALFA Bratislava.
- [6] BOLJANOVIC, V. (2005): *Sheet Metal forming processes and die Design*. ISBN 0-8311-3182-9.
- [7] *Metal Forming, Mechanics and Metallurgy*, Cambridge: University Press. ISBN 978-1-107-00452-8.
- [6] VASILKO, K. - MICHEL, D. - HRUBEC, J. (19894): *Brúsenie a ostrenie rezných nástrojov*. ALFA Bratislava.
- [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 978-3540051978.
- [9] MARCINIAK, Z. (1984): *Theorie der Blechformung*. Praha: STNL
- [10] PEARCE, R. (2010): *Sheet Metal Forming*. ISBN 0-7503-0101-5.

Matematický model pohonnej sústavy koľajového vozidla

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

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.blatnický@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

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

Sebastián Solčanský, Ing., PhD.

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

A mathematical model of a rail vehicle drivetrain

Abstract: The presented research is aimed at the derivation of a mathematical model of diesel-mechanical drivetrain of a rail vehicle. It is derived by means of the *Lagrange's equations of the second kind*. The derived mathematical model allows to understand the essential principle of the derivation of the mathematical model of the diesel-mechanical drivetrain of a rail vehicle, an application of the numerical mathematical methods for the solving the equations of motion and for evaluation of the wanted outputs quantities, such as waveforms of revolutions and torques of shafts and others.

Keywords: a rail vehicle, a mathematical model, a drivetrain, *Matlab*

ÚVOD

V súčasnosti je možné dopravné prostriedky koľajovej dopravy rozdeliť do dvoch hlavných skupín v závislosti od zdroja energie. Aj keď sú koľajové vozidlá závislej trakcie čoraz obľúbenejšie a mnohé európske krajiny sa z nich snažia stavať nové a nové trate, nedokážu fungovať vo všetkých kútoch krajiny [1, 2]. Sú regióny, kde sa výstavba trate s elektrickou sieťou neoplatí, je príliš náročná alebo existujú iné dôvody, prečo by sa elektrická sieť pre elektrické

koľajové vozidlá nemala rozširovať [3, 4]. Samostatné koľajové vozidlá sú v súčasnosti známe najmä ako vlakové jednotky (obr. 1).

Predkladaný výskum je súčasťou komplexného projektového výskumu zameraného na skúmanie javov v pohonnej sústave železničnej jednotky pri zmene výkonových pomerov. Hlavným cieľom je odvodiť výpočtový model pohonnej sústavy železničnej vlakovéj jednotky. Napriek tomu, že diesel-mechanický prevodový systém s pružnou

spojkou alebo s trecou lamelovou spojkou je v súčasnosti jedným z najstarších prevodových systémov, odvodenie činnosti jeho prevodového systému vyžaduje pochopenie základov používaných metód. Prezentácia dosiahnutých poznatkov preto ponúka vedcom a výskumníkom možnosť vidieť uvažovaný postup ďalších aktivít, ktoré povedú k vytvoreniu celej železničnej vlakovej jednotky s moderným a ekologickým prenosom výkonu.



Obr. 1. Príklad DM jednotky produkcie slovenského výrobcu

1 ODVODENIE MATEMATICKÉHO MODELU

Hlavným cieľom je vytvorenie matematického modelu pohonnej sústavy železničného vozidla. Dieselový motor, ktorý je zdrojom energie, môže byť umiestnený nad rámom alebo je umiestnený pod podlahou. Riadiaca stanica môže byť na oboch koncoch, na jednom konci alebo v samostatnom vozni. Naftové viac-vožňové jednotky (DMU) sa zvyčajne klasifikujú podľa toho, akým spôsobom sa hnacia sila prenáša na ich kolesá. V prípade dieselového mechanického združeného agregátu (DMMU) sa mechanická energia motora prenáša na kolesá pomocou prevodovky a hnacieho hriadeľa. Je to podobný systém ako v cestnom vozidle. Vo väčšine aplikácií sa prevody menia pomocou automatického prevodového systému [5-7].

Matematický model pohonnej sústavy obsahuje pohybové rovnice. Z matematického hľadiska sú to diferenciálne rovnice a odvodzujú sa vhodnou metódou. V našom prípade sa ako vhodná metóda javí metóda *Lagrangeových rovníc druhého druhu*. Všeobecný tvar *Lagrangeových rovníc druhého druhu* je nasledujúci:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} + \frac{\partial E_d}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial E_p}{\partial q_i} = Q_i, \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

kde E_k je kinetická energia sústavy,

E_d je disipatívna energia sústavy,

E_p je potenciálna energia sústavy,

q_i sú zovšeobecnené súradnice sústavy,

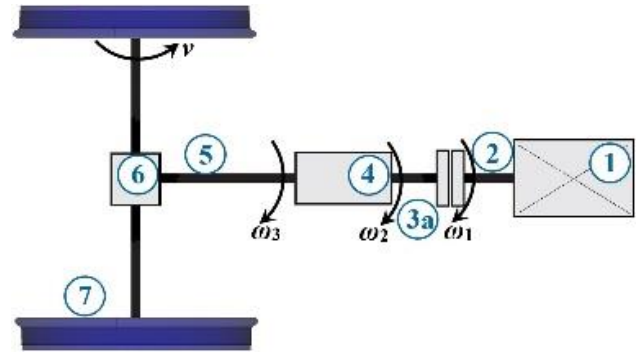
\dot{q}_i sú zovšeobecnené rýchlosti,

Q_i reprezentuje zaťaženie sústavy,

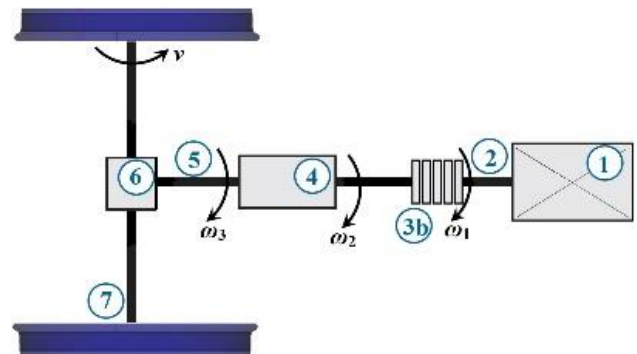
n je počet stupňov voľnosti sústavy ($^{\circ}V$).

Zjednodušenú schému mechanického systému diesel-mechanickej pohonnej sústavy s pružnou spojkou je možné vidieť na obr. 2. Pozostáva z relatívne samostatných komponentov ako sú: motor (1), kľukový hriadeľ (2), pružná spojka (3a), prevodovku

(4), výstupný hriadeľ (5), rozdeľovaciu prevodovku (6) a hnané dvojkolesie (7).



Obr. 2. Zjednodušená schéma hnacej sústavy s pružnou spojkou



Obr. 3. Zjednodušená schéma hnacej sústavy s trecou lamelovou spojkou

Všetky komponenty sa považujú za tuhé okrem spojky. To znamená, že tento mechanický systém je opísaný pomocou dvoch zovšeobecnených súradníc. K relatívnemu pohybu dochádza práve v pružnej spojke [8]. Zovšeobecnené súradnice sú uhly natočenia vstupného hriadeľa spojky φ_1 a výstupného hriadeľa spojky φ_2 . Uhol natočenia φ_3 je súradnica, ktorá sa vzťahuje na výstupný hriadeľ prevodovky. Mechanický systém má teda dva stupne voľnosti ($2^{\circ}V$) a tieto nezávislé uhlové pohyby sú opísané súradnicami φ_1 a φ_2 . Keď vezmeme do úvahy zjednodušenú schému hnacieho ústrojenstva, potrebné energie na odvodenie pohybových rovníc sú nasledovné:

- kinetická energia:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot (I_1 \cdot \dot{\varphi}_1^2 + I_2 \cdot \dot{\varphi}_2^2 + I_3 \cdot \dot{\varphi}_3^2 + m_c \cdot v^2) = \frac{1}{2} \cdot \left[I_1 \cdot \dot{\varphi}_1^2 + \left(I_2 + \frac{I_3}{i_c^2} + \frac{m_c \cdot R^2}{i_c^2} \right) \cdot \dot{\varphi}_2^2 \right] \quad (2)$$

kde I_1 , I_2 a I_3 a momenty zotrvačnosti komponentov systému, ktorý sa pohybuje rýchlosťou otáčania $\dot{\varphi}_1$, $\dot{\varphi}_2$, $\dot{\varphi}_3$

m_c je celková hmotnosť vozidla,

R je priemer kolesa

i_c je celkový prevodový pomer prevodového systému, pričom $i_c = i_{pa} \cdot i_{pr}$, kde i_{pa} je prevodový

pomer aktívneho stupňa a i_{pr} je prevodový pomer rozdeľovacej prevodovky,

- disipatívna energia:

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot (b_1 \cdot \dot{\varphi}_1^2 + b_2 \cdot \dot{\varphi}_2^2), \quad (3)$$

kde b_1, b_2 sú súčinitele viskózných strát,

- potenciálna energia:

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot (\varphi_2 - \varphi_1)^2, \quad (4)$$

kde k je súčiniteľ torznej tuhosti spojky a uvažujeme, že $\varphi_2 > \varphi_1$.

Je potrebné poznamenať, že sa uvažuje rovnaká obvodová rýchlosť kolesa ako má vozidlo v ťažisku, t. j. nedochádza k deformáciám kolesa a ani k jeho preklzu. Ďalej rovnica 2 ukazuje vyjadrenie ďalších súradníc alebo kinematických veličín, t. j. φ_3 a v pomocou definovaných zovšeobecnených súradníc φ_1 a φ_2 . Platia teda nasledujúce vzťahy:

$$\frac{\dot{\varphi}_2}{\dot{\varphi}_3} = i_c \quad \Rightarrow \quad \dot{\varphi}_3 = \frac{\dot{\varphi}_2}{i_c} \quad (5)$$

$$v = R \cdot \dot{\varphi}_3 \quad \Rightarrow \quad v = R \cdot \frac{\dot{\varphi}_3}{i_c}.$$

Pravá strana rovnice 1 zahŕňa vonkajšie zaťaženia systému. V našom prípade sú tieto zaťaženia dané momentmi pôsobiacimi na jednotlivé komponenty. Kľukový hriadeľ je zaťažený hnacím momentom motora M_k a výstupný hriadeľ z prevodovky je zaťažený momentom odporov M_r . Hoci moment M_r pôsobí na súčiastku (6), mal by byť premenený aj na hriadeľ (3a), teda súčiastke otáčajúcej sa uhlovou rýchlosťou $\dot{\varphi}_2 = \omega_2$. Po výpočte odvodenia jednotlivých energií a zohľadnení opísaných predpokladov je výsledný matematický model diesel-mechanického prenosu výkonu železničného vozidla s pružnou spojkou:

$$\begin{aligned} I_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + b_1 \cdot \dot{\varphi}_1 + k \cdot \varphi_1 - k \cdot \varphi_2 &= M_k \\ \left(I_2 + \frac{I_3}{i_c^2} + \frac{m_c \cdot R^2}{i_c^2} \right) \cdot \ddot{\varphi}_2 + b_2 \cdot \dot{\varphi}_2 - k \cdot \varphi_1 + k \cdot \varphi_2 &= -M_r \end{aligned} \quad (6)$$

alebo v maticovej forme:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_1 & 0 \\ 0 & I_2 + \frac{I_3}{i_c^2} + \frac{m_c \cdot R}{i_c^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} M_k \\ -M_r \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

Prevodový systém s trecou lamelovou spojkou je znázornený na obr. 3. V tomto prípade je trecí moment v systéme uvažovaný nasledovne:

$$M_f = S \cdot p \cdot f \cdot N \cdot R_f, \quad (8)$$

kde S je plocha piestu spojky,

p je okamžitý tlak oleja,

f je koeficient trenia,

N je počet trecích dvojíc spojky,

R_f je stredný polomer lamiel spojky.

Určené energie systému, t. j. kinetická energia E_k (rov. 2), disipatívna energia E_d (rov. 4) a potenciálna energia E_p (rov. 5) pre systém s pružnou spojkou sú v princípe rovnaké pre systém s trecia lamelová spojka. Keď vezmeme do úvahy trecí moment M_f (rov. 8), systém pohybových rovníc je nasledujúci:

$$\begin{aligned} I_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + b_1 \cdot \dot{\varphi}_1 + k \cdot \varphi_1 - k \cdot \varphi_2 &= M_k - M_f \\ \left(I_2 + \frac{I_3}{i_c^2} + \frac{m_c \cdot R^2}{i_c^2} \right) \cdot \ddot{\varphi}_2 + b_2 \cdot \dot{\varphi}_2 - k \cdot \varphi_1 + k \cdot \varphi_2 &= M_f - M_o \end{aligned} \quad (9)$$

alebo v maticovej forme:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_1 & 0 \\ 0 & I_2 + \frac{I_3}{i_c^2} + \frac{m_c \cdot R}{i_c^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} M_k - M_f \\ M_f - M_o \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

Výpočet odvodených pohybových rovníc systému s pružnou spojkou (rov. 7) a pohybových rovníc systému s trecou lamelovou spojkou sa vykonáva pomocou technického programovacieho jazyka Matlab [9, 10]. Vypočítali sme pohybové rovnice v časovej oblasti pre predpísané počiatkové podmienky. Pre oba zjednodušené modely sme zvážili nasledujúce začiatkové podmienky:

$$t = 0: \quad \varphi_1 = \varphi_2 = 0; \quad \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2 = 0. \quad (11)$$

2 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Ako už bolo uvedené vyššie, vytvorené matematické modely prevodového systému s pružnou spojkou (rov. 7) a prevodového systému s trecou lamelovou spojkou (rov. 10) sú riešené v časovej oblasti v programe *Matlab*.

Dosiahnuté výsledky sú zobrazené vo forme grafov, ktoré zobrazujú priebeh vybraných výstupných veličín. Obrázok 4 znázorňuje priebeh výstupných veličín diesel-mechanickej prevodovky s pružnou spojkou. Tento graf obsahuje päť kriviek, ktoré sú označené nasledovne: M_k – krútiaci moment motora, M_o – moment odporu, M_t – celkový moment zaťaženia, M_{pr} – moment pasívnych odporov, n_1 – otáčky kľukového hriadeľa 2 (obr. 2) a δ – relatívna výchylka oboch častí pružnej spojky.

Na ilustráciu výstupov bol zvolený časový interval 5 sekúnd. Moment M_o predstavuje jazdný odpor vozidla. Moment pasívnych odporov zahŕňa straty v ložiskách, ozubených kolesách a iných komponentoch (trenie, valivé a pod.). Ako je vidieť, moment motora stúpa z počiatkovej hodnoty približne 1500 Nm počas časového intervalu cca. 0,8 s. Spolu s

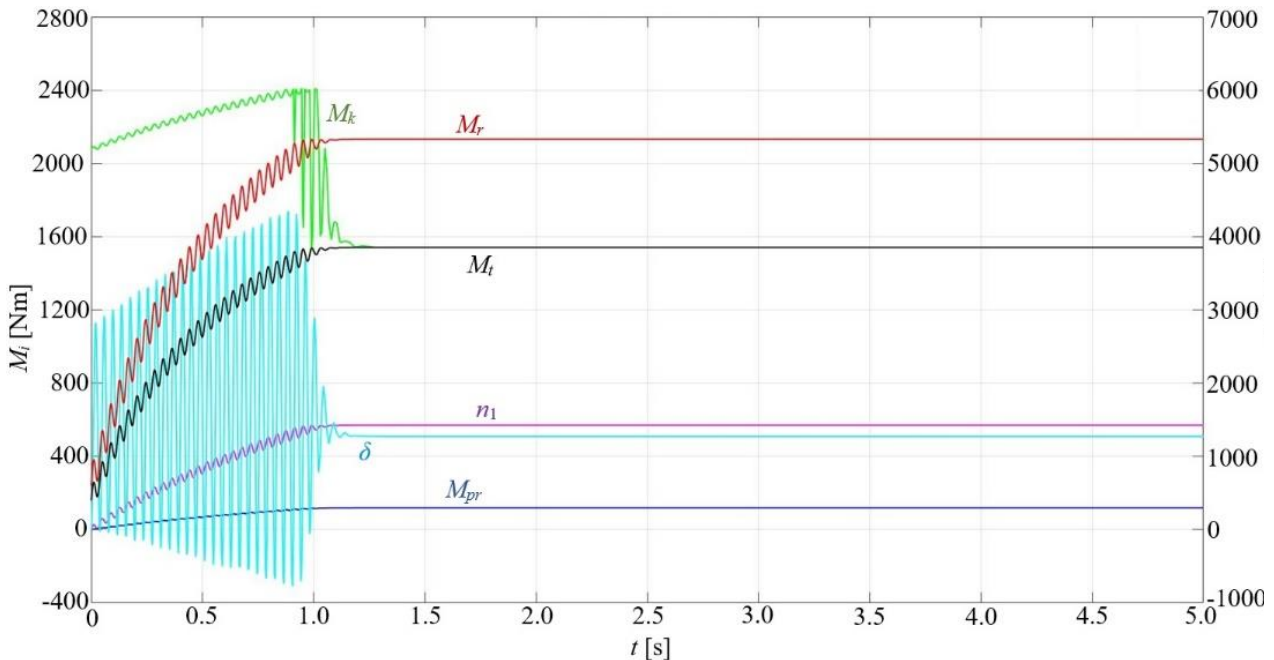
ním vyvoláva aj moment odporu M_o . Pri určitej hodnote týchto momentov sa dosiahne momentová rovnováha. Je to aplikácia po 1,15 s.

Po tomto čase sa dosiahne rovnováha mechanického systému prevodovky a hodnoty momentov a otáčok kľukového hriadeľa sú konštantné. Tento ustálený

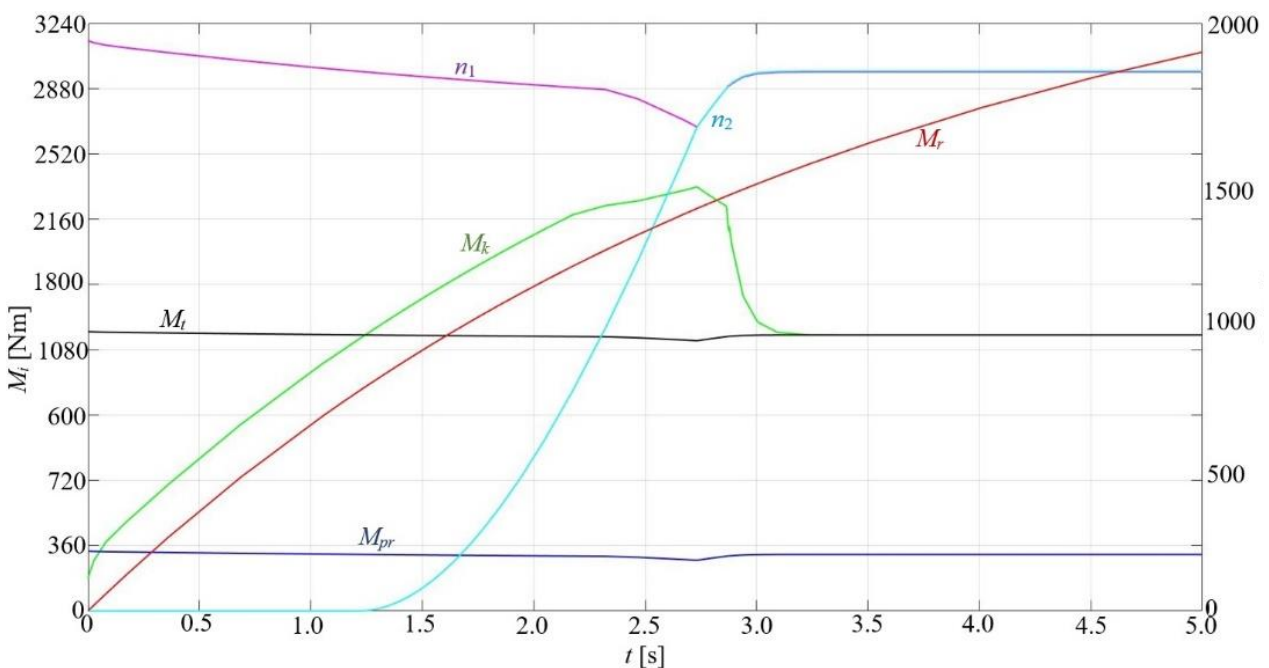
stav by bol narušený v prípade zmeny zaťaženia, napr. zmena jazdného odporu, teda zmena momentu M_r alebo M_t . Zaujímavým výstupom je relatívna výchylka pružných častí spojky (δ). Ako je vidieť, pri nevyváženom stave, ktorý zodpovedá nábehu mechanického systému prevodovky, sa tento uhol mení na hodnoty +/- . Je to spôsobené pružnosťou

spojky, ktorú pozorujeme v časovom intervale 1,15 s. Po dosiahnutí ustáleného stavu (po 1,15 s) relatívna výchylka častí spojky zmizne a obe časti pružnej spojky sa otáčajú rovnakými otáčkami (časový interval 1,15 s až 5 s).

Priebehy výstupných veličín diesel-mechanického



Obr. 4. Priebeh výstupných veličín systému s pružnou spojkou



Obr. 5. Priebeh výstupných veličín systému s trecou lamelovou spojkou

prevodového systému koľajového vozidla sú znázornené na obr. 5. V tomto prípade sme pozorovali šesť výstupných veličín. Ide konkrétne o výstupy: M_k – moment motora, M_r – moment odporu, M_t – celkový moment zaťaženia, M_{pr} – moment pasívnych odporov, n_1 – otáčky kľukového hriadeľa 2 (obr. 3) a n_2 –

stav by bol narušený v prípade zmeny zaťaženia, napr. zmena jazdného odporu, teda zmena momentu M_r alebo M_t . Zaujímavým výstupom je relatívna výchylka pružných častí spojky (δ). Ako je vidieť, pri nevyváženom stave, ktorý zodpovedá nábehu mechanického systému prevodovky, sa tento uhol mení na hodnoty +/- . Je to spôsobené pružnosťou

otáčky výstupného hriadeľa lamelovej spojky (obr. 3).

Odlíšne správanie vznetovej prevodovky s trecou lamelovou spojkou je zrejmé na prvý pohľad. V grafe sú tieto výstupy opäť zobrazené v časovom intervale 5 s. Je vidieť, že nástup krútiaceho momentu kľukového hriadeľa M_k nie je v porovnaní s pružnou spojkou taký prudký. Podobne aj priebehy ostatných momentov sú hladšie. Otáčky kľukového hriadeľa n_1 dosiahnu rovnováhu s otáčkami n_2 výstupného hriadeľa spojky po 2,75 sekundách. Je tiež vidieť, že krútiaci moment a moment zaťaženia dosahujú rovnováhu po cca. 3,15 s. Hladší nástup momentov a rotácií hriadeľov možno vysvetliť princípom činnosti trecej lamelovej spojky. Spojka prenáša krútiaci moment cez svoje lamely, pri ktorých dochádza k určitému preklzu. Tento sklz robí plynulejšie priebehy momentov. Tlak medzi lamelami dosiahne maximálnu hodnotu a potom sú momenty (krútiaci moment a odporové momenty) rovnaké ako aj otáčky hriadeľov n_1 a n_2 . Tretia lamelová spojka vykazuje hladší chod prevodového ústrojenstva, čo prispieva k vyššiemu komfortu jazdy pre pasažierov, lepšej kontrole momentov v sústave a vyššej ochrane proti preťaženiu.

Budúci výskum bude zameraný na tvorbu matematických modelov iných typov *DMU*, a to na *DHMU* a *DEMU*. Tieto uvažované modely prenosovej sústavy sa zdajú byť komplikovanejšie. Hydraulický systém pracujúci v prevodovom systéme je potrebné opísať zložitejším modelom vrátane zmeny tlaku v hydrodynamickom meniči. Princíp činnosti *DMU*, ktoré sú najpoužívanejšími *DMU*, bude ešte komplikovanejší. Súvisí to so skutočnosťou, že spaľovací motor poháňa generátor a následne elektrina elektromotory v poháňaných podvozkoch. Perspektívnym riešením tohto problému je vytvorenie *MBS* modelu prevodového systému železničného vozidla [11, 12]. Záverečným krokom výskumu budú výsledky matematických modelov z Matlabu a tiež *MBS* modelov porovnané s perspektívou dosiahnutia uspokojivých výsledkov.

ZÁVER

V niektorých krajinách sa stále používajú železničné vozidlá s nezávislým zdrojom energie. Existujú lokomotívy alebo železničné vlakové jednotky. Tieto železničné vozidlá využívajú niekoľko typov prenosových systémov. Líšia sa od seba zložitou, účelom použitia, požiadavkami na prenášaný výkon, krútiaci moment a iné. Jedným z najjednoduchších prevodových systémov železničného vozidla s nezávislým hnacím ústrojenstvom je diesel-mechanický prevodový systém. Obsahuje motor, spojku, prevodovku a ďalšie potrebné komponenty. V prípade skúmania prevádzkových podmienok týchto koľajových vozidiel je potrebný matematický model.

Tento príspevok bol zameraný na odvodenie matematického modelu diesel-mechanického prevodového systému koľajového vozidla. Matematický model bol odvodený pomocou Lagrangeových rovníc druhého druhu. Boli nastavené dva matematické modely, a to pre prevodový systém s pružnou spojkou a s trecou lamelovou spojkou. Na základe matematických modelov boli vykonané simulácie štartu týchto prenosových sústav. Výsledky simulácií boli prezentované vo forme grafických výstupov. Dosiahnuté výsledky ukázali rozdiely v tvare vlny jednotlivých výstupných veličín. Uvedený postup je možné aplikovať na odvodenie matematických modelov zložitejšej prenosovej sústavy koľajových vozidiel.

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] KOSTRZEWSKI, M. - MELNIK, R. (2021): *Condition monitoring of rail transport systems: A bibliometric performance analysis and systematic literature review*. In: Sensors, Vol. 21, No. 14, pp. 1-63.
- [2] DVORAK, Z. - LEITNER, B. - NOVAK, L. (2016): *Software support for railway traffic simulation under restricted conditions of the rail section*. In: Procedia Engineering, Vol. 134, pp. 245-255.
- [3] FALENDYSH, A. - KHARLAMOV, P. - KLETSKA, O. - VOLODARETS, N. (2016): *Calculation of the parameters of hybrid shunting locomotive*. In: Transport Research Arena TRA2016, Vol. 14, pp. 665-671.
- [4] RABINOVICH, E. - GRITSUK, I. V. - ZUIEV, V. - EVGENY, E. Y. - GOLOVAN, A. - ZYBTSEV, Y. - VOLKOV, V. - GERLICI, J. - KRAVCHENKO, K. - VOLSKA, O. - RUDNICHENKO, N. (2018): *Evaluation of the powertrain condition based on the car acceleration and coasting data*. In: SAE Technical Papers, Vol. 2018, pp. 1-12.
- [5] LOVSKA, A. - BURLUTSKI, O. - FOMIN, O. - GORBUNOV, M. - BUREIKA, G. - STEISUNAS, S. - VAICIUNAS, G. (2019): *The improved carrying structure of a passenger car for the appropriate strength in train ferry transportation*. In: Proceedings of the 24th International Conference on Current

Problems in Rail Vehicles, Žilina, Slovakia, pp. 17-26.

[6] PUKALSKAS, S. - KRIAUCIUNAS, D. - RIMKUS, A. - PRZYBYLA, G. - DROZDZIEL, P. - BARTA, D. (2021): *Effect of hydrogen addition on the energetic and ecologic parameters of an SI engine fuelled by biogas*. In: Applied Sciences, Vol. 11, No. 2, pp. 1-17.

[7] SZPICA, D. (2018): *Modelling of the operation of a dual mass flywheel (DMF) for different engine-related distortions*. In: Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, Vol. 24, No. 6, pp. 623-640.

[8] TOPCZEWSKA, K. - SCHLATTMANN, J. - ABDULLAH, O. I. (2020): *Temperature and thermal stresses distributions in a dry friction clutch*. In: Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 58, No. 2, pp. 315-360.

[9] FILO, M. - LUKÁČ, M. (2005): *Modelovanie a simulácie s počítačovou podporou*. EDIS-Vydavateľstvo Žilinskej univerzity v Žiline, 216 p.

[10] BRUMERCIK, F. - LUKAC, M. - CABAN, J. (2016): *Unconventional powertrain simulation*. In: Communications-Scientific Letters of the University of Zilina, Vol. 18, No. 2, pp. 30-33.

[11] GERLICI, J. - SAKHNO, V. - YEFYMENKO,

A. - VERBITSKII, V. - KRAVCHENKO, A. - KRAVCHENKO, K. (2018): *The stability analysis of two-wheeled vehicle model*. In: MATEC Web of Conferences, Vol. 157, pp. 1-10.

[12] KOZIAK, S. - CHUDZIKIEWICZ, A. - OPALA, M. - MELNIK, R. (2019): *Virtual software testing and certification of railway vehicle from the point of view of their dynamics*. In: Proceedings of the 13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport, Novy Smokovec, Slovak Republic, pp. 729-736.

[13] DÍŽO, J. - BLATNICKÝ, M. - ISHCHUK, V. - MOLNÁR, D. (2023): *Derivation of a simplified mathematical model of a DMUs powertrain*. In: 26th International Conference „Current Problems in Rail Vehicles - PRORAIL 2023“, September 20–22, 2023, Žilina, Slovakia, pp. 101-108, ISBN 978-80-89276-61-5.

[14] DÍŽO, J. - BLATNICKÝ, M. - ISHCHUK, V. - LOVSKA, A. - KRAVCHENKO, O. (2023): *Derivation of a simplified mathematical model of a rail vehicle powertrain with a hydrodynamic converter*. In: 26th International Conference „Current Problems in Rail Vehicles - PRORAIL 2023“, September 20–22, 2023, Žilina, Slovakia, pp. 101-108, ISBN 978-80-89276-61-5.

Stratégie frézovania tenkostenných komponentov z ťažkoobrobiteľného materiálu

Jakub Hrbál, Ing.

Ústav výrobných technológií, Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave,
Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Ulica Jána Bottu 25, 91724 Trnava.
E-mail: jakub.hrbal@stuba.sk, Tel.: + 421 948 954 326

Marek Vozár, Ing., PhD.*

Ústav výrobných technológií, Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave,
Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Ulica Jána Bottu 25, 91724 Trnava.
E-mail: marek.vozar@stuba.sk, Tel.: + 421 948 038 796

Boris Pätoprstý, Ing., PhD.

Ústav výrobných technológií, Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave,
Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Ulica Jána Bottu 25, 91724 Trnava.
E-mail: boris.patoprsty@stuba.sk, Tel.: + 421 902 287 050

Ivan Buranský, doc. Ing., PhD.

Ústav výrobných technológií, Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave,
Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Ulica Jána Bottu 25, 91724 Trnava.
E-mail: ivan.buransky@stuba.sk, Tel.: + 421 948 936 662

Milling strategies for thin-walled components made of difficult-to-cut material

Abstract: The paper deals with the issue of the influence of machining strategies and tool parameters on the quality of the machined surface of thin-walled parts made by *WAAM technology*. The current state of machining thin-walled parts is complemented by cutting tools in terms of materials, geometry, and tool wear. From the point of view of surface integrity, the roughness and flatness of machined thin-walled parts made of *Inconel 718* nickel alloy material will be observed. The machining strategy and cutting tool geometry were designed by experimental machining. The results of the experiment are presented in the conclusion. Achieved experimental results are a contribution to the efforts to expand the knowledge on the topic of machining thin-walled parts.

Keywords: milling strategy, thin-walled part, end mill, *WAAM*, optical 3D scanning

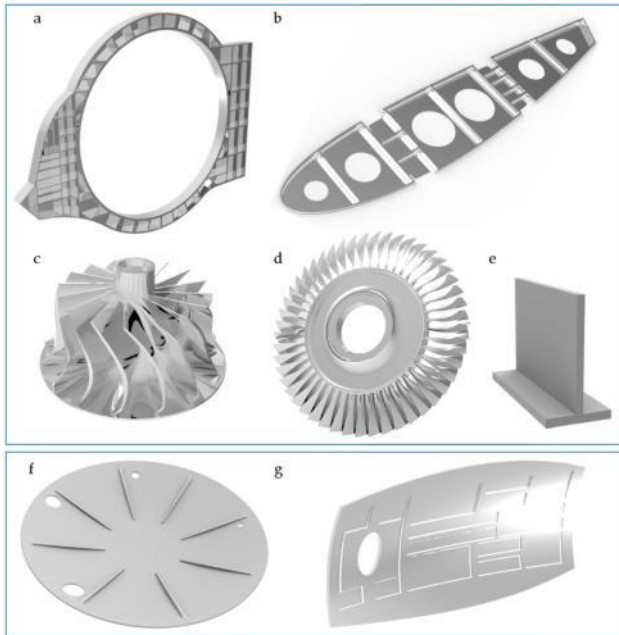
ÚVOD

Technológia obrábania je jednou z najbežnejšie používaných metód na výrobu rôznych komponentov. Medzi dôvodmi pretrvávajúcej potreby uskutočňovať štúdie obrábania je rastúci dopyt po vyšších rýchlostiach úberu materiálu a zavádzanie nových materiálov. Na jednej strane je potreba zvýšiť produktivitu zvýšením rýchlosti úberu kovu alebo odstránenie, čo najmenšieho množstva materiálu k dosiahnutiu finálneho tvaru súčiastky. Na druhej strane je úsilie priemyslu nájsť materiály s vynikajúcimi vlastnosťami, ktoré by vyhovovali požiadavkám na dizajn a dokážu vydržať extrémne pracovné podmienky. Nové materiály majú jedinečné metalurgické vlastnosti a prinášajú nové výzvy v

obrábaní. Pre tieto materiály sa používa pojem ťažkoobrobiteľné materiály (*difficult-to-cut materials*). Tieto materiály sa vyznačujú vysokou húževnatosťou, odolnosťou proti korózii, oxidácii a zachovávajú si svoje mechanické vlastnosti pri vysokých teplotách [1].

Tenkostenné súčiastky sa vo väčšine prípadov klasifikujú z hľadiska pomeru rozmerov súčiastky. Na základe odbornej a vedeckej literatúry by sa dala tenkostenná súčiastka definovať ako súčiastka tvorená stenami, ktoré sú vysoké, tenké a aj pri malých rezných silách sa deformujú. Hlavnou charakteristikou tenkostennej súčiastky je nedostatočná tuhosť a vznik chvenia pri obrábacom procese. Na výrobu tenkostenných súčiastok sa

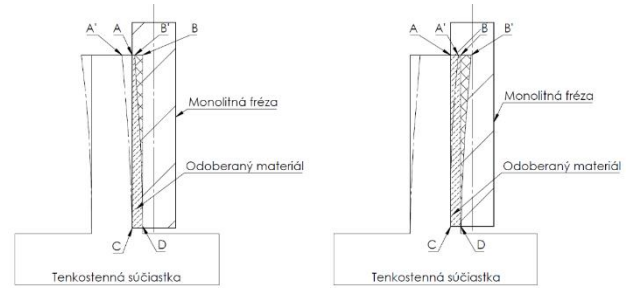
používajú spôsoby obrábania, ako sú frézovanie, sústruženie a progresívne metódy obrábania. Produktivita procesu obrábania tenkostenných súčiastok, typických pre letecký a energetický priemysel, je stále obmedzená problémami s presnosťou. Tenkostenné súčiastky majú malú tuhosť a pri obrábaní dochádza ku chybám, ktoré sú spôsobené vibráciami [2] a statickou deformáciou [3]. Príklady typických tenkostenných súčiastok sú znázornené na obr. 1.



Obr. 1. Príklady tenkostenných súčiastok: a) rám, b) rebro, c) obežné koleso, d) turbína, e) jednoduchá tenkostenná súčiastka, f) prepážka, g) kryt [4]

Kľúčový faktor ovplyvňujúci presnosť je statické vychýlenie obrobku, ktoré je spôsobené reznou silou vznikajúcou pri procese obrábania. Pri výrobe súčiastok frézovaním dochádza k zmene tuhosti súčiastky s postupným odoberaním materiálu, čo má nepriaznivý vplyv na celý proces výroby. Odoberaním materiálu sa znižuje tuhosť obrobku a vplyvom rezných síl môže dôjsť ku vzniku samobudeného chvenia. Nestabilita obrobku pri obrábaní je určená relatívnou kmitavou výchylkou medzi nástrojom a obrobkom. Takáto výchylka tenkostennej súčiastky spôsobuje zhoršenie integrity povrchu obrobenej plochy. Proces frézovania tenkostennej súčiastky je veľmi komplikovaný, pretože vznikajúce rezné sily sa periodicky menia a pôsobia na súčiastku a nástroj staticky a dynamicky. Pri obrábaní tenkostenných súčiastok je nutné uvažovať o dynamickej poddajnosti obrobku pri optimalizácii technologických podmienok [2, 3].

Pri prerušovanom obrábaní sa proces môže stať nestabilným. Medzi obrobkom a nástrojom dochádza k vzniku vibrácií a chvenia, čo má za následok deformáciu tenkostennej súčiastky. Vznik deformácií tenkostenných súčiastok je znázornený na obr. 2.



Obr. 2. Deformácia tenkostennej súčiastky pri obrábaní [5]

Na obr.2 sú znázornené body ABCD, ktoré reprezentujú odoberaný materiál. Pôsobením rezných síl pri obrábaní sa bod A posunie do polohy A' a bod B sa posunie do bodu B'. Vplyvom deformácií sa odreže materiál, ktorý je reprezentovaný bodmi ABCD. Po frézovaní sa obrobený povrch elasticky vráti späť. Materiál ACA nie je odobratý a tým dochádza ku vzniku hrubšej steny v hornej časti súčiastky. V druhom prípade dochádza ku vzniku hrubšej spodnej časti súčiastky. Materiál sa elasticky vráti späť a spolu s materiálom ABCD je odrezaný materiál ACA. Pri frézovaní tenkostenných súčiastok sa používajú stopkové frézy, ktoré majú veľké vyloženie a môže dôjsť k odtlačeniu nástroja. Takto vychýlený nástroj neobrába celý materiál, ale vzniká tvarová odchýlka a zhoršuje sa kvalita obrobeného povrchu. Vplyvom odtlačenia nástroja vzniká na obrobenom povrchu nerovnomerná hrúbka steny. Obrobený povrch pozostáva z povrchov vytvorených jednotlivými reznými hranami. Pri valcovom frézovaní nie je hrúbka triesky konštantná. Autori *Laamouri a kol.*, *Ratchev a kol.* používali pri svojich experimentoch súbežné frézovanie [6, 7]. Pri frézovaní tenkostenných súčiastok je súbežné frézovanie lepšie ako protibežné [8].

Voľba vhodnej stratégie frézovania môže do značnej miery ovplyvniť výsledok obrábacieho procesu. Výber stratégie obrábania závisí od tvaru, veľkosti obrábaných plôch a od požadovanej kvality obrábaného povrchu. Proces obrábania delíme na hrubovacie a dokončovacie operácie. Hrubovacími operáciami odoberáme podstatnú časť materiálu z polotovaru až po rozmery súčiastky, ktoré sú zväčšené o prídavok na dokončovacie obrábanie. Pod pojmom dokončovacie obrábanie sa rozumie obrábanie s takými reznými parametrami, pri ktorých by mali byť dosiahnuté požadované vlastnosti súčiastky a integrity povrchu [9].

1 MATERIÁLY A METÓDY

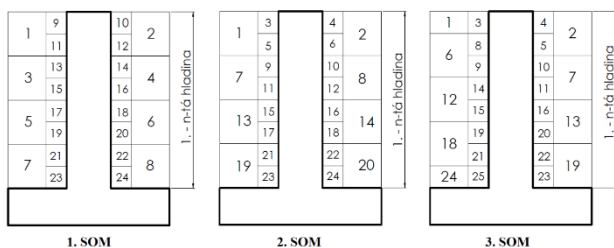
Inconel 718 patrí do skupiny tzv. „superzliatin“. Pojem *superzliatiny* označuje skupinu zliatin, ktoré sú schopné udržať si svoje mechanické vlastnosti po dlhodobom vystavení zvýšeným teplotám. Vďaka svojim vynikajúcim chemickým, mechanickým a fyzikálnym (tab. 1) vlastnostiam sa zliatiny niklu stali atraktívnym materiálom pre letecký, jadrový

a kozmický priemysel. Používajú sa na výrobu raketových motorov, lopatiek turbín a pri stavbe reaktorov a ako tyče palivových čerpadiel. *Superzliatiny* sa rozdeľujú do troch skupín podľa ich primárnych zložiek, konkrétne na zliatiny na báze železa a niklu, niklu a kobaltu. *Superzliatiny* na báze kobaltu a niklu vykazujú vynikajúce vlastnosti pri zvýšených teplotách [10, 11].

Tab. 1. Základné fyzikálne vlastnosti zliatiny Inconel 718 [12]

Parameter	Hodnota
Hustota	8190 kg·m ⁻³
Koeficient tepelnej rozťažnosti	13,0 μm·m ⁻¹ ·°C ⁻¹
Teplota tavenia	1260-1336 °C
Špecifické teplo	435 J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹
Tepelná vodivosť	11,4 W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹

Prístup k riešeniu problematiky obrábania tenkostenných súčiastok nadväzoval na dizertačnú prácu *doc. Ing. Ivana Buranského, PhD.* Autor skúmal vplyv stratégií frézovania na kvalitu obrobeného povrchu tenkostenných súčiastok. Materiál obrobku bola zliatina hliníka EN 6082. V dizertačnej práci boli vybrané tri spôsoby odoberania materiálu (*SOM*). Tieto spôsoby odoberania materiálu sa používajú pre obrábanie tenkostenných súčiastok (1.1.3). Použité spôsoby odoberania materiálu, ktoré boli experimentálne použité (1. *SOM*, 2. *SOM* a 3. *SOM*) sú zobrazené na obr. 3.

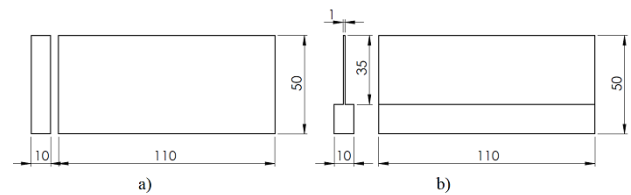


Obr. 3. Použité stratégie pre obrábanie [5]

Počas obrábania boli sledované rezné sily pomocou dynamometra *KISTLER typ 9552 A*, ktorý pracuje na princípe piezoelektrického javu. Pri frézovaní bola použitá stopková valcová fréza s priemerom 16 mm. Výsledky tohto experimentu viedli k záveru, že pre tenkostenné súčiastky je najvhodnejšie použiť spôsob odoberania materiálu 3. *SOM*. Pri tomto spôsobe obrábania bol priebeh rezných síl počas frézovania stabilnejší, pretože je stena z druhej strany podopretá neobrobeným materiálom, čím sa zvyšuje jej tuhosť. Tvar a rozmery súčiastky určenej pre experimenty sú uvedené na obr. 4.

Na výrobu stopkových rezných nástrojov bol použitý spekaný karbid *CTS24Z* od firmy *Ceratizit Group*. Polotovar pre výrobu rezných nástrojov mal rozmery 10h6 x 73 mm. Materiál sa používa na výrobu

vysokovýkonných rezných nástrojov na obrábanie ťažkoobrobiteľných nástrojov. Tento materiál ponúka vysokú priemyselnú kvalitu s dobrým pomerom cena/výkon. Tabuľka 2 zobrazuje základné vlastnosti materiálu *CTS24Z*.

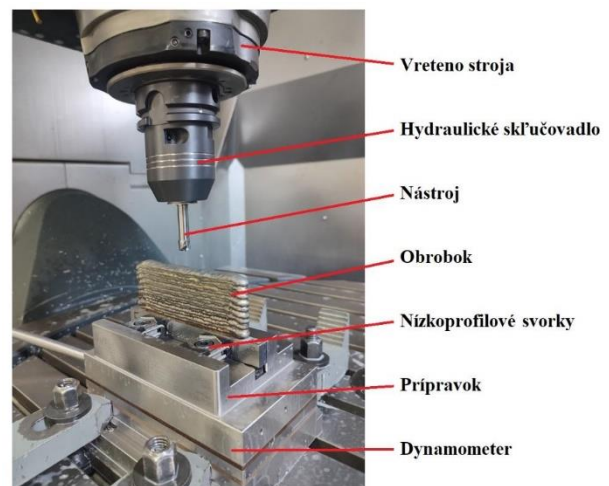


Obr. 4. Tvar: a) polotovar, b) konečný tvar súčiastky

Tab. 2. Základné vlastnosti materiálu TS24Z [13]

Hustota [g·cm ⁻³]	Tvrdosť HRA	Spojivo [hm %]	Pevnosť v ťahu [MPa]	ISO označenie
14,10	91,7	12,0	4000	K20-K40

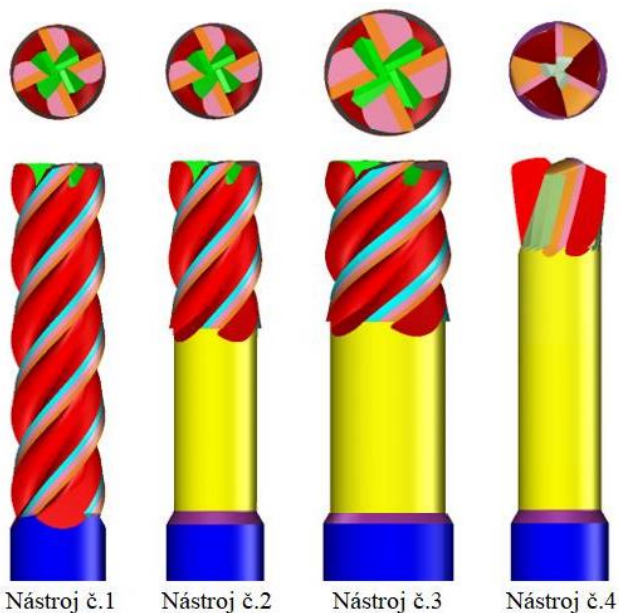
Experimenty frézovania sa uskutočnili na 5-osovom obrábacom centre *DMG DMU 85*. Ako upínací systém bolo použité hydraulické skľučovadlo *CoroChuck 930*. Dráhy nástroja sú generované pre operáciu čelného frézovania. Tieto parametre vychádzali z charakteru rezných operácií, použitého nástroja a opotrebovania nástroja. Dráhy nástroja s reznými parametrami boli vygenerované v softvéri *Autodesk PowerMill CAM*. Softvér sa používa v rade rôznych odvetví na určenie optimálnych rezných parametrov, dráh nástroja a na zníženie času výroby a výrobných nákladov. Obrázok 5 zobrazuje pracovné prostredie pre experimenty.



Obr. 5. Pracovné prostredie obrábacieho centra

Vďaka nízkej tepelnej vodivosti materiálu *Inconel 718* je dôležité zabezpečiť dostatočné chladenie počas obrábacieho procesu, aby sa zabránilo vytvoreniu stvrdnutej podpovrchovej vrstvy na obrobenom povrchu. Chladiaca kvapalina *Blaser EcoCut MD25* na vodnej báze, ktorej koncentrácia bola 5 % bola použitá pre vykonanie experimentov. Experimenty obrábania tenkostenných súčiastok boli

zamerané na spôsoby odoberania materiálu a geometriu rezného nástroja. Na obrobených súčiastkach bola sledovaná drsnosť a rovinnosť obrobeného povrchu. Rovinnosť bola vyhodnocovaná pomocou farebných máp odchýlok, ktoré boli získané optickým skenovaním. Obrobený povrch bol naskenovaný optickým skenerom *ATOS Triple Scan II*. Tenkostenné súčiastky vyrobené rôznymi reznými nástrojmi vykazovali rozdiel v kvalite povrchu už pri predbežnej vizuálnej kontrole. V dôsledku spôsobu odoberania materiálu sa na povrchu súčiastok vytvorili vlny, ktoré sú spôsobené chvením vznikajúcim počas frézovania tenkostennej súčiastky. Pre obrábanie tenkostenných súčiastok boli použité štyri rezné nástroje s rôznou geometriou, ktorých modely sú zobrazené na obr. 6.



Obr. 6. Modely nástrojov použité v experimentoch

Pre kvantifikovanie rozmerovej odchýlky tenkostenných súčiastok boli optickým skenerom skenované súčiastky, ktoré boli porovnané s *CAD* modelom. Výsledkom porovnania sú farebné mapy odchýlok, ktoré poskytujú informácie o rozmerových odchýlkach. Na obr. 7 až obr. 10 je zobrazený

obrobený povrch súčiastky po frézovaní z oboch strán, farebná mapa odchýlok a geometria nástroja. Tabuľka 3 zobrazuje použité rezné podmienky pre frézovanie.

2 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Na obr. 7 je zobrazený obrobený povrch, ktorý bol vyrobený pomocou nástroja č. 1, ktorého rezná časť bola 37 mm. Vplyvom nízkej tuhosti nástroja dochádzalo k najväčšiemu chveniu sústavy *SNOP*, čo sa prejavovalo aj neprijemným zvukom počas obrábania. Chvenie a nedostatočná tuhosť nástroja malo za následok nerovnomerné odstránenie materiálu. Na obrobenom povrchu je vidieť dráhy po nástroji, ktoré sú medzi sebou vzdialené axiálnou hĺbkou rezu. Dráhy po nástroji, ktoré sa objavili na povrchu, sú spôsobené malou tuhosťou rezného nástroja a jeho odtlačeníom od obrábaného povrchu.

Zmenšením veľkosti reznej časti nástroja a použitím odľahčenia drieku sa zvýši tuhosť rezného nástroja. Rezná časť nástroja mala dĺžku 15 mm. Rozdiel v kvalite povrchu bol viditeľný už vizuálnou kontrolou. Zvýšením tuhosti rezného nástroja nedošlo k tak veľkému odtlačeníu nástroja ako v prvom prípade. Obrázok 8 zobrazuje farebné mapy odchýlok a obrobený povrch, kde bol použitý nástroj s odľahčeným driekom. Na obrobenom povrchu je vidieť menší rozdiel v hrúbke steny medzi jednotlivými dráhami nástroja. Už pri nástroji č. 2 je vidieť, že zvyšovaním tuhosti rezného nástroja sa dosahuje lepšia kvalita obrobeného povrchu.

Ďalším spôsobom zvýšenia tuhosti je použitie rezného nástroja s väčším priemerom. Pre dosiahnutie lepšej kvality obrobeného povrchu bola použitá fréza s priemerom 14 mm. Použitím nástroja s väčším priemerom bola dosiahnutá najlepšia kvalita povrchu, z klasických valcových fréz. Zvyšovaním tuhosti rezného nástroja sa chvenie nástroja znižuje v dôsledku väčšej tuhosti. Obrázok 9 zobrazuje obrobený povrch a farebnú mapu odchýlok pri použití rezného nástroja s priemerom 14 mm. Väčšiu tuhosť nástroja je možné získať aj zväčšením priemeru jadra

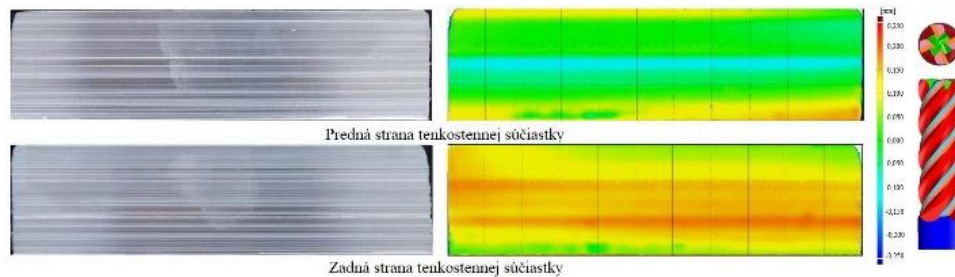
Tab. 3. Rezné parametre použité pri realizácii experimentov

No.	Operácia	Axiálna hĺbka rezu [mm]	Radiálna hĺbka rezu [mm]	Posuv na zub [mm]	Rezná rýchlosť [m·min ⁻¹]
1	Hrubovanie	10	1,3	0,03	65
1	Dokončovanie	10	0,2	0,03	65
2	Hrubovanie	10	1,3	0,03	65
2	Dokončovanie	10	0,2	0,03	65
3	Hrubovanie	10	1,3	0,03	65
3	Dokončovanie	10	0,2	0,03	65
4	-	0,4	4,5	0,16	38

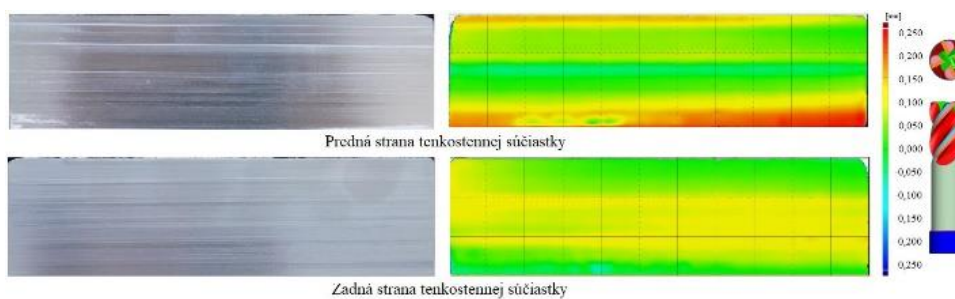
nástroja. Zväčšením jadra získame tuhší nástroj, avšak je nutné počítať s menšou hĺbkou drážky, pretože tieto geometrické parametre nástroja sú na sebe závislé. Zväčšením jadra by sme museli meniť aj rezné podmienky, čo sú ďalšie faktory ovplyvňujúce kvalitu obrobeného povrchu.

Spomenuté poznatky o tom, ako je možné dosiahnuť

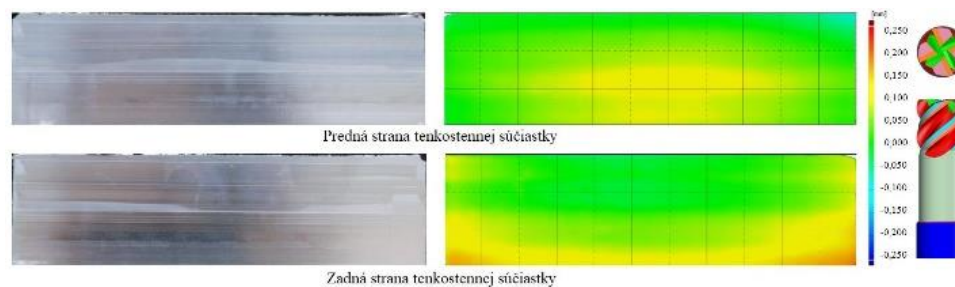
feed milling). *HFM* je v podstate metóda hrubovania vyvinutá pre vysoké rýchlosti úberu kovu, aby sa zvýšila produktivita a ušetril čas obrábania. *HFM* používa menšiu hĺbku rezu (zvyčajne nie viac ako 2 mm), čím sa vytvára tenšia trieska, ktorá odvádza teplo preč z reznej hrany. Má tiež vysoký posuv na zub: až päťkrát vyšší posuv na zub ako bežné



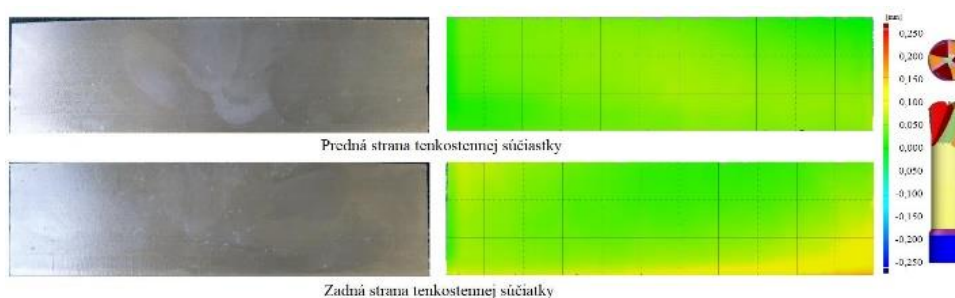
Obr. 7. Povrch a mapa odchýlok pri nástroji č. 1



Obr. 8. Povrch a mapa odchýlok pri nástroji č. 2



Obr. 9. Povrch a mapa odchýlok pri nástroji č. 3



Obr. 10. Povrch a mapa odchýlok pri nástroji č. 4

väčšiu tuhosť nástroja a tým dosiahnuť lepšiu kvalitu povrchu sú všeobecne známe. Ďalšou možnosťou ako zmenšiť chvenie sústavy *SNOP*, ktoré vzniká vplyvom rezných síl je zmeniť samotnú stratégiu obrábania. V dnešnej dobe sa pre odstránenie čo najväčšieho množstva materiálu v čo najkratšom čase používa frézovanie s vysokým posuvom (*HFM - high-*

frézovanie. Tento prístup znižuje tvorbu tepla, čo má za následok predĺženie životnosti nástroja a poskytuje vyššiu rýchlosť úberu. Použitím *HFM* sú rezné sily smerované do vretena stroja v axiálnom smere, čo znižuje riziko vibrácií a stabilizuje obrábanie. To umožňuje použiť vyššie rezné parametre aj pri obrábaní s veľkým vyložením. Ďalšou časovou

výhodou *HFM* je počet operácií. Keďže obrábanie s vysokým posuvom pri malých hĺbkach rezu vytvára povrch s veľmi dobrou drsnosťou je možné eliminovať dokončovacie operácie, a tým sa zjednodušuje *NC programovanie*. Okrem toho proces *HFM* nevyžaduje zvýšenú reznú rýchlosť. Obrázok 10 zobrazuje povrch a farebnú mapu odchýlok po vysokoposuvovom obrábaní (*HFM*). Je možné vidieť, že použitím vysokoposuvového obrábania bol dosiahnutý povrch s najlepšou drsnosťou a rozmerovou presnosťou.

Porovnaním farebných máp odchýlok bolo zistené, že použitie nástroja s nekonvenčnou geometriou malo pozitívny vplyv na rozmerovú presnosť vyrobenej súčiastky. Na obrobenom povrchu bola meraná dosiahnutá drsnosť. Drsnosť povrchu súčiastky, ktorá bola obrábaná navrhnutou frézou bola porovnateľná s konvenčnými nástrojmi.

Experimentálnym obrábaním bol priblížený proces obrábania tenkostenných súčiastok. Počas experimentov bola zmenená stratégia obrábania a geometria nástroja. Vykonaním experimentov bolo zistené, že použitím vysokoposuvového obrábania je možné získať lepšiu rozmerovú presnosť obrobeného povrchu ako pri stratégiách obrábania, ktoré sú odporúčané pre obrábanie tenkostenných súčiastok.

ZÁVER

Tenkostenné súčiastky sa čoraz častejšie používajú v automobilovom, leteckom a energetickom priemysle, pre svoju nízku celkovú hmotnosť. Z vedeckých štúdií a preštudovanej literatúry možno konštatovať, že uvedená problematika je v priemysle aktuálna a vo väčšej miere riešená z hľadiska integrity povrchu a dynamiky procesu

rezania. V článku je prezentovaný teoretický základ založený na prehľade súčasného stavu problematiky obrábania tenkostenných súčiastok. Stručne je popísaná geometria rezného nástroja a materiály používané na ich výrobu. V kapitole bola popísaná technológia výroby *WAAM*, ktorá sa použila na výrobu tenkostenných súčiastok. Výsledkom experimentov je návrh a výroba rezného nástroja určeného na obrábanie tenkostenných súčiastok, ktoré sú vyrobené z ťažkoobrobiteľných materiálov.

Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Vývoj nových progresívnych rezných nástrojov pre obrábanie súčiastok vyrobených technológiou *WAAM* aditívnou výrobou za účelom zníženia počtu rezných nástrojov pri obrábaní súčiastok tvorených rôznym typom materiálu, (ITMS2014+: 313011BWQ8), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

LITERATÚRA

- [1] BEŇO, J. (1999): *Teória rezania kovov*. Košice: Viena, s. 260, ISBN 80-7099-429-0.
- [2] BUDAK, E. (1995): *Tool exit*. Science, 353, 459–476.
- [3] SAGHERIAN, R. - ELBESTAWI, A. - The, I. (1990): *Applications A Simulation System for Improving Machining Accuracy in Milling User Forces Effective load Input Deflection I conditions Cutting*. In: Chip Calculation. 14, 293-305.
- [4] DEL SOL, I. - RIVERO, A. - DE LACALLE, L. N. L. - GAMEZ, A. J. (2019): *Thin-wall machining of light alloys: A review of models and industrial approaches*. In: Materials, 12(12).
- [5] BURANSKÝ, I. (2010): *Obrábanie tenkostenných súčiastok*: Trnava: STU MTF, Dizertačná práca. MTF-10906-4587.
- [6] LAAMOURI, A. - GHANEM, F. - BRAHAM, C. - SIDHOM, H. (2019): *Influences of up- milling and down-milling on surface integrity and fatigue strength of X160CrMoV12 steel*. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 105(1-4), 1209-1228.
- [7] RATCHEV, S. - LIU, S. - BECKER, A. A. (2005): *Error compensation strategy in milling flexible thin-wall parts*. In: Journal of Materials Processing Technology, 162-163(SPEC. ISS.), 673-681.
- [8] MICHALIK, P. - ZAJAC, J. - HATALA, M. - MITAL, D. - FECOVA, V. (2014): *Monitoring surface roughness of thin-walled components from steel C45 machining down and up milling*. In: Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 58, 416-428.
- [9] ZELINSKI, P. (2009): *How To Machine Aircraft Titanium: The 8-To-1 Rule For Finishing Walls And Ribs*. MMSOnline. [Online]: <http://www.mmsonline.com/articles/how-to-machine-aircraft-titanium-the-8-to-1-rule-for-finishing-walls-and-ribs>.
- [10] SHOKRANI, A. - DHOKIA, V. - NEWMAN, S. T. (2012): *Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids*. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture, 57, 83-101.
- [11] WEGENER, K. - KUSTER, F. - WEIKERT, S. - WEISS, L. - STIRNIMANN, J. (2016): *Success Story Cutting*. In: Procedia CIRP, 46, 512-524.
- [12] METALCOR. *Datasheet 1.4435*. [online] ©2019. Available on the internet: <http://www.metalcor.de/en/datenblatt/16/>
- [13] CERATIZIT. *Round tool materials*. 2020. [online] ©2019. Available on the internet: <https://www.ceratizit.com/en/services/downloads/?fileid=2285>

Vplyv vysokej prevádzkovej teploty na funkčnosť ložísk

Elena Kantoríková, Ing., PhD.*

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

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

The effect of high operating temperature on the functionality of bearings

Abstract: Rolling bearings are among the most important parts of machines and equipment. Many malfunctions in operation can be prevented by the correct choice of bearing, regular inspection and maintenance. The failure rate of the bearing is affected by many factors such as inappropriate storage, incorrect assembly, intrusion of foreign particles into the bearing spaces, inappropriately selected lubricant, or incorrect handling, transportation, etc. If damage or other deficiencies occur in rolling bearings, it is important to determine the cause of the damage so that appropriate measures can be taken to prevent their recurrence. Incipient damage to the bearing is reflected in the operation of the bearing, usually by a rise in temperature, or an increase in noise and stronger vibrations.

Keywords: bearings, temperature, deformations

ÚVOD

Valivé ložiská patria medzi najdôležitejšie časti strojov a zariadení. Sú neodmysliteľnou súčasťou všetkých rotačných mechanizmov. S rastúcimi požiadavkami, spoľahlivosť a predĺženie bez údržbového chodu strojných zariadení sa zákonite musí predlžovať aj životnosť ložísk samotných. U nápravových ložísk železničných vagónov sú kladené vysoké požiadavky na bezpečnosť prevádzky. Preto je potrebné spoľahlivé určenie ich životnosti. Existuje veľké množstvo faktorov ktoré vplývajú na životnosť ložiska. Podľa pôvodu vzniku ich môžeme rozdeliť do troch základných skupín. V prvej skupine sú to faktory súvisiace priamo z výrobou ložísk. Tu môžeme zaradiť vlastnosti samotného materiálu (*mikročistota, mikroštruktúra tvrdosť*), hodnoty rozmerových a geometrických parametrov, drsnosť funkčných plôch. Do druhej skupiny patria skladovacie podmienky a montáž. Nevhodným skladovaním ložísk môže dôjsť ku vzniku korózie na funkčných plochách prípadne ku znehodnoteniu maziva. Nesprávne vykonanou montážou môže vzniknúť poškodenie funkčných plôch (ryhy, alebo otlacky na obežných dráhach, valivých telieskach). Taktiež môže dôjsť k vniknutiu cudzích častíc do priestorov ložiska a pod. Do tretej skupiny faktorov, ktoré vplývajú na životnosť ložiska patria samotné prevádzkové podmienky.

Pre výrobu ložiskových krúžkov a valivých telies sa najčastejšie používajú *celokaliteľné chrómové ocele*. Obsah uhlíka pri týchto oceliach je cca 1 % a obsah chrómu cca 1,5 %. Najčastejšie sa kalia na tvrdosť

58 HRC až 65 HRC. Pri tvrdosti menšej než 60 HRC klesá dynamická únosnosť s každým stupňom HRC o 4 % až 8 % a statická únosnosť o 6 % až 9 %. Tieto ocele predstavujú optimálnu rovnovahu medzi výrobnými a prevádzkovými nákladmi.

Začínajúce poškodenie ložiska sa prejaví na chode ložiska, a to spravidla stúpaním teploty, alebo zvýšením hlučnosti a silnejšími vibráciami. Teplo vznikajúce v ložisku môže viesť k uvoľneniu presahu na čape, a tým k pootočeniu krúžku. Ohrevom dôjde k vymedzeniu vôle, a tým k obmedzeniu až vylúčeniu axiálneho posuvu krúžku voľného ložiska v telese. Preto na tento faktor kladieme pri navrhovaní uložení veľký dôraz [1, 2].

1 ZÁKLADNÉ PORUCHY POŠKODENIA VALIVÝCH LOŽÍSK

1.1 Pitting

Cyklické namáhanie obežných dráh krúžkov a valivých telies má za následok únavu materiálu. Normálna úrava sa prejavuje vznikom trhliniek a odlupovaním materiálu valivých plôch takzvaný *pitting*. Pri pokračujúcom namáhaní môže nastať i náhle nalomenie krúžku.

Poškodenie obežnej dráhy spôsobené nešetrnou montážou a priehlbiny v obežnej dráhe vzniknuté zavalcovaním tvrdých nečistôt počas prevádzky ložiska. Obe poškodenia sú neprípustného rozsahu a môžu byť zdrojom rozvoja únavového poškodenia - *pittingu*. Poškodenie obežných dráh vzniknuté nesprávnym postupom pri montáži sú z pravidla

ľahko rozpoznateľné, pretože ležia v rozstupoch valivých telies. Nebezpečné sú aj otláčky vzniknuté preťažením v stacionárnom stave, alebo vibráciami zariadení pri jeho transporte na veľké vzdialenosti, napríklad pri lodnej preprave [3].

1.2 Spalling a brinelling

K tvorbe *spallingu* dochádza najmä u povrchovo vytvrdzovaných súčastí. Vysoké kontaktné tlaky vyvolávajú v povrchových vrstvách šmykové napätia, ktoré spôsobujú vznik podpovrchových trhlín. Vetvenie trhlín má za následok oslabenie povrchovej vrstvy a odlúpnutie časti povrchu. Poškodený povrch potom pôsobí ako vrub a môže vyvolať prasknutie ložiskového krúžku.

Najčastejšou príčinou vzniku *spallingu* je nedostatočné mazanie, ktoré spôsobí vytvorenie nesúvislého mazacieho filmu na kontaktných plochách. Ďalšou príčinou môže byť vniknutie tvrdých častíc do ložiska alebo nesprávna montáž ložiska. Napríklad pri montáži jednoradových valčekových ložísk sa často odoberateľný krúžok násilím nasúva na krúžok s valčekmi, čím dochádza k poškodeniu funkčných plôch. Pri ložiskách sa často môžeme stretnúť s *brinellingom*, ktorý sa vyskytuje v dvoch modifikáciách, ako pravý (*true brinelling*) a falošný (*false brinelling*). Falošný *brinelling* sa často vyskytuje v ložiskách, ktoré sú v klúde, ale v blízkosti sa nachádzajú zariadenia, ktoré vyvolávajú vo svojej blízkosti vibrácie. Tieto vibrácie často vznikajú aj pri preprave ložísk, čomu je možné zabrániť oddelením vonkajších a vnútorných krúžkov ložiska, alebo fixáciou hriadeľa. Tento typ poškodenia sa môže vyskytnúť aj v prípade použitia maziva s vyššou viskozitou. Ak sa nevytvorí mazacia vrstva medzi valivými telieskami a obežnými dráhami ložiska, dochádza k priamemu kovovému styku valivých teliesok a krúžkov a ich vzájomnému pohybu. Gulôčky vytvárajú na povrchu jamky, valivé telieska s čiarovým stykom vytvárajú drážky. Veľmi často je *brinelling* sprevádzaný vytváraním *oxidických* zlúčenín, ktoré sa ukladajú na dne drážok vo forme jemnej červenohnedej vrstvy.

Pravý *brinelling* je zapríčinený plastickou deformáciou, keď je ložisko opakovane namáhané extrémnym zaťažením, vyšším než je jeho povolená únosnosť. Na tento druh poškodenia sú náchylnejšie ložiská s čiarovým stykom [4].

1.3 Korózia

Korózia vzniká vniknutím vody do maziva prípadne kondenzáciou pár a kapilárnou *eleváciou*. Korózia sa prejaví po dlhšom odstavení dvomi stopami po stranách valivých teliesok v zaťaženom mieste pod cca troma až piatimi telieskami. V niektorých prípadoch dochádza ku *transkryštalickej korózii*, čo

vedie ku neodstrániteľnému poškodeniu.

2 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIA ZABEZPEČUJÚCE OPTIMÁLNU PREVÁDZKOVÚ TEPLotu

2.1 Uloženie a zaťaženie

Vlastnosti ložísk sú naplno využité iba vtedy, keď sú ložiskové krúžky podopreté po celom obvode a celej šírke obežných dráh. Pevná oporná plocha môže mať valcový alebo kužeľový tvar, pri axiálnych ložiskách ide o rovinnú plochu. Oporné plochy musia byť vyrobené v odpovedajúcich presnostiach a nesmú na nich byť drážky, otvory a podobne. Okrem toho musia byť ložiskové krúžky spoľahlivo zaistené, aby sa pri zaťažení neotáčali v telese, alebo na hriadelí. Vhodné radiálne zaistenie a zodpovedajúce podoprenie sa dosiahne iba vtedy, ak sú ložiskové krúžky namontované s presahom. Ak sa však požaduje jednoduchá montáž a demontáž, prípadne axiálny posuv voľného ložiska v axiálnom smere, nie je možné voliť pevné uloženie oboch krúžkov.

Rotujúci hriadeľ alebo iná súčiastka uložená vo valivých ložiskách je nimi vedená v radiálnom aj axiálnom smere tak, aby bola splnená základná podmienka jednoznačnosti jeho pohybu. Súčiastka má byť, pokiaľ možno, staticky určite uložená, t. j. podoprená na dvoch miestach radiálne a v jednom mieste axiálne [5, 6].

Zaťaženie má priamy vplyv na voľbu veľkosti presahu v uložení. Čím je väčšie zaťaženie ložiska, tým sa musí voliť väčší presah v uložení. Obzvlášť to platí pre prípady rázového a vibračného zaťaženia ložiska. Pevné uloženie na čape, alebo v diere telesa vyvolá deformáciu krúžku, a tým dôjde k zmenšeniu radiálnej vôle. Aby bola v prípade pevného uloženia zabezpečená potrebná radiálna vôľa, je treba niekedy použiť ložiská so zväčšenou radiálnou vôľou. Výsledná vôľa po zmontovaní je závislá na type a veľkosti ložiska. Preto je nutné zvažovať veľkosť potrebného presahu uloženého krúžku podľa typu a veľkosti ložiska. Pre ložiska menších rozmerov sa volí menší presah a naopak. Ložisko sa upevňuje v radiálnom smere na lícovanej valcovej ploche čapu a diery v telese. V niektorých prípadoch sa pri upevňovaní na čap používa upínacie, alebo sťahovacie puzdro, prípadne možno ložisko upevniť priamo na kužeľový čap.

Správne radiálne upevnenie ložiska na čape a v telese má značný vplyv na využitie jeho únosnosti a na správnu funkciu uloženia. V zásadne by mali byť oba ložiskové krúžky uložené pevne, pretože iba tak sa dosiahne ich spoľahlivého podoprenia po celom obvode a radiálne upevnenie proti pretáčaniu. Pre uľahčenie montáže a demontáže, alebo na posúvanie voľného ložiska je dovolené posuvné uloženie jedného z krúžkov.

Pri voľbe správneho radiálneho upevnenia ložiska posudzujeme a zohľadňujeme vplyv spôsobu otáčania a veľkosť zaťaženia. Presnosť úložných plôch z hľadiska tolerancie a geometrických tvarou je dôležitá, preto že sa môže prenášať na obežné dráhy ložiskových krúžkov. Predovšetkým je to dôležité zohľadniť v návrhu uložení, u ktorých je kladený veľký dôraz na presnosť chodu [5, 6].

3 VPLYV TEPLoty NA ROZMEROVÚ STÁLOSŤ LOŽISK

Pri ochladiení ložiskových ocelí z *austenitizačnej* teploty rýchlosťou väčšou než kritická, je výsledná štruktúra tvorená martenzitom, *karbidickou fázou* a zvyškovým *austenitom*. Zvyškový *austenit* je v zakalenej ložiskovej oceli nežiaducou štruktúrnou fázou, lebo od určitého obsahu znižuje tvrdosť a jeho rozpad je príčinou rozmerovej nestability zakalených ložiskových súčastí. Rozmerová nestabilita je zapríčinená väčším merným objemom martenzitu ktorý vzniká pri rozpade zvyškového *austenitu*. K rozpadu zvyškového *austenitu* môže dôjsť počas montáže za tepla. Montáž za tepla je výhodná pre ložiská s valcovou dierou. Vyhovujúce rozťahnutie krúžkov pre ľahké nasunutie ložiska sa dosiahne zohriatím na 70 °C až 80 °C. Vyššie teploty nad 100 °C, znižujú tvrdosť ložiska a jeho trvanlivosť a môžu zmeniť aj jeho rozmery (okrem ložisk stabilizovaných pre prevádzku pri vyššej teplote) [7]. Ložiská určené pre vyššie prevádzkové teploty nad 120 °C sa označujú S0 – S5. Pri týchto ložiskách má obsah zvyškového *austenitu* výrazný vplyv na ich rozmerovú stálosť. Vysoké prevádzkové teploty by mali za následok rozpad zvyškového *austenitu*, preto je potrebné, aby bol jeho obsah pri týchto ložiskách (S0 – S5) minimálny. Jednou z možností je popúšťanie pri vyšších teplotách. Popúšťanie je možné rozdeliť podľa teplôt do štyroch štádií. V druhom štádiu 200 °C ÷ 300 °C je charakteristickým procesom premena zvyškového *austenitu*. Táto premena prebieha priamo a výsledkom rozpadu je štruktúra, ktorá by vznikla premenou podchladeného *austenitu* pri danej teplote. Kinetika premeny zvyškového *austenitu* pri popúšťaní je odlišná od premeny primárneho *austenitu* a je kontrolovaná difúziou uhlíka v *austenite*. Vzrastá pri nej merný objem, menia sa magnetické vlastnosti a uvoľňuje sa teplo. V tomto štádiu pokračujú premeny charakteristické pre prvé štádium, koherentná precipitácia ε-karbidu, resp. jeho obmedzený rast, zníženie presýtenosti uhlíka v martenzite na 0,1 %, zmena v stave dislokácií, reakcie atómov uhlíka s dislokáciami [8, 9].

Ďalšou možnosťou odstránenia zvyškového *austenitu* je kalenie so zmrazovaním. Používa sa vtedy ak teplota *martenzit finish* leží pod 0 °C, potom na dosiahnutie čo najväčšieho rozpadu zvyškového

austenitu na *martenzit* sa súčiastka ďalej chladí v zmrazovacích prostrediach. Kalit' sa môže priamo do zmrazovacieho kúpeľa. Toto má za následok vznik vysokých vnútorných napätí, deformácií a výskyt trhlin. Preto sa kalí do vody (oleja) a následne do zmrazovacieho kúpeľa. Zväčša stačí zmrazovať na teplotu -80 °C v kúpeli zo zmesi liehu a tuhého oxidu uhličitého. Pri *vysokolegovaných oceliach* sa na zmrazovanie používa tekutý dusík [10].

Tab. 1. Kritická teplota pre vznik teplotných zvyškových ťahových napätí.

Materiál	Teplota [°C]
Oceľ 11 600 (E335)	260
Oceľ 14 209 (100CrMn6)	240
Zliatina titánu VT3-1	910

Zvyškové napätia v povrchovej vrstve závisia od rozdelenia teplôt, tepelno-fyzikálnych parametrov obrábaného materiálu, jeho mechanických vlastností a spôsobu upevnenia súčiastky pri obrábaní. Pri následných operáciách, napríklad pri brúsení, sa tieto superponujú a menia znamienko. Ich konečné rozloženie v súčiastke sa stabilizuje až v prevádzke súčiastky v zariadení [11]. Tento jav by sme mohli nazvať dedičnosť zvyškových napätí. Doterajšie úvahy ukazujú, že pri procesoch obrábania, kde je intenzívna plastická deformácia pri nízkych teplotách (sústruženie, frézovanie...), vznikajú v povrchovej vrstve priority tlakové napätia. Naopak, ak dochádza k intenzívnemu ohrevu povrchovej vrstvy (brúsenie), vznikajú na povrchu ťahové napätia. Z predchádzajúceho možno konštatovať, že teplotné zvyškové napätia v ťahu môžu vznikáť v povrchovej vrstve obrobku len v tom prípade, ak vnútorné napätie vzniknuté pri ohreve prevýši medzu sklzu obrábaného materiálu a nastane v ňom plastická deformácia. Táto podmienka sa dá vyjadriť vzťahom:

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot (\theta_2 - \theta_1) \geq R_e, \quad (1)$$

kde R_e je medza sklzu obrábaného materiálu s uvažovaním deformačného spevnenia.

Ak zanedbáme teplotu θ_1 pre jej malú hodnotu, možno z predchádzajúceho vzťahu napísať:

$$\theta = \frac{R_e}{\alpha \cdot E}, \quad (2)$$

kde θ je teplota ohrevu povrchovej vrstvy kovu, pri ktorej prekročení vznikajú teplotné zvyškové napätia [12].

Ohrev kalenej ocele môže viesť k rozpadu zvyškového *austenitu*, transformácii tetragonálneho martenzitu na kubický, alebo vytváraniu *feriticko-perlitickej* štruktúry (*troostit*, *sorbit*). Okrem toho takýto ohrev pri obrábaní vysokými reznými rýchlosťami môže vyvolať popustenie a miestne sekundárne zakalenie v dôsledku rýchleho odvodu

tepla do vnútra materiálu (pri obrábaní bez chladenia), alebo chladiacim prostredím (vzduch, kvapalina). Jednou z možností tepelnej úpravy je spôsob tepelného spracovania - umelé starnutie. Umelé starnutie sa vykonáva za účelom odstránenia vnútorných pnutí vyvolaných hrubým brúsením jednotlivých plôch na lož. súčiastiach. Proces umelého starnutia spočíva ohriatím lož. súčasti na predpísanú teplotu a výdržou na tejto teplote. Ložiskové krúžky nesmú byť znečistené od brúsneho kalu a povrch musí byť bez korózie [13, 14].

ZÁVER

Prevádzková teplota vplyva na životnosť valivých ložísk, preto je dôležité identifikovať príčiny vzniku deformácií a predvídať ich výskyt. Zvyškový *austenit* je nestabilná štruktúrna zložka, ktorá sa pôsobením tepla a napätí počas prevádzky alebo montáže za tepla rozpadá. Produkty rozpadu majú iný merný objem ako zvyškový *austenit*, tým dochádza k rozmerovým a geometrickým zmenám komponentov ložiska čo má za následok skrátenie životnosti ložiska.

Pod'akovanie

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

LITERATÚRA

- [1] ŽMINDÁK, M. - PALKECH, J. (2011): *Modelovanie vývinu tepla vo valčekových valivých ložiskách*. Tribotechnika.
- [2] ZAHRADNÍČEK, R. et al. (2015): *Materiály a komponenty*. Košice, ISBN 978-80-553-2019-9.
- [3] ORAVČÍK, V. (2018): *Poruchy valivých ložísk*. [Online].

[4] VASILKO, K. (2007): *Analytická teória trieskového obrábania*. Prešov: Tlačiareň COFIN, Prešov, s. 395-398, ISBN 978-80-8073-759-7.

[5] VÁCLAV, L. et al. (2009): *Trenie ložiska a ich mazanie*, [Online].

[6] LIŠČÍČ, B. et al. (2010): *Quenching Theory and Technology*. 2nd Boca Raton: Taylor & Francis Group LLC, s. 97, ISBN 978-0-8493-9279-5.

[7] JECH, J. (1968): *Oceli na valivá ložiska a jejich tepelné zpracování*. Praha: SNTL, s. 280, ISBN 04-404-68.

[8] FABIÁN, P. - KEČKOVÁ, E. - BETÁK, P. (2007): *Tepelné spracovanie kovov*. Žilina: Tlačiareň Svidnícka, s.r.o., s. 93, ISBN 978-80-969592-7-3.

[9] BRUSILOVÁ, A. - GÁBRIŠOVÁ Z. (2012): *Najčastejšie príčiny porušenia valivých ložísk*. Tribotechnika.

[10] BEARING CORPORATION (2017): *Bearing failure*. [Online]. Dostupné na: <http://www.bearingcorporation.com/bearing-failure/>

[11] KINEX (2016): *Montáž, demontáž a poruchy valivých ložísk*. Dostupné na: http://www.kinex.sk/files/Servis_montaz_demontaz_a_poruchy_valivych_lozisk.pdf

[12] PSL (2011): *Technická príručka valivé ložiská*. [Online]. Dostupné na: http://www.psl.sk/downloads/27_2011_tp_vl_s.pdf.

[13] SEMRAD, K. (2018). *Mechanizmy a časti*. [Online]. Dostupné na: <http://web.tuke.sk/lf-kli/Semrad%20Karol/Mechanizmy%20a%20casti/05-Capy%20a%20loziska.pdf>.

[14] ZVL SLOVAKIA (2018): *Použitie, montáž a demontáž ložísk*. [Online]. Dostupné na: <https://www.zvlslovakia.sk/PDF/Pouzivanie-montaz-a-demontaz-lozisk.pdf>.

Aplikácie difúzie v strojárskovej výrobe

Martin Jaško, Ing.

HS Technik, spol. s r. o.,
Žilinská cesta 84, 013 11 Lietavská Lúčka.
E-mail: martin.jasso22@gmail.com, Tel.: + 421 902 394 938

Richard Pastirčák, doc. Ing., PhD.*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: richard.pastircak@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 27 97

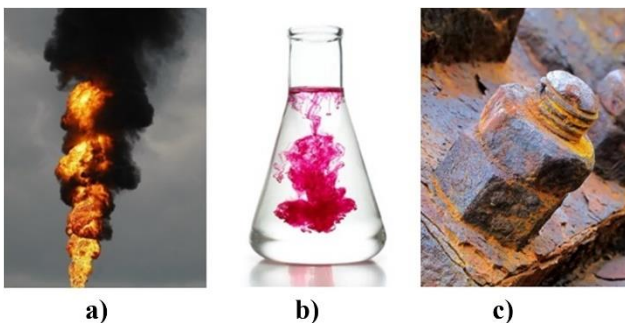
Diffusion and its applications in mechanical engineering

Abstract: This thesis aims to explain the nature of the diffusion process and the importance of this process in the field of engineering production. The thesis contains information on the principles and mechanisms by which diffusion takes place, as well as on the environmental influences and factors that directly affect this process. The thesis concludes with a description of selected manufacturing and surface treatment processes used in mechanical engineering, the principal basis of which is diffusion.

Keywords: diffusion, diffusion mechanisms, diffusion bonding, chemical-thermal treatment

ÚVOD

Pojem difúzia pochádza z latinského slova „diffusio“ a je možné ho voľne preložiť ako šírenie, prenos alebo distribúciu. Z odborného hľadiska je možné difúziu vysvetliť ako proces prenosu hmoty (atómy, ióny, molekuly) alebo energie na dlhšie aj kratšie vzdialenosti, kedy dochádza k prenosu častíc z prostredia s vyšším obsahom určitej látky do prostredia, kde je obsah tejto látky nižší a to pôsobením a zvyšovaním energie (teplo). K tomuto prenosu môže samozrejme dôjsť len pri predpoklade, že difundujúca častica je v danom prostredí aspoň čiastočne rozpustná.



Obr. 1. Difúzia v prírode: a) v plynnom skupenstve, b) v kvapalnom skupenstve, c) v tuhom skupenstve

V prírode difúzia prebieha vo všetkých troch skupenstvách (obr.1) a je možné ju pozorovať napríklad pri lúhovaní čaju v horúcej vode (v studenej vode prebieha difúzna značne pomalšie), pri šírení vône z parfumy, alebo pri pozorovaní korózie oceľových súčastí, ktorá je v podstate dôsledkom

difúzie častíc obsiahnutých v zemskej atmosfére (kyslík, vodík). Difúziu môžeme pozorovať aj na vlastnom tele, napríklad pri užívaní vitamínov, kedy dochádza k rozpúšťaniu a prenosu častíc obsiahnutých v médiu do organizmu.

Difúzia prebieha vo všetkých prostrediach, ale v technologickej praxi je možné tento proces eliminovať úplne, napríklad pri podmienkach vákua, kedy difúzia neprebíha vôbec, taktiež ako neprebíha pri teplote prostredia rovnajúcej sa absolútnej nule ($-273,15^{\circ}\text{C}$). Z dôvodu vyšších nákladov, potrebných pre vytvorenie takéhoto prostredia, sú však tieto možnosti využívané len pre výskumné účely [1, 2].

Najväčší rozvoj v oblasti teórie difúzie nastal v 19. storočí a je spojený s *Adolfom Fickom*, nemeckým lekárom a biofyzikom, ktorý okrem iného ako prvý skonštruoval a patentoval prístroj na meranie krvného tlaku. Jeho synovec, s rovnakým menom, zas ako prvý skonštruoval sklenené kontaktné šošovky.

1 FICKOVE ZÁKONY

Základným pilierom teórie difúzie sú dva *Fickove zákony*. *Adolf Fick* sa snažil difúziu pochopiť a vysvetliť ako pozorovateľný pohyb častíc hmoty alebo energie. Na opísanie tohto pohybu použil dve dôležité veličiny; prvou je koncentrácia difundujúcej látky c a druhou je čas procesu τ . Za hybnú silu v tomto procese je považovaný gradient koncentrácie.

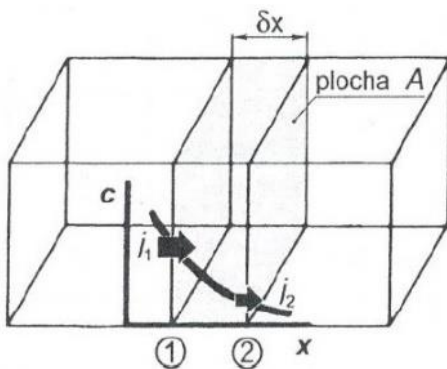
Zjednodušene je možné povedať, že *I. Fickov zákon* vyjadruje, koľko atómov, iónov alebo molekúl

difunduje materiálom a akou rýchlosťou. Matematické vyjadrenie *I. Fickovho zákona* je nasledujúce (1):

$$J = -D \cdot \frac{dc}{dx} \quad (1)$$

Index J vyjadruje intenzitu difúzneho toku, index c vyjadruje koncentráciu difundujúcej látky a index x reprezentuje vzdialenosť medzi dvoma bodmi s rozdielnou koncentráciou. Index D symbolizuje difúzny koeficient, ktorý je rozdielny pre každý typ materiálu a znamienko mínus pred týmto koeficientom znamená, že prenos častíc prebieha proti koncentračnému gradientu, teda z miesta s vyššou koncentráciou do miesta s nižšou koncentráciou. Z teoretického hľadiska by po vyrovnaní týchto koncentrácií malo dôjsť k zastaveniu procesu difúzie, ale v praxi sa bežne vyskytuje aj jav, kedy difúzia pokračuje ďalej - tzv. jav opačnej difúzie.

Principiálne *II. Fickov zákon* vychádza z *I. Fickovho zákona*, ale s tým rozdielom, že počíta s možnosťou zmeny objemovej koncentrácie c v závislosti nielen od polohy x , ale aj času τ (obr.2).



Obr. 2. Model difúzneho toku podľa *II. Fickovho zákona*

II. Fickov zákon znie: „Časová zmena koncentrácie látky v danom mieste je priamo úmerná priestorovej zmene gradientu koncentrácie, pričom konštantou úmernosti je difúzny koeficient D . Difúzny koeficient D je konštantou, ktorá charakterizuje, ako ľahko daná látka difunduje do prostredia“. Matematické vyjadrenie *II. Fickovho zákona* je nasledujúce (2):

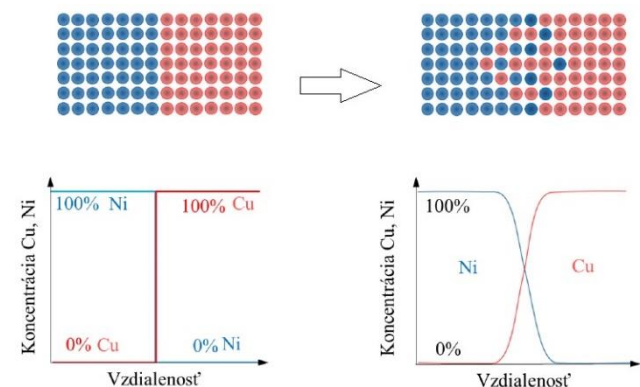
$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2)$$

V praxi môže nastať prípad, kedy sa prvý člen matematického vyjadrenia *II. Fickovho zákona* rovná nule ($\partial c / \partial \tau = 0$). Tento stav sa nazýva stacionárna difúzia a stretávame sa s ním napríklad pri procese čistenia vodíka. Pri väčšine praktických prípadov však dochádza k nestacionárnej difúzii a difúzny tok $J \neq \text{konšt.}$, ale mení sa s polohou x [2, 3].

2 DIFÚZIA V KOVOCH A ZLIATINÁCH

Ako už bolo uvedené, difúzia prebieha vo všetkých troch skupenstvách, ale v prípade tuhého skupenstva

je tento proces jediný možný spôsob prenosu hmoty. Chemická podstata difúzie, podľa druhého termodynamického zákona je, že systém sa v každom prípade snaží dostať do stavu s najnižšou hodnotou vnútornej energie. Táto snaha sa uskutočňuje presúvaním atómov z energeticky nevýhodných polôh do polôh energeticky výhodných a tento presun je podmienený uvoľnením týchto atómov z ich rovnovážnych polôh. V pevnom skupenstve sú atómy v kryštálovej mriežke viazané rôznymi chemickými väzbami, ktoré sú relatívne silné a pre uvoľnenie atómu z tejto mriežky je potrebné dodať systému pomerne dosť veľkú energiu (vysoká teplota). Zvyšovaním teploty sa zvyšuje amplitúda kmitov atómu v mriežke až do stavu, kedy sa atóm z kryštálovej mriežky uvoľní.



Obr. 3. Vznik difúznej vrstvy medzi článkami Ni a Cu

Prenos hmoty pomocou difúzie je znázornený na obr. 3. V prípade dvoch kovov, napr. nikel (Ni) a meď (Cu), sa položia a spoja tak, aby boli aspoň jednou plochou v čo najtesnejšom kontakte. Po vystavení týchto kovov vysokej teplote (nižšej ako je teplota topenia oboch materiálov) po určitý čas, dôjde medzi kovmi k obojstrannému prenosu častíc. Po ochladení týchto kovov na teplotu okolia a následnou chemickou a štruktúrnou analýzou je možné pozorovať, že medzi týmito dvoma kovmi došlo k vzniku novej $Ni-Cu$ zliatiny. Atómy medi difundovali do niklu a naopak, nikel difundoval do medi (obr. 3). Proces difúzie (presunu) atómov jedného kovu do druhého, sa nazýva vzájomná difúzia alebo difúzia prímiesí. Difúzia v jednozložkovej sústave sa nazýva autodifúzia. V heterogénnych sústavách je možné pomocou difúzie meniť chemické zloženie jednotlivých fáz a taktiež znižovať koncentračné rozdiely medzi fázami. V prípade, že dochádza k zvyšovaniu koncentračných rozdielov, sa hovorí o obrátenej (opačnej) difúzii.

Vplyv difúzie na vlastnosti materiálu môže mať pozitívny aj negatívny výsledok. Ako pozitívum je možné spomenúť vytváranie difúzných vrstiev postupmi a procesmi chemicko-tepelného spracovania, kedy dochádza k zmene koncentrácie určitého prvku v povrchovej vrstve obrobku, čo sa prejaví zlepšením určitých mechanických vlastností

(tvrdosť, pevnosť v ťahu) a zvýšením odolnosti voči opotrebeniu. Medzi negatívne vplyvy difúzie patrí napríklad oduhličovanie nástrojových ocelí, spracovávaných pri vysokých teplotách. Taktiež medzi nežiaduce zmeny v kryštalografickej mriežke patrí difúzia vakancií, ktoré sa pri tečení (*creep*) spájajú na hraniciach zŕn do kavit, ktoré sú iniciátorom medzikryštálového lomu [3-5].

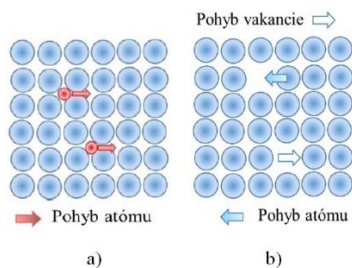
3 MECHANIZMY DIFÚZIE

Z hľadiska zmeny kryštalografickej mriežky základného materiálu, sa môže difúzia definovať ako samovoľný proces, pri ktorom častice jednej látky (atómy, ióny, molekuly) prenikajú medzi častice druhej látky, ako dôsledok vyrovnávania koncentračného gradientu. Toto prerozdelenie častíc látky umožňuje vznik úplne nových fáz. Najjednoduchším spôsobom prechádzania častíc hmoty v tuhom skupenstve je prenos častíc v mieste kontaktu dvoch zložiek.

Principiálne je možné rozdeliť mechanizmy, ktorými dochádza k prenosu častíc v kovových materiáloch, do dvoch skupín, na individuálne a skupinové.

Individuálne mechanizmy sú charakteristické tým, že presun častice (atómu) alebo vakancie prebieha nezávisle od ostatných atómov. Tieto mechanizmy difúzie sa podľa spôsobu prenosu, rozdeľujú na intersticiálne a vakančné mechanizmy.

Intersticiálny mechanizmus je možné uplatniť, ak sú splnené podmienky pre vznik intersticiálneho tuhého roztoku a atómy difundujúceho prvku sú dostatočne malé na to, aby sa mohli pohybovať vo voľnom priestore v kryštalovej mriežke základného prvku (obr. 4a).

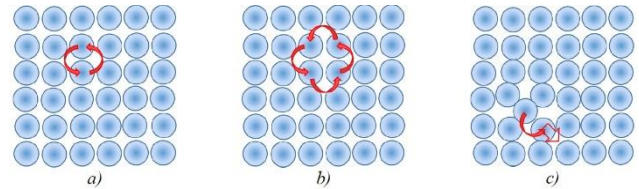


Obr. 4. Individuálne mechanizmy difúzie: a) intersticiálny mechanizmus, b) vakančný mechanizmus

Vakančný mechanizmus je charakteristický preskokom atómov do blízkych vakancií (obr. 4b). Mechanizmus sa uplatňuje v prípadoch, kedy sú veľkosti difundujúcich častíc približne rovnako veľké, ako častice základnej látky. Týmto mechanizmom môžu vniknúť substitučné tuhé roztoky, v ktorých sú atómy základného prvku nahradené atómami prídavného prvku, alebo sa presúvajú atómy vlastného prvku (samodifúzia), pri znižovaní úrovne vnútornej energie (voľnej entalpie). Aktivačná energia vakančného mechanizmu je vyššia, ako pri intersticiálnom mechanizme a to z toho dôvodu, že

vakancie sa musia najskôr vytvoriť a následne premiestniť.

Pri skupinových mechanizmoch difúzie dochádza k presunu viacerých, najčastejšie susedných častíc. Podľa spôsobu prenosu atómov sa rozdeľujú skupinové mechanizmy na výmenné, kruhové a nepriame intersticiálne mechanizmy.



Obr. 5. Skupinové mechanizmy difúzie: a) výmenný, b) kruhový, c) intersticiálny nepriamy

Výmenný mechanizmus (dvojoblúkový) je charakteristický výmenou pozícií dvoch susedných, rovnako veľkých atómov, pričom pri tejto výmene dochádza k distorzii (skrúteniu) mriežky (obr. 5a). Aktivačná energia, potrebná pre výmenu atómov, je niekoľko násobne vyššia, ako pri presune interstície alebo vakancie. Z toho dôvodu je pravdepodobnosť výskytu tohto mechanizmu veľmi malá.

Kruhový mechanizmus (viacoblúkový) je charakteristický výmenou pozícií viacerých, rovnako veľkých atómov, ktoré sú v tesnej blízkosti (obr. 5b). Tieto presuny sú asi o tretinu energeticky náročnejšie ako vakančný mechanizmus.

Nepriamy intersticiálny mechanizmus je založený na presune atómu cez intersticiálne polohy v kryštalovej mriežke základného prvku a to z jednej uzlovej polohy do druhej (obr. 5c). Aktivačná energia, potrebná pre tento typ presunu atómu, je niekoľko násobne vyššia, ako pri intersticiálnom mechanizme.

4 VPLYV PROSTREDIA NA DIFÚZIU

Rýchlosť difúzie závisí od viacerých faktorov, napríklad od teploty, času, aktivačnej energie (aktivačná energia je energia potrebná na uvoľnenie atómov z kryštalovej mriežky), chemického zloženia jednotlivých fáz, fázového rozhrania, rozpustnosti difundujúceho prvku v danej fáze, koncentrácia porúch v mriežke a podobne.

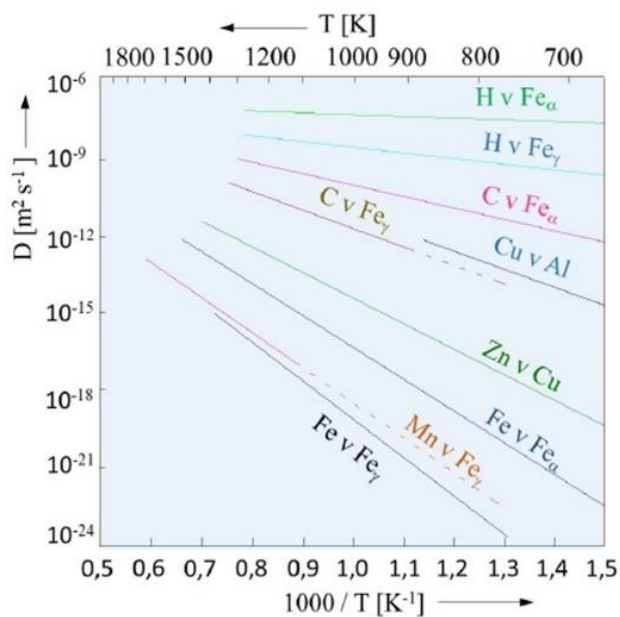
Zo všetkých spomínaných faktorov, práve teplota má najväčší vplyv na rýchlosť difúzie. Schopnosť častice (atómu alebo iónu) pohybovať sa rastie so zvyšujúcou sa tepelnou energiou – inak povedané, s rastúcou teplotou bude mať atóm väčšie množstvo energie a jej účinkom bude schopný premiestniť sa z jednej polohy do polohy druhej (obr. 6).

V roku 1889 švédsky fyzik a chemik *Svante Arrhenius* sformuloval teóriu, ktorá sa vzťahuje na rýchlosť reakcie a teplotu, potrebnú pre priebeh tejto reakcie. Jedným z výstupov tejto teórie je fakt, že reakčná rýchlosť mnohých chemických reakcií sa zdvojnásobí

pri každom zvýšení teploty o 10 °C (alebo K). Matematické vyjadrenie Arrheniusovej rovnice je takéto (3):

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (3)$$

Index k v tejto rovnici predstavuje rýchlostnú konštantu, A je exponenciálny faktor, ktorý je konštantou pre danú chemickú reakciu a vzťahuje sa na frekvenciu kolízií častíc, e predstavuje Eulerovo číslo, E_a je aktivačná energia, R je všeobecná plynová konštant a T je absolútna teplota (K).



Obr. 6. Závislosť koeficientu difúzie od teploty pre rôzne binárne sústavy

Pri difúzii iónov dochádza aj k prenosu elektrického náboja. Tento efekt sa môže využiť v keramických materiáloch s iónovými väzbami. S rastúcou teplotou sa zrýchľuje difúzia iónov a tým aj elektrická vodivosť.

Koeficient difúzie (*difuzivita*) závisí od veľkosti aktivačnej energie a tá je priamo ovplyvňovaná štruktúrou matrice. V prípade, že má matrica tesné usporiadanie, tak je pre pohyb difundujúceho atómu potrebná vyššia aktivačná energia. Taktiež aj intenzita chemickej väzby ovplyvňuje difuzivitu, čo znamená, že pri silnej väzbe je potrebná vyššia aktivačná energia.

Menšia veľkosť atómov (atómová hmotnosť) poskytuje prvkom, ktoré difundujú intersticiálnym mechanizmom, výhodu vyššej rýchlosti pri pohybe kryštálovou mriežkou oproti substitučným prvkom.

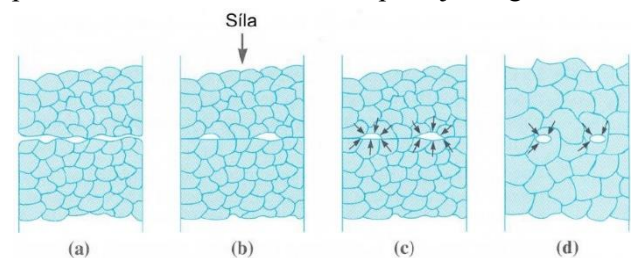
Bodové poruchy kryštalografickej mriežky (vakencie) sú využívané pri prenose hmoty alebo energie vakančným mechanizmom difúzie. Súčiniteľ difúzie priamoúmerne vzrastá so zvyšovaním koncentrácie vakancií, vďaka čomu proces difúzie prebieha rýchlejšie.

Vplyv čiarových a plošných porúch na rýchlosť difúzie je významný len pri nižších teplotách, pretože k prenosu dochádza na pomerne malých plochách. So zvyšujúcou sa teplotou sa tento vplyv znižuje a po dosiahnutí určitej teploty už nie je preukázateľný.

Vplyv koncentrácie difundujúceho prvku na difuzivitu môže byť rôzne veľký a pre každý prípad osobitý. V praxi sa často stáva, že je vplyv koncentrácie zanedbateľný, napríklad v prípade nízkej koncentrácie prímеси. Taktiež ale môže nastať opačný prípad, kedy sa môže difuzivita zvýšiť až desaťnásobne, napríklad v prípade Au-Ni zliatiny, pri zvyšovaní koncentrácie Au z 20 % na 80 %.

5 VYUŽITIE DIFÚZIE V STROJÁRSKEJ VÝROBE

V dávnej minulosti alchymisti používali vtedajšie poznatky o difúzii na ohúrenie publika, prípadne určitých vládnucich skupín. Dnes je známe, že difúzia je prírodný proces a prebieha všade okolo nás. Z hľadiska strojárkej výroby je vyvíjané úsilie buď difúziou zabrániť, z dôvodu jej nepriaznivého vplyvu na materiálové vlastnosti, alebo naopak, poznatky o difúzii použiť a tým zlepšiť parametre určitého procesu. Ako bolo už spomenuté, najväčší vplyv na difúziu má teplota, takže aj postupy a procesy, v ktorých sa difúzia používa cielene, sú charakteristické prívodom veľkého množstva tepelnej energie.

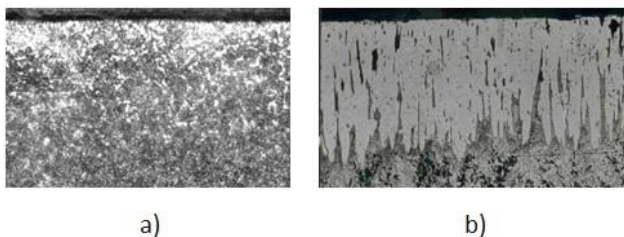


Obr. 7. Postup difúzneho spájania materiálov: a) malé kontaktné plochy pred začatím procesu, b) zväčšenie kontaktných ploch použitím sily a deformácie, c) difúzia po hraniciach zŕn, d) zaplnenie dutín počas difúzie v celom objeme

Difúzne spájanie sa používa na vytvorenie obvykle pevného spoja medzi dvoma alebo viacerými materiálmi (pevnými alebo práškovými), ktoré sa vzájomne dotýkajú bez lepidla, čo umožňuje využiť vyššie prevádzkové teploty a dosiahnuť pevnejší metalurgický spoj (obr.7). Princíp tejto metódy spočíva v tesnom kontakte dvoch súčastí (materiálov), pri pôsobení sily a zvýšenej teploty (nižšia ako je teplota topenia). Pôsobením týchto činiteľov dochádza k splošteniu povrchu a zväčšeniu kontaktných ploch medzi spojovanými materiálmi. V prípade, že už je kontaktná plocha spojená dostatočne, začína sa prenos častíc z hraníc zŕn do dutín a k rastu zŕn. Nakoniec sú všetky dutiny zaplnené a materiály sú pevne spojené. Proces difúzneho spájania materiálov

sa využíva najmä pre spájanie reaktívnych materiálov, ako je napríklad titán, alebo keramika.

Cieľom chemicko-tepelného spracovania je vytváranie povrchových difúzných vrstiev (obr.8) v kovových materiáloch (najmä nízkouhlíkové ocele) za účelom predĺžovania životnosti súčiastok, pracujúcich pri podmienkach zvýšeného namáhania. Tento proces je charakteristický nasycovaním povrchu základného materiálu atómami prvkov ako sú *C*, *N* (prípadne ich kombinácia) a *B*. Toto nasycovanie prebieha obvykle v riadených atmosférach a pri zvýšených teplotách (500 °C ÷ 1100 °C), počas určitého času (rádovo v hodinách). Počas nasycovania sa premiestňujú atómy nasycovaného prvku intersticiálnym spôsobom a konečné množstvo difundujúceho prvku v povrchovej vrstve je kontrolované (cca 1 %). Väzby, ktoré vzniknú medzi atómami v kryštálovej mriežke počas toho procesu, sú v určitých prípadoch tak silné, že je nutné po tomto procese zahrnúť aj proces popúšťania, z dôvodu vzniku možných prasklín.

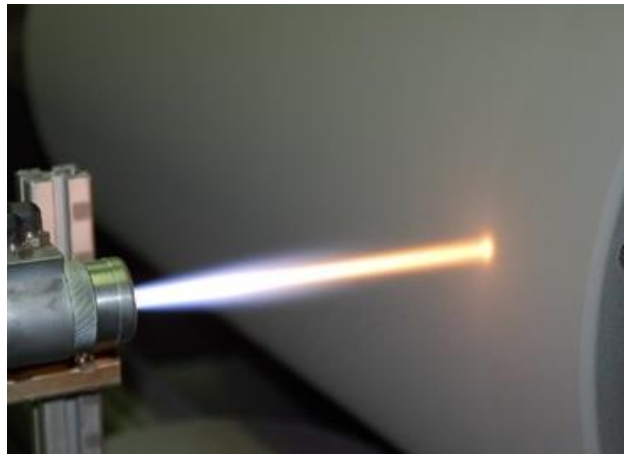


Obr. 8. Chemicko-tepelné spracovanie materiálov: a) difúzia uhlíka po nautličovaní v tuhom prostredí, b) difúzia bóru do základného materiálu pri procese boridovania

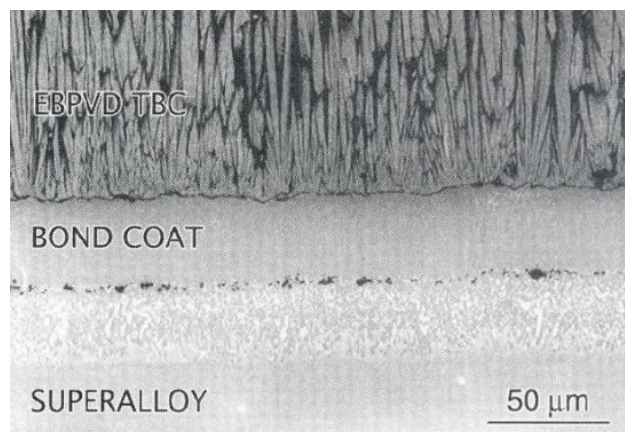
Pri procesoch úpravy povrchu pomocou povlakovania alebo žiarových nástrekov (obr. 9) má maximálny vplyv na kvalitu a funkčnosť súčiastky adhézia systému povlak - substrát, teda schopnosť dvoch materiálovo rozdielnych fáz držať spolu počas pôsobenia zaťaženia. Takisto pri tomto procese má difúzia značný vplyv, aj keď nedochádza k cieľnému ovplyvňovaniu priamo funkčnej plochy, ako v prípade chemicko-tepelného spracovania. Na to, aby povlak (nástrek) bol schopný udržať sa na základnom materiáli, musí dôjsť k výmene atómov medzi týmito dvoma fázami, čím sa vytvoria dostatočne pevné chemické väzby. Drsnosť a čistota povrchu základného materiálu majú v tomto prípade taktiež veľký vplyv na rýchlosť a kvalitu difúzie, preto je potrebné vždy súčiastky pred procesom nanášania povlaku alebo nástreku dôkladne odmastiť, prípadne znížiť profil drsnosti povrchu. V prípade vytvárania žiarových nástrekov sa pred procesom nanášania používa aj pieskovanie povrchu kremičitým pieskom, kedy po nanosení povlaku (napríklad *wolfrámkarbid*, *Mo*) dochádza k vzniku medzivrstvy, niekedy nazývanej aj *grunt*.

Pri oxidácii hliníku vzniká na povrchu oxid hlinitý (Al_2O_3). Ten vytvorí na povrchu materiálu ochrannú

vrstvu, ktorá zabraňuje prenikaniu kyslíku a chráni materiál pred koróziou.



Obr. 9. Proces nanášania žiarového nástreku



Obr. 10. Termálna bariérová vrstva (TBC), vyhotovená na legovanej Ni zliatine

Lopatky lietadlových turbín sú vyrobené z vysokolegovanej *Ni* zliatiny. Táto zliatina je chránená proti vysokým teplotám vrstvami keramických oxidov a nazýva sa *Thermal barrier coatings (TBC)* – termálna bariérová vrstva (obr.10). Množstvo kyslíka, ktoré prejde touto vrstvou ovplyvňuje rýchlosť korózie a tým aj trvanlivosť. Pre zlepšenie adhézie a difúzie medzi TBC a zliatinou sa používa zliatina molybdénu (*bond coat*).



Obr. 11. Optické vlákna umiestnené v ochranných vrstvách

Takisto sa pri optických vláknach využívajú ochranné vrstvy (povlaky), ktoré majú zabrániť difúziou vodnej páry k vláknu. V prípade difúzie by sa zvýšili optické

straty a na povrchu vlákna by sa vytvorili mikropraskliny (obr. 11).

ZÁVER

Difúzia, ako komplexný dej, sa v prírode prejavuje vo všetkých skupenstvách a rôzne jej formy a zákonitosti sú ešte aj v súčasnosti predmetom skúmania viacerých vedcov a odborníkov. Príspevok sa zaoberal najmä difúziou v tuhom skupenstve a jej využitím v strojárskvej výrobe. Znalosti o spôsoboch, ktorými prebieha difúzia a o vplyvoch prostredia na tento proces sú nutnosťou v prípade dimenzovania súčiastok vyrobených z kovových materiálov, keďže tento proces môže mať ako pozitívny, tak aj negatívny vplyv na kvalitu a funkčnosť súčiastky. Cieľom príspevku bolo vysvetliť teoretické základy prenosu častíc v tuhých skupenstvách procesom difúzie a prepojiť tieto poznatky s výrobnými a spracovateľskými postupmi, používanými v strojárskvej výrobe.

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol v rámci riešenia projektu KEGA 022ŽU-4/2021. Autori ďakujú grantovej agentúre za finančnú podporu.

LITERATÚRA

- [1] CALLISTER, W. D. (2003): *Materials science and engineering: an introduction*. 6th ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 820 s., ISBN 0-471-22471-5.
- [2] DYBKOV, V. I. (2010): *Reaction diffusion and solid state chemical kinetics*. 2. vyd. Enfield, New Hampshire: Trans Tech Publications, ISBN 978-3-03813-445-9.
- [3] PAVELEK, M. (2023): *Termomechanika 15. Základy prenosu tepla*. Energetický ústav. [online]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/termo/15_Prenos.pdf>.
- [4] PTÁČEK, L. et al. (2003): *Nauka o materiálu*. 2. vyd. Brno: CERM, 516 s., ISBN 80-7204-283-1.
- [5] SKOČOVSKÝ, P. (2014): *Nauka o materiáli*, Žilina: EDIS, ISBN 978-80-554-0871-2.

Evaluation of the possibilities of use of interactive technology in the laboratory

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 goal of the contribution was to propose the possibilities of using interactive technology in the laboratory and to create a creative and interesting environment for students. One of the benefits is facilitating and streamlining the learning process and developing students' creativity. Interactive hardware (*interactive whiteboard*) and software (*multimedia systems*) were used to solve the work. The conclusion of the work consists of an evaluation of the benefits of using the interactive whiteboard in the laboratory.

Keywords: interactive technology, laboratory, creativity, multimedia system

INTRODUCTION

Interactive whiteboards are a modern and popular technological tool used in the field of education and presentations. Their use brings many opportunities to improve teaching and student engagement. Currently, trends in the field of education focus on the integration of interactive content into the learning process. Interactive whiteboards help to activate students with the help of engaging topic content, enhance long-term memorization of the given situation (solved problem) and connection with the result of this activity (task), and improve students' interest in the interpretation of the subject matter

during the teaching process. By using an interactive whiteboard, it is possible to achieve mutual active communication between the user and the computer. This type of touch-sensitive surface enables the display of content with maximum clarity. Interactivity requires a new approach, which is reflected in the use of software applications.

1 THE USE OF INTERACTIVE TECHNOLOGY IN THE LABORATORY

A visual standard was created for working with an interactive whiteboard and its accessories in the *Laboratory of Designing Production Systems and*

Processes at the Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering at the University of Zilina. This visual standard is placed on the table where educators can view it and follow it if they want to use the interactive whiteboard. By analyzing the possibilities at the university, it was found that the mentioned interactive technology has several possibilities of use. One of the possibilities mentioned is working with different programs that are compatible with the board or the *ActivInspire* program. These are mainly programs such as *Microsoft PowerPoint*, where we can project a presentation on the board and use the *ActivInspire* program to highlight or write notes that would help to better understand the issue of a specific subject in class.

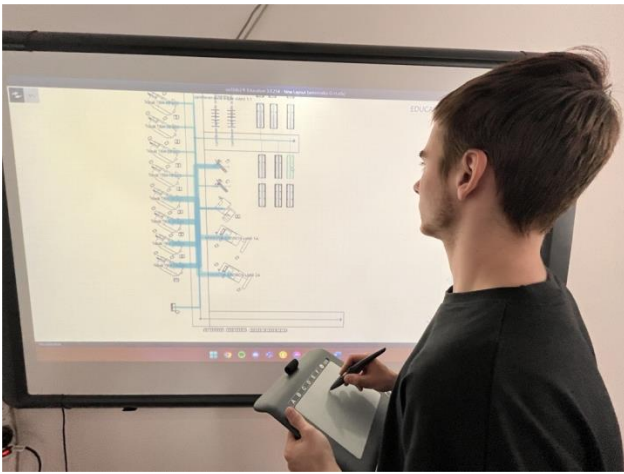


Fig. 1. View 2D - working with Vistable software on an interactive whiteboard

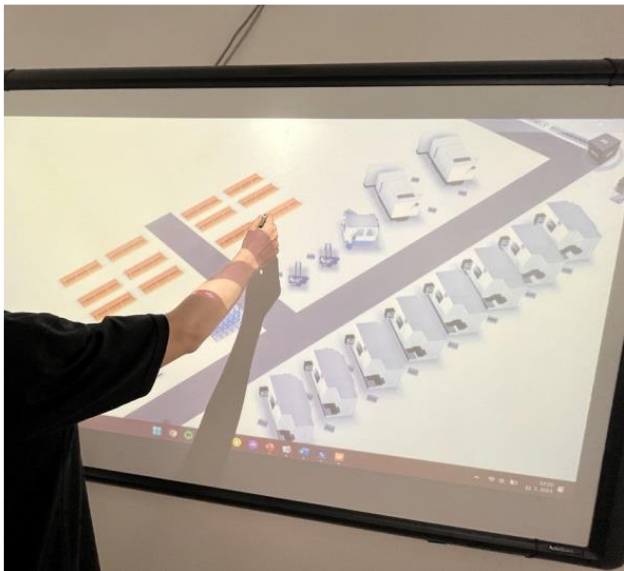


Fig. 2. View 3D - working with Vistable software on an interactive whiteboard

The *Microsoft Word* program is similar, when it is possible to move and show the text on the board and then clarify the issue of the given topic using the *ActivInspire* tools. We can also display photos or play any video on the board either on the Internet or

directly from the computer. The *Vistable* program is also no exception, all that is needed to work with this program is the complete connectivity of a whiteboard, desktop computer or laptop, data projector, and a tablet can also be used together with a pen. Subsequently, it is possible to move and add modifications (machines, workplaces, buildings, cars) in the program. The program with the connected whiteboard is therefore used more for presentation and partial editing and not for creating a production layout.

A great tool is the display of a 3D visualization of the finished project, when it is possible to present the production hall to the students at the lecture and at the same time move between them and offer them control in the 3D visualization with a tablet. The student can move around the production hall by simply dragging the pen on the tablet screen.

Figure 1 shows the work in *Vistable* in a 2D view, and Figure 2 shows a 3D view of the production hall. This assignment is processed in the subject Designing production and assembly systems in the 3rd year of bachelor's studies.

2 POSSIBILITIES OF TESTING STUDENTS IN VARIOUS SUBJECTS

A great use of a large interactive whiteboard is testing, for example using the *kahoot* application for such testing we will also need an Internet connection. The teacher prepares the test before the lesson begins. When the teacher comes to the class, he turns on the blackboard and sets the test on the blackboard, after starting the test, students write the code that is displayed on the screen of the *kahoot* environment into their mobile phones, tablets, laptops or desktop computers. In addition, *Kahoot* also offers a *Ghost Mode* feature that allows users to play games against their own past performance or against the performance of other users. This feature provides the ability to track and improve your progress and compare yourself to others.

After connecting all the students, the teacher starts the test and the students have a certain time to answer the question. After answering all the questions, the evaluation will be done by *kahoot.com* itself.

3 EVALUATION AND BENEFITS

Studies conducted by university researchers have found Prezi to be a more engaging and effective form of presentation than PowerPoint. The principle of creating a presentation through a white canvas, gradually revealing information and using the presentation path guarantees that the presentations will be memorable, original and dynamic. The platform is used to bring the presentation to life using movement, zoom and spatial tools. An open canvas

that is unique will allow you to view and organize the presentation as a whole into topics. *Prezi* includes advanced features for inserting images, text, icons, shapes, graphs, video and animations, the presentation can be shared with students.

The term such as concept maps, mind graphs or mind maps have been known for a long time. The principles of creating mind maps can be learned and transferred to the digital space. Clear, creative and original thinking can help students learn, revise and take notes [1].

EdrawMind software is a tool for creating mind maps, diagrams and other visual tools for organizing and presenting information. This software allows you to create and edit different types of diagrams, including mind maps, organizational charts, Gantt charts, process flow diagrams and many more.

EdrawMind also offers various features for sharing and collaborating with other users, such as the ability to share and comment on diagrams in real time, import and export to different formats, and more. *EdrawMind* is used for a variety of purposes, including project planning, brainstorming, creating presentations, and more. The program is free, eliminating the need to invest in software. But it is necessary to download the software [2].

With the onset of the digital era, new possibilities for the university environment also appear. One of these solutions is the *Office 365* platform, which provides comprehensive tools for effective university management, communication and online learning. If a student or teacher wants to learn or improve in using an e-mail client, organizing work time, recording and backing up documents, sharing materials, creating tests, preparing presentations and conducting online classes, this education is intended for him. The *Office 365* platform enables educators and students to access modern productivity tools from *Microsoft* [3].

Office 365 is applications and services that exist on mobile, computer and web browser. *Office 365* for schools includes: office online (*Word*, *Excel*, *Powerpoint*), document sharing (*Sharepoint*), shared calendar, professional email (*Outlook*), personal data storage (*Onedrive*), online education (*Teams*, *Classnotebook*) [4].

These applications can be used in most subjects; the advantage is that the changes made by the teacher on the interactive whiteboard are simultaneously updated in the document available to the students. The *University of Zilina* provides this package to students completely free of charge [5-6].

The *Buncee* interactive tool shows the real experience of the lesson, presented in the form of multimedia posters, interactive worksheets and online quizzes. With this application, the subject matter can be explained in a new and engaging way. Online login

and diverse material libraries provide inspiration and simplify the use of individual applications.

The *Buncee* platform is used to create interactive digital presentations and teaching materials that can be used in a university environment or for corporate presentations. It allows users to add various elements such as images, videos, sounds, text and animations to presentations to create dynamic and attractive presentations. *Buncee* also provides a number of pre-made templates that users can customize as needed. Thanks to the *Buncee* platform, educators and presenters can engage and motivate listeners and improve their learning and retention. Students can create a multimedia poster with which they can present the assignment in an engaging way.

Wizer.me is an online platform for creating interactive learning materials such as tests, quizzes, challenges and other activities. It serves educators and educational workers as a tool for creating personalized and dynamic educational materials that can be adapted to the individual needs of students and thus improve their educational experience. *Wizer.me* allows educators to create and customize their materials using a variety of tools, such as multiple-choice questions, organizing, text completion, working with images, videos, and audio. Students can complete these materials online, and educators can track their progress and evaluate their work using built-in tools.

Files in the *ActivInspire* program are created in the form of demonstration notebooks (flipcharts) with an unlimited number of pages, which can contain various elements such as texts, animations, videos, audio samples, hyperlinks, embedded Internet browser, active elements from the resource library or created according to your own ideas, notes, annotations on the desktop and assignments or tests. Actions and restrictions can be assigned to each object. By using drawing tools, geometric shapes, images and sounds, you can create a basis for creating interactive tasks, such as secretarial, peke, eight-way, completing words or creating pairs. The benefit of creating a quiz in *ActivInspire* is that students can test their knowledge in a fun and competitive way.

Creating videos for educators is an important part of teaching, but many are often afraid of the complex preparation. However, with *Video Editor*, this is no longer a problem. With this tool, he can quickly and easily create videos for his students and share them instantly [7-8]. In the *Video Editor*, you can easily control converting sources, cutting video, applying filters and transitions, editing audio, inserting subtitles and many other functions that will help you create quality teaching materials. *ClipChamp* is a web application for editing and converting videos. It serves for simple and fast processing of videos directly in the browser.

CONCLUSIONS

The use of an interactive whiteboard in the field of education represents a modern and innovative approach to teaching. Based on the analysis of the use of the interactive whiteboard, we came to the conclusion that this technology can have significant benefits for teaching and learning. One of the main benefits of an interactive whiteboard is improving student engagement and teacher-student interaction. An interactive whiteboard allows information to be presented and shared in a dynamic and interactive way, which can lead to better understanding and retention of the subject matter.

In addition, the interactive whiteboard allows educators to adapt teaching methods to the specific needs and preferences of individual students. Another benefit of an interactive whiteboard is the possibility of easy access to various tools and applications that allow you to create interactive presentations and exercises. On the other hand, interactive whiteboards can be quite expensive and require technical support. In addition, their use requires a certain level of technical skill of teachers and students. Despite these limitations, the results of the analysis show that the interactive whiteboard can be a very useful tool for teaching and learning. Overall, it can be concluded that the use of interactive whiteboards in education represents a new and modern way to improve the quality of teaching and motivate students. With an increasing number of schools and institutions introducing interactive whiteboards into the classroom, this technology is expected to play an increasingly important role in the future of education.

Acknowledgements

This work was supported by project contract No. VEGA1/0248/21.

References

[1] AN INTERACTIVE CLASS (2021): Preparation of materials for interactive whiteboard, education of teachers (In Slovak). Available on: <https://www.interaktivnatrieda.sk/priprava-materialov-preinteraktivnu-tabulu-vzdelavanie-pedagogov/>

[2] 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.

[3] BUCKOVA, M. - GASO, M. - PEKARCIKOVA, M. (2020): *Reverse logistic. InvEnt 2020: Industrial engineering – Invention for enterprise - proceedings*. In: Bielsko-Biala: Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humnistycznej.

[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-Bialej, p. 11-18, ISBN 978-83-66249-56-1.

[5] 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) p. 1-27, ISSN 2076-3417.

[6] 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 May - 28 May, Slovakia. Transportation Research Procedia, 55, pp. 510-517.

[7] BUCKOVA, M. - GASO, M. - PEKARCIKOVA, M. (2020): *Reverse logistic*. In: InvEnt 2020: Industrial engineering – Invention for enterprise: proceedings. Bielsko-Biala: Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humnistycznej, ISBN 978-83-66249-48-6. pp. 36-39.

[8] SUKALOVA, V. - STOFKOVA, Z. - STOFKOVA, J. (2022). *Human Resource Management in Sustainable Development*. In: Sustainability, 14(21), 14258.

Konštrukčný návrh rámu korby pre jednonápravový príves za traktor

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

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.blatnický@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

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

Jakub Kurtulík, Ing.

A design of a single-axle trailer superstructure frame for a tractor

Abstract: This article is focused on the results of the research, which is intended to design of a single-axle tipping tractor trailer. The trailer consists of two main parts, a frame and a superstructure. Both parts of the trailer must undergo strength analyses under determined loading conditions. While results of strength analyses of the frame were already presented on the previous event, this work shows an overview of the strength analysis of the tipping superstructure of the trailer. The structure has been analysed under static loads and dynamical effects have been considered by means of a dynamic coefficient. The task has been performed by application of the *Finite Element Method (FEM)*. Some chosen load cases have been analysed and the distribution of stresses in the structure has been evaluated. Results have shown that the designed structure of the tipping superstructure is able to withstand the given loads and it can be used in practice.

Keywords: 3D model, design, trailer, tractor

ÚVOD

Poľnohospodárstvo je veľmi dôležitou súčasťou ekonomiky krajiny. Nezaobíde sa to bez dopravných strojov. Traktory a ich príslušenstvo k nim patrí. Prívesy sú štandardným a neoddeliteľným dopravným prostriedkom, ktorý umožňuje prepravu tovaru mnohých druhov. V poľnohospodárstve využívajú prívesy rôznych rozmerových a hmotnostných kategórií podľa individuálnych potrieb. Používajú sa jednonápravové prívesy až po troj- až štvornápravové prívesy, buď s jednoduchou nápravou alebo s

riadenými nápravami umožňujúcimi zlepšiť riadiace vlastnosti celej súpravy ťahača a prívesu.

Všeobecne platí, že jednonápravový príves je dopravný prostriedok s nižšou celkovou hmotnosťou, ktorý má uplatnenie v menších farmách na prepravu materiálu na kratšie vzdialenosti, má lepšie riadiace vlastnosti v menších priestoroch. Trojstranný sklápací príves sa javí ako najuniverzálnejší typ prívesu. V zásade sa dá použiť na prepravu takmer všetkých druhov tovaru, ako sú sypké materiály, pevné produkty, balíky slamy, drevo (vo vhodnej forme),

paletizovaný materiál a iné. Jedinou výnimkou sú tekuté produkty.

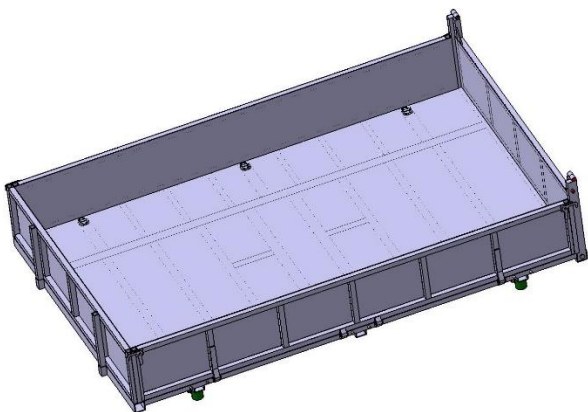
Cieľom tohto výskumu je statická analýza rámu nadstavby takéhoto trojstranného sklápacieho jednonápravového traktorového prívesu. Ide o pokračovanie výskumných aktivít s týmto trailerom, ktorý bol predstavený na predošlom podujatí. Keďže rám, ako podvozku, tak aj nadstavby, je veľmi dôležitý a hlavná nosná časť prívesu, musí byť starostlivo navrhnutý a overený z hľadiska rozloženia namáhania v konštrukcii. Konštrukcia musí spĺňať dané kritériá [4-7], aby sa predišlo vážnym škodám pri jej dlhodobej prevádzke v ťažkých terénnych prevádzkových podmienkach.

1 PODMIENKY EXPERIMENTOV

Výskum jednotlivých zaťažovacích stavov si vyžaduje analýzu hlavných konštrukčných celkov navrhovaného prívesu (obr. 1). Hlavnými skúmanými časťami prívesu sú rám prívesu a rám nadstavby (obr. 2). Práve tieto dva rámy sú najdôležitejšie, pretože sú zaťažované jednotlivými zaťažovacími a súvisiacimi silovými reakciami v plnom rozsahu. Oba konštrukčné celky boli vystavené zaťažovacím prípadom. Keď sa príves pohybuje po ceste, dynamický súčiniteľ δ_D vyjadruje dynamický efekt, ktorý vzniká v dôsledku nerovností vozovky a iných dodatočných vplyvov súvisiacich s jazdou.



Obr. 1. CAD model navrhovaného jednonápravového prívesu za traktor



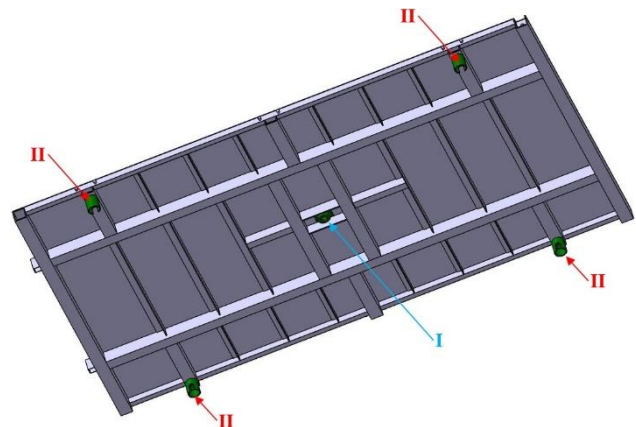
Obr. 2. CAD model analyzovanej konštrukcie korby

Základné parametre navrhovaného prívesu (vrátane analyzovanej nadstavby), ktoré sú dôležité z hľadiska statickej analýzy, sú uvedené v tab. 1.

Tab. 1. Parametre navrhnutého jednonápravového prívesu za traktor

Parameter	Jednotka	Hodnota
Pohotovostná hmotnosť	kg	1500
Užitočné zaťaženie	kg	3000
Celková hmotnosť	kg	4500
Maximálna rýchlosť	km·h ⁻¹	40
Dynamický koeficient	-	1,5

Nižšie sú popísané záťažové stavy. Bola vykonaná analýza rozloženia napätí v ráme prívesu v dôsledku zaťaženia pre tri rôzne stavy zaťaženia. Tento výskum teda prináša detaily analýzy rámu nadstavby. Ide o analýzu sily. Pevnostná analýza bola vykonaná pomocou *metódy konečných prvkov (MKP)* s pomocou modulárneho softvéru *Ansys*. Tento softvér umožňuje vykonávať požadované analýzy a zabezpečuje požadovanú spoluprácu s použitým CAD softvérom *Catia*. Hlavným cieľom je identifikovať rozloženie napätia v rámovej konštrukcii, ktoré vzniká v dôsledku dynamických účinkov zaťaženia.



Obr. 3. Konštrukcia korby, pohľad zospodu

Analýzovaná vyklápacia nadstavba je znázornená na obr. 3. Rám nadstavby je výrobok, ktorý je vyrobený z ocele *EN S355J0*. Tento materiál má medzu klzu $R_e = 355$ MPa a medzu pevnosti $R_m = 470 \div 630$ MPa. Hlavnými nosnými prvkami sú dva pozdĺžne hranaté profily s rozmermi 70 mm x 70 mm x 5 mm. Tieto profily sú spojené a zakončené ďalšími dvoma profilmi s rovnakým tvarom a rozmermi, ktoré sú orientované priečne. Táto hlavná konštrukcia je doplnená o niekoľko ďalších doplnkových pozdĺžnych a bočných profilov tiež so štvorcovým prierezom, ale s menšími rozmermi, a to 35 mm x 35 mm x 3 mm. Stredná časť rámu nadstavby je spevnená bočnými profilmi a medzi nimi je zvarovaný profil *U160*. Tu je umiestnená polgul'ová príruha (*I*) pre montáž čapu hydraulického valca (funkcia sklápania). Bočné, prípadne koncové

časti nadstavby obsahujú polguľové prvky (II). Celá nadstavba bude spočívať len na dvoch bočných pologuľových prvkoch a strednej prírubе pri bočnom sklápaní alebo na dvoch zadných pologuľových prvkoch a strednej prírubе pri spätnom sklápaní. Ložná plocha vyklápacej nadstavby je pokrytá oceľovým plechom hrúbky 3 mm.

Základom statickej analýzy je vygenerovanie geometrie

Zaťaženie pre prvý zaťažovací stav F_{1st} sa vypočíta takto:

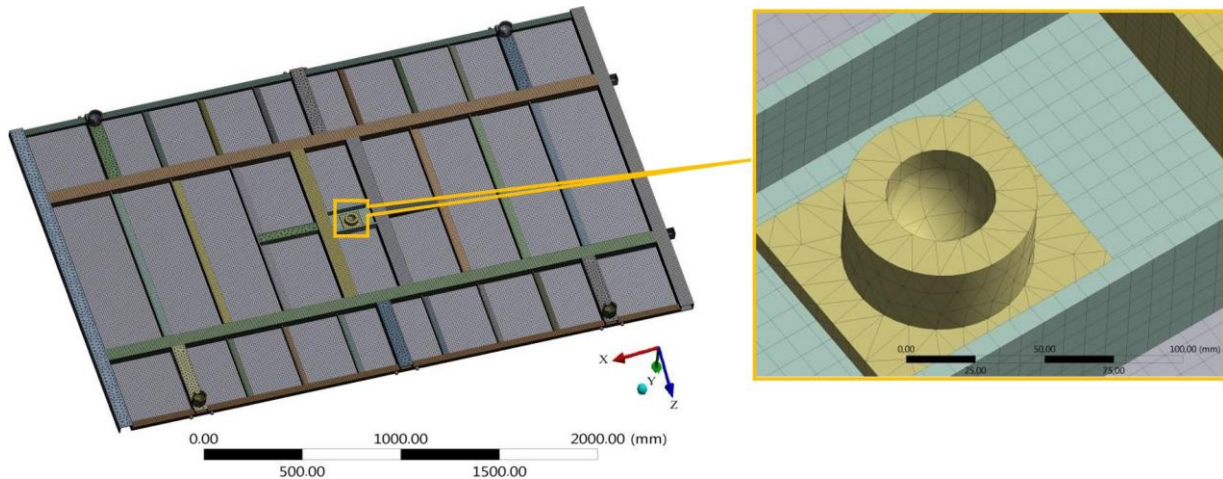
$$F_{1st} = m \cdot g \cdot \delta_D \quad (1)$$

kde m [kg] je hmotnosť nadstavby,

g [$m \cdot s^{-1}$] je gravitačné zrýchlenie,

δ_D [-] je súčiniteľ dynamického zaťaženia.

Dosadením známych hodnôt (tab. 1) dostávame



Obr. 4. MKP sieť vytvorená v konštrukcii korby a jej detail

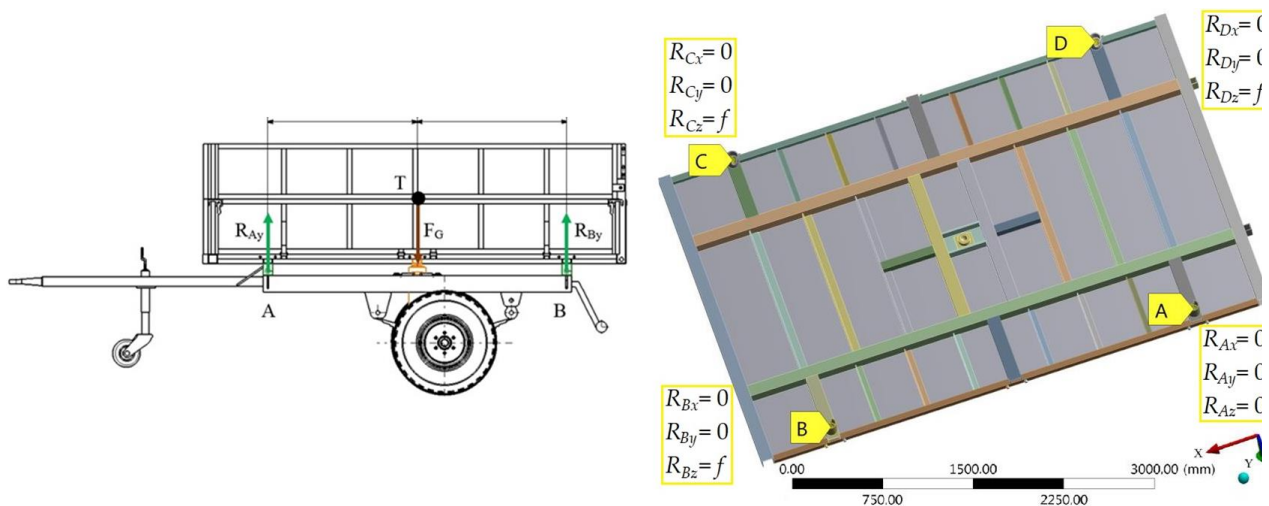
modelu a určenie jednotlivých spojov danými prvkami modelu. Kvadratické šesťstenné prvky boli definované v sieti konečných prvkov s veľkosťou prvku 10 mm. Vytvorená sieť konečných prvkov v nadstavbe ako aj jej detail je na obr. 4.

Definovanie okrajových podmienok závisí od daného zaťažovacieho stavu, ktorý sa skúma. Posudzovali sa tri prípady zaťaženia, a to zaťaženie na rovnej ceste, zaťaženie pri spätnom preklápaní a nakoniec zaťaženie pri bočnom vyklápaní.

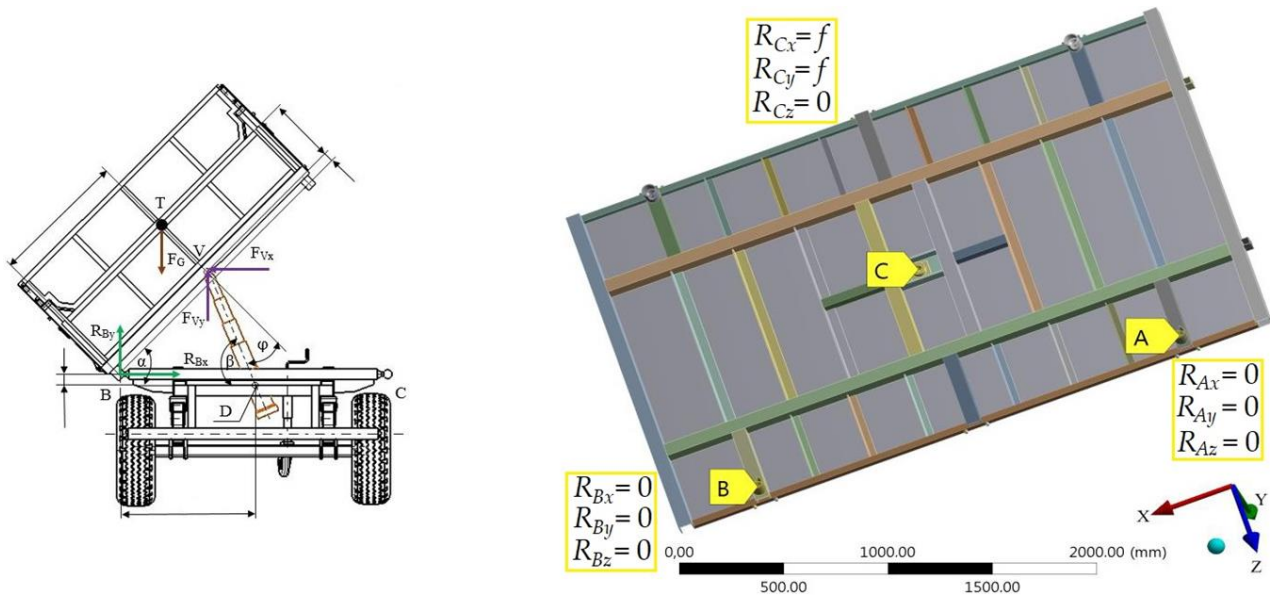
Prvý prípad zaťaženia je pre jazdu po rovnej ceste (obr. 5). Nadstavba spočíva na štyroch pologuľových prvkoch umiestnených po stranách nadstavby. Preto sú v týchto miestach definované stupne voľnosti (obr. 5).

hodnotu zaťaženia $F_{1st} = 44145$ N.

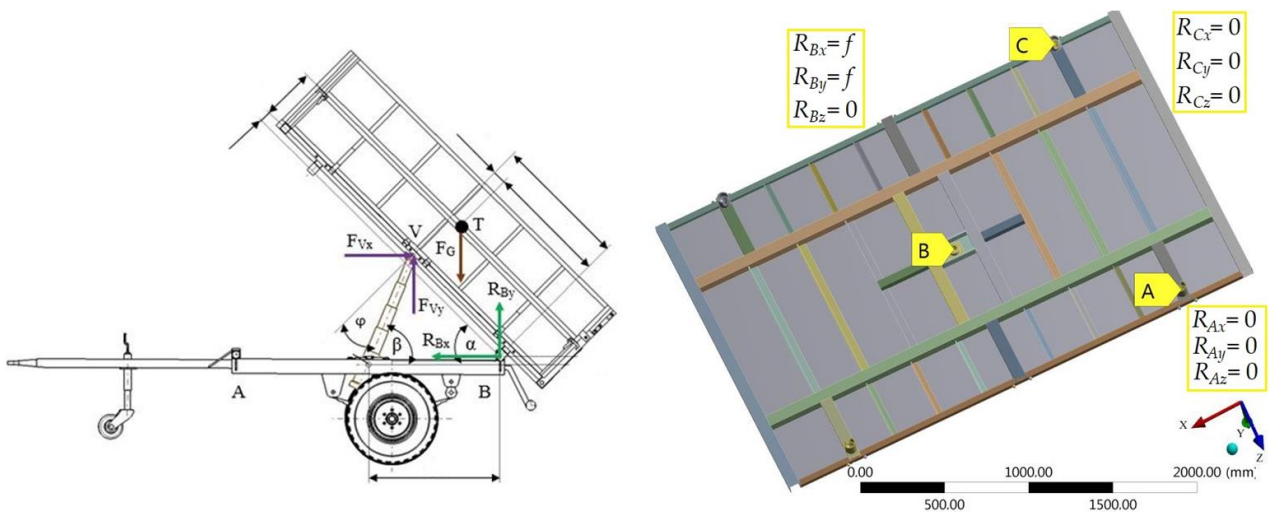
Druhý prípad zaťaženia je pri bočnom sklápaní. Na tento účel sa nadstavba opiera o strednú prírubu a bočné pologuľové prvky (obr. 6). V opísaných miestach sú definované stupne voľnosti (obr. 6), pri ktorých nezáleží na tom, či uvažujeme s pravostranným preklápaním alebo ľavostranným preklápaním. Je to vďaka symetrickému dizajnu nadstavby. Je potrebné poznamenať, že obr. 6 znázorňuje ilustračnú situáciu. Najnepriaznivejší prípad zaťaženia je však pre moment, keď sa nadstavba začne zdvíhať, teda pre veľmi malý uhol sklonu α ($\alpha = 1^\circ$). Keďže preklápanie je počas jazdy zakázané, dynamický koeficient δ_D sa neberie do



Obr. 5. Sily a reakcie definované v konštrukcii pre prvý zaťažovací prípad



Obr. 6. Sily a reakcie definované v konštrukcii pre druhý zaťažovací prípad



Obr. 7. Sily a reakcie definované v konštrukcii pre tretí zaťažovací prípad

úvahy a zaťaženie pre druhý prípad zaťaženia F_{2nd} je dané formuláciou:

$$F_{2nd} = m \cdot g \quad (2)$$

Dosadením známych hodnôt (tab. 1) dostávame hodnotu zaťaženia $F_{2nd} = 29430$ N.

Posledným zaťažovacím stavom (tretím zaťažovacím stavom) je situácia, keď sa nadstavba nakloní dozadu (obr. 9). Nadstavba spočíva na dvoch zadných bočných pologuľových prvkoch a na strednej prírubke (obr. 10). Obrázok 10 znázorňuje definíciu stupňov voľnosti. Podobne ako v predchádzajúcom prípade, aj obr. 9 predstavuje názornú situáciu. To znamená, že najnepriaznivejší prípad zaťaženia je aj v momente, keď sa nadstavba začne zdvíhať a uhol sklonu je $\alpha = 1^\circ$. Dynamický koeficient δ_D sa opäť neuvažuje. Zaťaženie pre tretí zaťažovací stav F_{3rd} je dané formuláciou:

$$F_{3rd} = m \cdot g \quad (3)$$

Hodnota zaťaženia je rovnaká ako pre druhý zaťažovací stav, teda $F_{3rd} = 29430$ N.

2 VÝSLEDKY A DISKUSIA

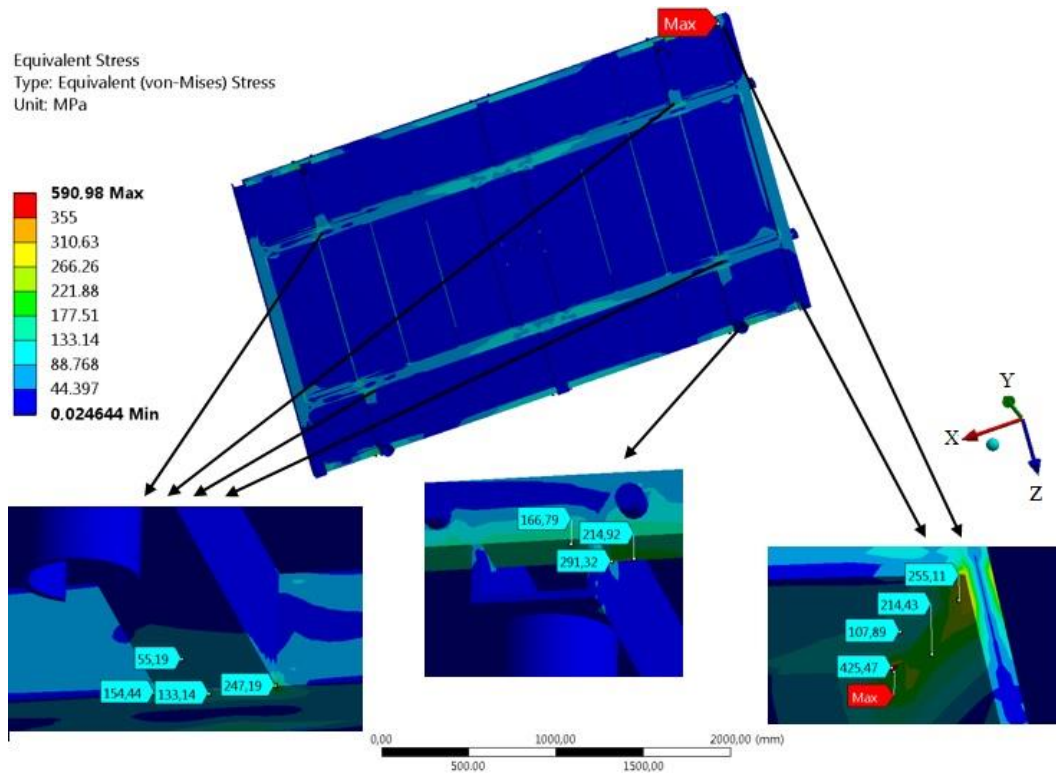
Táto časť obsahuje výsledky pevnostných výpočtov nadstavby pre jednotlivé vyššie popísané zaťažovacie stavy.

Obrázok 8 zobrazuje rozloženie napätí v konštrukcii pre prvý prípad zaťaženia. Možno konštatovať, že maximálne redukované napätie (*von Mises*) sa sústreďuje v oblasti, kde sú pozdĺžne bočné profily (s rozmermi 35 mm x 35 mm x 3 mm) spojené s bočnými profilmi (s rozmermi 70 mm x 70 mm x 5 mm). Detailne je to vidieť na obr. 8. V strednej časti je najviac zaťažených pár pozdĺžnych profilov. Číselné hodnoty ukázali, že nie sú prekročené maximálne dovolené napätia a konštrukcia spĺňa pevnostné podmienky pre prvý zaťažovací stav.

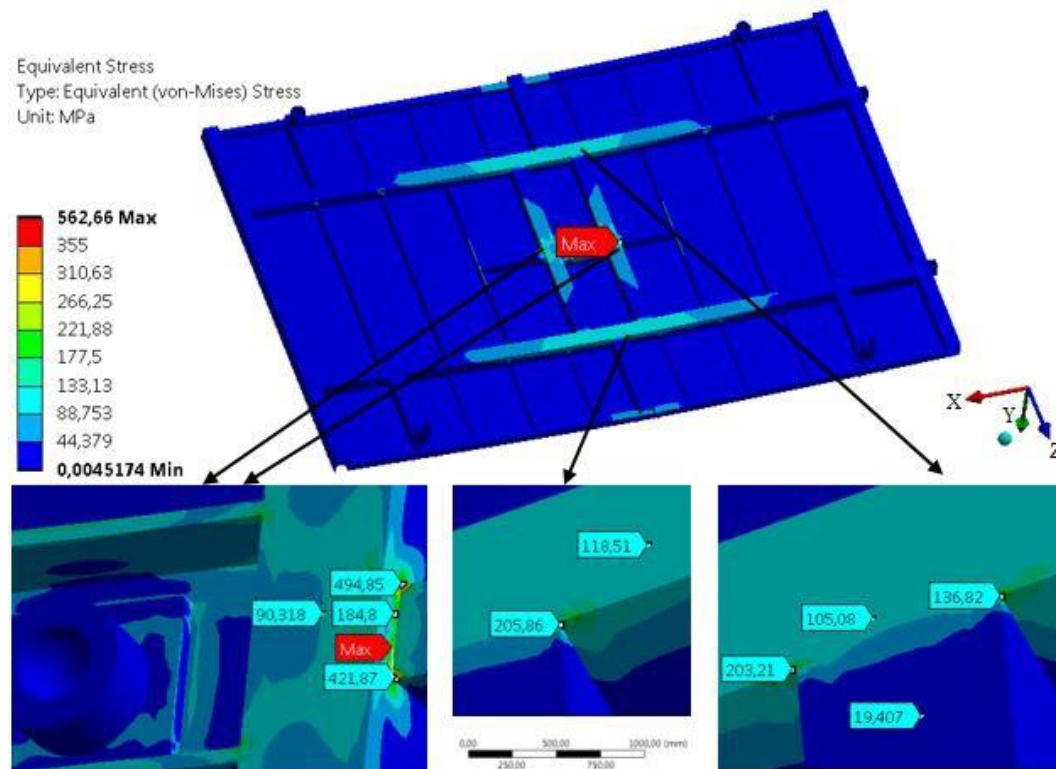
Výsledky pevnostnej analýzy pre druhý zaťažovací stav sú znázornené na obr. 9. Po pevnostných analýzach je

zrejme, že stredná časť nadstavby patrí k najviac zaťaženej konštrukčnej časti nadstavby. V tomto mieste sa uvažuje o montáži hydraulického valca. Vyššie hodnoty redukovaných napätí (*von Mises*) sú spôsobené spojením menších pozdĺžnych profilov (50

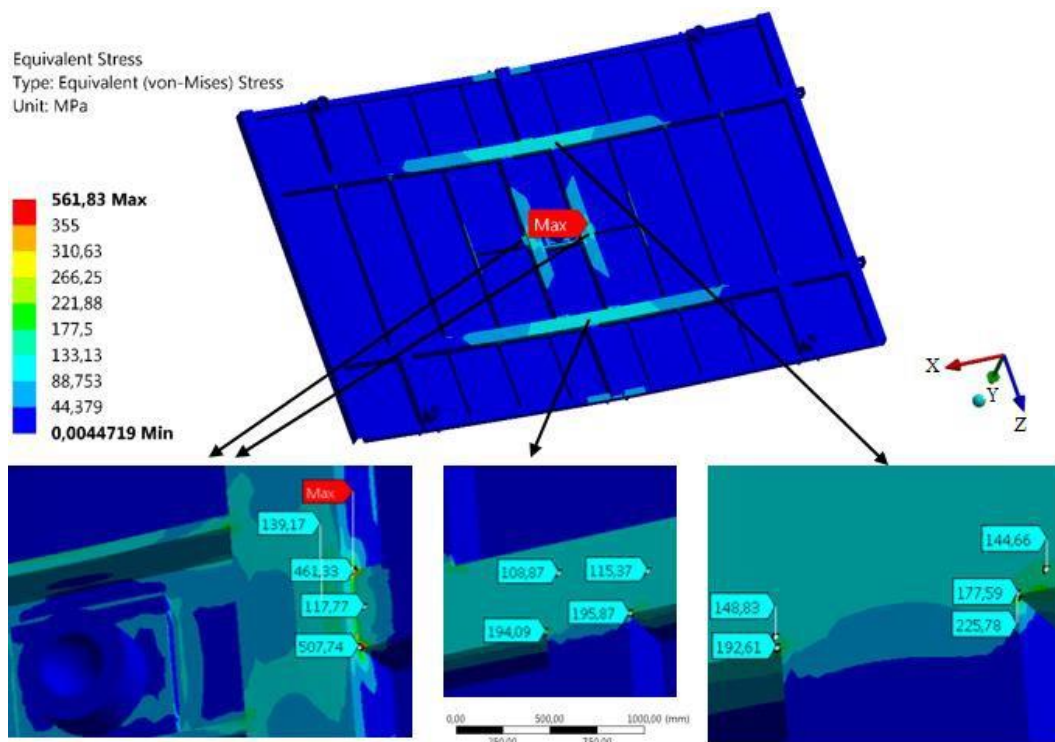
mm x 50 mm x 5 mm) s bočnými nosnými profilmi (70 mm x 70 mm x 5 mm). Toto je zobrazené na obr. 10. Tieto pevnostné analýzy ukázali, že žiadne zaťaženie zodpovedajúce druhému zaťažovaciemu stavu neprekračujú hodnotu dovoleného napätia použitého materiálu.



Obr. 8. Grafické zobrazenie rozloženia napätí v konštrukcii korby pre prvý zaťažovací stav



Obr. 9. Grafické zobrazenie rozloženia napätí v konštrukcii korby pre druhý zaťažovací stav



Obr. 10. Grafické zobrazenie rozloženia napätí v konštrukcii korby pre tretí zaťažovací stav

Numerické analýzy nadstavby pre tretí zaťažovací stav viedli k rozloženiu napätia v konštrukcii, ako je zobrazené na obr. 10. Ako je možné vidieť, vyklápanie do strany spôsobuje najväčšie hodnoty redukovaného napätia (von Mises) v stredovej časti nadstavby rámu, kde je montovaný hydraulický valec a tiež v oblasti konštrukcie, kde sú umiestnené hlavné pozdĺžniky rámu. Ani v prípade tohto zaťažovacieho stavu neboli prekročené maximálne hodnoty napätí v konštrukcii nadstavby.

Dosiahnuté výsledky pevnostných analýz rámu nadstavby pre jednotlivé záťažové stavy ukázali, že hlavné nosné profily rámu sú zaťažené najmä v strednej časti nadstavby, kde je namontovaný hydraulický valec. Tieto napätia sú v rámci prípustných hodnôt napätia.

ZÁVER

Konštrukcia nadstavby pre jednonápravový prívos bola navrhnutá spolu so samotným prívosom. Navrhnutá nadstavba je určená pre použitie ako univerzálna trojstranná sklápacia korba pre prepravu materiálu rôzneho druhu. Príspevok prezentuje statickú analýzu rámu nadstavby a celej konštrukcie pre tri zaťažovacie stavy, ktoré reprezentujú hlavné druhy zaťaženia, ktoré sa môže vyskytnúť počas prevádzky prívosu. Výsledky statických analýz ukázali, že konštrukcia prívosu spĺňa požiadavky z hľadiska predpísaných limitných hodnôt.

Pod'akovanie

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] GERLICI, J. - SAKHNO, V. - YEFYMENKO, A. - VERBITSKII, V. - KRAVCHENKO, A. - KRAVCHENKO, K. (2018): *The stability analysis of two-wheeled vehicle model*. In: MATEC Web of Conferences, vol. 157.
- [2] HARUŠINEC, J. - SUCHÁNEK, A. - LOULOVÁ, M. - STRÁŽOVEC, P. (2018): *Design of a device to simulate environmental influences on the course of brake tests*. In: MATEC Web of Conferences, vol. 157.
- [3] FOMIN, O. - GERLICI, J. - LOVSKA, A. - KRAVCHENKO, K. - PROKOPENKO, P. - FOMINA, A. - HAUSER, V. (2019): *Durability determination of the bearing structure of an open freight wagon body made of round pipes during its transportation on the railway ferry*. In: Communications – Scientific Letters of the University of Zilina, vol. 21, pp. 28-34.
- [4] ŠTASTNIAK, P. - KURČÍK, P. - PAVLÍK, A. (2018): *Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform*. In: MATEC Web of Conferences, vol. 235.
- [5] JAKUBOVICOVA, L. - SAPIETOVA, A. - MORAVEC, J. (2018): *Static analysis of transmission tower beam structure*. In: MATEC Web of Conference, vol. 244.

Evaluation of new trends and reasons for attendance artificial intelligence at the operational level

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 contribution is focused on the analysis of the current state of the introduction of artificial intelligence in enterprises in *Slovakia*. Here are also the results of a questionnaire survey aimed at finding out what the participating small and medium-sized enterprises mean by the term digitization, whether they use it and consider it important. The questionnaire also investigated whether companies are familiar with the national strategies of *Industry 4.0* or how they see the service provision and financing system in this context. The conclusion of the article is devoted to the evaluation of new trends and reasons for the emergence of artificial intelligence.

Keywords: artificial intelligence, new trends, operational level

INTRODUCTION

Artificial intelligence was just a fantasy in the past, even though machines that copied human activities were already created in the past. Nowadays, fantasy is becoming more and more a reality, as modern technology continues to develop and advance. Many people may have a negative opinion about the benefits of this technology to the lives of ordinary people because of science fiction movies. At the same time,

artificial intelligence is a great helper, even if we don't realize it, we use it every day. We can encounter artificial intelligence, for example, during online shopping, in advertisements, in self-driving cars, in the health sector for the development of new medicines or in normal weather forecasting. The use of artificial intelligence deepens every year, whether in businesses or in everyday life.

1 NEW TRENDS FOR ATTENDANCE ARTIFICIAL INTELLIGENCE

As part of the evaluation of the findings from the analysis of the current state of the introduction of artificial intelligence in enterprises in the Slovak Republic, possibilities for the use of new trends and reasons for the introduction of artificial intelligence at the operational level were proposed for enterprises. At the same time, the chapter contains different possibilities of using elements of artificial intelligence, risks of artificial intelligence and the current use of artificial intelligence in companies around the world.

The arrival of a new wave of technologies, including artificial intelligence, is inevitable and is influenced by the following trends currently prevailing in the industry [1-3].

1.1 Aging of the automation infrastructure

Automation systems that today perform various manufacturing operations have existed since the beginning of the second industrial revolution. This has created a huge gap between the rapid progress in *ICT* and the aging automation infrastructure. For reasons such as the risk of unplanned downtime and non-compliance, competitive disadvantages and increasing maintenance costs only further increase the need to modernize traditional automation systems [4].

Recommendation for businesses:

From the point of view of the aging of the automation infrastructure, it is recommended for enterprises at the operational level to carry out a survey of the possibilities of modernizing the technological park in order to be competitive. Furthermore, carry out research on the modernization of the introduction of artificial intelligence elements into production.

1.2 Aging workforce

With advancing technology affecting production, businesses face new challenges in the form of a shortage of skilled labour. An aging workforce cannot keep up with evolving technologies or run smart digital factories. This results in the development of a new kind of industry expertise that is needed to develop and maintain advanced automation systems [5-7].

Recommendation for businesses:

Together with the implementation of new technologies, train competent workers regarding the methods of operation of the given technology. It is easier for a company to train an original employee who is already familiar with the operation of the company than to train a completely new employee.

1.3 Resistance to new technologies

Change in any form comes with some resistance. It is very difficult to deploy newer technologies without affecting current business or production processes. The change also means that producers will have to use more of the existing resources [4].

Recommendation for businesses:

Since workers have a familiar system of work and may feel resistance to change when introducing elements of artificial intelligence, the recommendation may be to implement training and educational programs for the development of their skills in the use and operation of new technologies.

2 ARTIFICIAL INTELLIGENCE, AUTOMATION, ROBOTIZATION AND ITS IMPACT ON SOCIETY

Due to the continuous development of artificial intelligence, automation and robotization, entire industries will be abolished in the future. It is estimated that between 9 % and 47 % of the workforce could be replaced by automation. The consulting company *McKinsey* predicts that by 2030, robots should replace around 800 million workers in the world [8-10].

According to *OECD* data, robotization should replace about a third of current jobs in *Slovakia*. The most endangered positions are located in the west of the country, which amounts to 40 % of jobs. For the previous generation, the skills acquired at school were enough for 26 years, today it is only four and a half years. Therefore, it is necessary for universities to adjust their focus and focus on lifelong learning. It is estimated that up to 65 % of children who enter primary school will have jobs that do not yet exist. Jobs that require interaction with people, the use of social intelligence or work in an unpredictable environment will be difficult to automate in the first wave [11].

On the contrary, job positions such as assembler, storekeeper, cashier, baker, taxi driver or truck driver, i.e. routine activities or activities in predictable environments, will completely disappear. Among the less threatened professions are, for example, assistants, consultants or accountants, although their occupations will require far fewer workers due to the automation of most tasks [12-13].

Relatively safe positions are represented by professions such as teacher, doctor, dentist, nurse, businessman, hairdresser, artist or scientist. In very many cases, the professions themselves will not disappear, but the work performed will be significantly automated. For example, cardiologists reviewing medical images will be assisted by expert

systems capable of instantly evaluating millions of patient images from around the world, with the resulting report signed by the cardiologist to the patient. In turn, artificial intelligence will help lawyers analyse hundreds of documents in the stage of preparation for the hearing, but it will be the lawyer who will advise on presenting the case to court. It is expected that an ever-increasing number of people will remain not only unemployed, but also unemployable. Also, the growing supply of cheap machine labour will eventually reduce human fees far below the cost of living [14-16].

Recommendation for businesses:

Businesses could cooperate with secondary schools and universities, for example in the framework of dual education, so that there is a transfer of needs and requirements to employees.

CONCLUSIONS

The various possibilities of using elements of artificial intelligence include:

Optimization of production - by production optimization we understand a wide and diverse group of artificial intelligence and mathematical modelling with the aim of efficient management of resources, maximization of outputs and minimization of negative outputs of the given process. This often means a set of partial smaller solutions rather than a single monolithic solution. Production optimization is suitable for companies from the manufacturing or processing industry that have data in various information systems. The use of artificial intelligence therefore represents a continuation or extension of an already started automation process [17-18].

Quality management, control and analysis - suitable for various companies in which the control of serial and mass production plays an important role and in which it is possible to replace the visual control of the product either during production or at the output of the finished product. Full automation using the vision system, based on artificial intelligence, is possible wherever a visual inspection without further analysis is sufficient to detect a defect or analyse a sample. The key to deploying artificial intelligence is to have enough reference samples and identifiers for machine decision making. This is the deployment of the so-called machine vision systems, the basis of which is a higher level of artificial intelligence working on neural networks.

Intelligent automation of non-production processes - this technology is ideal for companies that value processes as repeatable, not requiring a higher degree of human creativity.

The smart industry action plan also published the conclusions of the *Hungarian* study, which, in cooperation with partner institutions from the *Czech*

Republic, Slovakia, Poland, Germany and Italy, drew up the most important effects of digitization and aspects of *Industry 4.0* on the basis of a questionnaire survey among small and medium-sized enterprises in the mentioned countries. The questionnaire survey focused on questions such as: what do the participating companies imagine by the term digitization, do they use it, or do they consider it important. The questionnaire also examined whether companies are familiar with the national strategies of *Industry 4.0*, whether they have heard about them, or how they see the service provision and financing system in this context.

Main findings from the mentioned questionnaire survey:

- digitization is not an option, but an irreversible process, taking into account the extent to which it is necessary for small businesses and not forgetting the fact that it depends on the type of work,
- surveys indicate that robotics together with digitization will be included in all areas of life, which will cause the demise, but also the creation of new professions,
- from the point of view of small businesses, robotics and digitization should be considered not only as a problem, but also as an opportunity,
- due to the lack of information of small businesses about the overall progress of the mentioned processes, they suffer. Therefore, they need continuous and more extensive access to information sources to find out what these processes will mean for them in the future.

Acknowledgements

This work was supported by project contract No. VEGA1/0248/21.

REFERENCES

- [1] ATP journal (2019): *Artificial intelligence at the operational level (1)*. (In Slovak) [online]. Available on: https://www.atpjournals.sk/buxus/docs/casopisy_cele/ATP%20Journal%209%202019.pdf
- [2] ATP journal (2019): *Artificial intelligence at the operational level (3)*. (In Slovak) [online]. Available on: https://www.atpjournals.sk/buxus/docs/casopisy_cele/ATP%20Journal%2011%202019.pdf
- [3] ATP journal (2020): *Artificial intelligence augments human capabilities, not replaces them*. (In Slovak). [online]. Available on: https://www.atpjournals.sk/buxus/docs/casopisy_cele/ATP%20Journal%207%202020.pdf#page=1
- [4] EUROPARL (2020): *Artificial intelligence: definition and use*. (In Slovak). [online]. Available on:

<https://www.europarl.europa.eu/news/sk/headlines/society/20200827STO85804/umela-inteligencia-definicija-a-vyuzitie>

[5] BIELIKOVÁ, M. et al. (2019): *Analysis and proposal of possibilities for research, development and application of artificial intelligence in Slovakia* (In Slovak). [online]. Available on: <https://www.mirri.gov.sk/wp-content/uploads/2020/03/Dielo2-Manual.pdf>

[6] MHSR (2021): *Concept of intelligent industry for Slovakia*. (In Slovak) [online]. Available on: <https://www.mhsr.sk/uploads/files/DIBTWTJL.docx>

[7] MHSR (2021): *Proposal of an action plan for the intelligent industry of the Slovak Republic* (In Slovak) [online]. Available on: <https://www.mhsr.sk/uploads/files/8U6RKSS5.pdf>

[8] MIRRI (2021): *Action plan for the digital transformation of Slovakia for years 2019-2022*. (In Slovak). [online]. Available on: https://www.mirri.gov.sk/wp-content/uploads/2019/07/Akcnny-plan-DTS_2019-2022.pdf

[9] MIRRI (2021): *Slovakia's digital transformation strategy 2030*. (In Slovak) [online]. Available on: <https://www.mirri.gov.sk/wp-content/uploads/2019/06/Strategia-digitalnej-transformacie-Slovenska-2030.pdf>

[10] 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.

[11] BUCKOVA, M. - GASO, M. - PEKARCIKOVA, M. (2020): *Reverse logistic*. In:

InvEnt: Industrial engineering - Invention for enterprise - proceedings. Bielsko-Biala: Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej, pp. 36-39, ISBN 978-83-66249-48-6.

[12] Burganova, N. - Grzmar, P. - Mozol, S. (2020): *Design of logistics system in production*. In *Technologie, procesy i systemy produkcyjne*. Bielsko-Biala : Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Białej, ISBN 978-83-66249-56-1, p. 11-18.

[13] 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) p. 1-27, ISSN 2076-3417.

[14] 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. Virtual conference 26 May-28 May, Slovakia. *Transportation Research Procedia*, 55, pp. 510-517.

[15] SUKALOVA, V. - STOFKOVA, Z. - STOFKOVA, J. (2022): *Human Resource Management in Sustainable Development*. In: *Sustainability*, 14(21), 14258.

[16] AHMED, N. (2021): *What is artificial Intelligence? (AI)* [online]. Available on: <https://www.aitimejournal.com/@nisha.arya.ahmed/what-is-artificial-intelligence-a>

[17] ATOZOFAI (2021): *Ludská reč* [online]. Available on: <https://atozofai.withgoogle.com/intl/sk/speech-recognition/>

Motto: „Boh stvoril celé čísla a ostatné je dielom človeka.“

Leopold Kronecker, nemecký matematik

RECENZIA

Vo vydavateľstve *Ikar* v roku 2021 vyšla zaujímavá kniha od autora *Dana Mackenzie* s názvom *Príbeh matematiky v 24 rovníkoch*, ISBN 978-80-551-7752-6. Slovenský preklad urobil *M. Demetrian*. Kniha má 224 strán vrátane registra. Kladne možno hodnotiť, že autor rešpektuje *Komenského zásady* a postupne prechádza vo svojom výklade od aritmetiky a rovnice $1 + 1 = 2$ až po *Black-Scholesovu rovnicu* predvídateľnosti investovania a variability akciových trhov. Text knihy je rozdelený na tieto štyri časti:

Prvá časť. Rovnice antiky:

1. Prečo veríme aritmetike: *Najjednoduchšia rovnica na svete.*
2. Odpor k novému konceptu: *Objav nuly.*
3. Štvorec nad preponou: *Pytagorova veta.*
4. Hra s kruhmi. *Objav čísla π .*
5. *Od Zenónových paradoxov po myšlienku nekonečna.*
6. Rovnováha: *Zákony páky.*

Druhá časť. Rovnice v ére objavov:

7. Tajomstvo koktavého muža: *Cardanov vzorec.*
8. Nebeský poriadok: *Keplerove zákony pohybu planét.*
9. Písanie pre večnosť: *Veľká Fermanova veta.*
10. Neprebádaný kontinent: *Základná veta kalkulu.*
11. Jablká, legendy... a kométy: *Newtonove zákony.*
12. Veľký bádateľ: *Eulerove vety.*

Tretia časť. Rovnice v revolučných časoch:

13. Nová algebra: *Hamilton a kvaternióny.*
14. Dve padajúce hviezdy: *Teória grúp.*
15. Geometria veľrýb a mravcov: *Neeuklidovská geometria.*
16. Veríme v prvočísla: *Prvočíselná veta.*
17. Myšlienka spektier: *Fourierove rady.*
18. Boží pohľad na svetlo: *Maxwellove rovnice.*

Štvrtá časť. Rovnice našej doby:

19. Fotoelektrický jav: *Kvantá a relativita.*
20. Od zlej cigary až po Westminsterské opátstvo: *Diracova rovnica.*
21. Budovateľ impéria: *Čchenova-Gaussova-Bonnertova rovnica.*
22. tak trochu nekonečná: *Hypotéza kontinua.*
23. Teória chaosu: *Lorenzove rovnice.*
24. Skrotenie tigra: *Blackova-Scholesova rovnica.*

Kniha je veľmi dobre napísaná a hoci je to vedecký text, dá sa mu pohodlne rozumieť a pre pobavenie čitateľa je v kapitole *Počítadlo verus umenie počítať* opísaný súboj v počítaní nositeľa *Nobelovej ceny R. P. Feynmana* a *brazílskeho pouličného predavača drevených počítadiel*. Ako to dopadlo sa dozviete na stranách 12-14 prezentovanej knihy.

JM

Poznámka: prekladateľ na strane 92 udáva akoby *Newtonovo* dielo *Philosophiae naturalis etc.* vyšlo len v českom preklade. Pozrite si *Technológ 4/2021* na strane 74-75, kde som o *slovenskom* preklade *Newtonovej* knihy písal.



prof. Ing. Lubomír Bechný, CSc. nás opustil.

V letnom čase dňa 20. 8. 2023 nás opustil vzácny človek, kolega a kamarát *L. Bechný*. Odišiel vo veku nedožitých 90 rokov.

Prof. Ing. Lubomír Bechný, CSc. sa narodil 31. 12. 1933 v *Bohumíne*. Krátko na to sa rodina presťahovala do *Vsetína*, kde *L. Bechný* strávil celé detstvo a mladosť. Na milované *Valašsko* sa veľmi rád vracal celý život.

Po absolvovaní *Strednej priemyselnej školy strojníckej vo Vsetíne* a *Slovenskej vysokej školy technickej v Bratislave* prešiel technologickými metalurgickými funkciami v *Zbrojovke Vsetín* a *Martinských strojárňach v Martine*.

Od roku 1964 pôsobil ako vysokoškolský učiteľ na *Žilinskej univerzite* (vtedy *Vysokej školy dopravnej*). Začínal ako odborný asistent, pokračoval ako vedúci zlievarenského oddelenia a neskôr zastával funkciu vedúceho katedry. Patril medzi prvých dvadsiatich vysokoškolských profesorov, vymenovaných v samostatnej *Slovenskej republike* v máji 1993.

Počas takmer štyridsaťročného pôsobenia na *Žilinskej univerzite* vychoval stovky absolventov v odbore *Strojárska technológia* so špecializáciou *zlievarenstvo*. Bol vedúcim diplomových prác viac ako 100 diplomantov. Školil viacerých doktorandov. Štrnásť doktorandov úspešne obhájilo doktorandské práce. Ako predseda habilitačných a inauguračných komisií pripravil viacerých habilitantov a inauguratorov k úspešným docentúram a profesúram.

V ostatnom období bol členom vedeckých rád *Žilinskej univerzity*, *fakultnej vedeckej rady SjF* a *vedeckej rady Fakulty výrobných technológií (FVT) Technickej univerzity Košice so sídlom v Prešove*. Takisto bol niekoľko rokov predsedom štátnicových komisií *FVT v Prešove* a na *Materiálovo-technologickej fakulte STU Bratislava so sídlom v Trnave*, členom štátnicovej komisie pre slévarenství na *VUT v Brne*.

Profesor *Bechný* vytvoril vedeckú školu v oblasti metalurgického procesu a kryštalizácie grafitických liatin, nových progresívnych typov a filtrácie kovov. Bol medzinárodne uznávaným odborníkom. Prednášal na zahraničných univerzitách a taktiež pravidelne prednášal na svetových zlievarenských kongresoch (*Lisabon, Krakow, Peking, Philadelphia, Haag* a iné), na sympóziách a konferenciách. Bol odborným garantom medzinárodných konferencií

Očkovadlá a predzliatiny, medzinárodných metalurgických sympózií a spoluzakladateľom známej stredo európskej medzinárodnej konferencie slovenských, českých a poľských zlievačov SPOLUPRÁCA. Bol autorom a spoluautorom mnohých vysokoškolských učebníc a skript v oblasti teórie zlievania, metalurgie liatin a filtrácie. Celú dobu pôsobenia na Žilinskej univerzite venoval pozornosť celoživotnému vzdelávaniu odborníkov z praxe.

Významná bola aj jeho spolupráca s priemyslovými podnikmi pri riešení konkrétnych zlievarenských problémov a jeho spolková činnosť. Niekoľko rokov bol predsedom Slovenskej metalurgickej skupiny ČS VTS, členom predsedníctva Československé slévárenské společnosti. Po vzniku Slovenskej republiky bol prvým predsedom Slovenskej zlievarenskej spoločnosti.

V jeho profesijných stopách kráča syn Vladimír, v ďalšej generácii pokračujú aj vnuci Vladimír ml., a Adam, ktorí sa venujú rovnakému odboru ako starý otec.

Luboš miloval rodinné stretnutia, rád sa stretával s priateľmi a bývalými kolegami. Kým mu to zdravie umožňovalo, zúčastňoval sa na rôznych odborných konferenciách a stretnutiach. Tiež veľmi rád cestoval a spoznával nové krajiny a kultúry.

Napriek tomu, že mu už zdravie posledné roky neslúžilo, boli sme radi, keď sa pán profesor rád zúčastňoval aj vo vysokom veku katedrových akcií, pričom stále intenzívne spomínal na svoje pôsobenie na našej katedre, fakulte a univerzite. Na oslavách 70. výročia založenia Žilinskej univerzity a akcii Otvorená univerzita, kde sme ho privítali aj v našej univerzitnej zlievarni.

Česť Tvojej pamiatke Luboš, odpočívaj v pokoji.

DB



S kolegami v júni 2023 na oslavách 70. výročia založenia Žilinskej univerzity.

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 Kantoríková, PhD.

prof. Ing. Jozef PILC, CSc.

redakčná rada - editorial board:

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

doc. Ing. Silvia MALÁKOVÁ, PhD. (SK)

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

Ing. Vladimíra BIŇASOVÁ, PhD. (SK)

doc. Ing. Jozef BÍLIK, PhD. (SK)

doc. Dr. - Inž. Janusz MUSIAL (PL)

Dipl. Ing. Eva REGER (D)

doc. Ing. 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. (UA)

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)

ISSN 1337-8996

DOI: <https://doi.org/10.26552/tech.J.2023.3>