

Experimentální a výpočtové metody v inženýrství

11. ročník konference pro mladé vědecké pracovníky

12. - 13. června 2024, Ústí nad Labem, Česká republika



Sborník příspěvků

Editor

Martin Svoboda a Vít Černohlávek

Ústí nad Labem

ISBN 978-80-7561-472-8



9 788075 614728

Editor: Ing. Martin Svoboda, Ph.D.
Ing. Vít Černohlávek, Ph.D.

ISBN 978-80-7561-472-8

Předmluva

Dámy a pánové, drazí čtenáři,

V předloženém sborníku jsou shrnuty příspěvky vědeckých pracovníků předních vzdělávacích institucí a výzkumných ústavů z České, Polské a Slovenské republiky z mezinárodní vědecké konference Experimentální a výpočtové metody v inženýrství (EVM 2024).

Konference proběhla dne 12. až 13. června 2024 v Ústí nad Labem a pořádal ji Ústav strojů a energetiky Fakulty strojního inženýrství Univerzity Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem.

Příspěvky vědeckých pracovníků se věnují především experimentální, numerické či analytické analýze v oblastech strojních konstrukcí, materiálového inženýrství, stavebnictví, energetiky, teplárenství, biomechaniky. Příspěvky jsou doprovázeny obrazovou přílohou naměřených dat a zhodnocením výsledků vědecké činnosti.

Ing. Martin Svoboda, Ph.D.

Programový výbor konference

Odborný garant

- Ing. Martin Svoboda, Ph.D. (FSI UJEP v Ústí n. L.)

Vědecký výbor konference – členové

- prof. dr hab. inž. Stanisław Legutko, Faculty of Mechanical Engineering, Poznan University of Technology, Poznaň, PL
- prof. Ing. Martin Libra, CSc., Technická fakulta, ČZU, Praha, CZ
- prof. Ing. Štefan Michna, PhD., Fakulta strojního inženýrství, UJEP, Ústí nad Labem, CZ
- doc. Ing. Jaromír Cais, Ph.D., Fakulta strojního inženýrství, UJEP, Ústí nad Labem, CZ
- dr hab. inž. Olaf Ciszak, Faculty of Mechanical Engineering, Poznan University of Technology, Poznaň, PL
- doc. PaedDr. Petr Eisenmann, CSc., Přírodovědecká fakulta, UJEP, Ústí nad Labem, CZ
- doc. Ing. Milan Chalupa, CSc., Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany, Brno, CZ
- doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D., Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni, CZ
- doc. Ing. Martin Novák, Ph.D., Prorektor pro vědu, UJEP, Ústí nad Labem, CZ
- doc. PhDr. Jan Novotný, Ph.D., Fakulta strojního inženýrství, UJEP, Ústí nad Labem, CZ
- doc. Dr. Ing. Pavel Polach, Škoda výzkum, s.r.o.
- doc. Ing. David Rot, Ph.D., Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni, CZ
- doc. Ing. Alžběta Sapietová, PhD., Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita, Žilina, SK
- doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D., Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni, CZ
- doc. RNDr. Tomáš Zdráhal, CSc., Pedagogická fakulta, Univerzita Palackého, Olomouc, CZ
- Ing. Vít Černoohlávek, Ph.D., Fakulta strojního inženýrství, UJEP, Ústí nad Labem, CZ

- Ing. Martin Kantor, Ph.D., Fakulta strojního inženýrství, UJEP, Ústí nad Labem, CZ
- Ing. František Klimenda, Ph.D., Fakulta strojního inženýrství, UJEP, Ústí nad Labem, CZ
- mjr. Ing. Zdeněk Krobot, Ph.D., Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany, Brno, CZ
- plk. Ing. David Kuzmič, Ph.D., Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany, Brno, CZ
- Ing. Milan Sapieta, PhD., Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žilině, SK
- Ing. Bc. Vladislav Sítař, Ph.D., Fakulta strojního inženýrství, UJEP, Ústí nad Labem, CZ
- dr inż. Marcin Suszyński, Faculty of Mechanical Engineering, Poznan University of Technology, Poznań, PL
- Ing. Martin Svoboda, Ph.D., Fakulta strojního inženýrství, UJEP, Ústí nad Labem, CZ
- Ing. Jan Štěrbá, Ph.D., Fakulta strojního inženýrství, UJEP, Ústí nad Labem, CZ

Organizační výbor konference

Předseda organizačního výboru

- Ing. Vít Černošlávek, Ph.D., FSI UJEP, Ústí n. L.

Přípravný a organizační výbor

- Ing. Jan Štěrba, Ph.D., FSI UJEP, Ústí n. L.
- Ing. Alexandr Fales, FSI UJEP, Ústí n. L.
- Ing. Zdeněk Růžička, FSI UJEP, Ústí n. L.
- Ing. Patrik Balcar, FSI UJEP, Ústí n. L.
- Ing. Tereza Jarošová, FSI UJEP, Ústí n. L.

Nosná témata konference

- *Rozvoj experimentálních, numerických a analytických metod v mechanice, biomechanice, termo a hydromechanice*
- *Nové metody a jejich aplikace při analýze deformací a napětí strojních konstrukcí*
- *Experiment jako nástroj verifikace analytických a numerických metod*
- *Experimentální výzkum a predikce pevnosti, životnosti a provozní spolehlivosti konstrukcí a zařízení*
- *Sledování a monitorování provozních zatížení a provozních stavů konstrukcí a zařízení*
- *Využití aplikované matematiky a fyziky v technice*
- *Rozvoj a aplikace nových metod ve strojírenské technologii*
- *Využití kolaborativních robotů pro řešení aktuálních úloh a procesů*
- *Robotizace a její implementace pro průmyslové aplikace*
- *Nové trendy v řídicích systémech výrobních procesů v návaznosti na průmysl 4.0*
- *Elektromobilita a vodíkové technologie pro dopravu*
- *Obnovitelné zdroje energie a akumulace energie*
- *Mikrosítě a ostrovní napájecí systémy*

Za podporu pořádání konference EVM 2024 děkujeme

UNIVERZITA J. E. PURKYNĚ V ÚSTÍ NAD LABEM

Fakulta strojního inženýrství



ČSZE

Za podporu pořádání konference EVM 2024 děkujeme

ústecký kraj



KISTLER

measure. analyze. innovate.

FESTO

ISBN 978-80-7561-472-8



9 788075 614728

Obsah	str.
1. Miloš Taraba, Ján Vavro jr., Ján Vavro, Implementácia mechanizácie do procesu zvarovania	12-24
2. Dana Bakošová, Alžbeta Bakošová, Petra Dubcová, Daniela Košťaliková, Andrej Dubec, Mariana Janeková Comparison of Mechanical Properties of Polyamide Composites Reinforced with Short Carbon Fibres Considering Filler Content and Treatment	25-32
3. Lukáš Klimek, Ján Vavro, Ján Vavro jr. Kalibrácia „nízkoteplotných“ infračervených teplomerov	33-44
4. Ľuboš Marček, Ján Vavro, Ján Vavro jr. Mikroskopická analýza štruktúry a opotrebenia kovových materiálov pomocou SEM	45-55
5. Jana Körmedy, Ján Vavro, Ján Vavro jr. The influence of temperature on the production of antioxidant tin-phosphorus alloy	56-68
6. Ján Vavro, Ján Vavro jr., Ľuboš Marček, Jana Kuricová, Miloš Taraba, Lukáš Klimek, Pavol Čerňava The influence of the crane track unevenness on the load of the supporting crane structure	69-76
7. Petra Dubcová, Andrej Dubec, Alžbeta Bakošová, Alžbeta Bakošová, Dana Bakošová, Daniela Košťaliková, Mariana Janeková, Maroš Dedinský Quality Assessment of Zinc Alloy Castings Produced with HPDC Technology	77-87
8. Daniela Košťaliková, Mariana Janeková, Dana Bakošová, Petra Dubcová, Patrik Pilár Design of heat exchanger and CFD analysis	88-96
9. Mariana Janeková, Daniela Košťaliková, Dana Bakošová, Andrej Dubec, Alžbeta Bakošová, Jana Králiková Comparison of bearing surface quality parameters for wind turbines	97-107
	str.

10. Tomáš Vlach, Roman Horký
Vlastnosti hliníkových slitin s použitím odpadních třísek při tavbě 108-117
11. Alexandr Fales
Rototická platforma VEX 118-131
12. Ján Vavro jr., Ján Vavro, Ľuboš Marček, Jana Kuricová, Miloš Taraba, Lukáš Klimek, Pavol Čerňava
Analysis of the eigenfrequencies and stability for the supporting structure of the gantry crane 132-139
13. Zdeněk Růžička, Vít Černohlávek, Jan Štěřba
Studie zatěžování elektromobilu a zpětný vliv na životnost akumulátoru 140-149
14. Tereza Jarošová, Igor Žuravský, Martin Svoboda, Vít Černohlávek, Milan Sapieta, Václav Schmid, Milan Chalupa, Zdeněk Krobot, Patrik Balcar
Měření kvality jízdních vlastností osobního automobilu s aktivními tlumiči 150-158
15. Artur Meller, Stanisław Legutko, Adrian Mróz, Mariusz Piechowski, Hubert Kędziora, Vít Černohlávek
Durability of Multi-Cavity Forging Tools: The Advantages of Process Automation 159-172
16. Vít Černohlávek, František Klimenda, Zdeněk Růžička, Jan Štěřba, Artur Meller, Marcin Suszynski
Experimentální měření hluku kolaborativního šestiosého robotického ramene 173-183
17. Alexandr Fales
Experimentální měření a testování vytištěných 3D dílů 184-198
18. Patrik Balcar, Petr Vachata, Jan Lodin, Martin Svoboda, Michal Lattner, Antonín Svoboda, Edita Pichlová
Pilotní testování mechanických vlastností tištěných obratlů 199-207
19. Pavel Houška, Vladislav Sít'ář, Klára Caisová, Daniela Vysloužilová
Posouzení ekonomického dopadu FV potenciálu na průmyslových objektech v městských oblastech pomocí open source nástrojů slunečního záření 208-216

Implementácia mechanizácie do procesu zvárania

Miloš Taraba (0009-0000-2006-8350)¹, Ján Vavro, jr. (0009-0009-6787-9041)¹, Ján Vavro (0009-0001-3704-4934)¹
¹Faculty of Industrial Technologies, Alexander Dubček University of Trenčín, Ivana Krasku 491/30, 020 01, Púchov. Slovak Republic. E-mail: milos.taraba@tnuni.sk, jan.vavro.jr@tnuni.sk, jan.vavro@tnuni.sk

The article is focused on the investigation of the impact of the introduction of mechanization in the welding shop, for the production of cylinders from austenitic chrome-nickel steel type X5CrNi18 10. The welds are assembled in a production line for the processing of puff pastry. In addition to the technical improvement of the process and the verification of the sufficient quality of the welds, we proved with calculations that after the introduction of the change there was a significant reduction in the production time. By introducing a higher level of mechanization and necessary technological changes, the production time was reduced by up to half compared to the original technological procedure, with an increase in quality parameters. Which led to a reduction in the production costs of the welding shop. A significant consequence of the proposed change was its impact on workplace safety.

Key words: Austenitic chromium nickel steel, Implementation, Mechanization, Welding process, Positioner.

Úvod

Vo výrobnom odvetví, so stále rastúcimi cenami energií, materiálov a surovín je nevyhnutné neustále hľadať nové možnosti optimalizácie a racionalizácie procesov. Investovaním do zmien v technológiách a technologických postupoch alebo zavádzaním moderných IT prostriedkov a umelej inteligencie bez nutnosti hľadať kvalifikovanú pracovnú silu. Úspora nákladov vynaložených na materiál, mzdy či vstupné suroviny je vítanou a predstavuje pre spoločnosť možnosť investovať voľný kapitál do iných oblastí za účelom zvýšenia konkurencieschopnosti vo vysoko globalizovanom a konkurenčnom prostredí.

V potravinárskom priemysle, vyznačujúcom sa špecifickými požiadavkami na kvalitu, a vysokou spotrebou energií, bez ktorých nie je možné potraviny v hygienicky odpovedajúcom a sterilnom prostredí spracovať, je konkurencieschopnosť zásadná. Navyše je úzko profilovaný a závisí na špecifických vlastnostiach materiálov, ktorých ceny sú pre výrobné spoločnosti kľúčové. Materiál musí spĺňať prísne normy, ako napr. odolnosť voči vode, vodnej pare, vlhkosti, slabým organickým a anorganickým kyselinám, a podobne. Kvalita materiálu je základ, linky musia odolávať pravidelnému teplotnému zaťaženiu počas celej doby, väčšinou kontinuálnej výroby.

Vlády sa už celé roky snažia tlačiť na reťazce, aby znížili ceny potravín, ktoré následne tlačia na výrobcov potravín. To vedie k snahe výrobcov optimalizovať výrobu a hľadať možné alternatívy, investovaním do výrobných technológií s nižšou spotrebou, cenou, respektíve s inými výrobnými výhodami.

Výrobcovia zariadení a výrobných liniek pre potravinársky priemysel sú nútení, aby prichádzali s inovatívnymi riešeniami, ktoré umožňujú udržať cenu zariadení, napriek zvyšovaniu nákladov na polotovary, cenu práce a zároveň spĺňať sprísňujúce sa hygienické a emisné normy. Jednou z je zvýšenie úrovne mechanizácie, čo vedie k zníženiu výrobných časov a zároveň k minimalizácii nepodarkovosti a iných nežiaducich javov vedúcim k zbytočným nákladom.

Spoločnosť, pre ktorú bol náš návrh vytvorený patrí medzi svetovo známe spoločnosti, ktoré majú vedúce postavenie na svetových trhoch v oblasti výroby výrobných liniek pre potravinársky priemysel. Aby si toto postavenie udržala, je nepretržite nútená optimalizovať, vyhľadávať, analyzovať a riešiť možné straty nie len v technologickom procese.

Po dôkladnej analýze bol objavený potenciál na zlepšenie v zefektívnení technológie zvárania typového dielu linky. Tá vykazovala nedostatky vedúce k výrazným prestojom, čo automaticky viedlo k stratám, a k potrebe zamestnať vysoko kvalifikovaných pracovníkov vo zvarovni.

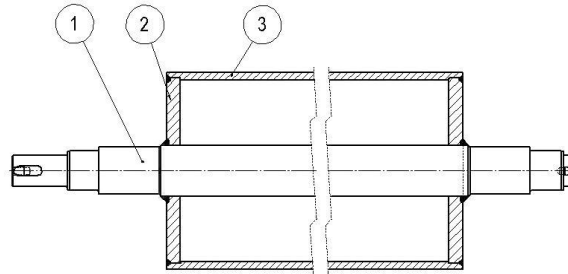
Návrh zlepšenia technológie zvárania si vyžadoval overenie v praxi. Najskôr bola vykonaná analýza vplyv budúcej zmeny na kvalitu výrobku, následne na výrobné časy a možnú racionalizáciu. Nakoniec sme pristúpili k overeniu, či investícia do technologického zlepšenia a potrebných technologických zariadení je pre spoločnosť rentabilná.

Charakteristika typovej súčiastky

Predmetom výskumu bol vytypovaný konštrukčný diel potravinovej výrobnéj linky na výrobu lístkového cesta nazvanej "Laminátor line". Jedna takáto linka potrebuje v priemere 20 takýchto dielov. Konštrukciou ide o valec,

ktorého účelom je znižovanie hrúbky cesta v jednotlivých krokoch výrobného procesu, tiež slúži na správne vedenie cesta po dopravníkovom páse a na zabezpečenie samotného pohonu pásu. Z uvedeného dôvodu je valec, jeho kvalita a dĺžka výroby dôležitým faktorom pri znižovaní nákladov a výrobného času.

Jedná sa o kľúčovú súčiastku používanú aj v iných typoch liniek, ktoré spoločnosť vyrába. Je súčasťou dvojice valcov umiestnených v hornej a spodnej časti zostavy linky. Schéma prierezu konštrukcie valca je uvedená na Obr. 1.



Obr. 1 Schéma prierezu valca rúr (1 – hriadeľ 2 - spojenie – čelo 3 – rúra)

Valec pozostáva z hriadeľa s dĺžkou 1230 mm a je spojený s ostatnými časťami valca ako vyplýva zo schémy pomocou zvarov. Hriadeľ prechádza rúrou s dĺžkou 820 mm a priemer 250 mm. Otvor, cez ktorý prechádza hriadeľ má priemer 73 mm. Rúra a hriadeľ sú spojené z oboch strán s čelami, s hrúbkou 19 mm a priemer 234 mm.

Na vytvorenie spoja je použitý kútový zvar na každej strane súčiastky (Obr. 1 - časť v červenom ovále). Rúra je spojená s čelom tupým zvarom (Obr. 1 - časť v zelenom ovále). Celkovo sa na jeden valec používajú 2 tupé a 2 kútové zvary. Obr. 2 dokumentuje jednotlivé časti valca v reálnom vyhotovení pred zváraním.



Obr. 2 Finálne výrobky jednotlivých dielov valca

Opodstatnenosť implementácie mechanizácie do výroby práve tejto súčiastky je možné nájsť aj v jej minulosti. Spoločnosť už predtým odhalila nedostatky pri výrobe, čo vyústilo do nutnosti zmeny materiálu a neskôr aj konštrukcie. Ako sa zistilo počas nepretržitej prevádzky dochádzalo k pret'azovaniu valcov, pórovitosť povrchovej vrstvy chrómu viedla k vzniku korózie na čelných stranách valca, ktoré boli v styku s cestom a mohli viesť ku kontaminácii cesta, čo je v potravinárskom priemysle neprípustné. Od roku 2008 sa preto prestal na jej výrobu používať materiál S235JRG, a nahradila ho oceľ typu X5CrNi18 10.

Tieto zmeny sa ukázali pre spoločnosť výhodné z dôvodu zníženia veľmi vysokých nákladov na pôvodný materiál, ktorý mal oveľa horšie vlastnosti. Tie sa odzrkadlili v nákladoch na zabezpečenie nutných úkonov spojených s povrchovou úpravou súčiastky. Navyše, k zmene bolo potrebné pristúpiť aj z dôvodu sprísnenia hygienických nárokov v potravinárskom priemysle. Ďalším faktorom bolo napýšenie objemu výroby približne na 350 až 400 kusov ročne.

Aestetická chrómniklová oceľ X5CrNi18 10 je najčastejšie používaným druhom nerezovej ocele vďaka svojim veľmi žiadaným mechanickým vlastnostiam pre potravinársky priemysel, ako je tepelná a korózná odolnosť, taktiež spĺňa všetky hygienické štandardy. Okrem toho je dobre tvarovateľná za studena a dobre zvárateľná elektrickým oblúkom. Zachováva si odolnosť proti medzikryštalickej korózii po zváraní plechu do hrúbky 6 mm aj bez potreby dodatočnej tepelnej úpravy vzhľadom na fakt, že má nízky obsah uhlíka. Jej chemické zloženie je uvedené v Tab. 1 [2],[3],[4],[5].

Tab. 1 Chemické zloženie ocele X5CrNi18 10 (hmot. %) [2]

	C	Cr	Mn	Ni	P	S	Si
min:	-	17,00	-	9.000	-	-	-
max:	0.070	20.000	2.000	11.500	0.045	0.030	1.000

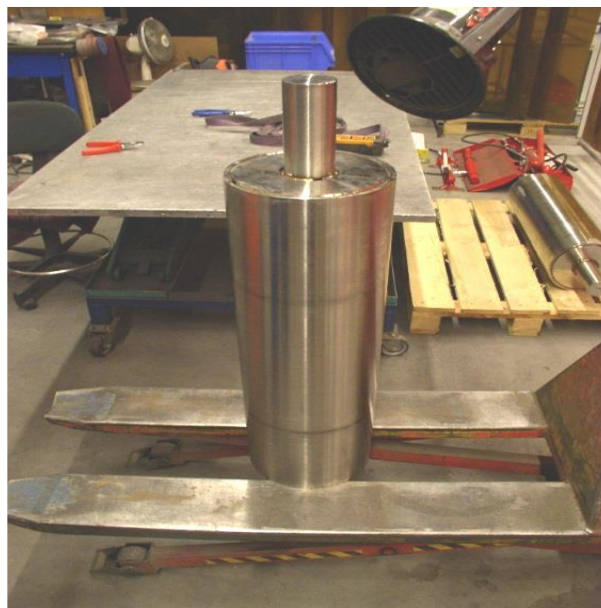
Jej použitie bolo schválené do pracovných teplôt okolo 300 °C, má dobrú leštiteľnosť a vďaka jej cene sa sa javí pre spoločnosť ako veľmi výhodná. Má tendenciu spevňovať sa, na čo je potrebné myslieť hlavne pri jej obrábaní [2],[4],[6].

Analýza pôvodného technologického postupu zvárania a jeho nedostatkov

Pred realizáciou nového návrhu technológie zvárania valca, bolo potrebné posúdiť starý technologický postup zvárania, ktorý vykazoval značné nedostatky. Tie predlžovali výrobný čas, a viedli ku komplikáciám pri výrobe. Ako jedným s problémov sa ukázalo pracovisko, ktoré nebolo pripravené na zvýšené objemy výroby a nedisponovalo potrebným vybavením, ktorým by bolo možné zabezpečiť bezproblémovú a neprerušovanú výrobu bez zbytočných prestojov. Nedisponovalo potrebnými prípravkami, polohovadlami ani dostatočne výkonným zvaracím zdrojom, aby bolo možné zabezpečiť požadované navýšenie objemu výroby. V procese výroby valca absentovala akákoľvek forma automatizácie, ktorá by celý proces urýchlila a zefektívnila.

Ako sa ukázalo, proces zvárania bol zbytočne zložitý, neefektívny, veľmi prácny a náročný na kvalifikovanú pracovnú silu. Pripravené diely valca bolo potrebné najprv pripraviť trieskovým obrábaním a následne ďalší pracovník diely uložil na drevené palety. Zvárač musel opätovne súčiastky zostehovať a zoradiť tak, aby zodpovedali technickej dokumentácii. Bez potrebných zariadení, postupov a mechanizácie, musel zvárač používať na manipuláciu s valcom žeriav. Keďže pre zabezpečenie správneho postupu zvárania koreňa metódou TIG bolo potrebné valec najprv otočiť z horizontálnej do vertikálnej polohy, a až následne pokračovať vo zváraní a vyplniť zvarové húsenice pomocou metódy MAG. Následkom boli zbytočné komplikácie, zvýšená fyzická námaha pracovníka a predĺženie výrobného času.

Pri zváraní musel zvárač obchádzať celú súčiastku z viacerých strán, čo negatívne vplývalo na presnosť pohybu horáka a dochádzalo k nedokonalostiam zvaru. Tiež dochádzalo k nutnosti prerušiť zváranie, aby bolo možné súčiastku opätovne obísť, čo malo za následok nepresnosti pri napájaní zvarových húseníc. Na Obr. 3 je vidieť nevyhovujúce prostredie zvarovne pred zavedením mechanizácie.



Obr. 3 Príprava zostehovaného zvarku pred operáciou zvárania

Ako je zjavné z Obr. 3, časť technologického postupu pri zváraní nespĺňala požiadavky na bezpečnosť práce a ochrany zdravia z dôvodu nedostatočnej fixácie súčiastky počas zvárania. Hrozilo riziko uvoľnenia zvarku a vzniku pracovného úrazu, prípadne poškodenia samotného zvarku. To by znamenalo zvýšenie nákladov pre spoločnosť, respektíve problémy so zabezpečením adekvátnej náhrady skúseného zvárača. Celý technologický proces nebol vôbec vyhovujúci.

Na základe uvedeného, je možné tvrdiť, že zvárač nielenže musel vedieť odhadnúť na základe skúsenosti, či jednotlivé etapy zvaracieho procesu boli správne vykonané a kompletne, ale musel mať aj fyzickú zdatnosť. Tiež musel disponovať vysokou úrovňou odbornej spôsobilosti, zručnosti a dlhoročnými skúsenosťami.

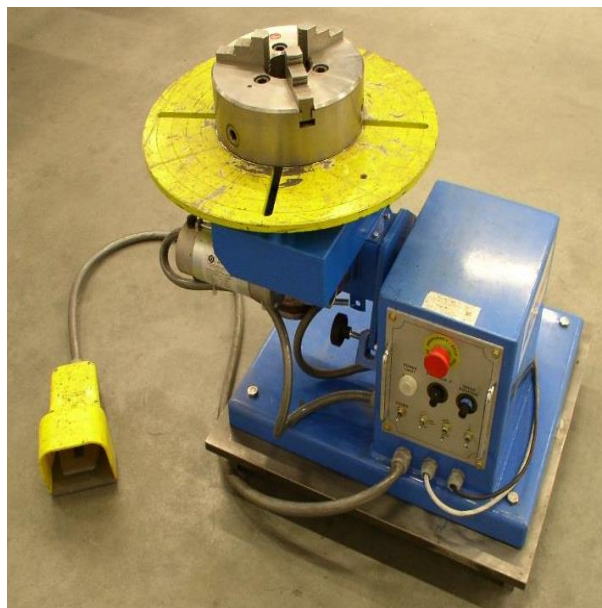
Pri zváraní výplňových húseníc dochádzalo k prehrievaniu horáka, ktorý nemal dostatočný výkon. Preto bolo potrebné zváranie rozdeliť do dvoch fáz. Najprv zváranie koreňa metódou TIG a následne výplňových húseníc metódou MAG. Pri dvoch odlišných druhov zvarov na jednom valci, sa jednalo o nezanedbateľný problém a zbytočne vynaložený výrobný čas a náklady. Pre dokreslenie plytvania výrobným časom treba poukázať na fakt, že na tupom spoji je potrebné zabezpečiť dve zvarové húsenice a pri kúťovom zvare je takýchto húseníc až päť.

Nedostatočný zvarací výkon zvaracieho zdroja mal za následok zníženie životnosti prievlakov. V prípade kúťového zvaru často dochádzalo k nedostatočnému prevareniu viacvrstvového zvaru, lebo bolo potrebné zabezpečiť následné opravy, aby sa zabránilo množeniu baktérií v nenatavenej časti zvaru a zníženiu hygienických nárokov na valec. Občas dochádzalo k veľkému rozstreku kovu a jeho nánalepovaniu na povrch súčiastky. Vznikali problémy pri sústružení povrchu a čelných plôch valca. Samozrejme kvôli tomu dochádzalo k zvýšenej frekvencii výmeny rezných nástrojov a nákladov.

Nový návrh technologického postupu pri zváraní valca, má prispieť k zefektívneniu výrobného procesu a znížiť náročnosť na zručnosti, fyzickú námahu pracovníka pri dodržaní rovnakej úrovne kvality zvarov, znížiť výrobný čas a náklady. Zabezpečiť dostatočnú úroveň bezpečnosti a ochrany zdravia pri práci.

Zavedenie mechanizácie a zmeny technologického postupu

V rámci riešenia sme ako prvý krok mechanizácie zaradili do výrobného procesu stolové rotačné polohovadlo typ SPS 75 S HC od výrobcu Automa, upravené o trojčel'ust'ové skľučovadlo zobrazené na Obr. 4 [1].



Obr. 4 Polohovadlo SPS 75 S HC [1]

Polohovadlo má nosnosť 75 kg a umožňuje vertikálne otáčanie súčiastok s možnosťou ručného vyklopenia o 90° do horizontálnej polohy s rýchlosťou otáčania 7 otáčok za minútu. Medzi jeho funkcie patrí odber impulzu pre ovládanie zvaracieho zdroja, presné upnutie, a nastavenie počiatočnej polohy zostehovaného zvarku. Upnutím za nosný hriadeľ dôjde k zabezpečeniu presného vedenia voči horáku a zvýšenia celkovej presnosti zvaru. Polohovadlo nastavením optimálnej a rovnomernej rýchlosti zvárania voči drôtu zníži nedostatky spôsobené nerovnomernou rýchlosťou pri ručnom nastavovaní. Zároveň sa predíde možnému uvoľneniu zvaranej súčiastky spoľahlivým a bezpečným zapolohovaním [1].

Ďalším krokom mechanizácie je zavedenie držiaka horáka, ktorý zníži nepresnosti spôsobené pri zváraní bez upevnenia horáka, čím zabezpečí konštantnú vzdialenosť hubice horáka od zvarového kúpeľa. V rámci návrhu sme použili držiak umožňujúci jednoduché a rýchle nastavenie výšky, pracovného polomeru a sklonu horáka. Navyše umožňuje meniť jeho pracovnú výšku v závislosti od dĺžky valca, polomeru zváraného priemeru a sklonu horáka, ktoré sa pri tupom a kútovom zvaru menia [1].

Keďže zváranie vyžadovalo využitie dvoch zváracích metód, boli potrebné dva druhy zváracích zdrojov. Na zváranie koreňa sa pri zvaroch využíval zvárací zdroj od firmy STEL, typ: TIG μ P 161H. Na zváranie výplňových húseníc sa pri zváraní používal zvárací zdroj od firmy FORMICA, typ For - MIG 289 [1]. Zmenou technológie došlo k odstráneniu nutnosti zväť koreň a húsenice osobitne pomocou dvoch metód a tento úkon sa vykonal len v jednom kroku. Na to bolo potrebné zabezpečiť vhodný zvárací zdroj s potrebným zváracím výkonom. Po nákupe nového sme k predchádzajúcemu vylepšeniu pridali tiež výkonný zvárací zdroj typu KEMPACT PULSE 3000, ten zvýšil rýchlosť zvárania a umožnil využívať rôzne druhy režimov a parametrov [2].

Mechanizácia v podstate pozostáva z vytvorenia zostavy skladajúcej sa zo zváracieho zdroja, polohovadla a držiaka horáka, ktoré sú ilustrované na Obr. 5.



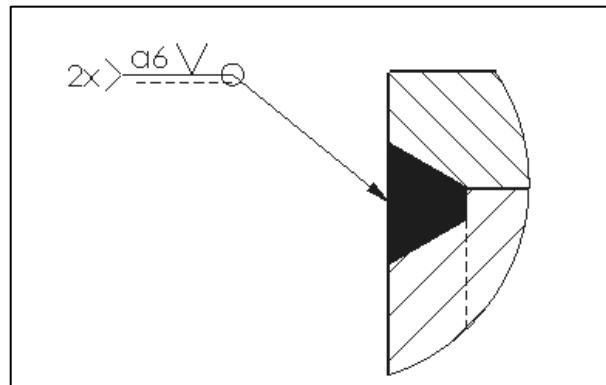
Obr. 5 Mechanizovaná zváracia zostava

Nasledovali zmeny pracoviska, aby vyhovovalo z bezpečnostného, aj z technického hľadiska. Pracovisko sme preto rozdelili na dve osobitné časti kde dochádzalo k výkonu dvoch rôznych druhov úkonov. A to na časť pre stehovanie a časť pre zváranie výplňových húseníc, čo sa prejavilo zvýšením plynulosti výroby. Pristúpili sme aj k zmene technologického postupu výroby súčiastky [3], [4].

Logisticky sa valec po stehovaní presunie na pracovisko určené pre zváranie výplňových húseníc. Po upnutí sa držiak horáka nastaví do požadovanej zváracieho pozície. Po zapálení oblúka na zváracom zdroji začne polohovadlo rotovať, pričom vykoná jednu otáčku. Následne dôjde k zmene nastavenia hubice horáka a parametrov pre zváranie kútového zvaru. [3], [4].

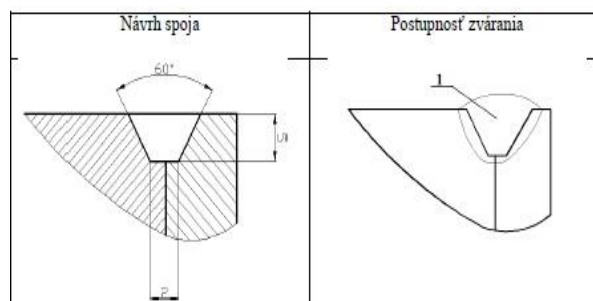
3.1 Charakteristika zmeny zváracieho postupu tupého zvaru

Na účely experimentu bol navrhnutý zvárací postup, pri ktorom sa vykonal tupý obvodový zvar tvaru V s prevýšeným povrchom a priemerom 235 mm s uhlom skosenia zváraných plôch v rozsahu 30° a rozmerom $a = 6$ mm. Náčrt tupého zvaru, ktorý spája čelo s rúrou, podľa nového navrhovaného zváracieho postupu, je vidieť na Obr. 6.



Obr. 6 Návrh tupého zvaru

Na zváranie bol použitý zvarací zdroj KEMPPI KEMPACT PULSE 3000. Spoj bol pripravený sústružením, stehovaním a zvarový kov bol prenesený pulzným spôsobom. Návrh zvárania s uvedením postupnosti vytvorenia zvaru a uvedením jednotlivých rozmerov je zobrazený na Obr. 7.

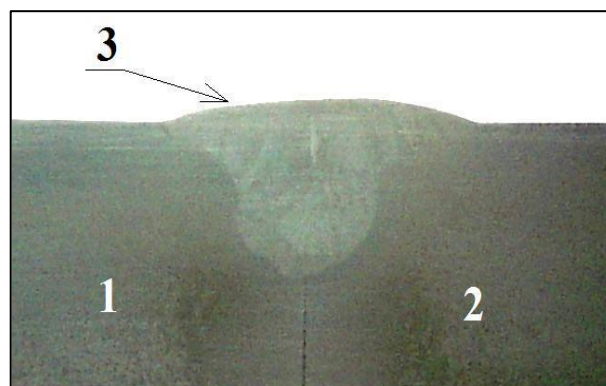


Obr. 7 Návrh spoja a postupnosť zvárania pri tupom zvare

Ako prídavný materiál bol použitý G 19 9 L Si podľa STN EN ISO 14343 s priemerom 1 mm. Na ochranu zvaru pred vzdušnou atmosférou bol použitý vhodný ochranný a aktívny plyn Ar 97,5 % + CO₂% s prietokom 22 litrov za minútu a priemerom hubice 14 mm. Kontaktná hubica bola vzdialená 15 mm od povrchu zváraného diela. Na zváranie sa použil prúd 180 A a tepelný príkon 10,8 kJ.cm⁻¹ s rýchlosťou otáčania stola 0,3 otáčky za minútu.

3.2 Hodnotenie vytvoreného tupého zvaru po zavedení nechanizácie

Z dôvodu kontroly vhodnosti navrhutej technológie vyhotovenia zvaru, bolo potrebné vykonať skúšky na skúšobnej vzorke. Zvarové spoje boli pozorne preskúmané makroskopicky (Obr. 8) a podrobené skúške tvrdosti.



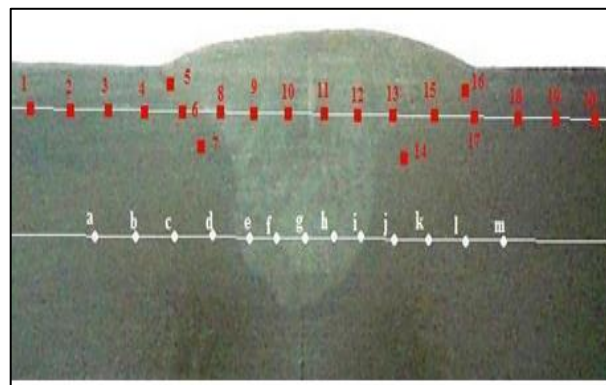
Obr. 8 Makroskopická snímka prierezu tupého zvaru (1 čelo, 2 rúra, 3 zvar)

Vzorka tupého zvaru bola odobratá odrezaním časti zvaru naprieč zvarovým spojom. Následne bolo potrebné vzorku tupého zvaru obrúsiť pomocou rovinatej brúsky a brusných papierov. Následne prebehlo naleptanie povrch vzorky zvaru pomocou chloridu železitého.

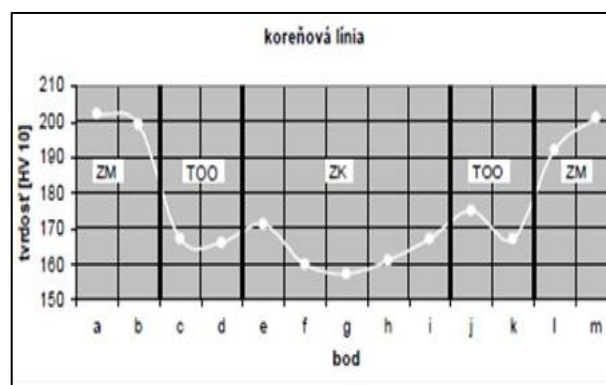
Táto chemická zlúčenina mala za úlohu vyvolať štruktúru niklových austenitických ocelí vo vzorke zvaru. Po zviditeľnení štruktúry bol vytvorený jej snímok pomocou digitálneho fotoaparátu. Keďže, v rámci zmeny technologického postupu bolo odstránenie spôsobu zvarovania metódou TIG, javilo sa nevyhnutné overiť, či navrhnutý technologický postup viedol k jeho prevareniu. Z Obr. 8 jasne vyplýva, že koreň zvaru bol dostatočne prevarený aj po technologickom zmene. Na vzorke nie sú pozorované žiadne viditeľné studené spoje, ani neprevarené miesta alebo trhliny. Na Obr. 8 je tiež vidieť dendritickú štruktúru zvarového kovu v smere tuhnutia.

3.3 Hodnotenie tvrdosti tupého zvaru metódou HV

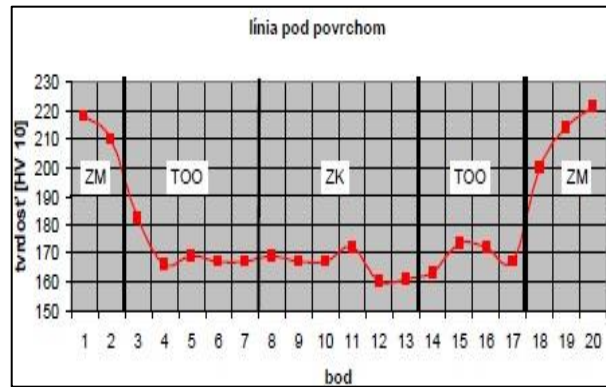
Po kontrole prevarenia tupého zvaru bolo potrebné overenie jeho tvrdosti v súlade s normou STN EN ISO 6507-1. Na meranie bol použitý prístroj BRIVISKOP, typ BVR 250 H podľa Vickersa. Odber vzorky bol vykonaný rovnakým spôsobom, ako v predchádzajúcom prípade. Počas tejto skúšky bolo zisťované, či v mieste zvaru nedošlo k výskytu neprimerane tvrdých štruktúr alebo iných javov, ktoré by mohli ohroziť požadovanú kvalitu zvaru a poukazovali by na nevhodnosť navrhnutého technologického postupu zvarovania. Na makroskopickom snímku (Obr. 9, 10 a 11) je možné vidieť priebeh merania tvrdosti v koreňovej línii a línii pod povrchom tupého zvaru.



Obr. 9 Makroskopická snímka prierezu tupého zvaru



Obr. 10 Priebeh merania tvrdosti na koreňovej línii v prípade tupého zvaru

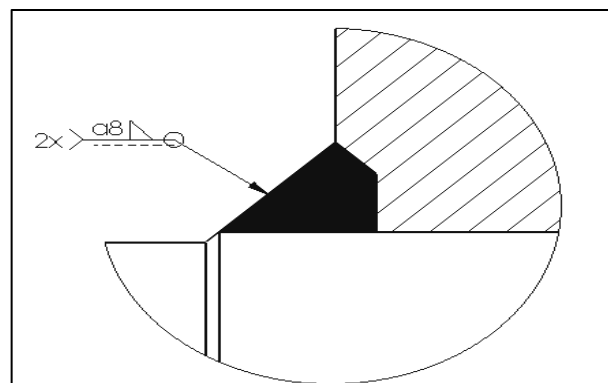


Obr. 11 Priebeh merania tvrdosti na línii pod povrchom v prípade tupého zvaru

Z makroskopickej snímky prierezu skúšobného tupého zvaru, ako aj z priebehu merania tvrdosti nevyplývajú žiadne negatívne zmeny v oblasti vyhotoveného zvaru, ani výskyt neprímerane tvrdých štruktúr v oblasti spoja, ktoré by mohli viesť k problémom v prevádzke. Nepol pozorovaní ani vznik extrémnych hodnôt tvrdosti, svedčiacich o nevhodnosti zmeny mechanizácie, ani k iným negatívnym javom. Z Obr. 10 a 11 je jednoznačne viditeľné, že merania potvrdili pokles hodnôt v tepelne ovplyvnených oblastiach zváraných kovoch.

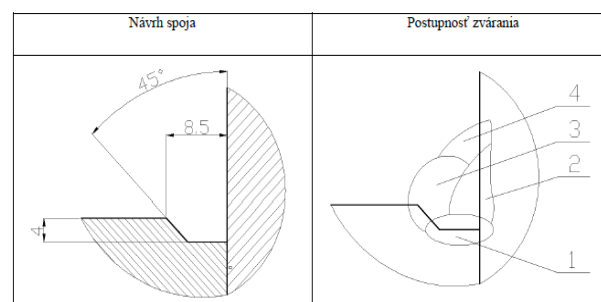
3.4 Charakteristika zmeny zvaracieho postupu kútového zvaru

Pre účely experimentu overenia kvality vyhotovenia kútového zvaru bol navrhnutý zvarací postup, pri ktorom bol vykonaný viacvrstvový obvodový kútový zvar so stredným priemerom 80 mm a rozmerom $a = 8$ mm, konštrukčným odsadením hlbokým 4 mm na priemere 85 mm a skosením v rozsahu 45° . V súlade s novým technologickým návrhom, po sústružení zvaru, bolo potrebné ponechať zrazit' hranu o veľkosti $10 \times 45^\circ$. Náčrt obvodového kútového zvaru, spájajúceho hriadeľ s čelom je možné vidieť na Obr. 12.



Obr. 12 Návrh viacvrstvového, obvodového kútového zvaru

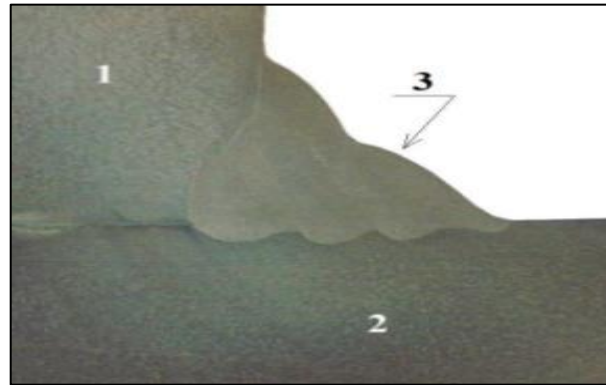
Na zváranie bol použitý ten istý zvarací zdroj ako aj v prvom prípade, teda KEMPPI KEMPACT PULSE 3000. Zvar bol vyhotovený v polohe PA. Spoj súčiastky bol pripravený sústružením a stehovaním. Zvarací kov bol počas zvárania prenesený pulzným spôsobom. Návrh zvárania kútového zvaru je uvedený na Obr. 13.



Obr. 13 Návrh spoja a postupnosť jeho zvárania pri kútovom zvare

3.5 Hodnotenie kútového zvaru po zavedení mechanizácie

Za účelom overenia toho, či dochádzalo alebo nedochádzalo k vzniku nejakých negatívnych javov, ktoré by mohli viesť k zníženiu kvality kútového zvaru alebo jeho častí, sa pristúpilo k overeniu zmeny technologického postupu pomocou vyhotovenia skúšobných kútových zvarov. Tieto zvary boli vyhotovené v súlade s navrhnutým technologickým postupom a sledovalo sa, či proces vyhotovenia zvaru viedol k negatívnym dopadom na zvar. Skúšobné vzorky kútového zvaru boli následne podrobené deštruktívnym skúškam, počas ktorých sa zvarové spoje pozorovali makroskopicky, ako je vidieť na Obr. 14. Účelom bolo zistiť prítomnosť negatívnych štruktúr alebo javov v rámci vytvoreného zvaru.

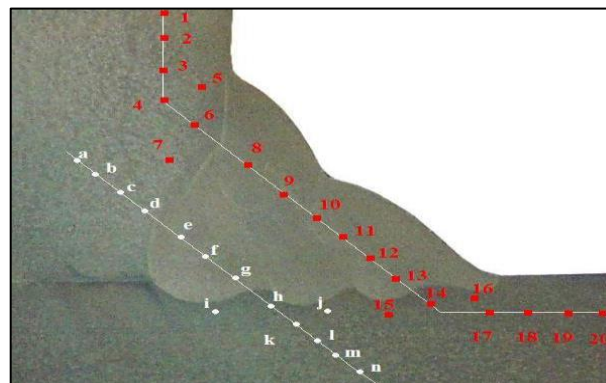


Obr. 14 Makroskopická snímka prierezu kútového zvaru (1 čelo, 2 hriadel, 3 zvar)

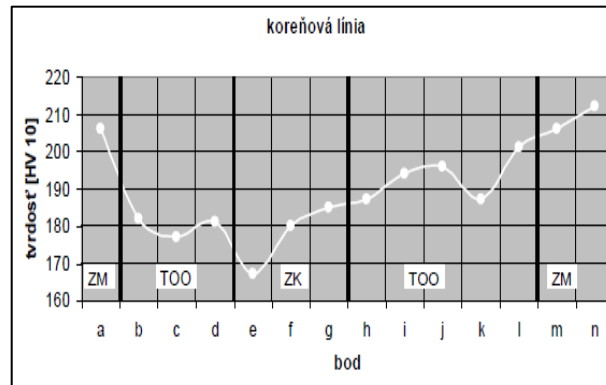
Vzhľadom na to, že kútový zvar je viacvrstvový, jeho koreň musí byť dobre prevarený. Z tohto dôvodu bolo dôležité overiť, či došlo k jeho požadovanému prevareniu. Zo snímky (Obr. 14) vyplýva, že požadované kvalitatívne parametre na výplň koreňa zvaru boli splnené. Skúškou bolo overené, že pri zváraní nedošlo k vzniku trhlin medzi jeho jednotlivými vrstvami, ani k tvorbe neprevarených miest vo zvaru. Zo snímky bolo možné pozorovať všetky štyri viditeľné zvarové húsenice spoja a ich uloženie v súlade s predpísaným technologickým postupom. Zo snímky na Obr. 14 nevyplýva, že by pri novom technologickom postupe zvárania dochádzalo k tvorbe inklúzie ani necelistvosti spoja. Pri tomto zvare nie je viditeľná dendritická štruktúra pri každej zvarovej húsenici, ako to bolo v prípade tupého spoja, pretože tento druh zvaru je ovplyvnený technológiou jeho vyhotovenia. A teda, tepelný vplyv vyhotovenia každej vrstvy má vplyv na ďalšiu vrstvu počas zvárania.

3.6 Hodnotenie tvrdosti kútového zvaru metódou HV

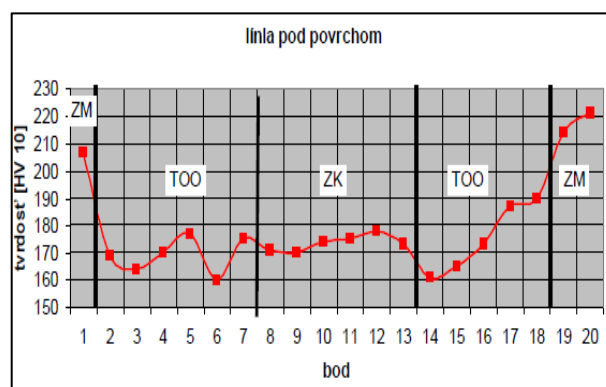
Po overení prevarenia zvaru bolo potrebné overiť aj tvrdosť kútového zvaru vyhotoveného po zmene technologického postupu, vykonaného v súlade s ustanoveniami pre meranie tvrdosti normou STN EN ISO 6507-1. Na meranie bol použitý prístroj BRIVISKOP, typ BVR 250 H. Skúška bola vykonaná podľa Vickersa. Počas tejto skúšky bolo zisťované, či nedošlo k výskytu neprimerane tvrdých štruktúr v oblasti spoja a či má zvar požadovanú kvalitu. Makroskopická snímka a priebeh merania tvrdosti v koreňovej línii a línii pod povrchom kútového zvaru sú zobrazené na Obr. 15, 16 a 17.



Obr. 15 Makroskopická snímka prierezu kútového zvaru



Obr. 16 Priebeh merania tvrdosti na koreňovej línií v prípade kútového zvaru



Obr. 17 Priebeh merania tvrdosti na línií pod povrchom v prípade kútového zvaru

Z makroskopickej snímky prierezu skúšobného kútového zvaru (Obr. 15), ako aj z priebehu merania tvrdosti vyplýva, že nenastali nejaké nežiadúce negatívne zmeny v oblasti vyhotoveného zvaru a nebol pozorovaný ani výskyt neprimerane tvrdých štruktúr v oblasti spoja, ktoré by mohli viesť k problémom v prevádzke a zníženiu jeho kvality. Zo skúmania nevyplynulo, že by došlo k vzniku akýchkoľvek extrémnych hodnôt tvrdosti, ktoré by svedčili o nevhodnosti zmeny technologického postupu. Z Obr. 16 a Obr. 17 je jasne viditeľné, že výsledky meraní potvrdili pokles hodnôt v tepelne ovplyvnených oblastiach zvarovaných kovoch.

Vplyv navrhovaných zmien na výrobné časy

Na základe získaných výsledkov z jednotlivých zmien je možné posúdiť, či okrem technických výhod priniesli ekonomické zlepšenie a zvýšenie produktivity práce. Pokiaľ by sa tieto návrhy nezobrazili vo výrobnom procese a výrobný čas by ostal rovnaký, boli by zbytočné ďalšie výpočty. Vzhľadom k tomu, že sa jedná o technológiu zvarovania, vychádzal výpočet z výrobného času zvarovania. Použité boli rovnice pre výpočet času zvarovania koreňa a zvarovania výplňových zvarových húseníc. [3]:

1.) Rovnica pre výpočet čistého - výrobného času zvarovania koreňa zvaru na valci t_{zk} :

$$t_{zk} = \frac{l_z}{v_z} \quad (1)$$

kde:

l_z - je celková dĺžka zvaru (mm),

v_z - rýchlosť zvarovania (mm.min⁻¹).

- celkovú dĺžku zvaru l_z je možné vypočítať na základe rovnice:

$$l_z = 2 \cdot (l_{zoh} + l_{zscr}) \quad (2)$$

kde:

$2x$ - sa rovná násobok pre dve strany zvaru,

l_{zoh} - dĺžka zvaru na obvode hriadeľa (mm),

l_{zscr} - dĺžka zvaru spoja na strane čela a rúry (mm).

2.) Rovnica pre výpočet čistého výrobného času zvárania výplňových zvarových húseníc t_{zv} :

$$t_{zv} = \frac{l_{zh}}{v_z} \quad (3)$$

kde:

l_{zh} - je celková dĺžka zvaru pri zváraní výplňových zvarových húseníc (mm),

v_z - rýchlosť zvárania (mm.min⁻¹).

- celkovú dĺžku zvaru pri zváraní výplňových zvarových húseníc l_{zh} je možné vypočítať na základe rovnice:

$$l_{zh} = 2 \cdot (n_{zvzk} \cdot l_{szch} + n_{zvtz} \cdot l_{zscr}) \quad (4)$$

kde:

2 - násobok pre dve strany zvaru,

n_{zvzk} - počet zvarových húseníc kútového zvaru,

l_{szch} - stredná dĺžka zvaru spoja čelo – hriadeľ (mm),

n_{zvtz} - počet zvarových húseníc tupého zvaru,

l_{zscr} - dĺžka zvaru spoja na strane čela a rúry (mm).

4.1 Výpočet výrobného času pred zavedením zmien

Pri pôvodnom postupe zvárania sme výrobný čas vypočítali z rovníc (1) až (4) nasledovne [3]:

1.) Výpočet čistého výrobného času zvárania koreňa zvarov pred zavedením mechanizácie a zmeny technologického postupu podľa rovnice (1) a (2):

$$t_{zk} = \frac{l_z}{v_z} = \frac{2 \cdot (235,5 + 728)}{150} = 13 \text{ minút} \quad (5)$$

2.) Výpočet čistého výrobného času zvárania výplňových zvarových húseníc pred zavedením mechanizácie a zmeny technologického postupu podľa rovnice (3) a (4):

$$t_{zv} = \frac{l_{zh}}{v_z} = \frac{2 \cdot (5.267 + 2.728)}{200} = 28 \text{ minút} \quad (6)$$

Z uvedeného výpočtu vyplynulo, že výrobný čas potrebný na vyhotovenie zvaru koreňa trval 13 minút a výrobný čas na zváranie výplňových zvarových húseníc trval 28 minút. Celkový čistý výrobný čas zvaru bol 41 minút. K vypočítanému času je potrebné pripočítať aj čas potrebný na prípravu, pomocné práce a manipuláciu so súčiastkou. Celkový čas potrebný na výrobu jedného zvaru sa pohyboval v priemere 210 min.

Predlžovanie spôsobovala napríklad nutnosť kontroly správnosti napojenia zvarovej húsenice, ako aj použitie dvoch osobitných metód zvárania.

4.2 Výpočet výrobného času skúmanej súčiastky po zavedení mechanizácie a zmeny technologického postupu

Po zavedení mechanizácie sme opätovne prepočítali výrobný čas zvárania, použili sme len rovnicu pre výpočet času zvárania výplňových zvarových húseníc t_{zv} [3]:

$$t_{zv} = \frac{l_{zv}}{v_z} = \frac{2 \cdot (4.267 + 728)}{250} = 14 \text{ minút} \quad (7)$$

kde:

l_{zv} - je celková dĺžka zvaru (mm),

v_z - rýchlosť zvárania (mm.min⁻¹).

Porovnaním čistého výrobného času po zmene je možné konštatovať, že došlo k výraznej časovej úspore 27 minút oproti pôvodnej situácii. Celkový čas potrebný na výrobu zvaru sa pohyboval v priemere 100 až 110 minút na výrobok. Vypustenie metódy TIG pre zváranie koreňa z technologického postupu viedlo k úspore 13 minút čistého výrobného času. Zavedená mechanizácia poskytla možnosť jednou húsenicou zvariť čelo s rúrou. Na zvarenie čela a hriadeľom bolo potrebné vytvoriť 4 húsenice. Rýchlosť zvárania bola výrazne vyššia, dosahovala až 250 mm.min⁻¹, čo sa opäť prejavilo úsporou drahocenného výrobného času.

Výsledky a diskusia

Z porovnania získaných výsledkov skúmania a dopadov navrhnutých zmien technologického postupu na zavedenia mechanizácie bolo výpočtom preukázané, že došlo k výrazným úsporám čistého výrobného času zvárania súčiastky, ako aj celkového výrobného času. Keďže úspora výrobného času súčiastky znamená úsporu nákladov ako aj to, že je možnosť vyrobiť viac súčiastok a zvýšiť tým zisk, sa s určitou pravdepodobnosťou zobrazí aj vo finančnom rozpise. Na základe získanej úspory výrobného času a prevádzkových sadziieb daného pracoviska bola určená ročná finančná úspora U_f , pre dané zváracie pracovisko na základe výpočtu podľa vzorca [3]:

$$U_f = R_{hz} \cdot n_y \cdot t_s = 25.400.1,5 = 15\ 000 \text{ eur} \quad (8)$$

kde:

R_{hz} - hodinová sadzba zvarovne (EUR),

n_y - ročný objem výroby (kus),

t_s - časová úspora pri jednom zvarke (hodina).

Pri vyčíslení úspory vo finančných jednotkách je potrebné tiež rátať s nákladmi na nový zvárací zdroj a polohovadlo v cene 8 500 eur. Potom čistá finančná úspora pri objeme 400 kusov vyrábaných súčiastok bola 6 500 eur z dôvodu zníženia výrobného času. Následne boli porovnané náklady na zváranie za rok pred a po zmene technológie. Náklady N_{zzy} pri ročnom objeme 400 vyrobených kusov po navrhutej zmene boli [3]:

$$N_{zzy} = n_y \cdot N_z \cdot t_{vz} = 400.25.1,5 = 15\ 000 \text{ eur} \quad (9)$$

Náklady na zváranie N_{pzy} pri ročnom objeme 400 kusov pred zmenou boli:

$$N_{pzy} = n_y \cdot N_z \cdot t_{vz} = 400.25.3 = 30\ 000 \text{ eur} \quad (10)$$

kde:

n_y - ročný objem výroby (kus),

N_z - náklady zvarovne (EUR),

t_{vz} - čas výroby pri jednom zvarke (hodina).

Návratnosť investície do mechanizácie a následnej nutnej zmeny technologického postupu je možné očakávať v období do 7 mesiacov od zavedenia všetkých odporúčaných opatrení. Okrem ekonomického aspektu zmeny technologického návrhu zvárania, došlo k výraznému technickému prínosu vo forme zvýšenia kvality zvarových spojov a bezpečnosti na pracovisku.

Tento článok ilustroval vplyv implementácie vyššieho stupňa mechanizácie do výrobného procesu na kvalitu vytypovaného konštrukčného dielu používaného v potravinárskej linke. Postupným zavádzaním mechanizácie sa celý proces zjednodušoval a jednotlivé časti výrobného postupu sa zefektívňovali. Implementácia polohovadla a zmeny zváracieho postupu sa v nezanedbateľnej miere prejavila nie len na kvalite samotnej súčiastky ale aj na bezpečnosti výrobného pracoviska a výrazne znížila riziko pracovného úrazu.

Kvalita vyhotovenia skúmaného tupého a kútového zvaru bola overená makroskopickým pozorovaním a následne boli vykonané skúšky tvrdosti oboch zvarov, ktoré dokumentovali zvýšenie celkovej presnosti a spoľahlivosti testovaných zvarov. Použité merania dokázali, že namerané hodnoty v tepelne ovplyvnených oblastiach zvarovaných kovoch v prípade oboch skúmaných zvarov ešte klesli oproti pôvodnému technologickému postupu zvárania. Z experimentálneho posúdenia, okrem uvedených pozitívnych zmien, vyplynuli aj ďalšie výhody technického ako aj ekonomického charakteru pre výrobné pracovisko.

Spojením dvoch samostatných zváracích metód do jednej sa skrátil výrobný čas. Odstránením nežiadúceho ale nevyhnutného prerušenia procesu zvárania z technologického postupu sa nezanedbateľne zvýšila produktivita práce a kvalita zvarového spoja.

Mechanizácia sa prejavila aj v menšej spotrebe energie na zvýšenú kontrolu, prípadné opravy nepodarkov a náklady na práceneschopnosť zamestnancov z dôvodu možných pracovných úrazov. Úspora bola vyčíslená aj na nákladoch na nákup rezných nástrojov, ktoré mali výrazne zníženú životnosť z dôvodu nedostatočnej organizácie na pracovisku a rozstreku kovu pri pulznom prenose. To takisto výrazne ovplyvnilo rentabilitu popísanej zmeny pre spoločnosť.

Z uvedeného vyplýva, že okrem technických výhod, má zmena technologického postupu a zavedenie mechanizácie pozitívny vplyv na ekonomickú situáciu spoločnosti a ušetrené financie môžu byť využité na investovanie do nových, progresívnych technológií.

Každá zmena v technologickom postupe sa prejaví vo finančnom vyjadrení. Pri návrhu ďalších investícií, je vysoko odporúčané vypracovať plán a urobiť prepočet predpokladanej návratnosti.

PodĎakovanie

Túto prácu podporila Slovenská grantová agentúra – projekt KEGA 011TnUAD-4/2024.

Literatúra

- [1] AUTOMATA. SPS 75 HC. User Guide. 2021. [online].
< https://www.automa2000.com/public/datasheets/SPS_75_HC.pdf >.
- [2] KEMPPI. Kempact Pulse 3000. User Guide. 2021. [online].
<<https://resources.userdoc.kemppi.com/manuals/kempact-pulse-kempactcool-om-en.pdf>>.
- [3] MARÔNEK, M., BÁRTA, J. 2007. Multimediálny sprievodca technológiou zvárania. Slovenská technická univerzita, Materiálovotechnologická fakulta v Trnave. 343 s. ISBN 9788080960667.
- [4] AIR PRODUCTS. Príručka zvárača. 2020. [online].
<<http://www.airproducts.sk/~media/Files/PDF/company/SK->>.
- [5] MESSER. Messer Tatragas: Ochranné plyny na zváranie. 2023. [online].
< <https://www.messergroup.com/en/> >.
- [6] STN EN ISO 14 175. Zváracie materiály. Plyny a zmesi plynov na tavné zváranie a príbuzné procesy. 2008.

Comparison of Mechanical Properties of Polyamide Composites Reinforced with Short Carbon Fibres Considering Filler Content and Treatment

Dana Bakošová (0000-0003-2936-8637)¹, Alžbeta Bakošová (0000-0003-3440-0689)¹, Petra Dubcová (0000-0003-3450-3290)¹, Daniela Košťaliková (0000-0003-4981-7698)¹, Andrej Dubec (0009-0001-6145-6357)¹, Mariana Janeková (0000-0002-9380-2760)¹

¹ Faculty of Industrial Technologies in Púchov, Alexander Dubček University of Trenčín. I. Krasku 491/30, 020 01 Púchov, Slovakia. E-mail: dana.bakosova@tnuni.sk, alzbeta.bakosova@student.tnuni.sk, petra.dubcova@tnuni.sk, daniela.kostialikova@tnuni.sk, andrej.dubec@tnuni.sk, mariana.janekova@tnuni.sk

In this study the polyamid PA6 composites reinforced with carbon fibres (CF) are investigated. Good adhesion between a filler and a matrix is essential for enhancing properties of a resulting composite. Various treatments of the CF are utilized to ensure good adhesion. In this study, the properties of the composites were improved through the oxidation of the CF in HNO₃. Subsequently, to further enhance these properties, the oxidized CF were grafted with nano-SiO₂. The effect of the short CF content on mechanical properties of the PA6-CF composites was also evaluated. The CF content in the tested composites varied from 10 wt% to 60 wt%. The composites were subjected to tensile, flexural and compression tests. An atomic force microscopy was employed to investigate topography of the CF and the composites. The most significant improvement of the tested properties was observed at the CF content of 40 wt% in the composites reinforced with the CF, which were grafted with nano-SiO₂.

Keywords: Polyamide composites, Carbon Fibres, Nano-silica, Fibre surface treatment, Mechanical properties

Introduction

Polymers reinforced with carbon fibres (CF) stand out with their high strength to weight ratio, which paired with their excellent thermal, electrical, structural and tribological properties designates them as alternative to conventional metal structural materials. Due to their exceptional properties, carbon fibre reinforced composites are widely used in various applications such as automotive, aerospace industry, sport equipment and wind energy. For high performance applications thermoplastic matrices are used including polyamide (PA), polyethylene terephthalate (PET), polycarbonate (PC), polyetheretherketone (PEEK) among others [1]-[4].

The synthesized CF are inert, non-polar material with smooth surface, thus they have poor affinity to some polymers, which are generally polar. Therefore, to utilize their full reinforcement potential their surface is treated to ensure good interfacial adhesion between the CF and the polymer matrix [4]. The adhesion can be improved by physico-chemical processes, by which reactive functional groups are created on the CF surface, mechanical processes, that increase roughness of the CF surface or their combination [5]. Various approaches [6] to enhance adhesion to polymer matrix include: oxidation [7]-[9], chemical grafting [10], chemical deposition [11], sizing agent coating [12], coating with nanofillers [13], plasma treatment [14], microwave irradiation [15].

Polyamide 6 (PA6) is widely used matrix of CF reinforced polymer composites, due to its good mechanical properties, chemical resistance and versatility. It has good wear resistance and a low coefficient of friction, making it suitable for applications where friction and abrasion occur. The PA6 has a relatively high melting point (around 220 °C), which allows it to withstand elevated temperatures. It can be easily processed using a variety of manufacturing methods, including injection moulding, extrusion and blow moulding, enabling the production of complex shapes and parts [16], [17].

Thanks to their material properties, the PA6-CF composites are broadly researched. The properties of final composites are affected by several factors. Besides used types of the matrix and fibres, the properties also depend on manufacturing processes, orientation and concentration of the fibres [18], [19], and their adhesion to the matrix. Effects of CF length and content, on the mechanical, thermal and morphological properties of the PA6-CF composites prepared by melt mixing method were investigated in the work [19]. The increase in the tensile strength, modulus and hardness values and the decrease in elongation at break with the increasing CF content were reported. The glass transition temperature and melting temperature were not changed significantly. Heat of fusion and the relative degree of crystallinity values of composites decreased with the ascending CF content. The storage and loss moduli values of composites increased with the increasing CF content. Similar results were observed also in the study [20].

Nanoparticles are widely used to improve adhesion between the CF and polymer matrix, including carbon nanotubes [21], nanosilica (SiO₂) [6], [22], [23], graphene oxide [24] and titanium dioxide [25]. In the study [22], the short CF reinforced PA6 composite with polydopamine/nanosilica (PDA-SiO₂) interfacial layer on the CF surface was studied and a 28.09% increase in strength was observed compared to the untreated CF. In the study [10] the interfacial adhesion of PA6 composites reinforced with CF was investigated. The CF were oxidized, modified with 3-aminopropyltriethoxysilane and then grafted with SiO₂ nanoparticles. The SiO₂ nanoparticles uniformly distributed on the CF surface improved interfacial adhesion between CF and PA6 and improvement in the strength compared to composites with untreated CF was observed. In the study [23], polyurethane with nano-SiO₂ was used to size continuous CF filaments to enhance their compatibility with PA6 matrix, resulting in improved mechanical properties and 20.75 % increase in tensile strength compared to the

composites with untreated CF.

This study focuses on the enhancement of the PA6 composites reinforced with chopped short CF. The effect of different modification methods applied to the CF and variation of the CF content on the mechanical properties of the resulting PA6-CF composites is investigated. Three groups of PA6-CF composites were tested: the first group comprised composites produced with the unmodified CF, the second group was produced with the CF oxidized in HNO₃ and in the last group, the CF were oxidized in HNO₃ and subsequently grafted with nano-SiO₂. Each group encompassed composites with a different CF content, spanning from 10 to 60 wt%. The PA6 specimens without CF reinforcement were also examined for comparative analysis.

Materials

The polyamide PA6 matrix was reinforced with the short chopped CF, which were made by precision cutting from a continuous carbon fibre. Selected material properties of the used CF are listed in the

Tab. 1. The mechanical properties of the CF composite materials depend on the adhesion between the fibres and a polymer matrix. Therefore, the CF surface treatments are utilized to improve the adhesion. In this study, three types of the short CF were used:

- **The CF without treatment** – in order to remove all impurities from the surface, the CF were cleaned in acetone for 20 minutes.
- **The CF oxidized in HNO₃** – the CF were oxidized and mixed in HNO₃ at a temperature of 80 °C for 5 hours, then washed with deionized water and dried in an oven. Treatment of the CF with nitric acid can increase their surface energy and form functional groups, which can lead to better adhesion between the CF and the polyamide matrix. Additionally, it can facilitate their better dispersion in the polyamide matrix, resulting in a more homogeneous material with better mechanical properties.
- **The CF grafted with nano-SiO₂** – the CF oxidized in HNO₃ were mixed in a toluene solution containing 4% of nano-SiO₂ powder at a temperature of 90 °C for 6 hours, then washed with ethanol and dried. Grafting with the SiO₂ nanoparticles can improve the adhesion between the CF and the polyamide matrix, leading to better load transfer and higher mechanical strength of the composite. Moreover, they can aid in dispersing the CF and preventing the formation of agglomerates, allowing better homogeneity of the composite. The presence of SiO₂ can increase the thermal stability of the composite, thermal conductivity and resistance to thermal shocks [22].

Tab. 1 Material properties of the used CF

Density	1.80 g/cm ³
Fiber length	3 mm
Fiber diameter	7 μm
Tensile strength	4 GPa
Tensile modulus	240 GPa
Combability with	PEEK, PEI, PA, polyamides

Three variants of composite materials PA6-CF were prepared. The first variant contained the CF without surface treatment. The second variant of the samples was prepared with CF oxidized in HNO₃ and the last one contained the CF grafted with nano-SiO₂. For each variant, samples were prepared with a different CF content in the range of 10–60 wt% (specifically 10, 15, 20, 30, 40, 50 and 60 wt%). The composite samples were labelled based on the CF concentration: PA6-CF10, PA6-CF15, PA6-CF20, PA6-CF30, PA6-CF40, PA6-CF50, and PA6-CF60. In addition to the PA6-CF composites, PA6 matrix material samples were also tested as reference.

Pellets (Fig. 1) for the production of the PA6-CF composites were prepared by melt mixing using a co-rotating twin-screw extruder (the speed of the first screw was 50 rpm, the speed of the second screw was 120 rpm). The PA6 was fed into a hopper and the carbon fibres were simultaneously added. By rotating the second screw, they were dispersed in the PA6 matrix at a temperature in the range of 270–290 °C for 5 minutes. Then, the extruded material was cooled in a water bath and divided into pellets measuring 4–5 mm in length. These pellets were dried in an oven for 24 h at 80 °C to remove residual water prior to injection moulding.



Fig. 1 Examples of PA6 pellets, short chopped CF and PA6-CF pellets

Specimen were prepared according to relevant standards using injection moulding machine. The injection parameters are listed in the Tab. 2. The moulding scheme with indicated temperature zones is in the Fig. 2.

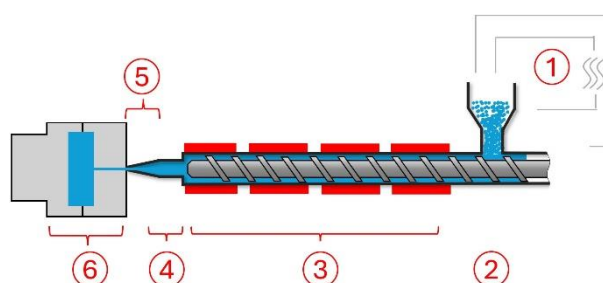


Fig. 2 Injection moulding scheme

Tab. 2 The injection parameters (temperature zones are numbered in the Fig. 2)

Parameter	Value
Drying temperature and time (1)	80 °C, 24 hours
Feed section temperature (2)	80 °C
Barrel temperature (3)	240–300 °C
Nozzle temperature (4)	270–300 °C
Melt temperature (5)	270–300 °C
Mold temperature (6)	100–120 °C
Holding pressure	700–800 bar
Back pressure	120–150 bar
Injection speed	170–180 cm ³ /s
Screw speed	100 rpm

Experimental methods

The mechanical properties of each PA6-CF composite were investigated utilizing following measurements:

- Tensile tests (ISO 527) were performed at 20 °C and loading speed 50 mm/min. Type 5 specimens with a gauge length of 50 ±0.1 mm and a thickness of 3 ±0.1 mm were used. Tensile strength, tensile modulus and elongation at break were determined. An extensometer was also used to obtain more accurate elongation data.
- Three-point flexural tests (ISO 178) were performed using method A at temperature of 20 °C and loading speed 2 mm/min. The specimens measured 80 ±0.1 mm in length and 10 ±0.1 mm in width, with a thickness of 4 ±0.1 mm. The distance between the supports was 64 ±1 mm.
- Compressive tests (ISO 604) were carried out at 20 °C, using the specimens with the following dimensions: length 10 ±0.1 mm, width 10 ±0.1 mm and thickness 4 ±0.1 mm.

Furthermore, the atomic force microscopy (AFM) was employed to investigate topography of the PA6-CF composites and the surface modification of the CF using the AFM NT-206 microscope. The roughness was evaluated using the AFM NT-206 software, by processing the statistical value of z-heights of the imaged surface area. The arithmetic mean deviation Ra and the root mean square deviation of the assessed profile Rq were determined.

Results and discussion

4.1 Topography

Firstly, the CF surface of untreated as well as the surface of the CF subjected to treatments was examined by the AFM and roughness parameters R_a and R_q were determined. The corresponding topography is shown in the Fig. 3 and the values of R_a and R_q are listed in the

Tab. 3. The surface of the unmodified CF was the smoothest. Oxidation of the CF in HNO_3 led to an increase in the surface roughness and the CF grafted with nano- SiO_2 had a surface coating of the highest roughness. Through the evaluation of the treated CF surface, it is evident that oxidation in HNO_3 followed by grafting of nano- SiO_2 effectively enhances surface roughness. This enhancement facilitates improved adhesion between the CF and the polymer matrix.

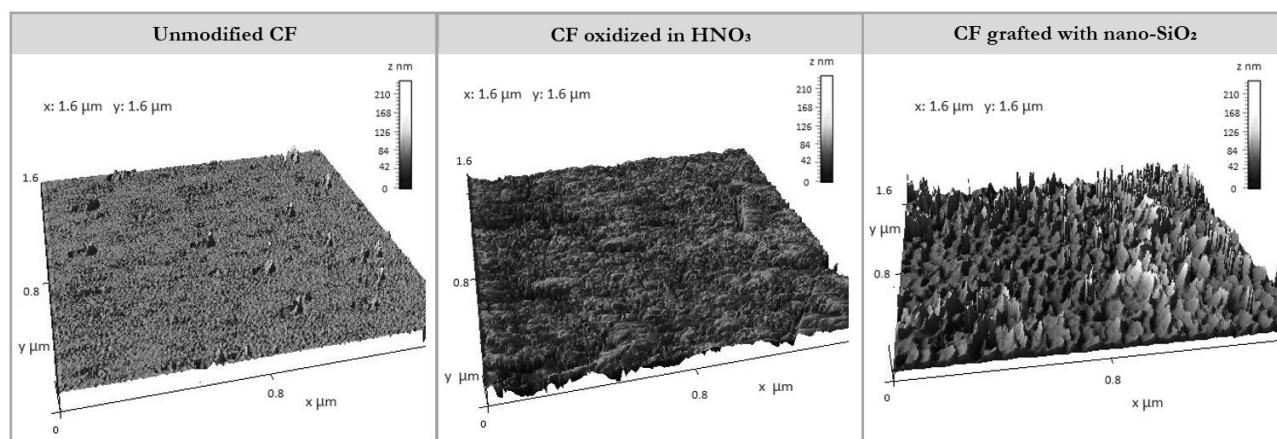


Fig. 3 Surface topography of the carbon fibres

Tab. 3 Surface roughness parameters of short carbon fibres

Modification of short carbon fibres	R_a [nm]	R_q [nm]
Unmodified	71	87
Oxidized in HNO_3	85	104
Grafted with nano- SiO_2	102	119

The AFM was also utilized to investigate the topography of the individual composites. Examples are illustrated in the Fig. 4. The distribution of CF bundles within the PA6 matrix varied depending on their concentration in the composite. Compared to the polymer without filler, the CF caused slight inhomogeneities. The composites featuring modified CF exhibited a more organized structure. The values of the surface roughness parameters R_a and R_q of the composites obtained by the AFM software are listed in the Tab. 4. The average roughness of the reference sample was $R_a = 0.56 \mu m$ and $R_q = 0.61 \mu m$. In general, the surface roughness of the PA6-CF composites increased with the percentage of the CF filler. The roughness values did not exhibit significant difference depending on the used CF treatment method. Besides the CF content, the surface roughness is also influenced by processing technology and selected processing parameters [26].

Tab. 4 Roughness of PA6-CF composites

Sample and CF treatment	R_a (μm)			R_q (μm)		
	unmodified	HNO_3	Nano- SiO_2	unmodified	HNO_3	Nano- SiO_2
PA6-CF10	0.61	0.60	0.61	0.67	0.67	0.67
PA6-CF15	0.67	0.67	0.67	0.77	0.78	0.77
PA6-CF20	0.73	0.72	0.73	0.81	0.81	0.80
PA6-CF30	0.76	0.76	0.75	0.85	0.85	0.85
PA6-CF40	0.87	0.88	0.86	0.94	0.93	0.93
PA6-CF50	0.91	0.91	0.90	1.03	1.03	1.02
PA6-CF60	0.94	0.94	0.93	1.08	1.08	1.07

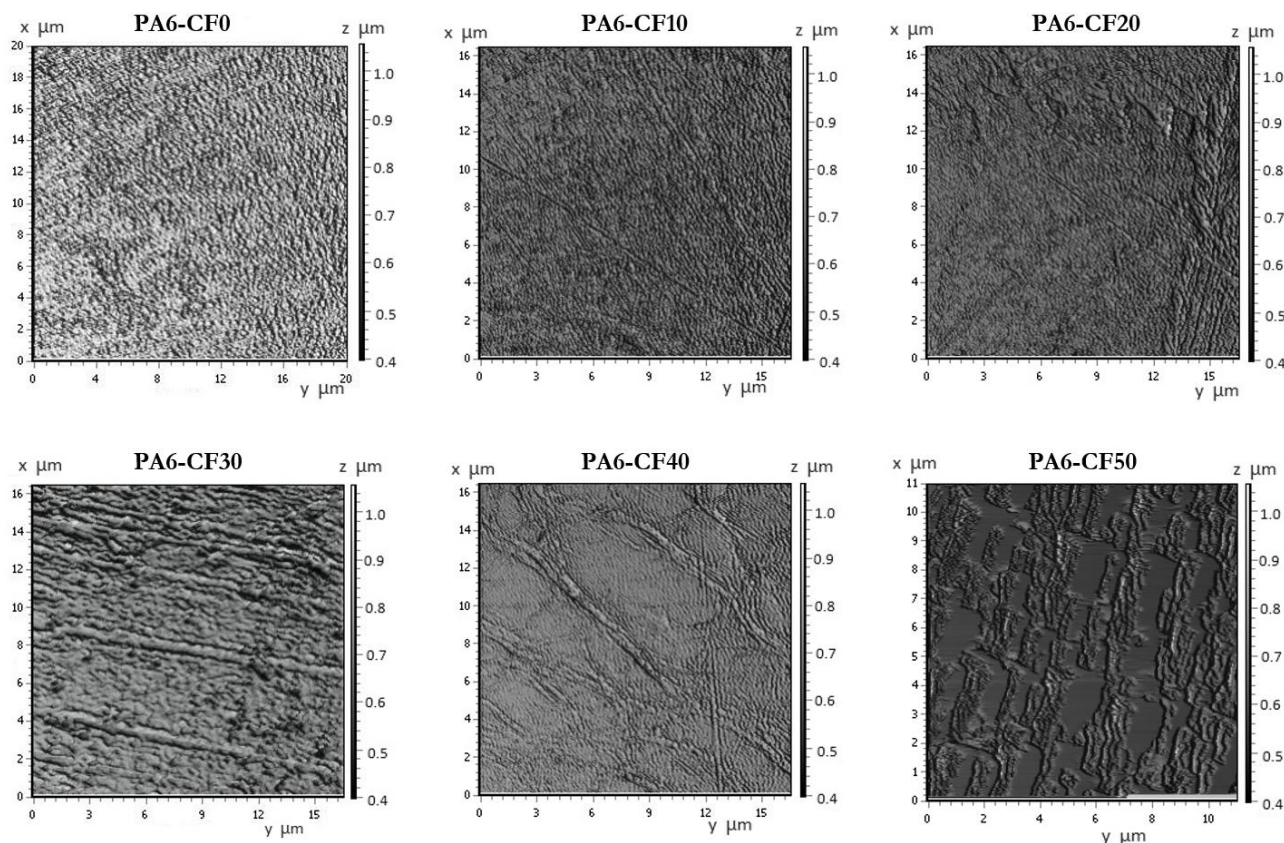


Fig. 4 Topography examples of the PA6 and PA6 composites reinforced with the CF grafted with nano-SiO₂.

4.2 Mechanical properties

The tensile test results are shown in the Fig. 5. The addition of the CF to the polymer matrix significantly affects the tensile properties of the resulting composite, primarily due to the high strength and stiffness inherent in the CF. The tensile strength of the PA6-CF composites increased with the increasing filler content up to 40 wt%. The PA6-CF40 composites with the unmodified CF, the CF oxidized in HNO₃ and the CF grafted with nano-SiO₂ exhibited respective increases in tensile strength of 150.57%, 163.40%, and 176.57% compared to the reference sample PA6, with the tensile strength of 85.21 MPa. The addition of the CF grafted with nano-SiO₂ yielded the most substantial enhancement in tensile strength, reaching a peak of 235.78 MPa in the PA6-CF40 composite. However, beyond the CF content of 40 wt%, a decline in strength was observed. At high CF concentrations, filler agglomeration may arise, causing fibres to cluster into larger groups. This phenomenon compromises homogeneity, as even dispersion of filler within the polyamide matrix deteriorates, resulting in critical areas that may negatively affect overall strength. A similar trend was observed in the measured tensile modulus of PA-CF composites, that also exhibited a consistent rise with increasing filler content up to 40 wt% and then stagnated. The highest stiffness was achieved in PA6-CF40 composite with the CF grafted with nano-SiO₂, with the 779.06% increase in the tensile modulus (28.13 GPa) compared to the reference sample PA6 (3.20 GPa). With increasing stiffness of the composites, elongation at break decreased. The decline in elongation at break with the increasing CF content was observed up to 40 wt% and then plateaued. Compared to the reference sample (4.55%), the PA6-CF40 composite with CF grafted with nano-SiO₂ exhibited the most significant reduction of 62.41% in elongation at break, reaching 1.71%.

■ unmodified CF ● CF oxidized in HNO₃ ▲ CF grafted with nano-SiO₂

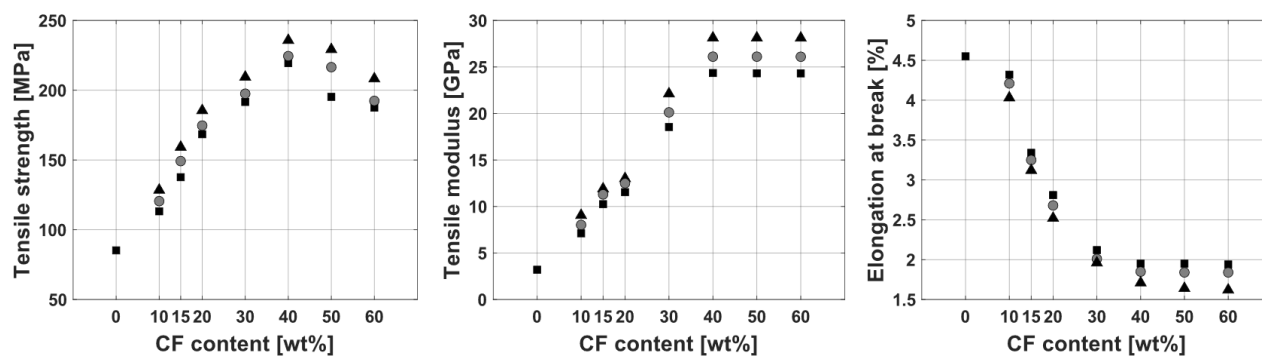


Fig. 5 Tensile tests results

The flexural test results are shown in the Fig. 5. The flexural strength, similarly, to the tensile strength, increased with the increasing filler content up to 40 wt% and beyond this point, flexural strength decreased. The PA6-CF40 composite with nano-SiO₂ exhibited the highest flexural strength of 298.54 MPa, which is 165.79% increase compared to the PA6 (112.32 MPa). In the PA6-CF40 composites with the untreated CF, the flexural strength increased by 136.06%, and in the PA6-CF40 composites with the CF oxidized in HNO₃, it increased by 148.50% in comparison to the PA6.

The incorporation of the CF also improved the compressive properties of the resulting composites (Fig. 6). The compressive test results showed an increase in the compressive strength up to the CF content of 50 wt%. Additionally, the PA-CF composites grafted with nano-SiO₂ exhibited superior performance when compared to other CF variants. The compressive strength of unfilled PA6 was 110.23 MPa. An addition of 50 wt% of the unmodified CF, the CF oxidized in HNO₃ and the CF grafted with nano-SiO₂ resulted in a 128.1%, 135.73% and 144.53% increase of the compressive strength, respectively.

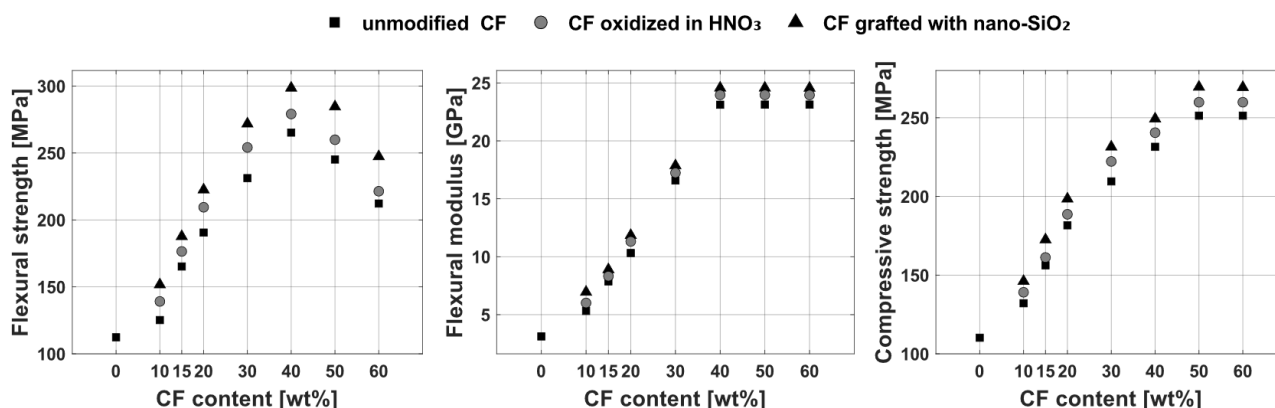


Fig. 6 Flexural tests and compressive tests results

The test results indicate an improvement in mechanical properties attributable to the CF reinforcement. The PA6-CF composites showed an increase in stiffness, as mechanical load is transferred from the polyamide matrix to the CF. The high strength of the CF enables the composites to withstand higher loads without significant deformation or damage. This load transfer mechanism helps distribute the applied load more efficiently throughout the volume of the composite material, resulting in increased strength. A strong interaction between the matrix and the filler is essential to ensure effective load transfer. In the composites with the CF oxidized in HNO₃, the adhesion of the CF to the PA6 matrix improved, resulting in enhanced properties. Even better results were achieved when the CF, after oxidation in HNO₃, were grafted with nano-SiO₂. A significant improvement in properties was observed up to the content of 40 wt%. At higher concentrations of the CF, the agglomeration of the fibres can occur causing their inhomogeneous distribution in the PA6 matrix, which can negatively affect the resulting properties.

Conclusion

The incorporation of the carbon fibres into the polyamide matrix demonstrated a significant improvement in mechanical properties in all tested parameters. The reinforcing effect of the CF led to a significant improvement in the tensile, compressive and flexural strength. This improvement can be attributed to the high strength and stiffness of the CF, which effectively reinforce the PA6 matrix. Furthermore, it can be inferred that the surface treatment of the CF, involving oxidation in HNO₃ followed by grafting with nano-SiO₂, significantly improved the mechanical properties of the resulting composite materials. This enhancement can be contributed to better adhesion between the CF and the PA6 matrix.

The resulting properties depend on many factors, such as filler dimensions, filler aspect ratio, uniformity of filler dispersion, and manufacturing processes. Further research may also focus on other factors such as temperature effects, environmental aging, and multiaxial loading to explore the potential of these composite materials in various engineering applications.

Acknowledgement

This research work was created within the project „The use of the MATLAB program in the processing of experimental scientific data in materials research“, code of project MVP01_2024, based on the financial support from the European Union within the call Early Stage Grants of the Recovery and Resilience Facility (Code of the project: 09103-03-V05-00010, Component 9: More effective management and strengthening of research, development and innovation funding), and with the financial support of the Internal Grant Scheme of the Alexander Dubček University of Trenčín.

References

- [1] MAŇAS, L., et al. (2019). Verification of material composition and manufacturing process of carbon fibre wheel. In: *Manufacturing Technology*, Vol. 19, No. 2, pp. 280-283. <https://doi.org/10.21062/ujep/283.2019/a/1213-2489/MT/19/2/280>.
- [2] KUPČÁK, R., ZOUHAR, J. (2020). Application of composite materials in sports optics. In: *Manufacturing Technology*, Vol. 20, No. 2, pp. 200-209. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.038>.
- [3] MAJKO, J., et al. (2022). Tensile properties of additively manufactured thermoplastic composites reinforced with chopped carbon fibre. In: *Materials*, Vol. 15, No. 12, pp. 4224. <https://doi.org/10.3390/ma15124224>.
- [4] ALSHAMMARI, B.A., et al. (2021). Comprehensive review of the properties and modifications of carbon fiber-reinforced thermoplastic composites. In: *Polymers*, Vol. 13, No. 15, pp. 2474. <https://doi.org/10.3390/polym13152474>.
- [5] ANSARI, M. S., ZAFAR, S., PATHAK, H. (2023). A comprehensive review of surface modification techniques for carbon fibers for enhanced performance of resulting composites. In: *Results in Surfaces and Interfaces*, Vol. 12: 100141. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2023.100141>.
- [6] ZHENG, H., et al. (2022). Recent advances of interphases in carbon fiber-reinforced polymer composites: A review. In: *Composites Part B: Engineering*, Vol. 233, pp. 109639. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109639>.
- [7] YU, J., et al. (2014). The oxidation of carbon fibers through $K_2S_2O_8/AgNO_3$ system that preserves fiber tensile strength. In: *Composites Part B: Engineering*, Vol. 60, pp. 261-267. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.12.037>.
- [8] LEE, W. H., et al. (2001). XPS study of carbon fiber surfaces treated by thermal oxidation in a gas mixture of $O_2/(O_2+ N_2)$. In: *Applied Surface Science*, Vol. 171, No.1-2, pp. 136-142. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(00\)00558-4](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(00)00558-4).
- [9] JIANG, J., et al. (2017). Influence of electrochemical oxidation of carbon fiber on the mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide/epoxy composites. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 95, pp. 248-256. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.02.004>.
- [10] ZHANG, T., et al. (2019). Interfacial adhesion between carbon fibers and nylon 6: Effect of fiber surface chemistry and grafting of nano-SiO₂. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 121, pp. 157-168. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.03.029>.
- [11] AN, Q., et al. (2012). Electrophoretic deposition of carbon nanotubes onto carbon-fiber fabric for production of carbon/epoxy composites with improved mechanical properties. In: *Carbon*, Vol. 50, No. 11, pp. 4130-4143. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.04.061>.
- [12] KARSLI, N. G., et al. (2013). Effects of sizing materials on the properties of carbon fiber-reinforced polyamide 6,6 composites. In: *Polymer Composites*, Vol. 34, No. 10, pp. 1583-1590. <https://doi.org/10.1002/pc.22556>.
- [13] HE, X., et al. (2007). Preparation of a carbon nanotube/carbon fiber multi-scale reinforcement by grafting multi-walled carbon nanotubes onto the fibers. In: *Carbon*, Vol. 45, No. 13, pp. 2559-2563. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2007.08.018>.
- [14] YOU, J., et al. (2021) Carbon fiber-reinforced polyamide composites with efficient stress transfer via plasma-assisted mechanochemistry. In: *Composites Part C: Open Access*, Vol. 6, pp. 100209. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100209>.
- [15] WIEDMER, S., et al. (2005). Effect of electron-beam radiation on thermoplastic composites. In: *Plastics, rubber and composites*, Vol. 34, No. 2, pp. 76-84. <https://doi.org/10.1179/174328905X48568>.
- [16] FRANCISCO, D., et al (2019). Advances in polyamide nanocomposites: A review. In: *Polymer Composites*, 2019, Vol. 40, No. 3, pp. 851-870. <https://doi.org/10.1002/pc.24837>.
- [17] MAJKO, J., et al. (2023). Challenges in Tensile Testing of Thermoplastic Composites Reinforced with Chopped Carbon Fibre Produced by Fused Filament Fabrication Method. In: *Manufacturing Technology*. Vol. 23, No. 2, pp. 216-224. <https://doi.org/10.21062/mft.2023.010>.
- [18] QUAGLIATO, L., et al. (2020). The influence of fiber orientation and geometry-induced strain concentration on the fatigue life of short carbon fibers reinforced polyamide-6. In: *Materials & Design*, Vol. 190, pp. 108569. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108569>.

- [19] KARSILI, N. G., AYTAC, A. (2013). Tensile and thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composites. In: *Composites Part B: Engineering*, Vol. 51, pp. 270-275. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.03.023>.
- [20] LIANG, J., et al. (2014). Mechanical properties, crystallization and melting behaviors of carbon fiber-reinforced PA6 composites. In: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 115, pp: 209-218. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3184-2>.
- [21] LIU, Y., et al. (2020). Effects of carbon nanotube length on interfacial properties of carbon fiber reinforced thermoplastic composites. In: *Journal of Materials Science*, Vol. 55, pp. 15467-15480. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05129-w>.
- [22] LI, B., et al. (2023). Improving mechanical and thermal properties of short carbon fiber/polyamide 6 composites through a polydopamine/nano-silica interface layer. In: *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 140, No.6, pp. e53457. <https://doi.org/10.1002/app.53457>.
- [23] JING, X., et al. (2023). Polyurethane with nano-SiO₂ based surface sizing method for 3D printed carbon fiber reinforced nylon 6 composites. In: *Polymer Composites*, Vol. 44, No. 3, pp. 1546-1561. <https://doi.org/10.1002/pc.27187>.
- [24] MA, Y., et al. (2018). Enhanced interfacial properties of carbon fiber reinforced polyamide 6 composites by grafting graphene oxide onto fiber surface. In: *Applied Surface Science*, Vol. 452, pp. 286-298. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.274>.
- [25] SINGH, R., et al. (2018). On the applicability of composite PA6-TiO₂ filaments for the rapid prototyping of innovative materials and structures. In: *Composites Part B: Engineering*, Vol. 143, pp. 132-140. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.032>.
- [26] BIGERELLE, M., et al. (2008). Multiscale roughness analysis in injection-molding process. In: *Polymer Engineering & Science*, Vol. 48, No. 9, pp. 1725-1736. <https://doi.org/10.1002/pen.21131>.

Kalibrácia „nízko-teplotných“ infračervených teplomerov

Lukas Klimek (0009-0000-9525-414X)¹⁾, Jan Vavro,jr (0009-0009-6787-9041)¹⁾, Jan Vavro (0009-0001-3704-4934)¹⁾

¹⁾Faculty of Industrial Technologies in Púchov, Alexander Dubček University of Trenčín. I. Krasku 491/30, 020 01 Púchov, Slovak Republic. E-mail: lukas.klimek@tnuni.sk, jan.vavro.jr@tnuni.sk, jan.vavro@tnuni.sk

The calibration of “low-temperature” infrared thermometers is a critical process that ensures their accuracy and reliability, particularly in industries where precise temperature control is a non-negotiable standard. The calibration process involves several steps and considerations, including the selection of a suitable thermal radiation source, which is essential for the calibration of the thermometer. Factors such as the field of view, emissivity estimation of the calibration source, and ambient temperature are crucial in minimising uncertainties during calibration. Furthermore, the utilisation of a transfer standard, which must be traceable to a national metrological institute, is of paramount importance in order to guarantee the veracity of the calibration. The meticulous process of calibration not only attests to the efficacy of infrared thermometers but also addresses the challenges posed by low-temperature environments, where the margin for error is minimal. It is of the utmost importance for professionals in the field to have a comprehensive understanding of the procedures and equipment involved in temperature measurement, including the mounting device and distance measuring device. This understanding is fundamental for the maintenance of temperature measurement integrity and the upholding of safety standards.

Keywords: Calibration, infrared camera, pyrometer, blackbody, temperature, uncertainty

1 Zabezpečenie merania teploty

Správne meranie teploty, v podstate akékoľvek meranie si vyžaduje zavedenie prísneho procesu, ktorý umožňuje sledovať všetky merania na základe spoľahlivého národného štandardu, ktorý bol sám o sebe kvalifikovaný na medzinárodnej úrovni prostredníctvom špičkových porovnaní so štandardmi v iných národných meracích inštitúciách. Z hľadiska teploty je súčasným štandardom medzinárodná teplotná stupnica z roku 1990. Všetky merania teploty na celom svete by mali byť v konečnom dôsledku odvoditeľné tejto stupnici. Proces zabezpečenia tohto cieľa pozostáva z 3 krokov, z ktorých každý zlepšuje presnosť merania. Tieto kroky sú kalibrácia, nadväznosť a akreditácia. [1]

a. Kalibrácia

Aby sme zabezpečili, že meracie zariadenie pracuje spoľahlivo, je dôležité, aby sa pravidelne kalibrovalo. V súvislosti s čiernym telesom, teplomerom alebo termokamerou je kalibrácia proces, pri ktorom sa výstup zariadenia priradí sledovateľná teplota ITS-90. Inak povedané, kalibrácia je operácia, ktorá určuje vzťah medzi hodnotami teploty indikovanými zariadením a hodnotami teploty ITS-90. Kalibrácia poskytuje informáciu o výkone zariadenia, napríklad či funguje správne, či nie je potrebné ho nastaviť. Kalibrácia predpokladá existenciu referenčných zariadení so známou teplotou. Kalibrácia infračervených teplomerov sa vykonáva pomocou dobre charakterizovaných vysoko presných štandardných referenčných zdrojov čiernych telies. Tie sú opísané v ďalšej časti. [2]

b. Neistota

Aby bola každá kalibrácia platná, je potrebné jasne pochopiť a kvantifikovať neistotu kalibračného procesu. Existujú medzinárodne uznávané spôsoby určovania a pripisovania neistoty, ktoré sú podrobne opísané v príručke ISO Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM) Každý, kto má záujem o spoľahlivé meranie, bez ohľadu na množstvo, sa bude chcieť dobre orientovať v obsahu GUM a v rozbere neistôt.

c. Ako infračervené teplomery merajú elektromagnetické spektrum

Všetky objekty vyžarujú žiarenie vo forme elektromagnetických vln, ktoré pokrývajú celé elektromagnetické spektrum vrátane rádiových vln, mikrovln, infračerveného, viditeľného svetla, ultrafialového, röntgenového a gama žiarenia. Rozloženie a intenzita žiarenia z objektu závisí predovšetkým od jeho teploty. Objekty s teplotou blízkou izbovej teplote vyžarujú väčšinu svojho žiarenia v infračervenom spektre, približne 10 mikrónov (10 μm). V prípade objektov s teplotou blízkou 1 000 °C sa vyžarované žiarenie posúva smerom ku kratším vlnovým dĺžkam, približne 2 μm . [3]

Infračervená termokamera meria žiarenie v určitom rozsahu vlnových dĺžok a na základe intenzity zisteného signálu určuje teplotu objektu - čím silnejší je signál, tým vyššia je teplota. IR teplomery zvyčajne merajú v rozsahu 8 μm - 14 μm , čo je vhodné pre teploty od -50 °C do 500 °C a niekedy aj vyššie. Pre teploty nad týmto rozsahom sú vhodnejšie teplomery určené pre iné vlnové dĺžky.

d. Funkcia reakcie teplomera

Meraným signálom je zvyčajne prúd alebo napätie na výstupe detektora infračerveného teplomera. Pre používateľov, ktorých zaujíma príslušná teplota, nie je surový signál často priamo relevantný. Signál sa mení veľmi nelineárne s teplotou cieľového objektu, čo znamená, že zdvojnásobenie signálu sa nerovná zdvojnásobeniu teploty. Korelácia medzi signálom

detektora a teplotou je definovaná funkciou odozvy teplomera, ktorá je úzko reprezentovaná rovnicou:

$$S(T) = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT+B}\right) - 1} \quad (1)$$

kde A, B a C sú konštanty súvisiace s vlastnosťami infračerveného teplomera a c_2 je univerzálna konštanta s hodnotou $14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$. Všimnite si, že hodnota T v rovnici (1) má jednotky Kelvinov, ktoré súvisia s bežnejšie používanými jednotkami stupňov Celzia:

$$T_{/K=t/} = ^\circ\text{C} + 273,15 \quad (2)$$

Izbová teplota 20°C teda zodpovedá teplote $293,15 \text{ K}$ na Kelvinovej stupnici. [4]

Vzťah znázornený rovnicou (1) je stanovený výrobcom infračerveného teplomera a je elektronicky spracovaný v prístroji, aby sa na displeji zobrazil údaj o teplote v stupňoch Celzia. V dôsledku toho je táto konverzia signálu na teplotu pred používateľom skrytá a vo všeobecnosti sa ho netýka. Napriek tomu si kalibračné laboratórium pri kalibrácii infračerveného teplomera vyžaduje znalosť špecifik tohto procesu premeny. Premena signálu na teplotu je obsiahnutá v rovnici (1):

$$T = \frac{c_2}{A \ln\left(\frac{C}{S} + 1\right)} - \frac{B}{A} \quad (3)$$

Vyhodnotenie rovníc (1) a (3) si vyžaduje len znalosť parametrov teplomera A a B. Pretože kalibrácia IR teplomera zahŕňa určenie teplotných korekcií, ukazuje sa, že hodnota C nie je dôležitá, pokiaľ sa pre všetky výpočty používa vždy rovnaká hodnota. Preto môžeme pri vyhodnocovaní rovníc (1) a (3) jednoducho priradiť $C = 1$. A a B súvisia s rozsahom vlnových dĺžok, v ktorom pracuje IR termometer:

$$A = \lambda_0 \left(1 - \frac{\Delta\lambda^2}{2\lambda_0^2}\right) \quad (4)$$

$$B = \frac{c_2 \Delta\lambda^2}{24\lambda_0^2} \quad (5)$$

kde λ_0 je stredná vlnová dĺžka rozsahu a $\Delta\lambda$ je šírka rozsahu vlnových dĺžok. Pre infračervený termometer pracujúci v rozsahu $8 \mu\text{m} - 14 \mu\text{m}$ teda dostávame $\lambda_0 = 11 \mu\text{m}$ a $\Delta\lambda = 6 \mu\text{m}$ a z rovníc (4) a (5) vyplýva $A = 9,36 \mu\text{m}$ a $B = 178 \mu\text{m} \cdot \text{K}$. Prepočet teploty na signál môžeme ilustrovať použitím týchto hodnôt (spolu s $C = 1$) v rovnici (1). Napríklad pri teplote 50°C ($323,15 \text{ K}$), rovnica (1) dáva $S = 0,01132$. (Signál k teplote, prepočet možno potom skontrolovať použitím tejto hodnoty S v rovnici (3) na opätovný výpočet hodnoty $T = 323,15 \text{ K}$.) Mnohé nízko teplotné IR teplomery pracujú v tomto rozsahu vlnových dĺžok $8 \mu\text{m} - 14 \mu\text{m}$, ale používa sa aj mnoho iných rozsahov, napríklad $8 \mu\text{m} - 13 \mu\text{m}$ a $7 \mu\text{m} - 18 \mu\text{m}$. Je dôležité skontrolovať špecifikácie, aby ste určili skutočný rozsah vlnových dĺžok.

2 Vplyvy na údaje IR teplomerov

a. Emisivita

Intenzita žiarenia vyžarovaného objektom závisí nielen od jeho teploty, ale aj od vlastnosti nazývanej emisivita. Emisivita je číslo v rozsahu od 0 do 1, ktoré charakterizuje, ako dobre objekt vyžaruje žiarenie. Objekt s emisivitou 1 sa označuje ako čierne teleso (idealizovaný dokonalý žiarič) [5]. Objekt s emisivitou 0,8 vyžaruje 80 % žiarenia čierneho telesa, objekt s emisivitou 0,5 vyžaruje 50 % žiarenia čierneho telesa atď.

b. Inštrumentálna emisivita

V dôsledku vplyvu emisivity budú rôzne objekty pri rovnakej teplote produkovať rôzne infračervené teplotné signály a poskytovať zodpovedajúce rôzne údaje. Aby sa to zohľadnilo, majú IR teplomery tzv. „prístrojová emisivita“, ktorú by mal používateľ nastaviť na hodnotu emisivity povrchu cieľového objektu. Pri niektorých modeloch teplomerov sa emisivita nedá nastaviť, ale je pevne stanovená na hodnote 0,95, niekedy však 0,97. Tieto prístroje majú obmedzené použitie.

c. Odrazené žiarenie

Ďalšou komplikáciou pri meraniach v IR termometrii je skutočnosť, že objekty, ktoré nie sú čiernymi telesami, sú čiastočnými reflektormi žiarenia. Pre každý nepriehľadný objekt sa emisivita a reflexivita vždy rovnajú 1. Teda objekt s emisivitou 0,8 má reflexivitu 0,2. To znamená, že 20 % všetkého žiarenia, ktoré je vyžarované z okolitých objektov a dopadá na cieľový objekt, sa odrazí. [6] Toto odrazené žiarenie je detegované infračerveným teplomerom a je pripočítané k žiareniu vyžarovanému cieľovým objektom. Takto odčítané údaje na teplomere závisia nielen od teploty cieľa, ale aj od teploty jeho okolia. Objekty, ktoré sú dobrými žiarčičmi (tie, ktoré majú emisivitu blízku 1), majú tendenciu, byť čierne a čím vyššia je emisivita, tým nižšia je odrazivosť, a teda tým menší je vplyv okolia na údaj teplomera.

d. Detektor žiarenia

Napokon, aj samotný detektor vyžaruje žiarenie. Signál na výstupe detektora zodpovedá rozdielu medzi prichádzajúcim žiarením z cieľa (vrátane odrazeného žiarenia) a odchádzajúcim žiarením emitovaným detektorom. Všetky lacné infračervené teplomery používajú nechladené detektory, takže detektor je pri izbovej teplote alebo mierne nad ňou. Ak je cieľová teplota nižšia ako 200 °C, potom žiarenie emitované detektorom tvorí významnú časť prichádzajúceho žiarenia a musí sa zohľadniť. Niektoré infračervené teplomery používajú termoelektrické zariadenia na chladenie detektora hlboko pod okolitú teplotu. V týchto drahších modeloch možno žiarenie detektora bežne zanedbať pre väčšinu cieľových teplôt, ale tieto prístroje nie sú predmetom tohto článku.

3 Rovnica merania

Zahrnutím všetkých týchto efektov, emisivity cieľa, odrazeného žiarenia a žiarenia emitovaného detektorom, vzniká na výstupe detektora meraný signál S_{meas} , ktorý je daný meracou rovnicou pozostávajúcou zo súčtu troch členov [6]:

$$S_{meas} = \varepsilon_s S(T_s) + (1 - \varepsilon_s) S(T_w) - \quad (6)$$

kde T_s je teplota cieľa (veľičina, ktorá nás zaujíma), T_w je teplota okolia (často steny miestnosti), T_d je teplota detektora, ε_s je emisivita povrchu cieľa a $1 - \varepsilon_s$ je jeho odrazivosť. Každý z troch členov na pravej strane rovnice (6) zodpovedá inej zložke žiarenia: prvý, $\varepsilon_s S(T_s)$, zodpovedá žiareniu emitovanému cieľom; druhý, $(1 - \varepsilon_s) S(T_w)$, žiareniu odrazenému od okolia; a tretí, $S(T_d)$, žiareniu emitovanému detektorom. Každú z funkcií $S(T)$ možno vypočítať dosadením príslušnej hodnoty teploty do rovnice (1), pričom sa nezabudne najprv previesť akékoľvek teploty stupňov Celzia na teploty v Kelvinoch.

4 Spracovanie nameraného signálu

Ak sa nameraný signál, S_{meas} , daný rovnicou (6) dosadí do rovnice prepočtu signálu na teplotu (3), výsledkom nebude cieľová teplota T_s , pretože na ňu vplyva emisivita cieľa, teplota okolia a teplota detektora (ε_s , T_w a T_d). Aby IR teplomer lepšie vyjadroval cieľovú teplotu, pred prepočtom na teplotu sa nameraný signál predbežne spracuje, čím sa v podstate uplatnia korekcie na vyššie uvedené vplyvy. Teplota detektora, T_d , sa dá presne určiť pomocou vnútornej teplotnej sondy namontovanej v strede detektora.

Jeho meranie prebieha automaticky ako súčasť meracieho procesu IR teplomera a je pred používateľom úplne skryté.

V prípade infračervených teplomerov s nastaviteľnou emisivitou prístroja, ε_{instr} , môže používateľ informovať teplomer o hodnote cieľovej emisivity správnym nastavením ε_{instr} . V prípade prístrojov s pevnou emisivitou výrobca navrhuje teplomer tak, aby vykonával merania len na konkrétnych objektoch (t. j. objektoch s konkrétnou emisivitou). Mnohé potravinárske výrobky, plasty, materiály vyrobené z organických zlúčenín (ako papier, drevo a koža) a väčšina farieb majú emisivitu blízku 0,95 v rozsahu 8 μm - 14 μm (t. j. sú takmer čierne), preto sa často volí hodnota 0,95 ako pevné nastavenie emisivity prístroja.

Teplota okolia, T_w , závisí od situácie pri meraní a líši sa od merania k meraniu. V prípade tejto vplyvnej veličiny väčšina výrobcov IR teplomerov implicitne predpokladá, že T_w bude približne rovnaká ako teplota detektora, T_d . Inými slovami, predpokladajú, že všetky merania sa budú vykonávať v okolitom prostredí. Tento predpoklad je zvyčajne v poriadku pri kalibrácii v dobre kontrolovanom laboratóriu, ale v iných situáciách merania môže byť dosť zavádzajúci. Patria sem chladné sklady, kde je teplota okolia výrazne nižšia ako teplota teplomera, a situácie, keď sú merané výrobky obklopené horúcimi predmetmi, napríklad ohrievačmi, ktorých teplota je výrazne vyššia ako teplota teplomera.

Vyzbrojený týmito informáciami infračervený teplomer spracuje nameraný signál takto: najprv sa nameraný signál vydelením nastavením emisivity prístroja; potom sa pripočíta veličina zodpovedajúca signálu pri teplote detektora (t. j. veličina daná rovnicou (1) s dosadením $T = T_d$); nakoniec sa výsledná hodnota signálu prepočíta na nameranú hodnotu teploty T_{meas} . Matematicky sa to vyjadruje takto:

$$S(T_{meas}) = \frac{S_{meas}}{\varepsilon_{instr}} + S(T_d) \quad (6)$$

5 Chyby merania

Aké sú dôsledky tohto spracovania signálu? Aby sme na to odpovedali, najprv nahradíme S_{meas} z rovnice (6) do rovnice (7):

$$S(T_{meas}) = \frac{\varepsilon_s S(T_s) + (1 - \varepsilon_s) S(T_w) - (1 - \varepsilon_{instr}) S(T_d)}{\varepsilon_{instr}} \quad (7)$$

Môžeme to prepísať ako súčet troch členov:

$$S(T_{meas}) = S(T_s) + \frac{(1 - \varepsilon_{instr})}{\varepsilon_{instr}} [S(T_w) - S(T_d)] + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{instr})}{\varepsilon_{instr}} [S(T_s) - S(T_w)] \quad (8)$$

Ak sú druhý a tretí člen (čiary) tejto rovnice nulové, potom je rovnica jednoducho $S(T_{meas}) = S(T_s)$. To by znamenalo, že $T_{meas} = T_s$, t. j. že nameraná teplota sa rovná cieľovej teplote, čo je to, o čo sa snažíme. Ak však niektorý z druhých alebo tretích riadkov rovnice nie je nulový, predstavujú chybové členy. V tomto prípade sa nameraná teplota už nerovná cieľovej teplote.

Druhý riadok je nulový, keď je $\varepsilon_{instr} = 1$ alebo $T_w = T_d$. Podmienka $T_w = T_d$ je vyššie uvedený predpoklad výrobcu.

Rovnica (9) nám umožňuje kvantifikovať chybu, keď táto podmienka neplatí. Ak sa nastaví $\varepsilon_{instr} = 1$ (ak je možné) čo je často dobrou stratégiou, pretože potom meranie teploty T_{meas} nezávisí od T_d , ako je zrejme z rovníc (8) a (9). To však môže spôsobiť chybu prostredníctvom tretieho riadku v rovnici (9).

Táto tretia čiara je nulová, keď je buď $\varepsilon_{instr} = \varepsilon_s$ alebo $T_s = T_w$, t. j. keď sa emisivita prístroja zhoduje s emisivitou cieľa alebo keď je teplota cieľa rovnaká ako teplota okolia. Nesprávne nastavenie emisivity prístroja vedie k chybe, ktorá sa zväčšuje s rastúcim rozdielom medzi týmito dvoma teplotami. Pri prístrojoch s pevnou emisivitou nemá používateľ nad touto chybou žiadnu kontrolu, pokiaľ neplatí podmienka $T_s = T_w$.

Ak to zhrnieme, tak iba v prípade, že $T_w = T_d$ a $\varepsilon_{instr} = \varepsilon_s$, sa údaj na IR teplomere rovná skutočnej cieľovej teplote. Ak niektorá z týchto podmienok neplatí, údaj teplomera je chybný. Jedinou výnimkou je prípad, keď je cieľ čiernym telesom ($\varepsilon_s = 1$) alebo prevládajú podmienky čierneho telesa ($T_s = T_w$) a emisivita prístroja bola tiež nastavená na 1, v takom prípade údaj nezávisí ani od T_w , ani od T_d .

6 Kalibrácia

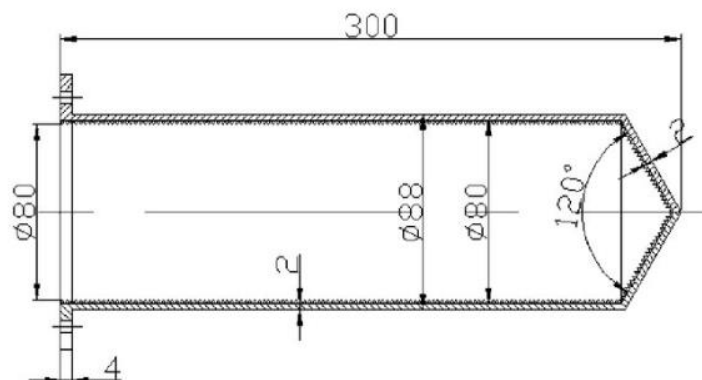
Vyššie uvedené chyby sa vyskytujú takmer pri všetkých meraniach s infračervenými teplomermi a treba dbať na to, aby tieto chyby neboli nadmerné. Vyskytujú sa aj počas kalibrácie, pretože podmienky, pre ktoré sú chyby nulové ($T_w = T_d$ a $\varepsilon_{instr} = \varepsilon_s$), platia veľmi zriedkavo. Ako teda kalibrujeme infračervený teplomer, keď očakávame chyby v nameraných hodnotách aj v prípade dokonalého teplomera? Odpoveďou je, že najprv musíme vypočítať očakávané údaje pre ideálne zariadenie pri kalibrácii a zistiť, ako blízko sú skutočné údaje k očakávaným. Alebo inak povedané, keďže na kalibráciu infračervených teplomerov vždy používame čierne telesá, musíme vypočítať "korekcie na čierne telesá", ktoré aplikujeme na údaje nášho referenčného teplomera pred porovnaním s údajmi kalibrovaného zariadenia.

Bežné čierne telesá sú vyrobené z dutín, takže ich efektívna emisivita je veľmi blízka 1 (pozri Obr. 1). Tieto dutiny čiernych telies sú účelové a používajú sa so suchým blokom. Efektívnu emisivitu dutiny ε_{bb} môžeme určiť z jej dĺžky L , polomeru jej otvoru r a emisivity materiálu, z ktorého je vyrobená, ε_s [7]

$$\varepsilon_{bb} = 1 - (1 - \varepsilon_s) \left(\frac{r}{L}\right)^2 \quad (9)$$

Napríklad dutina vyrobená z materiálu s emisivitou 0,9 (oxidovaná nehrdzavejúca oceľ), ktorej dĺžka je 300 mm a polomer otvoru 40 mm, má efektívnu emisivitu:

$$\varepsilon_{bb} = 1 - (1 - 0,9) \left(\frac{40}{300}\right)^2 = 0,998$$



Obr. 1 Dutina čierneho telesa s dĺžkou L a polomerom apertúry r , ktorej steny majú emisivitu ε_s . Efektívna emisivita dutiny je daná rovnicou (10). Pri používaní sa dutina rovnomerne zahrieva v peci alebo v kalibrátore so suchým blokom.

Ako zdroje čierneho telesa sa používajú aj ploché kalibrátory, tzv. terče (pozri Obr. 2). Ich emisivita sa však zvyčajne blíži k hodnote 0,95, takže nie sú skutočnými čiernymi telesami. Na účely tohto článku sa však oba typy kalibračných zdrojov budú označovať ako čierne telesá a budú sa rozlišovať podľa ich efektívnej emisivity. Referenčný teplomer, ktorý

meria skutočnú teplotu čierneho telesa, môže byť buď kontaktný teplomer, ako je platinový odporový teplomer, alebo referenčný infračervený teplomer. V špeciálnom prípade čierneho telesa s ľadovým bodom nie je potrebný žiadny samostatný referenčný teplomer. Tieto tri metódy kalibrácie sú opísané nižšie.

7.1 Kontaktný teplomer ako referencia

Ak sa ako referenčný teplomer používa kontaktný teplomer, je dôležité, aby bol umiestnený tak, aby meral skutočnú teplotu čierneho telesa. To je obzvlášť dôležité pre kalibrátory s plochou doskou (terčom), kde teplotné rozdiely môžu viesť k rozdielom medzi teplotou dosky, na ktorú je namierený kalibrovaný IR teplomer, a teplotou v mieste referenčného teplomera (zvyčajne za povrchom dosky).



Obr. 2 Kalibrátor s plochou doskou pri pohľade infračerveným teplomerom.

V kalibračnom laboratóriu sa teplota kalibrovaného zariadenia zvyčajne rovná teplote okolia, T_{amb} . Rovnicu (8) pre očakávaný údaj teplomera, T_{exp} , teda môžeme prepísať ako:

$$S(T_{exp}) = \frac{\varepsilon_{bb}S(T_{ref}) + (1 - \varepsilon_{bb})S(T_{amb}) - (1 - \varepsilon_{instr})S(T_d)}{\varepsilon_{instr}} \quad (10)$$

kde ε_{bb} je efektívna emisivita čierneho telesa a T_{ref} je skutočná teplota čierneho telesa určená referenčným teplomerom. Druhý člen v čitateli rovnice (11) zodpovedá okolitému žiareniu, ktoré vstupuje do dutiny čierneho telesa z okolia a nachádza si cestu späť von, alebo žiareniu, ktoré sa odráža od plochej dosky. V prípade dutiny, ktorej efektívna emisivita je vo všeobecnosti veľmi blízka 1, bude tento člen veľmi malý.

Pre daný súbor podmienok možno očakávanú teplotu vypočítať vyhodnotením pravej strany rovnice (11) (pomocou rovnice (1) na určenie $S(T_{ref})$, $S(T_{amb})$ a $S(T_d)$), čím sa získa $S(T_{exp})$, potom možno použiť rovnicu (3) na získanie T_{exp} z $S(T_{exp})$. „Korekcia na čierne teleso“, ΔT_{bb} , je rozdiel medzi očakávaným údajom a údajom odčítaným:

$$\Delta T_{bb} = T_{exp} - T_{ref} \quad (11)$$

Túto korekciu na čierne teleso možno pripočítať k referenčnému údajovi teplomera, čím získame očakávaný údaj IR teplomera.

V Tab. 1 je uvedený príklad výpočtu pre výpočet infračerveného teplomera s vlnovou dĺžkou 8 μm - 14 μm , ktorého emisivita je stanovená na 0,95, s použitím dutiny čierneho telesa s efektívnou emisivitou 0,997. V tomto príklade je teplota okolia 20 °C a teplota detektora 21 °C. Všimnite si, že teplota detektora nie je všeobecne známa, pretože nie je zobrazená na prístroji, takže jej hodnota sa musí aproximovať alebo odhadnúť, aby sa vypočítali korekcie na čierne teleso. Hodnoty v Tab. 1 vám poskytujú prostriedky na kontrolu presnosti vašich tabuľkových výpočtov. Na Obr. 3 sú zobrazené korekcie na čierne teleso pre celý rozsah teplôt čierneho telesa od -50 °C do 500 °C. Zobrazený je aj vplyv rôznych teplôt detektora. Teplota detektora sa môže líšiť od teploty okolia, ak bol teplomer uskladnený v miestnosti s inou teplotou ako v kalibračnom laboratóriu a pred meraním nemal čas sa vyrovnáť. Detektor môže byť tiež teplejší ako okolie, ak sa na dlhší čas umiestni pred horúce čierne teleso. Ako ukazuje Obr. 3, existuje len slabá závislosť korekcie čierneho telesa od teploty detektora, hlavne pri nižších teplotách. Väčšia časť korekcie je spôsobená tým, že $\varepsilon_{instr} \neq \varepsilon_{bb}$.

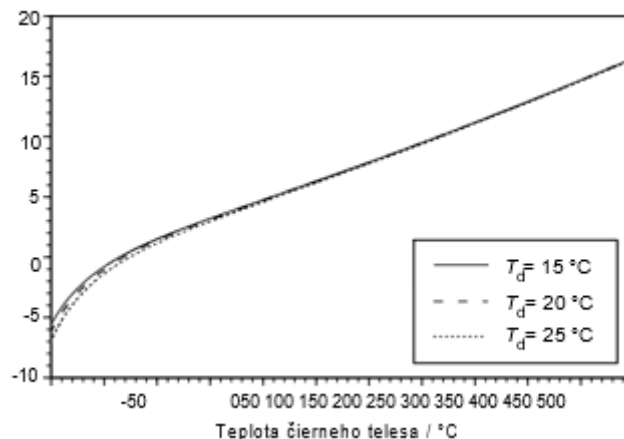
Ak emisivita prístroja nie je pevne stanovená, potom nastavenie na 1 odstráni akúkoľvek závislosť odčítania od teploty detektora (pozri rovnicu (11)). Ak sa kalibrácia vykonáva pomocou dutiny čierneho telesa s efektívnou emisivitou blízko 1, potom by sme mali očakávať, že korekcie na čierne teleso budú oveľa menšie ako tie, ktoré sú uvedené na Obr. 3, pretože teraz $\varepsilon_{instr} \approx \varepsilon_{bb}$. Je to skutočne tak, ako ukazuje plná čiara na Obr. 4. Ak je však čiernym telesom plochý kalibrátor s emisivitou 0,95, potom je potrebné uplatniť väčšie korekcie na čierne teleso, ktoré sú uvedené na Obr. 5 prerušovanou

čiarou.

Tab. 2 Výpočet korekcií na čierne teleso pre tri hodnoty T_{ref} pre infračervený teplomer $8 \mu\text{m} - 14 \mu\text{m}$ ($A = 9,36 \mu\text{m}$, $B = 178 \mu\text{m} \cdot \text{K}$) s $\varepsilon_{instr} = 0,95$, $\varepsilon_{bb} = 0,997$, $T_{amb} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $T_d = 21 \text{ }^\circ\text{C}$.

T_{ref} ($^\circ\text{C}$)	$S(T_{ref})$ [rovnic (1)]	$S(T_{amb})$ [rovnic (1)]	$S(T_d)$ [rovnic (1)]	$S(T_{exp})$ [rovnic (11)]	T_{exp} ($^\circ\text{C}$) [rovnic (3)]	ΔT_{bb} ($^\circ\text{C}$) [rovnic (12)]
-50	0,00175	0,00732	0,00744	0,00147	-56,5	-6,5
100	0,02025	0,00732	0,00744	0,02088	103,0	3,0
500	0,16773	0,00732	0,00744	0,17566	516,4	16,4

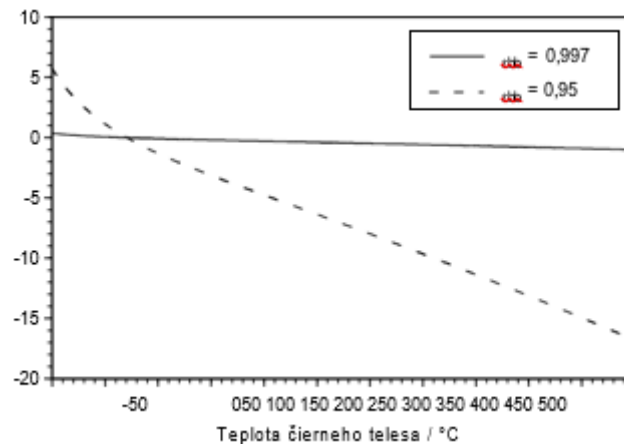
Pre čierne teleso s terčom by boli korekcie na čierne teleso menšie, ak by bola emisivita telesa nastavená tak, aby zodpovedala ε_{bb} , t. j. $\varepsilon_{instr} = 0,95$. Tieto korekcie sú znázornené na Obr. 5. Keď sa teplota detektora tiež zhoduje s teplotou okolia, všetky korekcie sú nulové bez ohľadu na teplotu čierneho telesa.



Obr. 3 Korekcie teploty zdroja kalibrácie čierneho telesa, ktorého efektívna emisivita je $\varepsilon_{bb} = 0,997$, na získanie očakávaného údaju pre infračervený teplomer $8 \mu\text{m} - 14 \mu\text{m}$ s pevnou emisivitou $\varepsilon_{instr} = 0,95$. Predpokladá sa, že teplota okolia je $T_{amb} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplota detektora je uvedená na grafe.

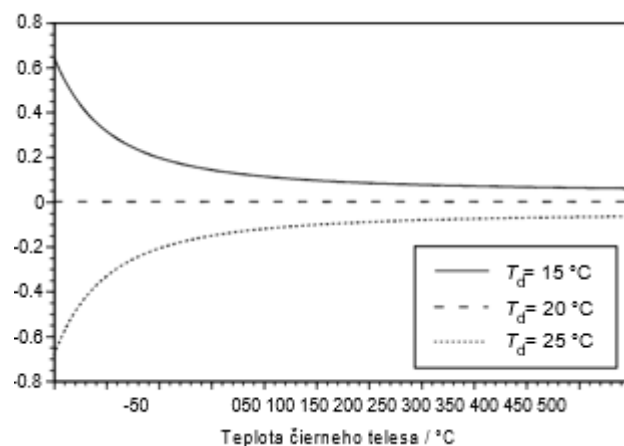
Postup kalibrácie je zhrnutý do nasledujúcich krokov:

- Určite minimálne a maximálne vlnové dĺžky pre pracovný rozsah vlnových dĺžok kalibrovaného zariadenia. Tieto hodnoty by mali byť uvedené v špecifikáciách termometrov v časti "spektrálna odozva".
- Na základe týchto hodnôt v rovnicach (4) a (5) vypočítajte koeficienty A a B funkcie odozvy teplomera.
- Určite emisivitu čierneho telesa, ε_{bb} , buď ako efektívnu hodnotu z rovnice (10) pre dutinu, alebo priamo zo špecifikácií pre plochý kalibrátor.
- Nastavte emisivitu prístroja, ε_{instr} , čo najbližšie k hodnote ε_{bb} (ak klient nepožaduje inak), alebo ak je emisivita prístroja pevne stanovená, určte jej hodnotu zo špecifikácií teplomera.
- Pomocou sondy teploty vzduchu zmerajte teplotu okolia T_{amb} .



Obr. 4 Plná čiara platí pre rovnaké podmienky ako na Obr. 3, s tým rozdielom, že nastavenie emisivity na IR teplomere je $\varepsilon_{instr} = 1$. Prerušovaná čiara je pre kalibrátor s terčom s emisivitou $\varepsilon_{bb} = 0,95$, opäť pre $\varepsilon_{instr} = 1$. V prípade oboch kriviek sú korekcie na čierne teleso nezávislé od teploty detektora.

- Odhadnite teplotu detektora, T_d . Táto teplota bude pravdepodobne rovnaká ako teplota okolia za predpokladu, že IR teplomer mal dostatok času na vyrovnanie s kalibračným laboratóriom a že IR teplomer nie je nadmerne zahrievaný žiarením z čierneho telesa. Ak je emisivita prístroja nastavená na 1, hodnota T_d sa nevyžaduje.
- Pre každý kalibračný bod odčítajte referenčný teplomer, T_{ref} , a vypočítajte očakávaný údaj IR teplomera, T_{exp} , pomocou rovnice (11). Porovnajme skutočný údaj na IR teplomere s hodnotou T_{exp} . Rozdiel medzi očakávanou teplotou a skutočným údajom je korekcia, ktorá by sa mala uviesť v kalibračnom certifikáte.



Obr. 5 Rovnaké podmienky ako na Obr. 4, ale pre IR termokameru s nastavením emisivity $\varepsilon_{instr} = 0,95$ pri pohľade na kalibrátor s terčom s emisivitou $\varepsilon_{bb} = 0,95$. Keď $T_d = T_{amb} = 20$ °C, korekcie na čierne teleso sú nulové pre všetky teploty.

b. Infračervený teplomer ako referencia

V niektorých prípadoch sa ako referenčné zariadenie na meranie teploty kalibračného zdroja čierneho telesa používa samostatný IR teplomer. Tento referenčný IR teplomer musí byť už kalibrovaný. Korekcie na čierne teleso pre tento spôsob kalibrácie sa líšia od korekcií uvedených v predchádzajúcej časti.

Niektoré kalibrátory s terčom majú digitálny ukazovateľ teploty nastavený výrobcom s použitím IR termometra ako referencie. Toto sa často označuje ako „radiometrická kalibrácia“ displeja. Zohľadňuje sa pritom emisivita dosky, odrazy okolia a nastavenie emisivity prístroja na kalibrovanom zariadení (prostredníctvom nastavenia na regulátore plochej dosky). Tento typ kalibrátora v podstate automaticky aplikuje korekcie uvedené v predchádzajúcej časti a údaj na displeji udáva očakávaný údaj prístroja bez kalibrácie. Pri používaní tohto displeja ako referenčnej teploty je však potrebné postupovať opatrne, pretože podmienky, za ktorých bol kalibrovaný, sa môžu líšiť od súčasných podmienok, keď sa terč používa ako kalibračný zdroj. Najmä teplota okolia nemusí byť rovnaká (čo spôsobuje, že odrazené žiarenie je odlišné), teplota detektora kalibrovaného zariadenia sa môže líšiť od teploty okolia a rozsah vlnovej dĺžky referenčného teplomera sa môže líšiť od rozsahu vlnovej dĺžky kalibrovaného zariadenia. Zvyčajne špecifikovaná neistota kalibrátora zahŕňa zložku, ktorá zohľadňuje mierne zmeny teploty okolia a teploty detektora. Používateľ by mal skontrolovať, či sa pracovné rozsahy vlnových dĺžok zhodujú. V tejto časti predpokladáme, že údaje IR teplomera sa odčítavajú v rovnakom čase ako

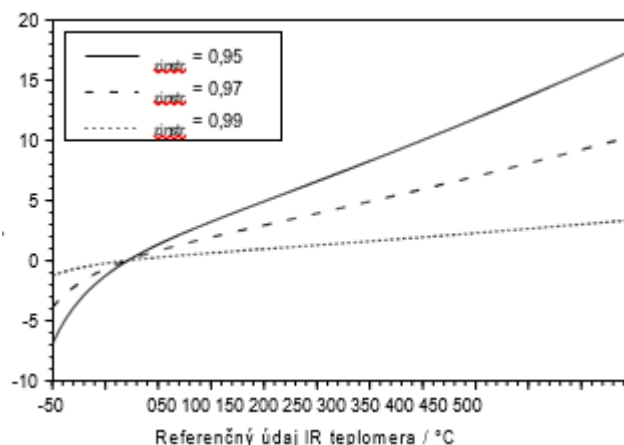
merania kalibrovaného zariadenia, takže okolité podmienky počas sekvencie meraní sú identické. Predpokladáme tiež, že nastavenie emisivity prístroja na referenčnom teplomere je 1, takže jeho údaje sú nezávislé od teploty jeho detektora. Predpokladá sa tiež, že pracovný rozsah vlnových dĺžok referenčného teplomera je rovnaký ako rozsah vlnových dĺžok kalibrovaného prístroja (hodnoty A a B sú rovnaké pre oba prístroje). Ak táto posledná podmienka neplatí, potom je výpočet korekcií na čierne teleso zložitejší a vyžaduje si ďalšie informácie.

Aplikovaním rovnice (8) na referenčný teplomer aj na kalibrovaný teplomer a určením rozdielu nameraných signálov dostaneme:

$$S(T_{exp}) = S(T_{ref}) + \frac{(1 - \varepsilon_{instr})}{\varepsilon_{instr}} [S(T_{ref}) - S(T_d)] \quad (12)$$

Ako predtým, T_{exp} je očakávaná hodnota pre kalibrované zariadenie, ε_{instr} je nastavenie emisivity prístroja a T_d je teplota jeho detektora. T_{ref} je údaj na referenčnom teplomere (ktorý sa vo všeobecnosti nerovná teplote čierneho telesa, najmä ak sa používa terč). Korekcie na čierne teleso sú opäť dané vzťahom $\Delta T_{bb} = T_{exp} - T_{ref}$. Všimnite si, že rovnica (13) nezávisí od skutočnej teploty čierneho telesa alebo od hodnoty jeho efektívnej emisivity, alebo od teploty okolia. Skutočnosť, že tieto hodnoty nemusia byť známe, je hlavnou výhodou tejto metódy. Okrem toho, ak je $\varepsilon_{instr} = 1$, korekcie na čierne teleso sú nulové pre všetky teploty. To je v kontraste s rovnicou (11), kde za tejto podmienky korekcie na čierne teleso stále závisia od teploty okolia a efektívnej emisivity čierneho telesa.

Na Obr. 6 sú uvedené korekcie na čierne teleso pre túto metódu pre rôzne nastavenia emisivity prístroja na kalibrovanom zariadení ako funkcia hodnoty referenčného teplomera. Predpokladá sa, že teplota detektora kalibrovaného zariadenia je $T_d = 20^\circ\text{C}$. Hoci to nie je znázornené, zmena korekcií pri zmenách teploty detektora je približne rovnaká ako na Obr. 3.



Obr. 6 Korekcie potrebné na údaje referenčného IR teplomera namiereného na kalibračný zdroj čierneho telesa pri kalibrácii $8\ \mu\text{m}$ - $14\ \mu\text{m}$ IR teplomera s teplotou detektora $T_d = 20^\circ\text{C}$ a s emisivitou prístroja podľa grafu. Referenčný teplomer tiež pracuje v rozsahu $8\ \mu\text{m}$ - $14\ \mu\text{m}$ a jeho prístrojová emisivita je nastavená na 1.

Kalibračný postup, keď sa ako referencia používa IR teplomer, je zhrnutý takto:

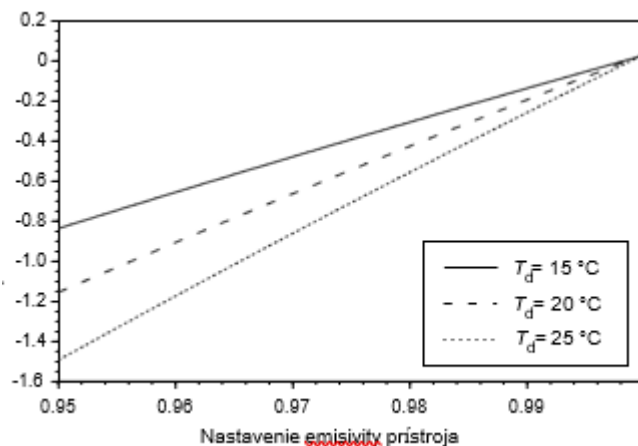
- Určite minimálne a maximálne vlnové dĺžky pre pracovný rozsah vlnových dĺžok kalibrovaného zariadenia. Tieto hodnoty by mali byť uvedené v špecifikáciách IR teplomera v časti "spektrálna odozva".
- Skontrolujte, či sú tieto minimálne a maximálne vlnové dĺžky rovnaké pre referenčný IR teplomer.
- Pomocou týchto hodnôt v rovnicach (4) a (5) vypočítajte koeficienty A a B odozvy teplomera (ktoré sa vzťahujú na oba teplomery).
- Emisivitu prístroja, ε_{instr} , nastavte na prístroji pred kalibráciou čo najbližšie k hodnote 1 (ak zákazník nepožiadava inak), alebo ak je emisivita prístroja pevne stanovená, určte jej hodnotu zo špecifikácií teplomera.
- Nastavte emisivitu prístroja na referenčnom IR teplomere na hodnotu 1.
- Odhadnite teplotu detektora T_d pre kalibrované zariadenie. Je pravdepodobné, že táto teplota bude rovnaká ako teplota okolia za predpokladu, že kalibrované zariadenie malo dostatok času na vyrovnanie s kalibračným laboratóriom a že kalibrované zariadenie nie je nadmerne zahrievané žiarením z čierneho telesa. Ak je jeho prístrojová emisivita nastavená na hodnotu 1, hodnota T_d sa nevyžaduje.
- Pre každý kalibračný bod odčítajte referenčný IR teplomer T_{ref} a vypočítajte očakávaný údaj T_{exp} kalibrovaného zariadenia pomocou rovnice (13). Porovnajete skutočný údaj na kalibrovanom zariadení s hodnotou T_{exp} . Rozdiel medzi očakávanou teplotou a skutočným údajom je korekcia, ktorá by sa mala uviesť v kalibračnom certifikáte.

c. Ľadový bod ako referencia

Bod ľadu je presná a spoľahlivá referenčná teplota vhodná na kontrolu presnosti a časového posunu IR teplomerov. Keďže emisivita ľadu je $\varepsilon_s = 0,98$ v infračervenej časti spektra, pomocou drveného ľadu sa dá ľahko zostrojiť dobrá dutina čierneho telesa s efektívnou emisivitou blízkou 1 (podľa rovnice (10)). Keďže teplota správne zostrojeného ľadového bodu je definovaná presne na $0\text{ }^\circ\text{C}$, na kalibráciu pri tejto teplote nie je potrebný žiadny referenčný teplomer.

Ak chceme určiť očakávaný údaj na IR teplomere, keď je zameraný na čierne teleso s ľadovým bodom, môžeme do rovnice (11) dosadiť hodnotu $T_{\text{ref}} = 0\text{ }^\circ\text{C}$. V tomto prípade je korekcia na čierne teleso rovnaká ako očakávaný údaj vyjadrený v stupňoch Celzia. Na Obr. 7 je znázornená korekcia na čierne teleso ako funkcia nastavenia emisivity prístroja na kalibrovanom zariadení pre tri rôzne teploty detektora za predpokladu, že teplota okolia je $T_{\text{amb}} = 20\text{ }^\circ\text{C}$ a efektívna emisivita dutiny čierneho telesa s ľadovým bodom je $\varepsilon_{\text{bb}} = 0,999$.

Kalibračný postup pre kalibráciu ľadového bodu je totožný s postupom pre kontaktný teplomer ako referenčný, s výnimkou kroku 7, v ktorom sa neodčítava žiaden referenčný teplomer; namiesto toho sa v rovnici (11) použije jediná referenčná teplota $T_{\text{ref}} = 0\text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 7 Očakávaný údaj pre infračervený teplomer s vlnovou dĺžkou $8\text{ }\mu\text{m} - 14\text{ }\mu\text{m}$ ako funkcia nastavenia emisivity prístroja pri pozorovaní dutiny s čiernym telesom s ľadovým bodom s efektívnou emisivitou $\varepsilon_{\text{bb}} = 0,999$. Teplota okolia je $T_{\text{amb}} = 20\text{ }^\circ\text{C}$.

d. Teplota detektora

Problémom v celom tomto článku je, že hodnota T_d nie je používateľovi známa. Prístroj ju meria interne, ale nezobrazuje sa na displeji. Najlepší predpoklad je, že T_d bude rovnaká alebo blízka izbovej teplote, čo si môže vyžadovať určitú úpravu prístroja pred použitím. V niektorých prípadoch však nie je možné zabezpečiť, aby $T_d = T_{\text{amb}}$. Jednou z nich je prípad, keď sa infračervený teplomer používa dlhší čas pred horúcim zdrojom (napr. počas kalibrácie pri vysokých teplotách), kde žiarenie zo zdroja môže detektor zahriať nad okolitú teplotu. Druhým prípadom je použitie infračerveného teplomera v mrazničke, kde je teplota okolia výrazne nižšia ako špecifikovaná prevádzková teplota teplomera. V tomto prípade sa teplomer môže stále úspešne používať, ale detektor sa musí udržiavať nad teplotou zvyčajne $0\text{ }^\circ\text{C}$.

Závislosť od teploty detektora sa odstráni, ak je emisivita prístroja nastavená na 1 (to je vylúčené v prístrojoch s pevnou emisivitou). Na druhej strane, relatívne veľké chyby v odhade teploty detektora sa zvyčajne dajú tolerovať bez výraznej chyby v odčítaní.

V prípade prístrojov s nastaviteľnou emisivitou možno teplotu detektora v skutočnosti odvodiť z dvoch meraní toho istého cieľa s použitím dvoch rôznych nastavení emisivity prístroja. Teplota a emisivita cieľa a teplota okolia nemusia byť známe. Vyžaduje sa len, aby tieto hodnoty boli počas dvoch meraní konštantné. Teplotu detektora, T_d , možno vypočítať z rovnice:

$$S(T_d) = \frac{\varepsilon_{\text{instr1}} S(T_{\text{meas1}}) - \varepsilon_{\text{instr2}} S(T_{\text{meas2}})}{\varepsilon_{\text{instr1}} - \varepsilon_{\text{instr2}}} \quad (13)$$

kde T_{meas1} a T_{meas2} sú dva údaje IR teplomera, keď je emisivita prístroja nastavená na $\varepsilon_{\text{instr1}}$ a $\varepsilon_{\text{instr2}}$. Presnosť výpočtov vykonaných pomocou rovnice (14) je najlepšia, keď sú hodnoty $\varepsilon_{\text{instr1}}$ a $\varepsilon_{\text{instr2}}$ široko rozmiestnené; hodnoty 0,5 a 1 sú zvyčajne primerané. Napríklad dve merania čierneho telesa pomocou IR teplomera s vlnovou dĺžkou $8\text{ }\mu\text{m} - 14\text{ }\mu\text{m}$ môžu byť $T_{\text{meas1}} = 141,8\text{ }^\circ\text{C}$, keď je emisivita prístroja nastavená na $\varepsilon_{\text{instr1}} = 1$, a $T_{\text{meas2}} = 219,4\text{ }^\circ\text{C}$, keď je $\varepsilon_{\text{instr2}} = 0,5$. Dosadením týchto hodnôt do rovnice (14) dostaneme $T_d = 21,5\text{ }^\circ\text{C}$.

Výpočty tohto druhu sú užitočné na určenie očakávaných zmien teploty detektora pri zmene podmienok v laboratóriu. Hoci to nie je možné urobiť pre prístroje s pevnou emisivitou, môže byť možné odvodiť ich správanie z meraní vykonaných s podobnými prístrojmi s nastaviteľnou emisivitou.

7 Praktická ukážka kalibrácie so zavedením korekcií

Boli zvolený infračervený teplomer na ktorý aplikujeme korekcie, z kalibrácie etalónu ale aj korekciu na „čierne teleso“. Zvolili sme bežne dostupný infračervený teplomer a to Fluke 66.

Fluke 66 je vysoko výkonný infračervený teplomer, ktorý poskytuje rýchle, presné a bezkontaktné meranie teploty. S jeho 30:1 pomerom vzdialenosti k veľkosti meraného bodu môže užívateľ merať teploty na bezpečnej vzdialenosti bez ohrozenia presnosti. Teplomer je vybavený laserovo navádzaným systémom zameriavania, ktorý uľahčuje ciele a zvyšuje presnosť merania s odchýlkou len 1 %. Fluke 66 dokáže merať teploty v rozsahu od -32 °C do 600 °C (-25 °F do 1100 °F), čo umožňuje jeho použitie v širokom spektre aplikácií, od elektrických diagnostík po monitorovanie priemyselných procesov.

Tento model tiež ponúka 12-bodové zaznamenávanie dát, čo je užitočné pre sledovanie teplotných trendov alebo dokumentáciu meraní pre neskoršiu analýzu. Digitálne nastaviteľná emisivita od 0.1 do 1.0 umožňuje užívateľom prispôbiť teplomer pre presnejšie meranie teploty rôznych materiálov. Okrem toho, Fluke 66 obsahuje funkcie ako MAX, MIN, DIF a AVG, ktoré poskytujú okamžité zobrazenie meraní mimo nastavených limitov, a tiež Hi a Lo alarmy pre rýchle identifikovanie teplotných anomálií.

Teplomer je tiež kompatibilný s voliteľným príslušenstvom sondy, ktoré umožňuje duálne kontaktne a nekontaktné merania teploty, čo rozširuje jeho flexibilitu a aplikácie. S hmotnosťou len 320 gramov je Fluke 66 prenosný a ľahko sa používa v teréne. Jeho robustná konštrukcia zaručuje dlhú životnosť aj v náročných priemyselných prostrediach.

Fluke 66 je ideálny nástroj pre technikov, ktorí vykonávajú diagnostiku elektrických obvodov, hodnotenie vyváženia miestností alebo diagnostiku katalyzátorov v automobiloch.

Vďaka rýchlejšej odozve do 0.5 sekundy a spektrálnej odozve od 8 μm do 14 μm, Fluke 66 poskytuje spoľahlivé výsledky pri meraní teploty povrchov a pomáha rýchlo lokalizovať potenciálne chyby alebo nefunkčné systémy, čím znižuje pracovný čas a zlepšuje efektívnosť. Jeho LCD displej s podsvietením zabezpečuje ľahkú čitateľnosť v rôznych svetelných podmienkach, a funkcia zadržania dát na displeji na 7 sekúnd po uvoľnení spúšte umožňuje užívateľom zaznamenať meranie bez nutnosti okamžitého zápisu.

Fluke 66 je napájaný 9 V alkalickou alebo NiCd batériou, pričom životnosť batérie je 20 hodín s zapnutým laserom a podsvietením na 50 %, alebo 40 hodín s vypnutým laserom a podsvietením. Tento teplomer je tiež vybavený laserovým zameriavacím systémom triedy II a typická vzdialenosť k cieľu je 5 metrov (16,4 stôp).

Kalibrácia bola prevedená na presnom infračervenom kalibrátore Fluke 4180 ktorý je navrhnutý pre kalibráciu infračervených teplomerov a termografických kamier. Tento model poskytuje vysokú presnosť a spoľahlivosť merania s rozsahom teplôt od -15 °C do 120 °C, tento kalibrátor ponúka uniformitu teploty až do ±0,10 °C a stabilitu do ±0,05 °C, čo zabezpečuje konzistentné a spoľahlivé výsledky pri každom meraní. Kalibrátor je radiometricky kalibrovaný, čo znamená, že emisivita je nastavená a overená pre dosiahnutie konzistentných a presných výsledkov. Veľká cieľová plocha o priemere 152 mm je ideálna pre väčšinu infračervených teplomerov, pretože umožňuje kalibráciu bez potreby korekcie pre veľkosť zdroja chyby. S hmotnosťou iba 9,1 kg je kalibrátor ľahko prenosný a jeho intuitívny displej zobrazuje, keď je teplota stabilná. Fluke 4180 je tiež vybavený akreditovanou kalibráciou od jedného z najdôveryhodnejších laboratórií pre teplotnú kalibráciu na svete, čo zaručuje presnosť a sledovateľnosť meraní.

Oba skúšané infračervené teplomery boli temperované po dobu minimálne 24 hodín v priestoroch laboratória so stabilnou teplotou prostredia 23 °C ± 2 °C, ktorá je nepretržite zaznamenávaná. V priestoroch laboratória kde sa stabilizovali aj skúšané infračervené teplomery je umiestnené aj čierne teleso Fluke 4180.

Tab. 3 Meranie teploty infračerveným teplomerom pri teplote 30 °C

Číslo merania	Kontaktné meranie terča pomocou Pt100 [°C]	Korigovaná hodnota podľa kalibračného listu Fluke 4180 [°C]	Nameraná hodnota IR teplomerom pri $\epsilon = 0,95$ [°C]	Nameraná hodnota IR teplomerom pri $\epsilon = 1$ [°C]
1.	29,74	29,7	29,9	29,5
2.	29,74	29,7	29,9	29,4
3.	29,74	29,7	29,8	29,4
4.	29,74	29,7	29,8	29,6
5.	29,74	29,7	29,9	29,5
6.	29,74	29,7	29,9	29,5
7.	29,74	29,7	29,9	29,4
8.	29,74	29,7	29,8	29,4
9.	29,74	29,7	29,8	29,5
10.	29,74	29,7	29,9	29,5
Priemer	29,74	29,7	29,86	29,47

Z uvedenej tabuľky vyplýva že ak použijeme nastavenie infračerveného teplomera s emisivitou na 0,95 a meriame teplotu na skalibrovanom čiernom telese Fluke 4180 pri teplote prostredia $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ a použijeme korigovanú hodnotu čierneho telesa z kalibrácie, kde nám vychádza priemerná hodnota teploty počas merania $29,7\text{ °C}$ ktorú porovnáme s nameranou hodnotou infračerveného telesa, na ktorom bola priemerná hodnota meraní $29,86\text{ °C}$, tak dostaneme chybu infračerveného teplomera $0,16\text{ °C}$, prípadne porovnáme nameranú teplotu infračerveného teplomera s teplotou meranou kontaktné na čiernom telese, tak dostaneme chybu infračerveného teplomera $0,12\text{ °C}$, neistotu merania momentálne zanedbáme.

Ak však budeme merať infračerveným teplomerom s nastavenou emisivitou na 1 a budeme korigovať hodnotu podľa rovníc spomínaných vyššie pre kontaktné meranie teploty čierneho telesa, kde dostaneme priemernú teplotu telesa $29,37\text{ °C}$, zistíme že chyba infračerveného teplomera bude pri meraní kontaktným teplomerom a nastaveným infračerveným teplomerom na emisivitu 1 hodnota len $0,1\text{ °C}$.

Keby nebolo čierne teleso kalibrované a nebola by vykonaná korekcia hodnoty čierneho telesa, bola by v tom prípade teplota na čiernom telese 30 °C a v tomto prípade by bola chyba infračerveného teplomera $-0,14\text{ °C}$, čo je rozdiel $0,3\text{ °C}$ oproti korigovaným hodnotám, či už pomocou nameraných chýb z kalibrácie alebo „korekciou na čierne teleso“ pomocou rovníc, uvedených v tomto článku.

Tab. 4 Meranie teploty infračerveným teplomerom pri teplote 120 °C

Číslo merania	Kontaktné meranie terča pomocou Pt100 [$^{\circ}\text{C}$]	Korigovaná hodnota podľa kalibračného listu Fluke 4180 [$^{\circ}\text{C}$]	Nameraná hodnota IR teplomerom pri $\varepsilon = 0,95$ [$^{\circ}\text{C}$]	Nameraná hodnota IR teplomerom pri $\varepsilon = 1$ [$^{\circ}\text{C}$]
1.	119,07	119,4	119,3	115,6
2.	119,07	119,4	119,3	115,6
3.	119,08	119,4	119,3	115,7
4.	119,07	119,4	119,3	115,7
5.	119,07	119,4	119,3	115,6
6.	119,07	119,4	119,3	115,6
7.	119,08	119,4	119,3	115,7
8.	119,08	119,4	119,3	115,6
9.	119,08	119,4	119,3	115,6
10.	119,07	119,4	119,3	115,6
Priemer	119,074	119,4	119,3	115,63

Znova je možné vidieť v Tab. 3 že pri nastavenej emisivite infračerveného teplomera na 0,95 je chyba merania voči korigovanej hodnote čierneho telesa $-0,1\text{ °C}$ ale voči meranej kontaktnej teplote bez zavedení korekcie je chyba $0,23\text{ °C}$, čo je rozdiel v meraní teploty $0,33\text{ °C}$. Pri meraní teploty 120 °C je dovolená chyba Fluke 66 len $1,2\text{ °C}$.

Ak však zavedieme korekcie na čierne teleso, tak dostaneme hodnotu teploty čierneho telesa $115,39\text{ °C}$ z čoho vyplýva že meraná chyba infračerveného teplomera pri nastavení emisivity na hodnotu 1 je $0,24\text{ °C}$.

V druhom prípade, ak by sme neuvažovali s korekciou z kalibračného certifikátu, teda s chybou nameranou pri kalibrácii, dostali by sme chybu merania infračerveného teplomera $-0,7\text{ °C}$, čo predstavuje rozdiel $0,6\text{ °C}$ voči korigovaným hodnotám čierneho telesa z kalibrácie.

S týchto porovnaní je možné vidieť, že buď je potrebné čierne telesá dávať pravidelne kalibrovať do akreditovaných laboratórií, tak aby bol zabezpečený nepretržitý reťazec nadväzností na národné prípadne medzinárodné etalóny, alebo je potrebné mať nadviazaný na národné alebo medzinárodné etalóny presný referenčný teplomer Pt100, ktorým je následne možné merať kontaktnú teplotu čierneho telesa (terča) a s prípadným použitím korekcií na čierne teleso vyhodnotiť meranie infračerveného teplomera.

8 Záver

Keďže „nízkoteplotné“ infračervené teplomery sú navrhnuté tak, aby pri meraní teploty automaticky prekonávali problém odrazeného žiarenia, kalibrácia takýchto zariadení nie je jednoduchá úloha. Postupy kalibrácie IR teplomerov musia byť starostlivo navrhnuté tak, aby zohľadňovali nastavenie emisivity prístroja, teplotu jeho detektora a teplotu okolia, ako aj vlastnosti zdroja kalibrácie čierneho telesa a referenčného teplomera.

Metódy uvedené v tomto článku umožňujú akreditovanému kalibračnému laboratóriu vypočítať očakávaný údaj pre ideálne zariadenie alebo korekciu na údaj referenčného teplomera („korekcia na čierne teleso“), na základe ktorého by sa mal porovnať údaj na kalibrovanom zariadení, čo je dôležité pre presné a správne meranie.

Z príkladu merania vyplýva že neistota emisivity a jej zlý odhad predstavuje najväčší zdroj neistoty merania, preto je dôležité správne určiť a zmerať emisivitu čierneho telesa, teda kalibrátora s plochou doskou, nakoľko jeho používaním a nesprávnou starostlivosťou sa môže mierne emisivita povrchu zmeniť čo spôsobí v ďalších kalibráciách problém, kalibračné laboratórium bude vo svojich certifikátoch uvádzať nesprávne hodnoty, práve preto kladieme veľký význam „korekcie na čierne teleso“ tak ako aj korekcie z nadväznosti a teda z akreditovaného kalibračného listu.

9 PodĎakovanie

Túto prácu podporila Slovenská grantová agentúra – projekt KEGA 011TnUAD-4/2024.

Referencie

- [1] G. Machin, M. Broussely a Simpson, „9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography,“ rev. Calibration and validation of thermal imagers, Krakow - Poland, 2008.
- [2] R. Simpson, G. Machin, H. McEvoy a R. Rusby, „Traceability and calibration in temperature measurement: a clinical necessity,“ Journal of Medical Engineering & Technology, pp. 212-217, August 2006.
- [3] V. Vavilov a D. Burleigh, „Basics of Thermal Radiation,“ rev. Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing, Online, Springer Link, 2020, pp. 301-329.
- [4] T. H. Preston, „The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90),“ Metrologia, zv. 27, %1. vyd.1, 1990.
- [5] L. Muzika, J. Tesař, M. Švantner, J. Skála a P. Honnerová, „Comparison of Methods for Emissivity Influence Suppression,“ Buildings, zv. 13, %1. vyd.1, 2023.
- [6] FLUKE Process Instruments, „The Principles of Noncontact Temperature Measurement,“ FLUKE Process Instruments, 2018.
- [7] J. d. L. Veguillas, „A Simple Geometrical Model for Calculation of the Effective Emissivity in Blackbody Cylindrical Cavities,“ International Journal of Thermophysics, pp. 267 - 282, 15 October 2014.

Mikroskopická analýza štruktúry a opotrebenia kovových materiálov pomocou SEM

Luboš Marček (0009-0005-3699-0100)¹, Ján Vavro, jr. (0009-0009-6787-9041)¹, Jan Vavro (0009-0001-3704-4934)¹

¹Faculty of Industrial Technologies, Alexander Dubček University of Trenčín. Ivana Krasku 491/30, 020 01, Púchov. Slovak Republic. E-mail: lubos.marcek@tnuni.sk, jan.vavro.jr@tnuni.sk, jan.vavro@tnuni.sk

The introduced work deals with the microscopic analysis of metallographically prepared selected metal materials structures, using a scanning electron microscope (SEM). Prepared samples of seamless steel pipes were subjected to a thorough microscopic examination from the outer surface to the inner regions in order to interpret the specific structure, including the change of the inner surfaces due to wear. The experiment showed that the microstructure and character of the surfaces play a crucial role in the behavior of metallic materials under real conditions. Four types of pipes were monitored according to their use. The unused steel pipe (designated as sample No. 1) exhibited a rough outer surface with identified inclusions, while the used pipe (designated as sample No. 2) showed marks of intergranular corrosion and significant wear after long-term use. The older pipe (designated as sample No. 3) showed a decarburized area and inclusions containing sulfides and aluminum. The steel pipe with corrosion layers (designated as sample No. 4) exhibited a continuous corrosion layer with cavitation and cracks. The results of this study offer a comprehensive view relating to the influence of the nature of the microstructure and wear on the water flow (performance) of metal pipes, with an emphasis on the identification of possible risks associated with geometry change, corrosion and wear. The recommendations create a basis for predicting the degradation as well as appropriate maintenance to ensure their long and reliable service life under real-world conditions of use.

Key words: Analysis, SEM, Structure, Material wear, Pipes

Úvod

V dnešnej dobe zohrávajú kovové materiály kľúčovú úlohu v širokej škále priemyselných aplikácií a stavebníctve. Ich materiálové vlastnosti, ako pevnosť, odolnosť a tepelná vodivosť, ich robia nezasupiteľnými vo výrobe rôznych komponentov a technických objektoch (TO). V tomto kontexte je dôležité hlbšie porozumieť kovovým materiálom tak, aby sa mohol efektívne využívať ich potenciál ako predchádzať nežiaducim javom. Vonkajšie prostredie môže v materiáloch spôsobiť chemické, mechanické, alebo fyzikálne zmeny, ktoré sa stávajú iniciátormi budúcich degradácií.

Vzhľadom k tomu, že sa táto práca venuje kovovým rúram bude dôležité venovať pozornosť ich mikroštruktúre. Zmeny na vnútorných povrchoch rúr a ich opotrebenie majú zásadný vplyv na ich funkčnosť a životnosť. Charakter mikroštruktúry materiálov ovplyvňuje celkové vlastnosti a odolnosť voči vonkajším vplyvom. Opotrebenie superponované koróziou môžu spôsobovať medzný stav a degradáciu materiálu, čo sa zobrazí na bezpečnosti, spoľahlivosti a efektívnosti v konkrétnych aplikáciách. Riešenie tejto problematiky je nevyhnutné pre inžinierov, konštruktérov a vedcov pri vývoji a výrobe nových produktov.

Cieľom predloženej štúdie je detailné analytické skúmanie kovových materiálov používaných na výrobu rúr, so zameraním na ich mikroštruktúru. Vnútorné povrchy nie len rúr, ale aj iných dutých telies v interakcii s tečúcim vodným médium, sú vystavené korózii a ďalšiemu opotrebeniu. Konkrétne je táto práca venovaná mikroskopickému skúmaniu, pomocou elektrónového mikroskopu (SEM), vybraných a pripravených vzoriek z ocelových rúrok. Cieľom skúmania bola identifikácia vybraných mikroštruktúr a ich čistota (inklúzie). Ďalej štúdiu nových vrstiev, napríklad z oxidovaných, korózných oblastí z povrchu materiálov. V ďalšom bola venovaná pozornosť dôležitým aspektom, ako je vplyv korózie na následné opotrebenie, iniciácia trhlín a zmena fáz v mikroštruktúre materiálu, ktorá môže znižovať celkovú životnosť kovových komponentov. Hlavné oblasti je možné vyjadriť v následných bodoch:

- Mikroštruktúra vybraných materiálov a skúmanie vnútorných povrchov kovových rúr,
- Vplyv korózie na opotrebenie a zmenu mechanických vlastností materiálu,
- Elektrónová mikroskopická analýza (SEM) metalograficky pripravených vzoriek materiálov,
- Identifikácia inklúzií a ich hodnotenie v danej mikroštruktúre materiálu.

1 Kovové materiály

Kovové materiály sú základnými stavebnými blokmi mnohých hydraulických a priemyselných aplikácií. Sú charakteristické svojimi materiálovými vlastnosťami, ku ktorým patria pevnosť, húževnatosť, tvárnosť, vodivosť tepla a elektrickej energie a iné. Tieto materiály sú často vybrané pre svoju schopnosť odolávať mechanickému zaťaženiu a zároveň poskytovať spoľahlivosť a dlhú životnosť komponentov [1].

1.1 Štruktúra kovových materiálov

Feriticko-perlitické fázy v štruktúre ocelí, predstavujú jednu z najbežnejších mikroštruktúr v konštrukcii a TO. Ocele s touto štruktúrou sa využívajú aj pre výrobu bezšvíkových rúr určených na rozvody vykurovania. Feritické a perlitické zrná

môžu byť rôznej veľkosti s rôznym pomerom týchto fáz. Tvoria komplexnú mikroštruktúru, kde podľa obsahu feritu sa materiál javí ako tvrdší, alebo mäkkší, teda viacej, alebo menej odolný voči opotrebeniu. Okrem feriticko-perlitickej mikroštruktúry existuje mnoho ďalších aj nežiadúcich fáz ako sú napríklad karbidy, sulfidy, alebo oxidy. Tieto fázy zhoršujú materiálové vlastnosti ocelí. Z tohto dôvodu je dôležitá čistota kovov, ktorá sa kontroluje ako prvá pre vylúčenie negatívnych vplyvov na vznik budúcich degračných procesov v prevádzke TO [2].

- Inklúzie podľa svojho charakteru predstavujú cudzie častice v kovových materiáloch, ktoré môžu ovplyvniť nielen mechanické, ale aj korózne vlastnosti. Analýza a identifikácia inklúzií je kľúčová pre predikciu porušenia ocelí, v rôznych TO, prevádzkovaných v reálnych podmienkach,
- Rozloženie a veľkosť zŕn v mikroštruktúre materiálu má priamy vplyv na jeho mechanické vlastnosti. Napríklad, keď vnútorné povrchy kúrenárskych rúr obsahujú nerovnorodosť vo veľkosti feriticko-perlitických zŕn, zobrazí sa to v menšej odolnosti voči zaťaženiu a opotrebeniu materiálu [2].

1.2 Vlastnosti kovových materiálov

Vlastnosti kovových materiálov sú rozhodujúce pre ich použitie v konkrétnych aplikáciách na hydraulické prvky. Je treba vybrať podstatné vlastnosti, ktoré ovplyvňujú funkciu TO, podľa ich použitia. Či sa bude jednať o:

- mechanické vlastnosti – pevnosť, húževnatosť, ťažnosť, tvrdosť,
- fyzikálne vlastnosti – tepelná vodivosť, elektrická vodivosť, odolnosť voči zmenám teplôt, tepelná stálosť,
- odolnosť voči chemickým vplyvom, korózii, kavitácii,
- technologické vlastnosti, ako sú zlievateľnosť, tvárnosť a zvárateľnosť [1], [2].

Z požadovaných vlastností sa vychádza pri výbere a navrhovaní kovových materiálov pre hydraulické prvky (napr. rúry) pracujúce v rôznych prostrediach.

2 Oceľové rúry pre vodné médium a ich vnútorné povrchy

Oceľ ako materiál patrí medzi najosvedčenejší materiál pre montáž a výrobu potrubia klasického teplovodného vykurovania. Disponuje potrebnými materiálovými vlastnosťami, ktoré zabezpečujú dobrú odolnosť voči prevádzkovým tlakom. Potrubia z ocelí sú dostatočne pevné a odolné, zabraňujú tým priepustnosti média a zároveň umožňujú odolávať dilatácny zmenám, aj výchyľkám zo stanovenej geometrie. Potenciálna pevnosť ocele a jej ťažnosť vychádza z hmotnostného percenta uhlíka. Čím je vyššie percento uhlíka, tým je oceľ pevnejšia a tvrdšia. No na druhej strane je menej tvárna. Čo sa týka materiálu na rúry vykurovacieho systému, na výrobu rúr sa používa nízkouhlíková oceľ, pretože oceľ s vysokým obsahom uhlíka má zníženú teplotu topenia. V rozmedzí noriem pre definovanie uhlíkovej ocele, sa môžu využiť aj ďalšie prvky, napr.: chróm, volfrám, mangán, kobalt, molybdén, ako prídavné, alebo legujúce prvky, ktoré môžu zlepšiť materiálové vlastnosti. Pre montáž rozvodov teplosného média pri teplovodnom vykurovaní sa používali a dodnes používajú materiály označené ako: oceľové čierne rúry, uhlíková oceľ s vonkajším pozinkovaním a meď [2], [3].

Vnútorné povrchy oceľových rúr, ktoré sú v interakcii s vodným médium, predstavujú kritický aspekt pre ich ďalšiu funkčnosť a životnosť. Tieto povrchy sú v priamom kontakte s vodou rozdielnej čistoty a teploty, ktorá môže ovplyvniť povrch materiálu zvnútra rúr. Ich dôležitosť spočíva v:

- integrite materiálu – vnútorné povrchy rúr, zabezpečujú mechanickú pevnosť a stabilitu kovových hydraulických komponentov,
- vplyve na materiálové vlastnosti – charakter mikroštruktúry a výskyt nežiadúcich fáz (inklúzie) ovplyvňujú odolnosť voči zaťaženiu a degradácii,
- koróznej zmene materiálov – vnútorné aj vonkajšie povrchy sú náchylné na koróziu, čo môže viesť k degradácii materiálu a zníženiu celkovej životnosti [2], [3].

Oceľové rúry využívané pre kvapalné médium sú vystavené rôznemu typu opotrebenia a teplotným zmenám. Predikcia budúcich degradácií bude vychádzať z identifikácie:

- korózných vrstiev – ak sú korózne oblasti na vnútorných povrchoch rúr kritické, môžu viesť k degradácii základného materiálu a zníženiu životnosti. Identifikácia týchto vrstiev je nevyhnutná pre predchádzanie šírenia korózie, a iniciácii trhlín, ktoré sa šíria do vnútra steny rúry,
- kavitácie a jej dopadoch na materiál – kavitáciou sa vytrhávajú mikroskopické objemy materiálu v dôsledku zmeny tlakov v mikrolokaliách vodného média. Prítomna korózia s kavitáciou, môže značne oslabiť steny rúr a tým zmeniť ich geometriu. Tento jav môže mať vážne následky na zmenu mechanických vlastností materiálu, čo môže viesť až k havárii komponentov [3], [4].

Výskumom a analýzou týchto procesov prebiehajúcich na vnútorných povrchoch kovových materiálov - rúr je možné lepšie porozumenie ich reakcii na reálne prevádzkové podmienky. Pokiaľ budú zmapované všetky aspekty, ktoré môžu ovplyvniť vznik porušenia materiálov, bude možné vyvinúť opatrenia na optimalizáciu ich výkonu a životnosti.

3 Opotrebenie kovových rúr

Opotrebenie kovových materiálov môže nastať z rôzneho pôsobenia okolia, ktoré je závislé od konkrétnej aplikácie a kvapalného prostredia. Hlavné mechanizmy opotrebenia rúr na vodné médium sú typické:

- abráziou – opotrebenie povrchu v dôsledku trenia s inými materiálmi, alebo časticami vo vnútornom (kvapalnom) prostredí,
- adhézne opotrebenie – trenie medzi povrchmi kvapalina verzus kov môže spôsobiť zmenu profilu (zmenšenie prietokových priemerov) a geometrii povrchu,
- korózne opotrebenie – zmena povrchovej mikroštruktúry na krehké korózne produkty (oxidov), ktoré sa uvoľňujú a odlupujú do kvapalného média, čím sa stávajú abrazívnymi časticami,
- únavové opotrebenie – postupné oslabovanie materiálu v dôsledku opakovaného zaťaženia kvapalinou a zmenami teploty a tlaku,
- kavitačné opotrebenie, ktoré vzniká zmenou lokálnych tlakov v rôznych mikro-objemoch kvapaliny, čím dochádza k implózií bublín, ktoré svojim dynamickým nárazom na materiál ho z povrchu vytrhnú a tým sa stáva abrazívnou časticou [2], [3], [5].

Vplyv korózie na opotrebenie

Všetky zámerne vyrobené materiály sa pozvoľna, alebo rýchlejšie rozrušujú v styku s vonkajším prostredím a práve tento dej fyzikálno-chemickej deštrukcie materiálov vplyvom prostredia, je podstatou i definíciou korózie [6], [7].

Potrubia obecné sú veľmi kritickou časťou každej priemyselnej aplikácie, aj v stavebníctve, či už sú to rozvody požiarnej a pitnej vody, technickej vody, alebo vykurovania. Pri návrhu potrubných systémov je nutné dbať na zvýšené požiadavky na bezpečnosť a voľbu vhodného materiálu. Materiál potrubných systémov by mal spĺňať radu požiadaviek, či už pevnostných, technologických, alebo odolnosť voči korózií v danom prostredí. Náchylnosť potrubí na korózne napadnutie závisí od mnohých ukazovateľov a tiež na type konštrukcie potrubného systému [6], [7].

Degradačný korózný proces v kvapalnom médiu je možné označiť ako dej elektrochemický, ktorý je superponovaný ďalšími činiteľmi, ako sú napríklad nečistoty, mikroorganizmy, alebo chemické zlúčeniny (solí, hydroxidy, kyseliny, organických látky) apod. Koróziu vo vode ovplyvňuje rozpustený kyslík, pH a teplota vody [8], [9].

Pokiaľ dochádza ku korózií v rúrach, dochádza ku vzniku korózných splodín, ktoré sa stávajú abrazívnymi časticami, ktoré celý korózný proces zrýchlia. Korózne produkty môžu zničiť ochranné vrstvy a zvýšiť trenie, čím zrýchlia celý proces opotrebenia. Kombinácia korózie a opotrebenia môže viesť k vytváraniu trhlín, odtrhávaniu materiálu a tým k celkovému zhoršeniu materiálových vlastností [10].

Interakcia kovových materiálov s vonkajším prostredím je kritickým faktorom ovplyvňujúcim ich životnosť. Faktory, ako teplota, vlhkosť, chemické zloženie prostredia a tlak, môžu ovplyvňovať rýchlosť korózie a opotrebenia. Dlhodobý vplyv týchto faktorov môže viesť k postupnému oslabovaniu materiálových vlastností, ktoré ovplyvňujú jeho schopnosť odolávať zaťaženiu a udržiavať integritu [8], [10].

4 Skúšky materiálov

Mikroskopické hodnotenie

Používa pri kontrole stavu štruktúry materiálov. Realizuje sa pomocou svetelných a elektrónových mikroskopov. Pre mikroskopické kontroly výroby sa vzorka odoberá z miest, kde predpokladáme najväčšiu a najmenšiu štruktúrnú heterogenitu. Pre zisťovanie príčin lomov či porúch súčastí sa snažíme odobrať vzorku obsahujúcu defektné miesto a pre porovnanie ďalšiu vzorku z nepoškodennej oblasti.

V pozdĺžnych rezoch pozorujeme:

- morfológiu a usporiadanie nekovových inklúzií,
- stupeň plastickej deformácie jednotlivých štruktúrnych zložiek kovovej základnej hmoty,
- výskyt riadkovitosti,
- vplyv tepelného spracovania na mikroštruktúru.

Priečne rezy umožňujú pozorovať:

- morfológiu a usporiadanie nekovových inklúzií,
- stupeň plastickej deformácie jednotlivých štruktúrnych zložiek kovovej základnej hmoty,
- výskyt riadkovitosti,
- vplyv tepelného spracovania na mikroštruktúru.

5 Experiment - mikroskopická analýza

Mikroskopická analýza bola vykonaná na štyroch materiáloch vyrezaných z rôznych typov rúr. Z rúry, ktorá ešte nebola použitá a ďalších rúr, ktoré boli prevádzkované tak, že nimi určitý čas pretekalo vodné médium. Jednotlivé časti materiálov boli vyrezané a metalograficky pripravené tak, aby bolo možné študovať povrchy na vnútornej a vonkajšej strane rúrky (označené ako vzorka 1, 2, 3, a 4). Všetky vzorky Obr. 1 a 2 boli pripravené na mikroskopickú analýzu v priečných rezoch. Čistenie vzoriek prebehlo v izopropylalkohole v ultrazvukovej čističke po dobu 20 minút [3].



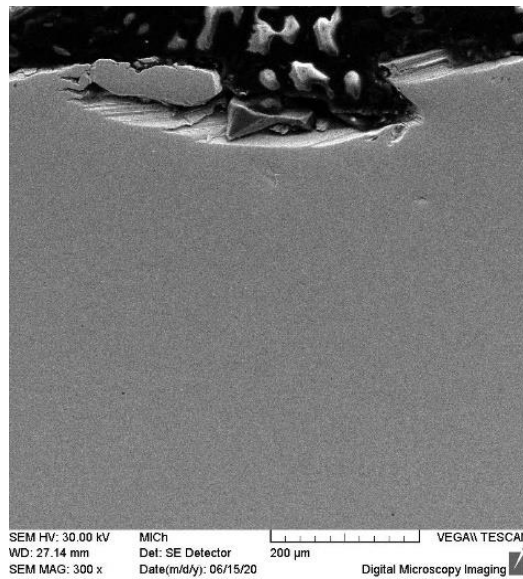
Obr. 1 Vyrezané vzorky z vybraných kovových rúr [3]



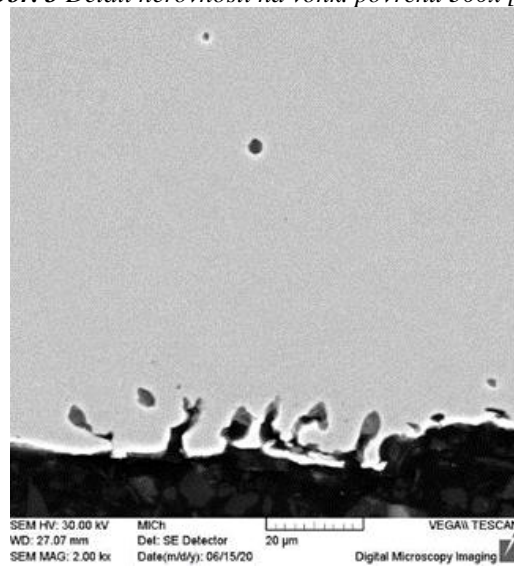
Obr. 2 Vyrezané vzorky z vybraných kovových rúr [3]

Vyčistené vzorky boli skúmané na elektrónovom mikroskope – VEGA 2 TESCAN. Pokiaľ bola hodnotená mikroštruktúra, materiál z rúrok bol leptaný. Každá vzorka bola detailne skúmaná od vonkajšieho povrchu k vnútornému, kde bola venovaná pozornosť hlavne: charakteru mikroštruktúry materiálu, jeho čistote a chemickému zloženiu inklúzií, koróznym produktom, prípadne vnútorným povrchovým nánosom.

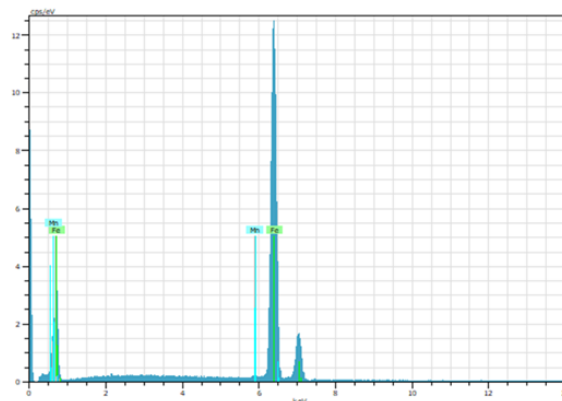
Prvá analýza bola spracovaná na vzorke č. 1 (neprevádzkovaná oceľová bezšvíková rúra DN 15) z materiálu 11 353, podľa STN 42 0250 (pre závitovanie a zváranie). Rúrka nebola ošetrovaná žiadnym náterom. Na hodnotenom výreze z rúrky pri veľkom zväčšení, sú viditeľné charakteristické nerovnosti materiálu, vyplnené oxidmi, ktoré tvoria povrch rúrky Obr. 3. Predchádzajúca vizuálna kontrola vonkajšieho povrchu ukazovala na veľkú drsnosť a jemné nerovnosti. Detailným skúmaním povrchu pri zv. 2000x Obr. 4., sa zvýraznila jeho porušená celistvosť, ktorá mohla byť spôsobená technológiou tvárnenia. Vnútorňý povrch nevykazoval výskyt korózných vrstiev, alebo nánosov, nakoľko sa jednalo o novú rúrku. Mikroštruktúra bola identifikovaná ako feriticko-perlitická. Bodovou chemickou analýzou bolo kontrolované zloženie oceli v tesnej blízkosti vnútorného povrchu Obr. 5. Chemická analýza potvrdila, že sa jedná o oceľ bežnej akosti, ktorá nebola mikrolegovaná ani povrchovo upravená [3].



Obr. 3 Detail nerovnosti na vonk. povrchu 300x [3]



Obr. 4 Vnútorný povrch s inklúziou 2000x [3]

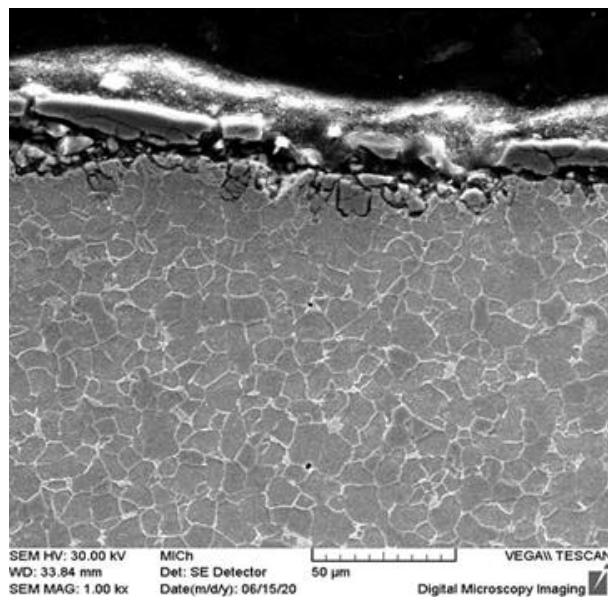


Spectrum: 2

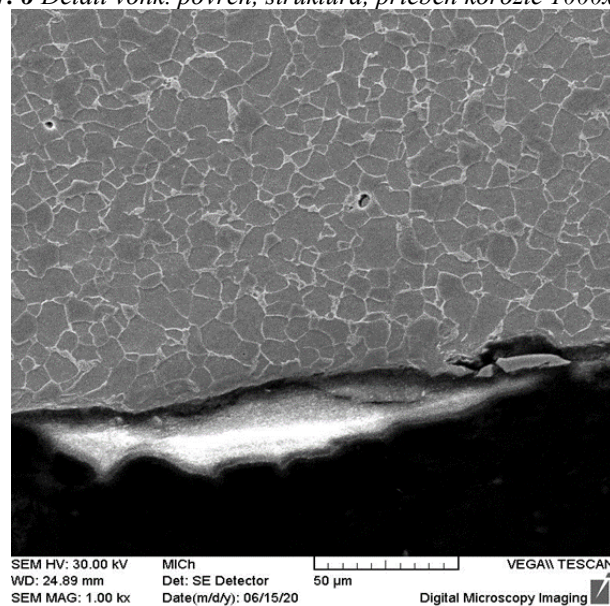
El	AN	Series	unn. [wt. %]	C norm. [wt. %]	C Atom. [at. %]	C Error (1 Sigma) [wt. %]
Mn	25	K-series	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	26	K-series	97.34	100.00	100.00	2.49
Total:			97.34	100.00	100.00	

Obr. 5 Výsledky bodovej chemickej analýzy okraj vnútorného povrchu m 2 - vzorka 1 [3]

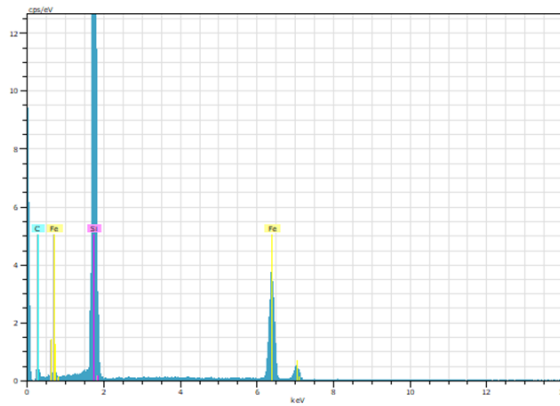
Vzorka č.2 je oceľová bezšvíková rúra DN 15 z materiálu triedy 11 353 podľa STN 42 0250, (pre závitovanie a zváranie). Rúrka bola používaná v systéme teplovodného vykurovania s teplotným spádom 70/55 °C cca 20 rokov. Mikroskopickým skúmaním bolo identifikované podkorodovanie povrchu rúry pod náterom Obr. 6. Korózia postupuje po hraniciach zŕn smerom do vnútra materiálu. Ide o interkryštalickú koróziu, ktorá sa prejavuje tým, že materiál neadekvátne narušuje. Dochádza k uvoľňovaniu zŕn z povrchu, čím sa materiál rúrky stáva citlivejší na vonkajšie prostredie. Vzhľadom k tomu, že sa jedná o feriticko-perlitickú štruktúru, bude podstatný tvar, veľkosť a rozloženie zŕn. Tesne pod vonkajším povrchom sa nachádzali zrná feritu ochudobnené o uhlík. Táto oduhličovaná podpovrchová oblasť má iné materiálové vlastnosti ako základný materiál a tým sa stáva citlivejšia na vznik korózie. Vnútorný povrch rúrky (Obr. 7) je typický tým, že sa tam vyskytujú trhlinky smerom do materiálu, odlupovanie základného materiálu a nánosy. Detail mikroštruktúry v daných oblastiach a inklúzie, sú zobrazené pri zväčšení 1000x na Obr. 7. Je nežiadúce, ak sa kúsky základného materiálu a nánosov uvoľnia a pretekajúce médium ho odplavuje. V týchto prípadoch sa opotrebenie koróziou a kavitáciou superponuje abrazívnym opotrebením, ktoré je pre tieto rúry neprípustné. Môže sa zrýchľovať degradácia rúr, ktorá sa zobrazí aj v stenčovaní hrúbok stien, (zmene geometrie), čo môže viesť až k prederaveniu materiálu a presakovaniu vodného média. Chemická analýza Obr. 8 potvrdila, že sa jedná o materiál, ktorý nebol legovaný [3].



Obr. 6 Detail vonk. povrch, štruktúra, priebeh korózie 1000x [3]



Obr. 7 Detail vnút. povrch, štruktúra, inklúzie, korózne nánosy 1000x [3]

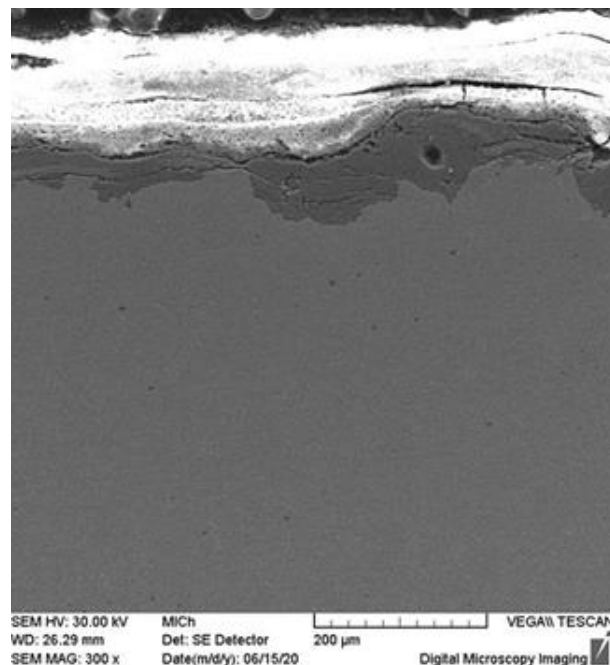


Spectrum: 1

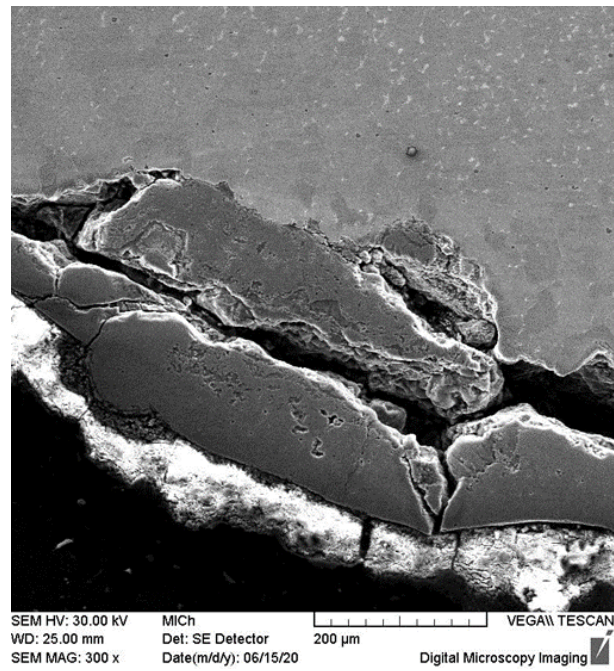
El AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C 6	K-series	34.48	27.19	50.57	6.28
Si 14	K-series	65.11	51.35	40.84	2.93
Fe 26	K-series	27.21	21.46	8.58	0.73
Total:		126.79	100.00	100.00	

Obr. 8 Výsledky bodovej chemickej analýzy inklúzie – vzorka 2 [3]

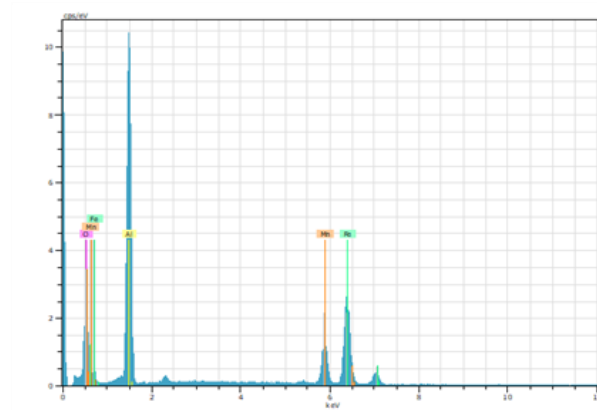
Vzorka č. 3 je metalograficky pripravená z ocelevej bezšvíkovej rúry DN 20. Táto rúra sa prevádzkovala najdlhšie v teplovodnom systéme vykurovania s teplotným spádom 70/55 °C. Jej životnosť bola deklarovaná na 48 rokov. Časť rúry bola vyrezaná zo stúpacieho potrubia v interiéri. Povrch rúry bol opatrený základným a vrchným náterom. Tieto rúry sú zo zvárateľného materiálu triedy 11 353 podľa STN 42 0250, pre závitovanie. Povrchy z vonkajšej strany Obr. 9 a vnútornej časti rúrky Obr. 10 majú pomerne veľkú nerovnosť. Je zrejmé, že vrstvy z korózných produktov sa nachádzajú na povrchu aj vo vnútri rúry. Vnútorný povrch obsahuje navyše nánosy, ktoré spolu s oxidmi vytvárajú na povrchu materiálu veľké napätové stavy, ktoré vedú ku vzniku trhlín a nespojitostí. Pokiaľ dôjde k odlúpeniu takejto vrstvy (oxidy plus nánosy) pohybom vody, dochádza v danej oblasti k abrazívnemu opotrebeniu. Táto oceľ je feriticko-perlitická s pomerne veľkým výskytom inklúzií na báze sulfidov a hlinitanov, čo preukázali výsledky z bodovej chemickej analýzy Obr. 11 a, b [3].



Obr. 9 Detail vonk. povrchu 300x [3]



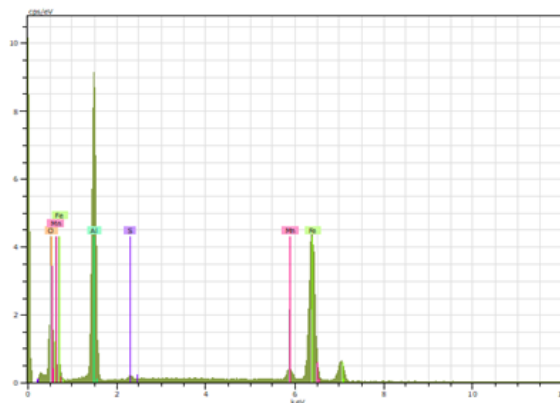
Obr. 10 Detail vnút. povrchu rúrky 300x [3]



Spectrum: 1

El	AN	Series	unn. C	norm. C	Atom. C	Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
O	8	K-series	37.99	35.11	54.03	5.15
Al	13	K-series	39.71	36.70	33.49	2.03
Mn	25	K-series	8.68	8.03	3.60	0.27
Fe	26	K-series	21.82	20.16	8.89	0.60
Total:			108.20	100.00	100.00	

Obr. 11 a Výsledky bodovej chemickej analýzy inklúzií m1 – vzorka 3 [3]



Spectrum: 2

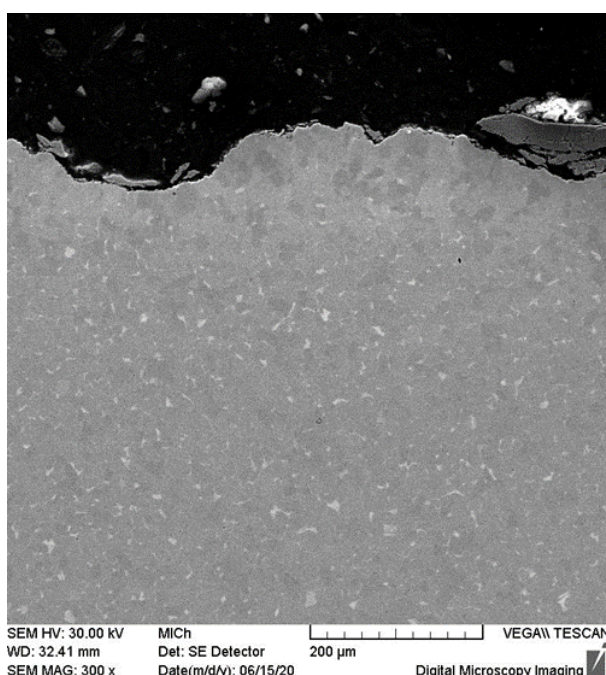
El	AN	Series	unn.	C norm.	C Atom.	C Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
O	8	K-series	32.36	31.40	50.62	4.30
Al	13	K-series	36.60	35.51	33.94	1.87
S	16	K-series	0.46	0.44	0.36	0.05
Mn	25	K-series	1.48	1.44	0.67	0.07
Fe	26	K-series	32.16	31.21	14.41	0.85

Total: 103.06 100.00 100.00

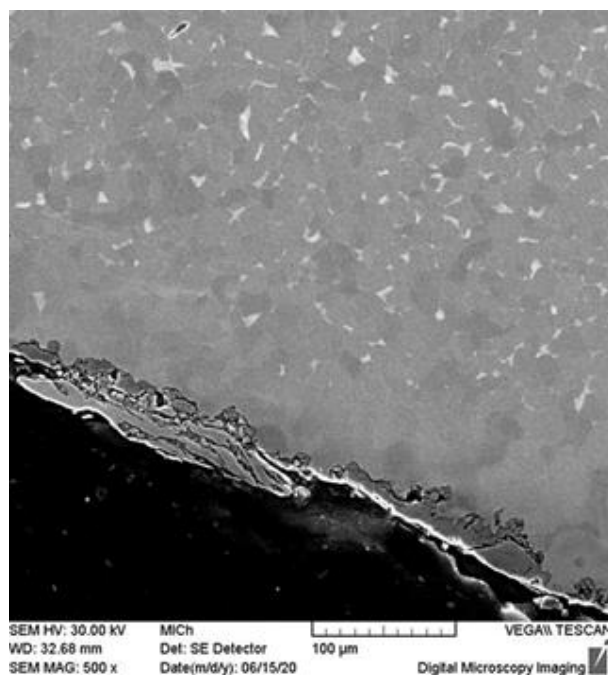
Obr. 11 b Výsledky bodovej chemickej analýzy inklúzií m2 – vzorka 3 [3]

Vzorka č. 4 je z oceleovej bezšvíkovej rúry DN 25, ktorá bola používaná 20 rokov v teplovodnom systéme vykurovania s teplotným spádom 70/55 °C. Vzorka bola vyrezaná z ležateho potrubia v teplovodnom kanáli uloženom v zemi s tepelnou izoláciou (minerálna vata so sklenenými vláknami), obalená v hliníkovej fólii. Deklarovaný materiál rúr je triedy 11 353 podľa STN 42 0250, pre závitovanie a zváranie. Na povrchu rúrky sú viditeľné nerovné oxidačné vrstvy, ktoré deformujú jeho geometriu. Na vonkajšom povrchu bolo viditeľné celkové zvlnenie materiálu, ktorý bol navyše aj porušený. Celý vonkajší povrch rúrky bol napadnutý rovnomernou interkryštalickou koróziou do rôznej hĺbky materiálu (Obr. 12). Zrná feritu aj perlitu sú rovnomerné s výskytom malého množstva inklúzií v mikroštruktúre.

Vnútrotný povrch rúrky má typicky výraznú koróznou vrstvou, ktorá prechádza do vnútra materiálu čím mení jeho vlastnosti. Ďalej bola pozorovaná oduhliččená vrstva základného materiálu pod koróznym nánosom Obr. 13 [3].



Obr. 12 Detail vonk. povrchu 300x [3]



Obr. 13 Detail vnút. povrchu 500x [3]

6 Závěrečné zhodnotenie a odporúčanie

Mikroskopická analýza pomocou SEM poskytla dôležité informácie o štruktúre, čistote a opotrebení kovových materiálov, z ktorých boli vyrobené skúmané rúry na vodné médium. Tieto informácie sú kľúčové pre ich hodnotenie a predikciu degradácie, ktorá skracuje životnosť rúr. Zhodnotenie vzoriek z ocelových bezšvíkových rúr poukazuje na to, že sa vždy jednalo o povrchové skorodovanie a na vnútorných povrchoch prevádzkovaných rúr, umocnené nánosmi z vodného média.

Povrch (vonkajší aj vnútorný) vzorky č. 1 mal pomerne veľkú drsnosť, ktorá charakterizovala výrobný proces neprevádzkované rúry. Vzorka č. 2 vykazovala známky interkryštalickej korózie, trhliny a odlupovania materiálu z vnútorného povrchu, už po 20 rokoch používania v systéme teplovodného vykurovania. Najstaršie rúry (vzorka č. 3 a č. 4), boli typické tým, že sa u nich na vnútornej strane, vyskytovala oduhlíčená podpovrchová oblasť a inklúzie na báze sulfidov a hlinitanov. Získané poznatky z výskumu materiálov rúr na vodné médium, poskytujú cenné informácie potrebné pre návrh, výrobu a údržbu kovových komponentov v systéme teplovodného vykurovania. Na základe získaných poznatkov odporúčame:

- pravidelnú inšpekciu a údržbu kovových hydraulických prvkov, najmä tých, ktoré sú v interakcii s vodným médium;
- zhodnotenie v súčasnosti používané materiály pre výrobu vodných rúr s ohľadom na ich odolnosť voči korózii a opotrebeniu v závislosti od konkrétnej aplikácie;
- implementáciu vhodných náterov a ochranných izolácií na zníženie rizika vzniku atmosférickej korózie a mechanického opotrebenia;
- monitorovanie vývoja opotrebenia v čase;
- pravidelnú kontrolu vodného média, hodnoty tepelnej vodivosti, výskyt chemických prvkov a pH vody.

Tieto odporúčania pomôžu predchádzať nežiaducim problémom spojeným s degradáciou kovových materiálov, nekvalitného fungovania systému vykurovania a zabezpečia ich dlhú a spoľahlivú životnosť v reálnych prevádzkových podmienkach teplovodného vykurovania.

Zo získaných výsledkov ďalej vyplýva, že ocelové bezšvíkové rúry môžu dosiahnuť predpísanú životnosť 50 rokov. Významným faktorom ovplyvňujúcim ich životnosť je pretekajúce médium a jeho teplota, tvrdosť, vodivosť a pH. Pozornosť treba tiež venovať prestupom rúr cez stropy, steny stavebných konštrukcií a kanále, či montážne šachty, kde veľmi často dochádza k atmosférickej a bakteriálnej korózii. Na základe výsledkov mikroskopického skúmania môžeme konštatovať, že je možné predikovať životnosť rúr (potrubia), vzhľadom na elimináciu výrobných a montážnych chýb.

Záverom si môžeme dovoliť vysloviť presvedčenie, že akákoľvek nekvalitná technológia v priebehu výroby konkrétneho materiálu a rúr sa prejaví v navýšení výdavkov za opravy, konečným užívateľom – zákaznikom.

Pod'akovanie

Túto prácu podporila Slovenská grantová agentúra – projekt KEGA 011TnUAD-4/2024.

Literatúra

- [1] MORAVČÍK, R., HAZLINGER, M.: Náuka o materiáloch II. STU Bratislava, 2009, 1. vyd., 243s, ISBN 978-80-8096-081-0.
- [2] PALČEK, P., HADZIMA, B., CHALUPOVÁ, M.: Materiálové charakteristiky. Žilinská univerzita, Žilina, 2004.
- [3] MARČEK, E. Komparácia využitia materiálov pri teplovodnom vedení média pre vykurovacie telesá. Trenčín: FPT KMI Púchov, 2020. Diplomová práca.
- [4] NOVÁK, P. Základní principy koroze kovů v elektrolytech, In: Korózia v energetike. 2006, Košice. s.1.
- [5] STN EN 14 868 Ochrana kovových materiálov proti korózii. Návod na hodnotenie pravdepodobnosti vzniku korózie v uzavretých systémoch s recirkuláciou vody.
- [6] KREIBICH, V. Teorie a technologie povrchových úprav, Praha: ČVUT v Praze, 1996.
- [7] BARTONÍČEK, R. Koroze a protikoroziní ochrana kovů. Praha: Academia, 1966.
- [8] HADZIMA, B. LIPTÁKOVÁ, T.: Základy elektrochemickej korózie kovov. 1.vyd. Žilina: Edis, 2008. 112 s. ISBN 978-80-8070- 876-4.
- [9] Smernica pre vykurovaciu vodu VDI 2035 – 1 Vlastnosti teplotnosných kvapalín.
- [10] ANISIMOV, E., PEŠLOVA, F., HAJDUCHOVÁ, E. Korózní napadnutí potrubí pro rozvod topného média. Chem. Listy 105, s 616-s 617, 2011.
- [11] KARLÍK, M.: Úvod do transmisní elektronové mikroskopie. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. 321 s. ISBN 978-800-1047-293.

The influence of temperature on the production of antioxidant tin-phosphorus alloy

Jana Körmendy (0009-0005-4560-884X)¹, Ján Vavro jr. (0009-0009-6787-9041)¹, Ján Vavro (0009-0001-3704-4934)¹
¹ Faculty of Industrial Technologies in Púchov, Alexander Dubček University of Trenčín. I.Krasku 491/30, 020 01 Púchov, Slovakia; jana.kuricova@tnuni.sk, jan.vavro.jr@tnuni.sk, jan.vavro@tnuni.sk

The restriction of lead content in alloys for the production of the solder based on the Directive of the European Parliament and of the Council of the European Union of 08.06.2011 which is also known as RoHS (Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment), had a very positive impact on the research of lead-free solder alloys as well as on the economic impact on the production of solders. It opened the door to issues relating to the mechanical properties of lead-free solders and the microhardness of formed joints, increasing their quality and efforts to reduce production costs. Besides the production efficiency increase, without the need for manual removal of so-called slagging, the moderation of oxide formation on the melt surface standing for the increase of the yield of the total amount of solder represents one of the many factors influencing the production of lead-free alloys for tin-based soldering. This work deals with the issues of material selection for the production of lead-free solders. Temperature affects the formation of different phases when there is the change in the concentration of the elements involved because it can be negative aspect for soldering. Therefore, it is necessary to have detailed knowledge on all the process which takes place during the temperature changes.

Keywords: tin alloys, antioxidant alloy, chemical composition, Optical emission spectroscopy, Energy-dispersive X-ray spectroscopy

1 Introduction

The stability of tin-based phases above its melting point (232 °C) to atmospheric oxygen is very low and its change can be observed with the naked eye. The melt with a tin content of at least 99 % in the batch is silvery shiny at the beginning in the process and after only a few minutes, the surface turns with matte finish due to the formation of a layer of oxides on its surface. The oxide layer is mainly a problem in lead-free wave soldering, in the case where the lead-free solder alloy is applied on surface of PCB boards. The formation of oxides in this case causes a large loss of molten solder, increasing the total cost of production. Due to the fact that the density of lead-free tin-based solder in the liquid state is almost the same as oxides at the surface (density of molten tin is 6.980 kg/m³, density of SnO₂ is 7.010 kg/m³ and SnO is 6.450 kg/m³), it is very difficult to separate slag from the melt [1]. Moderation or reduction of slag formation on the surface of the tin melt is possible either by the absence of oxygen access or through the addition of phosphorus to the batch [2,3]. Red phosphorus is very reactive and ignites at a lower temperature in comparison with the melting point of tin and therefore, it is necessary to add it in the form of a pre-alloy Sn-P to the melt. The production of this pre-alloy requires compliance with the temperature and amount of phosphorus, i.e. precise steps of loading into the furnace under strict safety measures. In addition to the need to use safety features, such as a protective suit, protective shield, gloves resistant to high temperatures, it is also necessary to ensure adequate ventilation. Based on the study of specialized literature, it was found that by adding the pre-alloy Sn-P to the melt of tin alloys, the number of oxides on its surface is significantly reduced [4,5,6].

Materials and methods

The design of the material and experimental methods is based on theoretical and practical knowledge. The experimental part consisted of two parts:

- A. Preparation of samples of SnP2 alloy under laboratory conditions,
- B. Analysis of dross amount formed on the solder bath surface.

2.1 Preparation of samples of SnP2 alloy under laboratory conditions

Tin with 99.98 % purity was used to create the SnP2 alloy (content of elements in the alloy - Sn 98 %, P 2 %) in the form of cut tin wire with 5 mm diameter and stabilized P4 red phosphorus in the form of dust for synthesis. The measured weight of tin before the formation of the alloy was 490 g and the measured weight of P4 phosphorus was 10 g. To create an intermediate layer between tin and phosphorus, due to their different melting point (Sn 232 °C, P4 586 °C), fine silica sand mixed with bentonite in a ratio of 1:1 was used. This technological process was chosen based on the experience of the previous experiment and the effort to create an Sn-P alloy. Without the formation of an intermediate layer separating the two components entering the melting process, phosphorus, due to its relatively low burning point (240 °C), would burn out before a chemical bond between it and tin would be formed before forming the desired Sn-P-based alloy [8]. The batch consisted of the following layers (Fig. 1) to obtain optimum results:

1. 10 g of P4 (A) red, phosphorus in form of dust, storage in vacuum desiccator
2. Interlayer – fine silica sand and bentonite in a ratio of 1:1 (B).
3. Tin, with 99.98 % purity, in the form of cut wire with 5 mm diameter (C),
4. Top layer — crushed coal (D),
5. Sibral – temperature-resistant insulation material

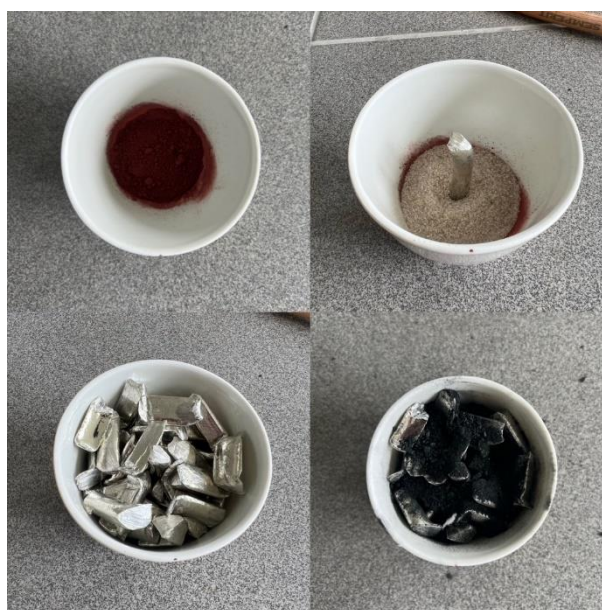


Fig. 1 Preparation of Sn-P alloy batch

In this order mentioned above, the individual parts of the batch were placed in a ceramic cup and placed in the muffle furnace. The initial temperature during the insertion of the crucible filled with all layers was 120 °C. The crucible was heated at a speed interval of 10 °C/min. The casting temperature of the samples was different: 600 °C for the first melt, 700 °C for the second, 750 °C for the third and 850 °C for the fourth melt. When the final temperature was reached, the crucible with the batch was held at this temperature for 20 minutes. The insulation material was removed, and the interlayer of fine sand and bentonite was broken with a graphite rod, and then floated to the surface of the melt and subsequently it was also removed. After that, the crucible was covered with insulating material again and placed back into the furnace for 20 minutes at the required casting temperature to allow a complete reaction between phosphorus and tin (Fig. 2). The measured temperatures and melting time of individual samples are available in Table 1, where temperature (T_A) and time (t_A) were recorded before the interlayer was taken, and temperature (T_B) and time (t_B) were recorded after the melt crucible was reinserted into the furnace.



Fig. 2 Sn-P alloy after melting process.

After the specified time, the contents of the crucible were poured into a mould and the sample was removed after the alloy had cooled. After that, all samples were visually inspected from the aspect of the impurities on their surface. The cooling of the sample was followed by its preparation for measuring the chemical composition on a digital optical emission spectrometer Q4 TASMÁN with a CCD detector (Fig. 3). This spectrometer is designed to analyse the chemical composition of metal solid samples. The spectrometer's analytical tripod consists of a pneumatic sample pressure that allows the sample to be firmly held at different heights, an analytical tripod with a top plate, and an analytical hole underneath which the electrode is placed. Argon gas passes through the analytical tripod. The sample on the spectrometer must be representative of the material to be analysed. In order for the spectrometer to measure with the highest possible accuracy and correctly, each sample must be properly prepared. The underside of the sample should be machined on both sides with a removal of material of at least 2 mm. No coolant or lubricating oils should be used for machining to avoid contamination of the sample.



Fig. 3 Digital optical emission spectrometer Q4 TASMÁN with a CCD detector

Before the actual measurement, the area of each turned sample we decided to analyse was sanded on a grinder with new, uncontaminated sandpaper with fine grain thickness. The requirements for each sample measured were as follows:

- Electrical conductivity — the sample must be electrically conductive, without impurities on the surface.
- Strength — the sample must be solid and not porous, free from bubbles, cracks, and dirt.
- Homogeneity — the sample must be homogeneous throughout its volume and there should be no segregation of individual elements. The surface of the sample must be flat, clean, dry and unoxidized and the sample must be larger than the hole above the electrode in order to cover and seal it completely.
- Cleanliness – do not place the surface of the sample with the sanded side on the table to avoid contamination of the surface to be analysed.

Before each analysis, the electrode should be cleaned with a cleaning brush. The prepared sample was then placed on a plate of an analytical tripod so that it completely covers the gap above electrode. The sample must extend 1 mm beyond the edge of the electrode gap, or ideally as much as possible in the center of the sample where it is expected to be most homogeneous.

2.2 Analysis of dross amount formed on the solder bath surface

To verify the effects of the antioxidant alloy SnP2 on reducing the amount of oxides on the melt surface in the production of tin solder, we chose the production of solder type SAC305 with chemical composition, which is shown in Table 1. The content of the elements in the table is indicated with the maximum permissible content of individual elements according to the standard for this type of alloy J-STD-006C. This type of alloy is specifically mentioned as a substitute for lead alloy Sn63Pb37 (Sn 63 %, Pb 37 %). Performance characteristics of this alloy are very desirable, e.g. this alloy shows best-in-class yield, outperforms all SnCu-based materials, has low dross generation, excellent solderability due to fast wetting speed (in back-to-back tests 0.65 seconds compared to 1.00 second for SnCu-based materials) and delivers excellent performance across wide range of flux technologies. SAC305 complies with all requirements of RoHS Directive (Article 4.1 of the European Directive 2011/65/EU). Alloy specification for maximum Lead (Pb) Content = 0.07 %. As Ch. Yuanming et al. writes in the article Microstructure evolution and growth kinetics of intermetallic compound in SAC305/Ag and SAC305/Cu solder joints during solid-state aging [7], SAC305 is a lead-free alloy that has proven to be a suitable substitute for leaded solder precisely because of its good mechanical properties and relatively low melting point (melting point is from 217 °C to 219 °C), a solder pot temperature for wave soldering application is from 255 °C to 265 °C and for selective soldering recommended solder pot temperature is from 280 °C to 320 °C. Due to these temperatures, this type of alloy is also commonly used to stabilize and reduce the copper content in wave solder bath. The temperature difference in use is also confirmed by Diepstraten, Gerjan in his book Lead-free Soldering Process Development and Reliability, chapter Wave/Selective Soldering, the solder temperatures for selective soldering are slightly higher than for wave soldering (260 °C). However, they are much lower than lead-free hand soldering temperatures for rework wire (400 °C). Typically, the solder temperature is in between 280-300 °C. The smaller nozzles need more heat to get enough energy into the assembly and have complete hole fill. Some engineers do not want to have temperatures above 300 °C because of fillet/pad lifting or flux activation loss [8]. Also, the results of M. Yang study showed that a Cu₆Sn₅ scallop type layer with round grains having a strong texture was formed at the interface of the SAC solders/Cu systems. The addition of Ag decreased the IMC/liquid SAC solder interfacial energy and improved the wettability of the solder on the Cu [9].

Tab. 1 Chemical composition in alloy SAC305 according to standard J-STD-006C

Chemical element	Content in alloy [%]	Chemical element	Content in alloy [%]
Sn	balance	As	0.03 max
Ag	3.0 ± 0.2	Ni	0.01 max
Cu	0.5 ± 0.1	Bi	0.10 max
Pb	0.07 max	Cd	0.001 max
Sb	0.10 max	Al	0.001 max
Zn	0.001 max	In	0.05 max
Fe	0.02 max	-	-

Two solder baths (A and B) with the same material content were prepared and each of 300 kg batch of SAC305 consisted of the following parts:

1. Tin (Sn), with 99.98 % purity, in the form of bars – 288.45 kg.
2. Silver (Ag), with 99.98 % purity in the form of cut wire with 5 mm diameter – 9.0 kg.
3. Copper (Cu), with 99.98 % purity in the form of thin wire with 0.44 mm* – 1.5 kg.

*This form of material was chosen for better melting of copper at lower temperature.

In one of the solder baths (B) was used deoxidation alloy SnP2 (Sn 98 %, P 2 %), in form of solid waffle shaped ingots (Fig. 4). Weighed amount that was added to the melting was 1,05 kg.



Fig. 4 SnP2 alloy in waffle shaped ingots

All the above materials were put into an electric industrial furnace with pot made of casted iron. The heat temperature was set on 300 °C. After an hour and a half, the temperature has been reduced to 255 °C degrees and tin-phosphorus deoxidation alloy was then added to the second melt (B) to bring the phosphorus level up to a range of 0.005 % - 0.007 %. Melted alloy was mixed. The first dross began to appear. Already at this stage, a difference was noticeable in the furnace with an alloy without added phosphorus and with added phosphorus. The phosphorus-free melt color on the surface showed yellow tones and was dull, while the surface color of the phosphorus-

containing melt was silver-glossy. All the dross generated during this period was carefully skimmed from the surface of the melt and weighed every hour. The total melting time was 6 hours under stable conditions at a temperature 255 °C. After 6 hours, samples were cast from the melt without the addition of phosphorus (A) and from the melt with the addition of phosphorus (B) into the brass mold for samples that you can see in the Fig. 5.



Fig. 5 Brass mold for samples of melted solder alloy SAc305

It is also important to consider the negatives of adding Phosphorus-tin alloy to a tin bath in the manufacture of solder. K. Sweatman in the study with title The effects of phosphorus in lead-free solders states about effect of adding phosphorus into to solder bath on stainless steel. As well as being a powerful antioxidant for solder phosphorus can also break down the oxide film that gives stainless steel its resistance to wetting by molten solder [10]. Once the protective oxide film had been penetrated the molten solder wets the underlying Fe-Cr-Ni alloy, which then begins to dissolve in the solder [11]. The consequence is erosion of parts exposed to the molten solder and even perforation of the walls of the solder pot resulting in leakage of molten solder, which creates serious health and safety issues as well as damaging the machine. One solution to the problem of the machine erosion caused by the phosphorus added to control drossing was to make the solder pot of cast iron, which is more resistant to dissolution or to line the pot with titanium. Pumps and nozzles were made more resistant to wetting and erosion by applying ceramic coatings or a treatment that created a surface layer of metal nitrides that are much more resistant to wetting and dissolution [12]. However, this adds substantially to the cost of soldering equipment.

Results

3.1 Preparation of samples of SnP2 alloy under laboratory conditions

The chemical composition of the four samples was measured using the Q4 TASMAN digital optical emission spectrometer. The casting temperature of the samples was different (Tab. 2). The phosphorus and tin contents for individual samples are available in Tab. 3. The dependence of the casting temperature and phosphorus content of the alloy is graphically shown in Fig. 6.

Tab. 2 Measured temperatures and time during melting of alloy Sn-P

Sample No.	Weight of tin [g]	Weight of P4 [g]	T _A [°C]	t _A [min]	T _B [°C]	t _B [min]
1	490.03	10.09	599	21	602	20
2	490.12	9.98	709	22	712	21
3	490.08	10.03	746	21	750	21
4	490.02	10.01	849	21	851	21

Tab. 3 Tin and phosphorus content of samples 1 to 4 casted at different temperatures

Sample No.	Weight of tin [g]	Weight of P4 [g]	Starting temperature [°C]	Ø Casting temperature [°C]	Weight percent of Sn [%]	Weight percent of P [%]
1	490.03	10.09	123	600.5	99.93	0.07
2	490.12	9.98	121	710.5	99.42	0.58
3	490.08	10.03	120	748	99.10	0.90
4	490.02	10.01	120	850	97.96	2.04

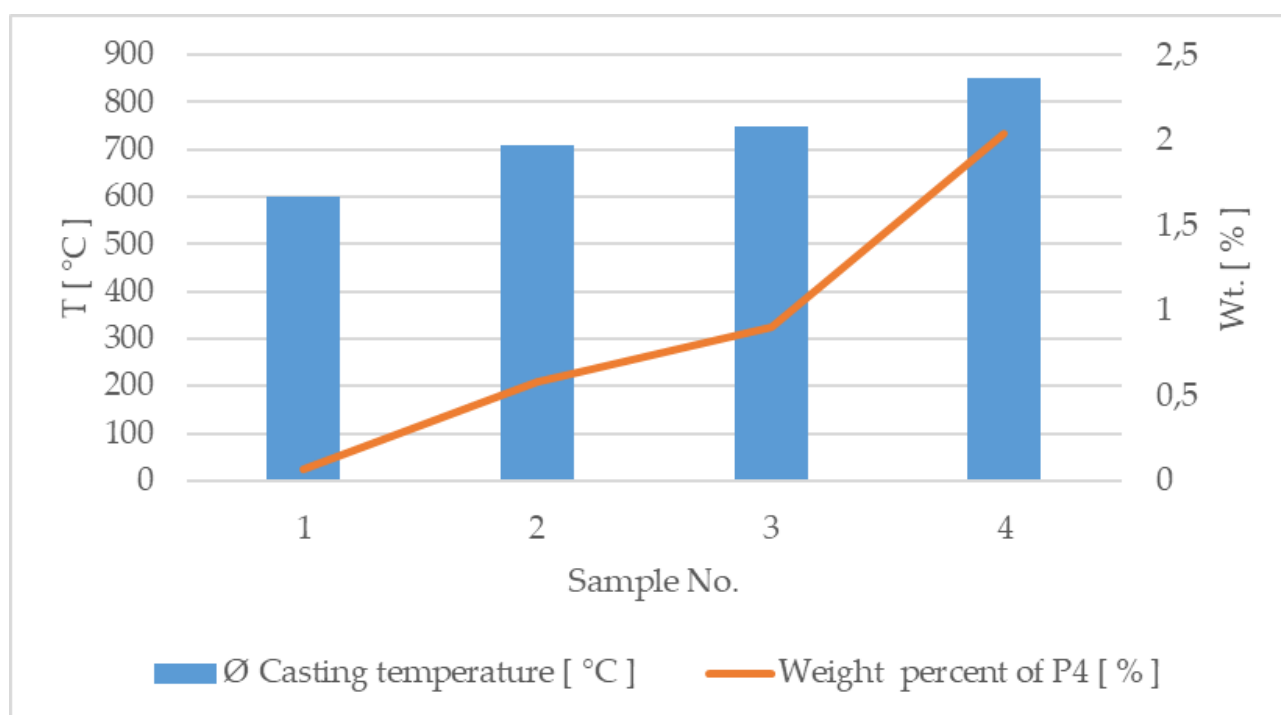


Fig. 6 The dependence of the casting temperature on the percentage of phosphorus content.

From the experiments and the results obtained and presented in the Tab. 2 and Tab. 3, it is clear that to form an Sn-P alloy with a phosphorus content of $\geq 2\%$, the temperature higher than $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ is required for the reaction to take place the process completely. The observed surface of such a molten Sn-P alloy sample was rougher than that of the sample with a lower phosphorus content. A change in the colour and structure of samples surfaces could also

be observed. This phenomenon in the casting of tin-phosphorus alloys is comparable to the specialized study which was introduced by AI-Ping Xian and Guo-Liang Gong: Oxidation Behaviour of Molten Tin Doped with Phosphorus [13]. The given study shows how the phosphorus content of the Sn-P alloy affects the oxidation of the casting surface. In the paper, there is the introduction of the fact that the oxidation resistance of a liquid alloy decreases with the amount of slag taken from its surface, which could be the result of unreacted phosphorus binding to slag forming oxides due to a lower melting point of the alloy. The light silvery surface of the sample remained constant only at a higher melting point. According to the occurrence of other elements in the alloy captured on the basis of the chemical composition measurement method using a digital optical emission spectrometer (Ca, Cu, Fe), the sample with the highest phosphorus content (Sample No. 4) was exposed to semi-quantitative measurement from the sample surface by energy disperse X-ray fluorescence spectrometry using the EDX-7000 Shimadzu measuring instrument. The results of this measurement show a more accurate content of the mass percentages of individual elements and indicate the purity of the alloy. The sample was measured from both sides and the measurement results are shown on Fig. 8 – Fig. 11.

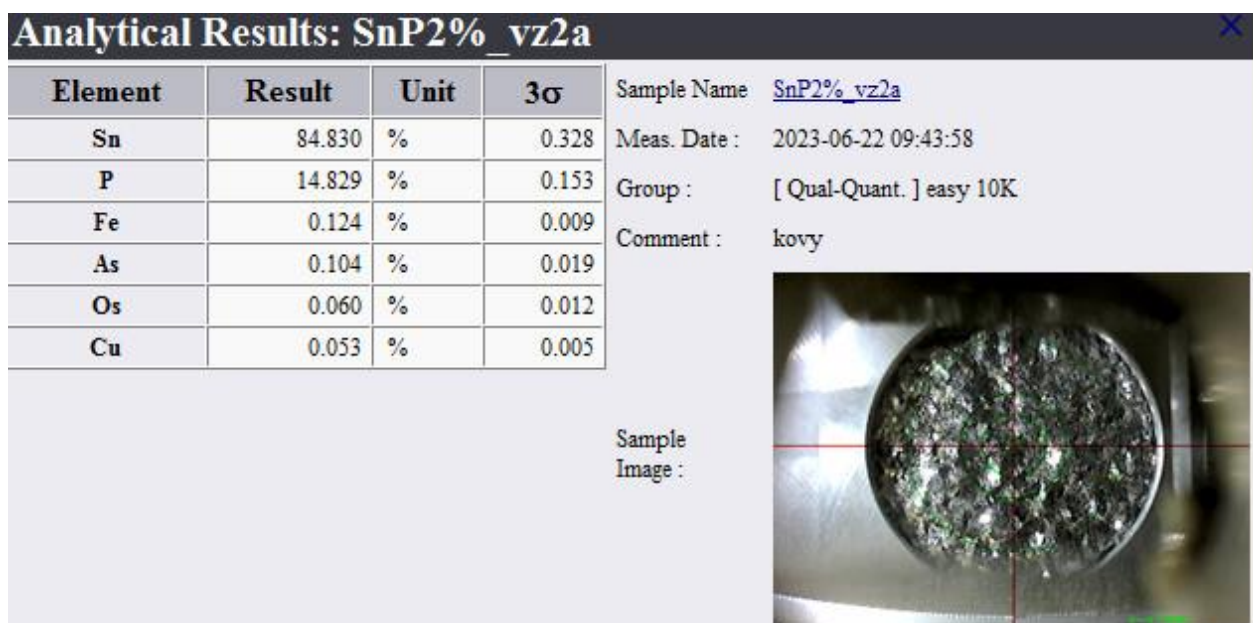


Fig. 8 Top of the sample No. 4 - chemical composition of the surface, measured by semi-quantitative method.

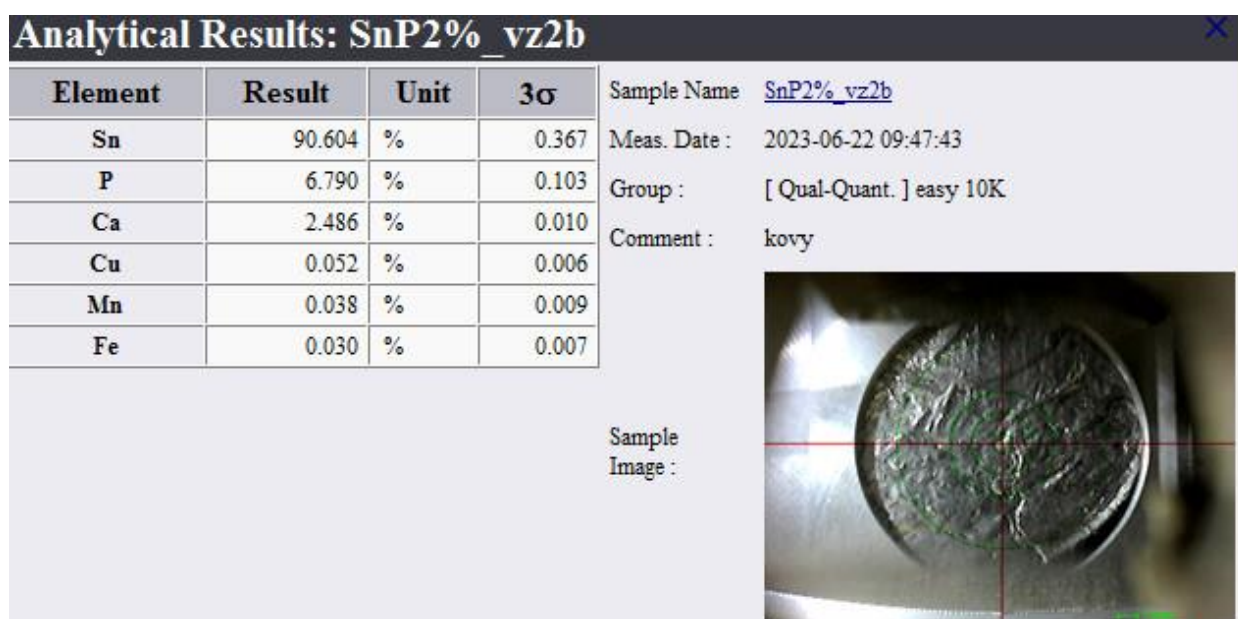


Fig. 9 Bottom of the sample No. 4 - chemical composition of the surface, measured by semi-quantitative method.

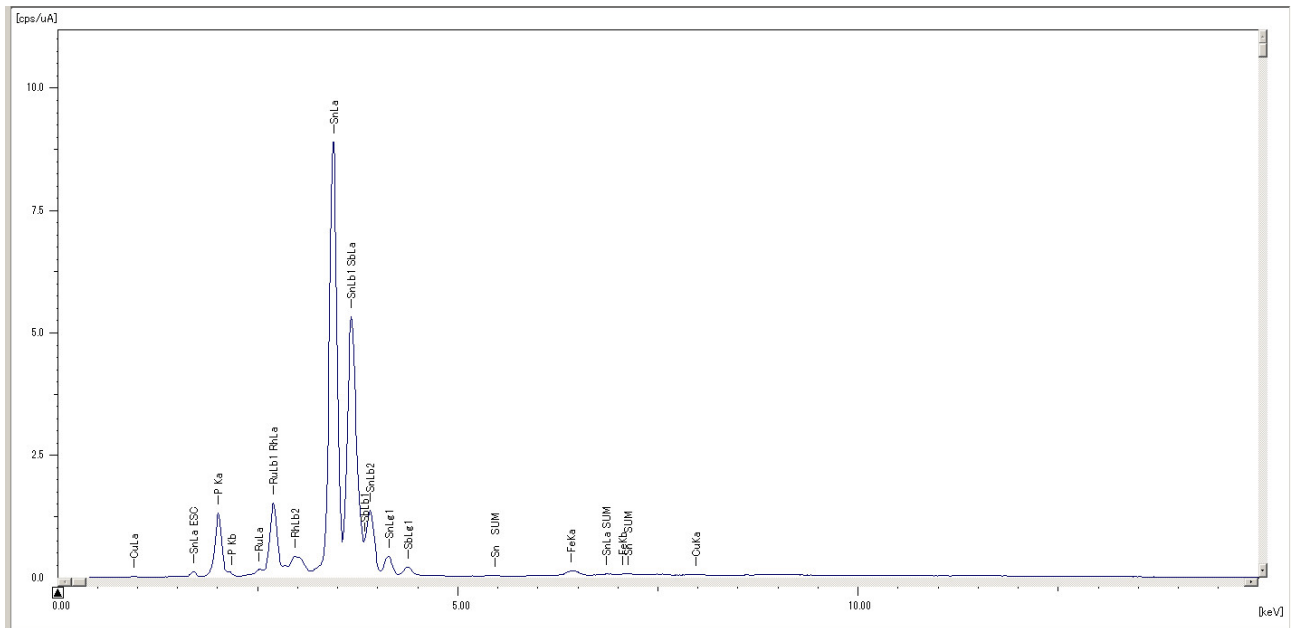


Fig. 10 Top of the sample No. 4 - chemical composition of the surface, measured by semi-quantitative method.

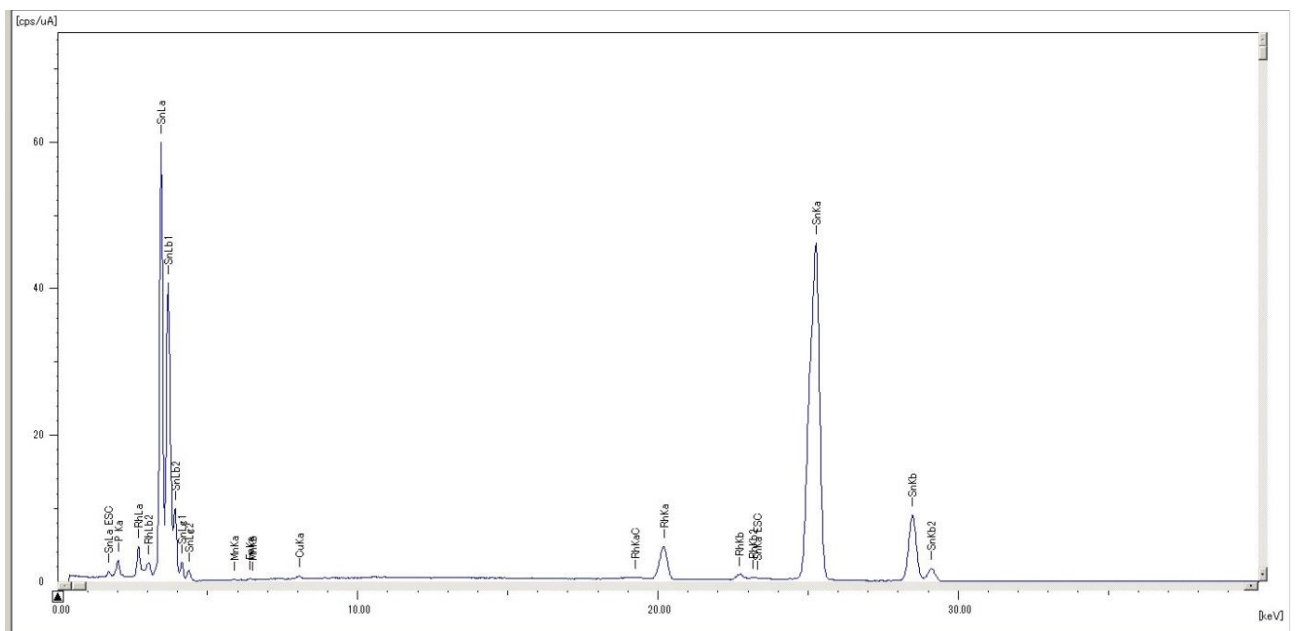


Fig. 11 Bottom of the sample No. 4 - chemical composition of the surface, measured by semi-quantitative method.

It was the presence of calcium in group of the elements found in the Sn-P alloy that manifested itself in a higher percentage, which led to the measurement of the chemical composition of sand, and it served as an intermediate layer between the individual elements during the melting of the alloy and was considered as a source of calcium in the resulting sample [14,15]. The sand was also subjected to semi-quantitative analysis by energy disperse X-ray fluorescence spectrometry (Fig. 12). The measurement result was not satisfactory because the presence of calcium in the sand was negligible and probably it was not contaminant of the sample (Sample No.4).

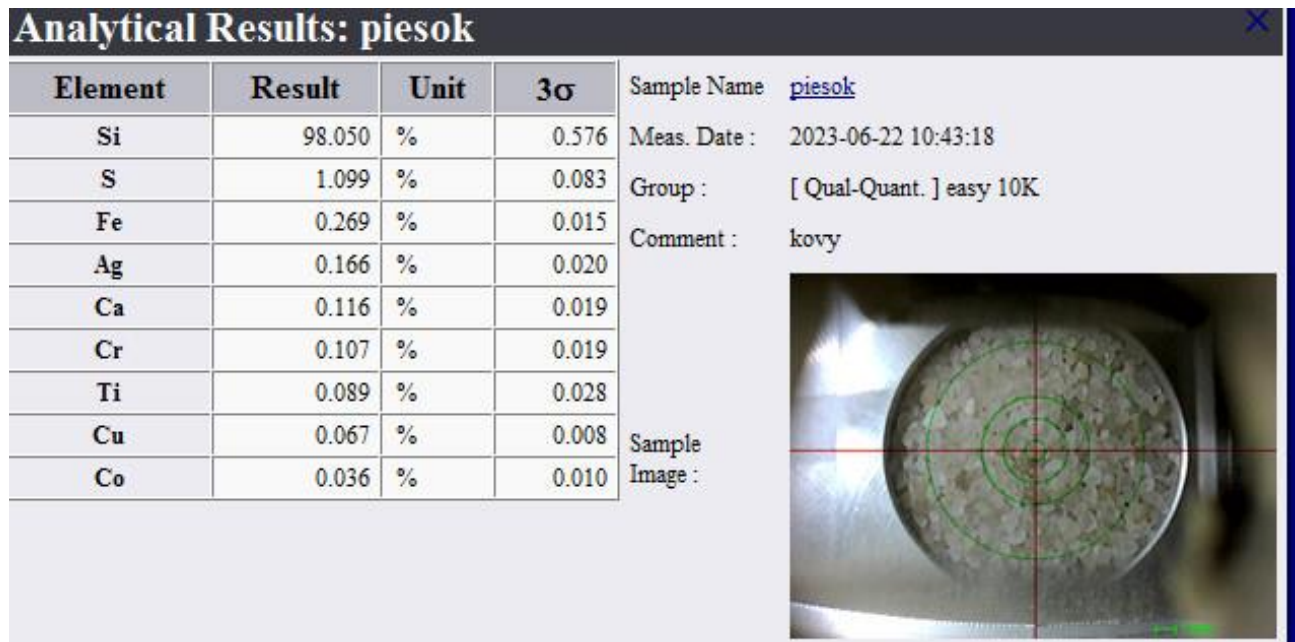


Fig. 12 Sand used as an interlayer in alloy melting - chemical composition of the surface, measured by semi-quantitative method.

3.2 Analysis of dross amount formed on the solder bath surface

Two different samples were cast. Already during the cooling of the samples in the brass mold, there was a difference in the amount of oxides on their surface which can be observed with the naked eye (Fig. 13). The surface of the sample from the melt without the addition of phosphorus (A) had a significantly larger amount of oxides on its surface than the surface of the samples from the melt with most of the phosphorus (A). This significant difference is visible also in the Fig. 14. This visual difference refers to the ability of dross to form on the surface of both melts.

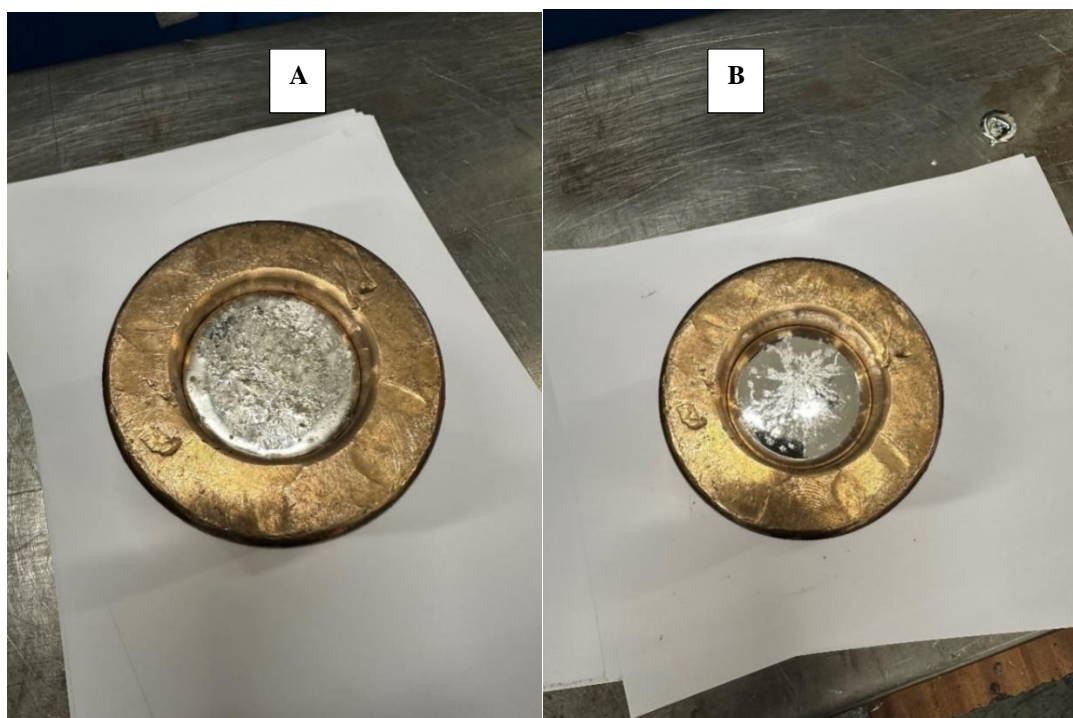


Fig. 13 Visual differences between two samples: A without addition of phosphorus in the solder bath, B with addition of phosphorus in the solder bath

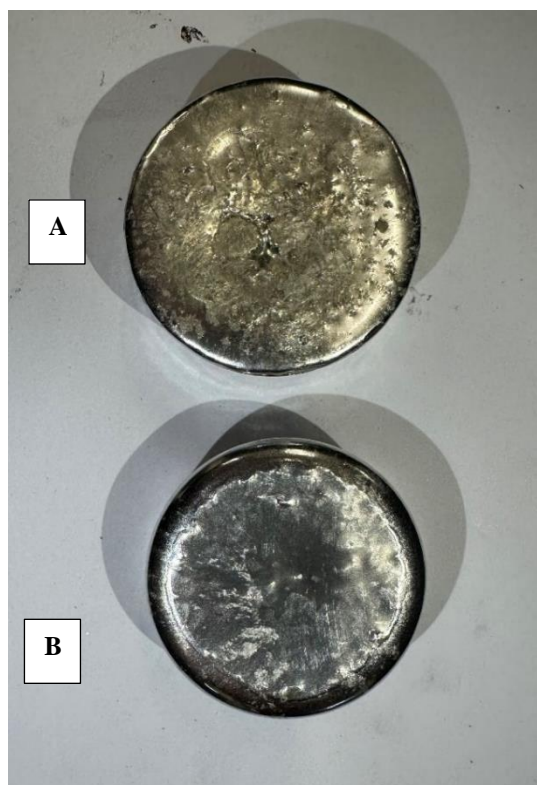


Fig. 14 Visual differences between two samples – yellow tones of oxides on sample A surface, shine and glossy surface with significant less amount of oxides on sample B surface.

The cooling of the sample was followed by its preparation for measuring the chemical composition on a digital optical emission spectrometer Q4 TASMÁN with a CCD detector. Tolerances for the content range of individual elements have been respected according to standard J-STD-006C. Chemical composition of sample A can be seen in Tab. 4. In Tab. 5, where the measured chemical composition values for sample B are shown, the phosphorus content is 0.003 %. At the beginning of melting, its content was higher (represented by 0.007 % in the total batch volume). If we consider the properties of phosphorus at higher temperatures [16, 17], it can be assumed that under the influence of temperature and melting time a certain amount burned out.

Tab. 4 Chemical composition of sample A - without addition of phosphorus in the solder bath

Chemical element	Content in alloy [%]	Chemical element	Content in alloy [%]
Sn	96.39	As	0.01
Ag	2.9	Ni	0.001
Cu	0.6	Bi	0.02
Pb	0.02	Cd	0.000
Sb	0.05	Al	0.001
Zn	0.001	In	0.02
Fe	0.01	P	0.000

Tab. 5 Chemical composition of sample B - with addition of phosphorus in the solder bath

Chemical element	Content in alloy [%]	Chemical element	Content in alloy [%]
Sn	96,42	As	0.002
Ag	3.0	Ni	0.005
Cu	0.4	Bi	0.004
Pb	0.02	Cd	0.000
Sb	0.1	Al	0.001
Zn	0.001	In	0.02
Fe	0.02	P	0.003

The dross taken from each melt every hour was weighed and recorded. The weighing results of dross from two solder baths SAC305 (A) and SAC305 with addition of phosphorus (B) are shown in the Fig. 14. The quantity of dross resulting from solder bath B is 35 % lower than that resulting from solder bath A.

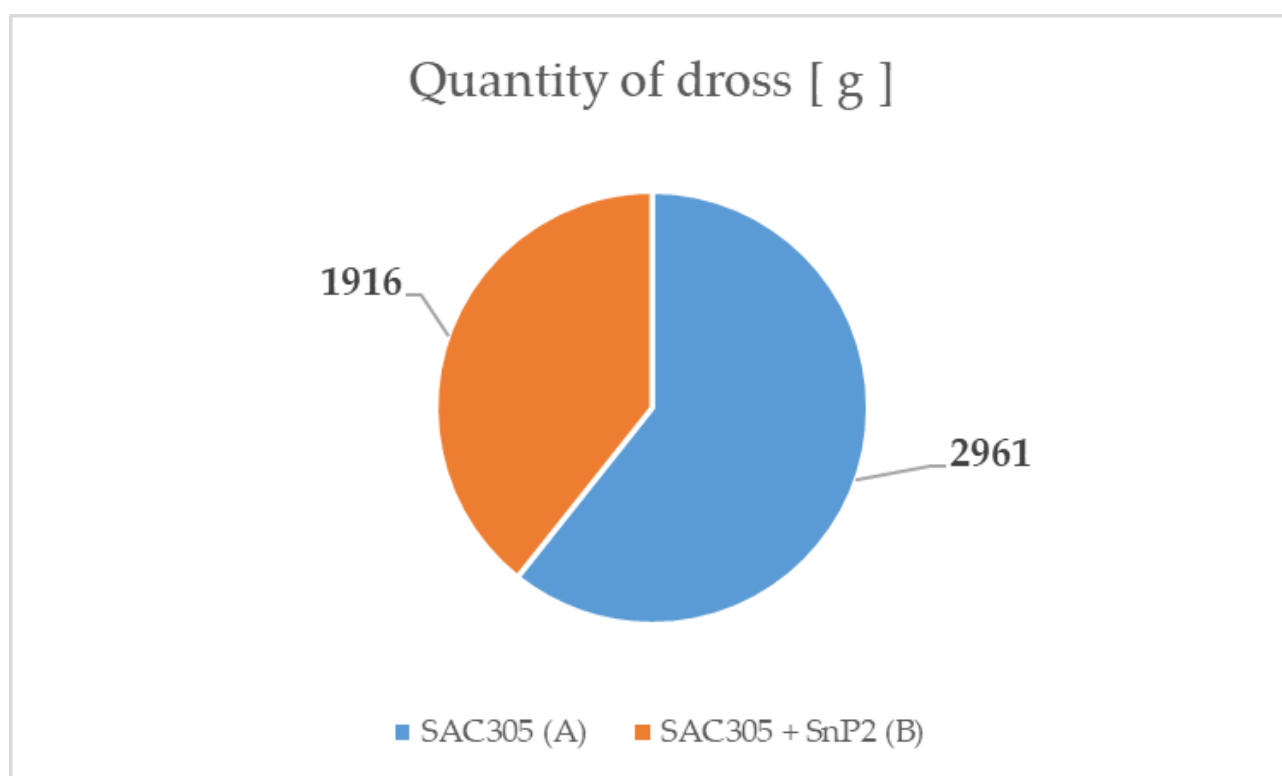


Fig. 14 Quantity of dross from melts A and B.

Conclusion

In conclusion, based on the obtained relevant results, the melting process of Sn-P alloys must be performed in a clean and inert environment, due to the activity of constituent elements that can create other undesirable chemical reactions and connections. The temperature and melting time must be maintained and monitored continuously. The formation of oxidic phases is undesirable for the further use of these alloys in the form of solders. The addition of a tin-phosphorus deoxidation pre-alloy is one option to reduce the formation of dross on the surface of the melt during the production of solder.

Acknowledgement

This work was supported by the Slovak Grant Agency – project KEGA 011TnUAD-4/2024.

References

- [1] Jiayi Yan, Wei Xiao, Jianwei Wang, FuWen Zhang, Xiaowu Li, Huijun He, Ligen Wang, Effects of alloying elements on the interfacial segregation of bismuth in tin-based solders, *Materials Today Communications*, Volume 35, 2023, 105713, ISSN 2352-4928.
- [2] W.S. Huang, Tin. (Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000)
- [3] Campbell, J. Complete Casting Handbook Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design, 2nd ed.; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2015; ISBN 978-0-444-63509-9
- [4] A. V. Kurdyumov, V. D. Belov, M. V. Pikunov, et al., Casting Production from Nonferrous Metal Alloys: Textbook, MISiS, Moscow (2011)
- [5] A. P. Smiryagin, Industrial Nonferrous Metals and Alloys, Ripol Klassik, Moscow (2013).
- [6] S. He and H. Nishikawa, "Effect of substrate metallization on the impact strength of Sn-Ag-Cu solder bumps fabricated in a formic acid atmosphere," 2017 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), Yamagata, Japan, 2017, pp. 381-385, doi: 10.23919/ICEP.2017.7939400.
- [7] Chen, Yuanming & Huang, Junjie & Huang, Yunzhong & Li, Qingyuan & Zeng, Hong & Tian, Ling & Li, Jingsong & Wang, Shouxu & he, Wei & Hong, Yan. (2024). Microstructure evolution and growth kinetics of intermetallic compound in SAC305/Ag and SAC305/Cu solder joints during solid-state aging. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 35. 10.1007/s10854-024-12043-3.
- [8] Diepstraten, Gerjan. (2020). Wave/Selective Soldering. 10.1002/9781119482093.
- [9] Ming Yang, Hongjun Ji, Shuai Wang, Yong-Ho Ko, Chang-Woo Lee, Jianxin Wu, Mingyu Li: Effects of Ag content on the interfacial reactions between liquid Sn–Ag–Cu solders and Cu substrates during soldering, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 679, 2016, Pages 18-25, ISSN 0925-8388, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.03.177>.
- [10] Sweatman, Keith W. and Takatoshi Nishimura. "THE EFFECTS OF PHOSPHORUS IN LEAD-FREE SOLDERS." (2015).
- [11] Chen, Yuanming & Huang, Junjie & Huang, Yunzhong & Li, Qingyuan & Zeng, Hong & Tian, Ling & Li, Jingsong & Wang, Shouxu & he, Wei & Hong, Yan. (2024). Microstructure evolution and growth kinetics of intermetallic compound in SAC305/Ag and SAC305/Cu solder joints during solid-state aging. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 35. 10.1007/s10854-024-12043-3.
- [12] Vianco, P T, Hosking, F M, & Rejent, J A. Wettability analysis of tin-based, lead free solders. United States.
- [13] Xian, AP., Gong, GL. Oxidation Behavior of Molten Tin Doped with Phosphorus. *J. Electron. Mater.* 36, 1669–1678 (2007). <https://doi.org/10.1007/s11664-007-0288-0>
- [14] Wang, H., Zhao, H., Sekulic, D.P. et al. A Comparative Study of Reactive Wetting of Lead and Lead-Free Solders on Cu and (Cu₆Sn₅/Cu₃Sn)/Cu Substrates. *J. Electron. Mater.* 37, 1640–1647 (2008). <https://doi.org/10.1007/s11664-008-0502-8>
- [15] A.A. El-Daly, A.E. Hammad, Enhancement of creep resistance and thermal behavior of eutectic Sn–Cu lead-free solder alloy by Ag and In-additions, *Materials & Design*, Volume 40, 2012, Pages 292-298, ISSN 0261-3069. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.007>
- [16] Goh, Y., Haseeb, A.S.M.A. and Faizul Mohd Sabri, M. (2013), "Electrodeposition of lead-free solder alloys", *Soldering & Surface Mount Technology*, Vol. 25 No. 2, pp. 76-90. <https://doi.org/10.1108/09540911311309031>
- [17] Abbott, A.P.; Alhaji, A.I.; Ryder, K.S.; Horne, M.; Rodopoulos, T. Electrodeposition of Copper-Tin Alloys Using Deep Eutectic Solvents. *Trans. Inst. Met. Finish.* 2016, 94, 104–113.

The influence of the crane track unevenness on the load of the supporting crane structure

Ján Vavro (0009-0009-6787-9041)¹, Ján Vavro jr. (0009-0001-3704-4934)¹, Ľuboš Marček (0009-0005-3699-0100)¹, Jana Kuricová (0009-0005-4560-884X)¹, Miloš Taraba (0009-0000-2006-8350)¹, Lukáš Klimek (0009-0000-9525-414X)¹, Pavol Čerňava (0009-0006-5455-6305)¹

¹Faculty of Industrial Technologies in Púchov, Alexander Dubček University of Trenčín, I. Kraska 491/30, 020 01 Púchov, Slovakia. E-mail: jan.vavro@tnuni.sk, jan.vavro.jr@tnuni.sk, lubos.marcek@tnuni.sk, milos.taraba@tnuni.sk, jana.kuricová@tnuni.sk, lukas.klimek@tnuni.sk, pavel.cernava@tnuni.sk

The paper presents the analysis of the gantry crane loading when driving along the crane track, using a 3D model, for which the analysis of the gantry crane frame loading was performed. The gantry crane is designed to remove dirt that is in front of the turbine under the water surface. For the gantry crane which moves along a track, the directional and vertical unevennesses were determined by experiment and are given in graphic and numerical form in (mm), relating to A track and B track with a total track length of 450 (m). Based on the knowledge of the unevenness of the rail track, the four random functional dependencies defining the irregularities of the individual rails as input variables were used for the kinematic excitation of the individual wheels of the gantry crane. The stress analysis was performed for a travel speed of 30 (m/min) and a lift of 10 (t) under the given loading. The results of the stress analysis are presented in graphic form.

Keywords: Loading, virtual model, load, stress analyse, 3D Model

1 Úvod

Riešenie reálnych problémov praxe je často spojené s riešením zložitých sústav diferenciálnych, integrálnych, alebo algebrických rovníc. Získať analytické riešenia je vo väčšine prípadov nemožné a tak konštruktéri využívajú numerické postupy s využitím modernej výpočtovej techniky.

Moderné výpočtové metódy sú závislé od tvorby virtuálneho modelu s následnou simuláciou prevádzkového procesu danej sústavy, bez ktorej je dnešná práca konštruktéra nemysliteľná pri riešení zložitých problémov, vyriešenie ktorých často prináša významný ekonomický prínos.

Pre konštruktéra ostáva hlavnou úlohou vhodne, s požiadavkami praxe navrhnuť parametre navrhovaného zariadenia vzhľadom na jeho hmotnosť, tvar, geometriu, prípadne niektoré iné dynamické vlastnosti. Hlavným cieľom býva snaha ušetriť materiál a nájsť najlepšie riešenie z hľadiska využitia materiálu a vhodného tvaru konštrukcie.

V súčasnej dobe zvýšené požiadavky na šetrenie materiálov, životnosť, spoľahlivosť výrobkov a strojných zariadení si vyžadujú nové prístupy pri riešení úloh technickej praxe. Pomocou vhodných výpočtových programov sa môže vykonať rýchla a efektívna štúdia, ktorá väčšou alebo menšou mierou ovplyvňuje statické a dynamické charakteristiky stroja.

2 Výsledky merania koľajovej dráhy žeriava (smerové a výškové odchýlky)

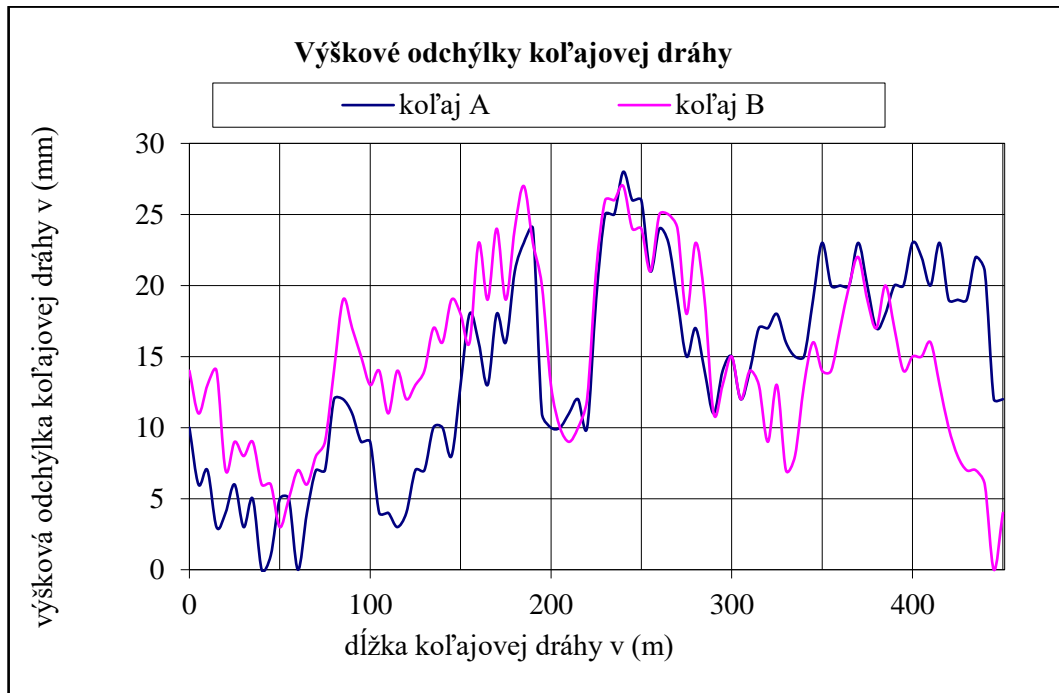
Nerovnosti koľaje sa obvykle rozdeľujú na zvislé (výškové) a priečne (smerové). Uvedené nerovnosti koľajnicových pásov majú za následok budenie pre zvislý chod vozidla (zvislé nerovnosti) a priečne prevýšenie koľajnicových pásov obvykle vo forme uhlových výchýliek (toto predstavuje jeden z budiacich vstupov pre priečny chod vozidla). Z priečných nerovností sa obvykle uvažujú priečne odchýlky osi koľaje a odchýlky rozchodu koľaje. To znamená, že zo štyroch budiacich náhodných funkcií (ľavá a pravá koľajnica v priečnom i zvislom smere) dostávame tri, ktoré sú viazané na určité typy kmitavého pohybu žeriava (vozidla).

Samotná koľaj je zložitá dynamická sústava, ktorá pri pôsobení premenlivého pohyblivého zaťaženia spôsobeného dvojkoľesami koľajových žeriavov (vozidiel) mení svoj tvar. Zmena tvaru koľaje je náhodná, pretože jej priechyb je ovplyvnený nasledovnými faktormi:

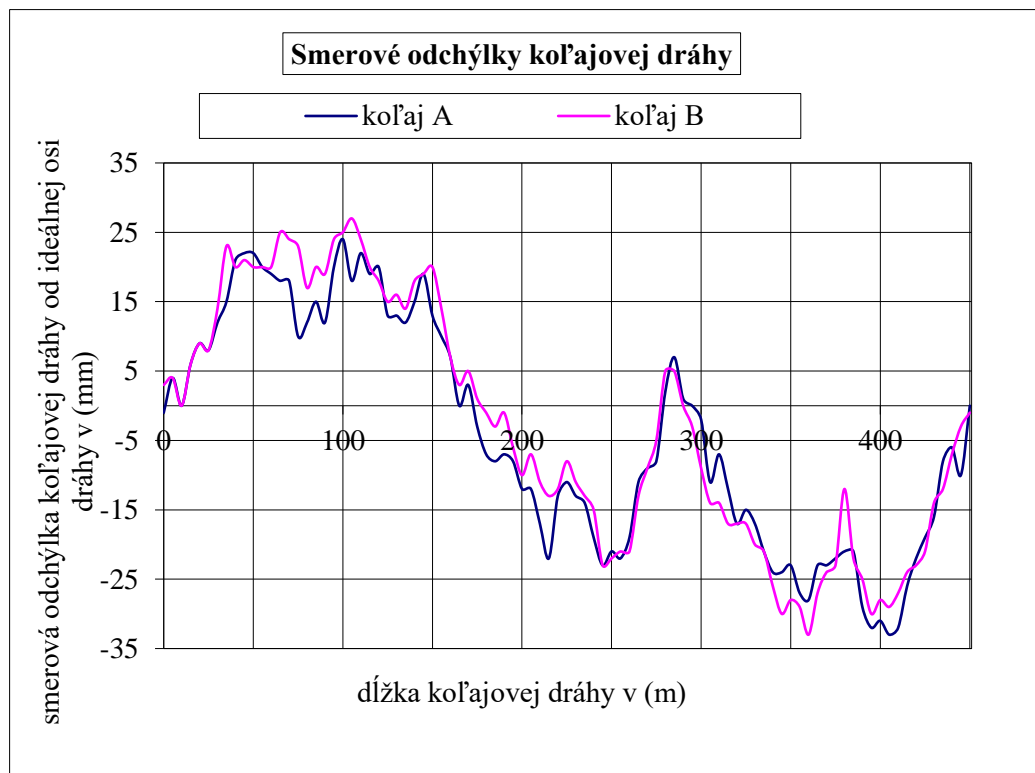
- zvislou poddajnosťou koľajnic,
- pružnými podložkami medzi päťami koľajnic a podkladnicami,
- kvalitou štrkového lôžka, najmä skutočným stavom podbitia jednotlivých podvalov,
- poruchami únosnosti železničného spodku,
- dynamickými vlastnosťami koľajového žeriava (vozidla) pohybujúceho sa po nej.

V našom prípade, keďže koľajnicová dráha je uložená v betóne, budeme uvažovať iba dynamické vlastnosti hradidlového žeriava (vozidla).

Experimentálne zisťovanie priebehu nerovností koľajnic je založené na geodetických metódach. Na Obr. 1 sú znázornené graficky výškové odchýlky koľajovej dráhy a na Obr. 2 sú znázornené smerové odchýlky koľajovej dráhy.



Obr. 1 Priebek výškových nerovností nameraných na ľavej koľajnici $u_{yL}^{(1)}$ (koľaj A) a na pravej koľajnici $u_{yP}^{(1)}$ (koľaj B)



Obr.2 Priebek smerových nerovností nameraných na ľavej koľajnici $u_{xL}^{(1)}$ (koľaj A) a na pravej koľajnici $u_{xP}^{(1)}$ (koľaj B)

V Tab.1 sú uvedené číselné hodnoty výškových nerovností koľajovej dráhy a v Tab. 2 sú uvedené číselné hodnoty smerových odchýliek koľajovej dráhy.

Tab. 1 Hodnoty výškových nerovností koľajovej dráhy

P. č.	dĺžka koľ. dráhy (m)	koľaj A odchýlka (mm)	koľaj B odchýlka (mm)	rozdiel (mm)	P. č.	dĺžka koľ. dráhy (m)	koľaj A odchýlka (mm)	koľaj B odchýlka (mm)	rozdiel (mm)
1	0	10	14	4	47	230	25	26	1
2	5	6	11	5	48	235	25	26	1
3	10	7	13	6	49	240	28	27	1
4	15	3	14	11	50	245	26	24	2
5	20	4	7	3	51	250	26	24	2
6	25	6	9	3	52	255	21	21	0
7	30	3	8	5	53	260	24	25	1
8	35	5	9	4	54	265	23	25	2
9	40	0	6	6	55	270	19	24	5
10	45	1	6	5	56	275	15	18	3
11	50	5	3	2	57	280	17	23	6
12	55	5	5	0	58	285	14	19	5
13	60	0	7	7	59	290	11	11	0
14	65	4	6	2	60	295	14	13	1
15	70	7	8	1	61	300	15	15	0
16	75	7	9	2	62	305	12	12	0
17	80	12	14	2	63	310	14	14	0
18	85	12	19	7	64	315	17	13	4
19	90	11	17	6	65	320	17	9	8
20	95	9	15	6	66	325	18	13	5
21	100	9	13	4	67	330	16	7	9
22	105	4	14	10	68	335	15	8	7
23	110	4	11	7	69	340	15	13	2
24	115	3	14	11	70	345	19	16	3
25	120	4	12	8	71	350	23	14	9
26	125	7	13	6	72	355	20	14	6
27	130	7	14	7	73	360	20	17	3
28	135	10	17	7	74	365	20	20	0
29	140	10	16	6	75	370	23	22	1
30	145	8	19	11	76	375	20	19	1
31	150	13	18	5	77	380	17	17	0
32	155	18	16	2	78	385	18	20	2
33	160	16	23	7	79	390	20	17	3
34	165	13	19	6	80	395	20	14	6
35	170	18	24	6	81	400	23	15	8
36	175	16	19	3	82	405	22	15	7
37	180	21	24	3	83	410	20	16	4
38	185	23	27	4	84	415	23	13	10
39	190	24	23	1	85	420	19	10	9
40	195	11	20	9	86	425	19	8	11
41	200	10	13	3	87	430	19	7	12
42	205	10	10	0	88	435	22	7	15
43	210	11	9	2	89	440	21	6	15
44	215	12	10	2	90	445	12	0	12
45	220	10	12	2	91	450	12	4	8
46	225	19	21	2					

Tab. 2 Hodnoty smerových nerovností koľajovej dráhy

P. č.	dĺžka koľ. dráhy (m)	koľaj A odchýlka (mm)	koľaj B odchýlka (mm)	rozdiel (mm)	P. č.	dĺžka koľ. dráhy (m)	koľaj A odchýlka (mm)	koľaj B odchýlka (mm)	rozdiel (mm)
1	0	-1	3	4	47	230	-13	-11	2
2	5	4	4	0	48	235	-14	-13	1
3	10	0	0	0	49	240	-19	-15	4
4	15	6	6	0	50	245	-23	-23	0
5	20	9	9	0	51	250	-21	-22	1
6	25	8	8	0	52	255	-22	-21	1
7	30	12	14	2	53	260	-19	-21	2
8	35	15	23	8	54	265	-11	-13	2
9	40	21	20	1	55	270	-9	-9	0
10	45	22	21	1	56	275	-8	-5	3
11	50	22	20	2	57	280	2	5	3
12	55	20	20	0	58	285	7	5	2
13	60	19	20	1	59	290	1	0	1
14	65	18	25	7	60	295	0	-3	3
15	70	18	24	6	61	300	-2	-9	7
16	75	10	23	3	62	305	-11	-14	3
17	80	12	17	5	63	310	-7	-14	7
18	85	15	20	5	64	315	-12	-17	5
19	90	12	19	7	65	320	-17	-17	0
20	95	20	24	4	66	325	-15	-17	2
21	100	24	25	1	67	330	-17	-20	3
22	105	18	27	9	68	335	-21	-21	0
23	110	22	24	2	69	340	-24	-26	2
24	115	19	20	1	70	345	-24	-30	6
25	120	20	18	2	71	350	-23	-28	5
26	125	13	15	2	72	355	-27	-29	2
27	130	13	16	3	73	360	-28	-33	5
28	135	12	14	2	74	365	-23	-27	4
29	140	15	18	3	75	370	-23	-24	1
30	145	19	19	0	76	375	-22	-23	1
31	150	13	20	7	77	380	-21	-12	9
32	155	10	14	4	78	385	-21	-22	1
33	160	7	7	0	79	390	-29	-25	4
34	165	0	3	3	80	395	-32	-30	2
35	170	3	5	2	81	400	-31	-28	3
36	175	-3	1	4	82	405	-33	-29	4
37	180	-7	-1	6	83	410	-32	-27	5
38	185	-8	-3	5	84	415	-26	-24	2
39	190	-7	-1	6	85	420	-22	-23	1
40	195	-8	-6	2	86	425	-19	-21	2
41	200	-12	-10	2	87	430	-16	-14	2
42	205	-12	-7	5	88	435	-8	-12	4
43	210	-17	-11	6	89	440	-6	-7	1
44	215	-22	-13	9	90	445	-10	-3	7
45	220	-13	-12	1	91	450	0	-1	1
46	225	-11	-8	3					

3 Počítačová verifikácia výpočtového modelu žeriava

Portálový hradidlový žeriav (Obr.3) je určený na odstraňovanie nečistôt, ktoré sa nachádzajú pod vodnou hladinou pred turbínou. Hradidlový žeriav bol vyrobený z ocele triedy 10 373 v súčasnosti jej ekvivalent je oceľ 11 373. Oceľ konštrukcie žeriavu je náchylná na starnutie.

Požadované mechanické vlastnosti ocele sú:

$R_{e\ min}=235$ [MPa] (medza klízu), $R_m=340-470$ [MPa] (pevnosť v ťahu), dovolené napätie $\sigma_{dov}=210$ [MPa].



Obr.3 Pohľad na portálový hradidlový žeriav

Prevádzkový režim portálového hradidlového žeriava (pracovný cyklus) môže byť nasledovný:

- pohyb žeriava po koľajovej dráhe na určenom stupni pojazdnej rýchlosti bez záťaže
- zdvih bremena
- pohyb žeriava po koľajovej dráhe na určenom stupni pojazdnej rýchlosti so záťažou

Do výpočtového modelu vstupujú nasledujúce parametre:

- Youngov modul pružnosti $E=2 \cdot 10^{11}$ Pa,
- Poissonovo číslo $\mu=0,3$,
- hustota materiálu $\rho=7800$ kg/m³.

Vonkajšie zaťaženie:

- veľkosť zdvíhaného bremena $Q=32$ t, 10 t, 5 t,
- vlastná hmotnosť žeriava a jednotlivých agregátov podľa výkresovej dokumentácie,
- kinematického budenia od nerovností koľajovej dráhy.

Na základe známych nerovností koľajnicovej dráhy použijeme pre kinematické budenie jednotlivých kolies hradidlového žeriava ako vstupné veličiny štyri náhodné funkčné závislosti Obr.1 a Obr.2 definujúce nerovnosti jednotlivých koľajníc v závislosti na dráhe [1-3].

Kde: v - rýchlosť hradidlového žeriava v m/min, (30 m/min).

L - rázvor dvojkolesí (5,2 m),

$u_{xL}^{(1)}$ - geometrická nerovnosť ľavej koľajnice v priečnom smere vzťahnutá na prednú (prvú) nápravu,

$u_{yL}^{(1)}$ - geometrická nerovnosť ľavej koľajnice v zvislom smere vzťahnutá na prednú (prvú) nápravu,

$u_{xP}^{(1)}$ - geometrická nerovnosť pravej koľajnice v priečnom smere vzťahnutá na prednú (prvú) nápravu,

$u_{yP}^{(1)}$ - geometrická nerovnosť pravej koľajnice v zvislom smere vzťahnutá na prednú (prvú) nápravu,

$u_{xL}^{(2)}$ - geometrická nerovnosť ľavej koľajnice v priečnom smere vzťahnutá na zadnú (druhú)

$$\text{nápravu a platí } u_{xL}^{(2)}(t) = u_{xL}^{(1)}\left(t - \frac{L}{v}\right),$$

$u_{yL}^{(2)}$ - geometrická nerovnosť ľavej koľajnice v zvislom smere vzťahnutá na zadnú (druhú)

$$\text{nápravu a platí } u_{yL}^{(2)}(t) = u_{yL}^{(1)}\left(t - \frac{L}{v}\right),$$

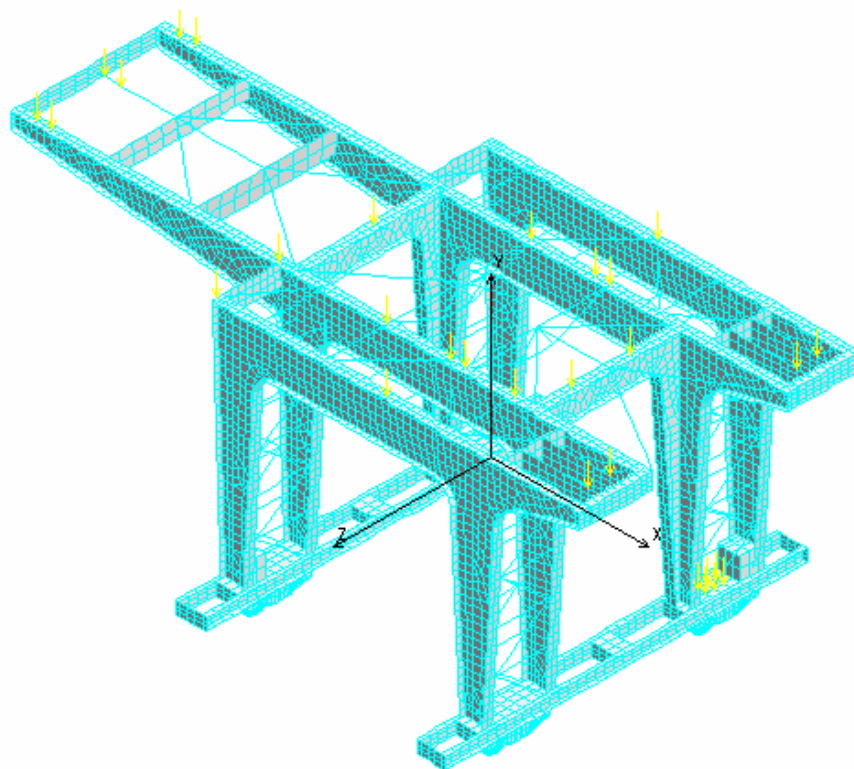
$u_{xP}^{(2)}$ - geometrická nerovnosť pravej koľajnice v priečnom smere vzťahnutá na zadnú (druhú)

$$\text{nápravu a platí } u_{xP}^{(2)}(t) = u_{xP}^{(1)}\left(t - \frac{L}{v}\right),$$

$u_{yP}^{(2)}$ - geometrická nerovnosť pravej koľajnice v zvislom smere vzťahnutá na zadnú (druhú)

$$\text{nápravu a platí } u_{yP}^{(2)}(t) = u_{yP}^{(1)}\left(t - \frac{L}{v}\right).$$

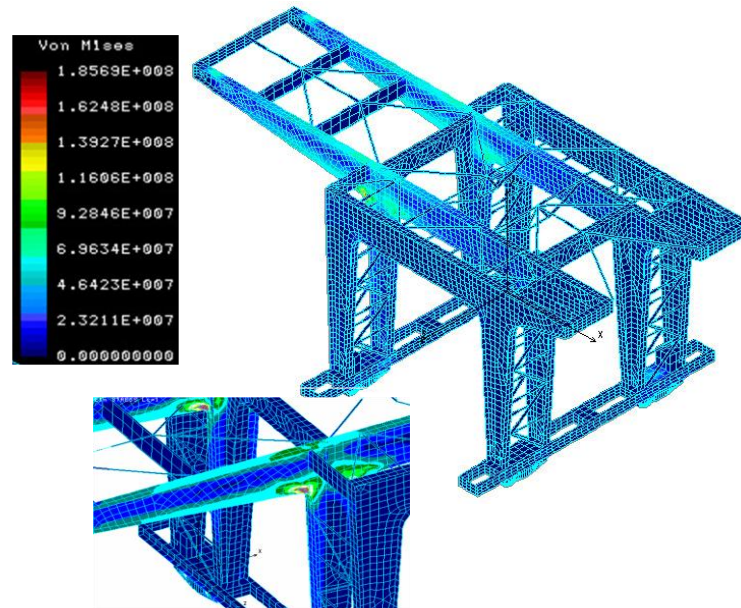
Na základe výkresovej dokumentácie bol vytvorený virtuálny model nosnej časti žeriava v systéme 3D MODEL Obr. 4 v ktorom sa urobila napät'ová analýza zaťaženia rámu portálového žeriava od daného prevádzkového zaťaženia [4-6].



Obr. 4 Konečno-prvkový model portálového žeriava so zatažením od jednotlivých agregátov

Na Obr. 5 je rozloženie napätia (zaťaženia) konštrukcie žeriava s detailom zaťaženia od vlastnej hmotnosti žeriava a hmotnosti jednotlivých agregátov podľa výkresovej dokumentácie, zdvíhaného bremena 10 [t] a pojazdu žeriava po koľajovej dráhe. Je to maximálna hodnota napätia, ktorá sa dosiahne pri manipulácii žeriava. Uvedená hodnota napätia v konštrukcii nepresiahne dovolené napätie $\sigma_{dov} = 210$ [MPa]. Podmienka zaťaženia je vyjadrená v tvare $\sigma_{dov} \geq \sigma_{vyp}$.

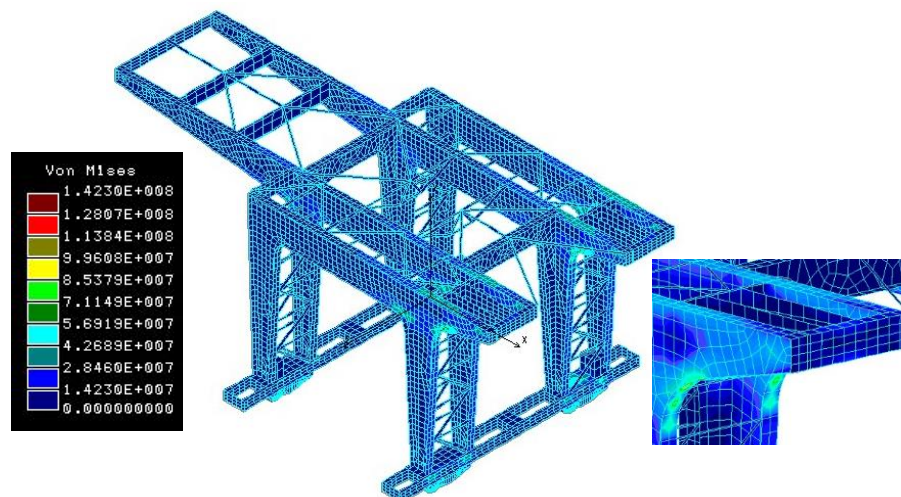
V našom prípade je 210 [MPa] $\geq 185,69$ [MPa] čo znamená, že nosná konštrukcia portálového žeriava vyhovuje pre dané zaťaženie prevádzky žeriava. Na veľkosť zaťaženia majú vplyv výškové a smerové odchýlky koľajovej dráhy.



Obr. 5 Maximálne rozloženie napätosti v [Pa]

Na Obr. 6 je rozloženie napätia (zaťaženia) konštrukcie žeriava s detailom zaťaženia od vlastnej hmotnosti žeriava a hmotnosti jednotlivých agregátov podľa výkresovej dokumentácie, zdvíhaného bremena 32 [t] a pojazdu žeriavu po koľajovej dráhe. Je to minimálna hodnota napätia, ktorá sa dosiahne pri manipulácii žeriava. Uvedená hodnota napätia v konštrukcii nepresiahne dovolené napätie $\sigma_{dov} = 210$ [MPa]. Podmienka zaťaženia je vyjadrená v tvare $\sigma_{dov} \geq \sigma_{vyp.}$

V našom prípade je 210 [MPa] $\geq 142,3$ [MPa] čo znamená, že nosná konštrukcia portálového žeriava vyhovuje pre dané zaťaženie prevádzky žeriavu. Na veľkosť zaťaženia majú vplyv výškové a smerové odchýlky koľajovej dráhy.



Obr. 6 Minimálne rozloženie napätosti v [Pa]

4 Záver

Spôľahlivá a bezpečná prevádzka portálového žeriava závisí od viacerých faktorov. Jedným z hlavných faktorov spoľahlivosti zariadenia je zaťaženie, ktoré nesmie prekročiť určitú hodnotu dovoleného zaťaženia konštrukcie pri jeho prevádzke. Podmienka zaťaženia je vyjadrená v tvare $\sigma_{dov} \geq \sigma_{vyp}$, kde σ_{dov} je dovolené napätie daného materiálu a σ_{vyp} -je vypočítané napätie v konštrukcii od daného zaťaženia.

Druhým dôležitým faktorom je stabilita žeriava pri jeho prevádzke, ktorá úzko súvisí so zaťažením konštrukcie žeriava.

Zaťaženie portálového žeriava sa pohybuje v rozpätí od 142,3 [MPa] do 185,69 [MPa]. Nosná konštrukcia portálového žeriava vyhovuje pre spoľahlivú prevádzku žeriavu. Maximálne zaťaženie 185,69 [MPa] je menšie ako dovolené zaťaženie 210 [MPa]. Na veľkosť zaťaženia majú tiež vplyv výškové a smerové odchýlky koľajovej dráhy.

Z porovnania nameraných hodnôt výškových a smerových odchýliek koľajovej dráhy z roku 2005 s odchýlkami z roku 2020 možno vidieť, že tieto odchýlky sa zväčšujú a podľa STN EN 1993-6/NA a STN EN 1090-2+A1 vyplýva, že namerané a vypočítané odchýlky prekračujú krajne dovolené odchýlky podľa uvedených noriem a priestorové vzťahy žeriavovej dráhy týmto normám nevyhovujú a vplývajú na celkové zaťaženie nosnej konštrukcie a rovnako i na stabilitu žeriavu.

Acknowledgement

This work was supported by the Slovak Grant Agency – project KEGA 011TnUAD-4/2024.

References

- [1] Brát, V., (1976), *Handbook of Kinematics with Examples*, Prague, SNTL.
- [2] Paul, B., (1979) *Kinematics and Dynamics of Planar Machinery*, New Jersey, Prentice-Hall.
- [3] Sága, M., Vavro, J., Kopecký, M., (2002), *Počítačová analýza a syntéza mechanických sústav*, ISBN 80-968605-4-2, Žilina, 267 s.
- [4] Vavro, J., Kopecký, M., Vavro, J., Jr., (2007), *Nové prostriedky a metódy riešenia sústav telies III*, ISBN 978-80-8075-256-9, Žilina, 150 s.
- [5] Vavro, J., (2020), *Kinematic and Dynamic Analysis of Planar Mechanisms by Means of the SolidWorks Software*, Tribun EU s. r. o., ISBN 978-80-263-1495-0, p. 156.
- [6] Vavro, J., Vavro, J., Jr., (2019), *Aplikácia výpočtových a experimentálnych metód v gumárenskom priemysle*, ASSA spol. s.r.o., Púchov, 120 s.

Quality Assessment of Zinc Alloy Castings Produced with HPDC Technology

Petra Dubcová (0000-0003-3450-3290)¹, Andrej Dubec (0009-0001-6145-6357)¹, Alžbeta Bakošová (0000-0003-3440-0689)¹, Dana Bakošová (0000-0003-2936-8637)¹, Daniela Košťaliková (0000-0003-4981-7698)¹, Mariana Janeková (0000-0002-9380-2760)¹, Maroš Dedinský (0000-0003-2315-3926)¹, Faculty of Industrial Technologies in Púchov, Alexander Dubček University of Trenčín. I. Krasku 491/30, 020 01 Púchov. Slovakia. E-mail: petra.dubcova@tnuni.sk

Modern zinc alloys offer a cost-effective solution while providing excellent mechanical and casting properties. Producing a high-quality casting fundamentally depends on selecting the appropriate alloy and designing the casting die optimally from a technological perspective. This paper investigates the door hinges made of zinc alloy, which are components of an electrical distribution box. The damage and loss of functional properties of these components necessary for protecting electrical systems occurred under a load. The investigated hinges were from a series supplied by the same manufacturer. Defects in the material at the point of failure, along with evaluations of microstructure and micropurity, were analysed using scanning electron microscopy (SEM). The method of energy dispersive spectroscopy (EDS) was used to detect the chemical composition. A visible amount of porosity and shrinkage was observed on the examined samples, which had a negative impact on its practical use under the load.

Keywords: Casting, Defects, Zinc alloy, Porosity, SEM analysis

1 Introduction

The aim of this paper was to evaluate the material quality of the door hinge made of zinc alloy and produced by the casting technology, as they often broke during assembly (Fig. 1). The hinges are components of electric distribution box and were supplied as a part of one series. Suspension hinges are mechanical devices designed to connect two flat components together, while providing a rotating movement of one component. They vary in their purpose, attachment methods, load capacity, materials, and aesthetic appeal. The wing features holes where screws are inserted to secure the suspension hinge onto the object. Selecting an appropriate hinge is an important step in the design process across numerous applications, although frequently neglected until the later phases of the process. If the selected hinge does not work as expected or fails during testing, finding a resolution becomes imperative to prevent costly revisions.

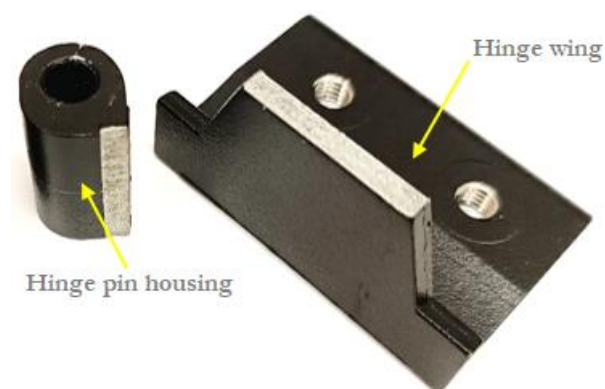


Fig. 1 Damaged door hinge

The consumption and use of zinc and its alloys has grown enormously in recent years. Casting zinc alloys are mainly used for the production of small shaped parts, produced by precision casting under pressure. Zinc alloys, such as ZAMAK, are alloyed with aluminium, magnesium, and copper. They differ in the alloying elements content, especially copper and magnesium. In the production of alloys, zinc with a purity of 99.99% is used. Their industrial use mainly involves component production by pressure casting, as they meet the highest standards. Besides their excellent casting properties, they are in demand, because of their outstanding mechanical properties, that often surpass those of aluminium, magnesium, and other alloys, as well as polymer materials. They also excel in surface treatment possibilities, formability, precision and the ability to cast thin walls. Other advantages of zinc alloy castings include high strength (Fig. 2) and hardness, long-term dimensional stability, cold forming ability, full recyclability and, last but not least, production speed and low production costs. The castings are resistant to wear due to the high hardness and they also have excellent corrosion resistance. A significant disadvantage of zinc alloys is a pronounced decline in mechanical properties at elevated temperatures. Therefore, the maximum operating temperature should not exceed approximately 120 °C. At low temperatures (below around -20 °C), mechanical properties also deteriorate, especially impact strength [1-8].

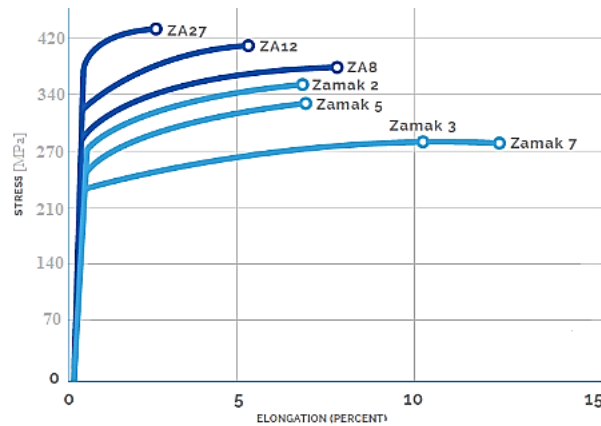


Fig. 2 Stress-Strain curves for die cast ZAMAK and ZA Alloys [7]

High pressure die casting (HPDC) technology is often used to produce zinc alloy castings employing a hot chamber die casting machine. This type of machines is exclusively utilized for producing castings from low-melting metal alloys, particularly those based on zinc. The positive aspect of this method is low cost and usually faster casting process. This technology allows for casting pieces with precise shapes and dimensions in high-volume production series [1-6]. High filling speed and high pressure make it possible to cast thin-walled and complexly shaped castings, which in many cases do not require further processing [1-7]. This precision casting technology utilizes a permanent metal die, where molten metal is injected at high speed under pressure and then it solidifies still under pressure. A primary characteristic of hot-chamber system machines is the direct connection of the melting furnace with crucible to the machine, enabling the molten metal to be injected straight into the die. The hot chamber ensures the movement of the working piston, which injects the molten metal. The piston is positioned directly in the crucible, where it draws in the molten metal. The piston moves vertically upward to intake the metal, then descends to inject the melt through a nozzle into the steel die. Subsequently, the piston performs a reciprocating upward movement to prepare for the next casting cycle (Fig. 3) [7, 8]. The optimal casting temperature of zinc alloys is between 410 and 430 °C. If alloys with copper additives are used for the casting process, this temperature reaches up to 450 °C. Too high casting temperatures damage the melting crucibles and injection mechanisms of machines with a hot chamber and increase the wear of steel dies. The temperature of the casting die should be optimally maintained between 120 °C and 180 °C, with a maximum limit of 200 °C [7, 8].

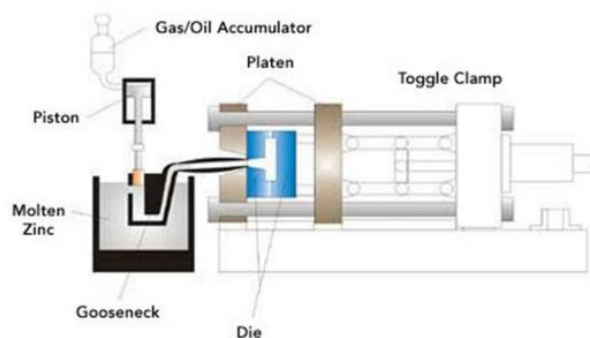


Fig. 3 Principle of a hot chamber die casting machine [7].

In the casting manufacturing process, achieving high-quality, flawless products with the required properties of the zinc alloy is essential. Each defect reduces product quality and leads to complaints, resulting in economic losses. Defects also negatively impact production flow. The primary factors directly affecting casting quality include the physical and casting properties of the material, the characteristics of the die and its functional surfaces, the casting conditions, as well as the shape and construction of the casting. These factors affect a presence of defective areas in the material, such as voids, porosity and shrinkage. In addition to defects of material integrity, non-metallic inclusions and the presence of internal stresses in the castings may also appear, which are closely related to volume changes during crystallization [5-12]. The volume shrinkage of the liquid and solid phase shrinkage during crystallization are related to the change in the density of the liquid and solid phases. The volume shrinkage is analogous to the volume thermal expansion of the solid phase [9-12].

The quality of the product, its utility and technical properties are also largely determined by surface treatments and the precision of their execution [13]. To ensure functional surface treatment, a high-quality surface after casting is essential. Therefore, it is important to ensure suitable casting parameters. If the die is too cold, the castings have an unsightly surface that is completely unsuitable for plating. At the optimal temperature, the castings have a smooth, fine surface with velvety sheen. However, excessively high die temperatures slow down the casting process, prolonging solidification time and

increasing the likelihood of surface defects.

Pure zinc exposed to atmospheric conditions immediately oxidizes and is covered with a thin layer of zinc oxide, therefore it is necessary to create a protective layer on the surface by anodizing. It is a form of surface treatment where its natural susceptibility to oxidation is utilized. This surface layer prevents further corrosion and is several times more resistant to abrasion and scratching compared to the original material. After anodizing, the surface layer has a microporous structure, which becomes compact after painting and subsequent sealing. The resulting anodized material is smooth, hard, with good chemical, corrosion and abrasion resistance. This surface treatment is followed by coating or powder coating [14], which is a surface treatment method also referenced by the supplier of the analysed broken hinges.

The powder coating is one of the most modern and ecological surface treatment technologies. It enables the attainment of an unlimited number of colours and thereby accommodating current trends and demands effectively. The coating process is carried out using the technology of electrostatic application of powder coat, in which the powder coating material is applied by spraying in an electrostatic field. Subsequently, the applied coat is hardened in ovens. This technology delivers enhanced mechanical and chemical resistance, more effective corrosion protection, a more aesthetically pleasing surface appearance, and improved edge coverage. Importantly, the shape of the product does not hinder the application of this process. The potential and service life of powder coating is mainly determined by pretreatment cleaning and optimized production control. The pretreatment process should thoroughly remove impurities that affect the adhesion of the coating to the surface. Removal of impurities can be done either chemically or mechanically. Powder paints are applied in a wide range of thicknesses, from very thin layers of about 25 μm to thicker layers with a thickness of 60 – 120 μm for outdoor use. To achieve the desired quality, one or two layers of surface treatment are usually sufficient [15-17].

Microscopic analysis and evaluation of defects in the material

A significant number of critical defects that lead to the destruction of the casting can be detected on the fracture surface of the broken part. In technical practice, the formation of a fracture surface in most cases represents an unacceptable degree of mechanical load or other damage. The fracture surface is a suitable area for obtaining important information regarding the applied degradation mechanism in the material and is a significant part of the fractographic analysis. The structural analysis of the casting material was focused on its evaluation in both longitudinal and transverse sections. The sampling procedure must be conducted in a manner that ensures the structure remains unaffected by mechanical or thermal influences, given that such changes can be relatively deep in material and cannot be removed by grinding or polishing. There are several machining methods for sampling, but wet abrasive grinding is among the most suitable methods. The advantage of this method is a high-quality cutting surface, a wide range of cutting discs and cooling at the cutting area, which serves as a prevention against thermal effects and simultaneously removes residues from the cutting surface. The sampling location of the examined hinge is illustrated in the Fig. 4.



Fig. 4 Sampling location

The influence of casting technology and quality control of zinc alloy castings were evaluated via the SEM analysis using a Vega Tescan 3 scanning electron microscope. The sample of the broken part was observed in SE and BSE mode. Secondary electrons (SE) are electrons generated directly at the impact location of the primary beam. They carry information about the topography, i.e. the shape of the sample surface. Due to the great depth of field and high resolution provided by electrons, the wavelength of which is significantly shorter than that of visible light, secondary electron imaging is used to analyse surfaces, structures, and measure dimensions, such as particle sizes. As the secondary electrons are detected at a certain angle to the surface of the sample, lighter and darker areas appear in the image, creating a three-dimensional effect. The number of back-reflected BSE electrons depends on the atomic weight of the chemical elements contained in the analysed area, and the resulting image provides information about the material contrast. A phase with a higher atomic weight reflects more electrons and is thus displayed on the screen with a brighter surface. Unlike secondary electrons, they come from a greater depth of the interaction volume of materials and carry not only topographical information, but also material information [18, 19].

Considerable porosity was observed on the entire longitudinal section (Fig. 5, 6), which was observed in the polished unetched state. With conventional methods of casting molten metal into a die, gas bubbles may form as a result of the presence of gas in the molten metal during melting (from a lining, a batch, a furnace atmosphere), improper casting

methods, improperly positioned exhausts, or insufficient breathability [20]. The precise casting method, which involves injecting molten metal under pressure into a metal die, can also be prone to gas bubble formation in the liquid metal. This often leads to porosity in the solidified material of the final casting if the process parameters are not optimally set.

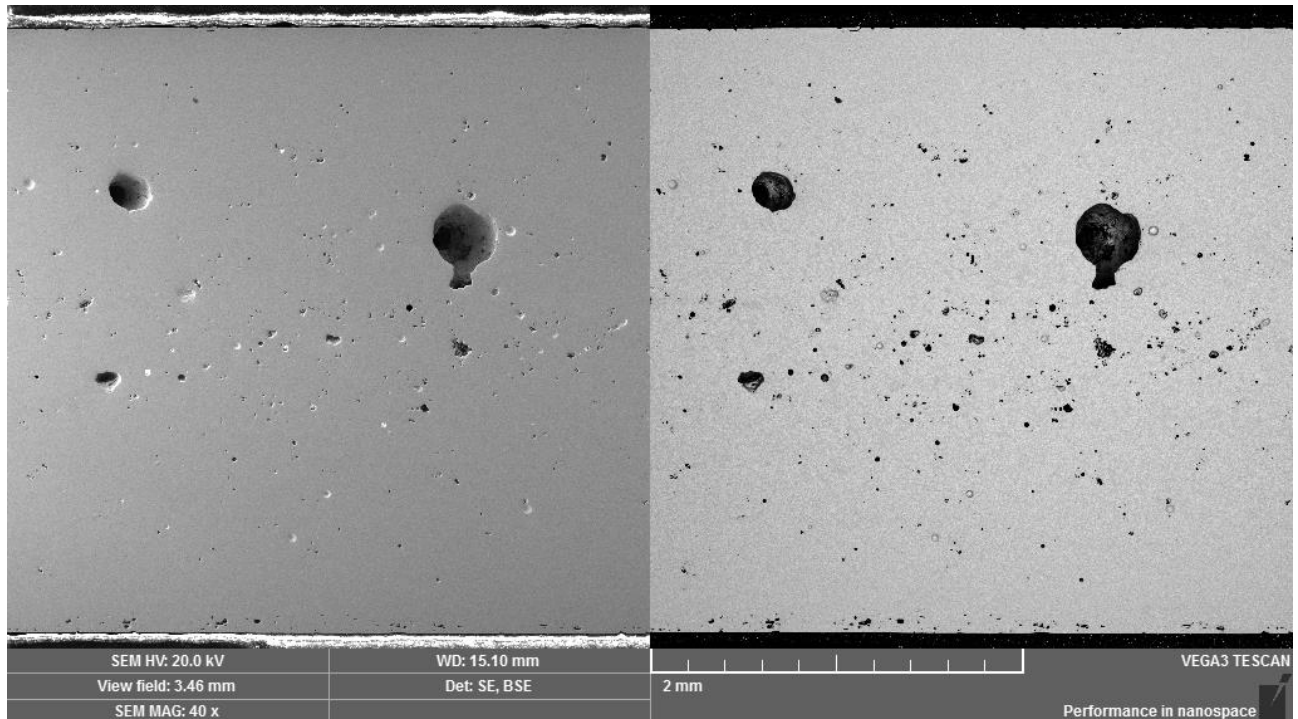


Fig. 5 Central area – longitudinal section, 40x magnification

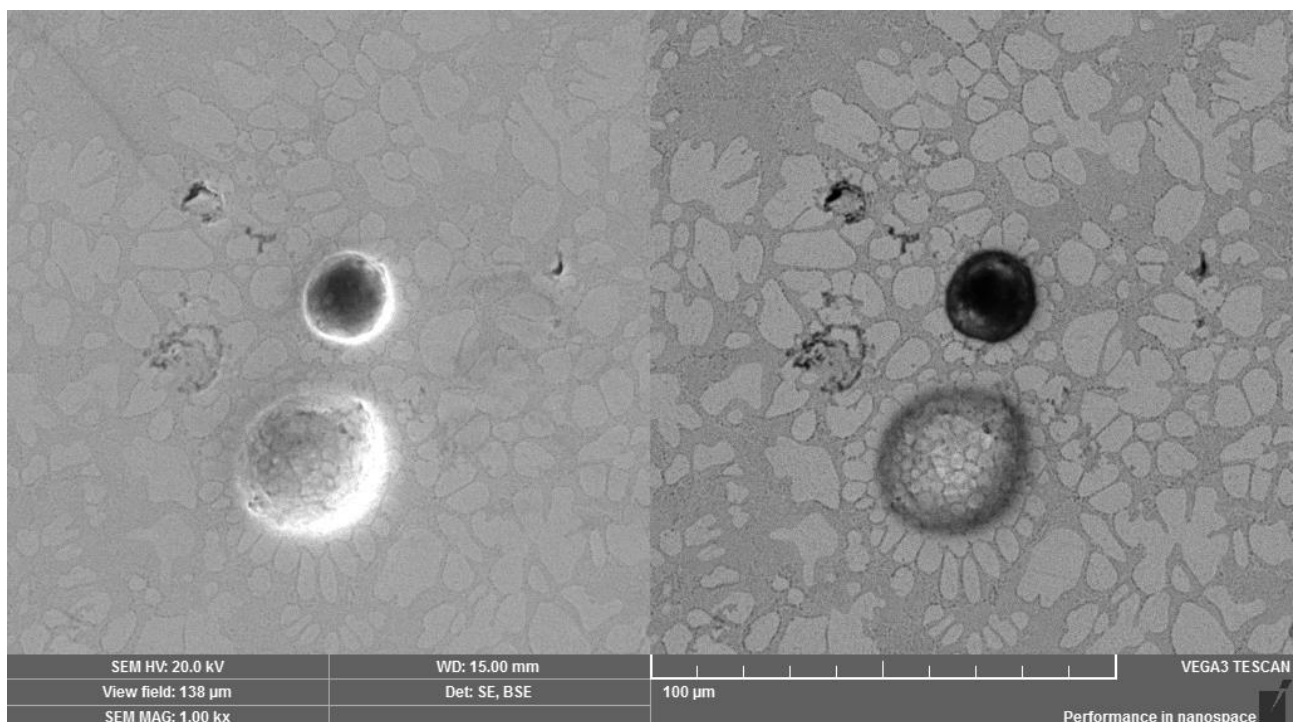


Fig. 6 Central area – longitudinal section – pores, 1000x magnification

The porosity was found mainly in the central area of the examined sample, where relatively large defects of this nature can also be observed, and to a lesser extent in the subsurface area (Fig. 7). Shrinkage defects were also present in the examined sample (Fig. 8). These defects occur due to volume reduction during solidification or insufficient melt supply to the die cavity. They are visible as a number of small, unevenly distributed cavities, which can negatively affect mechanical properties and potentially lead to the premature failure of the part under operating conditions.

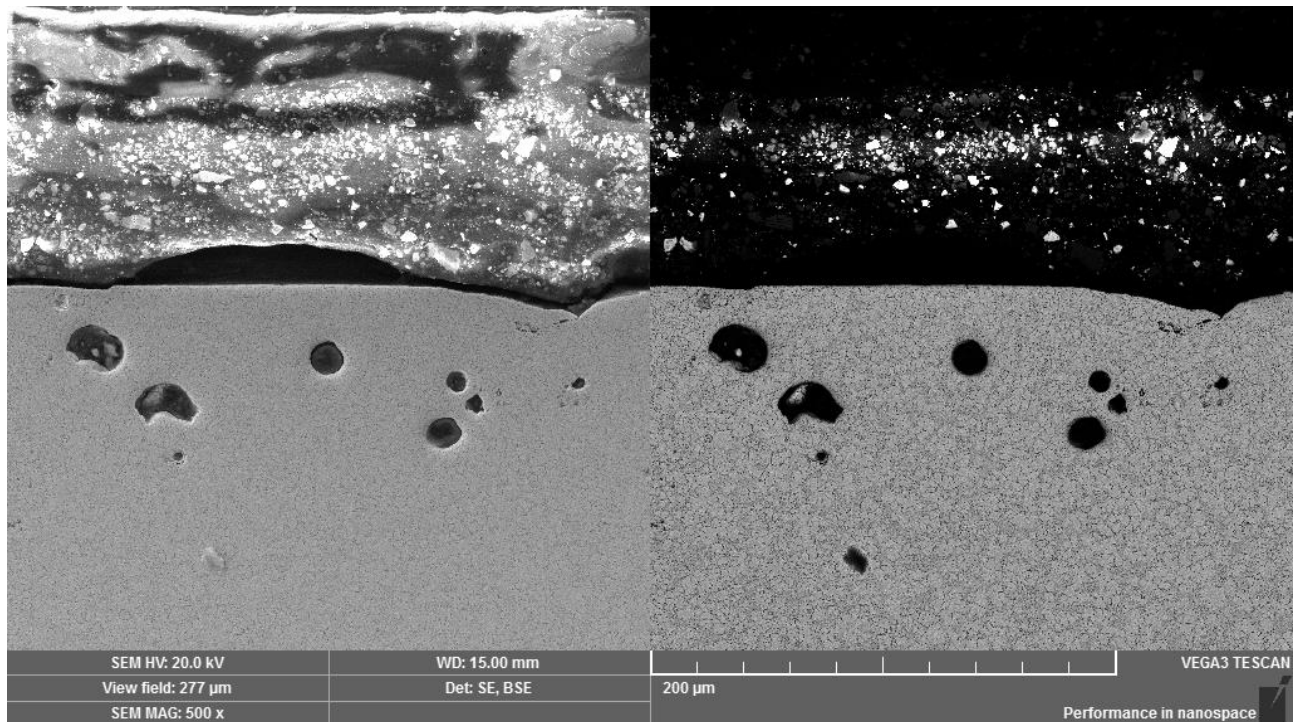


Fig. 7 Subsurface area – longitudinal section – pores, observed at 500x magnification

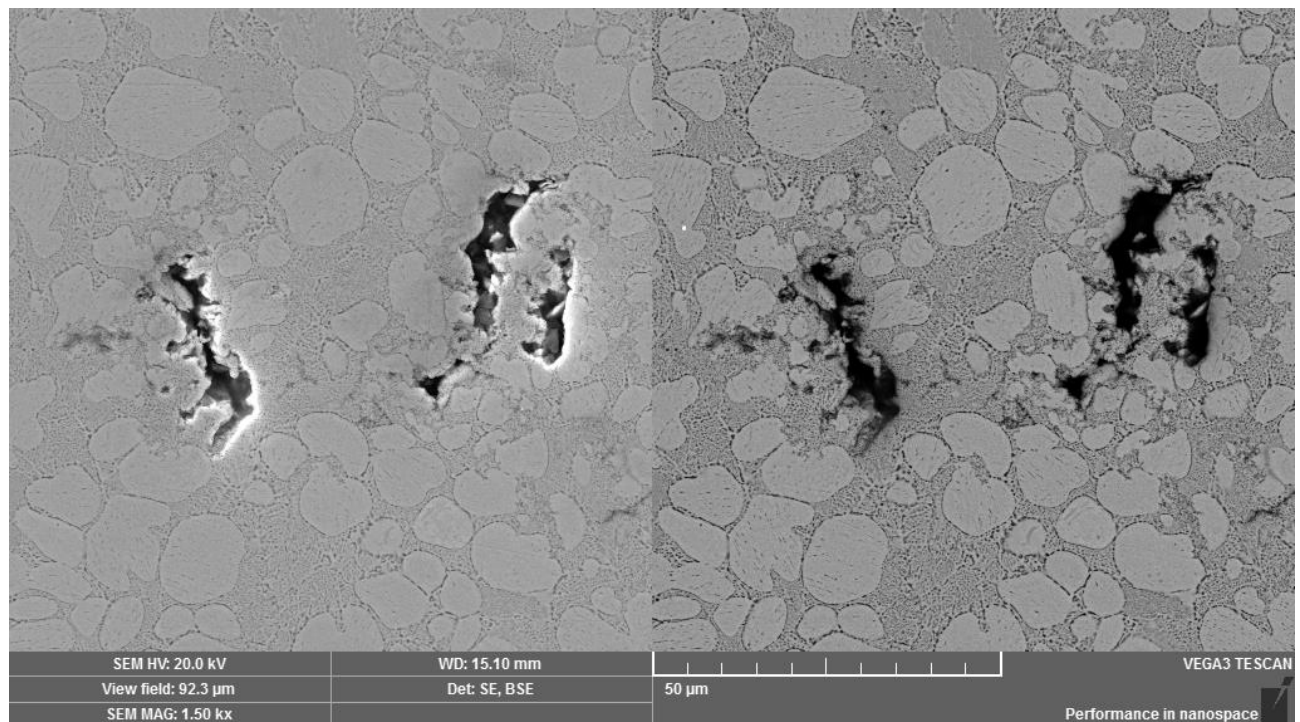


Fig. 8 Shrinkage defects – longitudinal section, 1500x magnification

In the transverse section (Fig. 9, 10), the defects occurred to a greater extent in the central area. The presence of pores of different sizes was observed. Their size reached a critical value, and their distribution in the zinc alloy indicates the agglomeration of these defects in areas with a higher number of them. The creation of porosity in castings depends on a combination of technological parameters. After solidification, the alloy has a higher density than in the liquid state, and as a result, gas is trapped inside the product. During the cooling and solidification of the material, shrinkage defects occur due to the lack of molten metal to replace the loss of the liquid phase in areas already enclosed by the solidified metal. Porosity very often occurs as a continuation of shrinkage defects, and therefore the measures that remove shrinkage defects are very effective for the elimination of porosity and vice versa. For example, in gravity casting of the melt, risers can be used to prevent the occurrence of such defects. If the molten metal could be transferred from the riser to the solidifying casting

without being interrupted by the premature solidification of a cross-section, the transfer would be ideal. To prevent porosity or shrinkage in the casting and ensure that any shrinkage is concentrated in the risers, it is essential to place at least one riser in each thermal node during the casting process. This placement ensures directed solidification, allowing the last metal to solidify within the risers rather than in the casting itself, thereby preventing serious defects [21, 22]. However, incorporating risers as a geometric parameter into the shape of the casting is not feasible with some casting methods. In such cases, it is important to precisely adhere to the optimal parameters directly related to the quality of the casting process and to consider all factors that can have a significant impact on ensuring the cohesiveness of the metal matrix of the final casting.

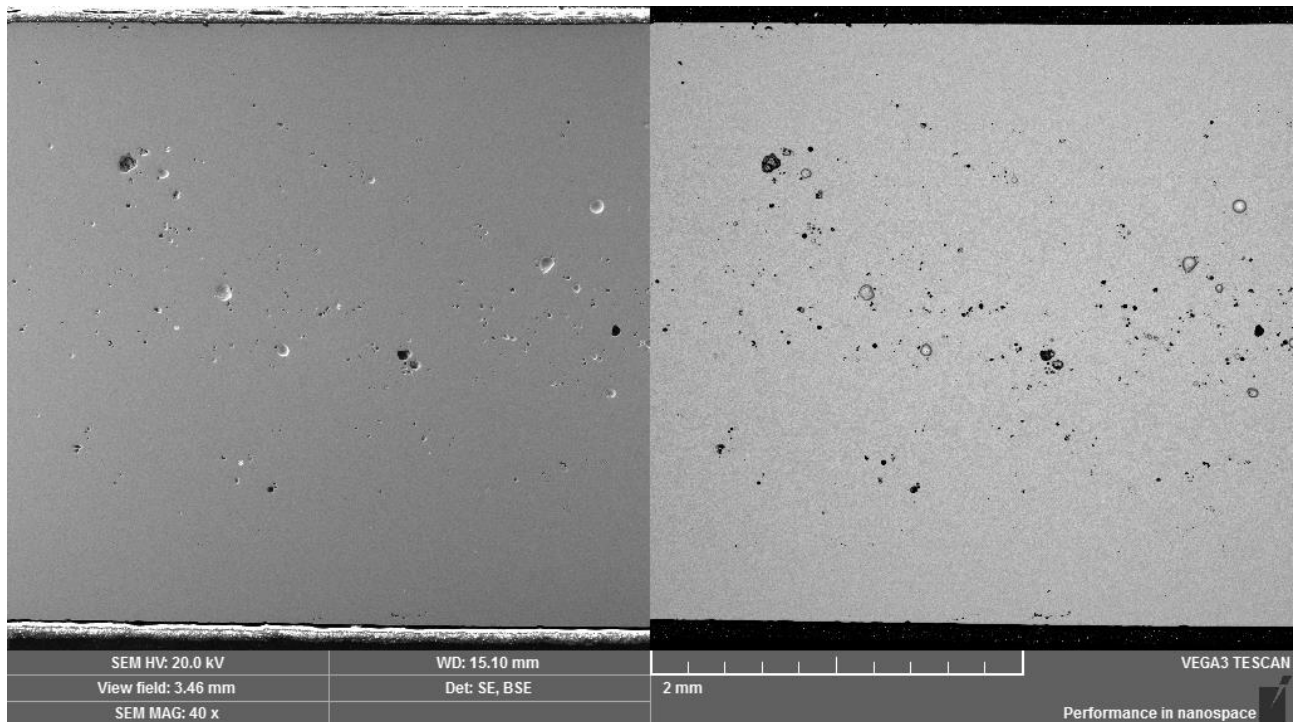


Fig. 9 Central area – transverse section, 40x magnification

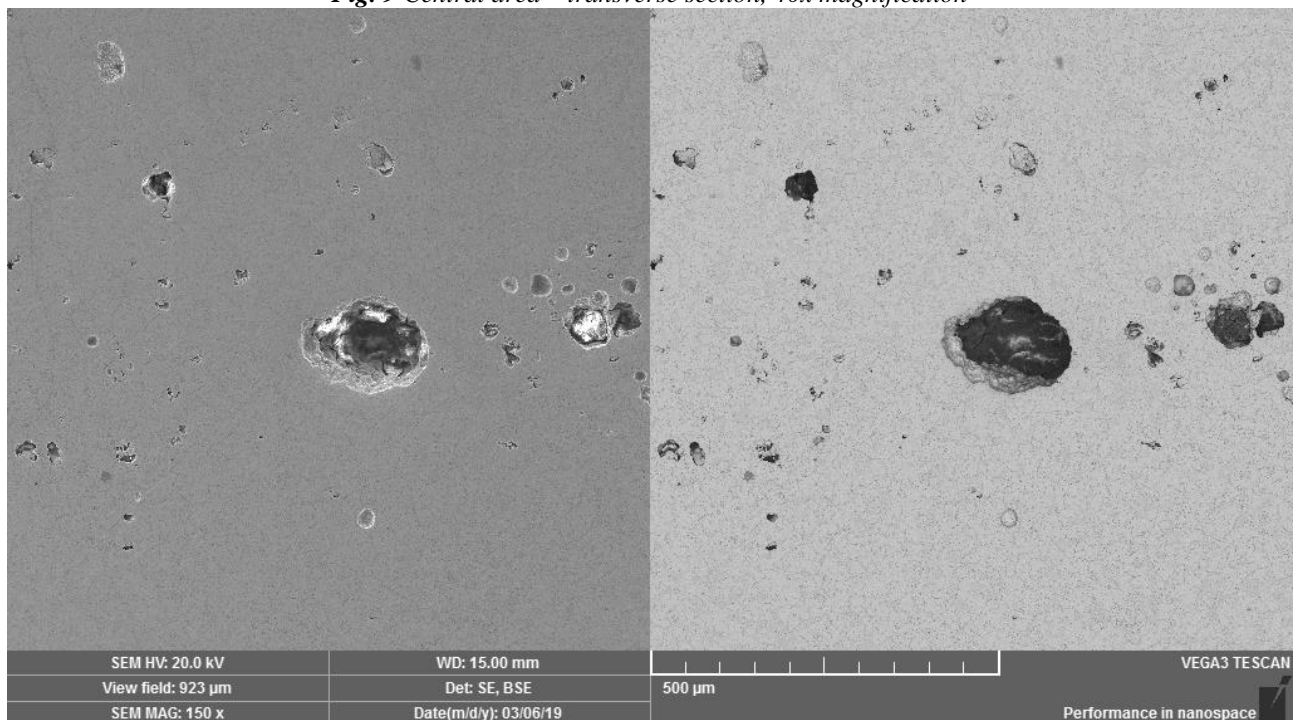


Fig. 10 Central area – transverse section – pores, 150x magnification

The chemical composition of the microstructure (Fig. 11) and the distribution map of individual elements (Fig. 12) were determined using the EDS method. This analysis was performed on the sample with a thermionic emission scanning electron microscope equipped and an EDX detector. Energy dispersive spectroscopy is an analytical technique used for chemical analysis of a sample. The accuracy of the EDS spectrum can be affected by various factors. The probability that X-rays will be emitted from the sample and thus be available for detection and measurement depends on the energy and intensity of the electron beam that is focused on the analysed area, on the flatness of the analysed area and on the working distance of the equipment. Inaccuracies may arise in this analysis if the correct equipment parameters are not followed and if sample characteristics are not properly considered [18, 19]. The EDX detector showed the presence of zinc, aluminium, oxygen and copper, which corresponds to the composition of the ZAMAK material. Carbon values are not precisely detectable by the EDS method. An increased percentage of aluminium content can affect higher values of strength and hardness of the material.

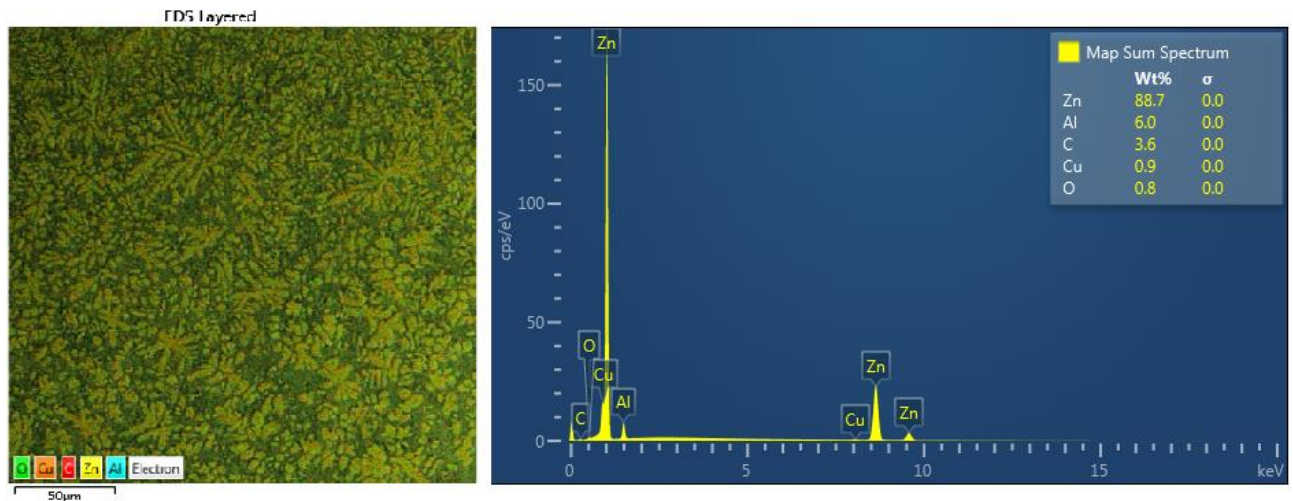


Fig. 11 Spectrum of chemical composition

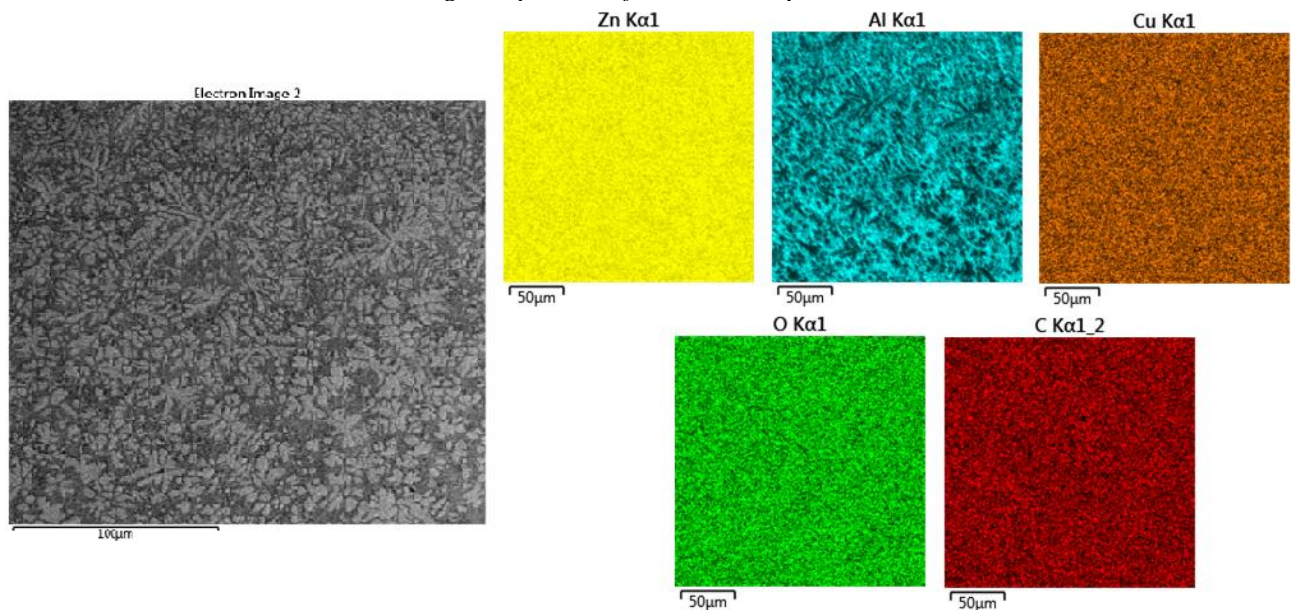


Fig. 12 Map of chemical elements

Furthermore, microstructure was evaluated to determine the presence and distribution of phases (Fig. 13). The microstructure is characterized by the size, shape, arrangement, amount, type and orientation of phases and defects of these phases. The structure and morphology of the precipitated phases in the alloy vary depending on the cooling conditions. The microstructure of this material consists of a light alpha phase and a dark beta phase. The alpha phase is made up mostly of zinc and a smaller part of aluminium. The beta phase has a visible dark morphology, which is made up largely of aluminium and also contains a smaller amount of zinc. The alloy consisted of a matrix rich in Zn (Pt. 1 in the Fig. 14), dark and dense areas enriched in Al (Pt. 2, 3, 4 in the Fig. 14) and bounded phases with a higher concentration of excluded Al along the grain boundaries (Pt. 5 in the Fig. 14). The copper was evenly distributed in the microstructure, as copper has a very good solubility in the metal.

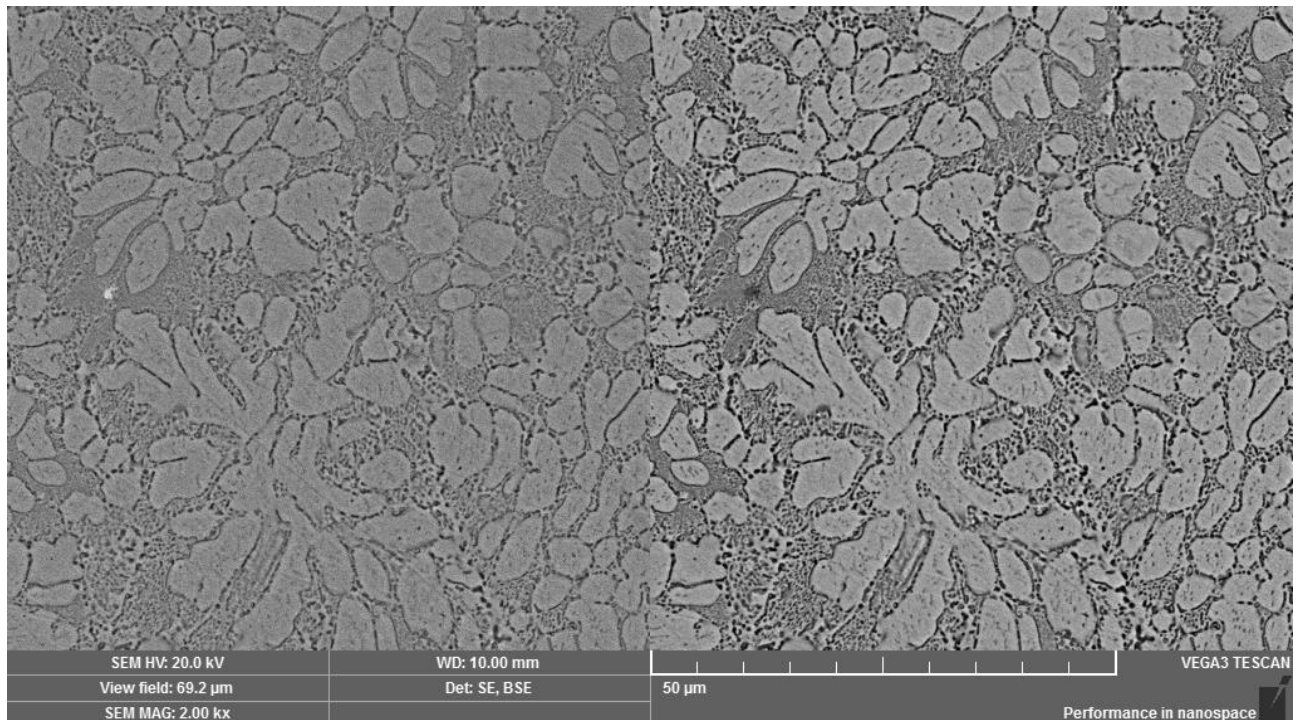


Fig. 13 Evaluation of zinc alloy microstructure, 2000x magnification

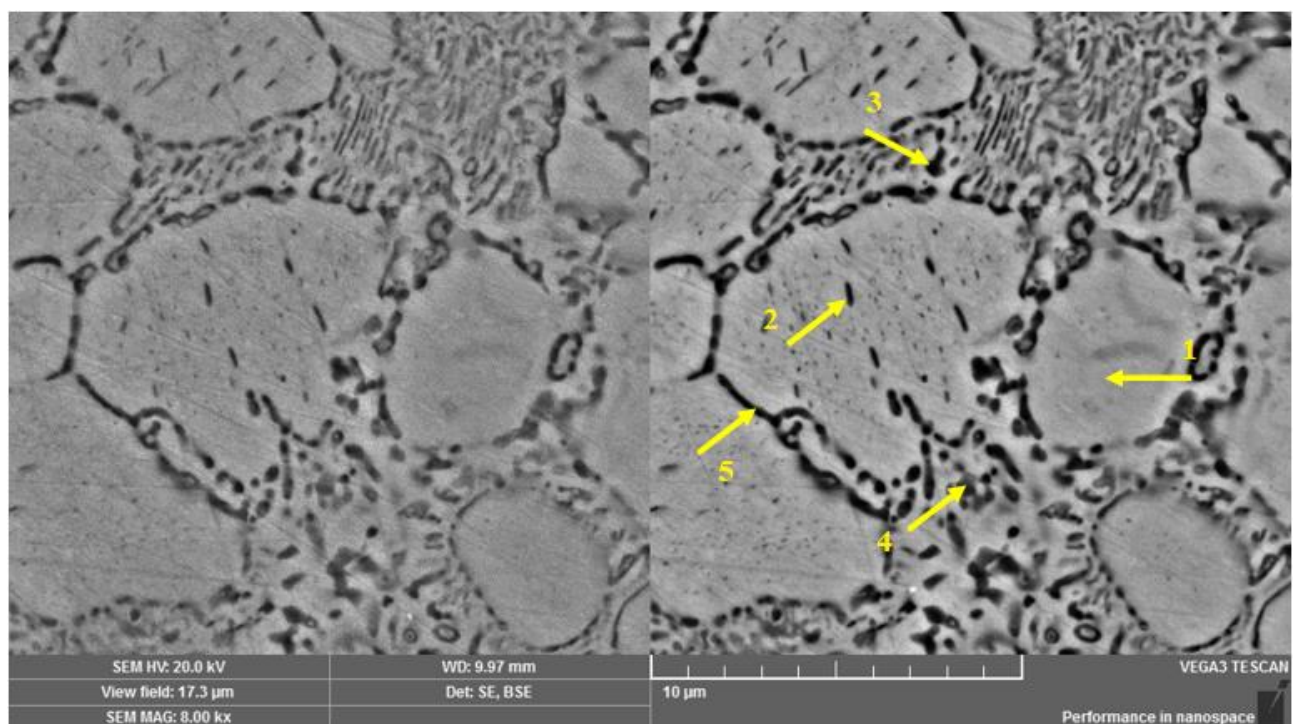


Fig. 14 Evaluation of zinc alloy microstructure, 8000x magnification

The surface of the examined hinge was treated with a powder coating. In the unetched state, the thickness of the surface layer (Fig. 15) and its chemical composition (Fig. 16, 17) were measured. The layer appeared to be uniform and continuous around the entire perimeter of the measured sample of the investigated part. However, the adhesive bond between the layer and the base material is very low. A significant empty microspace is visible along the entire analysed area, indicating imperfections in the coating and zinc alloy connection. Due to improper implementation of the surface treatment, it is highly likely that the coating layer will peel off under operating conditions. Additionally, visible microcracks on the surface of the casting, combined with the absence of a surface layer, could negatively affect the chemical homogeneity in the microcracked areas, thereby compromising the cohesiveness of the matrix.

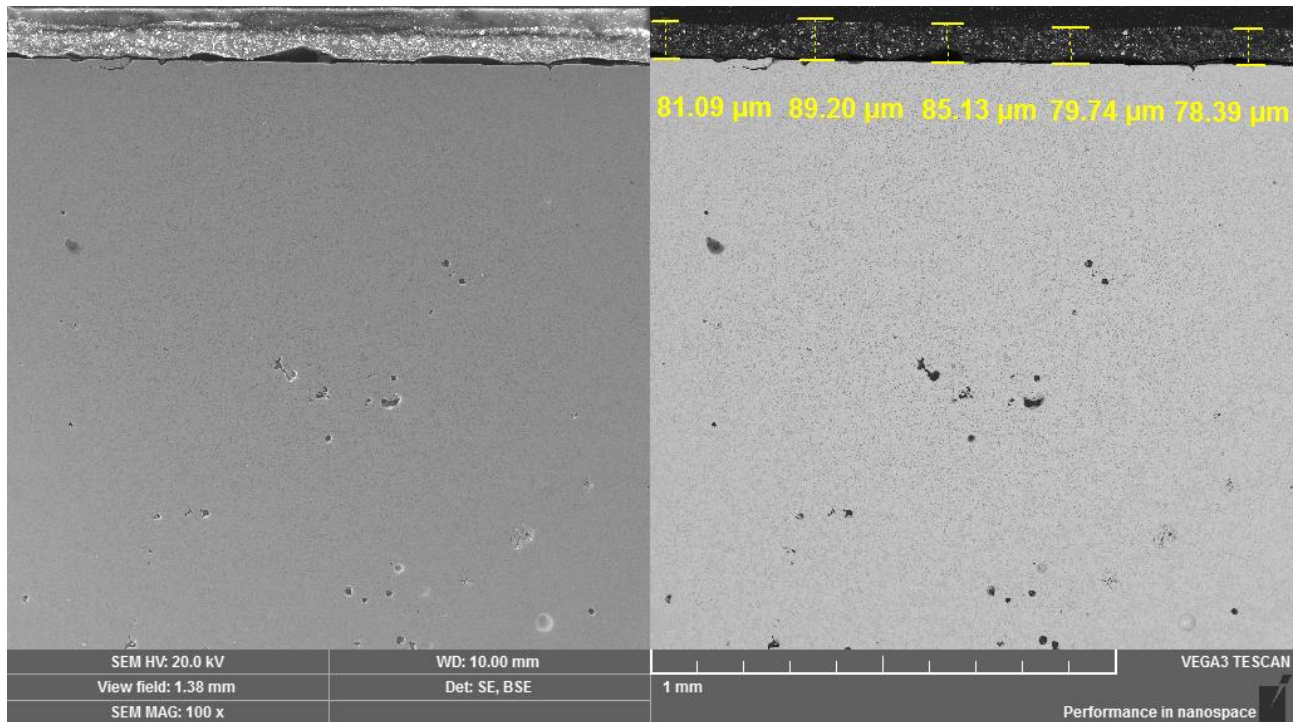


Fig. 15 Measurement of the surface layer

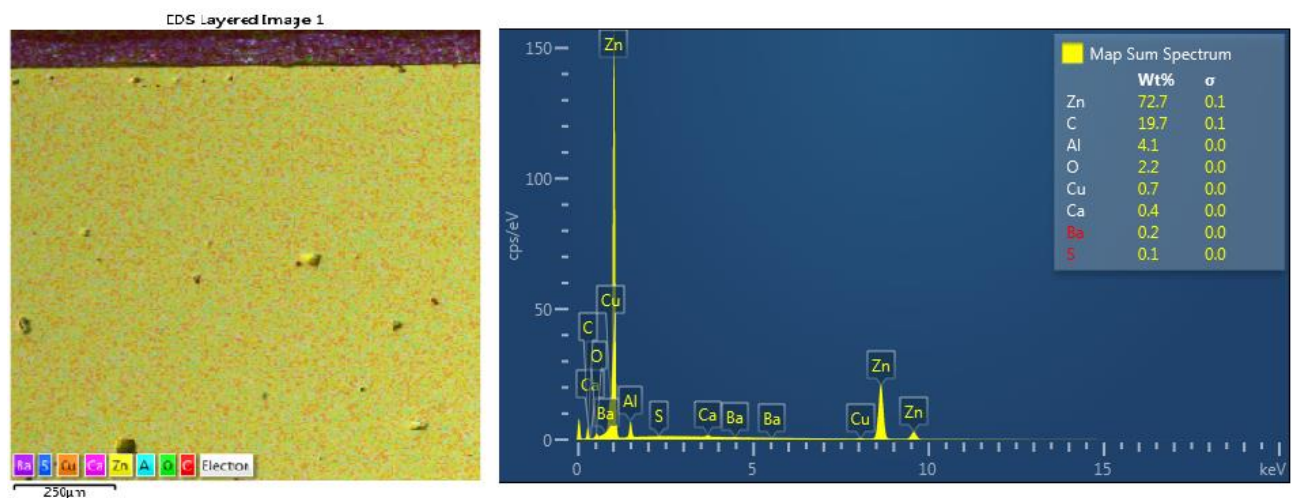


Fig. 16 The spectrum of chemical elements

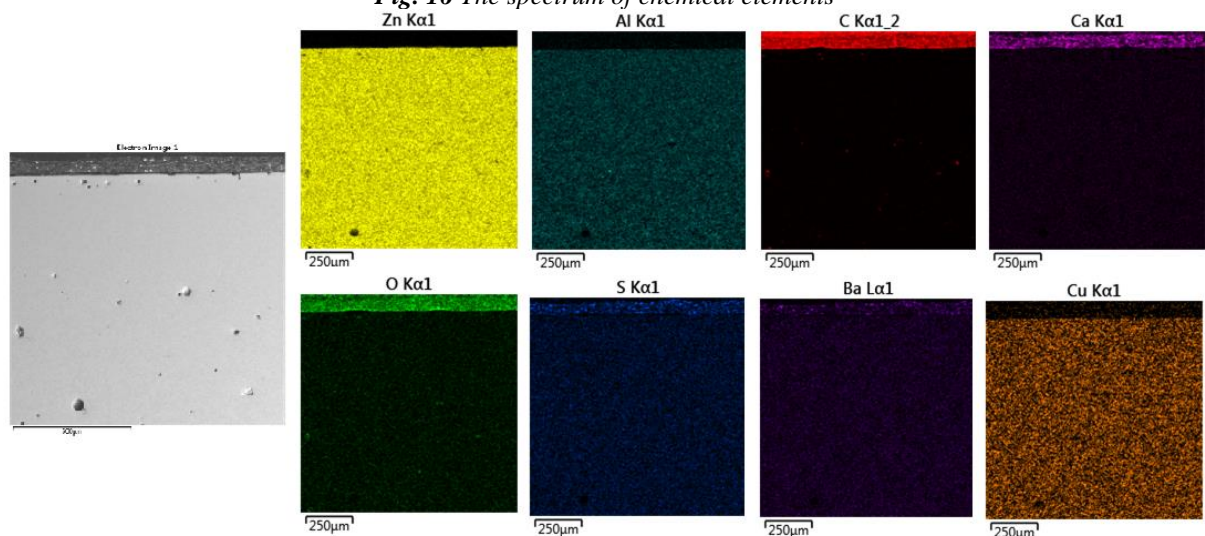


Fig. 17 Map of chemical elements

Hardness test of the Zn-Al alloy

A Vickers hardness test was performed on the broken hinge. This method is considered the most accurate due to small differences in the hardness of the tested material. The test according to Vickers HV1 was carried out in the longitudinal section of the sample in five places using the V10 K/AQ device according to the ISO 6507-1:2023 standard. The places of the indenter indentation were located from the edge to the centre of the sample with a shift of one and a half times the size of the indentation. This approach ensures that hardness measurements remain unaffected by material deformation hardening. Metallographic grinding was used to prepare samples in order to avoid inaccuracies in the measured hardness. The results show that the average value of the hardness of the examined sample was 91 HV1 (Tab. 1, Fig. 18), which corresponds to the hardness of ZAMAK 5 material.

Tab. 1 Hardness test of the Zn-Al alloy

Samples	Pt 1	Pt 2	Pt 3	Pt 4	Pt 5	Average
HV1	93	96	91	83	92	91

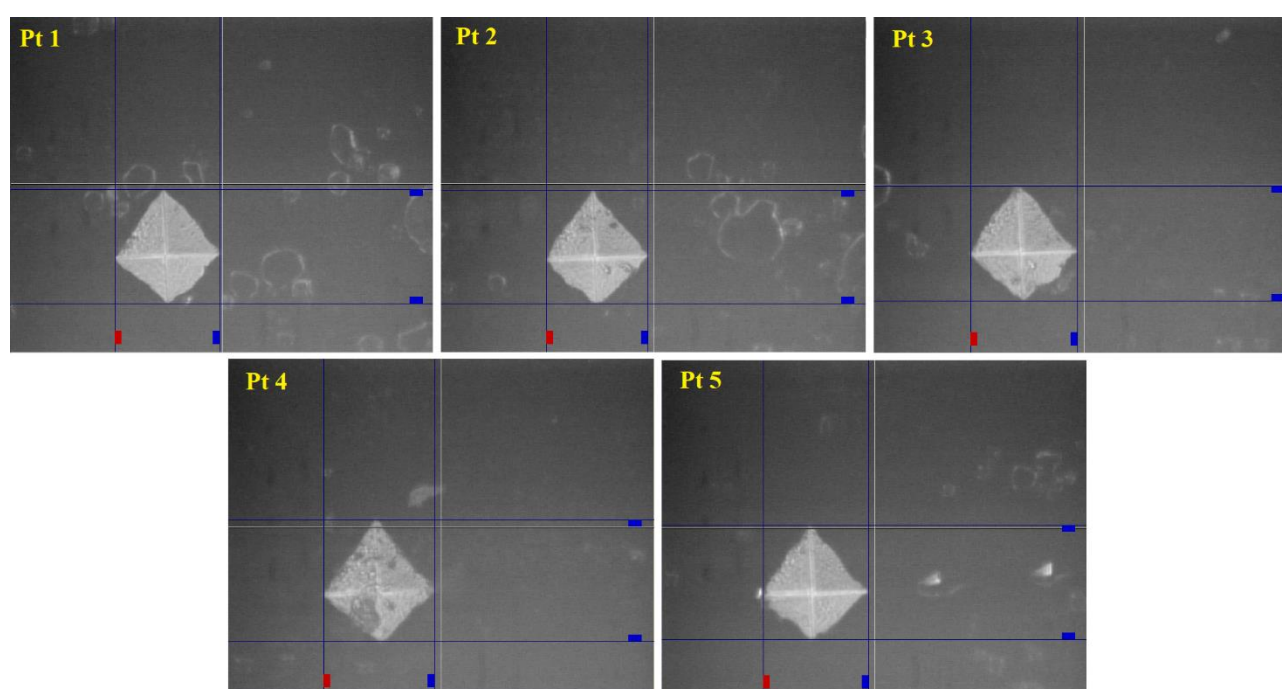


Fig. 18 Hardness measurement – location of indentations

Conclusion

The aim of this paper is to evaluate the material quality of the zinc alloy used for the door-hanging hinge of an electric distribution box, which is produced using casting technology. This analysis was motivated by the numerous breakages observed during the installation of the hinges from one series. The SEM analysis using a Vega3 Tescan scanning electron microscope was used for evaluation. In both the longitudinal and transverse sections of the sample, visible porosity and shrinkage were observed concentrated in the central and subsurface areas of the sample taken from the broken part of the hinge. These defects in the material are visible as a number of small unevenly distributed voids, which can cause undesirable properties and subsequent failure. The shrinkage defects cause a weakening of the load-bearing cross-section of the part. They are stress concentrators, and reduce fatigue strength, ductility and worsen pressure tightness. It is not possible to completely eliminate them, but their occurrence can be limited mainly by sufficient supply of the melt into the metal die. The problem with zinc alloys is the content of gases enclosed in the material of the castings, which is created during cooling and ongoing crystallization. This can be mitigated by applying increased pressure to the alloy melt, which is injected into the steel die of the casting, thereby expelling the excess gas from the casting. In some production processes, this technological step is underestimated or deliberately omitted to shorten the production cycle and reduce equipment wear and tear. As a result, the quality of the produced castings decreases, leading to frequent complaints. If the proportion of castings with defects exceeds the acceptable threshold, improperly configured precision pressure casting technology can result in significant economic losses for companies and negatively impact production flow. It is also important to assess

the negative decline in the essential physical and mechanical properties of castings, which cease to fulfil their function in operating conditions. When castings are required to meet functional properties with a focus on safety, as in the case of the analysed hinges, it is essential to ensure that a significant proportion of pores and shrinkage does not occur in the material.

Acknowledgement

This research work has been supported by the Cultural and Educational Grant Agency of the Slovak Republic project KEGA 003TnUAD-4/2022 “Simulations of basic and specific experiments of polymers and composites based on experimental data in order to create a virtual computational-experimental laboratory for mechanical testing”.

References

- [1] ROUČKA, J. Metallurgy of nonferrous alloys. 2004 p. 147. CERM Publisher, Brno. ISBN 80-214-2790-6
- [2] TRPČEKOVÁ, J., Nonferrous metals. [online]. [cit. 2024-03-20]. Available on: <https://urt.fmmr.tuke.sk/content/studium/vyuka/NK/NK.pdf>
- [3] European Standard. EN 12844:1999. Zinc and zinc alloys - Castings - Specifications
- [4] LOSERTOVIÁ, M., Production and properties of nonferrous metals. VŠB-TU Ostrava. [online]. 2013. [cit. 2024-03-20]. Available on: <https://docplayer.cz/2843748-Vyroba-a-vlastnosti-nezelezných-kovu.html>
- [5] Zinc die casting alloys. [online]. [cit. 2024-03-20]. Available on: <http://www.albco.com/wp-content/uploads/2018/01/ZINC-DIE-CASTING-ALLOYS.pdf>
- [6] Zinc metal properties. [online]. [cit. 2024-03-22]. Available on: <https://galvanizeit.org/design-and-fabrication/design-considerations/zinc-metal-properties/#thermalproperties>
- [7] DYNACAST. Stress and strain of die cast alloys. [online]. 2019. [cit. 2024-04-05]. Available on: Stress-Strain of Die Casting Alloys | Die Casting Company | Dynacast
- [8] High pressure die casting. [online]. [cit. 2024-04-05]. Available on https://zlievarenstvo.mtf.stuba.sk/?page_id=995&lang=en
- [9] STANČEK, L.: Technology 1. Bratislava, STU, 2006. 134 s. ISBN 80-227-2350-9.
- [10] MALIK, J. a kol.: Special technologies in foundry. Košice, TU, 2010. 186 s. ISBN 978- 80-553-0397-0.
- [11] BOLIBRUCHOVÁ, D., PASTIRČÁK, R., Foundry metallurgy of non-ferrous metals. University of Žilina in Žilina, 2018. 167 s. ISBN 978-80-554-1463-8
- [12] PINC, J., ŠKOLÁKOVÁ, A., PETR VEŘTÁT, P., ČAPEK, J., ŽOFKOVÁ, Z., RIESZOVÁ, L., HABR, S., VOJTECH, D. Microstructural characterization and optimization of the ZnMg0.8(CaO)0.26 alloy processed by ball milling and subsequent extrusion. Manufacturing Technology. 2020, 20(4):484-491. DOI: 10.21062/mft.2020.085
- [13] OLŠOVSKÝ, M.: Basics of surface treatment of metals. Nováky: MSM Martin, 2015. 51 s. ISBN 978-80-971929-9-0.
- [14] CROOKES, R.: Passivating pickling. 1st. ed. Lucemburk : Euro Inox, 2007. 12 p. ISBN 978-2-87997-224-4.
- [15] SCHWARB, R. a KNOBLAUCH, M. New Opportunities for UV-Curable Powder Coatings [online]. 2011 [cit. 2024-04-16]. Available on: http://www.coatingsworld.com/issues/2011-05/view_features/new-opportunities-foruv-curable-powder-coatings
- [16] Catalog Defects [online]. 2024. [cit. 2018-04-16]. Available on: <https://www.katalogvad.cz>
- [17] Paint and Coating Manufacture. [online]. 2022 [cit. 2024-04-15]. Available on: <http://www.iloencyclopaedia.org/component/k2/item/380-paint-and-coatingmanufacture>
- [18] MICHNOVA, L., LUKAC, I. Application Fractography and EDS Analyses for Quality Control of the Castings Made of AlSi7Mg0.3 Aluminium Alloy. Manufacturing Technology. 2017;17(6):916-918. DOI: 10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/6/916. IS
- [19] NCK MATCA. Scanning electron microscope (SEM). [online]. 2024, [cit. 2024-22-04]. Available on: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/sem>
- [20] STANČEK, L. Technology I – Casting. STU Bratislava, 2006, p. 134, ISBN 80-227-2350-9
- [21] BOLIBRUCHOVÁ, D., Foundry technology.ZU Žilina, 2017, p. 306, ISBN 978-80-554-1268-9
- [22] Czech technical standard, ČSN 421240. Casting errors. Nomenclature and classification of defects.

Design of heat exchanger and CFD analysis

Daniela Košťaliková (0000-0003-4981-7698)¹, Mariana Janeková (0000-0002-9380-2760)¹, Dana Bakošová, (0000-0003-2936-8637)¹, Petra Dubcová (0000-0003-3450-3290)¹, Patrik Pilár¹

¹Faculty of Industrial Technologies in Púchov, Alexander Dubček University of Trenčín. I. Krasku 491/30, 020 01 Púchov. Slovakia. E-mail: daniela.kostialikova@tnuni.sk, mariana.janekova@tnuni.sk, dana.bakosova@tnuni.sk, petra.dubcova@tnuni.sk, patrik.pilar@student.tnuni.sk

The work deals with the simulation of the liquid flow of the shell-and-tube heat exchanger in the Solid-works program using CFD analysis in order to achieve cooling of the liquid to a given temperature. By means of the CFD analysis the fluid flow inside the exchanger and the heat exchange between the two fluids was simulated. The different parameters of the simulations as change in mass flow rate, shape of the model, shape of tube storage, shape of partitions, change of material and geometry of the model were evaluated to achieve desired temperature of the cooled liquid. Concentric baffles proved to be a more suitable choice of baffles in our model. The overall importance of baffles in heat exchangers is justified as our results show. After changing the tubes from square to triangular placement, we found from the simulations that the heat exchange efficiency decreased significantly. This finding proved to us that the number of tubes placed in the heat exchanger is not crucial, especially when it comes at the expense of reducing the surface area for the coolant flow.

Keywords: SolidWorks, CFD analysis, Shell and Tube Heat Exchanger, Baffle

Introduction

Heat exchangers are primarily used to exchange heat between different heat transfer media. Shell and tube heat exchangers are relatively simple to manufacture, and have multi-purpose application possibility when compared with other types of heat exchangers [1-2]. It is reported that more than 30 % of the heat exchangers in use are of the shell-and-tube type [3-4]. The design of the heat exchanger is very important and almost always determines the efficiency and functionality of the whole system [5-6].

Baffles play a significant role in shell and tube heat exchanger assembly. They provide support for tubes, enable a desirable velocity to be maintained for the shell-side fluid flow, and prevent the tubes from vibrating. However, the single segmental baffles have some inherent defects since the structure has some limits:

- Fouling is formed in the stagnation zone near the shell wall and the rear of baffle plates.
- Large pressure drop results from baffles' impeding the fluid flow and the flow separation occurs near the baffle edge. Hence higher pumping power is often needed to offset the higher pressure drop under the same heat load.
- Significant bypass streams and leakage streams due to manufacturing tolerances.
- Short operational lifetime as a result of flow induced tube vibration.

Therefore, it is necessary to investigate other baffles to lower the shell side pressure drop and hence the operating cost of heat exchanger [7]. Various types of baffles are enlisted in literature. Some of the commonly used are segmental, double segmental, triple segmental, doughnut type, helical type, double helical and flower type. When traditional segmental baffles are used in shell and tube heat exchanger, higher pumping power is often needed to offset higher pressure drop under same heat load [8-11].

There are different arrangements of the tubes such as square, triangle or circle [12-14].

SolidWorks Flow Simulation enables fast and efficient simulation of heat transfer and flow of different substances using CFD analysis. The program allows to view the forces exerted by gases and liquids and then understand the effect on a given modelled product, addressing flow analysis that can be part of the design of various processes. This reduces the cost of creating different prototypes, helps to eliminate initial product defects, saves time and reduces development costs [15].

Experiment

The aim of the work was to design a shell and tube heat exchanger, which is part of a cooling circuit. Design procedure was as follows:

- to create a 3D model of the heat exchanger in Solidworks,
- to carry out a CFD simulation in Solidworks and use this simulation to analyze the actual process of temperature exchange between the two media and thus verify the efficiency and functionality of the de-signed heat exchanger.

The heat exchanger has been designed for water-water media and has a heat sink function. The structural model was made according to the custom design with standard dimensions. In the basic design, segmented baffles and tubes arranged in a square were used. The input parameters are shown in the tab. 1.

Tab. 1 Initial setpoints

Inlet temperature of the cooled medium	$t_{11} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$	setpoint
Outlet temperature of the cooled medium	$t_{12} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	desired value
Temperature of the cooling medium at the inlet	$t_{21} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	setpoint
Mass flow rate of the cooled medium:	$M_1 = 5\text{ kg/s}$	design value
Mass flow rate of the cooling medium	$M_2 = 5\text{ kg/s}$	design value

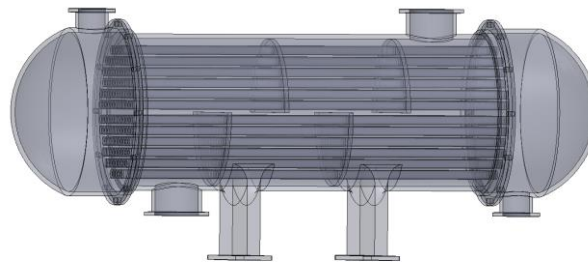


Fig. 7 Heat exchanger model

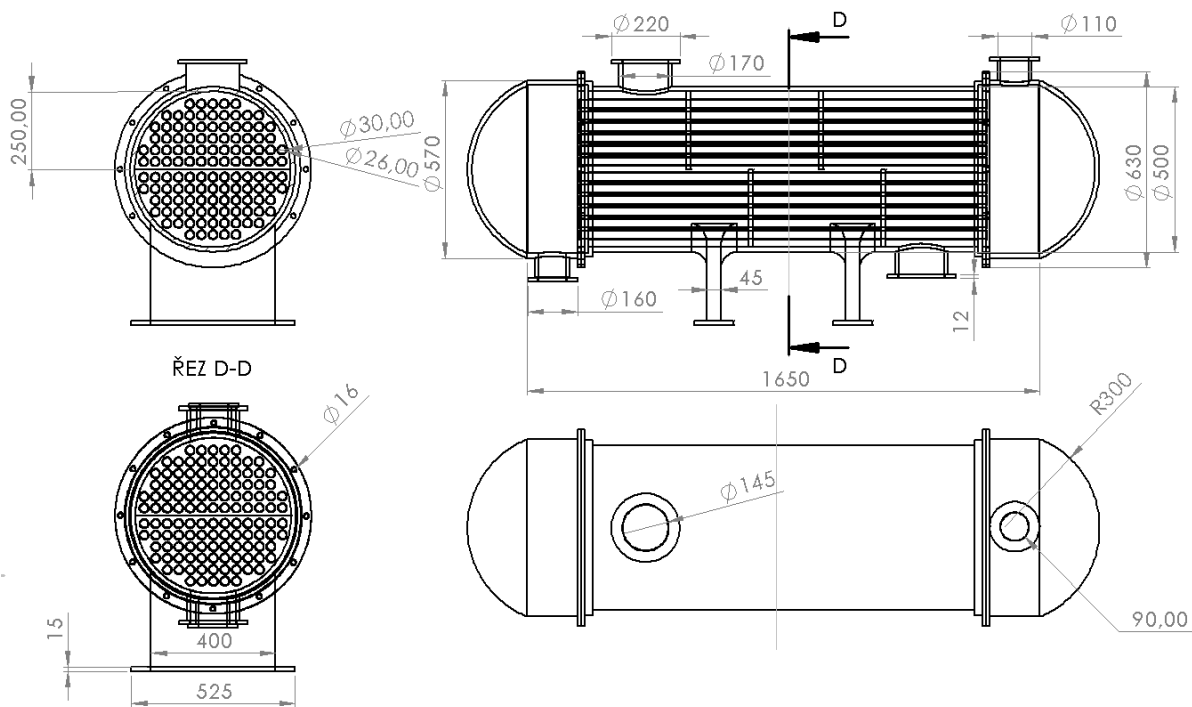


Fig. 8 Heat exchanger sketch

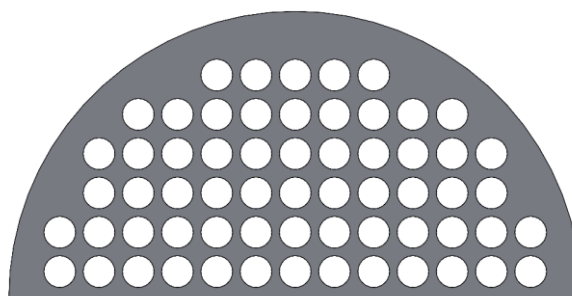
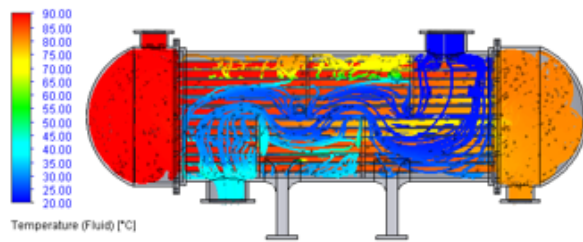


Fig. 9 Single segmental baffle

The shell and tube heat exchanger is one of the simplest types of heat recovery heat exchangers. In Solidworks, we have created a structural model of the heat exchanger, which is composed of individual parts. The cover (lid) (Figure 1) of the heat exchanger is located on the left and right side of the heat exchanger. The cooled fluid enters the opening on the left side of the heat exchanger and after the subsequent temperature exchange on the right side, it exits through the second opening with a lower temperature. The next part is the interior itself. This is the main working part where the greatest temperature exchange between the two fluids takes place.

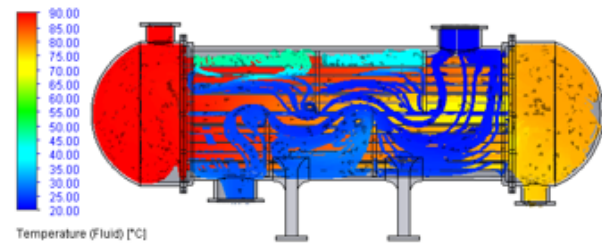
In this section, the individual tubes of the exchanger (124 pcs, tube length: 1310 mm, tube inner diameter: \varnothing 26 mm, tube outer diameter: \varnothing 30 mm) are placed horizontally. We have designed their arrangement in the tubes in a square. The specified material was copper. The surface of the tubes forms a heat exchange surface for heat transfer between the working substances. Four segmented baffles Fig. 3 are placed in the intertube space. Their main function is to slow the fluid movement, mix the fluids and extend the path of the flowing fluid. The baffles also serve to support the tubes to prevent them from bending and vibrating, which would subsequently damage the heat exchanger. The last part is the so-called cover of the heat exchanger, which acts as a protective cover for the inside of the heat exchanger and at the same time the fluid flows in it. There is a non-contact heat exchange with the fluid flowing inside the heat exchanger tubes. On the outer part of the shell there are pedestals which serve to fix the heat exchanger.

The finished 3D model with the internal view is shown in Fig. 1, Fig. 2 shows a sketch of the heat exchanger with its basic dimensions. The final shape of the heat exchanger model was achieved using an assembly. This model then allowed us to proceed with the CFD simulation itself.



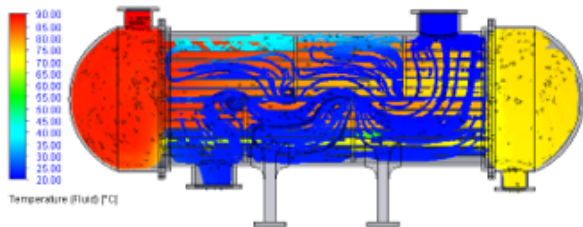
A Simulation n.1 – Initial simulation

Inlet temperature of the cooled medium: $t_{11} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Inlet temperature of the cooling medium: $t_{12} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Mass flow rate of the cooled medium: $M_1 = 5\text{ kg/s}$
 Mass flow rate of the cooling medium: $M_2 = 5\text{ kg/s}$
 Outlet temperature – cooled medium: $t_{12} = 79.84\text{ }^{\circ}\text{C}$



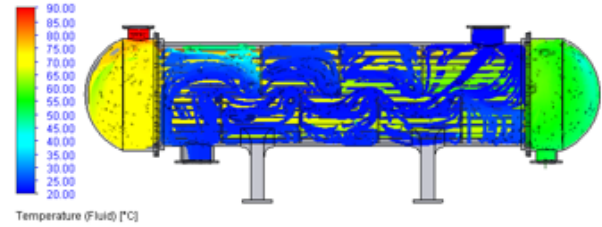
B Simulation n.2 – Mass flow change

Inlet temperature of the cooled medium: $t_{11} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Inlet temperature of the cooling medium: $t_{12} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Mass flow rate of the cooled medium: $M_1 = 4\text{ kg/s}$
 Mass flow rate of the cooling medium: $M_2 = 8\text{ kg/s}$
 Outlet temperature – cooled medium: $t_{12} = 75.91\text{ }^{\circ}\text{C}$



C Simulation n. 3 – Mass flow change

Inlet temperature of the cooled medium: $t_{11} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Inlet temperature of the cooling medium: $t_{12} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Mass flow rate of the cooled medium: $M_1 = 2\text{ kg/s}$
 Mass flow rate of the cooling medium: $M_2 = 12\text{ kg/s}$
 Outlet temperature – cooled medium: $t_{12} = 73.72\text{ }^{\circ}\text{C}$



D Simulation n. 4 – Change of the exchanger length

Inlet temperature of the cooled medium: $t_{11} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Inlet temperature of the cooling medium: $t_{12} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Mass flow rate of the cooled medium: $M_1 = 2\text{ kg/s}$
 Mass flow rate of the cooling medium: $M_2 = 12\text{ kg/s}$
 Outlet temperature – cooled medium: $t_{12} = 52.56\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 10 CFD simulations A – D

After completing the simulation, we found that the input parameters were correct, and no error was found in the geometry of the heat exchanger and in its input simulation parameters. In Figure 4A, we can see that the outlet average temperature of the cooled fluid after the temperature exchange is $t_{12} = 79.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ at a mass flow rate of $M_1 = 5\text{ kg/s}$.

For simulation no. 2, we decreased the cooled medium mass flow rate to $M_1 = 4\text{ kg/s}$ while increasing the coolant flow rate $M_2 = 8\text{ kg/s}$. The subsequent result at the end of the simulation (Fig. 4B) was an average coolant temperature at the outlet of the heat exchanger of $t_{12} = 75.91\text{ }^{\circ}\text{C}$.

For simulation no. 3, we further decreased the cooled medium mass flow rate to $M_1 = 2\text{ kg/s}$ and increased the coolant flow rate to $M_2 = 12\text{ kg/s}$. From the result of the third (Fig. 4C) simulation, we found that the cooled medium temperature was $t_{12} = 73.72\text{ }^{\circ}\text{C}$. By decreasing the cooled medium mass flow rate while further increasing the coolant flow rate, the resulting cooled medium temperature was only minimally reduced compared to the values in simulation no. 2.

Even after specifying a significantly higher cooling mass flow rate and then slightly reducing the coolant mass flow rate, we did not reach our stated target of $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

To achieve the desired results, we concluded that we would need to adjust the dimensions (Figs. 5, 6) of our heat exchanger. We extended the heat exchanger by 600 mm and added more baffles. This step should increase the heat exchange time, making the heat exchange between the two fluids more efficient. The addition of three more baffles should also help to increase the efficiency of the heat exchange, which causes the trajectory of the flowing fluid to lengthen and consequently slow down. We chose the same mass flow rate values as in the third simulation. At the end of the simulation, we found that the temperature of the cooled liquid at the outlet is approximately $t_{12} = 52.56\text{ }^{\circ}\text{C}$. This result has almost essentially achieved our stated objectives. These achieved results demonstrate that lengthening the heat exchanger and also adding baffles will indeed significantly improve the efficiency of heat exchange between the fluids (Fig. 4D).

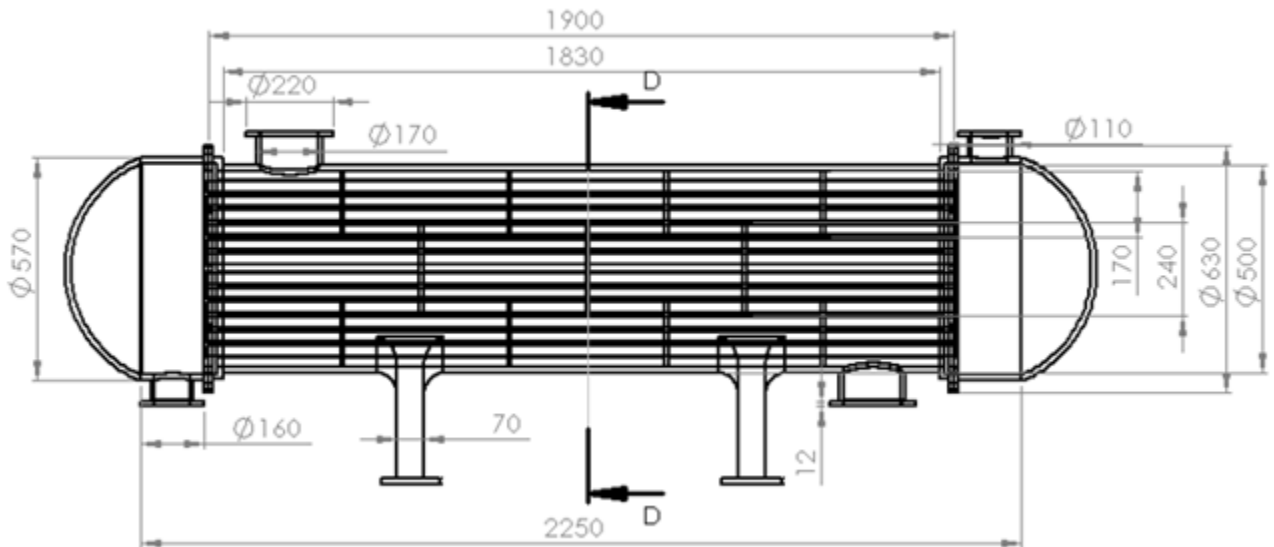


Fig. 11 Sketch of a heat exchanger with concentric baffles

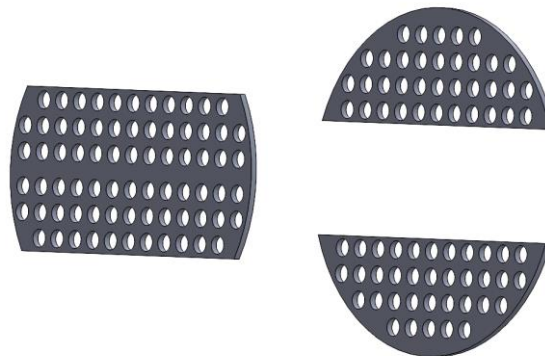
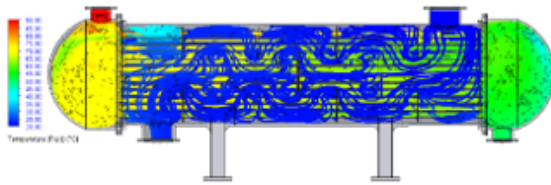


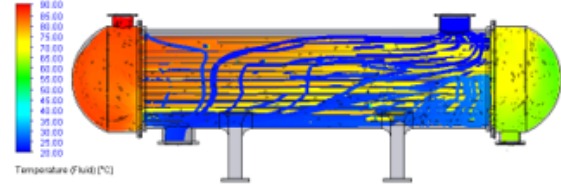
Fig. 12 Double segmental baffles

For simulation no. 5, we chose the same mass flow rate as in the previous last simulations but changed the baffle type from segmented to double segmental baffles (Fig. 6). Double segmental baffles are made of alternating disks and rings. Usually, the size of the cross-section between the shell and the disk is chosen to be the same as the cross-section in the ring bore. After the simulation (Fig. 7E), we obtained an average result of the cooled medium $t_{12} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. This result can already be considered as achieving our stated goal. Double segmental baffles proved to be better for our heat exchanger to achieve a more efficient cooling of the hot liquid.



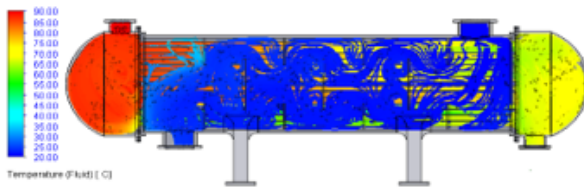
E Simulation n. 5 – Changing type of baffles

Inlet temperature of the cooled medium: $t_{11} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Inlet temperature of the cooling medium: $t_{21} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Mass flow rate of the cooled medium: $M_1 = 2\text{ kg/s}$
 Mass flow rate of the cooling medium: $M_2 = 12\text{ kg/s}$
 Outlet temperature – cooled medium: $t_{12} = 50.00\text{ }^{\circ}\text{C}$



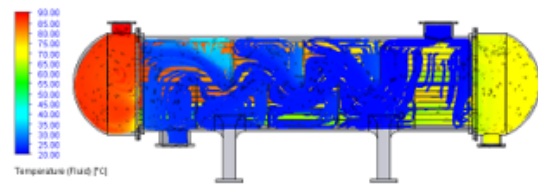
F Simulation n. 6 – Without baffles

Inlet temperature of the cooled medium: $t_{11} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Inlet temperature of the cooling medium: $t_{21} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Mass flow rate of the cooled medium: $M_1 = 2\text{ kg/s}$
 Mass flow rate of the cooling medium: $M_2 = 12\text{ kg/s}$
 Outlet temperature – cooled medium: $t_{12} = 63.51\text{ }^{\circ}\text{C}$



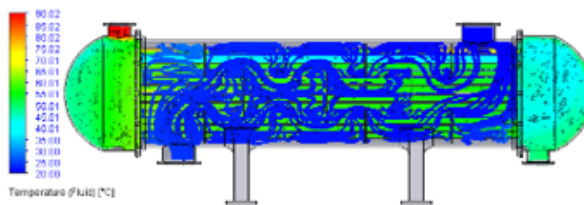
G Simulation n.7 – Triangular tube placement, concentric baffles

Inlet temperature of the cooled medium: $t_{11} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Inlet temperature of the cooling medium: $t_{21} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Mass flow rate of the cooled medium: $M_1 = 2\text{ kg/s}$
 Mass flow rate of the cooling medium: $M_2 = 12\text{ kg/s}$
 Outlet temperature – cooled medium: $t_{12} = 67.25\text{ }^{\circ}\text{C}$



H Simulation n.8 – Triangular tube placement with segments baffles

Inlet temperature of the cooled medium: $t_{11} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Inlet temperature of the cooling medium: $t_{21} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Mass flow rate of the cooled medium: $M_1 = 2\text{ kg/s}$
 Mass flow rate of the cooling medium: $M_2 = 12\text{ kg/s}$
 Outlet temperature – cooled medium: $t_{12} = 67.96\text{ }^{\circ}\text{C}$



I Simulation n.9 - Change of orientation of the model

Inlet temperature of the cooled medium: $t_{11} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Inlet temperature of the cooling medium: $t_{21} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Mass flow rate of the cooled medium: $M_1 = 2\text{ kg/s}$
 Mass flow rate of the cooling medium: $M_2 = 12\text{ kg/s}$
 Outlet temperature – cooled medium: $t_{12} = 49.25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 13 CFD simulations E - I

Before running the next simulation, we changed the shape of the tube placement. In the previous simulations, our model had the tubes placed in a square shape in the tube house. For the new simulation, we chose a triangular shape for the placement of the tubes in the tubehouse. The tube box with square tube placement contained 124 tubes and the new tube box with triangular tube placement (Fig. 7) has 136 tubes. This shows us that the triangular tube placement allows us to increase the number of tubes placed in the tube box.

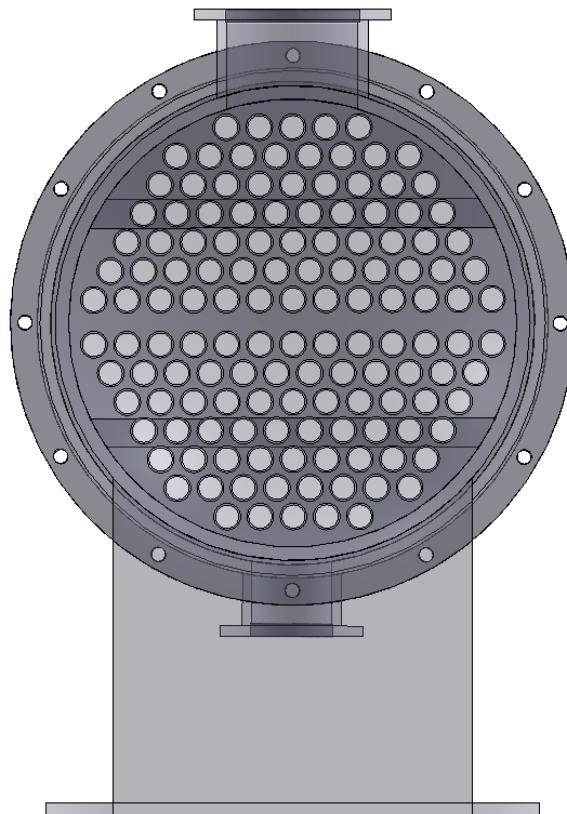


Fig. 14 Changing the placement of pipes

The results of simulation no. 7 and no. 8 (Figs. 7GH) showed us that placing the tubes in a triangle shape is not as efficient compared to placing the tubes in a square shape. Although more tubes are placed in the triangular shape, this is at the expense of a reduced space where the coolant can flow, resulting in a reduction in the efficiency of heat exchange between the two flowing fluids.

For simulation no. 9, we chose the same conditions as for simulation no. 5, where we have obtained the best results so far. The main change (Fig. 8I) was to change the geometry of the model from a negative Y-axis value to a positive Z-axis value. This is basically the effect of gravity on the designed model. From the simulation results, we found that the average outlet temperature of the cooled liquid $t_{12} = 49.25$ °C.

The values of the results (Table 2) of the individual simulations show us the different efficiency of heat exchange between the two media which depends on many factors, but among the most important ones is the correct design of the heat exchanger. From the simulations, we found that the heat exchange efficiency increases with the path length in which the media are in thermal contact. This fact proved to be crucial to our goal, because after lengthening the exchanger and adding baffles, there was a significant shift towards achieving our goal. Further, the change in mass flow rate has another additional effect on the heat exchange itself.

Conclusion

Double segmental baffles proved to be a more suitable choice of baffles in our model. The overall importance of baffles in heat exchangers is justified as our results show. After changing the tubes from square to triangular placement, we found from the simulations that the heat exchange efficiency decreased significantly. This finding proved to us that the number of tubes placed in the heat exchanger is not crucial, especially when it comes at the expense of reducing the surface area for the coolant flow. A final interesting observation is the effect of the location of the orientation of the heat exchanger with respect to the applied gravity. The simulation shows that better heat transfer occurs when the heat exchanger is positioned vertically, especially when the coolant is flowing against gravity. This is because there is a slight slowing down of the coolant flow due to gravity.

Tab. 2 Simulation results

Simulation no.	M ₁ (kg/s)	M ₂ (kg/s)	t ₁₂ (°C)	t ₂₂ (°C)	Type of baffles	Length (mm)	Note
1	5	5	79.84	34.33	segmental	2 030	
2	4	8	75.91	26.18	segmental	2 030	Mass flow change
3	2	12	73.72	22.71	segmental	2 030	Mass flow change
4	2	12	52.56	23.13	segmental	2 630	Change of the exchanger length
5	2	12	50.00	23.03	double segmental	2 630	Changing type of baffles
6	2	12	63.51	22.84	without baffles	2 630	
7	2	12	67.25	23.47	double segmental	2 630	Change the placement of pipes (triangle shape)
8	2	12	67.96	23.35	segments	2 630	Change the placement of pipes (triangle shape)
9	2	12	49.25	23.00	double segmental	2 630	Change of orientation of the model

References

- [1] MASTER, B.I, CHUNANGAD, K.S., BOXMA, A., KRAL, J.D., STEHLÍK P. (2006). Most frequently used heat exchangers from pioneering research to worldwide applications. In: *Heat Transfer Eng.*, 27(6), pp. 4-11. <https://doi.org/10.1080/01457630600671960>
- [2] CHANG, C., LIAO, Z., COSTA, A.L.H., BAGAJEWICZ, M.J. (2022). Globally optimal design of intensified shell and tube heat exchangers using complete set trimming. In: *Computers & Chemical Engineering, Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107644>.
- [3] CAPUTO, A.C, FEDERICI, A., PELAGAGGE, P.M, SALINI, P. (2022). On the design of shell-and-tube heat exchangers under uncertain operating conditions. In: *Applied Thermal Engineering*, Vol. 212, 118541, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118541>
- [4] SHAHRIL, S.M., QUADIR, G.A, AMIN, N.A.M, BADRUDDIN, I.A. (2017). Thermo hydraulic performance analysis of a shell-and-double concentric tube heat exchanger using CFD. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 105, pp. 781-798. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.021>
- [5] PATEL, D.S., PARMAR, R.R., PRAJAPATI, V.M. (2015). CFD analysis of shell and tube heat exchangers – A review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 2, Issue 9, ISSN: 2395-0072, e-ISSN: 2395 -0056.
- [6] DARBANDI, M., ABDOLLAHPOUR, M.S., HASANPOUR-MATKOLAEI, M. (2021). A new developed semi-full-scale approach to facilitate the CFD simulation of shell and tube heat exchanger. *Chemical Engineering Science*, vol. 245, 116836. <http://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116836>
- [7] AMBEKAR, A.S., SIVAKUMAR, R., ANANTHARAMAN, N., VIVEKENANDAN, M. (2016). CFD simulation study of shell and tube heat exchangers with different baffle segment configurations. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 108, pp. 999-1007. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.013>
- [8] BIÇER, N., ENGIN, T., YASAR, H., BÜYÜKKAYA, E., AYDIN, A., TOPUZ, A. (2020). Design optimization of a shell-and-tube heat exchanger with novel three-zonal baffle by using CFD and taguchi method. In: *International Journal of Thermal Sciences*, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118541>

- [9] İNAN, A.T., KÖTEN, H., KARTAL, M.A. (2023). Experimental comparison and CFD analysis of conventional shell and tube heat exchanger with new design geometry at different baffle intervals. *Numerical Heat Transfer, Part A*, Taylor & Francis. <http://doi.org/10.1080/10407782.2022.2101801>
- [10] MOHAMMADI, M.H, ABBASI, H.R., YAVARINASAB, A. (2020). Thermal optimization of shell and tube heat exchanger using porous baffles. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 170, 115005. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115005>
- [11] WANG, X., ZHENG, N., LIU, Z., LIU, W. (2018) Numerical analysis and optimization study on shell-side performances of a shell and tube heat exchanger with staggered baffles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 124, pp. 247-259. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.081>
- [12] GUPTA, V., DEWANGAN, R. (2017). Analysis of shell and tube heat exchanger with square and triangular cross-sectional geometry of tubes - A review. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, Vol. 2, Issue 1, pp. 169-171, ISSN: 2455-9024
- [13] SAFARIAN, M.R., FAZELPOUR, F., SHAM, M. (2019). Numerical study of shell and tube heat exchanger with diferent cross-section tubes and combined tubes. *International Journal of Energy and Environmental Engineering 10*, pp. 33-46. <https://doi.org/10.1007/s40095-019-0297-9>
- [14] MAGHSOUDALI, Y., RASTEGARKOUTENAEI, A., SAHAMI, M., BANDPY, M.G. (2022). Investigation of the effect of using the finned tubes on the performance of shell and tube heat exchanger by 3D modelling. *Journal of Energy Storage*, Vol. 56, Part B, 106031. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106031>
- [15] YANG, D., KHAN, T.S., AL-HAJRI, E., AYUB, Z.H, AYUB, A.H. (2019). Geometric optimization of shell and tube heat exchanger with interstitial twisted tapes outside the tubes applying CFD techniques. *Applied Thermal Engineering*, Volume 152, Pages 559-572. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.113>

Comparison of bearing surface quality parameters for wind turbines

Mariana Janeková (0000-0002-9380-2760)¹ Daniela Košťaliková (0000-0003-4981-7698)¹, Dana Bakošová (0000-0003-2936-8637)¹ Andrej Dubec (0009-0001-6145-6357)¹ · Alžbeta Bakošová (0000-0003-3440-0689)¹, Jana Králiková¹

¹Faculty of Industrial Technologies in Púchov, Alexander Dubček University of Trenčín. I. Krasku 491/30, 020 01 Púchov. Slovakia. E-mail: mariana.janekova@tnuni.sk, daniela.kostialikova@tnuni.sk, dana.bakosova@tnuni.sk, andrej.dubec@tnuni.sk, alzbeta.bakosova@student.tnuni.sk, jana.kralikova@student.tnuni.sk

The thesis deals with the surface treatments of bearing steel processed for wind turbines, on which the quality parameters of the surface treatments performed were compared. This is blackening, which is a method of surface treatment that allows the protection of the base material from the negative effects of external influences, in particular from moisture and associated corrosion. The application of surface treatment by blackening contributes to a better and more efficient start-up of the bearing in service. In the experimental part, the individual results of the structural analysis carried out for all types of materials investigated are evaluated, with the analysis focusing on the structural properties, the quality of the adhesion properties and the influence on the service life of the machine components. Electron microscopy was used to investigate the structural properties of the layer as well as the base material, which allowed to obtain the necessary data to meet the objectives of this work.

Keywords: Metal materials, Surface treatments, Blackening, Corrosion resistance, Adhesion

1 Introduction

The use of surface treatments is essential in many industries to ensure the required performance and durability of products. The surface as a boundary between two different environments is fundamentally influenced by its mechanical, physical and chemical properties. The essence of surface preparation is to create an environment that ensures the smooth progression of the reactions that take place downstream with the layers and surfaces being formed [1]. In spite of advanced metallurgy, the development of new grades of steels alloyed in different proportions, no universal material can be applied. The essence of surface preparation is the creation of an environment that ensures the smooth progression of reactions that take place downstream of the layers and surfaces being formed. Mechanical and chemical pretreatment of the surface is necessary to ensure good adhesion, durability of the future coating and homogeneous properties of the formed layers [1]. When a clean metal surface is exposed to external environmental influences, almost most metals develop a thin layer formed by their own reaction products on the surface, which protects the metal surface. If the surface of the metal becomes oxidised, it is up to the physical and electrical properties of the metal as to how quickly the oxidation continues or stops. In almost all types of metals, the growth of the oxidized layer is associated with a change in surface color and loss of the characteristic luster [2]. The oxide layer reaches a minimum thickness, so there is no change in the dimensions of the components after blackening. Due to the high adhesion capacity of this layer, it also prevents unnecessary slippage of the bodies when interacting with the outer and inner ring of the bearing.

Blackening is classified among diffusion methods of surface treatment, used for surface treatment of highly stressed components, such as gears in gearboxes, or for the protection of bearing surfaces [3]. Because of its advantages, especially the protection of surfaces against corrosion, blackening has found its application mainly in the armament industry and in engineering in the manufacture of machine components. Its use has found application mainly in metalworking, for example on drills, milling cutters, jaws, screws, and washers, on various decorative elements of door controls, handles, hinges for its visually rustic effect.

Materials used for the manufacture of bearings

Materials occupy an important role in a developing society since the various stages of human development are named after the material that was most abundantly used in each period. When assessing the suitability of material selection and the choice of a compatible surface treatment, it is necessary to take into account all the external and internal influences to which the treated material will be exposed. In particular, the structure and topography, the chemical composition and the properties of the body material determine the surface properties and its behaviour. Metallic materials are characterised by high elastic moduli and toughness, while at the same time being well formable [3]. They have good thermal and electrical conductivity but are less resistant to corrosion. Their properties can be further improved by hardening or possible modifications of the material composition. In general, due to their mechanical and technological properties, metals, and in particular steels, dominate in a wide range of applications [4,8].

In addition to technical and quality parameters, bearing steels must meet high technological and design requirements for good machinability and uniform metal remelting while maintaining the required dimensions [4, 8]. In addition to carbon, the chemical composition of steels contains a number of accompanying and alloying elements. Alloying elements are added to steels to meet the increasingly stringent requirements for use in demanding applications and operating conditions. By simply adjusting the ratio and increasing the content of certain elements, they improve in particular the mechanical properties of the resulting steel, but also the degree of remelting, remelting, carbide formability or technological processing [8]. The wear and thus the functionality and service life of individual steel components is also influenced by the running-in and especially by repeated start-ups of the bearing after the interruption of normal operation [5,10].

Surface treatment of metal materials

For a smooth start-up without unwanted bearing slippage, it has been proven to increase adhesion by treating the contact surfaces with a surface treatment. The surface is the basic functional unit of a surface that forms the interface between the material and the surrounding environment. The surface of the material remains in equilibrium with the environment due to its own free energy. Wear and subsequent degradation occurs when the free energy is disturbed and the two phases interact. The surface properties and its behaviour are mainly determined by the structure and topography, chemical composition and material properties of the body [9]. Blackening of iron, cast iron and steel components is one of the oldest methods of metal protection and has been used since the past also for its decorative character. However, over time it has been extended to other technological applications due to its positive properties. Bearings taught for the operation of wind turbines must withstand various external influences. The installation of such devices requires their stability in operation under different temperatures, speeds and load rates. In practice, this surface treatment is less suitable for use on cast irons or on high alloy steels; for the manufacture of bearings, it is usually most widely used to protect the surface of the contact surfaces of the bodies and rings of tapered roller, cylindrical roller, as well as ball rolling bearings [7, 10]. The armouring of steels is carried out in baths of hot concentrated aqueous solution of salt hydroxides with inhibitors and other additives [7]. It improves appearance, abrasion resistance and corrosion resistance. It is usually combined with the use of a suitable lubricant or oil, which as a result positively influences the adhesion capability according to the type of application of the components treated in this way. The blackened layer is of particular importance as an effective protection against corrosion and external environmental influences, due to the porosity of the layer and thus a more uniform distribution of the lubricant, it contributes to better bearing run-in and also to repeated run-ins during bearing downtime. In this process, a chemical reaction takes place which forms an oxide layer on the surface of the blackened material. Due to the compactness and integrity of the layer, it helps to prevent cracks in the material and subsequent damage. It reduces the risk of fretting due to corrosion damage to the bearing, enables smoother bearing run-in, increases corrosion resistance, prevents body slippage during bearing run-in, improves bearing performance even at low lubrication levels, reduces hydrogen permeation into the bearing base material, the resulting layer is very thin, therefore it does not affect the geometry and dimensional accuracy of machine parts, the layer is resistant to abrasion and abrasion, resistant to temperatures up to 300 °C by the characteristic "blackening" of the component gives the workpiece an antique appearance (optical enhancement) [10,11].

Experimental part

In the experimental part, we compared the quality parameters of the surface treatment on three types of base material Fig. 2. The surface treatment consisted in blackening, which is a method of surface treatment that allows protection of the base material against negative effects of external influences, especially against moisture and the associated corrosive wear of the bearings. Blackening is classified as a diffusion method of surface treatment [7,14]. A layer is formed on the surface of the base material by controlled oxidation. The result is a porous layer with a thickness of about 0.5-2 µm.

The treatment involves the preparation of the solution and the blackening itself. The blackening salt is poured into cold water with stirring for optimum concentration at a ratio of 1 kilogram of mixture per 1 litre of water. The temperature rises sharply due to the exothermic process, with the temperature of the solution rising by up to 80°C as the salt dissolves. It is known that the boiling point of a mixture depends on the amount of salt dissolved. By adding salt or evaporating water, increasing the salt concentration, the boiling point temperature increases. If we want to lower the boiling point temperature, it is necessary to add water to the mixture solution [9].



Fig 1 Immersion of components in a boiling alkaline salt solution

The blackening process is initiated by immersing the components in a bath in racks, sieves or drums Fig.1 To ensure the required quality of blackening of bearing components, a two-step process is used [11, 14]. The reaction in the material layer takes place only in the boiling point region, so care must be taken to ensure that the solution bath is heated. The components are removed from the bath as soon as they turn dark black. After blackening, the heating can be switched off and the bath is turned off [12]. When restarting, heating power is first added to bring the solution to the boiling point. As the blackening salt is replenished during operation, the solution bath has a long service life under normal operating conditions [12 - 14]. After the blackening process is complete, a thorough rinse is required to remove any residual salts that may later crystallize on the surface of the blackening layer [10,12]. After rinsing, the surface is dried. Since the resulting layer is porous and not completely anticorrosive, the application of oil or lubricant becomes an essential part of the process [13]. The oil preservative is retained in the micropores and acts as additional protection against corrosive wear of the surface. Bodies made from bearing after heat treatment and chemical-thermal treatment were the subject of investigation and comparison of surface quality properties [12-16]. The experimental material is used in the engineering industry to produce bearings for wind turbines. In Fig. 2 below, the bodies made from three different all-coatable materials that were designed for the experiment are documented.

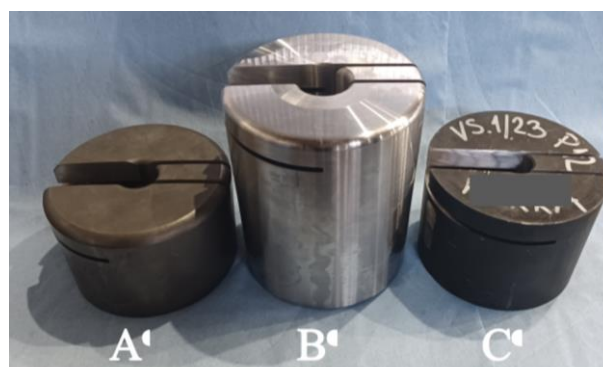


Fig. 2 Bodies sampled for surface treatment blackening - from the left sample A, B and C

The 18NiCrMo14-6 - (sampleA) cementitious steel material was cut from a body that had undergone a chemical-heat treatment cementation process. The hardness after processing is guaranteed at 60-64 HRC. The chemical composition of the base material is given in Table 1.

Table 1 Chemical composition of sample A (weight %)

Ni	Cr	Mo	Si	Mn	C	P	S	O	Ca
3.29	1.34	0.16	0.33	0.47	0.17	0.008	0.003	0.0003	0.0002

Sample B of 100CrMnSi6-4 - (sample B) steel was cut from the body after heat treatment by quenching, the hardness after quenching is guaranteed at 59-63 HRC. The chemical composition of the base material is shown in Table 2

Table 2 Chemical composition of sample B (weight %)

Ni	Cr	Mo	Si	Mn	C	P	S	O	Ca
0.05	1.44	0.013	0.49	1.04	0.95	0.015	0.001	0.0006	0.0001

The material of 100CrMo7-3 - (sample C) steel was cut from the body after heat treatment hardening, the hardness after hardening is guaranteed at 59-63 HRC. The chemical composition of the base material is given in Table 3

Table 3 Chemical composition of steel sample C (weight %)

Ni	Cr	Mo	Si	Mn	C	P	S	O	Ca
0.18	1.65	0.23	0.24	0.64	0.94	0.012	0.010	0.0003	0.0002

To verify the influence of the surface integrity quality and the related adhesion of the deposited layers, it was necessary to verify the roughness on the selected materials on the Mitutoyo Superfrest SJ-410 v. According to the calculation in Table 4, after polishing, the average roughness of all samples was $Ra \leq 0.40 \mu\text{m}$. To avoid confusion, each of the samples was marked with a letter according to the corresponding base material and a sample sequence number.

Table 4 Measurement of roughness of prepared samples

	Measure 1		Measure 2		Measure 3		Diameter	
Sample A	0.350	μm	0.417	μm	0.351	μm	0.373	μm
Sample B	0.381	μm	0.403	μm	0.333	μm	0.372	μm
Sample C	0.349	μm	0.343	μm	0.377	μm	0.356	μm

Structural analysis of the black layer

Using the SEM method, we assessed the morphology and topography of the analyzed sample regions. In sample A, which was cemented prior to the experimental application of the surface treatment, we observed an unevenly distributed occurrence of pores in Fig. 3 of smaller size in the surface and subsurface region of the blackened layer. The average pore size occurring in the blackened layer of this material was $0.44 \mu\text{m}$.

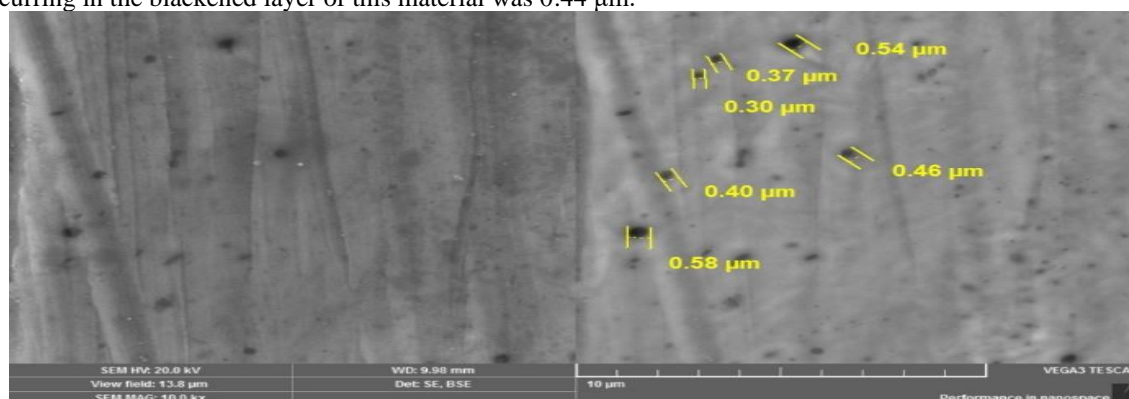


Fig. 3 Pore size measurements of the blackened layer of sample A

The EDS energy-dispersive spectroscopy method provides a means of obtaining the exact chemical composition of the material from the analyzed areas by several types of chemical composition analyses. For the determination of chemical composition, the X-act Oxford Instruments EDX detector was chosen. The chemical analysis carried out from the black layer area as well as the area of the starting material of sample A, we confirmed the presence of the predicted chemical elements see in Fig. 3. In the blackened layer area, the presence of iron oxides, which were the dominant component of the deposited layer, was confirmed in Fig. 4.

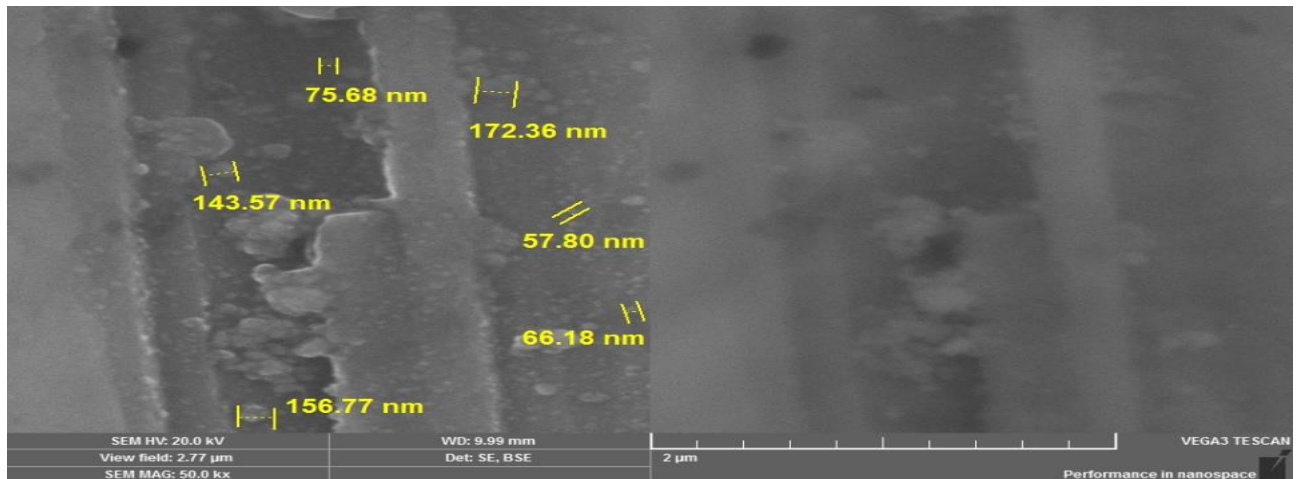


Fig. 4 Pore size measurements of the blackened layer of sample A

Fig. 3 and Fig.4 above show the oxides present in the layer whose average size was 112.06 nm. Their presence is due to the blackening technology as a natural part of the diffusion process and the ongoing reaction in the surface region of the material. From the result of the chemical spectrum analysis of the 1 area of the layer in Fig. 5, we found the presence of Fe in the representation of 91 wt.%, oxygen had a value of 4.7 wt.%.

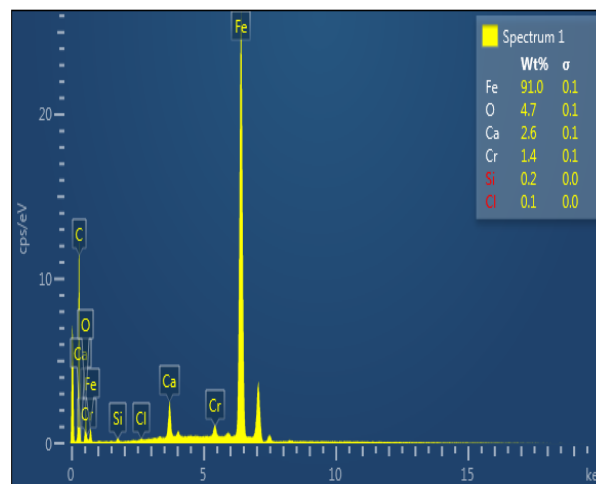


Fig. 5 Measurement of the relative size of oxides in the surface structure of the blackened layer of sample A

In sample B, a higher frequency of microscopic pores of similar size was observed, which were evenly distributed throughout the observed area. Their average size was 0.77 μm. Like the material of sample A, oxides were also observed in the surface area of sample B see in Fig. 7, their average size was 181.58 nm.

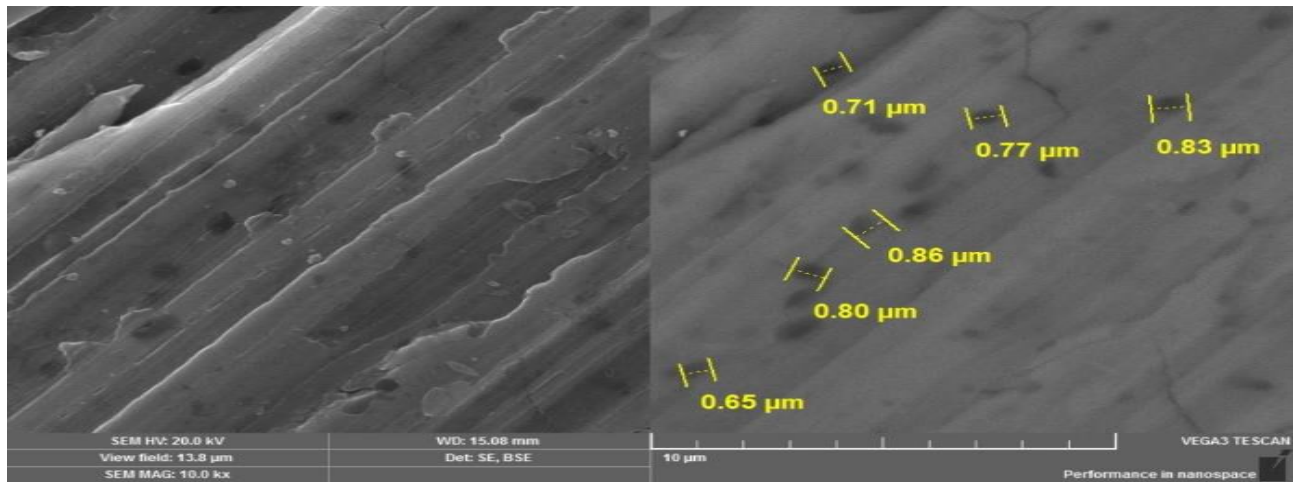


Fig. 6 Pore size measurements of the blackened layer of sample B

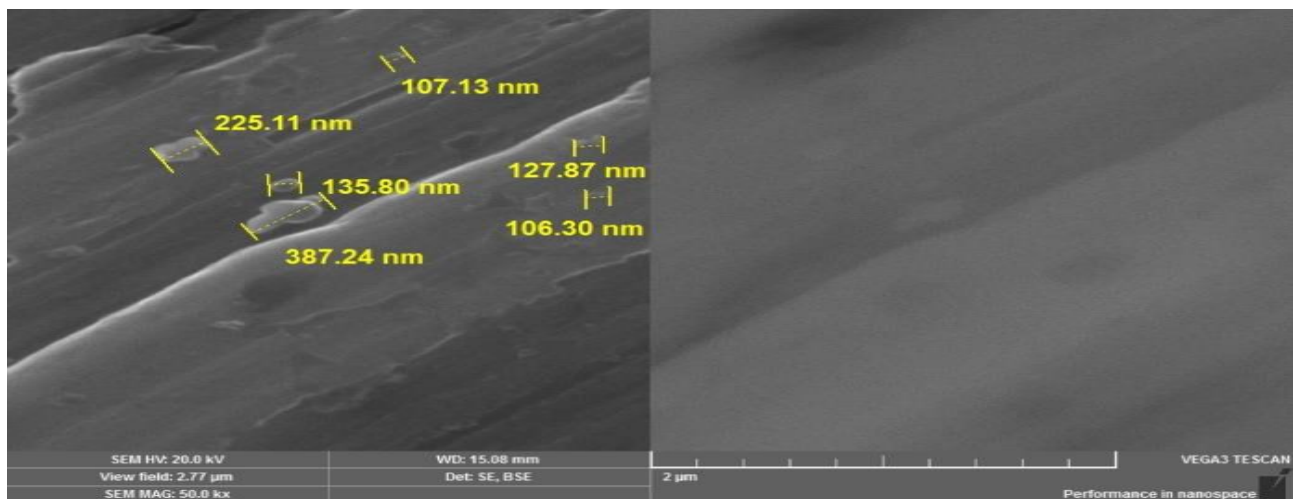


Fig. 7 Measurement of the relative size of oxides in the surface structure of the blackened layer of sample B

In the chemical analysis of sample B, the oxygen values reached a higher mass amount than that of sample A. We assume that this is due to the carbon content diffused into the base material layer during the chemical-thermal treatment by cementation. The presence of the remaining chemical elements for sample B in Spectrum 5 (layer) confirmed to us the Fe content was 78.7 wt.%, oxygen 16.7 wt.%, which is documented in Fig. 8.

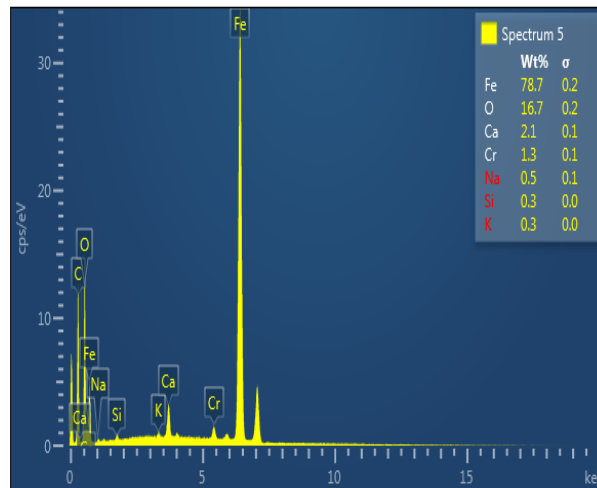


Fig. 8 Chemical spectrum of selected area of sample B: black layer

In the sample C-labelled material, a different structure of the surface region was observed. As can be seen in the above images, the occurring pores tended to cluster together. Their average size was 0,48 μm . In Fig. 9 we can see the transverse grinding marks from the sample preparation process. The average oxide size in the sample layer C from the measurement shown o in Fig. 10 was 135.36 nm.

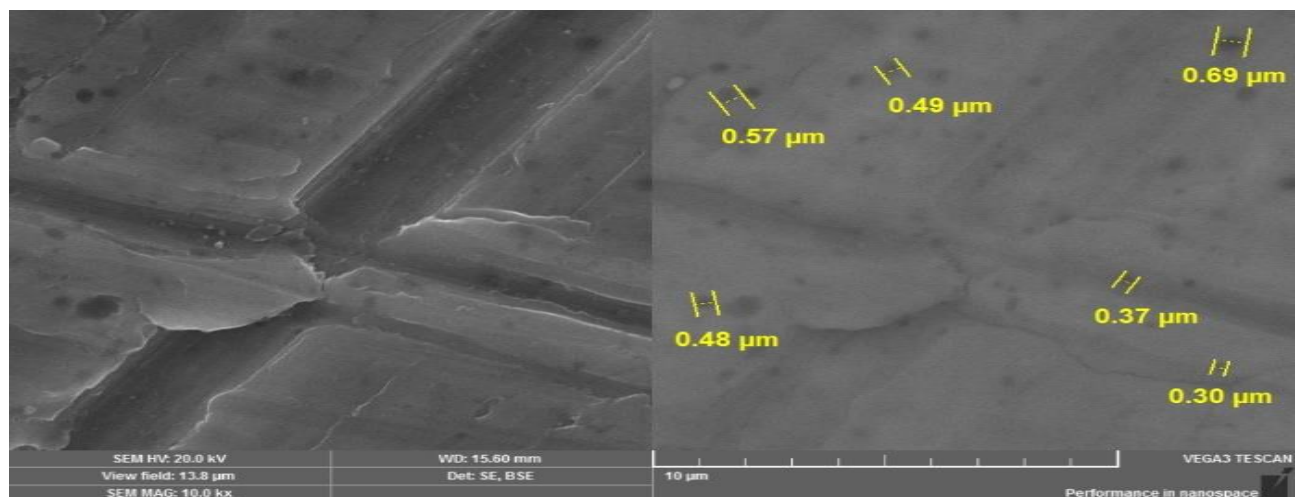


Fig. 9 Pore size measurement views of the blackened layer of sample C

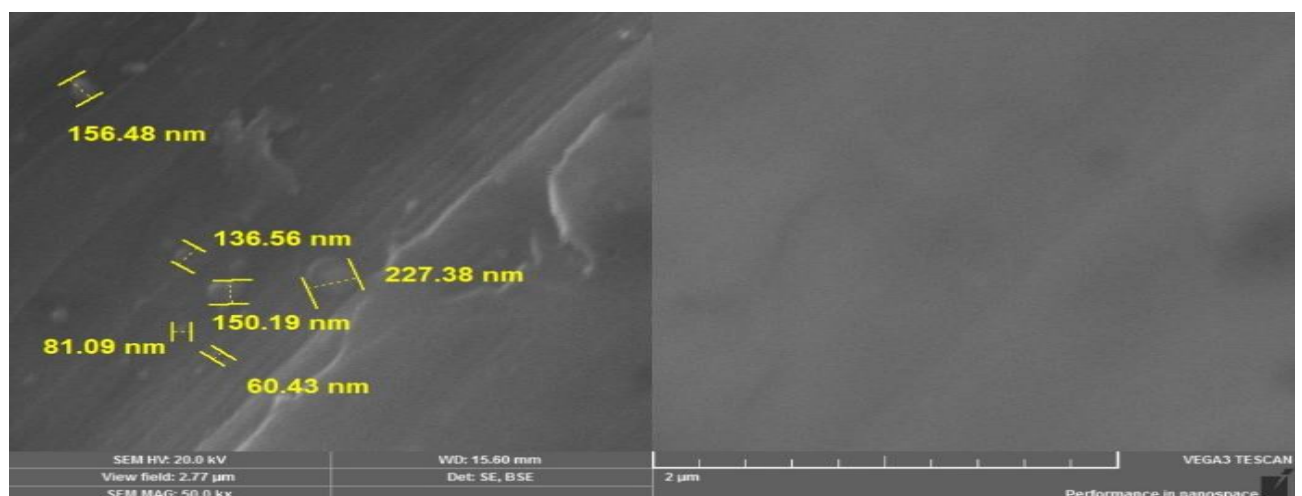


Fig. 10 Measurement of the relative size of oxides in the surface structure of the C

When considering sample C, the oxygen values reached a lower mass amount than sample B. We assume that this is due to the presence of additional passivating alloying elements which would affect the oxide layer formation process. In sample C of Spectra 3 from the layer region, the Fe content was 83.1 wt%, O was 13.1 wt%. The presence of the remaining chemical is recorded in Fig. 11.

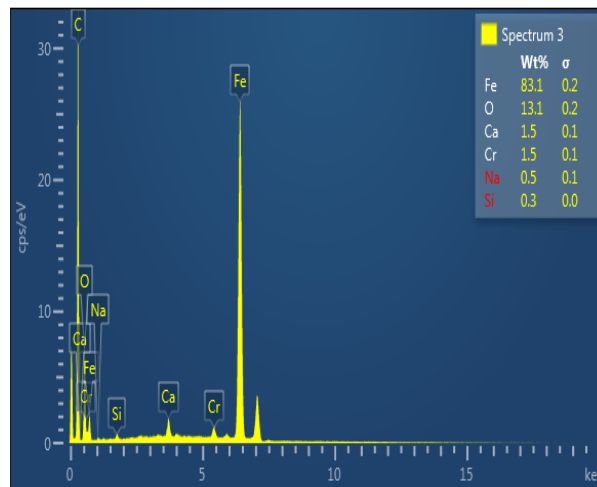


Fig. 11 Chemical spectrum of a selected region of sample C

The evaluation of the black layer adhesion for all the materials investigated was performed using the SEM method in BE, BSE. The SEM method determines us the nature of the topography and micromorphology of each surface.

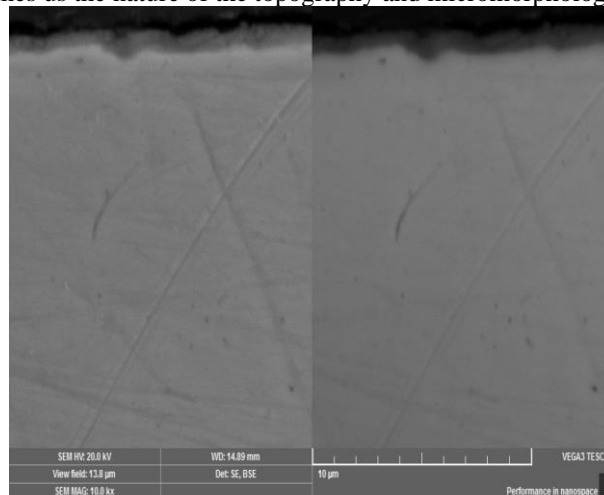


Fig. 12 Representation of the local non-uniformity of the adhesion of the blackened layer of sample A in the cross-section

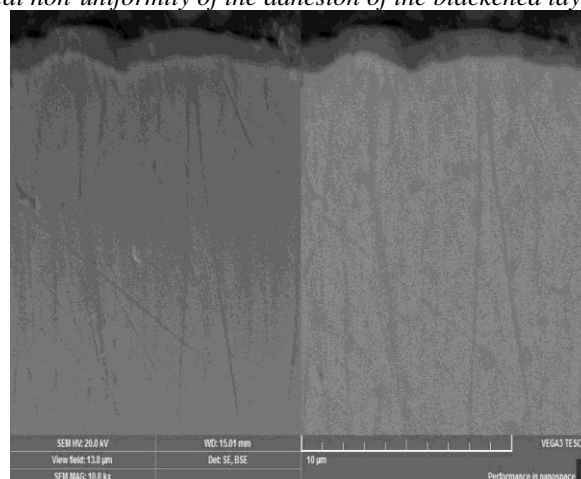


Fig. 13 Cross-sectional representation of the small local non-uniformity of the adhesion of the blackened layer of specimen B

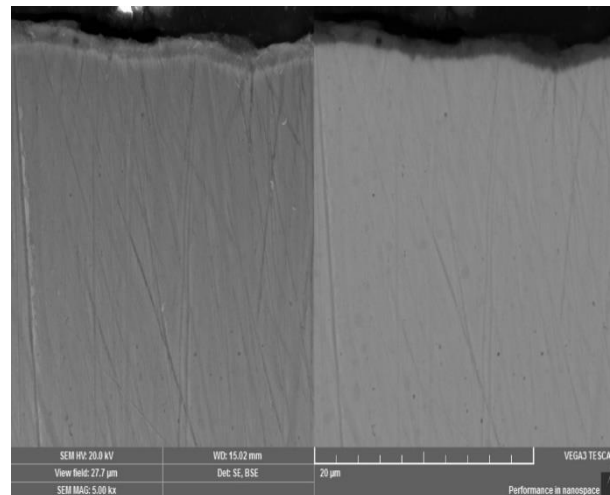


Fig. 14 Sample C Showing minor local non-uniformity of adhesion of the blackened layer of Sample C in cross-section.

We investigated the adhesion of the layer on the experimental materials in cross-sections for all samples of the selected materials see in Fig.13, Fig.14 where we identified uniformity and continuity of the deposited blackened layer for all layer materials.

Evaluation of the layer resistance test and confirmation of the degree of blackening

The test of the resistance of the black layer shall be carried out in accordance with the control standard DIN 50938, point 7.5. After preparation (degreasing) of the surface, a drop of 5 % oxalic acid solution was applied to the samples with a laboratory pipette. The standard solution was applied to the samples for 8 minutes and after wiping, a colour difference was observed on the surface of the sample. All the three experimental samples showed adequate colour change, the visible black to brown-black target or pale grey rim visible on sample B is also permissible within the above-mentioned prescription see in Fig. 15.

Fig. 15 Test for confirmation of the degree of blackening on individual samples



The test for confirmation of the degree of blackening of the layer was carried out in accordance with DIN 50938, paragraph 7.4. The surface of the samples was degreased, and a drop of a 20 % acetic acid solution was applied to the samples using a laboratory pipette. The exposure time was according to the standard 20 minutes. As in the previous case of the experiment, tolerable colour changes were observed on the surface of the samples, so that the degree of blackening (two-stage process) was confirmed by this test.

Results

In our experiment, the suitability of depositing thin films on all-usable materials that are low or encounter alloyed was confirmed. For cemented components, on the other hand, our research has shown deteriorated properties of the blackened layer, which were particularly evident in the thickness of the resulting layer. This fact confirms the fact that the carbon already diffused in the layer by the previous cementation influences the course of further reactions on the surface of the material. For this reason, in practice it does not make sense to use a combination of different surface treatments, or a combination of diffusion coatings and subsequent blackening. From the obtained results of the chemical and structural analysis of the experimental part, we can conclude that under optimal conditions of the blackening technology and proper selection of the base material, this method of surface treatment is effective with respect to the requirements of bearing functionality.

Structural analysis of the black layer was performed using the SEM method of SE mode, and we evaluated the micromorphology and topography of the analyzed areas, focusing on the detailed microstructural characteristics of the

material. In sample A, which was cemented, we observed an unevenly distributed occurrence of pores in the surface and subsurface region of the blackened layer. In sample B, a more frequent occurrence of microscopic pores of similar size was observed, which were uniformly distributed throughout the observed area. In the material labelled C, significant heterogeneity in the structure of the surface area was observed. The occurring pores tended to cluster; their distribution was non-uniform with an average size of 0.48 μm . After the analysis of the blackened layer, we evaluated the adhesion properties. We identified uniformity and continuity of the layer for all the coated materials investigated; the adhesion properties for all materials were in accordance with the prescribed specification for this method of treating functional surfaces.

Chemical analysis was performed on all three experimental materials in the layer region. The evaluation of the chemical composition confirmed the fact that in the case of the already cemented surface of the material, it is not possible to apply another, additional surface treatment method, since the presence of diffused carbon prevents further absorption of other chemical elements. In the chemical analysis of the blackened layer on the all-calcible materials, a higher occurrence of oxides was confirmed, thus confirming the higher blackening effect and efficiency of these materials.

A porosity and copper sulphate layer follow-up test were carried out and evaluated according to ISO 11408. No visible red dots were observed on the compared samples by this test, thus confirming satisfactory porosity of the layer. For the blackening process, it was necessary to perform a test of the layer resistance in accordance with DIN 50938, paragraph 7.5. According to the colour contrast, we visually evaluated that all three experimental samples showed an adequate colour change.

Conclusion

In general, surface treatment refers to any process that alters the physical or chemical properties of the surface of a material in order to increase the quality parameters. In addition to improving the appearance, mechanical and technological properties of the surface, the main role of coatings is to improve the resistance of the material to moisture and associated corrosion. As wind turbines are exposed to environmental influences, various surface treatments find their justification here. Unlike other surface treatments where a coating is applied to the steel surface, black oxide coating (blackening/bronzing) is the result of a chemical reaction between the ferrous metal and oxidizing salts. This means that where additional surface treatments are added to the metal surface and dimensions are increased, causing a reduction in g-tolerance during production, the black oxide coating has a negligible effect on the dimensional tolerances of the parts. This is of great benefit where tolerances are very important, such as threaded bolts, bearing housings, threaded holes or simply just internal machine components. They contribute to the improvement of the functional properties of the bodies and rings in mutual movement, act as a barrier against chemical damage and wear, which ultimately increases the service life of the bearings used in the main shaft of wind turbines. The surface layers must meet the prescribed parameters to achieve the highest possible quality, maintenance-free, safe, energy-efficient and, above all, environmentally friendly.

References

- [1] DOMÍNGUEZ, S., PÉREZ BUENO, J.J., ZAMUDIO TORRES, I., MENDOZA LÓPEZ, M.L. (2017). Characterization and corrosion resistance of electroless black Ni-P coatings of double black layer on carbon steel. In: *Surface and Coatings Technology*, Vol. 326, pp.192-199. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.07.044>
- [2] FARMER, J., CHOI, J.S., SAW, CH., HASLAM, J., DAY, D., HAILEY, P., LIAN, T., REBAK, R., PEREPEZKO, J., PAYER, J., BRANAGAN, D., BEARDSLEY, B., D'AMATO, A., APRIGLIANO, L. (2009). Iron-Based Amorphous Metals: High-Performance Corrosion-Resistant Material Development. In: *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol.40, pp.1289-1305. <https://doi.org/10.1007/s11661-008-9779-8>.
- [3] WANG., L. (2014). Use of structured surfaces for friction and wear control on bearing surfaces, In: *Surface Topography: Metrology and Properties*, Vol.2, Number 4. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/2/4/043001>
- [4] DU PLESIS, A., RAZAVI, N., BENEDETTI, M., MURCHIO, S., LEARY, M., WATSON, M., BHATE, D., BERTO, F.(2022). Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials: A review. In: *Progress in Materials Science*, Elsevier ,Vol.125. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100918>
- [5] LI, C., LI, J.C., ZHAO, M., JIANG, Q. (2009). Effect of alloying elements on microstructure and properties of multiprincipal elements high-entropy alloys, In: *Journal of Alloys and Compounds*, Elsevier, Vol.475, pp. 752-757. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.07.124>

- [6] REGHURAJ, A.R., SAJU, K.K. (2017). Black oxide conversion coating on metals: A review of coating techniques and adaptation for SAE 420A surgical grade stainless steel, In: *Materials Today Proceedings*, Vol.4, pp. 9534- 9541. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.219>
- [7] HART, E., CLARKE, B., NICHOLAS, G., AMIRI, A.K., STIRLING, J., CARROLL, J., DWYER-JOYCE, R., MCDONALD, A., LONG, H.(2020). A review of wind turbine main bearings: design, operation, modelling, damage mechanisms and fault detection, In: *Wind Energy Science*, Vol. 5, pp. 105–124, eISSN: WES 2366-7451, WESD 2366-7621. <https://doi.org/10.5194/wes-5-105-2020>
- [8] BAKER, C. RAHNEJAT, H. (2010). 18 - Fundamentals of hydrodynamic journal bearings: an analytical approach. In: *Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain*, pp. 591-614, Elsevier. ISBN 978-1-84569-361-9
- [9] ARTZ, E., QUAN, H., MCMEEKING, R.M., HENSEL, R. (2010). Functional surface microstructures inspired by nature – From adhesion and wetting principles to sustainable new devices. In: *Progress in Materials Science*, Vol.120, Elsevier, 100823. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100823>
- [10] DE LA PRESILA, R., WANDEL, S., STAMMLER, M., GREBE, M., POLL, G., GLAVATSKIH, S. (2023). Oscillating rolling element bearings: A review of tribotesting and analysis approaches. In: *Tribology International*, Vol- 188. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108805>
- [11] HANOZ, D., SETTIMI, G. A., DABALÁ, M. (2021) Characterization of black coating on Fe360 steel obtained with immersion in aqueous solutions. In: *Surfaces and Interfaces*, Vol.26, Elsevier101317. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101317>
- [12] FARELL, R.W. Jr. (2007) Blackening of ferrous metals In: *Metal Finishing*, Vol.105, pp.390-396, [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(07\)80358-8](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(07)80358-8)
- [13] REGHURAJ, A.R., SAJU, K. KB. (2017). Black oxide conversion coating on metals: A review of coating techniques and adaptation for SAE 420A surgical grade stainless steel. In: *ScienceDirect*, Vol. 4, pp. 9534–9541, Elsevier 10.1016/j.matpr.2017.06.219
- [14] FATTAH-ALHOSSEINI, A., YAZDANI KHAN, H., HEIDARPOUR, A. (2016). Comparison of anti-corrosive properties between hot alkaline nitrate blackening and hydrothermal blackening routes. In: *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 676, pp. 474-480, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.03.114>
- [15] ZHONG CHENG, Z. (2003) Compound-layer blackening of steel at room temperatures. In: *Plating and Surface Finishing*, Vol. 90, pp.49-50, ISSN03603164
- [16] ZHU, H., CAO, F., ZUO, D., ZHU, L., JIN, D., YAO, K. (2008) A new hydrothermal blackening technology for Fe₃O₄ coatings of carbon steel. In: *Applied Surface Science*, Vol.254, pp. 5905-5909. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.03.184>

Vlastnosti hliníkových slitin s použitím odpadních třísek při tavbě

Tomáš Vlach (0000-0003-2326-4183), Roman Horký (0000-0002-4451-3006),

Faculty of Mechanical Engineering, J. E. Purkyne University in Usti nad Labem. Pasteurova 3334/7, 400 01
Usti nad Labem. Czech Republic. E-mail: tomas.vlach@ujep.cz

Výzkum přináší poznatky o možnostech zpracování odpadního materiálu po obrábění. Experiment byl zaměřen na výsledné vlastnosti odlitků ze slitiny AlSi7Mg0,3. Zkoumány byly vlastnosti slitiny s ohledem na kvalitu materiálu vsázky při odlévání. Zkoumané vzorky byly odlity do kovové formy gravitačním způsobem lití. Pro vyhodnocování mikrostruktury byl využit laserový konfokální mikros-kop. Byly měřeny hodnoty tvrdosti dle Brinela a mikrotvrdosti dle Vickerse. Na konec bylo zkou-máno naplynění daných vzorků.

Klíčová slova: Al-Si slitiny, třísky, obrábění, recyklace, odlévání

1 Úvod

Al-Si slitiny jsou nejpoužívanějšími materiály ve slévárenství. Mají široké uplatnění díky kombinaci vhod-ných mechanických a slévárenských vlastností. Tyto vlastnosti ovlivňuje především jejich chemické složení. Jedná se o slitiny důležité pro všechna průmyslová odvětví, především automobilový a letecký průmysl. [1, 2, 3] Mechanické vlastnosti můžeme ovlivnit přidáním legujících prvků (změnou chemického složením) nebo tepelným zpracováním. [4] Široká oblast použití hliníkových slitin přináší i nutnost obrábění těchto slitin. Třískové obrábění je založeno na principu odebírání materiálu ve formě třísek, čímž obrobek získává výsledný tvar. [5] Obráběním získáme konečný tvar obrobku, ale také odpad v podobě odebrané třísky. S tímto kovo-vým odpadem je nutné dále pracovat a využívat možnosti recyklace a přetavení. Problémem těchto třísek je silné tepelné zatížení při samotném procesu obrábění a následná oxidace při přetavování. Neustále se vyvíjejí recyklační techniky, které dokážou tento šrot v nevhodném tvaru dále zpracovat. [6, 7] Slitiny hliníku lze obráb-ět za sucha nebo za použití procesní chladicí kapaliny. Problémy při obrábění za sucha jsou způsobeny nízkým bodem tání a vysokou adhezí. Nezbytná je volba optimálních řezných podmínek nebo použití vhodné procesní kapaliny. [8] Procesní kapaliny pomáhají odplavovat třísky, ochlazovat nástroj a obrobek, snižují tření a tím zlepšují kvalitu povrchu a v mnohých případech mají i konzervační účinky. Některé procesní kapaliny mají při recyklaci negativní vliv na životní prostředí. V některých případech však mohou ovlivnit i možnost využití třískového odpadu po obrábění. [9] Pokud recyklujeme šrot ve formě třísek, je proces náročnější z důvodu malých rozměrů a znečištění procesními kapalinami. Šrot ve formě třísek vlhkostí rychle oxiduje a při přetavování se velká část hmoty spálí v peci. Recyklace hliníkového šrotu má několik procesů: třídění, zhutňo-vání, tavení, odplynování a rafinace. [10, 11, 12] Vlastnosti odlitků jsou ovlivněny především mikrostrukturál-ními změnami v průběhu krystalizačních procesů roztavené slitiny. Před výběrem vhodného materiálu pro požadovanou aplikaci je nutná kontrola mikrostruktury a naplynění. [13, 14] Index hustoty se měří pomocí speciálních přístrojů jako je 3VT Plus a speciálních vah MK 3000. [15, 16]

2 Materiály a postupy

Pro experiment byla použita slitina AlSi7Mg0,3. Tato slitina se vyznačuje dobrou houževnatostí a tažností, s minimálním počtem legujících prvků a nečistot. Jedná se o slévárenskou slitinu, která má dobré slévárenské vlastnosti, obrobitelnost, odolnost proti korozi a svařitelnost. Nejčastěji se odlévá do kovových nebo písko-vých forem, pomocí nízkotlakého nebo gravitačního lití. Tato slitina nachází uplatnění nejen v automobilovém průmyslu, ale také v leteckém a raketovém průmyslu. Slitina má malou tendenci ke smršť-ování při lití, z tohoto důvodu je vhodné zjemnit zrno očkovaním B, Ti. [14] Chemické složení slitiny Al-Si7Mg0,3 dle norem je v Tab 1.

Tab. 1 Chemické složení $AlSi7Mg0,3$ (EN 42100) [14]

Chemický prvky	Al	Si	Mg	Ti	Fe	Mn	Zn	Cu
wt [%]	91.3-93.3	6.5-7.5	0.25-0.45	0-0.25	0-0.19	0-0.1	0-0.07	0-0.05

2.1 Příprava vzorků

Nejprve bylo nutné připravit odlitek ze slitiny $AlSi7Mg0,3$ pro soustružení a výrobu třísek pro jejich následné přetavení v různém obsahu spolu se slitinou $AlSi7Mg0,3$. Vsázka byla tavena v grafitovém kelímku při teplotě $740\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kovová forma byla předehřátá na $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Před litím byla z povrchu taveniny odstraněna vrstva oxidu (viz Obr. 1).



Obr. 1 Odstranění oxidové vrstvy před litím

Po odstranění vrstvy oxidu z povrchu taveniny bylo provedeno gravitační lití (viz Obr. 2). Odlitek byl při teplotě $730\text{ }^{\circ}\text{C}$ a váha odlitku činila 3 kilogramy.



Obr. 2 Odlévání čisté slitiny $AlSi7Mg0,3$

Po odlití bylo skutečné chemické složení změřeno Tasmanovým spektrometrem Q4. Stanovené chemické složení odlitku je v tabulce níže (Tab. 2).

Tab. 2 Naměřené chemické složení $AlSi7Mg0,3$

Chemický prvek	Al	Si	Mg	Ti	Fe	Mn	Zn	Cu
wt [%]	base	7,03	0.31	0.21	0.09	0.08	0.02	0.04

Následná tvorba potřebných třísek se prováděla soustružením. Při soustružení byla použita procesní kapalina AG COOL B 553. Tato procesní kapalina je polosyntetická a mísitelná s vodou. Obsahuje středně vysoký obsah minerálního oleje, který spolu s vodou tvoří stabilní emulzi. Vyznačuje se velmi nízkou pěnovostí v tvrdé i měkké vodě s vynikajícími oplachovými a chladivými účinky. [17, 18] Po upnutí odlitku byly otáčky upraveny tak, aby řezná rychlost odpovídala parametrům definovaným výrobcem nástroje a začalo se odebrání materiálu. Soustruh byl před použitím vyčištěn, aby nedošlo ke kontaminaci třískami z předchozího obrábění. Pro navržené hmotnosti dávek pro následné tavení bylo nutné vytvořit minimálně 1600 gramů Al třísek.



Obr. 3 Obrábění odlitku ze slitiny $AlSi7Mg0,3$

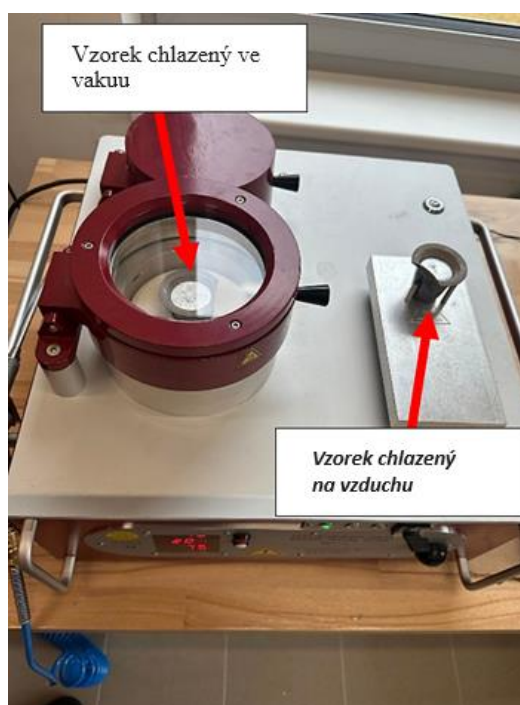
Po vytvoření hliníkových třísek z obrábění bylo nutné připravit množství čisté slitiny v kelímku. Bylo připraveno pět tavicích kelímků, do kterých byla následně navážena čistá slitina. První kelímek obsahoval pouze čistou slitinu, aby bylo možné porovnat ostatní vzorky. Další čtyři tavicí kelímky byly použity k vážení třísek. 100 g, 300 g, 500 g a 700 g třísek bylo postupně připraveno v kelímcích s různými koncentracemi čisté slitiny (viz Tab. 3). Všechny kelímky obsahovaly 1 kilogram materiálu.

Tab. 3 Overview of input raw materials for individual pouring crucibles

Lití/ kelímek	Hmotnost čistého AlSi7Mg0.3 [g]	Hmotnost AlSi7Mg0.3 třísek [g]
Vzorek 1	1000	0
Vzorek 2	900	100
Vzorek 3	700	300
Vzorek 4	500	500
Vzorek 5	300	700

Tavicí kelímky byly umístěny do pece, kde zůstaly asi 4 hodiny, dokud se materiál neroztavil. Náběh na tep-lotu tání byl realizován postupně od teploty okolí (21 °C). Během tavení byl z každé taveniny odebrán vzorek pro měření Hustoty (Dichte) indexu.

Nerezovou naběračkou byla odebrána část taveniny, která byla následně nalita do předem připravených ke-límků zahřátých na 200°C. Jeden z kelímků byl chlazen na vzduchu. Druhý kelímek byl umístěn do vakuové komory. Pro analýzu byl použit Vacuum Density Tester 3VT plus (viz Obr. 4).



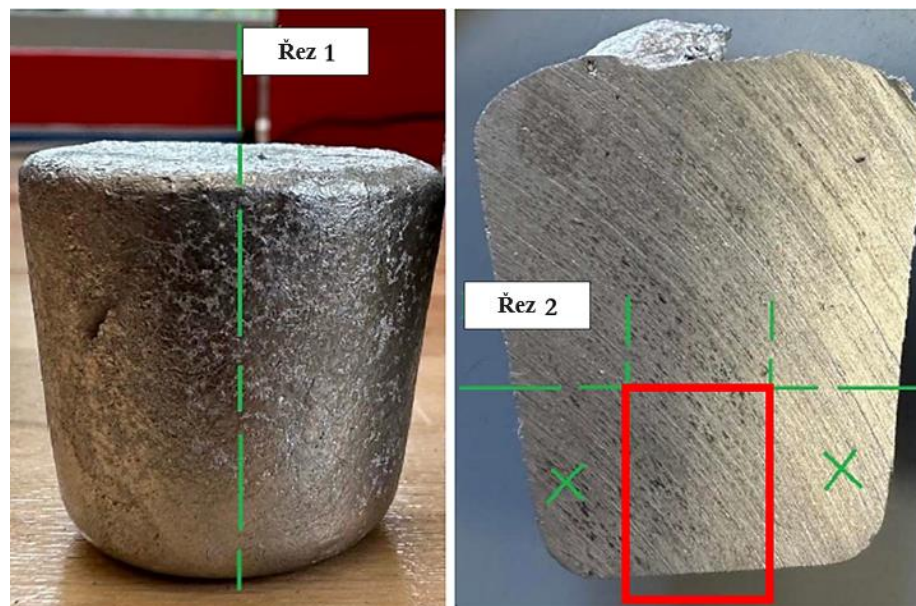
Obr. 4 Přístroj Vacuum Density Tester 3VT plus

Z každé taveniny s jiným procentuálním obsahem třísek byly vytvořeny dva odlitky, které sloužily k měření koncentrace plynu ve slitině. K tomuto měření byla použita elektronická váha indexu hustoty MK 3000 (viz Obr. 5), která se používá k vyhodnocení a stanovení rychlosti plynování hliníkových slitin v procentech.



Obr. 5 MK 3000

Zbytek taveniny byl vždy odlit gravitačním litím do kovové formy s následným přežáním. Pro další měření tvrdosti, mikrotvrdosti tuhého roztoku a mikroskopické analýzy byly vzorky nařezány. Schéma řezání a vzorkování je znázorněno na obrázku níže (viz Obr. 6). Každý ze vzorků byl měřen a pozorován pod optickým mikroskopem.

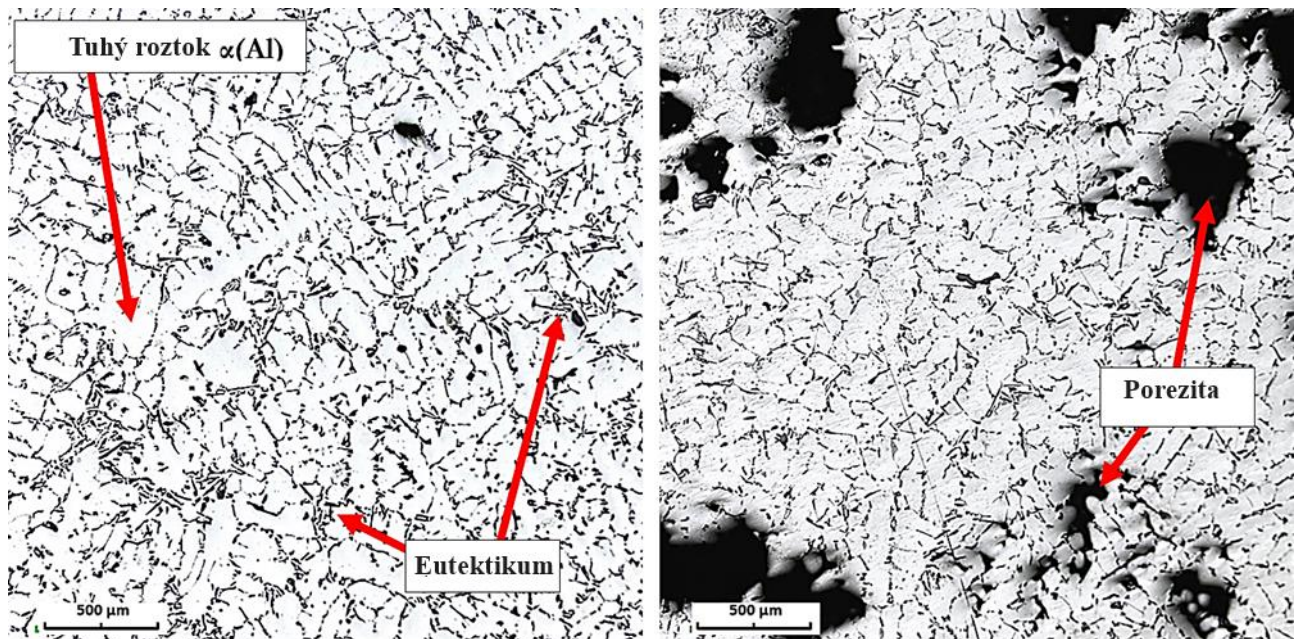


Obr. 6 Příprava vzorků pro další měření a analýzy

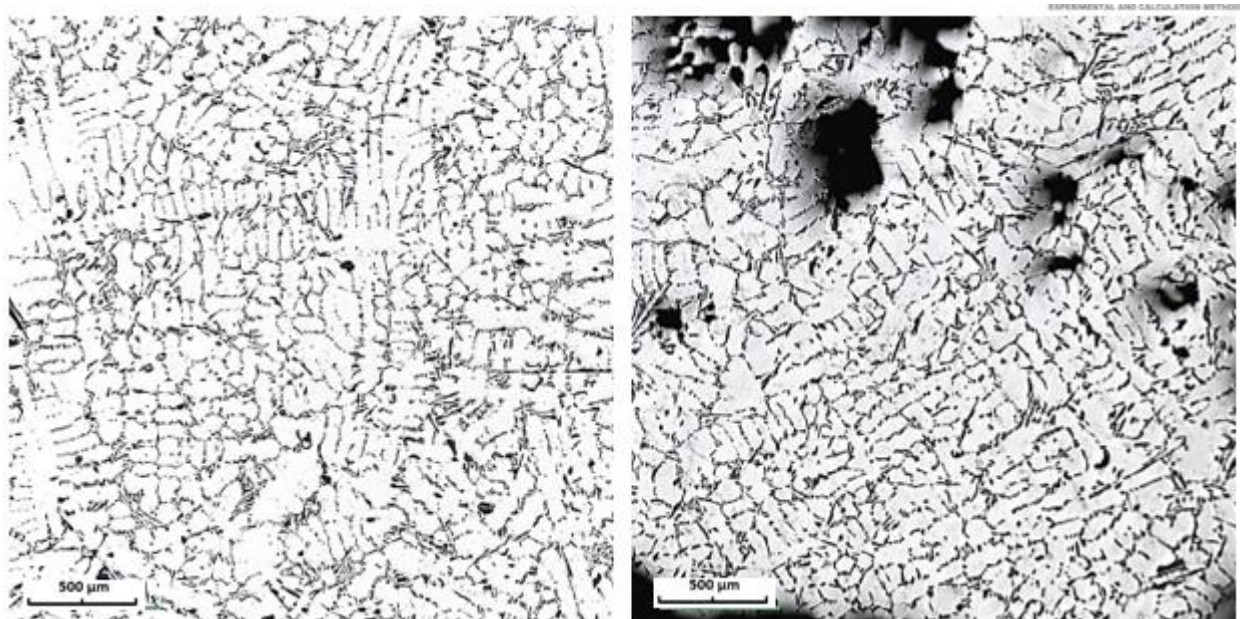
3 Výsledky

3.1 Mikroskopická analýza

Pro srovnání byly vybrány snímky mikrostruktury vzorků 1 a 5. Vzorky na Obr. 7a a Obr. 8a byly ochlazené na vzduchu a vzorky na Obr. 7b a Obr. 8b byly ochlazené ve vakuu. Pozorování vykazuje, že u všech vzorků je obsažen pevný roztok $\alpha(\text{Al})$ a eutektikum. Eutektikum je v interdendritických prostorech. Vzorky zchlazené ve vakuu obsahují pórovitost, která ovlivňuje konečné mechanické vlastnosti. Pro pozorování a analýzu byl použit laserový konfokální mikroskop Olympus Lext OLS 5000.



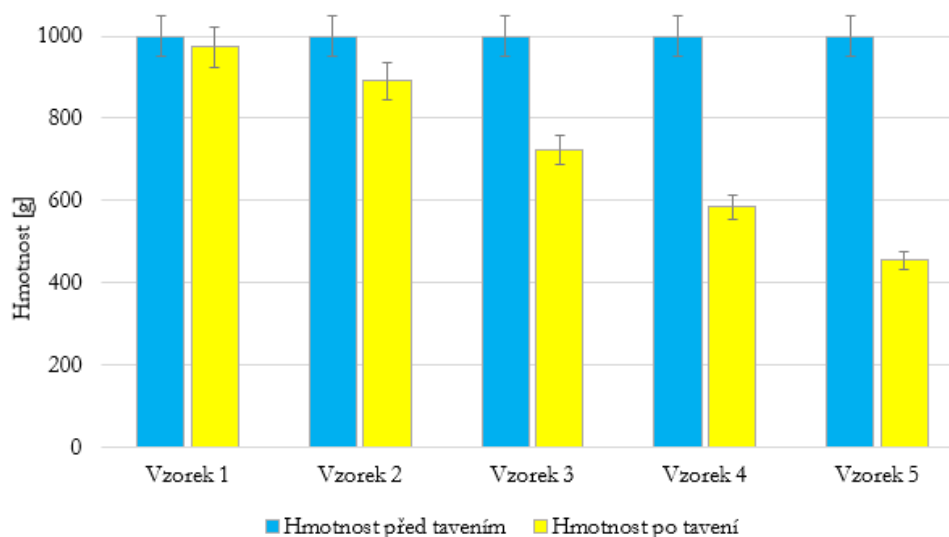
a) b)
Fig. 7 Mikrostruktura Vzorke 1, a) chlazená na vzduchu, b) chlazená ve vakuu



a) b)
Fig. 8 Mikrostruktura Vzorke 5, a) chlazený na vzduchu, b) chlazený ve vakuu

3.2 Hmotnostní úbytek během přetavování

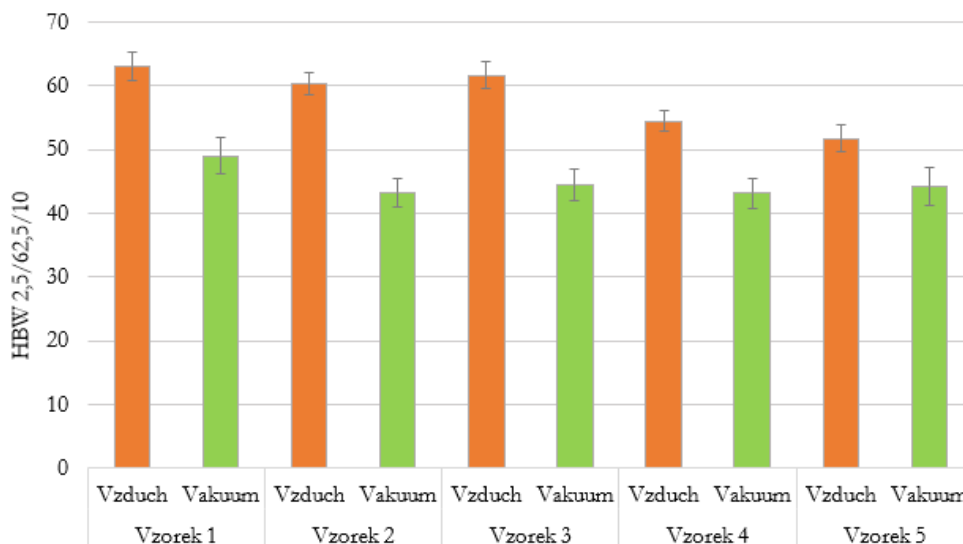
Graf 1 ukazuje množství odlévané hmoty u jednotlivých vzorků, tedy použitelnou část, a kolik odpadu a strusky vzniklo při přetavování. Je zřejmé, že se zvyšujícím se procentem třísek z obrábění vzniká mnohem více odpadu ve formě mazu než při přetavování čisté slitiny. Nejmenší rozdíl hmotnosti mezi vstupní a výstupní hmotností (2,6 hm. %) byl zjištěn u vzorku 1, kdy se jednalo o čistou slitinu. U vzorku 5, kde byl poměr čisté slitiny a třísek stejný, při překročení více než 50 hm. % odpadu a odpad je větší než hmotnost čisté slitiny.



Graf 1 Hmotnosti odlitků před a po přetavenís bliníkovými třískami

3.3 Tvrdost

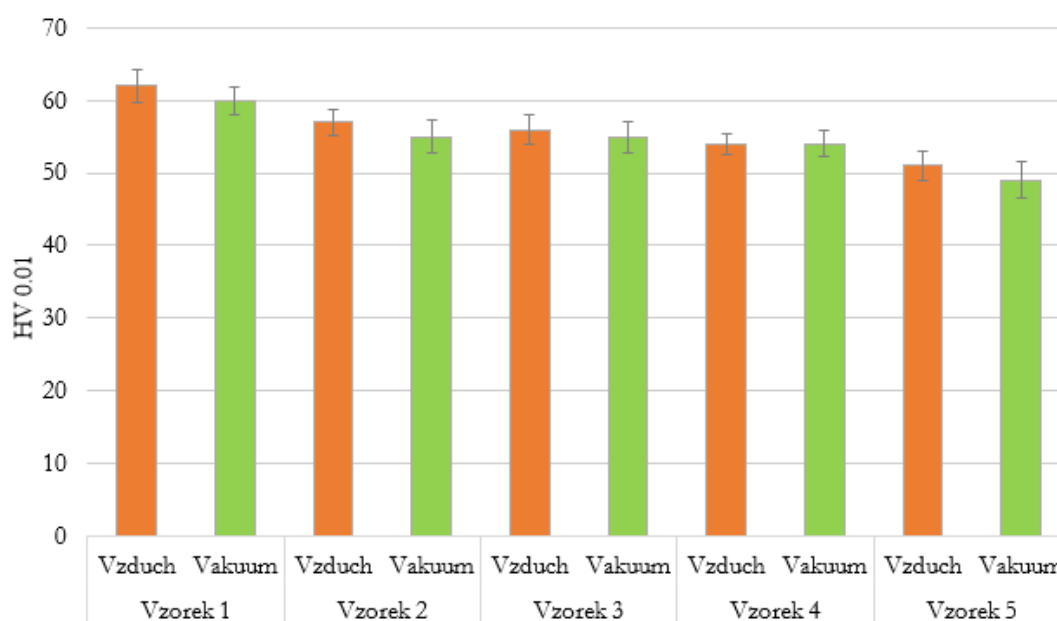
Všechny vzorky byly podrobeny měření tvrdosti podle Brinella podle norem. Každý vzorek byl měřen 10x. K měření bylo použito zařízení ERNST AT 250 DR-NX Tester. Získané střední hodnoty jsou uvedeny v grafu níže (viz Graf 2). Kvůli velké pórovitosti bylo nutné některá měření opakovat. Naměřené hodnoty u vzorků chlazených na vzduchu jsou vyšší než u vzorků chlazených ve vakuu. Nejvyšší hodnoty byly získány u vzorku 1. Nejnižší hodnoty byly u vzorku 5. Platí, že čím větší je obsah třísek (odpadu) ve slitině, tím nižší je tvrdost podle Brinella.



Graph 2 Tvrdost vzorků slitiny AlSi7Mg0,3 podle Brinella

3.4 Mikrotvrdost

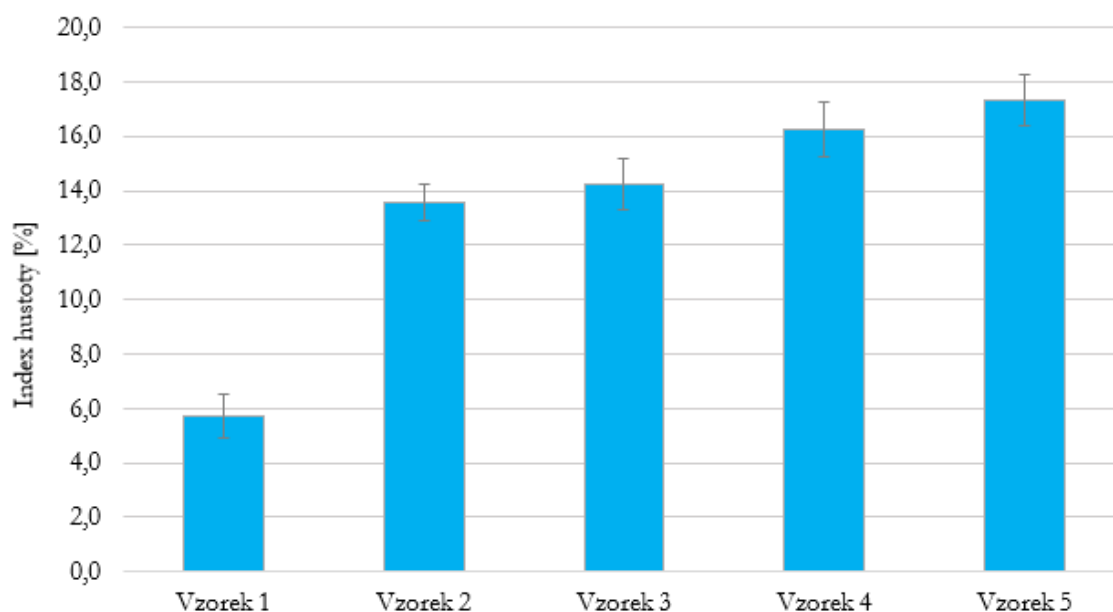
U každého vzorku byla provedena analýza mikrotvrdosti. Pro měření byl použit digitální FM-300 Micro-Hardness Tester. Mediány hodnot mikrotvrdosti tuhého roztoku α (Al) jsou uvedeny v grafu 3 níže. Vzorky byly odebírány ze spodní části odlitků (viz obr. 6) Stejně jako u měření tvrdosti podle Brinella bylo nutné ně-ktará měření opakovat z důvodu vysoké pórovitosti. Tuhý roztok α (Al) byl měřen 10x pro každý vzorek. Nej-vyšší mikrotvrdost byla zjištěna u vzorku 1 chlazeného na vzduchu. Nejnižší hodnota byla zjištěna pro vzorek 5, který byl ochlazen ve vakuu. Z grafu je vidět, že čím vyšší je koncentrace třísek (odpadu) ve slitině, tím nižší je mikrotvrdost tuhého roztoku α (Al).



Graph 3 Mikrotvrdost vzorků slitiny $AlSi7Mg0,3$ dle Vickerse

3.5 Index hustoty

Graf 4 ukazuje rozdíly mezi naměřenými indexy hustoty. Jak je vidět, nejnižší hodnoty byly naměřeny u vzorku 1, který neobsahoval žádnou koncentraci odpadních hliníkových třísek. Tento vzorek byla čistá slitina a byl použit k porovnání výsledků. Nejvyšší hodnoty byly zjištěny u vzorku 5, který obsahoval 70 hm. % odpadních hliníkových třísek v dávce. Rozdíl mezi vzorkem 1 a 5 je v hodnotě indexu hustoty téměř trojnásob-ný. Hodnota indexu hustoty v řádu desítek % je negativní jev a při výběru takového materiálu pro danou aplikaci mohou nastat problémy s pevností apod.



Graf 4 Index hustoty u vzorků

4 Závěr

Výsledné zkoumání prokazuje, že obsah odpadních třísek snižuje mechanické vlastnosti slitiny AlSi7Mg0,3. Čím vyšší je procentuální obsah třísek ve slitině, tím horší jsou mechanické vlastnosti, zejména tvrdost a mi-krotvrdost. Rozdíl tvrdosti slitiny podle Brinella mezi vzorkem 1 a vzorkem 5 byl 17 %. Rozdíl Vickersovy mikrotvrdosti tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$ mezi vzorkem 1 a vzorkem 5 byl 22 %.

V mikrostruktuře slitiny byla pozorována značná pórovitost a tím se zvyšuje hodnota plynování. U jedno-ho vzorku (vzorek 5) byla hmotnost strusky větší než hmotnost čisté slitiny. Rozdíl hodnot Dichteho indexu mezi vzorky 1 a 5a byl více než trojnásobný. Hodnota vzrostla z 5,7 % na 17,3 %. Vzorky s vyšší koncentrací odpadních hliníkových třísek měly velké množství prohoření. Plyny vznikající při tomto jevu ovlivňují vnitřní strukturu odlitků a tím i jejich konečné vlastnosti.

Z analýz je zřejmé, že použití odpadních třísek ovlivňuje vnitřní strukturu odlitků a výsledné vlastnosti ma-teriálu. Zda se vyplatí použít odpadní štěpky, závisí na požadované kvalitě materiálu z hlediska chemického složení nebo oblasti použití hliníkové slitiny.

Poděkování

Tento výzkum byl podpořen interní Grantovou agenturou UJEP (UJEP-SGS-2024-48-008-02).

Použité zdroje

- [1] MICHNA, Š., MICHNOVÁ L. (2014). Neželezné kovy, PrintPoint s.r.o., Praha, ISBN 978-80-260-7132-7
- [2] SVOBODOVA J, LUNAK M, LATNER M. Analysis of the Increased Iron Content on the Corrosion Resistance of the AlSi7Mg0.3 Alloy Casting. (2019) Manufacturing Technology.;19(6):1041-1046. doi: 10.21062/ujep/415.2019/a/12132489/MT/19/6/1041.
- [3] HREN I, SVOBODOVA J, MICHNA Š. Analysis of Microstructure Changes for AlSi7Mg0.3 Alloy Caused by Modification. (2019) Manufacturing Technology.;19(5):767-771. doi: 10.21062/ujep/369.2019/a/12132489/MT/19/5/767.
- [4] VLACH T, CAIS J. The Effect of Casting Mold Material on Microstructure of Al-Si Alloys. Manufacturing Technology. (2022) ;22(5):617-623. doi: 10.21062/mft.2022.072.
- [5] AYUBA, SAMUEL & ARAOYINBO, ALABA & ELEWA, R & BIODUN, M. (2021). Effect of Machining of Aluminium Alloys with Emphasis on Aluminium 6061 Alloy – A Review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 1107. 012157. doi:10.1088/1757899X/1107/1/012157.
- [6] TEKKAYA, A.E., et al. (2009). Hot profile extrusion of AA-6060 aluminum chips. In: Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, No. 7, pp. 3343-3350, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.07.047
- [7] MURRAY, JAMES & SPEIDEL, ALISTAIR & JACKSON-CRISP, ALEXANDER & SMITH, PETER & CONSTANTIN, HANNAH & CLARE, ADAM. (2021). Unprocessed machining chips as a practical feedstock in directed energy deposition. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 169. 103803. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2021.103803.
- [8] BAMBULA, M. Hodnocení obrobiteľnosti slitin hliníku - kritéria hodnocení. (2008) Brno: VUT, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 27 s., [online], [cit. 23.5.2024] Available: <http://hdl.handle.net/11012/7035>
- [9] P.S. SREEJITH, Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions, (2008) Materials Letters, Volume 62, Issue 2, Pages 276-278, ISSN 0167-577X, https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.05.019
- [10] S.N.A. RAHIM, M.A. LAJIS, S. ARIFFIN, A review on recycling aluminum chips by hot extrusion process. (2015) Procedia CIRP 26, 761–766, doi: 10.1016/j.procir.2015.01.013
- [11] R. GALLO, I. SOTO, Improving competitiveness through in-house aluminum chip melting: a case study. AFS Trans. 119, 1–8 (2011)

- [12] H. PUGA, J. BARBOSA, D. SOARES, F. SILVA, S. RIBEIRO, Recycling of aluminium swarf by direct incorporation in aluminium melts. (2009) J. Mater. Process. Technol. 209, 5195–5203 <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.03.007>
- [13] UHRÍČIK M, PALČEK P, CHALUPOVÁ M, KUCHARIKOVÁ L, PASTIEROVIČOVÁ L, MEDVECKÁ D, et al. (2023) Structural and Fractographic Analysis of Aluminum Alloy before and after Fatigue Loading. Manufacturing Technology. 23(5):725-731. doi: 10.21062/mft.2023.067.
- [14] ROUČKA J., (2004). Metalurgie neželezných slitin, CERM s.r.o., Brno, ISBN 80-214-2790-6
- [15] COMBI PACKAGE plus. (2024) www.mk-gmbh.de [online], [cit. 23.5.2024] Available: https://www.mk-gmbh.de/fileadmin/user_upload/produktbilder/Produkte/DichteIndex/Stationaere_Messstation_plus/Brochure_Combi-Package_plus_EN.pdf.
- [16] Zařízení podtlakové zkoušky indexu hustoty. (2024) Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích. [online], [cit. 23.5.2024] Available: <https://www.vstecb.cz/laboratore-1551-htm/>.
- [17] Kovonástroje s.r.o. [online]. Copyright © Kovonástroje s.r.o [online], [cit. 23.5.2024] Available: <https://www.kovonastroje.cz/chladici-kapalina-ag-cool-friguo-b-553-5-kgkoncentrat/>
- [18] Chladící kapalina AG COOL B553 [online], [cit. 23.5.2024] Available: <https://www.svarecky-kukly.cz/chladici-kapalina-ag-cool-b-553-aknel-5-kg>
- [19] CAMPBELL, F. C., (2008). Elements of metallurgy and engineering alloys. Materials Park, Ohio: ASM International ISBN 978-0-87170-867-0. [cit. 23.5.2024] doi: <https://doi.org/10.31399/asm.tb.emea.9781627082518>

Rototická platforma VEX

Alexandr Fales¹

¹Fakulta strojního inženýrství, Ústav technologie a materiálů, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 400 01 Ústí nad Labem. Česká republika. E-mail: alexandr.fales@ujep.cz

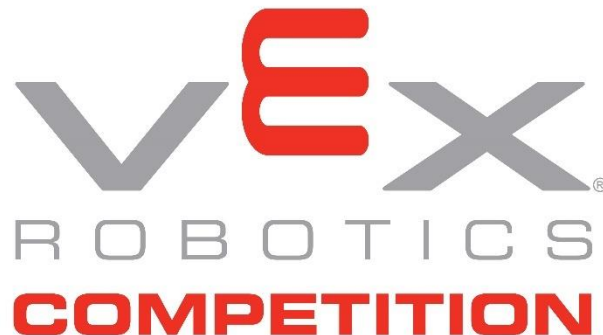
V rámci svojí disertační práce v její teoretické části se zabývám edukační robotikou. V předchozím článku s názvem Edukační robotika jsem realizoval na toto téma výzkum, přičemž jsem se stručně zmínil o možnostech její realizace. Osobně jsem testoval řadu různých robotických hraček jako např. Bee-boty, Blue-boty, Ozoboty, VEX123 a řadu robotických stavebnic jako např. LEGO WeDO 2.0, LEGO MINDSTORMS EV2 a EV3, LEGO SPIKE, dále VEX GO, VEX IQ generace 1 a generace 2, VEX EXP, VEX V5 a různé sady s mikropočítačem MICRO:BIT a mikrokontrolérem ARDUINO. Zjišťoval jsem odpovědi na otázky směřující na aplikaci robotických hraček a stavebnic ve výchovně vzdělávacím procesu primárního a sekundárního vzdělávání. Nyní jsem se zaměřil na platformu VEX ve všech jejích podobách a verzích, a to z důvodu, že jako jediná se neustále rozvíjí a přináší naprosto jedinečný a ucelený komplex pro rozvoj kompetencí souvisejících s aplikací robotiky do procesu vzdělávání na základních, středních, ale i vysokých školách. Umožňuje nejen žáků a studentům postupný růst a osvojování si nezbytných dovedností potřebných pro logické myšlení a technický přehled, ale celkově vzbuzení a udržení zájmu o techniku jako takovou od jejího samotného začátku ve fyzice, kroužku robotiky, programování s přístupným přesahem do odborných předmětů na střední škole až po odporné semináře a přednášky na škole vysoké, tak i růst a rozvoj pedagogických pracovníků na všech úrovních v konceptu edukační robotiky včetně získání mezinárodních certifikátů pro jednotlivé robotické hračky a stavebnice platformy VEX, zapojení se do mezinárodních soutěží s platformou VEX a koučování týmů, lektorování lektorů, vývoj dílů, hraček a stavebnic, a mnoho dalšího. Platforma VEX mi vychází v porovnání se všemi ostatními platformami, s nimiž jsem se za 15 let práce ve školství a soukromém sektoru setkal či je přímo testoval jako ideální volba pro osobní rozvoj technika jako odborníka, tak i ve smyslu edukační robotiky pedagoga jako lídra výuky při zavádění robotiky do procesu vzdělávání. Co nejvíce oceňuji, je naprosto úžasná metodická podpora v podobě velmi rozsáhlé znalostní databáze obsahující kompletní logicky a úrovnostně na sebe navazující celky řešící seznámení, zavádění, výuku, programování, experimenty a spoustu dalších témat, obsahující perfektně a velmi podrobně zpracované metodiky, typu vezmi si a začni. Tato přidaná hodnota je naprosto bezkonkurenční a není vázaná na předchozí požadované znalosti či dovednosti, ani žádnou povinnost si zakoupit jakýkoliv produkt z platformy VEX. Jednoduše řečeno je zcela zdarma k dispozici komukoliv, kdo má zájem o edukační robotiku či robotiku nebo se chce zlepšit v programování a konstrukčních dovednostech či jiných souvisejících dovednostech. Samostatnou kapitolou je pak možnost programování virtuálního robota, kde jsou k dispozici opět zcela zdarma virtuální herní pole aj. V tomto článku se zaměřím na robotickou hračku VEX 123, protože má naprosto unikátní systém programování a z mých zkušeností je žáky i studenty přijímána velmi pozitivně a díky aplikaci ve výuce dochází k rozvoji sledovaných dovedností ve smyslu algoritmizace, kódování, programování, krokování a diagnostiky programu i zařízení, spolupráce a kooperace, obhajoby a prosazování názorů, a další.

Klíčová slova: VEX, VEX 123, STEM, robotika, vzdělávání, hračka, kódování, programování

1 Co je to VEX?

- Jde o společnost VEX Robotics, která byla založena v roce 2004. Sídli v Greenville v Texasu.
- Je jedním z největších dodavatelů vzdělávacích a soutěžích robotických hraček a stavebnic včetně rozšiřujících dílů určených převážně školám, univerzitám a dalším vzdělávacím organizacím. Samozřejmě je možné si zakoupit jakýkoliv produkt pro vlastní potřebu.
- Základní produktová řada je složena z VEX 123 (4+), VEX GO (8+), VEX IQ (11+), VEX EXP (14+) a VEX V5 (14+). Členění do věkových skupin je spíše orientační a záleží na faktu, jak chcete daný produkt v reálu využívat. Mimo uvedené je k dispozici i VR VEX, což je platforma zaměřená na programování virtuálního robota.
- Dále VEX představuje partnerství s neziskovou nadací Robotics Education & Competition Foundation, kdy tyto dvě společnosti celosvětově propagují nejrychleji rostoucí soutěžní robotický program pro základní školy, střední školy a vysoké školy. V rámci tohoto programu je možné se zúčastnit různých školení, seminářů a je k dispozici velmi kvalitně zpracovaná metodika nejen pro pedagogy, kteří cílí na zavedení a rozvoj výuky robotiky ve svých školách a institucích a chtějí tak podpořit své žáky a studenty v rozvoji dovedností potřebných pro jejich budoucí profesní život.

- VEX se opírá o principy edukační robotiky a staví na vzdělávacích metodách, které jsou součástí metod STEM, STEAM a STREAM, což je dle mého názoru nejlepší metoda nejen pro výuku robotiky, polytechniky a programování vůbec.
- A na závěr jedna perlička. V dubnu 2018 byla soutěž VEX Robotics Competition vyhlášena Guinessovou knihou rekordů jako největší soutěž robotů na světě.



Obr. 1 Logo VEX Robotics competition

2 Robotická hračka VEX 123 – nauč se počítat

Jedná se o malého robota ve tvaru „puku“, proto se můžete na řadě škol s tímto označením i setkat. Robot má průměr 7,5 cm. Je vybavený 2 nezávislými krokovými motůrkami, což mu umožňuje nejen pohyb vpřed a vzad, ale hlavně možnost zatáčet, a to v celém rozsahu 360°. Pohyb os motůrku je přenášen přes malá ozubená kolečka na gumové jízdní kolečko, které je vhodné jednou za měsíc otřít vlhčeným ubrouskem, protože na sebe ve velké míře váže prach a jiné nečistoty. Masivní plastový kryt robota chrání před poškozením vlivem nešetného nebo nevhodného zacházení žáky či studenty, popř. pádem z výšky standardního stolu či lavice ve školách. Robot se zapíná pojezdem po rovném povrchu, a to na dráze dlouhé cca 10 cm, ideálně s ním pohybuje směrem vpřed. Na horní části robota se nachází 4 dotyková tlačítka a jedno optické, které je uprostřed. Dotyková tlačítka slouží k první možnosti programování, kterou je tzv. programování Touch neboli dotykové programování. Zelené tlačítko s rovnou šipkou umožňuje programovat pohyb vpřed, konkrétně zadat programovací příkaz jed' dopředu o jednu délku, což je právě jeden krok dlouhý 7,5 cm. Modré tlačítko se zahnutou šipkou směrem vlevo umožňuje zadat rotaci, resp. programovací příkaz ve smyslu otoč se vlevo o 90°, resp. vlevo bok. Purpurové tlačítko se zahnutou šipkou směrem vpravo umožňuje zadat rotaci, resp. programovací příkaz ve smyslu otoč se vpravo o 90°, resp. vpravo bok. Oranžové tlačítko se symbolem reproduktoru umožňuje využívat zvuk, resp. zadat programovací příkaz přehraj zvukový tón, popř. melodii. Prostřední optické tlačítko slouží k signalizaci stavu robota a dále jako tlačítko pro spouštění aktuálně nahraného programu krátký 1sekundovým přidržením nebo k vypnutí robota dlouhým 3sekundovým přidržením. Robot je napájen vnitřní nabíjecí baterií, kterou lze zcela bez problémů a opakovaně nabíjet pomocí USB-C nabíječky, popř. i z jakéhokoliv zařízení disponující touto možností. Dále je robot vybaven dvojí optickou senzorikou. Jeden optický senzor se nachází v přední části robota a je schopen rozeznávat 3 základní barvy a to červenou, zelenou a modrou. Využívá k tomu odrazivost vlastního světelného zdroje. Pro správnou funkčnost tohoto senzoru je nezbytné, aby se robot pohyboval v řádně osvětleném prostoru. Mimo to je tento senzor schopen detekovat překážku před robotem ve vzdálenosti do 2 cm. Pro bezchybnou detekci je nezbytné, aby byl předmět matný, nesmí být lesklý či zrcadlový ani průhledný. Spodní optický senzor dokáže rozlišit výraznou změnu odstínu barvy na povrchu, po kterém se robot pohybuje, což je vhodné např. pokud bychom chtěli robota zastavit na čáře nebo po něm požadovat, aby se po čáře pohyboval. Dále robot obsahuje vnitřní senzoriku v podobě akcelerometru pro možnost sledování změny rychlosti a gyroskopu umožňující mu sledování směru. Této senzoriky lze kromě jiného využít pro detekci nárazu. Objekt, do něhož má robot narazit, musí být pevný a nepohyblivý. Dále se tohoto čidla využívá při mazání programu v robotovi tzv. zatřesením. Pokud správně stiskneme jednotlivá tlačítka (dotkneme se jich), tak prostřední tlačítko po dobu stisku jednotlivých tlačítek, mění barvu dle aktuálně stisknutého tlačítka. Toto je naprosto skvělá zpětná kontrola pro žáky, zda se dotkli tlačítek správně. Po stisku tlačítka zůstává prostřední tlačítko v režimu zeleného postupného pulzování, čímž robot signalizuje, že je v něm uložen program a lze ho spustit zastíněním prostředního tlačítka na 1 sekundu. Osobně doporučuji zejména menším dětem pro dotyk tlačítek používat palec. Robot si do své paměti ukládá všechny stisknutí tlačítek a lze do něho naklikat až 250 programovacích kroků. Jedná se o princip povelového robota. Zde je první nevýhoda a tou je skutečnost, že pokud se během programování žák či student splete, není možné tuto chybu v dané části programu změnit a je nutné celý proces programování začít znovu, resp. robota potřesením smazat a naprogramovat tzv. na čisto. Na druhou stranu je tento způsob programování určen pro mateřskou školu nebo první stupeň základní školy a programy jsou relativně krátké a jednoduché, takže to nelze považovat za zásadní nedostatek, ba naopak se jedná o velmi jednoduchý způsob

programování a mazání, kdy tento způsob nutí žáky, aby se na programování soustředili, což vede k aktivnímu přístupu žáka k aktivitě a jeho zapojení i v oblasti přemýšlení, nikoliv jen pasivnímu přijímání informací. Tím je proces tzv. kódování pomocí dotykových tlačítek na robotu 123 ukončen. Dalším způsobem programování je kódování pomocí kodéru a přeprogramovaných magnetických karet (pásků). Tento způsob programování vyžaduje už určitou schopnost porozumět buď anglickému textu na kódovací kartě nebo symbolické ikoně. Na druhou stranu mám osobně vyzkoušeno, že většinu příkazů jsou schopny pod vedením učitele rozlišit i žáci mateřských škol, kteří ještě neumějí číst. Přesto však doporučuji používat kodér až od 3. třídy 1. stupně základních škol. Kodér a robot je nutné před prvním použitím v tomto režimu programování spárovat, jednoduše řečeno propojit je vzájemně mezi sebou. Provádí se stisknutím krajních tlačítek na kodéru, přičemž se signalizační LED dioda na něm rozsvítí žlutě, což signalizuje vysílání Jump signálu. Následně je potřeba stisknout současně krajní tlačítka na robotovi (šipky vlevo a vpravo). Správnost stisknutí je signalizována rozsvícením prostředního tlačítka VEX žlutě. Zhruba po 5 sekundách dojde k přehrání specifického zvuku robotem a celý proces je hotový. Kodér představuje plastovou desku s možností vkládat zasunutím magnetické karty do 11 pozic, přičemž do první pozice lze vložit pouze spouštěcí červenou kartu When start 123, kterou se celý program spouští. Do ostatních pozic dle libovolnosti vkládat karty ostatní. Je však nutné aplikovat algoritmizační myšlení, aby program správně fungoval, je což je v této fázi programování zásadní. Mezi další řídicí karty patří červená karta Go to start, sloužící k vytvoření nekonečného cyklu programu. Další řídicí kartou je Stop, vedoucí k zastavení programu. Sada světle modrých karet definuje příkazy pro pohyb robota. Těmito kartami jsou Drive 1, 2 a 4, kdy se robot pohybuje o 1 krok vpřed délky 7.5 cm nebo 2násobný či 4násobný krok vpřed. Karty Turn left a Turn right, odpovídají příkazům otoč se vlevo nebo vpravo o 90°. Karta Turn around představuje příkaz otoč se o 180°, resp. čelem vzad. Karta Turn random příkaz otoč se náhodně. Dalšími a z mého pohledu velmi zajímavými kartami jsou Drive until object – jed', dokud nedetekuješ objekt před sebou, což vede k tomu, že se robot pohybuje směrem vpřed a zastaví se ve vzdálenosti do 2 cm od objektu. Překážka musí být ve výšce minimálně předního optického senzoru, tak aby ji byl robot schopný detekovat. Karta Drive until line – jed' až k čáře, resp. se robot bude pohybovat směrem dopředu a zastaví se, pokud spodní sensorika detekuje výraznou změnu v odstinu povrchu, po kterém se robot pohybuje. Karta Drive until crash – robot se zastaví během pohybu vpřed, pokud narazí do překážky, kterou má před sebou. Příkazy pro přehrávání zvuku představují růžové karty a jsou to Play honk, doorbell, crash a random. Příkazy pro rozsvícení prostředního tlačítka aplikují fialové karty a jsou to Glow purple (rozsvítí prostřední tlačítko purpurově), Glow green (zeleně), Glow blue (modře) a Glow off (zhasne). Z mého pohledu patří zelené karty mezi nejoblíbenější. Jde o karty akcí, resp. se jedná o podprogramy, které představují určitý sled příkazů vedoucích k zajímavé aktivitě robota odpovídající jeho náladě, a to Act sad – buď smutný, Act crazy – buď bláznivý a Act happy – buď šťastný. Následuje sada šedých karet určených pro čekání. Jsou to příkazy Wait 1, 2 a 4 seconds, přičemž se robot zastaví na 1, 2 nebo 4 sekundy. Dle mého názoru jsou další oranžové karty vhodné až pro 4. nebo 5. třídu 1. stupně a samozřejmě vyšší. Jedná se o karty zahrnující příkazy podmínky. If object – když je zaznamenán předním optickým čidlem objekt, tak udělej..., If no object, když není zaznamenán předním optickým čidlem objekt, tak udělej..., If red - když je zaznamenán předním optickým čidlem červený objekt, tak udělej..., If green - když je zaznamenán předním optickým čidlem zelený objekt, tak udělej..., If blue - když je zaznamenán předním optickým čidlem modrý objekt, tak udělej..., If bright - když je zaznamenán předním optickým čidlem jasný objekt, tak udělej..., If dark - když je zaznamenán předním optickým čidlem tmavý objekt, tak udělej..., If crash - když je zaznamenán vnitřní sensorikou náraz, tak udělej..., If move buttoom - když je stisknuto tlačítko krok vpřed, tak udělej..., If right buttoom - když je stisknuto tlačítko otoč se vpravo o 90°, tak udělej..., If left buttoom - když je stisknuto tlačítko otoč se vlevo o 90°, tak udělej..., If sound buttoom - když je stisknuto tlačítko přehraj zvuk, tak udělej..., Else – jinak udělej..., End if – slouží k ukončení podmínkového cyklu If. Tyto příkazy je potřeba žákům dobře vysvětlit, aby je dokázali správně používat a zapojit tak vhodně své dovednosti v rámci algoritmického myšlení. Na kodéru jsou 3 tlačítka – Start v podobě zeleného trojúhelníku, který slouží k zapnutí kodéru a spuštění programu, Step v podobě oranžového tlačítka, které umožňuje krokování programu. Tento proces se používá jako diagnostický nástroj pro hledání chyby v programu, resp. ho lze velmi výhodně použít k testování programu. A v neposlední řadě tlačítko Stop v podobě červeného tlačítka sloužící k přerušení aktuálně prováděného programu nebo k vypnutí kodéru dlouhým přidržením po dobu 3 sekund. Správné vytvoření programu a nahrání do robota je signalizováno postranními LED diodami v levé části vedle zasunutých karet, přičemž pro správnou funkci musí probliknout LED diody zeleně. Pokud zůstane svítit jedna LED dioda červeně, je problém s přečtením karty kodérem. Dá se to snadno vyřešit vysunutím a opětovným zasunutím karty zpět do kodéru. Následně se program spustí přes zelené tlačítko Start znovu a vše běží, jak má. Omezení kodéru je ve skutečnosti, kdy jsme schopni vložit karty jen do pozic 1 až 10, což značně limituje možnosti programování. Na druhou stranu to může být bráno jako výzva, kdy jsou žáci nuceni přemýšlet, jak zjednodušit program na max. 10 kroků, což není leckdy vůbec jednoduché, a kromě algoritmického myšlení dochází navíc k rozvoji i kritického myšlení a procesu minimalizace. Z mého pohledu je určitou nevýhodou fakt, že je kodér napájen 2 klasickými AAA bateriemi. Tuto skutečnost je nezbytné brát v potaz, a mít k dispozici odpovídající počet baterií pro případ jejich vybití, protože kodér nelze nabíjet. Pokud potřebujete změnit program v kodéru, zpravidla stačí jen vydat původní karty a vložit nové. Následně spustit program pomocí zeleného tlačítka Start. Někdy, pokud jsou baterie vybité, tak dochází k opakovanému čtení původního programu, což je nepříjemné. Tento průvodní jev lze odstranit výměnou baterií nebo opakovanou demagnetizací, což se provede tak, že po vložení nového programu stisknete 2krát krátce červené tlačítko Stop a pak 2krát krátce zelené tlačítko Start a vše by mělo fungovat. Další a za mě naprosto ideální možností programování je přes aplikaci VEXcodeProject v tomto případně pro VEX 123. Je to aplikace, popř. cloudové prostředí dle varianty operačního systému, umožňující pomocí blokového programování ve vizuálním jazyce bloků programovat robota. Nejsme

ničím omezení a máme k dispozici výrazně více programovacích příkazů a možností, které cílí již na programování blížící se reálné praxi. Tento způsob programování doporučuji používat až od 4. třídy. Dále při zavádění do výuky u vyšších ročníků základních škol doporučuji dotykové programování a programování pomocí kodéru vzít krátce a přejít rychle na programování pomocí aplikace. Z hlediska operačního systému je aplikace určena pro iOS a Android. Cloud je určen pro Windows a Chrome OS. Tento způsob programování je dle mého názoru tím nejlepším, jak robota VEX 123 programovat. Navíc se jedná o aplikaci souboru metod STEM. Možnost naprogramovat reálného robota v podobě hračky a vidět okamžitě jeho reakci na vytvořený program, vede u žáků a studentů k naprosto unikání sebereflexi vůči sobě i vytvořenému programu a okamžitě se při zjištění chyby doslova vrhnou na její odstranění. Prakticky ani nepotřebují k dispozici učitele programátora, ale spíše rádce a dohlížitele. Posledním doporučením je sledování barev signalizačních LED diod robota a kodéru – pokud se objeví červená barva, pak to znamená, že jsou baterie na 25 a méně procentech svojí kapacity. Samozřejmě lze kodér a robota dále používat, dokud se zcela nevypne, ale z mého zkušenosti doporučuji v tomto stavu baterie robota ani kodér již nepoužívat. Robota dejte nabít na nabíječku a v kodéru vyměňte 2 kusy AAA baterií. Pokud kodér nebo robot střídavě blikají zeleně, je to v pořádku, protože jsou v režimu komunikace. Jinými slovy to znamená, že jsou spárováni buď mezi sebou nebo s jiným zařízením. Pokud váš robot nebo kodér blikají střídavě červenou a zelenou barvou, pak tomuto blikání věnujte pozornost, protože se zařízení nachází v režimu aktualizace a je nezbytné tuto aktualizaci úspěšně dokončit, aby nedošlo k nepříjemné situaci a tou je možné poškození vnitřní paměti robota nebo kodéru. Aktualizace se provádí v rámci správcovské aplikace VEX Classroom, kterou Vám doporučuji si nainstalovat do mobilního telefonu. Během instalace je potřeba povolit Wi-Fi, BT a polohu. Následně pak můžete roboty a kodéry spravovat ve smyslu lokalizace, přejmenování a aktualizace. Dále lze diagnostikovat robota nebo kodér při neobvyklém chování nebo sbírat data ze senzorických systémů robota. Aplikaci lze stáhnout přímo ze Storu (obchodu) Vašeho telefonu bez jakýchkoliv poplatků. Rozhodně doporučuji ji mít k dispozici. Ještě se můžete u robota setkat s tzv. vynucenou aktualizací a v případě neaktuálního firmwaru robota, pokud ho připojíte k programovací aplikaci VEXcode123 nebo cloudu, ten provede aktualizaci sám, aby mohl následně do robota nahrát program. Aktualizace trvá cca 10 až 30 sekund. Během aktualizace nesmí dojít k vypnutí robota a nesmí žáci či studenti přejít z aplikace či stránky cloudu na jinou aplikaci či stránku, jinak hrozí poškození vnitřní paměti robota.



Obr. 2 Robotická hračka VEX 123

Varianty VEX 123 k dispozici na trhu:

VEX 123 žákovská sada, která obsahuje: robota VEX 123, kodér a 30 příkazových magnetických karet, USB-C kabel pro nabíjení, a umělecký kroužek (prstenec) sloužící k rozvoji kreativity ve smyslu úpravy vzhledu robota.

VEX 123 třídní sada (classroom kit), která obsahuje: 6x žákovskou sadu VEX 123 (robot: 2x červený, 2x modrý, 2x zelený), přenosný nabíjecí box pro nabíjení vše robotů najednou, box s 6x kodérem, box s 7 x 30 příkazovými magnetickými kartami, herní pole s 12 dlaždicemi a mantinely, purpurovou tašku na uskladnění a přenášení.

Cenová relace (dle aktuálního ceníku firmy AV Media Systems, a.s. jakožto hlavního dodavatele platformy VEX a jejich produktů pro Českou republiku) https://www.avmedia.cz/assets/cenik_skoly/cenik_skoly.pdf:

VEX 123 žákovská sada – 4.990, - Kč bez DPH, resp. 6.038, - Kč s DPH

VEX 123 třídní sada (classroom kit) – 29.646, - Kč bez DPH, resp. 35.874, - Kč s DPH



Obr. 3 Robotická hračka VEX 123 – žákovská sada



Obr. 4 Robotická hračka VEX 123 – třídní sada

Osobní zkušenost a použití ve výuce:

Robotickou hračku VEX 123 a další nabízené produkty firmy VEX Robotisc používám už bez mála 17 let. Z mého hlediska se jedná o nejlepší platformu ve smyslu edukační robotiky s aplikací metod STEM/STEAM/STREAM ve výuce. Je to ucelený systém podpory kompletního rozvoje velkého množství dovedností, který umožňuje žákovi či studentovi růst s věkem od VEX 123, přes VEX GO, k VEX IQ, přes VEX EXP k VEX V5 a dál. Díky takto propracovanému systému se může jedinec opravdu rozvíjet. Dalším obrovským přínosem je ucelený a věkově vhodně zaměřený rozsáhlý systém podpory vzdělávání ve smyslu vytvořených metodik a aktivit pro používání VEX ve výuce, resp. ve výchovně vzdělávacím procesu žáka či studenta. Tato podpora je naprosto precizně vytvořena a je vhodná i pro úplně začátečníky jak z oblasti žáků, studentů, tak i pedagogů. Celý systém dále pokračuje v možnostech růstu pedagogů, kteří se rozhodli ho používat ve svých hodinách výuky, či na kroužku robotiky nebo pro inspiraci. K tomuto je zde celá řada webinářů, seminářů a workshopů. A v neposlední řadě pak možnost získání mezinárodní certifikace lektora edukační robotiky úrovně VEX 123, GO, IQ, EXP a V5.

Za mě se jedná o nejlepší hračku dostupnou na našem trhu. Osobně mě učarovala preciznost celého zařízení a 3

možnosti programování, které dávají žákovi či studentovi prostor k objevování, růstu a vlastní sebereflexi v různém věku. Systém programování 3 úrovní – dotykové, pomocí kodéru a v programovacím prostředí blokového programování VEXcodeProject je navíc na trhu nebývalý a pro mě i žáky či studenty naprosto senzační. V rámci zavádění do výchovně vzdělávacího procesu dochází ke skutečnému rozvoji dovedností ve smyslu algoritmicke, kódování, programování, krokování a diagnostiky programu i zařízení, spolupráce a kooperace, obhajoby a prosazování vlastních názorů. Rozhodně doporučuji práci ve skupině a to minimálně 2 žáků či studentů. Výuka je zajímavá a pro žáky motivující. Žáci se aktivně zapojují do procesu vlastního vzdělávání. Jak jsem již psal, nic lepšího v oblasti robotických hraček neznám, rozhodně VEX 123 doporučuji všem.

Doporučené odkazy pro VEX 123:

Webová stránka produktu VEX 123:

<https://www.vexrobotics.com/123>

Celou sadu videonávodů pro VEX 123 najdete zde:

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLSv2wt0lvLG44vhXpYJ6pjrTytr-VEXbK>

Videonávod pro aktualizaci, nastavení a přejmenování najdete zde:

<https://www.youtube.com/watch?v=gwtnloyzxA&list=PLSv2wt0lvLG44vhXpYJ6pjrTytr-VEXbK&index=4>

Návody:

<https://www.veskole.cz/navody/?search=vex>

programové prostředí:

<https://code123.vex.com/>

Kompletní popis, jak se co s čím dělá a k čemu je to dobré:

<https://kb.vex.com/hc/en-us/categories/360004035932-123>

STEAM Labs – kompletní sada cvičení do výuky (dole):

<https://education.vex.com/stemlabs/123>

STEM Labs – excel sešit:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1-DucwEgwDKvI8YvG8tIUb14Q9nkXbPIgYiJMmJoBs1Q/edit#gid=1270875597>

Aktivity přehledně s možností filtrování:

<https://education.vex.com/stemlabs/123/activities>

3 Kam dál, anebo pojd' me si i robota postavit

Pokud Vám robotická hračka nestačí a chcete se zaměřit i na konstrukci, pak rozhodně doporučuji vybrat si některou z následujících variant, které firma VEX Robotics aktuálně nabízí:

4 Robotická stavebnice VEX GO – nauč se chodit

Jedná se o zjednodušenou stavebnici VEX IQ. Obsahuje 275 dílů, a to konstrukční plastové díly a kovové osy. Dále elektroniku v podobě jednoduché řídicí jednotky, 3 krokových motorů, optického senzoru, dotykového spínače s LED podsvícením, elektromagnetem a baterii. Sada je dle mé zkušenosti určena zejména začátečníkům, ideálně pro 1. stupeň základní školy, ale lze ji v režimu pokročilého programování využívat prakticky pro jakoukoliv věkovou skupinu. Programování se realizuje opět pomocí aplikace VEXcodeProject v tomto případě pro VEX GO, jinak je vše stejné jako u VEX 123. Navíc aplikace obsahuje programovací kartu POHON, což je virtuální ovladač, takže můžete svého robota ovládat přímo ze zařízení. Díky skutečnosti, že je tato stavebnice zjednodušenou verzí VEX IQ nese s sebou řadu různých nedostatků. Každopádně v rámci zavádění do výchovně vzdělávacího procesu dochází i tak ke skutečnému rozvoji dovedností ve smyslu růstu motorických dovedností, představivosti, čtení návodů, inovativního myšlení, HW profilování, algoritmizace, kódování, programování, krokování a diagnostiky programu i zařízení, spolupráce a kooperace, obhajoby a prosazování vlastních názorů. Pro stavebnici VEX GO doporučuji práci ve skupině a to minimálně 2 žáků či studentů. Výuka je zajímavá a motivují a žáci se aktivně zapojují do procesu vlastního vzdělávání.



Obr. 5 Robotická stavebnice VEX GO – žákovská sada



Obr. 6 Robotická stavebnice VEX GO – třídní sada

Varianty VEX GO k dispozici na trhu:

VEX GO žákovská sada, která obsahuje: 275 konstrukčních a pohybových dílů, 3 motory, nárazníkový senzor s LED, optický senzor, elektromagnet, řídicí jednotku, baterii, kleště Pin tool, USB-C kabel.

VEX GO třídní sada (classroom kit), která obsahuje: 5x žákovskou sadu VEX GO, herní pole, nabíječku, zelenou přepravní tašku na uskladnění a přenášení.

Cenová relace (dle aktuálního ceníku firmy AV Media Systems, a.s. jakožto hlavního dodavatele platformy VEX a jejích produktů pro Českou republiku) https://www.avmedia.cz/assets/cenik_skoly/cenik_skoly.pdf:

VEX GO žákovská sada – 7.990,- Kč bez DPH, resp. 9.668,- Kč s DPH

VEX GO třídní sada (classroom kit) – 39.649,- Kč bez DPH, resp. 47 975,- Kč s DPH

Doporučené odkazy pro VEX GO:

Webová stránka produktu VEX GO:

<https://www.vexrobotics.com/go>

Celou sadu videonávodů pro začátek VEX GO najdete zde:

<https://www.youtube.com/watch?v=TuaiQ31E5AU&list=PLSv2wt0lvLG6LMYViM7L2o5XWRbf-jpTc>

Videonávod pro aktualizaci, nastavení a přejmenování najdete zde:

<https://www.youtube.com/watch?v=D7pkT2uPeeA&list=PLSv2wt0lvLG6LMYViM7L2o5XWRbf-jpTc&index=5>

Návody pro práci (inspirace):

<https://www.veskole.cz/navody/?search=vex>

programové prostředí:

<https://codego.vex.com/>

Kompletní popis, jak se co s čím dělá a k čemu je to dobré:

<https://kb.vex.com/hc/en-us/categories/360004035912-GO>

Konstrukční návody – 3D návod, PDF návod a STEM Labs:

<https://www.vexrobotics.com/go/downloads/build-instructions>

STEAM Labs – kompletní sada cvičení do výuky (dole):

<https://education.vex.com/stemlabs/go>

STEM Labs – excel sešit:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1PC8W1fR6xXR1q0XjBRCm3if_5PTncxI9SYjyoTakzoc/edit#gid=466400470

Aktivity přehledně s možností filtrování:

<https://education.vex.com/stemlabs/go/activities>

5 Robotická stavebnice VEX IQ – začni přemýšlet

Jedná se robotickou stavebnicí obsahující 1000 dílů, a to konstrukční plastové díly a kovové osy. Dále elektroniku v podobě propracované řídicí jednotky s grafickým displejem, 4 krokových kvalitních motorů, optického senzoru, laserového vzdálenostního čidla, dotykové LED, spínacího tlačítka, baterii s nabíječkou, a hlavně programovatelného ovladače. Sada je z mé zkušenosti určena jak pro rozvoj začátečníků, tak pro všechny věkové kategorie, díky možnosti rozšíření o další sady je to nadčasová pokroková stavebnice, které je vhodná jak pro základní, střední ale i vysokou školu. Řídicí jednotku a ovladač lze programovat buď pomocí blokového programování nebo pomocí programovacích jazyků C++ a Python, což z ní dělá opravdu nadstandardní stavebnici. HW profilování, diagnostika a systém sledování senzorických dat je v této oblasti unikátní. Vše se opět realizuje pomocí aplikace VEXcodeProject v tomto případě pro VEX IQ. Pokud mohu doporučit robotickou stavebnici, tak je to právě tato. Ještě maličkost na konec a tou je naprosto úžasná možnost zapojit se buď v rámci České republiky nebo mezinárodně do soutěžního klání, což je opravdu pro žáky i studenty perfektní zkušenost, dovoluji si sem vložit pár informací z méj účasti se dvěma týmy na letošním mistrovství ČR a jak to dopadlo?

Jsmo mistři České republiky ve VEX IQ!!!

Dne 6. června 2024 se utkalo 14 týmů středních škol z celé České republiky v O2 aréně v Praze o titul mistrů České republiky v robotické soutěži VEX IQ Robotics competition Full Volume.

2 týmy z naší školy SPŠ Česká Lípa Havlíčkova 426 p.o. – první tým LOBOTI v podání Viktora Kabanova a Vojtěcha

Talmana z třídy 4.C a druhý tým v podání Ivana Turka a Jana Diviše Fedurca ze třídy 3.C se v ranních hodinách plni očekávání vydali se svým trenérem a koučem Ing. Alexandrem Falesem k O2 aréně v Praze. Cestou ještě ladili detaily, osvěženi si pravidel, strategií a kooperace. Po příjezdu oba týmy zcela bez problémů prošli inspekci svých robotických modelů dle pravidel soutěže, přičemž se řeší rozměry a skutečnost originality dílů VEX IQ. Následovalo rozřazení dle náhody do zápasů v rámci týmové výzvy – Teamwork. Jedná se o soutěžní klání aliancí, kdy spolu musí 2 týmy spolupracovat, aby získaly co nejvíce bodů. Paralelně s touto výzvou probíhala výzva dovedností – Skills. V této výzvě soutěží každý tým sám za sebe ve dvou disciplínách – ovládání robota pomocí ovladače a autonomní režim. V týmové výzvě je rozhodující konstrukce robota, HW profil s řídicím programem a naprogramování ovladače a samozřejmě preciznost v ovládání robotického modelu. Jak říkám já, jde hlavně o počet naježděných hodin na tréninku. Ve výzvě dovedností je rozhodující to samé, a navíc ještě velmi dobře odladěný program autonomního režimu. Během jednotlivých zápasů postupně všechny týmy získávaly body a kolem 14:30 hod už byli jasní adepti do finálového klání. Do finále se dostal náš tým LOBOTI a během finálových zápasů týmové výzvy obhájil své prvenství. Mimo to získal tým LOBOTI i prvenství ve výzvě dovedností. Druhý tým naší školy NumOne, který už od začátku cílil na podporu prvního týmu získal cenu poroty – Judges Award. Tuto cenu uděluje odborná porota na základě rozhovoru s členy týmu, obhájení strategie, návrhu a konstrukce robota, hodnocení inženýrského zápisníku atd. Není snadné ji získat, ale nám se to povedlo. Zkrátka jsme mistři České republiky ve VEX IQ, máme 3 prvenství – Teamwork, Skills a Judges Award. Svědčí to o skutečnosti, že jsme se na naší škole naučili vše, co je k tomu potřebné, a to: naučit se pravidla soutěže, vymyslet ideální strategii, zkonstruovat funkční model robota pro nejlepší výsledek zápasů, vytvořit vhodný HW profil, naprogramovat správně ovladač a autonomní režim tak, abychom mohli vyhrát. A samozřejmě hodiny a hodiny a hodiny tréninku, bez toho to nejde. Díky patří i našemu trenérovi a koučovi, zejména za jeho pomoc, tipy a triky, doporučení, a hlavně tvrdý trénink a neuvěřitelnou motivaci dovést nás k vítězství. A to se nám povedlo. Je to úspěch nejen pro nás a naši školu, ale i pro naše město Českou Lípu!

A co na soutěž VEX IQ zástupci obou týmů:

Viktor Kabanov žák 4. ročníku oboru Mechatronik za tým LOBOTI

„Na soutěž VIQRC Full Volume jsme se připravovali několik měsíců, pan Ing. Alexandr Fales nás celou přípravou provázel a dost nám pomohl i poradil. Věřili jsme si na slušný výsledek, ale nikdy jsme si nedovolili říct, že to s jistotou vyhrájeme. Nakonec se nám díky naší velmi dobré spolupráci, volbě dobrých strategií a vynikající improvizaci během všech zápasů povedlo vyhrát. Vyhráli jsme jak alianční výzvu, kde jsme museli spolupracovat s jinými týmy, tak i sólovou výzvu společně s autonomním režimem. Z této soutěže si tak odvážíme 2 trofeje a titul mistři republiky.“

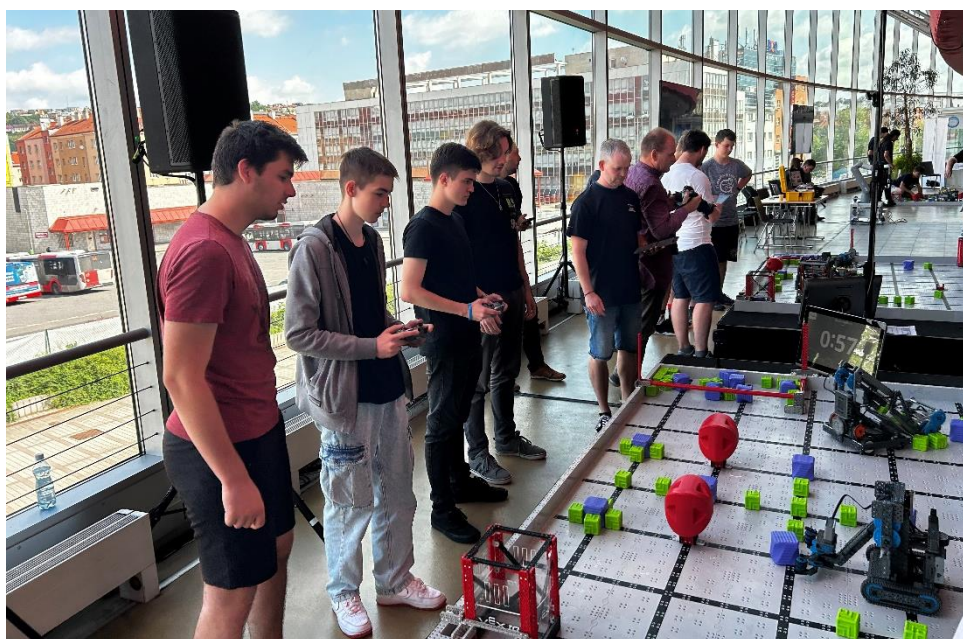
Ivan Turek žák 3. ročníku oboru Mechatronik za tým NumOne

Soutěž byla naprosto skvělá, příprava i samotné soutěžení mě velice bavilo a už teď se těším a přemýšlím nad příštím rokem. Pana učitele Ing. Alexandra Falese jakožto kouče bych za nic nevyměnil, je naprosto perfektní, co se týče pomoci při přípravě, tak i motivaci při soutěžení. Do soutěže jsme jeli s tím, že podpoříme hlavně tým LOBOTI, a načerpáme inspiraci. Zaměřili jsme se na sběr červených herních elementů, které prakticky nikdo jiný nesbíral. Díky naší konstrukci a strategii jsme získali cenu Judges Award udělenou porotou.

V rámci zavádění do výchovně vzdělávacího procesu dochází ke skutečnému rozvoji dovedností ve smyslu motorických dovedností, představitivosti, čtení návodů, inovativního myšlení, HW profilování, algoritmizace, kódování, programování, krokování a diagnostiky programu i zařízení včetně ovladače, spolupráce a kooperace, obhajoby a prosazování názorů. Pro stavebnici VEX IQ doporučuji práci ve skupině a to minimálně 2 žáků či studentů. Výuka je naprosto super, nejen zajímavá a motivující, ale žáci či studenti doslova rostou před očima. Opravdu nic lepšího v oblasti robotických stavebnic neznám, rozhodně VEX IQ doporučuji všem.



Obr. 7 Robotická stavebnice VEX IQ – logo



Obr. 8 Robotická stavebnice VEX IQ – soutěž

Varianty VEX IQ k dispozici na trhu:

VEX IQ žákovská sada, která obsahuje: 1 000 konstrukčních a pohybových dílů, 4 motory, dotykový senzor s LED, nárazníkový senzor, optický senzor, laserový senzor vzdálenosti, řídicí jednotku, baterii a nabíječku, dálkový ovladač, kleště Pin tool, USB-C kabel.

VEX IQ třídní sada (classroom kit), která obsahuje: 5x žákovskou sadu VEX IQ, herní pole, nabíječku, modrou přepravní tašku na uskladnění a přenášení. Dále herní elementy v podobě 18 kostek ve třech základních barvách – 6x červené, 6x zelené a 6x modré.

Dále jsou k dispozici rozšiřující sady pro soutěžní klání a herní elementy z jednotlivým výzvám, které zde neuvádím, ale jsou součástí ceníku.

Cenová relace (dle aktuálního ceníku firmy AV Media Systems, a.s. jakožto hlavního dodavatele platformy VEX a jejich produktů pro Českou republiku) https://www.avmedia.cz/assets/cenik_skoly/cenik_skoly.pdf:

VEX IQ žákovská sada – 14.300,- Kč bez DPH, resp. 17.303,- Kč s DPH

VEX IQ třídní sada (classroom kit) – 64.000,- Kč bez DPH, resp. 77.440,- Kč s DPH



Obr. 9 Robotická stavebnice VEX IQ – žákovská sada



Obr. 10 Robotická stavebnice VEX IQ – třídní sada

Doporučené odkazy pro VEX IQ:

Webová stránka produktu VEX IQ:

<https://www.vexrobotics.com/iq>

Celou sadu videonávodů pro VEX IQg2 (ještě na původní verzi – spíše inspirace) najdete zde:

https://www.youtube.com/watch?v=n_7RBfSjshg&list=PLSv2wt0lvLG5I6NffMTCCweCG8_xI-IU3

Návody pro práci (inspirace):

<https://www.veskole.cz/navody/?search=vex>

Programové prostředí – lze pomocí tlačítka vpravo „<>“ zobrazit kód v C++ nebo Python, také je možné napsat program přímo v C++ nebo Python s tím, že se zvolí tato možnost přes soubor/nový textový projekt/ a odpovídající programovací jazyk:

<https://codeiq.vex.com/>

Důležité! Po zadání této adresy do prohlížeče budete vyzváni ke stažení ovladače, je to nutné pro aktualizaci řídicí jednotky a případně i herního ovladače a možnosti komunikace PC (NTB aj.) s řídicí jednotkou.

Kompletní popis, jak se co s čím dělá a k čemu je to dobré:

<https://kb.vex.com/hc/en-us/categories/360002324792-IQ>

Konstrukční návody – 3D návod a PDF návod:

<https://www.vexrobotics.com/iq/downloads/build-instructions>

STEAM Labs – kompletní sada cvičení do výuky (dole):

<https://education.vex.com/stemlabs/iq>

STEM Labs – docx, xlsx, pdf:

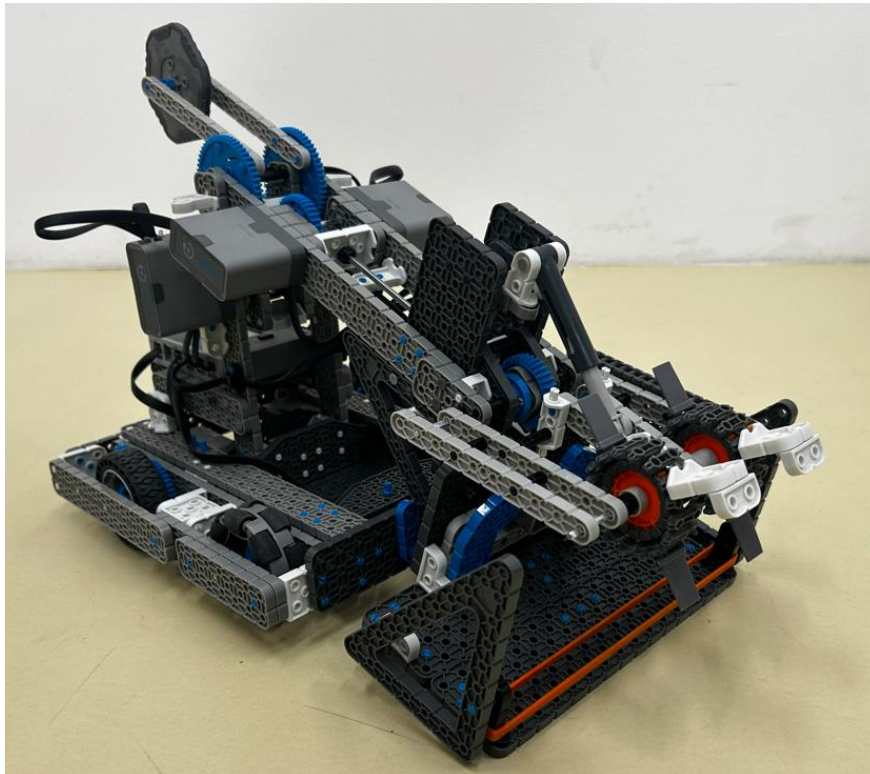
<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1OmNfN8X9Trpr8UhcZAGPa-akSaPDrFxsoluerQ0AMQk/edit#gid=1599757292>

Aktivity přehledně s možností filtrování:

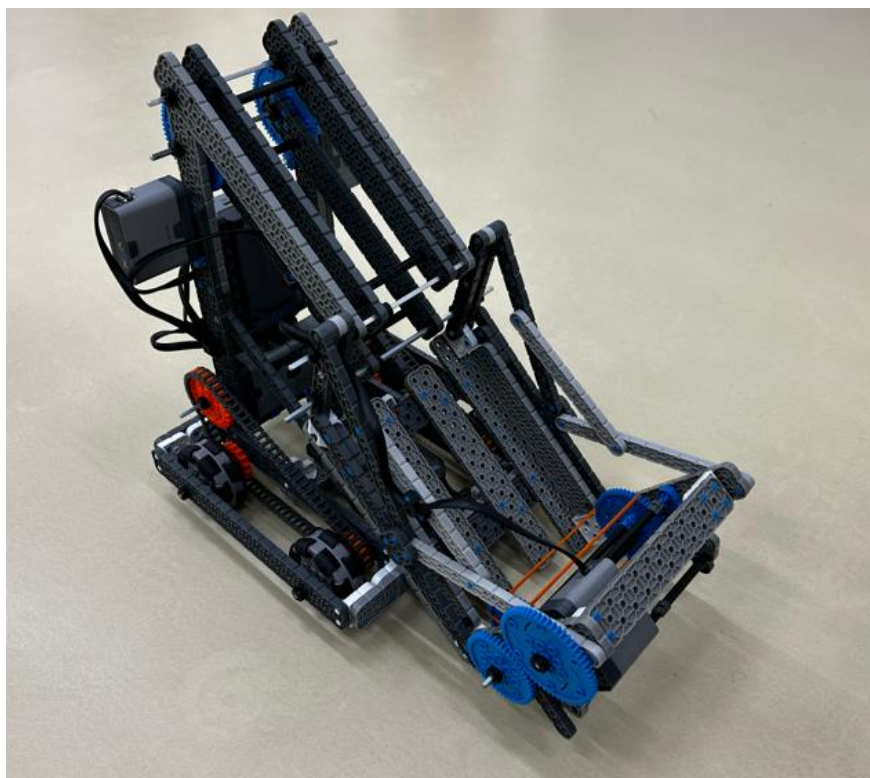
<https://education.vex.com/stemlabs/iq/activities>

A to nejdůležitější na konec Soutěž – fakt naprostá špička:

<https://visualcommunication.cz/vex-soutez/>



Obr. 11 Robotická stavebnice VEX IQ – konstrukční model 1



Obr. 12 Robotická stavebnice VEX IQ – konstrukční model 2

6 A pokud Vám ani předchozí nestačí:

Pro další rozvoj je možné použít robotickou stavebnici VEX EXP – zační experimentovat a robotickou stavebnici VEX V5 – vše propoj s praxí. Tyto stavebnice obsahují již kovové konstrukční prvky a cíly i na motorické dovednosti s tím, že je zde vyžadována pokročilá úroveň konstrukčních i programovacích dovedností. Proto je vhodné používat tyto stavebnice spíše na středních nebo vysokých školách.

Doporučené odkazy další produkty VEX:

Webová stránka produktu VEX EXP:

<https://www.vexrobotics.com/exp>

Webová stránka produktu VEX V5:

<https://www.vexrobotics.com/v5>

Připravují se další produkty:

Webová stránka produktu VEX CTE:

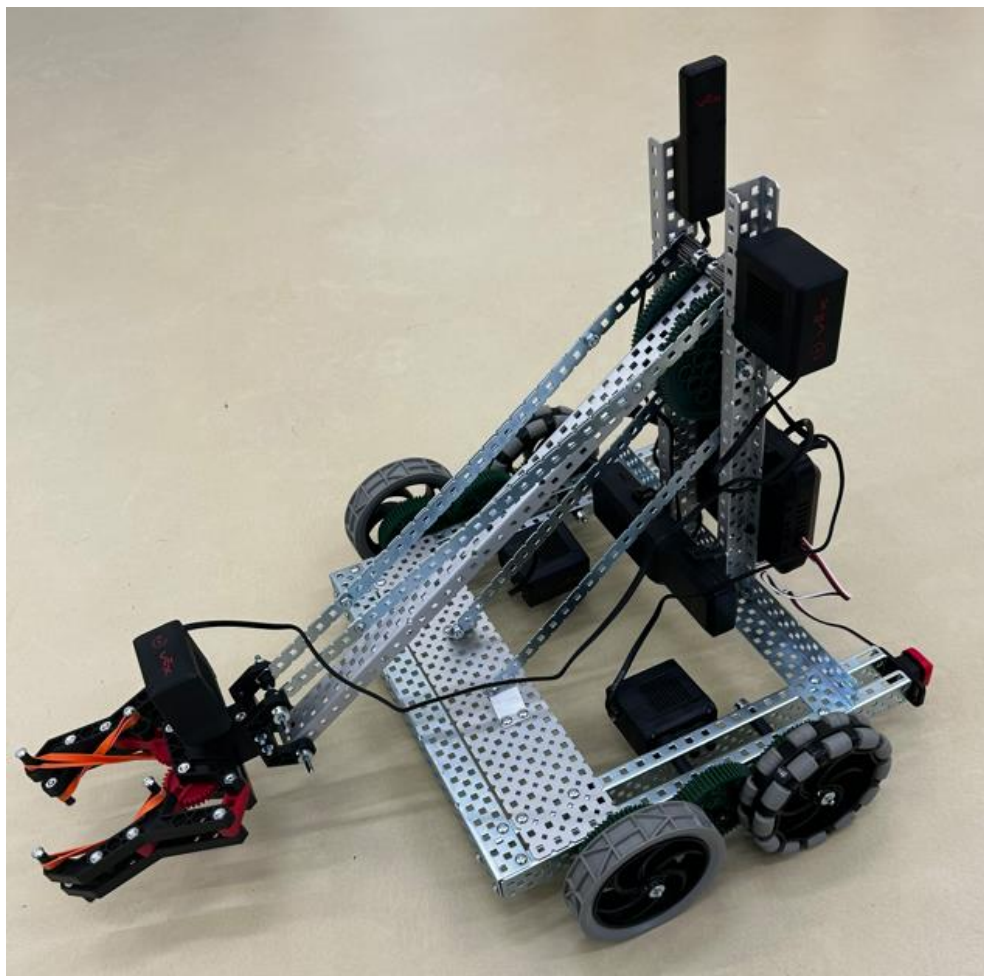
<https://www.vexrobotics.com/cte>

Webová stránka produktu VEX AIR:

<https://www.vexrobotics.com/air>

Webová stránka produktu VEX AIM:

<https://www.vexrobotics.com/aim>



Obr. 12 Robotická stavebnice VEX V5 – konstrukční model

References

- [1] ALIMISIS, D. (2012). Integrating Robotics in Science and Technology Teacher Training Curriculum. Proceedings of 3rd International Workshop Teaching Robotics, Teaching with Robotics, Integrating Robotics in School Curriculum Riva del Garda (Trento, Italy), 170–179.
- [2] EGUCHI, A., & URIBE L. (2017). Robotics to Promote STEM Learning: Educational Robotics Unit for 4th Grade Science. 2017 IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC), 186–194.
- [3] FALES, A. (2023). Edukační robotika. Flashdisk pp. 169-172, X. mezinárodní konference „Experimentální a výpočtové metody v inženýrství 2023“, Ústí nad Labem 2023, ISBN 978-80-7561-411-7.
- [4] Autor neuveden. (2024). VEX 123. In: VEX Robotics [online]. VEX Robotics, Inc. ©2024. Dostupné z: <<https://www.vexrobotics.com/123>>
- [5] Autor neuveden. (2024). VEX GO. In: VEX Robotics [online]. VEX Robotics, Inc. ©2024. Dostupné z: <<https://www.vexrobotics.com/go>>
- [6] Autor neuveden. (2024). VEX IQ. In: VEX Robotics [online]. VEX Robotics, Inc. ©2024. Dostupné z: <<https://www.vexrobotics.com/iq>>
- [7] Autor neuveden. (2024). VEX EXP. In: VEX Robotics [online]. VEX Robotics, Inc. ©2024. Dostupné z: <<https://www.vexrobotics.com/exp>>
- [8] Autor neuveden. (2024). VEX V5. In: VEX Robotics [online]. VEX Robotics, Inc. ©2024. Dostupné z: <<https://www.vexrobotics.com/v5>>

Analysis of the eigenfrequencies and stability for the supporting structure of the gantry crane

Ján Vavro jr. (0009-0009-6787-9041)¹, Ján Vavro (0009-0001-3704-4934)¹, Ľuboš Marček (0009-0005-3699-0100)¹, Jana Kuricová (0009-0005-4560-884X)¹, Miloš Taraba (0009-0000-2006-8350)¹, Lukáš Klimek (0009-0000-9525-414X)¹, Pavol Čerňava (0009-0006-5455-6305)¹

¹Faculty of Industrial Technologies in Púchov, Alexander Dubček University of Trenčín, I. Krasku 491/30, 020 01 Púchov, Slovakia. E-mail: jan.vavro.jr@tnuni.sk, jan.vavro@tnuni.sk, lubos.marcek@tnuni.sk, jana.kuricova@tnuni.sk, milos.taraba@tnuni.sk, lukas.klimek@tnuni.sk, pavol.cernava@tnuni.sk

The paper presents an analysis of the eigenfrequencies (natural frequencies) for a gantry crane, using SolidWorks software. The gantry crane is designed to remove dirt that is in front of the turbine under the water surface. In addition to the operating load, the inherent frequencies of the crane structure are also an important factor which, along with the excitation frequency, can affect the overall global loss of the crane stability. The stability of the crane during its operation is closely related to the load applied to the crane structure. In computer simulations, stability is expressed by a critical force ($F_{crit.}$) and when it is exceeded, local or global stability will be lost. In the article (paper), the first 10 eigenfrequencies of the crane are given in tabular form, and the first three eigenshapes are shown in graphic form. The total loss of crane stability, which is expressed by the critical force ($F_{crit.}$), is also shown in graphic form.

Keywords: Loading, virtual model, stabilita, critical force, natural frequencies

1 Úvod

Určenie vlastných frekvencií a príslušných vlastných tvarov vyšetrovanej mechanickej sústavy má pre inžinierov význam hlavne pri hodnotení správania sa modelovaného objektu namáhaného časovo premenlivými silami s významnými harmonickými zložkami. Ide predovšetkým o skutočnosť, aby významné frekvencie budenia a vlastné frekvencie sústavy neboli rovnaké, resp. boli od seba dostatočne vzdialené. V opačnom prípade dôjde k vybudeniu vlastných kmitov, čím je charakterizovaný tzv. rezonančný jav, ktorý je v prevádzke neprijateľný vzhľadom na to, že je často sprevádzaný znefunkčnením a následnou haváriou konštrukcie. Bezpečnosť a spoľahlivosť prevádzky žeriava veľakrát závisí od jeho stability. Pod globálnou stabilitou žeriava ako celku rozumieme jeho schopnosť odolávať preklápajúcim momentom od zdvíhajúcej záťaže, sily vetra, vlastnej hmotnosti jednotlivých elementov a agregátov žeriava, dynamických zaťažení vznikajúcich pri jeho pohybe po nerovnej koľajovej dráhe. Podmienkou zachovania stability žeriava je rovnosť (alebo prevýšenie) momentu stability M_{stab} od sily tiaže samotného žeriava proti všetkým silám, ktoré spôsobujú moment preklopenia M_{prek} .

Podmienka stability je vyjadrená $M_{stab} \geq M_{prek}$,

kde

M_{stab} - je výsledný moment stability,

M_{prek} - je výsledný moment preklopenia od vonkajších síl.

Všetky momenty sa počítajú u žeriavov pohybujúcich sa po koľajniciach k osiam dotyku pojazdných kôl s koľajnicou. Pri výpočte stability sa vyberá najnepriaznivejšie zaťaženie prevádzky žeriava pri kombinácii ostatných vonkajších zaťažení.

Vplyvom prevádzky žeriava môže dochádzať i k tzv. lokálnej strate stability v dôsledku preťaženia niektorej nosnej časti konštrukcie. Pri počítačovej simulácii je stabilita vyjadrená kritickou silou $F_{krit.}$, po jej prekročení dôjde k strate stability buď lokálnej, alebo globálnej. Pri výpočte stability sa vyberá najnepriaznivejšie zaťaženie prevádzky žeriava pri kombinácii ostatných vonkajších zaťažení.

2 Výsledky merania koľajovej dráhy hradidlového žeriava

Nerovnosti koľaje sa obvykle rozdeľujú na zvislé a priečne. Zo zvislých nerovností jednotlivých koľajnicových pásov sa spravidla odvodzujú dva druhy nerovností, a to zvislé nerovnosti osi koľaje v pozdĺžnom profile (používajú sa ako budenie pre zvislý chod vozidla) a priečne prevýšenie koľajnicových pásov obvykle vo forme uhlových výchyliek (toto však predstavuje jeden z budiacich vstupov pre priečny chod vozidla). Z priečných nerovností sa obvykle uvažujú priečne odchýlky osi koľaje a odchýlky rozchodu koľaje. To znamená, že zo štyroch budiacich náhodných funkcií (ľavá a pravá koľajnica v priečnom i zvislom smere) dostávame tri, ktoré sú viazané na určité typy kmitavého pohybu žeriava (vozidla).

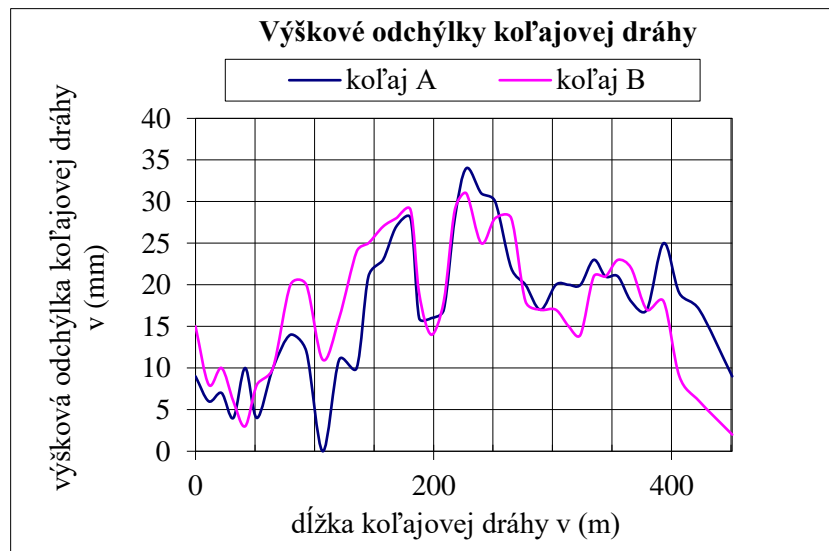
Samotná koľaj je zložitá dynamická sústava, ktorá pri pôsobení premenlivého pohyblivého zaťaženia spôsobeného dvojkolesiami koľajových žeriavov (vozidiel) mení svoj tvar. Zmena tvaru koľaje je náhodná, pretože jej priebeh je ovplyvnený nasledovnými faktormi:

- zvislou poddajnosťou koľajnic,

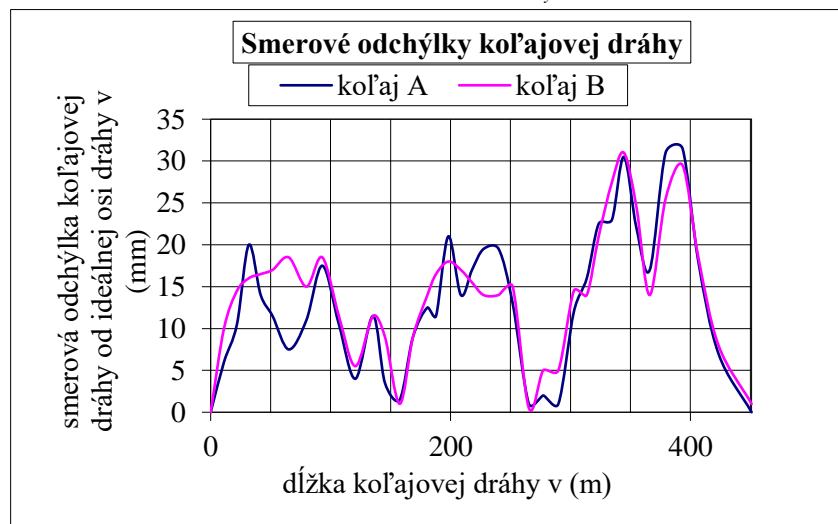
- pružnými podložkami medzi päťami koľajnic a podkladnicami,
- kvalitou štrkového lôžka, najmä skutočným stavom podbitia jednotlivých podvalov,
- poruchami únosnosti železničného spodku,
- dynamickými vlastnosťami koľajového žeriava (vozidla) pohybujúceho sa po nej.

V našom prípade, keďže koľajnicová dráha je uložená v betóne, budeme uvažovať iba dynamické vlastnosti hradidlového žeriava (vozidla). Experimentálne zisťovanie priebehu nerovností koľajnic je založený na geodetických metódach.

Na (Obr. 1) sú znázornené graficky výškové odchýlky koľajovej dráhy a na (Obr. 2) sú znázornené smerové odchýlky koľajovej dráhy.



Obr. 1 Priebeh zvislých nerovností nameraných na ľavej koľajnici $u_{yL}^{(1)}$ (koľaj A) a na pravej koľajnici $u_{yP}^{(1)}$ (koľaj B)



Obr.2 Priebeh priečných nerovností nameraných na ľavej koľajnici $u_{xL}^{(1)}$ (koľaj A) a na pravej koľajnici $u_{xP}^{(1)}$ (koľaj B)

3 Počítačová verifikácia výpočtového modelu žeriavu

Portálový hradidlový žeriav je určený na odstraňovanie nečistôt, ktoré sa nachádzajú pod vodnou hladinou pred turbínou do kontajneru (Obr. 3).



Obr. 3 Pohľad na portálový hradidlový žeriav

Prevádzkový režim portálového hradidlového žeriava (pracovný cyklus) môže byť nasledovný:

- pohyb žeriava po koľajovej dráhe na určenom stupni pojazdnej rýchlosti bez záťaže,
- zdvih bremena,
- pohyb žeriava po koľajovej dráhe na určenom stupni pojazdnej rýchlosti zo záťažou.

Do výpočtového modelu vstupujú nasledujúce parametre:

- Youngov modul pružnosti $E=2 \cdot 10^{11}$ [Pa],
- Poissonovo číslo $\mu=0,3$,
- hustota materiálu $\rho=7800$ [kg/m³],
- veľkosť zdvíhaného bremena $Q=32$ [t], 10 [t], 5 [t],
- vlastná hmotnosť žeriava a jednotlivých agregátov podľa výkresovej dokumentácie,
- kinematického budenia od nerovností koľajovej dráhy.

Na základe známych nerovností koľajnicovej dráhy použijeme pre kinematické budenie [1], [2], [5] jednotlivých kolies hradidlového žeriava ako vstupné veličiny štyri náhodné funkčné závislosti (Obr. 1) a (Obr. 2) definujúce nerovnosti jednotlivých koľajníc v závislosti na dráhe.

Kde: v - rýchlosť hradidlového žeriava v [m/min], [30 m/min], 15 [m/min],
 L - rázvor dvojkolesí 5,2 [m],

$u_{xL}^{(1)}$ - geometrická nerovnosť ľavej koľajnice v priečnom smere vzťahnutá na prednú (prvú) nápravu,

$u_{yL}^{(1)}$ - geometrická nerovnosť ľavej koľajnice v zvislom smere vzťahnutá na prednú (prvú) nápravu,

$u_{xP}^{(1)}$ - geometrická nerovnosť pravej koľajnice v priečnom smere vzťahnutá na prednú (prvú) nápravu,

$u_{yP}^{(1)}$ - geometrická nerovnosť pravej koľajnice v zvislom smere vzťahnutá na prednú (prvú) nápravu,

$u_{xL}^{(2)}$ - geometrická nerovnosť ľavej koľajnice v priečnom smere vzťahnutá na zadnú (druhú) nápravu

$$\text{a platí } u_{xL}^{(2)}(t) = u_{xL}^{(1)}\left(t - \frac{L}{v}\right),$$

$u_{yL}^{(2)}$ - geometrická nerovnosť ľavej koľajnice v zvislom smere vzťahnutá na zadnú (druhú) nápravu

$$\text{a platí } u_{yL}^{(2)}(t) = u_{yL}^{(1)}\left(t - \frac{L}{v}\right),$$

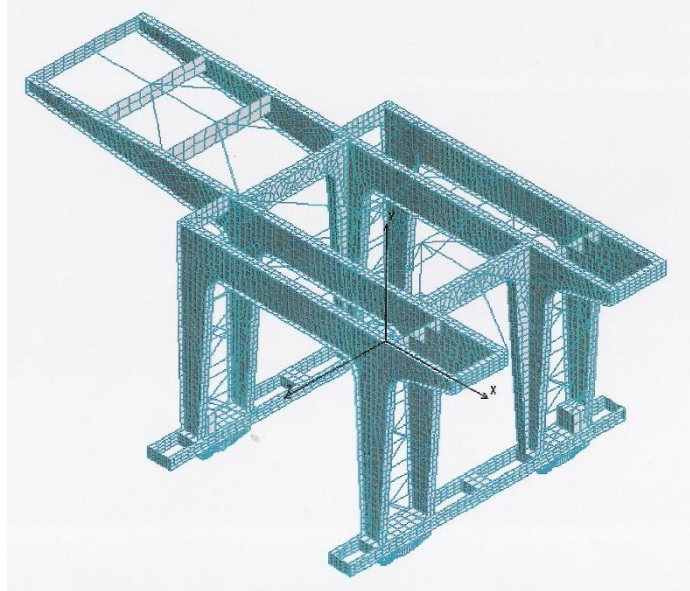
$u_{xP}^{(2)}$ - geometrická nerovnosť pravej koľajnice v priečnom smere vzťahnutá na zadnú (druhú) nápravu

$$\text{a platí } u_{xP}^{(2)}(t) = u_{xP}^{(1)}\left(t - \frac{L}{v}\right),$$

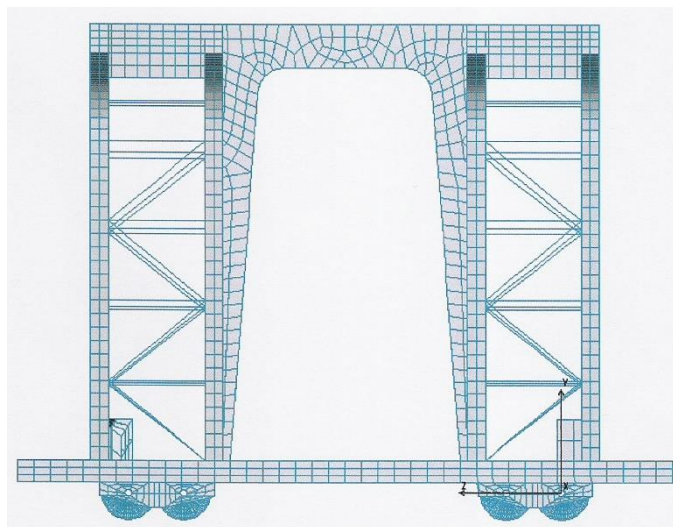
$u_{yP}^{(2)}$ - geometrická nerovnosť pravej koľajnice v zvislom smere vzťahnutá na zadnú (druhú) nápravu

$$\text{a platí } u_{yP}^{(2)}(t) = u_{yP}^{(1)}\left(t - \frac{L}{v}\right).$$

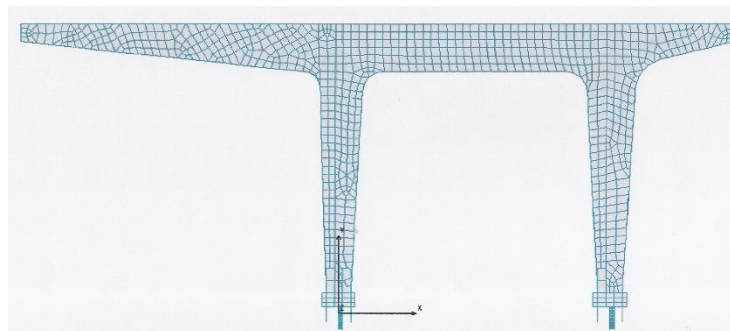
Na základe výkresovej dokumentácie sme vytvorili konečnoprvkový model [6], [7] nosnej konštrukcie portálového žeriavu v systéme SolidWorks (Obr. 4 až Obr. 6).



Obr. 4 Konečnoprvkový model nosnej konštrukcie portálového žeriavu

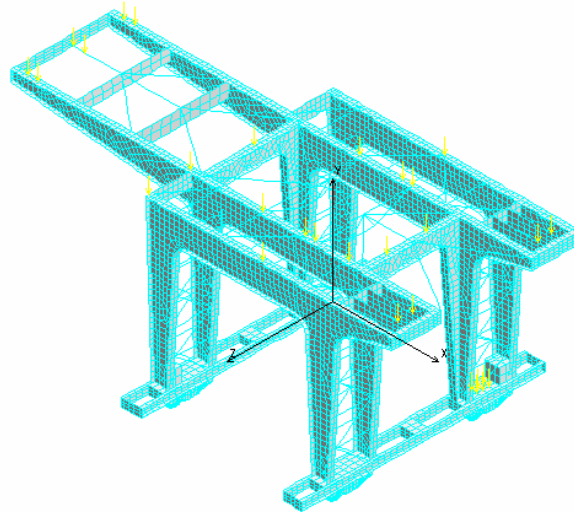


Obr. 5 Pohľad v smere osi x na konečnoprvkový model



Obr. 6 Pohľad v smere osi z na konečnoprvkový model

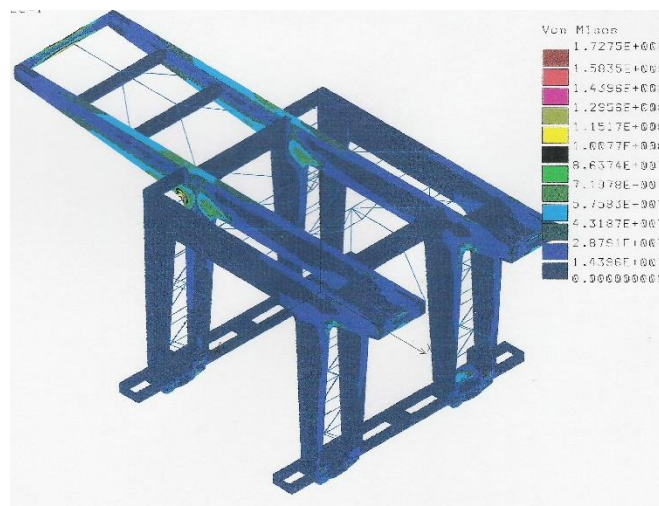
Rozloženie vonkajšieho zaťaženia od jednotlivých agregátov a protizávažia je na (Obr. 7).



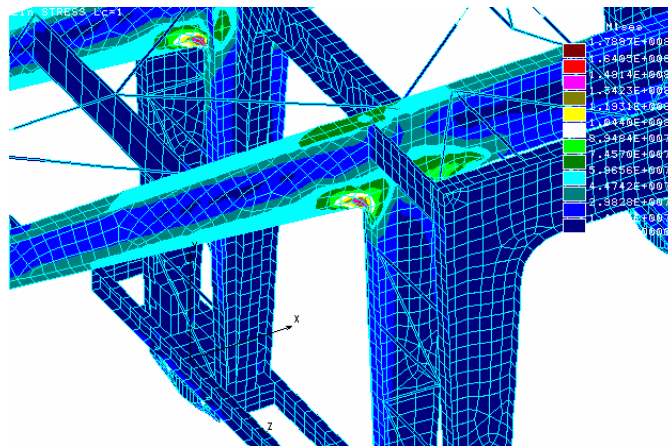
Obr. 7 Zaťaženia od jednotlivých agregátov

4 Výsledky zaťaženia a straty stability rámu portálového žeriava

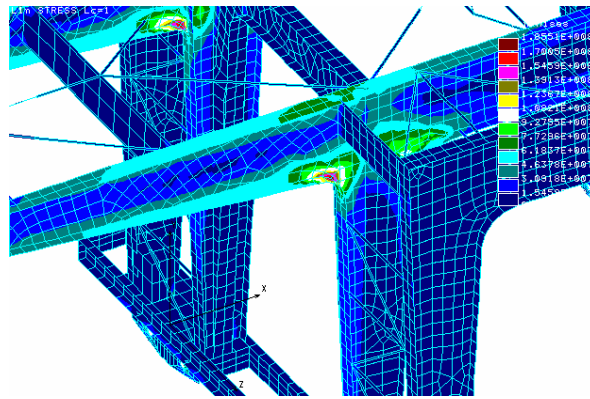
Na (Obr. 8 až Obr. 10) je rozloženie napätosti rámu žeriava pre zdvih 10 [t] na maximálnom vyložení a pojazdovej rýchlosti 30 [m/min] a pre rôzne nerovnosti koľajovej dráhy vo zvislom a priečnom smere podľa (Obr. 1 a Obr. 2).



Obr. 8 Rozloženie napätosti v bode koľajovej dráhy 250 [m] v [Pa]



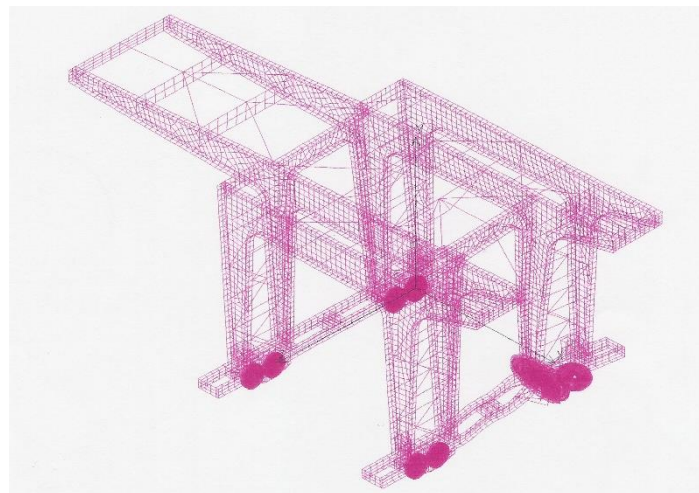
Obr. 9 Rozloženie napätosti v bode koľajovej dráhy 450 [m] v [Pa]



Obr. 10 Rozloženie napätosti v bode koľajovej dráhy 100 [m] v [Pa]

Stabilita žeriava (Obr.11) bola urobena pre zdvih zaťaženie 10 [t], pojazďovú rýchlosť žeriava 30 [m/min] a uvedenú nerovnosť koľajovej dráhy vo zvislom a priečnom smere v bode koľajovej dráhy 250 [m].

K celkovej strate stability dôjde pri preťažení silou 16839 N, pri strate kontaktu pojazďového kolesa s koľajnicou.



Obr. 11 Globálna strata stability žeriava v bode koľajovej dráhy 250 [m]

5 Modálna analýza portálového žeriavu

Veľký význam pri riešení úloh lineárnej dynamiky [3], [4], [8] má riešenie homogénnej diferenciálnej rovnice (1) s homogénnymi okrajovými podmienkami. Z hľadiska mechaniky konštrukcií ide o úlohu vlastného netlmeného kmitania.

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}(t) = \mathbf{0}. \quad (1)$$

kde:

\mathbf{M} matica hmotnosti,

\mathbf{K} matica tuhosti,

\mathbf{u} vektor posunutí,

$\ddot{\mathbf{u}}$ vektor zrýchlení.

Riešenie hľadáme v tvare

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{y} \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (2)$$

Výpočtom $\ddot{\mathbf{u}}$ a dosadením do (1) získame základnú rovnicu pre riešenie vlastného netlmeného kmitania

$$\left(-\omega^2 \cdot \mathbf{M} + \mathbf{K}\right) \cdot \mathbf{y} = \mathbf{0}. \quad (3)$$

Z matematického hľadiska predstavuje rovnica (3) problém vlastných čísel pre matice \mathbf{M} a \mathbf{K} . Vieme, že k tomu, aby rovnica (3) mala netriviálne riešenie, je nutné splniť podmienku

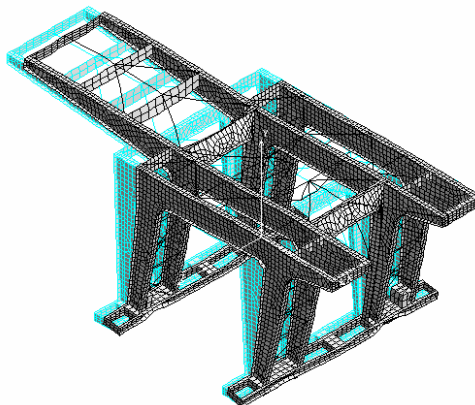
$$\det(\mathbf{K} - \omega^2 \cdot \mathbf{M}) = 0. \quad (4)$$

Ak je rozmer matíc \mathbf{M} a \mathbf{K} $n \times n$, potom môžeme vypočítať n vlastných kruhových frekvencií ω_i a n vlastných tvarov \mathbf{y}_i . Vlastné frekvencie zoradíme podľa veľkosti $\omega_1 \leq \omega_2 \leq \dots \leq \omega_n$. Zostavením vektorov \mathbf{y}_i do modálnej matice \mathbf{V} (\mathbf{y}_i tvorí

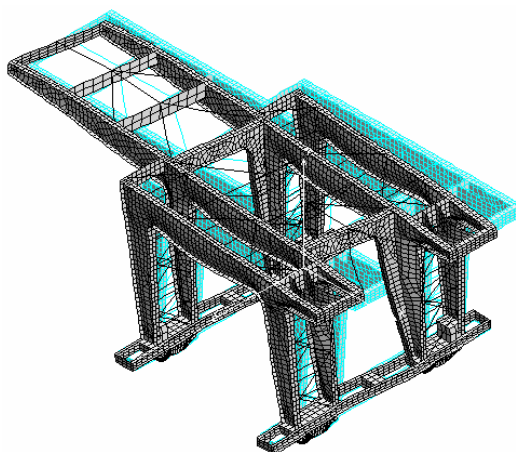
stĺpec modálnej matice) a kvadrátov vlastných frekvencií do diagonálnej spektrálnej matice Ω , môžeme všetky riešenia rovnice (3) zhrnúť v jednej rovnici

$$(\mathbf{K} - \Omega^2 \cdot \mathbf{M}) \cdot \mathbf{V} = \mathbf{0}. \quad (5)$$

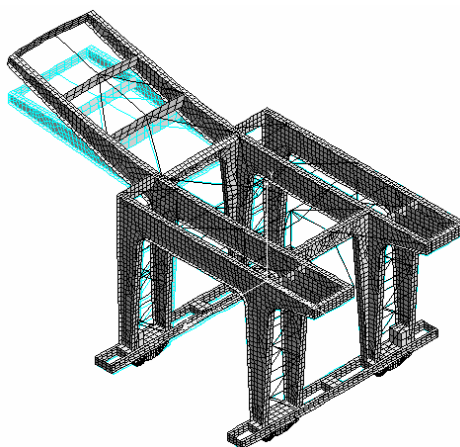
Modálna analýza bola vykonaná pre konečnoprvkový model portálového žeriavu (Obr. 2). Na (Obr. 5 až Obr. 7) sú zobrazené prvé tri tvary vlastných frekvencií portálového žeriavu v [Hz] a v Tab. 1 je uvedených prvých desiat' vlastných frekvencií nosnej konštrukcie portálového žeriavu.



Obr. 5 Prvý tvar vlastnej frekvencie v [Hz]



Obr. 6 Druhý tvar vlastnej frekvencie v [Hz]



Obr. 7 Tretí tvar vlastnej frekvencie v [Hz]

Tab. 1 Prvých desať vlastných frekvencií nosnej konštrukcie portálového žeriavu

Číslo frekvencie	Frekvencia [rad/sec]	Frekvencia [Hz]	Perioda [sec]
1	0.4427279E+02	0.7046233E+01	0.1419198E+00
2	0.5122712E+02	0.8153050E+01	0.1226535E+00
3	0.6001209E+02	0.9551221E+01	0.1046987E+00
4	0.8300188E+02	0.1321016E+02	0.7569931E-01
5	0.8918526E+02	0.1419428E+02	0.7045094E-01
6	0.9769244E+02	0.1554823E+02	0.6431598E-01
7	0.1012056E+03	0.1610738E+02	0.6208335E-01
8	0.1037301E+03	0.1650916E+02	0.6057245E-01
9	0.1044198E+03	0.1661892E+02	0.6017238E-01
10	0.1103911E+03	0.1756929E+02	0.5691749E-01

6 Záver

Nosná konštrukcia portálového žeriavu pri plnom zaťažení, t.j. od vlastnej hmotnosti konštrukcie a hmotnosti príslušných mechanizmov, pre pojazďovú rýchlosť 30 [m/min] v plnom rozsahu vyhovuje pre bezpečnú a spoľahlivú prevádzku. Maximálne zaťaženie dosahuje (Obr. 10) 185 [MPa] a je menšie ako $\sigma_{dov} = 210$ [MPa].

K strate stability by došlo v prípade, ak by sa zvýšilo vonkajšie zaťaženie o kritickú silu $F_{krit} = 0.039701 \cdot F_{von} = 0.039701 \cdot 296318 = 11764$ [N] v mieste zdvihu 10 [t] záťaže v bode koľajovej dráhy 100 [m]. Teda k strate stability by došlo vtedy, ak by pri zdvihu záťaže 10 [t] nevypol koncový vypínač a nosná konštrukcia by sa preťažila o 11764 [N]. Stabilita žeriavu závisí od vonkajšieho zaťaženia a tiež od nerovnosti koľajovej dráhy. V prípade zaťaženia 172 [MPa] (Obr.8) dôjde k strate stability pri prekročení $F_{krit} = 0,0455111 \cdot F_{von} = 0,455111 \cdot 370000 = 16839$ [N].

Podstatne sa miera stability zvýši, ak sa obmedzí pojazďová rýchlosť na 15 [m/min] a samozrejme sa nebudú vykonávať dva úkony súčasne tzn. zdvih a pojazď. Na stabilitu žeriavu má tiež vplyv vlastná frekvencia žeriavu. Z modálnej analýzy vyplýva, že najväčší vplyv bude mať prvá vlastná frekvencia žeriavu.

Acknowledgement

This work was supported by the Slovak Grant Agency – project KEGA 011TnUAD-4/2024.

References

- [1] Brát, V., (1976), *Handbook of Kinematics with Examples*, Prague, SNTL.
- [2] Paul, B., (1979) *Kinematics and Dynamics of Planar Machinery*, New Jersey, Prentice-Hall.
- [3] Saga, M., Vavro, J., Kopecký, M., (2002), *Počítačová analýza a syntéza mechanických sústav*, ISBN 80-968605-4-2, Žilina, 267 s.
- [4] Vavro, J., Kopecký, M., Vavro, J., Jr., (2007), *Nové prostriedky a metódy riešenia sústav telies III*, ISBN 978-80-8075-256-9, Žilina, 150 s.
- [5] Vavro, J., (2020), *Kinematic and Dynamic Analysis of Planar Mechanisms by Means of the SolidWorks Software*, Tribun EU s. r. o., ISBN 978-80-263-1495-0, p. 156.
- [6] Vavro, J., Jr., Vavro, J., Kováčiková, P., Bezdedová, R., (2016), *Kinematic and dynamic analysis of the manipulator for removal of rough tyres*, Procedia Engineering, 136, pp. 120 - 124.
- [7] Vavro, J., Jr., Vavro, J., Kováčiková, P., Bezdedová, R., (2017), *Kinematic and dynamic analysis of planar mechanisms by means of the solid works software*, Procedia Engineering, 177, pp. 476 - 481.
- [8] Vavro, J., Vavro, J., Jr., (2019), *Aplikácia výpočtových a experimentálnych metód v gumárenskom priemysle*, ASSA spol. s.r.o., Púchov, 120 s.

Studie zatěžování elektromobilu a zpětný vliv na životnost akumulátoru

Zdeněk Růžička (0009-0008-3360-6996)¹, Vít Černošlávka (0000-0001-6816-1124)², Jan Štěrba (0000-0002-2676-3562)³
¹Faculty of Mechanical Engineering, J. E. Purkyne University in Usti nad Labem. Pasteurova 3334/7, 400 01 Usti nad Labem. Czech Republic. E-mail: zdenek.ruzicka@ujep.cz, vit.cernohlavek@ujep.cz, jan.sterba@ujep.cz

Abstrakt

Práce se zabývá přehledem akumulátorů, zejména lithiových pro účel zdroje energie elektromobilů. Náhledem do metodiky testů ve vozidle za simulace laboratorních podmínek, ale i v reálném provozu. Cílem je zejména potvrdit, či vyvrátit praktičnost tohoto řešení energetického zdroje za simulace podmínek reálného provozu v nepříznivých podmínkách.

Proces testování bude využit jak za použití motorové brzdy, tak jízdou v provozu. S přihlédnutím ke stíženým podmínkám jako jsou povětrnostní vlivy. Jednotlivé testy se realizují s přihlédnutím k opakovatelnosti a tím vzniká možnost vytvoření statistického vyjádření zjištěných údajů ve vztahu k jednotlivým variantám testu.

Vliv na ověření změn kapacity akumulátoru mají zejména faktory jako počet nabíjecích cyklů a teplota. Předpokladem konečného zhodnocení je značný posun reálných parametrů k spodní hranici deklarovaných vlastností v oblasti celkového dojezdu elektromobilu.

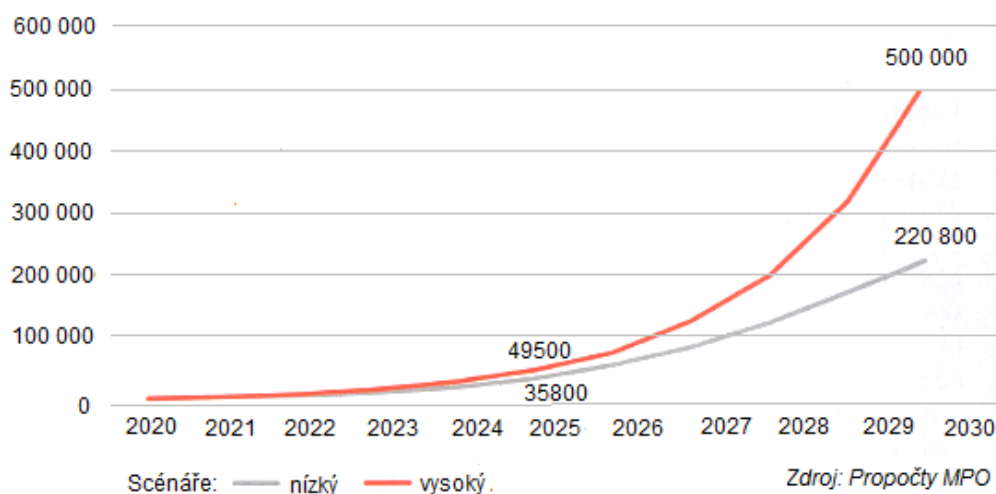
1. Úvod

Elektromobilita představuje klíčový prvek v přechodu k udržitelnější dopravě a energetice. Elektrické vozy (EV) nabízejí několik významných výhod oproti tradičním vozidlům se spalovacími motory:

- Snížení emisí: Elektrické vozy produkují nulové emise výfukových plynů, což přispívá k lepší kvalitě ovzduší a snížení skleníkových plynů.*
- Energetická efektivita: EV jsou energeticky efektivnější než vozidla se spalovacími motory, což znamená, že spotřebují méně energie na ujetí stejné vzdálenosti.*
- Nižší provozní náklady: Elektrické vozy mají nižší náklady na údržbu a provoz, protože mají méně pohyblivých částí a nepotřebují výměnu oleje.*
- Tichý provoz: EV jsou tišší než tradiční vozidla, což přispívá k nižší hladině hluku v městských oblastech.*

Vývoj počtu elektromobilů s výhledem k roku 2030

Zdroj: Propočty MPO



Graph 1 Vývoj a predikce počtu elektromobilů [9]

Budoucnost elektromobility vypadá slibně díky několika klíčovým trendům a inovacím:

- Vývoj nových typů baterií, jako jsou pevné baterie, může zvýšit dojezd a zkrátit dobu nabíjení.*
- Investice do nabíjecích stanic a rychlonabíjecích technologií usnadní používání EV pro širší veřejnost.*
- Mnoho vlád po celém světě zavádí pobídky a regulace na podporu elektromobility, včetně dotací na nákup EV a omezení pro vozidla se spalovacími motory.*
- Elektrické vozy mohou být nabíjeny z obnovitelných zdrojů energie, což dále snižuje jejich ekologickou stopu.*

Přestože elektromobilita nabízí mnoho výhod, existují i některá omezení, která je třeba překonat. Akumulátory elektrických vozů (EV) jsou klíčovou součástí těchto vozidel, protože poskytují energii potřebnou pro jejich pohon. Životnost těchto akumulátorů a vliv cyklování (nabíjení a vybití) na jejich výkon a trvanlivost jsou důležité faktory, které ovlivňují celkovou efektivitu a ekonomiku elektrických vozů. Nejběžnějším typem akumulátorů používaných v současných elektrických vozech jsou lithium-iontové (Li-ion) baterie. Tyto baterie jsou oblíbené díky své vysoké energetické hustotě, dlouhé životnosti a relativně nízké hmotnosti. Existují i jiné typy baterií, jako jsou nikel-metal hydridové (NiMH) a pevné baterie, ale Li-ion baterie dominují trhu. Životnost akumulátorů elektrických vozů je obvykle udávána v počtu nabíjecích cyklů. Jeden cyklus se skládá z jednoho plného nabití a jednoho plného vybití. Typická životnost Li-ion baterií se pohybuje mezi 1 000 a 2 000 cyklů, což při průměrném používání může odpovídat 8 až 15 letům provozu. Životnost baterie může být ovlivněna několika faktory, včetně:

- Teplota: Vysoké teploty mohou urychlit degradaci baterie, zatímco velmi nízké teploty mohou dočasně snížit její kapacitu.*
- Hloubka vybití (DoD): Čím menší je hloubka vybití, tím více cyklů může baterie vydržet. Například časté vybití baterie na méně než-li 20 % její kapacity snižuje její životnost.*
- Rychlost nabíjení: Rychlé nabíjení může způsobit vyšší teploty a zvýšené namáhání baterie, což může vést k rychlejší degradaci.*

Cyklování baterie má přímý vliv na její výkon a kapacitu. S každým nabíjecím cyklem dochází k mírné degradaci elektrochemických materiálů uvnitř baterie, což vede k postupnému snižování její kapacity. Tento proces je nevyhnutelný, ale jeho rychlost může být ovlivněna výše uvedenými faktory. Pro maximální životnost a výkon baterií elektrických vozů je důležité dodržovat několik doporučení:

- Udržování optimální teploty: Parkování vozidla v garáži nebo na stinném místě může pomoci udržet baterii v optimální teplotě.*
- Vyhýbání se hlubokému vybití a plnému nabíjení: Udržování nabití baterie mezi 20 % a 80 % může výrazně prodloužit její životnost.*
- Používání pomalého nabíjení: Kdykoli je to možné, používejte pomalé nabíjení místo rychlého nabíjení.*

2. Akumulátory

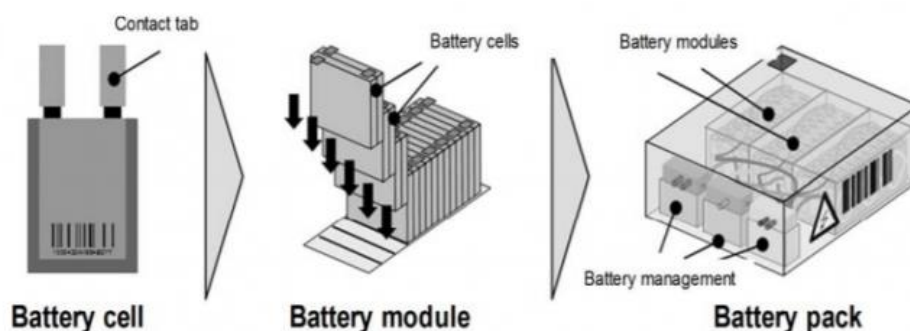


Fig. 1 Skladba akumulátoru elektromobilu [1]

2.1 Studium problematiky užitých akumulátorů a jejich kapacity:

V dnešní moderní společnosti hrají akumulátory klíčovou roli v napájení široké škály zařízení, od mobilních telefonů a notebooků až po elektromobily a systémy záložního napájení. Kapacita akumulátoru, definovaná jako množství energie, které dokáže uložit, je jedním z nejdůležitějších parametrů ovlivňujících jeho výkon a použitelnost. V této části se ponoříme do hloubky problematiky užitých akumulátorů a prozkoumáme několik klíčových aspektů

Tab. 1 Teoretický a reálný dojezd elektromobilů [9] [10] [11]

Automobil	Udávaný dojezd	Skutečný dojezd	Rozdíl
Tesla Model S 75D	490 km	328,3 km	161,7 km
Hyundai Ioniq Electric	280 km	188,3 km	91,7 km
Renault Zoe R110	316 km	235,0 km	81,0 km
Kia e-Niro	485 km	407,2 km	77,8 km
Hyundai Kona Electric 64 kWh	482 km	416,8 km	65,2 km
Smart ForTwo EQ	160 km	95,0 km	65,0 km
Nissan Leaf	270 km	206,0 km	64,0 km
Smart ForFour EQ	155 km	91,7 km	63,3 km
Jaguar I-Pace	470 km	407,2 km	62,8 km
Hyundai Kona Electric 39 kWh	312 km	254,3 km	57,7 km
Volkswagen e-Golf	231 km	188,3 km	42,7 km
BMW i3 94 Ah	235 km	194,7km	40,3 km

2.2 Různé typy akumulátorů:

Nejprve se seznámíme s klasifikací akumulátorů a jejich specifickými vlastnostmi, jako jsou napětí, kapacita, životnost, samovybíjení a specifická energie. Zaměříme se na běžné typy, jako jsou olověné, niklo-kadmiové, niklo-metal-hydridové, lithio-iontové a lithium-polymerové akumulátory. Každý z těchto typů má své výhody a nevýhody, které ovlivňují jejich vhodnost pro různé aplikace.

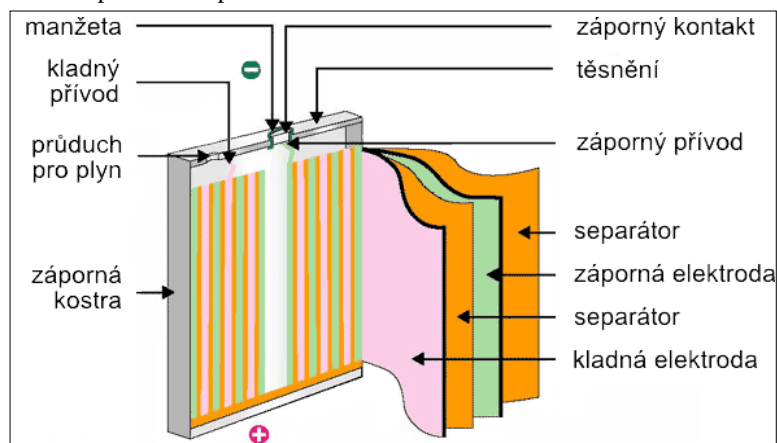


Fig. 2 Struktura lithiového akumulátoru [2]

2.3 Princip fungování akumulátorů:

Dále se podíváme na chemické procesy probíhající v akumulátorech během nabíjení a vybíjení. Porozumění těmto principům nám pomůže lépe pochopit jejich vlastnosti a možná omezení. Znalost základních chemických reakcí a fyzikálních jevů umožňuje optimalizaci používání a údržby akumulátorů.

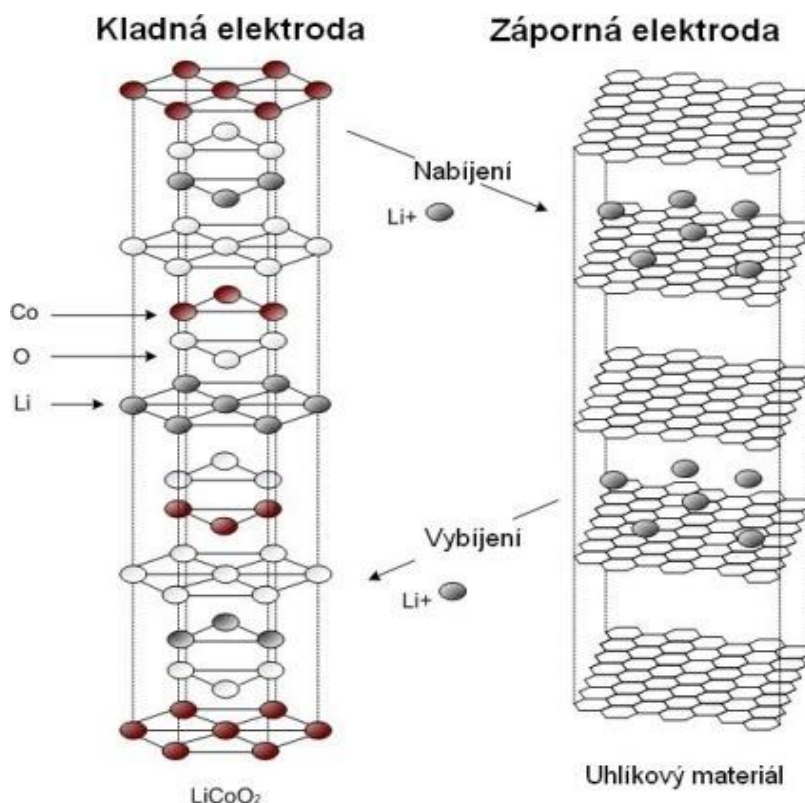


Fig. 3 Princip nabíjení a vybíjení lithiového akumulátoru [2]

2.4 Faktory ovlivňující kapacitu akumulátorů:

Prozkoumáme různé faktory, které ovlivňují kapacitu akumulátoru. Mezi tyto faktory patří typ akumulátoru, teplota, hloubka vybití, věk akumulátoru a způsob používání. Každý z těchto faktorů může výrazně ovlivnit výkon a životnost akumulátoru, a proto je důležité je detailně pochopit a vzít v úvahu při jejich používání.

2.5 Vliv na společnost a životní prostředí:

Zhodnotíme dopady užitých akumulátorů na společnost a životní prostředí. Tento aspekt zahrnuje problematiku udržitelnosti, sociálních dopadů a ekonomických aspektů. Akumulátory, přestože přinášejí mnoho výhod, mají také negativní dopady, například v podobě ekologické zátěže při jejich výrobě a likvidaci.

2.6 Budoucnost akumulátorových technologií:

Podíváme se na trendy ve vývoji technologií akumulátorů, jako je zvyšování kapacity, prodlužování životnosti, snižování ceny a vývoj nových typů akumulátorů. Budoucnost akumulátorových technologií je slibná, s mnoha inovacemi, které mohou přinést výrazné zlepšení jejich výkonu a udržitelnosti.

Cílem této sekce je dosáhnout komplexního pochopení problematiky užitých akumulátorů a jejich kapacity. Budeme se věnovat principům fungování, faktorům ovlivňujícím kapacitu, dopadům na společnost a životní prostředí a budoucím trendům ve vývoji. Tento hluboký vhled nám umožní lépe využívat a optimalizovat akumulátory v různých aplikacích.

2.7 Typy užitých akumulátorů a jejich vlastnosti

2.7.1 Klasifikace akumulátorů:

V oblasti užitých akumulátorů existuje široká škála typů, které se liší chemickým složením a principem fungování. Mezi nejběžnější kategorie patří:

Olovené akumulátory: Tento tradiční typ je známý pro své nízké náklady a odolnost. Přestože mají nižší specifickou energii a kratší životnost, jsou hojně využívány v automobilech a záložních napájecích systémech.

Niklo-kadmiové akumulátory: Oproti oloveným akumulátorům nabízejí vyšší specifickou energii a delší životnost. Nicméně, jsou dražší a méně šetrné k životnímu prostředí. Najdeme je v přenosných zařízeních, jako jsou notebooky a powerbanky.

Niklo-metal-hydridové akumulátory: Tyto akumulátory představují vylepšenou verzi niklo-kadmiových akumulátorů, vyznačují se delší životností a nižším samovybíjením. Mají široké uplatnění v hybridních automobilech, náradí a dalších oblastech.

Lithio-iontové akumulátory: Jsou špičkou moderních technologií a pyšní se nejvyšší specifickou energií a nejdelší životností. Dominují v mobilních telefonech, elektromobilech a široké škále dalších zařízení.

Lithium-polymerové akumulátory: Tyto varianty lithio-iontových akumulátorů mají lehčí a flexibilnější konstrukci, což je ideální pro přenosná zařízení, kde je klíčová nízká hmotnost a kompaktní rozměry.

Tyto různé typy akumulátorů mají své specifické vlastnosti, výhody a nevýhody, které určují jejich vhodnost pro konkrétní aplikace. Olovené akumulátory vynikají nízkými náklady, zatímco lithio-iontové a lithium-polymerové akumulátory nabízejí vysokou energetickou hustotu a dlouhou životnost, což je činí ideálními pro moderní elektronická zařízení a elektromobily.

2.7.2 Charakteristika a vlastnosti:

Každý typ akumulátoru má specifické vlastnosti, které ovlivňují jeho výkon, životnost a oblast použití. Tyto vlastnosti zahrnují napětí, kapacitu, životnost, samovybíjení, specifickou energii a cenu.

Napětí: Nominální napětí akumulátoru udává rozdíl potenciálů mezi jeho póly. Napětí běžných typů akumulátorů se pohybuje od 1,2 V (např. olovené akumulátory) do 3,7 V (např. lithio-iontové akumulátory). Toto napětí je klíčové pro určení, zda je daný akumulátor vhodný pro konkrétní aplikaci, například pro napájení různých elektronických zařízení.

Kapacita: Kapacita udává množství energie, které akumulátor dokáže uložit, a měří se v ampérhodinách (Ah). Vyšší kapacita znamená, že akumulátor může poskytnout energii po delší dobu na jedno nabití, což je důležité například pro mobilní telefony nebo elektrická vozidla, kde je dlouhá provozní doba žádoucí.

Životnost: Životnost akumulátoru se měří počtem cyklů nabíjení a vybíjení, které akumulátor vydrží, než ztratí značnou část své kapacity. Vyšší cyklická životnost znamená, že akumulátor může být používán déle, aniž by bylo nutné jej často měnit. To je klíčové pro aplikace, kde je spolehlivost a dlouhodobé používání důležité, jako například v průmyslových zařízeních.

Samovybíjení: Samovybíjení je postupná ztráta energie akumulátoru i v nepoužívaném stavu. Nižší samovybíjení prodlužuje dobu, po kterou lze akumulátor skladovat bez výrazného úbytku energie. To je výhodné pro záložní napájecí systémy a jiné aplikace, kde se akumulátory používají jen občas.

Specifická energie: Specifická energie je množství energie uložené v akumulátoru na jednotku hmotnosti (Wh/kg). Vyšší specifická energie umožňuje kompaktnější a lehčí konstrukce zařízení, což je výhodné zejména pro přenosná elektronická zařízení a elektrická vozidla, kde je nízká hmotnost klíčová.

Cena: Pořizovací náklady akumulátoru se liší v závislosti na typu, technologii a výrobci. Cena je důležitým faktorem při výběru akumulátoru, zejména pokud jde o velkoobjemové aplikace nebo masovou produkci, kde mohou náklady výrazně ovlivnit ekonomiku celého projektu.

Tyto vlastnosti společně určují, jaký typ akumulátoru je nejvhodnější pro konkrétní použití, a pomáhají uživatelům a výrobcům rozhodnout, který akumulátor nejlépe vyhovuje jejich potřebám a požadavkům.

2.8 Princip fungování užitých akumulátorů:

2.8.1 Chemické procesy:

Princip fungování akumulátorů je založen na reverzibilních chemických reakcích, které probíhají mezi elektrodami v elektrolytu. Tyto reakce umožňují ukládání energie během nabíjení a její uvolňování během vybíjení.

Během nabíjení dochází k oxidaci záporné elektrody a redukci kladné elektrody. Energie z externího zdroje se využívá k rozdělení iontů v elektrolytu a jejich přenosu mezi elektrodami. U lithio-iontového akumulátoru se například během nabíjení ionty lithia (Li^+) přesouvají z kladné elektrody (LiCoO_2) do záporné elektrody (grafit), zatímco elektrony (e^-) proudí v opačném směru v externím obvodu. Tento proces umožňuje ukládání energie do akumulátoru.

Při vybíjení probíhá opačný proces. Záporná elektroda se oxiduje a kladná elektroda se redukuje. Uložená energie v akumulátoru se uvolňuje ve formě elektrického proudu v externím obvodu. V případě lithio-iontového akumulátoru se

během vybíjení ionty lithia (Li^+) přesouvají z grafitu (záporná elektroda) do LiCoO_2 (kladná elektroda), přičemž elektrony (e^-) proudí opačným směrem v externím obvodu. Tento proces umožňuje využití uložené energie v akumulátoru pro napájení různých zařízení.

Tyto chemické procesy jsou základem pro fungování všech typů akumulátorů a umožňují jejich opakované nabíjení a vybíjení, což je klíčové pro jejich praktické využití v každodenním životě. Akumulátory tak poskytují potřebnou energii pro širokou škálu aplikací, od malých elektronických zařízení až po velká elektrická vozidla.

2.8.2 Reverzibilita a cyklovatelnost:

Reverzibilita chemických reakcí v akumulátoru je klíčová pro jeho cyklovatelnost, tedy schopnost opakovaného nabíjení a vybíjení. Kvalitní akumulátory mohou projít stovkami až tisíci cykly bez výrazné ztráty kapacity.

Různé faktory ovlivňují reverzibilitu a cyklovatelnost akumulátorů:

Materiály elektrod a elektrolytu: Vlastnosti použitých materiálů výrazně ovlivňují rychlost a stabilitu chemických reakcí. Kvalitní materiály zajišťují vyšší stabilitu a efektivitu reakcí, což prodlužuje životnost akumulátoru.

Teplota: Teplota hraje zásadní roli v cyklovatelnosti akumulátorů. Vysoké teploty mohou urychlovat degradaci materiálů, což vede k rychlejšímu poklesu kapacity a snížení životnosti akumulátoru. Naopak příliš nízké teploty mohou zpomalit chemické reakce, což ovlivňuje výkon akumulátoru.

Hloubka vybití: Hluboké vybíjení akumulátoru, tedy jeho časté vybíjení až do velmi nízké úrovně kapacity, může vést k nevratným chemickým změnám a ztrátě kapacity. Optimální je udržovat vybíjení v určitém rozsahu, aby se minimalizovalo opotřebení.

Rychlost nabíjení a vybíjení: Rychlé nabíjení a vybíjení může generovat nadměrné teplo a mechanický stres na materiály, což negativně ovlivňuje cyklovatelnost. Pomalejší a kontrolované nabíjení a vybíjení může pomoci prodloužit životnost akumulátoru.

Tyto faktory společně ovlivňují, jak dlouho může akumulátor efektivně fungovat, a jak dobře si udrží svou kapacitu během opakovaného nabíjení a vybíjení. Výběr správných materiálů, udržování optimální teploty a řízení hloubky a rychlosti vybíjení jsou klíčové pro maximální využití a životnost akumulátorů.

2.8.3 Význam pro praxi:

Pochopení principu fungování akumulátorů má klíčový význam pro praktické využití v mnoha oblastech:

Správné používání: Znalost principů fungování akumulátorů umožňuje uživatelům dodržovat doporučené postupy nabíjení a vybíjení, což vede k prodloužení životnosti akumulátoru a optimalizaci jeho výkonu. Správné používání je zásadní pro minimalizaci opotřebení a ztráty kapacity akumulátoru.

Výběr akumulátoru: Porozumění chemickým procesům a vlastnostem materiálů umožňuje správně vybrat akumulátor s vhodnými vlastnostmi pro konkrétní aplikaci. Různé typy akumulátorů se liší ve svých schopnostech a vlastnostech, a znalost jejich principů fungování pomáhá při správném rozhodování při výběru.

Vývoj technologií: Základní pochopení principů fungování akumulátorů je klíčové pro vědecký a technologický pokrok v oblasti energetiky. Vědci a inženýři mohou na základě této znalosti vyvíjet nové typy akumulátorů s vyšší kapacitou, delší životností a lepšími vlastnostmi. Představení nových technologií akumulátorů může vést k efektivnějšímu využití energie a k pokroku v oblasti udržitelného rozvoje.

Porozumění principům fungování akumulátorů tedy není jen teoretické, ale má přímý dopad na každodenní život a technologický pokrok. Umožňuje efektivní a inteligentní využití akumulátorů v různých aplikacích a přispívá k rozvoji nových a lepších technologií v oblasti skladování energie.

2.9 Vlastnosti užitých akumulátorů:

Kapacita akumulátoru, definovaná jako množství energie, které dokáže uložit a dodat, je jedním z nejdůležitějších parametrů ovlivňujících jeho výkon a použitelnost. Mnoho faktorů může ovlivnit kapacitu akumulátoru, a to jak během jeho používání, tak i v průběhu jeho životnosti.

2.9.1 Vlastnosti užitých akumulátorů

Kapacita akumulátorů je zásadním faktorem určujícím jejich výkon a použitelnost. Při jejich využívání se setkáváme s několika klíčovými faktory, které výrazně ovlivňují jejich kapacitu. Různé druhy akumulátorů mají odlišnou kapacitu. Například lithium-iontové varianty jsou obvykle známé svou větší kapacitou ve srovnání s tradičními olovenými akumulátory. Důležitým aspektem je také teplota. Teplota hraje klíčovou roli v provozu akumulátorů, protože s klesající teplotou klesá i jejich kapacita. V chladných prostředích může akumulátor ztratit až polovinu své kapacity. Dalším faktorem je hloubka vybití. Čím hlouběji je akumulátor vybit, tím větší je riziko trvalé ztráty kapacity. Proto je důležité vyhnout se úplnému vybití, což by mohlo negativně ovlivnit jeho dlouhodobou životnost. S časem se také kapacita akumulátorů postupně snižuje, což je další důležitý faktor. Starší akumulátory obvykle disponují menší kapacitou než ty novější. Nakonec způsob používání má rovněž zásadní vliv na kapacitu akumulátorů. Rychlé nabíjení a vybíjení může způsobit degradaci a zkrátit jejich životnost. Dodržování pokynů výrobce je proto klíčové pro zachování jejich kapacity a dlouhodobou spolehlivost.

2.10 Faktory ovlivňující kapacitu akumulátorů

Kapacita akumulátorů je klíčovým parametrem, který určuje jejich schopnost uchovat a dodat energii. Při jejich používání se setkáváme s několika faktory, které mají významný dopad na jejich kapacitu:

Typ akumulátoru:

Různé typy akumulátorů mají odlišnou kapacitu. Například lithium-iontové akumulátory jsou obvykle známé svou větší kapacitou než tradiční olovené varianty.

Teplotní podmínky:

Teplota hraje klíčovou roli ve funkci akumulátorů. S klesající teplotou klesá i jejich kapacita. V chladném prostředí může akumulátor ztratit až polovinu své kapacity.

Hloubka vybití:

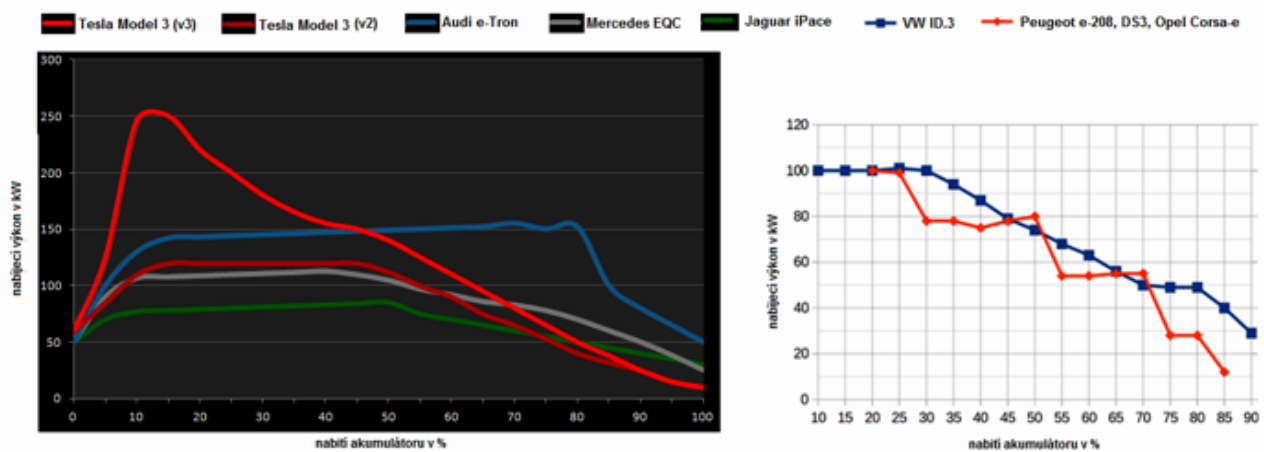
Čím hlouběji je akumulátor vybit, tím větší je riziko trvalé ztráty kapacity. Je proto důležité vyhnout se úplnému vybití, což může negativně ovlivnit jeho životnost.

Věk akumulátoru:

S časem se kapacita akumulátorů postupně snižuje. Starší akumulátory často disponují menší kapacitou než ty novější.

Způsob používání:

Způsob, jakým jsou akumulátory nabíjeny a vybíjeny, má také vliv na jejich kapacitu. Rychlé nabíjení a vybíjení může způsobit degradaci akumulátoru a zkrátit jeho životnost. Dodržování pokynů výrobce ohledně používání akumulátorů je klíčové pro zachování jejich kapacity a dlouhodobou spolehlivost.



Graph 2 Nabíjení akumulátoru elektromobilu [9] [12] [13]

2.10.1 Vliv na společnost a životní prostředí

Udržitelnost hraje klíčovou roli v oblasti akumulátorů, a to z několika důležitých důvodů. Jedním z nich je fakt, že výroba a likvidace akumulátorů může mít negativní dopad na životní prostředí. Proto je nezbytné používat akumulátory udržitelným způsobem a recyklovat je na konci jejich životnosti. Důležitými aspekty udržitelnosti jsou tedy těžba surovin, výrobní procesy, recyklace a likvidace.

Další důležitou oblastí jsou sociální dopady. Těžba surovin pro výrobu akumulátorů může mít negativní dopady na místní komunity, jako je znečištění životního prostředí a porušování lidských práv. Proto je klíčové dbát na etické a zodpovědné zdroje surovin a dodržovat pracovní a bezpečnostní standardy.

V neposlední řadě je třeba brát v úvahu i ekonomické aspekty. Trh s akumulátory roste, což zvyšuje poptávku po surovinách. To může vést k cenovým výkyvům a geopolitickým tlakům. Je proto důležité investovat do vývoje a výroby udržitelných a cenově dostupných akumulátorů, které budou respektovat potřeby budoucích generací a zároveň přinášet ekonomický prospěch.

2.11 Budoucnost akumulátorových technologií

V oblasti akumulátorů lze pozorovat značné trendy, které mají klíčový vliv na budoucnost těchto zařízení. Jedním z těchto trendů je neustálé zvyšování jejich kapacity. Průmysl se soustředí na vývoj akumulátorů s vyšší kapacitou, což umožní delší výdrž a rozšíření možností jejich využití. Paralelně s tím probíhá i snaha o prodloužení životnosti akumulátorů. Inovace v materiálech a technologiích směřuje k tomu, aby se minimalizoval jejich dopad na životní prostředí a prodloužila jejich životnost.

Dalším významným trendem je snižování ceny akumulátorů. Průmysl se snaží inovovat ve výrobních procesech, aby bylo možné nabízet akumulátory za nižší cenu, čímž se zvýší jejich dostupnost pro širší trh. Současně se také věnuje zajišťování bezpečnosti akumulátorů, přičemž se stále zdokonalují jejich bezpečnostní aspekty s cílem minimalizovat riziko požáru a výbuchu.

V oblasti nových technologií jsou zjištěna velká očekávání a výzvy. Například lithium-sírové akumulátory slibují vyšší kapacitu a nižší cenu, avšak ještě musí být řešeny otázky stability a cyklovatelnosti. Podobně je situace s lithium-vzduchovými akumulátory, které nabízejí teoreticky nejvyšší kapacitu, ale vyžadují řešení technických problémů týkajících se těsnění a bezpečnosti. Další novou technologií jsou pevné elektrolyty, které mohou přinést bezpečnější a stabilnější akumulátory s delší životností, ale vyžadují další výzkum pro zlepšení vodivosti.

Nicméně, i přes všechny pozitivní trendy, jsou zde i výzvy a překážky, kterým čelíme. Například dostupnost udržitelných a etických zdrojů surovin pro výrobu akumulátorů, efektivní a ekologická recyklace akumulátorů na konci jejich životnosti, nebo potřeba vytvořit jasné a podporující regulační rámce pro podporu inovací a udržitelnosti v oblasti akumulátorů.

Je však důležité si uvědomit, že akumulátory hrají klíčovou roli v budování udržitelné energetické budoucnosti. Umožňují skladování energie z obnovitelných zdrojů a její využití v časech nízké produkce, což je nezbytné pro dosažení energetické nezávislosti a boje proti změně klimatu.

3. Rekuperace

Rekuperace energie v elektromobilech (EV) je proces, při kterém se kinetická energie vozidla přeměňuje zpět na elektrickou energii, která se ukládá do baterie. Tento proces se nejčastěji využívá během brzdění nebo zpomalování vozidla. Když řidič uvolní plynový pedál nebo začne brzdit, elektromotor začne fungovat jako generátor. Místo toho, aby se energie ztrácela ve formě tepla, jak je tomu u tradičních brzdových systémů, je tato energie zachycena a přeměněna na elektrickou energii. Tato energie je pak uložena v baterii a může být znovu použita pro pohon vozidla, což zvyšuje celkovou účinnost a dojezd elektromobilu. Rekuperace energie má několik výhod

- a) *Efektivní využití energie z brzdění může prodloužit dojezd elektromobilu. To znamená, že řidiči mohou ujet delší vzdálenosti na jedno nabití, což je klíčové pro zvýšení praktičnosti a atraktivity elektromobilů pro širší veřejnost. V praxi to může znamenat méně časté zastávky na nabíjecích stanicích a větší pohodlí při delších cestách.*
- b) *Méně časté používání tradičních brzdových systémů znamená menší opotřebení brzdových destiček a kotoučů. To nejen snižuje náklady na údržbu, ale také zvyšuje bezpečnost vozidla, protože brzdové komponenty zůstávají déle v optimálním stavu. Navíc to přispívá k menšímu množství brzdového prachu, což má pozitivní dopad na životní prostředí.*

Efektivnější využití energie přispívá k nižší spotřebě elektrické energie a tím i k menšímu zatížení elektrické sítě a životního prostředí. Snižením potřeby častého nabíjení se také snižuje poptávka po elektřině, což může vést k menšímu využívání fosilních paliv pro výrobu elektrické energie. To vše přispívá k celkovému snížení emisí skleníkových plynů a zlepšení kvality ovzduší. Moderní elektromobily často umožňují řidičům nastavit úroveň rekuperace energie podle jejich preferencí, což může ovlivnit jízdní komfort a styl. Některé vozy nabízejí různé režimy rekuperace, od mírného až po silné brzdění, které může téměř úplně zastavit vozidlo bez použití tradičních brzd. Tento přizpůsobitelný přístup umožňuje řidičům optimalizovat své jízdní návyky pro maximální efektivitu nebo pohodlí podle aktuálních podmínek na silnici. Navíc, pokročilé systémy rekuperace energie mohou být integrovány s dalšími technologiemi, jako jsou adaptivní tempomaty a systémy pro správu energie, které dále zvyšují efektivitu a bezpečnost jízdy. Tyto systémy mohou například automaticky upravovat úroveň rekuperace na základě dopravní situace, sklonu silnice nebo rychlosti vozidla, což přispívá k plynulejší a efektivnější jízdě. Celkově vzato, rekuperace energie představuje klíčovou technologii pro budoucnost elektromobilů, která nejen zvyšuje jejich dojezd a snižuje náklady na údržbu, ale také přispívá k ochraně životního prostředí a zlepšení kvality života ve městech.

4. Motorová brzda

Při testování elektromobilu na motorové brzdě se také zkoumá životnost a kapacita baterie. Tento proces zahrnuje několik klíčových aspektů, které jsou nezbytné pro pochopení a optimalizaci výkonu baterií v elektromobilech. Měření aktuální kapacity baterie při různých zatíženích a rychlostech je zásadní pro určení, jak dlouho může elektromobil fungovat na jedno nabití. Testy mohou zahrnovat simulaci různých jízdních podmínek, jako jsou městské jízdy, jízdy po dálnici nebo jízdy v kopcovitém terénu, aby se zjistilo, jak se kapacita baterie mění v závislosti na zatížení. Tato data jsou klíčová pro vývoj baterií, které mohou nabídnout delší dojezd a lepší výkon v různých situacích. Kromě toho se zkoumá, jak rychle se baterie vybíjí při různých rychlostech a jaký vliv má na kapacitu baterie například použití klimatizace nebo topení v elektromobilu. Tyto faktory mohou výrazně ovlivnit celkový dojezd vozidla a jsou proto pečlivě analyzovány. Analýza, jak se kapacita baterie snižuje v průběhu času a při opakovaném zatěžování, je důležitá pro určení dlouhodobé životnosti

baterie. Tento aspekt zahrnuje sledování změn v kapacitě baterie po stovkách nebo tisících nabíjecích cyklů. Výrobci mohou tyto informace použít k vývoji baterií s delší životností a menší degradací, což je klíčové pro spokojenost zákazníků a udržitelnost elektromobilů. Degradace baterie může být ovlivněna mnoha faktory, včetně teploty, způsobu nabíjení a vybíjení, a dokonce i způsobu jízdy. Například agresivní jízda s častým zrychlováním a brzděním může urychlit degradaci baterie. Proto se při testování zohledňují různé jízdní styly a podmínky, aby se získal co nejpřesnější obraz o dlouhodobé životnosti baterie. Zjištění, jak se baterie zahřívá při různých zatíženích a jak efektivně se chladí, je kritické pro zajištění bezpečnosti a výkonu baterie. Přehřívání může vést k rychlejší degradaci baterie a snížení její životnosti, ale také k potenciálním bezpečnostním rizikům. Testy zahrnují měření teploty baterie při různých jízdních podmínkách a zatíženích, stejně jako hodnocení účinnosti chladicích systémů. Tepelná stabilita je zvláště důležitá při rychlém nabíjení, kdy se baterie může zahřívát více než při běžném provozu. Efektivní chladicí systémy jsou proto nezbytné pro udržení optimální teploty baterie a zajištění jejího dlouhodobého výkonu a bezpečnosti. Kromě toho se zkoumá, jak se baterie chová při extrémních teplotách, například v horkém letním dni nebo v mrazivých zimních podmínkách. Dalším důležitým aspektem je účinnost nabíjení a vybíjení baterie. To zahrnuje měření, kolik energie se ztrácí během těchto procesů a jak efektivně baterie dokáže přijímat a uvolňovat energii. Vyšší účinnost nabíjení znamená, že méně energie se ztrácí jako teplo, což může přispět k delší životnosti baterie a lepšímu celkovému výkonu elektromobilu. Testy mohou zahrnovat různé nabíjecí rychlosti a metody, včetně rychlého nabíjení a pomalého nabíjení přes noc, aby se zjistilo, jaký vliv mají tyto faktory na účinnost a životnost baterie. Kromě toho se zkoumá, jak se účinnost mění v průběhu času a jaký vliv má na ni opakované nabíjení a vybíjení. Celkově je testování baterií v elektromobilech komplexní proces, který zahrnuje mnoho různých aspektů a faktorů. Cílem je zajistit, aby baterie poskytovaly co nejlepší výkon, dlouhou životnost a bezpečnost pro uživatele elektromobilů. Výsledky těchto testů jsou klíčové pro další vývoj a inovace v oblasti bateriových technologií a elektromobilů.

4.1 Postup testování

Návrh testování elektrických vozidel (EV) na motorové brzdě je důležitým krokem pro ověření jejich výkonu, účinnosti a bezpečnosti. Níže je uvedený návrh testovacího plánu:

- a) *Ověřit výkon motoru při různých rychlostech a zatíženích.*
- b) *Změřit účinnost motoru a energetickou spotřebu.*
- c) *Ověřit funkčnost rekuperačního brzdění.*
- d) *Identifikovat případné problémy s přehříváním nebo jinými mechanickými problémy.*

4.1.1 Příprava testovacího prostředí

- a) *Zajistit, aby motorová brzda byla kalibrována a připravena pro testování.*
- b) *Zajistit, aby všechna bezpečnostní opatření byla na místě, včetně ochranných krytů a nouzových vypínačů.*
- c) *Instalovat potřebné senzory pro měření teploty, rychlosti, točivého momentu a dalších relevantních parametrů.*

4.1.2 Výkonové testy

- d) *Spustit motor při nízké rychlosti a postupně zvyšovat zatížení. Zaznamenat výkon a točivý moment.*
- e) *Spustit motor při vysoké rychlosti a postupně zvyšovat zatížení. Zaznamenat výkon a točivý moment.*

4.1.3 Účinnost motoru

- e) *Zaznamenat spotřebu energie při různých rychlostech a zatíženích.*
- f) *Vypočítat účinnost motoru na základě naměřených hodnot výkonu a spotřeby energie.*

4.1.4 Rekuperační brzdění

- a) *Simulovat brzdění a měřit množství energie, která je rekuperována zpět do baterie. –*
- b) *Vypočítat účinnost rekuperačního brzdění.*

4.1.5 Teplotní testy

- a) *Zaznamenat teplotu motoru a dalších klíčových komponent během testování.*
- b) *Provozovat motor při maximálním zatížení po delší dobu a sledovat, zda nedochází k přehřívání.*

4.1.6 Analýza dat

- [1] *Analýzovat naměřené hodnoty výkonu a točivého momentu*
- [2] *Vyhodnotit účinnost motoru na základě naměřených hodnot*
- [3] *Analýzovat účinnost rekuperačního brzdění*
- [4] *Vyhodnotit teplotní data a identifikovat případné problémy s přehříváním.*

5. Závěr

V příspěvku byla udělána rešerše typů akumulátorů s důrazem zejména na technologii lithiových baterií. Ty se vzhledem ke svojí koncentraci energie vzhledem k hmotnosti používají především v technologii elektromobility. Předpokládaným výstupem probíhajícího výzkumu je ověření tvrzení výrobců o dojezdu elektromobilů. Tyto údaje, jak je již celkem prakticky ověřeno vycházejí z idealizace podmínek provozu. Naším cílem je podrobit elektromobil sérii testů k ověření, nebo vyvrácení informací z různých zdrojů. K tomuto účelu se v jedné fázi pokusíme zatížit elektromobil pomocí motorové brzdy v laboratorních podmínkách. Vždy s několika proměnnými. Ať již rozsvícená světla, zapnuté topení, či stěrače. Včetně kombinace těchto jevů. Stejně testy budou provedeny i v rámci reálného provozu. Vždy před započítáním testu a po jeho ukončení bude sledováno několik parametrů. Teplota akumulátoru, proudy odebírané vozem, napětí akumulátoru. Samozřejmě kilometrový nájezd. Doba nabíjecího cyklu. Tyto podmínky budou opakovány v několika sekvencích pro určení změn v kapacitě akumulátoru vozu. Z výsledných hodnot sestavíme výstup, který bude reflektovat jednotlivé fáze procesu. Předpoklad je značné omezení dojezdu, za reálných podmínek v našem obvyklém prostředí.

Klíčová slova: Elektromobil, EV, Rekuperace, Akumulátory, Motorová brzda

References:

- [1] <https://www.evexpert.cz/eshop/znalostni-centrum/elektromobily-a-jejich-baterie>
- [2] <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektřiny/13612-lithiove-akumulatory>
- [3] Structural Considerations of Layered and Spinel Lithiated Oxides for Lithium Ion Batteries, M. M. Thackeray, J. Electrochem. Soc. 1995 volume 142, issue 8, 2558–2563
- [4] YOSHINO, A. (2012), The Birth of the Lithium-Ion Battery. Angew. Chem. Int. Ed., 51: 5798–5800. doi:10.1002/anie.201105006
- [5] Effects of yttrium ion doping on electrochemical performance of LiFePO₄/C cathodes for lithium-ion battery, Junming Chen, Xuchun Wang, Zhipeng Ma, Guangjie Shao, Ionics, October 2015, Volume 21, Issue 10, str. 2701–2708
- [6] RYDH, C. J, SANDÉN, B. A., Energy analysis of batteries in photovoltaic systems, Energy Conversion and Management 46 (2005), 1957–1979.
- [7] FEDORKOVÁ, A.: Analytical characterization of polypyrrole-LiFePO₄ powder as positive electrode material for lithium-ion batteries. Bratislava, 2010. Dizertační práce. Univerzita Komenského v Bratislavě.
- [8] WU, K., YANG, J, ZHANG, Y., WANG, CH., WANG, D. , Investigation on Li₄Ti₅O₁₂ batteries developed for hybrid electric vehicle, J Appl Electrochem (2012) 42:989–995, DOI 10.1007/s10800-012-0442-0
- [9] <https://www.fs.cvut.cz/verejnost/pr-media/pribehy-z-ustavu/kam-kracis-elektromobilito/>
- [10] Britové zjistili skutečný dojezd současných elektromobilů, většinou je to mizérie. <https://www.autoforum.cz/zajimavosti/britove-zjistili-skutecny-dojezd-soucasnych-elektromobilu-vetsinou-je-to-mizerie/>
- [11] Reálný dojezd 12 elektromobilů: Kdo dojede nejdál a kdo nejvíc lze? <https://autobible.euro.cz/realny-dojezd-12-elektromobilu-dojede-nejdal-nejvic-lze/>
- [12] Elektromobil pro všechny. První kilometry s VW ID.3 křížem křížem Českem. https://www.idnes.cz/auto/magazin/vw-volkswagen-id-3-elektromobil-jizda.A200830_075713_auto_testy_nyv?zdroj=vybava_idnes
- [13] Charge curves: teslamotors. Google search

Měření kvality jízdních vlastností osobního automobilu s aktivními tlumiči

Tereza Jarošová¹, Igor Žuravský¹, Martin Svoboda (ORCID ID: 0000-0002-7344-1531)¹, Vít Černohlávek (ORCID ID: 0000-0001-6816-1124)¹, Milan Sapieta³, Václav Schmid¹, Milan Chalupa (ORCID ID: 0000-0002-9366-1371)³, Zdeněk Krobot (ORCID ID: 0000-0002-7911-5577)², Patrik Balcar (ORCID ID: 0009-0007-4924-5681)

¹Faculty of Mechanical Engineering, Jan Evangelista Purkyně University in Ústí nad Labem, Pasteurova 3334/7, 400 01 Ústí nad Labem, Czech Republic, martin.svoboda@ujep.cz, vit.cernohlavek@ujep.cz, patrik.balcar@ujep.cz

²Faculty of Military Technology, University of Defence in Brno, Czech Republic, milan.chalupa@unob.cz, zdenek.krobot@unob.cz

³Faculty of Mechanical Engineering, Univerzity of Zilina. Unierzitna 1, 010 26 Zilina. Slovak Republic. E-mail: milan.sapieta@fstroj.uniza.sk

V článku je řešena kvalita jízdních vlastností osobního automobilu s aktivními tlumiči. Práce byla řešena pomocí experimentálních metod s využitím testovací stolice AHS. Hlavním cílem práce bylo posouzení soustavy pružení vozidla pomocí senzorů zrychlení a přítlaků mezi kolem a vozovkou pomocí testovacích stolic tlumičů pracujících metodikou EUSAMA a CAP. Výsledky práce prokázaly možnosti využití měření hodnot zrychlení ve vybraných místech ve vozidle. Rovněž byly ověřeny získané výsledky pro možnosti dalšího rozvoje v oblasti snižování dynamické zátěže při jízdě osobního automobilu po vozovce.

Keywords: automobil, experiment, jízdní vlastnosti, zrychlení, jízdní komfort, měření

1 Úvod

Tlumiče jsou nedílnou součástí podvozku automobilu a mají zásadní vliv na jízdní vlastnosti vozidla. Jejich úkolem je tlumit kmity karoserie a kol, které vznikají při jízdě po nerovnostech. Správná funkce tlumičů je důležitá pro zajištění bezpečnosti, jízdního komfortu a ovladatelnosti vozidla. V tomto článku se zaměříme na vliv konstrukce aktivních tlumičů a nastavení pružící soustavy na jízdní vlastnosti osobního automobilu.

Základním úkolem tlumičů je přeměna kinetické energie vozidla na energii tepelnou, a to prostřednictvím hydraulického odporu. Při přejezdu nerovností dochází ke stlačování a rozpínání tlumičů, což vede k přeměně pohybové energie na teplo, které je následně odváděno do okolí. Tímto způsobem tlumiče zabráňují nežádoucímu rozkmitání karoserie a kol, což má pozitivní vliv na jízdní komfort a stabilitu vozidla.

2 Teorie

Tlumení je fyzikální jev, při kterém dochází k postupnému snižování amplitudy kmitů. V případě automobilu se jedná o tlumení kmitů karoserie a kol, které vznikají při jízdě po nerovnostech. Tlumení zajišťují tlumiče, které jsou součástí podvozku vozidla.

Pasivní tlumiče jsou nejrozšířenějším typem tlumičů. Jejich charakteristika tlumení je dána konstrukcí a nemění se během jízdy. Pasivní tlumiče jsou relativně jednoduché a levné, ale jejich nevýhodou je, že nemohou optimálně reagovat na měnící se jízdní podmínky. [1, 2, 3]

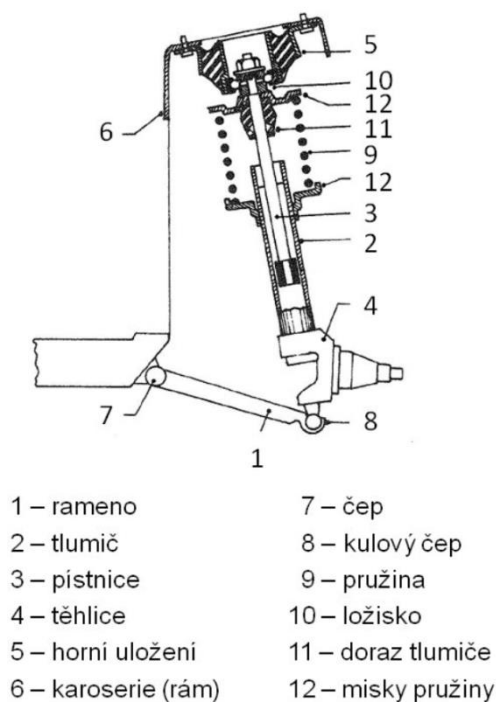
Semiaktivní tlumiče jsou tlumiče, které umožňují měnit charakteristiku tlumení v závislosti na aktuálních jízdních podmínkách. Změna charakteristiky tlumení je řízena elektronickou řídicí jednotkou, která vyhodnocuje signály z různých senzorů (např. senzorů zrychlení, senzorů pohybu kol). Semiaktivní tlumiče jsou dražší než pasivní tlumiče, ale nabízejí lepší jízdní vlastnosti a komfort. [2, 3]

Aktivní tlumiče jsou nejsofistikovanějším typem tlumičů. Dokáží nejen měnit charakteristiku tlumení, ale také aktivně působit proti pohybu kol a karoserie. Aktivní tlumiče jsou vybaveny hydraulickým čerpadlem, které vytváří tlak oleje, který je přiváděn do tlumičů. Tlak oleje je řízen elektronickou řídicí jednotkou, která vyhodnocuje signály z různých senzorů. Aktivní tlumiče jsou nejdražším typem tlumičů, ale nabízejí nejlepší jízdní vlastnosti a komfort.

Nastavení pružící soustavy je důležité pro zajištění optimálních jízdních vlastností vozidla. Správné nastavení pružící soustavy zahrnuje nejen volbu vhodných tlumičů, ale také pružin. Pružiny mají za úkol nést hmotnost vozidla a zajišťovat jeho odpružení. Charakteristika pružin (tuhost, progresivita) ovlivňuje jízdní vlastnosti vozidla stejně jako charakteristika tlumičů. [1, 8]

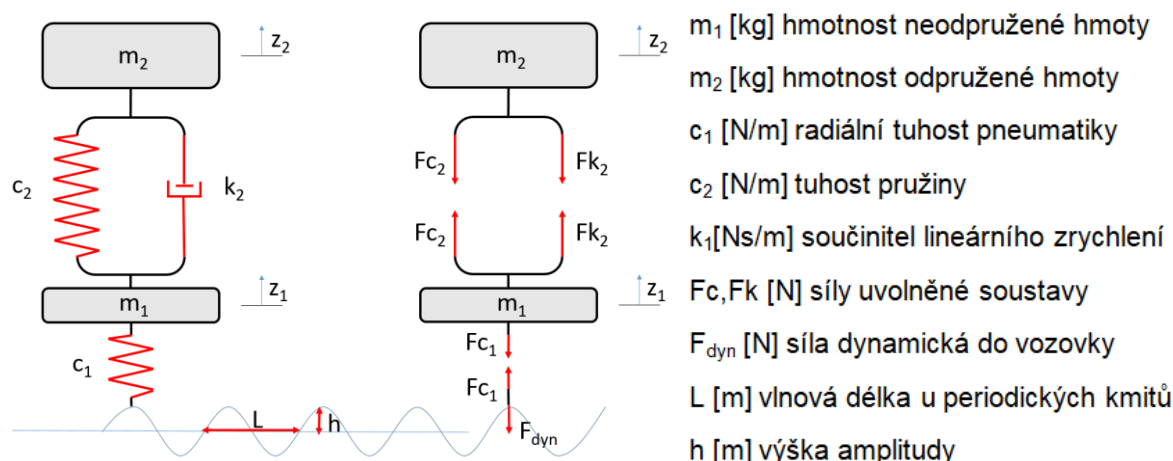
Systém odpružení má za úkol zachycovat rázy od vozovky (vznikající přejezdem překážek nebo propadem kola do nerovností na vozovce), měnit rázy na kmitání a kmitání pomocí tlumení utlumovat. Pohybem kola se stlačuje či prodlužuje pružina. Při přejezdu překážky pružina svoji silou urychlí pohyb karosérie (stlačení pružiny) a následně brzdí pohyb karosérie (roztahování pružiny). Stlačování a roztahování pružiny se děje kolem klidové polohy a to do doby, než dojde k úplnému útlumu, tj. přeměně kinetické energie v tepelnou. Pružiny (i tlumiče) jsou umístěny mezi zavěšením kol a nástavbou (karosérií). Odpružení zajistí, že je vozidlo „kmitající soustavou“ s vlastním kmitočtem karosérie, který je definován především velikostí odpružené hmoty vozidla a charakteristikou pružin. Charakteristiku definujeme tuhostí pružiny c [N.m⁻¹], která je definována poměrem síly F [N] k dráze s [m]. Charakteristika může být lineární nebo progresivní, měkká do 60 kmitů za minutu má nepříznivý dopad na nevolnost nebo tvrdá nad 90 kmitů za minutu má dopad na rázy do páteře. Hmotnost vozidla (odpružená hmota) je přenášena přes zavěšení kol, na disky kol (neodpružená hmota). Tyto dvě hmoty jsou propojeny pružinami, ale kmitají s různými kmitočty nezávisle na sobě. Tlumič přidaný k pružinám (zvětšuje odpor soustavy) způsobí pouze rychlejší odeznění kmitání tím, že sníží velikost amplitudy. Naopak velikost neodpružené hmoty ovlivňuje počet kmitů – kmitočet karosérie.

Způsob umístění tlumiče a pružinou (mezi karosérií a kolem) závisí na druhu použité nápravy. Nejčastější náprava typu McPherson (obr. 1), která je připevněna ke karosérii přes horní uložení a ke kolu přes těhlice (u lichoběžníkové nápravy přes spodní rameno). [16, 17, 18, 19]



Obr. 1. Konstrukce umístění tlumiče typu McPherson [2w, 3w]

Při konstrukci systému tlumení je potřeba brát zřetel na provozní podmínky a z nich vypočítat a poté navrhnout parametry odpružení. U všech výpočtů se používá zjednodušený dynamický model s příslušnými stupni volnosti (nejčastěji se dvěma), viz obrázek 2.



Obr. 2. Dynamický model tlumení

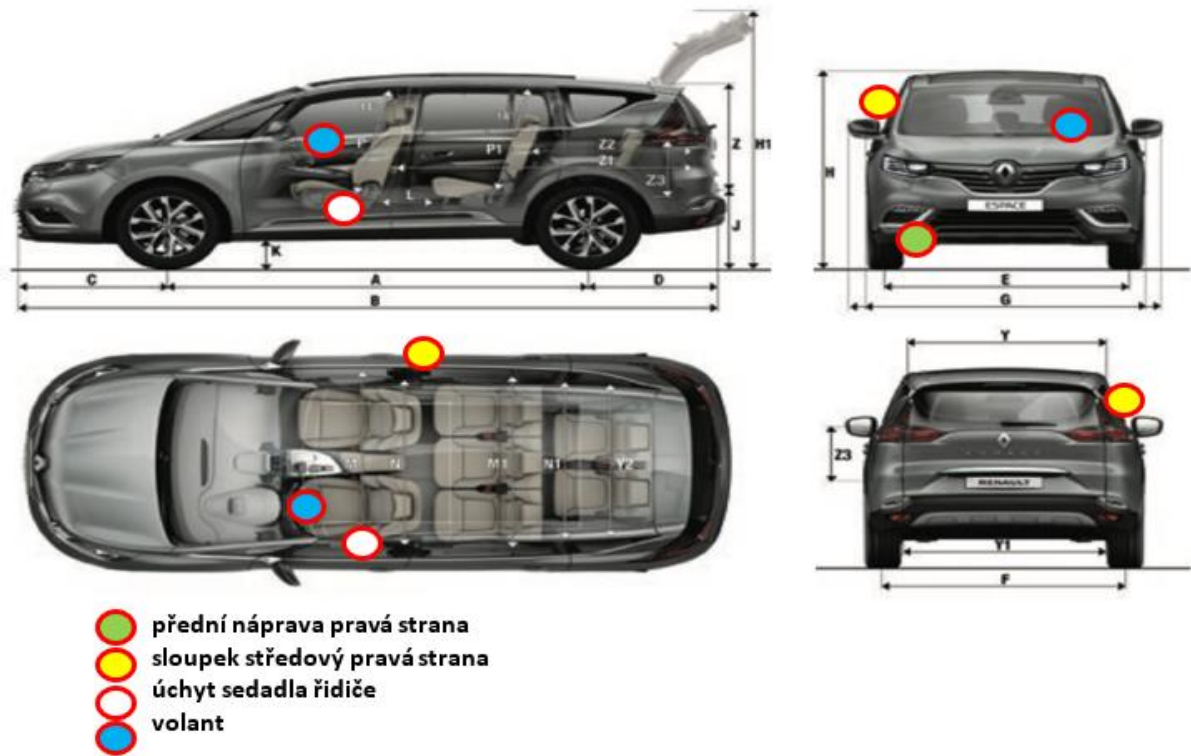
3 Metodika měření

V rámci experimentálního měření byly použity dvě hlavní metody pro vyhodnocování stavu podvozku a kvality tlumení:

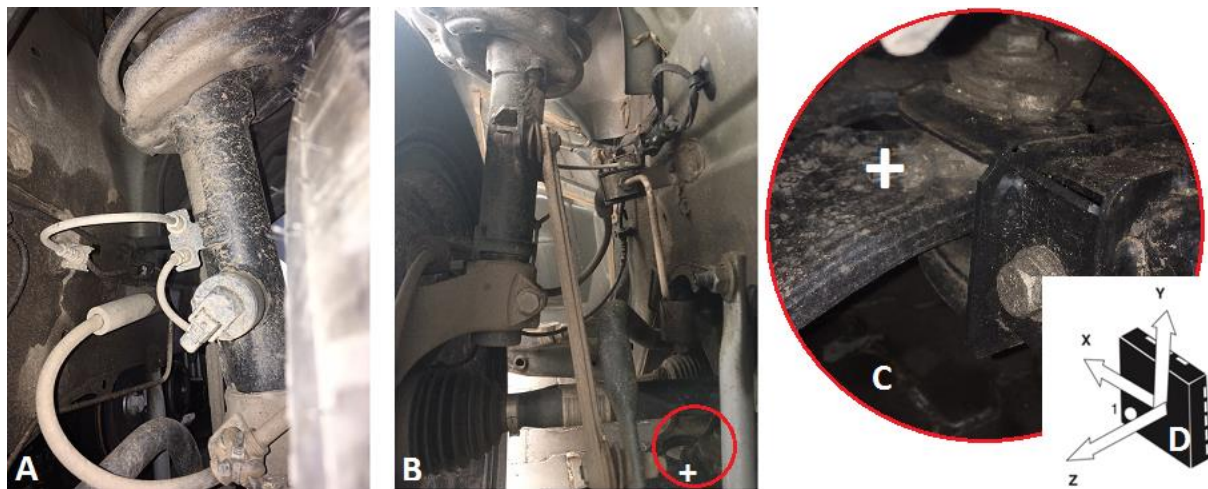
Metoda EUSAMA (European Shock Absorber Manufacturer's Association): Tato metoda se zaměřuje na měření přilnavosti (adheze) kol ke kmitající podložce testeru tlumičů. Při měření se zaznamenává poměr mezi minimální dynamickou přitlačnou silou kola a statickou silou. Vyšší hodnoty přilnavosti indikují lepší stav tlumičů a celkově lepší jízdní vlastnosti vozidla. [10,12]

Metoda CAP (Coefficient d'Amortissement de Phase): Tato metoda využívá přídavné čidlo pro měření fázového posunu mezi frekvencí vibrací testovací desky a frekvencí kmitání kola automobilu. Fázový posun je následně vyjádřen jako hodnota CAP, která slouží k posouzení stavu tlumiče bez ohledu na zatížení vozidla nebo tlak v pneumatikách. [13,12]

Měřením přilnavosti pneumatik k vozovce a přenos vibrací do různých částí vozidla v závislosti na tuhosti tlumičů (nastavení měkké, střední a tvrdé), bylo provedeno na vozidle Renault Espace IV. Initiale Paris, dCi160 EDC, rok výroby 2016, na letních pneumatikách Michelin Latitude Sport 3, 235/60 R18. Toto vozidlo disponuje adaptivními tlumiči s možností nastavení režimu Sport, Normal a Komfort. Pro měření zrychlení na různých částech vozidla byly použity tříosé senzory zrychlení LIS331DL od společnosti STMicroelectronics. Tyto senzory byly umístěny na volant, úchyt sedadla řidiče, karoserii a nápravu. [1,2, 8] Obr.3 a Obr. 4.



Obr. 3. Rozmístění senzorů zrychlení na vozidle Espace IV.



Obr. 4. Umístění senzoru zrychlení na přední nápravě vozidla Espace

A – tlumič s proměnnou účinností, B a C – umístění senzoru (označeno křížkem), D – směry měření senzoru zrychlení.

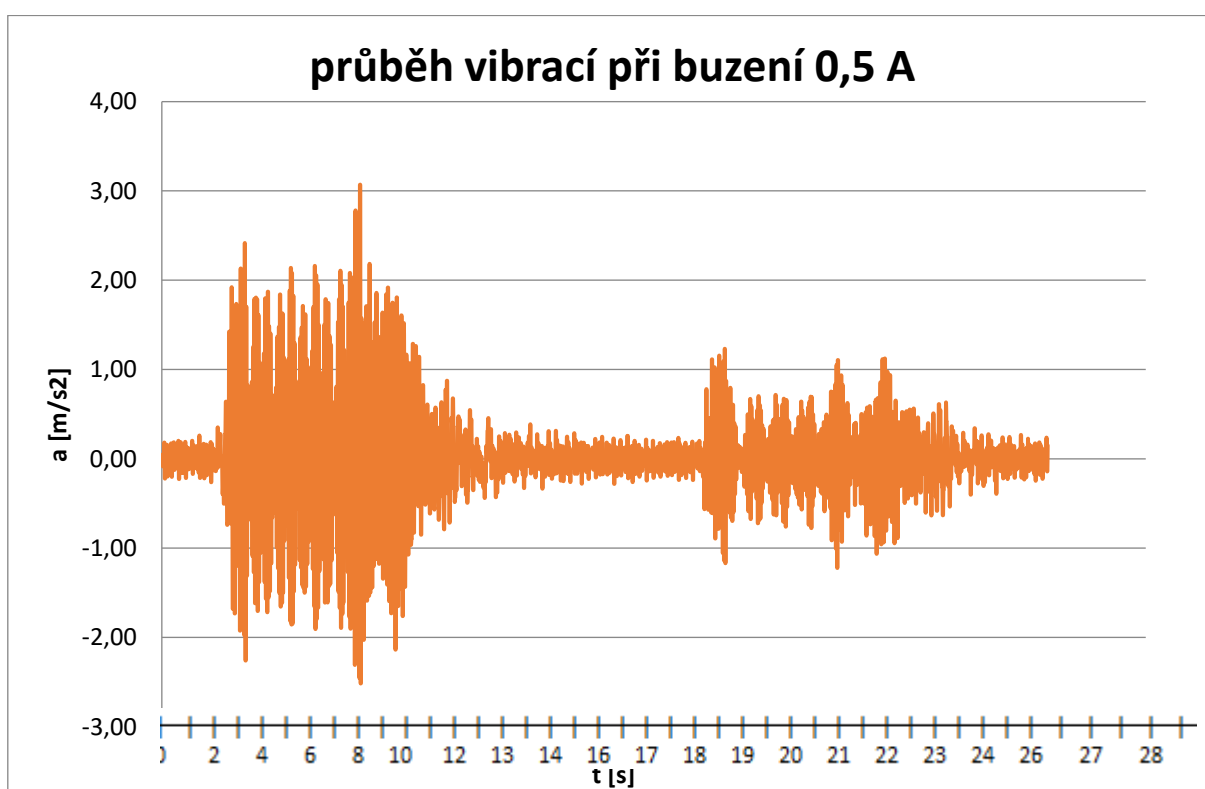
4 Výsledky měření

4.1 Měření na testovací stoličce tlumičů

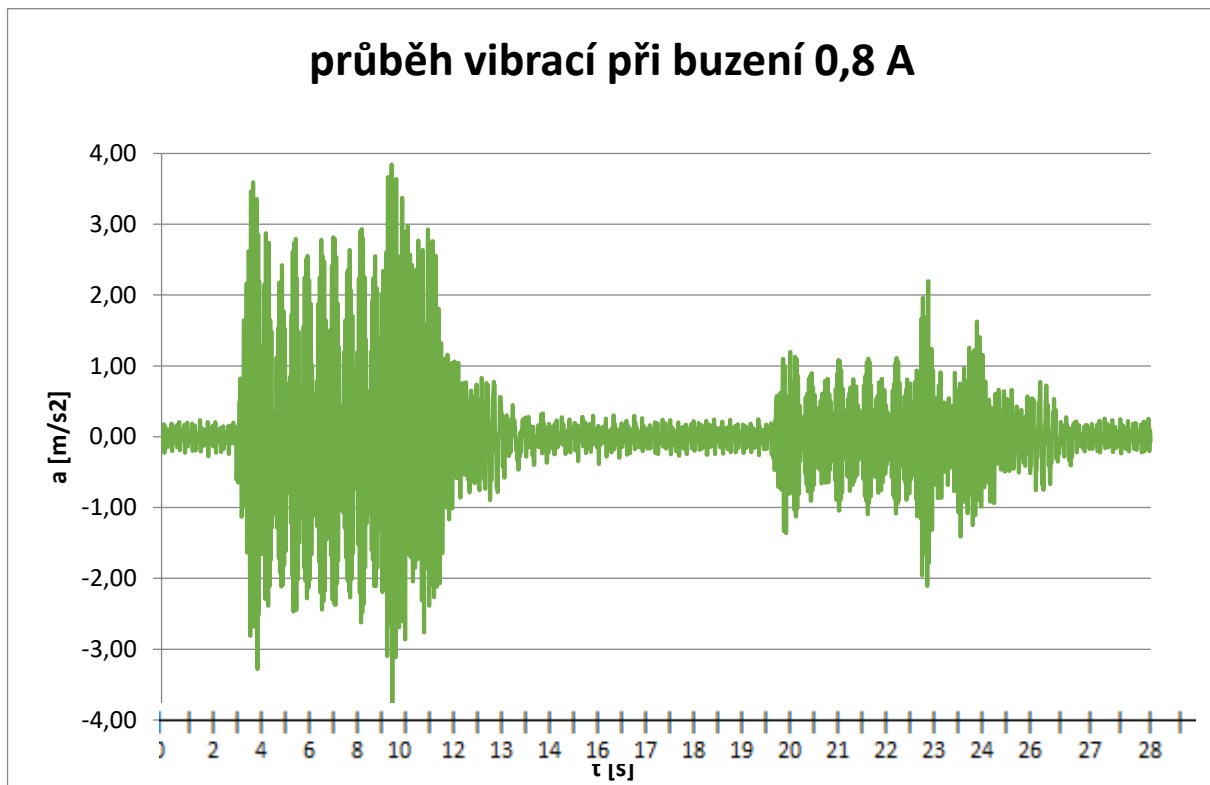
Byla provedena měření s proměnnou tuhostí tlumičů buzenými 0,5A – jízdní režim Komfort a Normal, s buzením 0,8A – režim sport, s buzením 1,2A – režim „opravný“ při brzdění

Tab. č. 1. Varianty provedených měření zrychlení na vozidle

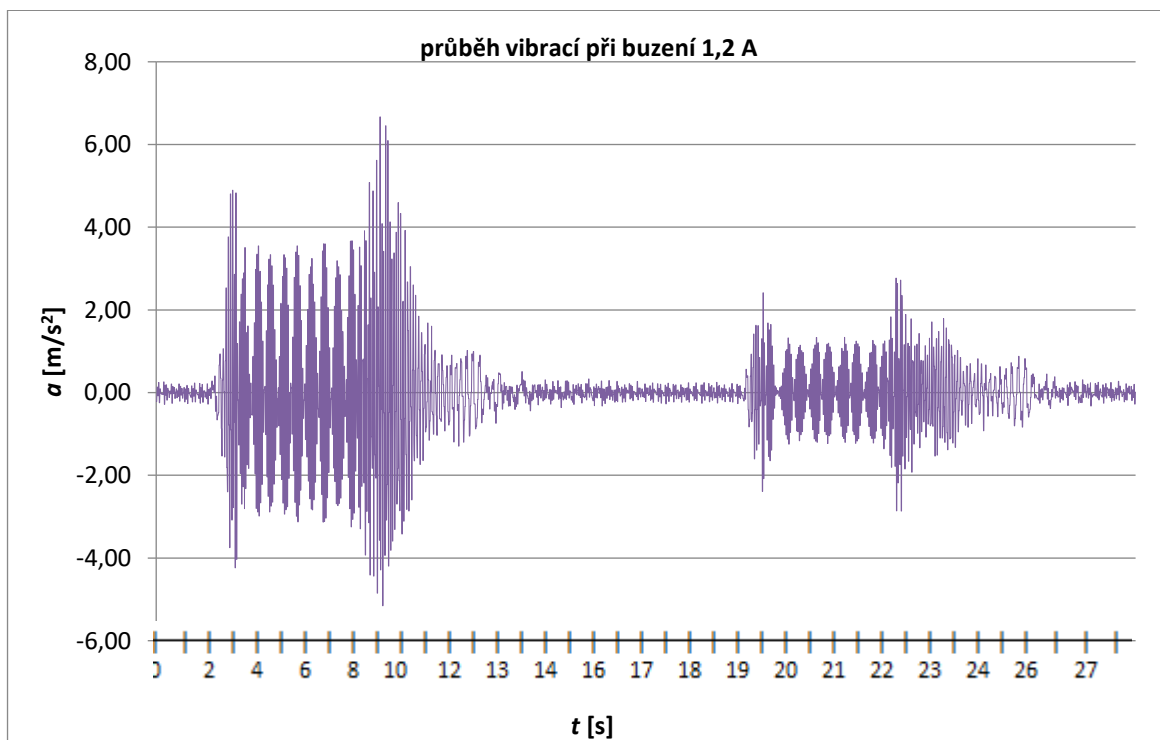
	senzor sedadlo
buzení 0,5 A	I
buzení 0,8 A	V
buzení 1,2 A	IX
bez buzení	XIII



Obr. 5. Měření č.: I. Průběh zrychlení působících na úchytu sedadla řidiče v režimu komfort.

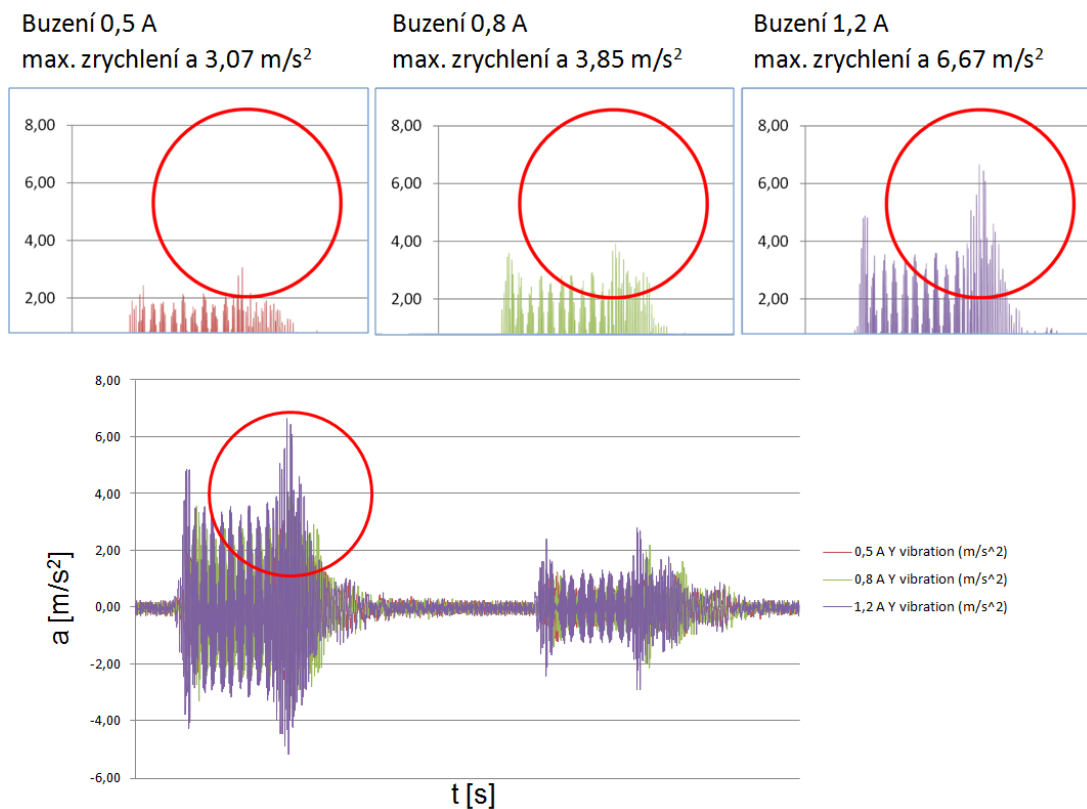


Obr. 6. Měření č.: V. Průběh zrychlení působících na úchytu sedadla řidiče v režimu sport.



Obr. 7. Měření č.: IX. Průběh zrychlení působících na úchytu sedadla řidiče v režimu brzdění.

U vozidla Renault Espace IV s adaptivními tlumiči bylo zjištěno, že změna jízdního režimu má významný vliv na přilnavost kol k vozovce. V režimu "komfort" byla přilnavost nejnižší, zatímco v režimech "sport" a "krizový" byla přilnavost výrazně vyšší. Tyto výsledky, jež vidíme v obrázku 8 potvrzují, že adaptivní tlumiče dokáží efektivně přizpůsobit svou charakteristiku aktuálním jízdním podmínkám.

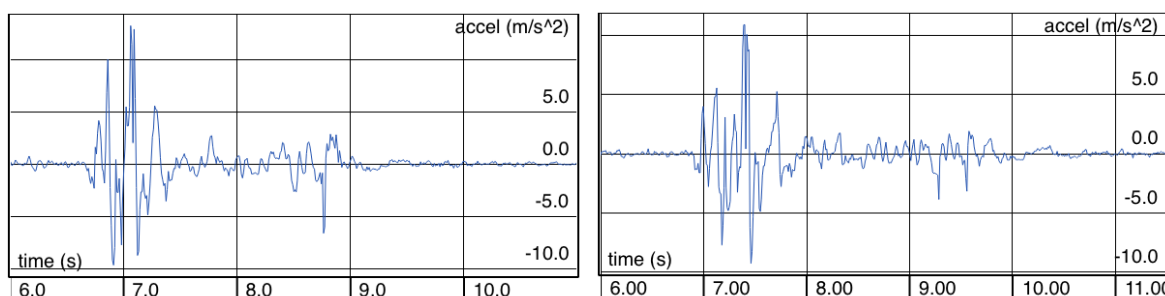


Obr. 8. Průběh zrychlení působících na úchytu sedadla řidiče – porovnání měření č.: I., V., IX.

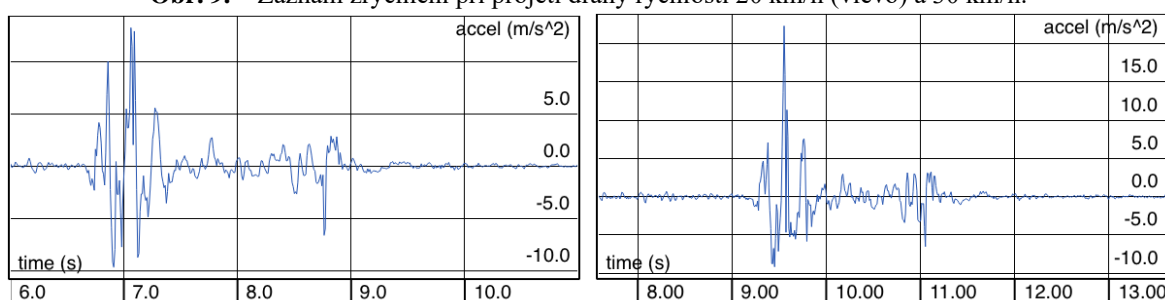
4.2 Měření za jízdy

Za jízdy bylo měřeno zrychlení na úchytu sedadla při průjezdu testovací trasy různou rychlostí. Pro měření zrychlení na úchytu sedadla řidiče byla zvolena jízda po rovné asfaltové vozovce s přejezdem vyvýšeného retardéru a překážek pod levým a pravým kolem. Retardér je ze zámkové dlažby o délce 17,6 m a výšce 0,13 m a pozvolným nájezdem délky 1 m a sjezdem délky 0,9 m. Překážky pod levým a pravým kolem jsou zhotoveny z betonového obrubníku o výšce 0,05 m a šířce 0,25 m. Přejezdovou rychlost jsme zvolili, 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h a 50 km/h.

Měření zrychlení na úchytu sedadla řidiče při přejezdu různých překážek ukázalo, že s rostoucí rychlostí se zvyšuje i maximální hodnota zrychlení. Při rychlosti 50 km/h bylo naměřeno zrychlení až 20 m/s². Tato hodnota je považována za kritickou z hlediska komfortu a zdraví řidiče, neboť dlouhodobé vystavení takovým vibracím může vést k bolestem zad, únavě a dalším zdravotním problémům.



Obr. 9. Záznam zrychlení při projetí dráhy rychlostí 20 km/h (vlevo) a 30 km/h.



Obr. 10. Záznam zrychlení při projetí dráhy rychlostí 40 km/h (vlevo) a 50 km/h.

5 Závěr

Získané výsledky potvrzují, že konstrukce tlumičů a nastavení pružící soustavy mají zásadní vliv na jízdní vlastnosti osobního automobilu. Aktivní tlumiče umožňují přizpůsobit charakteristiku tlumení aktuálním jízdním podmínkám, což přispívá k vyšší bezpečnosti a komfortu jízdy. U pasivních tlumičů je důležité správné nastavení tuhosti pružin a tlumičů s ohledem na zatížení vozidla a jízdní styl řidiče.

Pro zajištění optimálních jízdních vlastností a bezpečnosti je důležité pravidelně kontrolovat stav tlumičů a pružin a dodržovat předepsaný tlak v pneumatikách. V případě zjištění závad je nutné provést opravu nebo výměnu poškozených dílů.

Poděkování

Článek vznikl s přispěním grantové podpory UJEP-SGS-2024-48-001-2

6. Zdroje

- [1] Cernohlávek, V.; Klimenda, F.; Houska, P.; Suszyński, M. Vibration Measurements on a Six-Axis Collaborative Robotic Arm—Part I. *Sensors* 2023, 23, 1629. ISSN: 1424-8220
- [2] Vlk, F.: *Dynamika motorových vozidel*, Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, BRNO 2003 ISBN 8023900242
- [3] Černohlávek V, Štěrba J, Svoboda M, Zdráhal T, Suszyński M, Chalupa M, Krobot Z. *Verification of the safety of storing a pair of pressure vessels*. In: *Manufacturing Technology*. 2021;21(6):762-773. doi: 10.21062/mft.2021.097
- [4] Robb, M.J., Mansfield, N.J. *Self-reported musculoskeletal problems among professional truck drivers*. In: *Ergonomics* 2007; vol. 50, pp. 814-27. ISSN (printed): 0014- 0139
- [5] Svoboda, M., Schmid, V., Soukup, J., Sapieta, M.: *Influence of the spring system in vehicle vibration*, In *Vibration, Control and Stability of Dynamical systems*, Lodž, 2017, Politechnika Lodž, pp. 505-512, ISBN 978-83-935312-5-7
- [6] Svoboda, M.; Chalupa, M.; Jelen, K.; Lopot, F.; Kubový, P.; Sapieta, M.; Krobot, Z.; Suszyński, M. *Load Measurement of the Cervical Vertebra C7 and the Head of Passengers of a Car While Driving across Uneven Terrain*. *Sensors* 2021, 21, 3849. <https://doi.org/10.3390/s21113849>
- [7] Bovenzi, M., Pinto, I., Stacchini, N. *Low back pain in port machinery operators*. In: *J Sound Vib*. 2002, pp. 3–20. ISSN. 0022-460X.

- [8] Černohlávek, V., Svoboda, M., Štěrbá, J., Chalupa, M., Sapieta, M.: *Analytical and experimental solution of vibrations of a system of bound bodies*, In: Manufacturing Technology, Vol. 20, No 6 (2020) , pp. 699-707, ISSN: 1213-2489, DOI: 10.21062/mft.2020.116
- [9] CHALUPA, M., SVOBODA, M., VEVERKA, J., *The Passability of the Track Vehicle*, In: ECS Trans. 2019 volume 95, issue 1, pp. 457-466, , ISSN 1938-6737, doi: 10.1149/09501.0457ecst
- [10] Suszyński, M.; Peta, K.; Černohlávek, V.; Svoboda, M. *Mechanical Assembly Sequence Determination Using Artificial Neural Networks Based on Selected DFA Rating Factors*. Symmetry 2022, 14, 1013. ISSN: 2073-8994
- [11] Vlk, F.: *Dynamika motorových vozidel*, Prof.Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, BRNO 2003 ISBN 8023900242
- [12] Vlk, F.: *Diagnostika motorových vozidel*, Prof.Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, BRNO 2006 ISBN 802397064X
- [13] Loubel, J.L.: *Road Book RENAULT 1898-2001*, Jean-Lois Loubet, E-T-A-I, BOLOGNE FRANCE 2001 ISBN 2726885659
- [14] Grečenko, A.: *Motory a vozidla*, Univerzita J.E.Purkyně v Ústí nad Labem, ÚSTÍ NAD LABEM 2011 ISBN 9788074143311
- [15] Gscheidle, R.: *Příručka pro mechanika*, Europa-Sobotáles cz. s.r.o., PRAHA 2007 ISBN 9788086706177
- [16] Vlk F.: *Úlohy z dynamiky motorových vozidel*, Prof.Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, BRNO 2001 ISBN 8023865749
- [17] Soukup J., Skočilas J.: *Technická měření*, Univerzita J.E.Purkyně v Ústí nad Labem, ÚSTÍ NAD LABEM 2014 ISBN 9788074147302
- [18] Černohlávek, V., Svoboda, M., Štěrbá, J., Chalupa, M., Sapieta, M.: *Analytical and experimental solution of vibrations of a system of bound bodies*, In: Manufacturing Technology, Vol. 20, No 6 (2020) , pp. 699-707, ISSN: 1213-2489, DOI: 10.21062/mft.2020.116
- [19] CHALUPA, M., SVOBODA, M., VEVERKA, J., *The Passability of the Track Vehicle*, In: ECS Trans. 2019 volume 95, issue 1, pp. 457-466, , ISSN 1938-6737, doi: 10.1149/09501.0457ecst
- [20] Interní materiál Renault, AMORTISSEMENT PILOTE, Renault S.A. 2015
- [21] Interní material Renault, Elektronická regulace tuhosti pérování a výšky vozidla, Renault ČR, a.s., 1993
- [22] Návod k obsluze vozidel Talisman a Espace, Renault ČR, a.s., 2016
- [23] <http://kyb-europe.com/kyb-czech/about-us.html> 19/01/2017
- [24] <http://www.autoznalosti.cz/index.php/podvozek-a-kola/42-nazavisle-zaveseni-kol.html> 19/01/2017
- [25] <http://monroe.com/en-emea/shockopedia/what-role-shocks-play> 19/01/2017
- [26] <http://www.autolexicon.net/cs/articles/vliv-opotrebeni-tlumicu/> 3.4.2017
- [27] <https://www.motex.cz/vyrobyk/valcove-zkusebny-brzd/tester-tlumicu/> 1.2.2017

Durability of Multi-Cavity Forging Tools: The Advantages of Process Automation

Artur Meller (0000-0001-6992-7822)¹, Stanisław Legutko (0000-0001-8973-5035)¹, Adrian Mróz (0000-0003-3414-7185)², Mariusz Piechowski (0000-0002-8518-5336)³, Hubert Kędziora (0000-0002-3238-768X)¹, Vit Cernohlavek (0000-0001-6816-1124)⁴

¹Faculty of Mechanical Engineering, Poznan University Of Technology, Pl. Marii Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań, Poland. E-mail: artur.meller@doctorate.put.poznan.pl, stanislaw.legutko@put.poznan.pl, hubert.kedziora@doctorate.put.poznan.pl

²Mechanical Engineering Institute, Collegium Mechanicum, The President Stanislaw Wojciechowski Calisia University, 4th Nowy Świat Street, 62-800 Kalisz, Poland, E-mail: a.mroz@uniwersytetkaliska.edu.pl

³ WSB Merito University, Powstańców Wielkopolskich 5, 61-895 Poznań, Poland, E-mail: mariusz.piechowski@poznan.merito.pl

⁴Faculty of Mechanical Engineering, J. E. Purkyne University in Usti nad Labem. Pasteurova 3334/7, 400 01 Usti nad Labem. Czech Republic, E-mail: vit.cernohlavek@ujep.cz

This study investigates the influence of automating the forging process on the durability of multi-cavity forging dies. With the increasing demand for efficiency and productivity in the manufacturing industry, automation has become a prominent solution. However, its effects on tool durability, particularly in complex processes like forging, requires further research. Through experimental analysis and computational simulations, this research aims to quantify the impact of automation on die durability, considering factors such as material fatigue, tool wear, and production efficiency. The findings provide valuable insights into optimizing the forging process, balancing automation benefits with the need for tool durability and cost-effectiveness. Ultimately, this study contributes to advancing the understanding of automated manufacturing in the context of metal forming, facilitating informed decision-making for industry practitioners and researchers alike.

Keywords: die forging, forging simulation, forging dies durability, material fatigue, multi-cavity dies

1 Introduction

Global economic uncertainty, initially triggered by the pandemic and subsequently by escalating armed conflicts, along with resulting supply chain disruptions and unprecedented increases in business operating costs in Europe, has led to significant changes in the long-term strategies of manufacturing enterprises, which are now focusing on maintaining their market competitiveness [1]. Manufacturing corporations are taking on the challenge of relocating their production facilities to regions considered more stable for conducting business, which also feature lower labor costs. This move further intensifies the pressure on companies to protect their business from losing competitiveness [2].

For companies involved in the production of die forgings, one of the fundamental conditions for achieving cost efficiency is investing in the automation and robotization of forging processes. This aims to reduce the amount of human labor required for performing arduous tasks, thereby improving the quality of work while also enhancing the efficiency of the forging processes. Another condition for cost efficiency is improving the durability of forging tools, as their production costs constitute one of the largest components of the final forging's price [3]. Therefore, any cost-effective material, technological, or organizational solution that significantly increases the number of forgings produced from a single set of forging tools is of great interest to all die forges. Addressing this perspective, research has been conducted to compare the durability of forging tools in manual forging processes using single-cavity dies with automated processes utilizing multi-cavity dies for products shaped from brass.

Die forging is one of the fundamental methods for shaping metal components. It allows the production of parts with high mechanical properties and complex shapes that would be difficult to achieve using other manufacturing technologies or would be economically unjustifiable. This explains the widespread demand for forged components in many strategic industrial sectors, such as aviation, automotive, energy, and construction [4-6].

According to data from EUROFORGE, the umbrella organization of the European national associations for the forging industry, the global volume of forged products saw a slight increase from 29.675 million metric tons in 2022 to an estimated 29.880 million metric tons in 2023. The largest increase in production volume, a significant 15%, is estimated to have occurred in India (from 2.330 million metric tons in 2022 to 2.680 million metric tons in 2023). In second place, according to estimates, is Korea, with an 11% increase (from 1.643 million metric tons in 2022 to 1.820 million metric tons in 2023), attributed to the dynamic growth of its economies. The production of forged products in Europe also shows a stable upward trend, rising from 3.708 million metric tons in 2022 to an estimated 3.771 million metric tons in 2023. Germany remains the largest producer of forged products in Europe, with an estimated production of 2.535 million metric tons in 2023, followed by Italy with 1.208 million metric tons. According to the same estimates, Turkey leads in year-over-year growth with a 16% increase, from 271 million metric tons in 2022 to 315 million metric tons in 2023. Poland ranks second in growth, with a 7% increase from 298 million metric

tons in 2022 to 319 million metric tons in 2023 [7].

The situation looks quite different when considering more detailed data on the total demand for brass for production (including forging operations) in Europe in 2023. The estimated total consumption volume was 710,000 tons, with Italy leading the market with a 57.2% share, followed by Germany (14.3%), Denmark, Sweden, Norway, and Finland combined (4.9%), France (3.9%), Spain (3.9%), the United Kingdom (2.7%), Poland (2.7%), and other countries [8]. It is projected that by 2027, the forging market will grow at a compound annual growth rate (CAGR) of 5.1% in terms of value [9].

The presented data indicates that various forging methods are a promising and continuously evolving area of production using plastic forming techniques. Entrepreneurs who use forging technology aim to increase the efficiency of their processes by achieving a greater volume of produced goods per unit of time (utilizing multi-cavity dies and automation) and reducing the number of replicated tool sets (forging dies and punches) associated with their degradation, which prevents the attainment of consistent dimensional and qualitative products. In this context, numerous studies have already been conducted regarding the mechanisms contributing to the wear of forging tools [10-15]. However, the high costs of purchasing special grades of materials used in the production of forging tools, combined with often complicated and time-consuming manufacturing processes, along with the application of techniques to prevent their premature and excessive wear, significantly impact the high price of the manufactured set of forging tools. This is reflected in the higher cost of the final product offered by entrepreneurs. Therefore, it is worth considering the impact of implementing automation in the forging process, especially with the use of multi-cavity dies, on the durability of forging tools. The literature of the subject indicates gaps in this area. Automation of the forging process, aimed at achieving greater repeatability and stability compared to manual forging, but above all characterized by maintaining the required process parameters throughout the entire work interval, appears as a viable alternative that can significantly extend the durability of forging tools, even those that have not been subjected to special manufacturing techniques aimed at extending their working life or reducing excessive wear.

2 Methods for increasing the durability of forging tools

The life time of hot forging tools is influenced by a variety of factors during operation [16-19]. Table 1 presents these factors divided into those related to the forging, the die, and the operation.

Tab. 1 Factors influencing the durability of hot forging tools

Factors influencing the durability of hot forging tools		
Related to the forging:	Related to the die:	Related to operation:
forging material	die material (quality, type)	shape of the initial material or preform
forging weight	die hardness (type of heat treatment)	type of machine (size, strike velocity, technical condition)
forging shape	die construction	duration of the forging in the die
forging temperature	die dimensions	range of forging temperatures
dimensional tolerances	manufacturing technology	type of heating device and atmosphere within it
required surface condition	precision of manufacturing	heating of the forging (even, uneven)
	number of cavities in the die	influence of scale
	smoothness of die surface	type of die lubrication
	die temperature during operation	method of preheating the die before operation
	number of die regenerations	forging process (continuous, with brakes)
	method of die mounting in the press	skill and conscientiousness of the worker

Factors related to the forging and operation generally do not undergo significant changes and are often predetermined. Regarding the forging, the decisive parameter is its purpose. The contractor's scope of action is limited due to the multitude of requirements imposed by the customer (forging material, shape, dimensions, etc.). In the case of operation, the primary parameters are the technological and technical parameters of the forge, i.e., the available machinery. However, ensuring the repeatability of selected process parameters throughout the entire production batch is critical, so that they are as consistent as possible during the entire production run.

This can be achieved through the use of automated forging presses, which, when maintained in good condition, allow for effective elimination of production downtime and smooth regulation of the process, thereby preventing, for example, a decrease in the temperature of the working tools. Automation, combined with factors related to the die, especially the

material and technology used to manufacture the tools, are the factors that can most significantly contribute to shaping the durability of the dies

The attempt to prolong the durability of forging tools is a process that must be considered individually for a specific application or product family. The conducted analysis should encompass all factors influencing the life time of hot forging tools, but tailored to the technological, organizational, or financial capabilities of the enterprise where the particular product would be produced. Currently available methods for increasing the durability of forging tools encompass a wide and diverse range of possibilities, as illustrated in Figure 1.

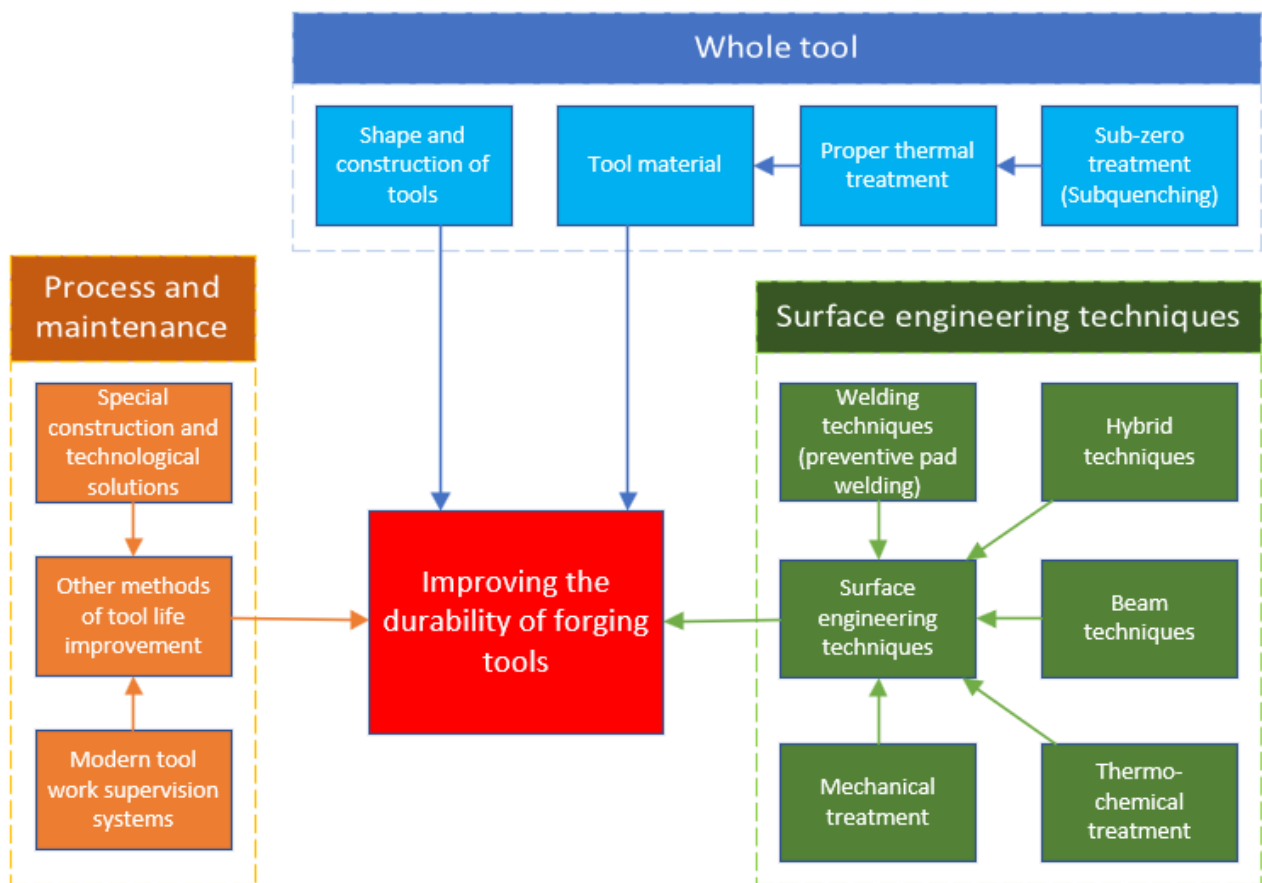


Fig. 1 Methods for increasing the durability of hot forging tools [20]

All efforts aimed at increasing the durability of hot forging tools can be grouped into areas related to the process (parameters, monitoring, machine condition), surface engineering methods, and those concerning the tool shape or the material used for its production along with the heat treatment performed.

In terms of the material used for the tools, the hard working conditions prompt the use of high-alloy steels for hot working tools. Such steels should be characterized by high hardness, good mechanical properties, and excellent resistance to wear at high working temperatures [21-24]. Additionally, it's important for them to be properly forged and free from surface and internal defects. Other properties that such steels should meet include:

- high resistance to deformation when heating individual parts of the die above the tempering temperature,
- relatively low coefficient of linear expansion and minimal dependence on temperature within the heating range of the dies,
- the ability to undergo deep hardening with minimal alteration in shapes and dimensions,
- high thermal conductivity,
- low tendency to adhere to the deforming metal,
- good machinability.

Meeting all these requirements simultaneously, sometimes contradictory to each other, for a specific grade of steel is impossible. Considering that steels intended for dies are relatively expensive due to the high content of alloying elements, influencing their durability solely by increasing the content of alloying elements in the material becomes economically undesirable and often creates a technological barrier. Therefore, the task of technologists is to select the material for dies in such a way that it largely meets the expectations associated with the specific conditions in which it will be used.

Reducing the impact of factors causing tool wear and damage seems to be a more rational idea, although not necessarily

easier to implement. A fundamental step in this direction is the application of appropriate tool lubrication. By introducing a lubricating substance between the interacting surfaces and the associated transition from dry friction to mixed or fluid lubrication, a beneficial effect on the durability of dies is exerted. The die material is isolated from direct contact with the forged material, resulting in reduced friction. As a result, the surface temperature of the die is lowered, which in turn reduces erosion, oxidation processes, and the intensity of material destruction due to thermal fatigue. Achieving the correct lubrication effect can only be reliably ensured through automated application, eliminating imperfections associated with manual forging, such as omitting or applying inconsistent amounts of lubricant, uneven lubrication of the die cavity, or lubrication performed at an inappropriate stage of the forging cycle. Automating the process also results in higher stability of the tool's operating temperature, which, combined with proper tool lubrication, should translate into extending their life time.

All processes that contribute to the degradation of forging die materials (plastic deformation, abrasive wear, thermal-mechanical fatigue, erosion) are localized in the surface layer of the tooling. Therefore, the next logical step to increase the durability of forging dies is shaping the properties and structure of the surface layer. This shaping occurs through the formation of diffusion layers or coatings with specific properties, resulting in the construction of a barrier that limits the impact of destructive factors and provides the material with desired operational properties. The intensive development of surface engineering in recent years, especially in the field of hybrid technologies for modifying the properties of the surface layer, provides an opportunity for effectively increasing the durability of forging dies [25-30]. The problem with such solutions lies in their full implementation in industrial practice, where barriers include the high costs of applying surface engineering methods in forging dies, limited availability of commercial solutions, and long lead times for related services.

3 Durability of forging tools in the hot forging process of brass slide blocks

Slide blocks that are used in gearboxes for heavy trucks and buses are manufactured at the Fabryka Armatur „Swarzędz“ sp. z o.o. (FAS) located in Rabowice, Poland, from brass grade CW617N (CuZn40Pb2).

Chemical composition for this grade of brass is presented in Table 2 according to the material certificate received along with the delivery of the brass rods. Delivery condition according to EN 12165. Sample taken from a rod with a diameter of 16 mm and a length of 3000 mm

Tab. 2 Chemical composition of brass sample from CW713R

Sample No.	Content [%]							
	Cu	Pb	Zn	Fe	Sn	Al	Ni	Others
1	57,3	2	REM	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0

Currently, FAS produces over 50 types of slide blocks. An example of a finished slide block after machining operation is shown in Figure 2.



Fig. 2 Slide block after final machining operation

Until the end of 2023, the steel used in FAS for producing dies for forging slide blocks was hot working tool steel WCLV (EN X40CrMoV5-1) with a hardness of 52-55 HRC, whose chemical composition is presented in Tab. 3. The use of this material for the dies in manual forging operations, allowed for an average production of 80,000 forgings per tool set before it was considered for scrapping or regeneration, if feasible.

Tab. 3 Chemical composition of WCLV steel [31]

Steel grade	Content [%]					
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
WCLV	0,39	1,1	0,4	5,2	1,4	0,95

At the beginning of 2024, following market analysis regarding new steel grades suitable for manufacturing dies for brass components, while also promising increased longevity, the decision was made to utilize a steel commercially known as Dievar, produced by the Uddeholm group.

Dievar is a high-performance chromium-molybdenum-vanadium hot working tool steel (the exact chemical composition of this steel is shown in Table 4), known for its excellent resistance to thermal cracking, total cracking, hot wear, and plastic deformation. Dievar is characterized by [32]:

- excellent ductility and toughness in all directions,
- good resistance to tempering,
- high strength at high temperature,
- excellent hardenability,
- good dimensional stability during heat treatment and coating application.

Tab. 4 Chemical composition of Dievar steel [32]

Steel grade	Content [%]					
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Dievar	0,35	0,2	0,5	5,0	2,3	0,6

The durability of forging tools for the currently used manual process at FAS (view of the manual forging station shown in Figure 3) compared to the process based on full automation (view of the automatic forging station shown in Figure 4) was estimated using the QForm UK 10.3.3 software. This is an advanced program for simulation of shaping, design, analysis of the forging process, and estimation of the durability of forging tools. For this purpose, a new multi-cavity set of tools (upper die + lower die) was designed and manufactured, and the initial conditions for each process were determined, as listed in Table 5.



Fig. 3 Manual forging station for brass slide blocks at FAS – MECOLPRESS 350 mechanical press



Fig. 4 Automatic forging station for brass slide blocks at FAS – MECOLPRESS 350 hydraulic press

Tab. 5 Simulation conditions for manual and automatic forging

Assumptions for the forging process		
Type of forging	manual	automatic
Die material	Dievar	Dievar
Forging material	CW617N	CW617N
Preforging: cooling in air [s]	4.5	2
Preforging: cooling on tool [s]	3	2
Tool cooling in air [s]	13	8
Lubrication: water + graphite	non-repeatable	-
Lubrication: oil + graphite	-	repeatable
Preforging heating temperature set [°C]	750	750
Upper die starting temperature [°C]	200	200
Lower die starting temperature [°C]	200	200

The view of the lower die cavity for the single manual forging is shown in Figure 5, and the view of the lower die for the multi-cavity automatic forging is shown in Figure 6.



Fig. 5 View of the single cavity for the slide block in the lower die for manual forging process



Fig. 6 View of the multi-cavity for the slide blocks in the lower die for automatic forging process

Since the manual forging process lacks the repeatability of lubrication, has a longer production cycle, and makes it significantly harder to accurately estimate the temperature of the heated preforming before forging, average values observed during the actual manual process were used for the simulation. Conversely, for the simulation of automatic forging, the target parameter values expected for the formation of the brass slide block were assumed. A primary factor affecting the durability of forging tools is their initial temperature before the forging process begins. Therefore, the accuracy of the temperature assumptions for the tested set of forging tools for manual and automatic forging was verified separately for the upper and lower die using a thermal imaging camera (FLUKE TiS45). Figure 7 shows the temperature measurement result for the upper die, and Figure 8 for the lower die, after being heated with a gas burner for 30 minutes, during the execution of a standard production batch forged manually. Figure 9 shows the temperature measurement for the upper die, and Figure 10 for the lower die, both also heated with a gas burner for 30 minutes, but during the execution of a test batch in an automatic cycle.



Fig. 7 Temperature value prior to the start of the manual forging process for the upper die

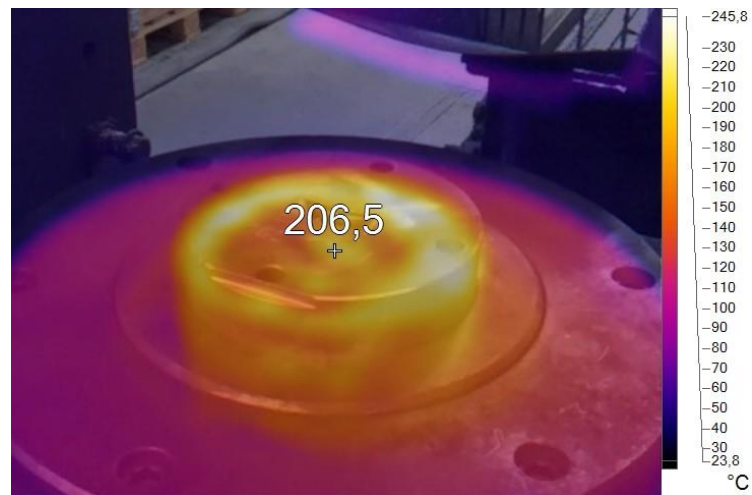


Fig. 8 Temperature value prior to the start of the manual forging process for the lower die

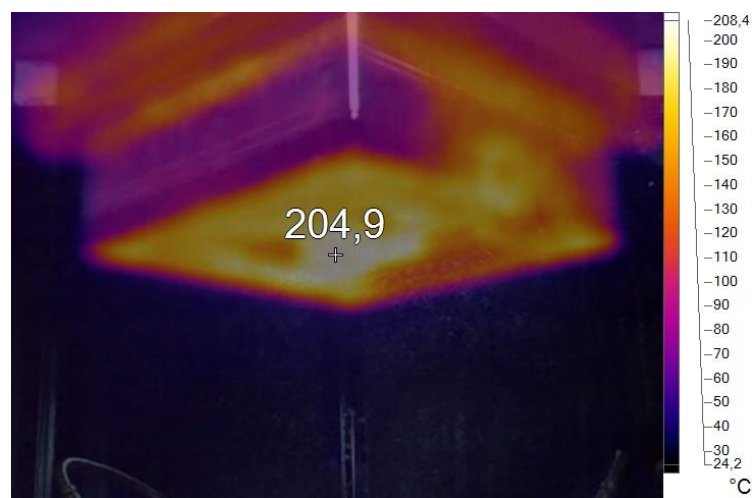


Fig. 9 Temperature value prior to the start of the automatic forging process for the upper die

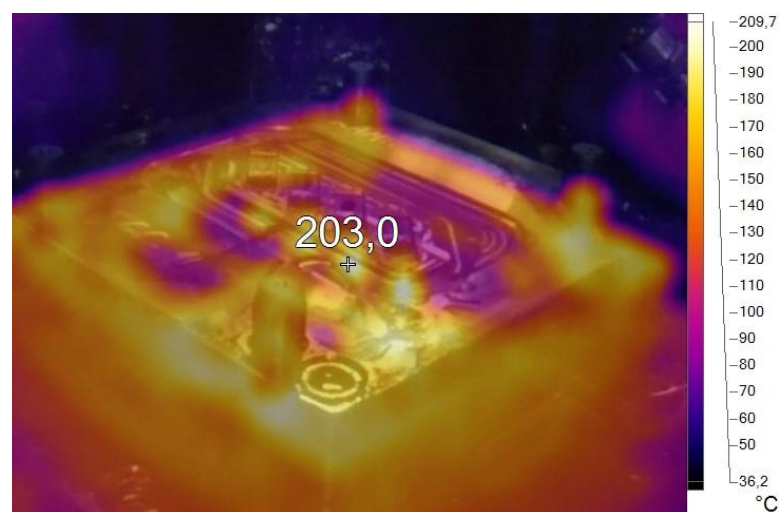


Fig. 10 Temperature value prior to the start of the automatic forging process for the lower die

Under these defined boundary conditions, the initial simulation was conducted to ascertain the press force necessary for die forging during the first forging cycle following tool heating. The results are illustrated in Figure 11 for the manual forging process and in Figure 12 for the automatic forging process.

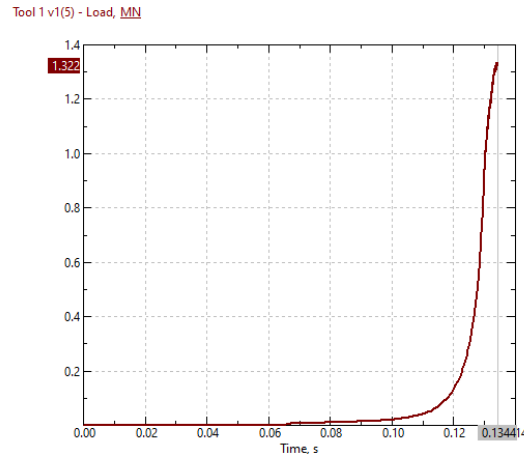


Fig. 11 Press force value in time for forging the first piece of brass slide block for manual forging operation

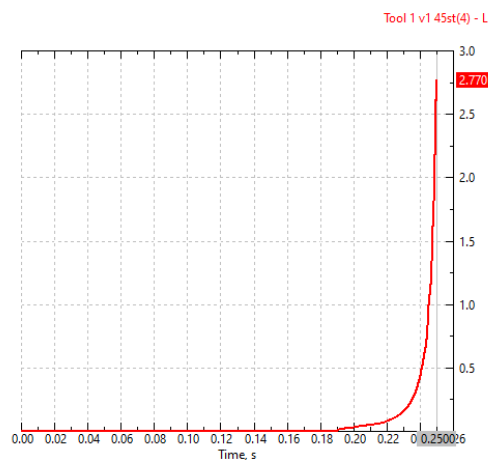


Fig. 12 Press force value in time for forging the first piece of brass slide block for automatic forging operation

The observed results indicate that the force required to forge the first forging after heating the tools is 1.322 MN for manual forging and 2.770 MN for automatic forging, which is more than twice as much. However, considering that four forgings are produced at a time during the automatic cycle, the force required to forge a single forging is approximately 0.693 MN, which is nearly half the value required for a single forging during manual cycle, which should positively impact the extension of the durability of the forging tools. The forging process simulation, aimed at predicting the durability of forging tools to achieve the most reliable results close to real conditions, required determining the number of cycles after which the tools temperature stabilizes. This is shown for both the manual and automatic forging processes in Figure 13.

For both manual and automatic forging processes, the number of applied forging cycles used to estimate the corresponding average operating temperature of the tools was 100, with their initial temperature set at 200°C according to previous measurements using a thermal imaging camera. The simulation showed a clear downward trend in the average temperature of the tools for manually performed cycles, with the final result being only about 124.5°C. It can be assumed that if further simulation were conducted, including additional manual production cycles, the tool temperature would continue to decrease, which would be significantly too low for proper forging and would primarily negatively affect the durability of the tools. For this reason, in actual manual forging processes, breaks are taken to reheat the forging tools, which unfortunately impacts the productivity in a given time unit. On the other hand, the simulation for the automatic forging process was stopped after obtaining the result for the 29th production cycle, where the average operating temperature of the forging tools was calculated at 192.3°C and showed stabilization at this level. It is clear that the shorter and more consistent cycle of the automatic forging process, combined with the consistent lubrication of the forging tools using oil + graphite, results in only a slight reduction in tool temperature from their initial value after heating and starting the process. Such simulated optimal working conditions of the dies should also contribute to extending their durability.

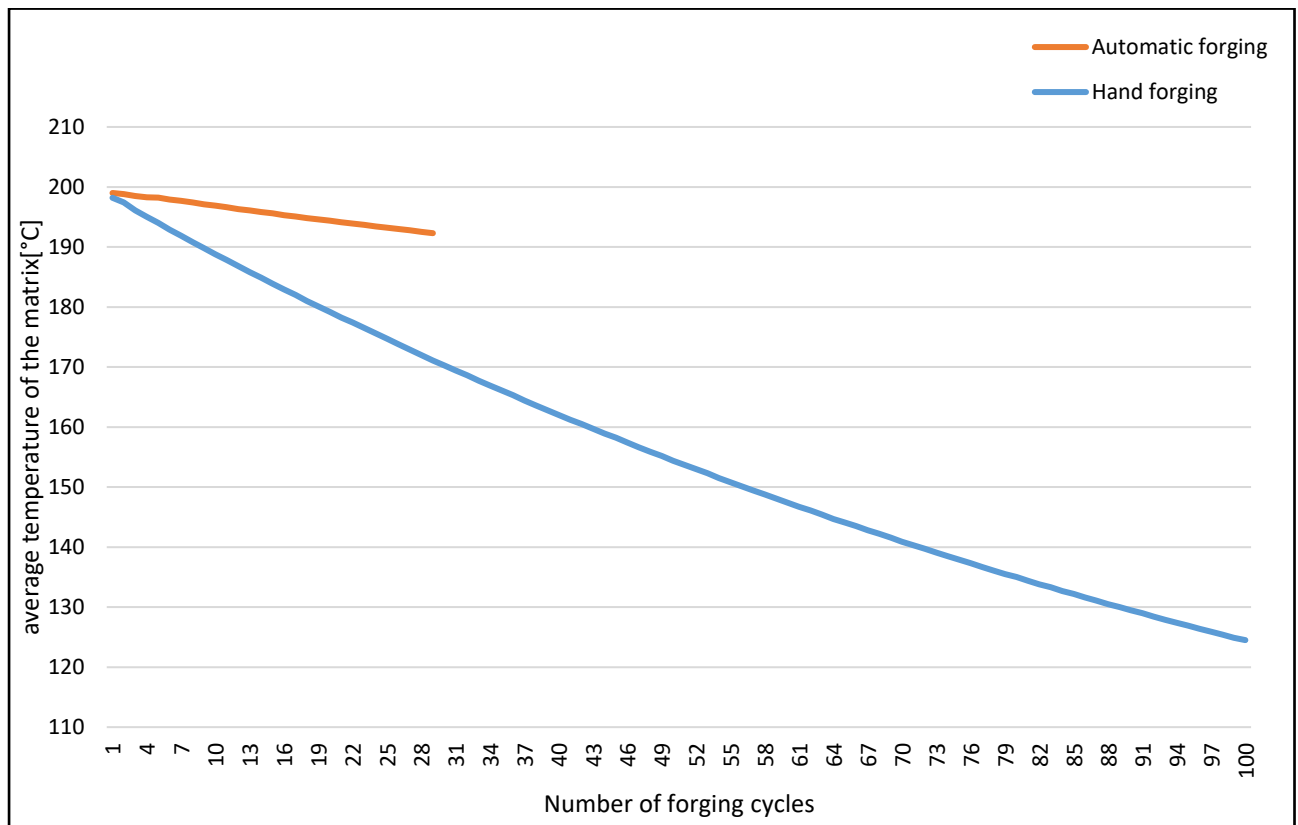


Fig. 13 Average die temperature for a given number of die forging cycles

By setting the boundary conditions for the forging process and gathering data on the average die temperature for each cycle, the durability of the die could be simulated. The QForm UK 10.3.3 software offers built-in tools and algorithms to estimate the number of cycles until the first fatigue crack appears and to determine the minimum and maximum stress in the tool. The simulation results for hand forging are shown in Figure 14 and Figure 15, while those for automatic forging are depicted in Figure 16 and Figure 17.

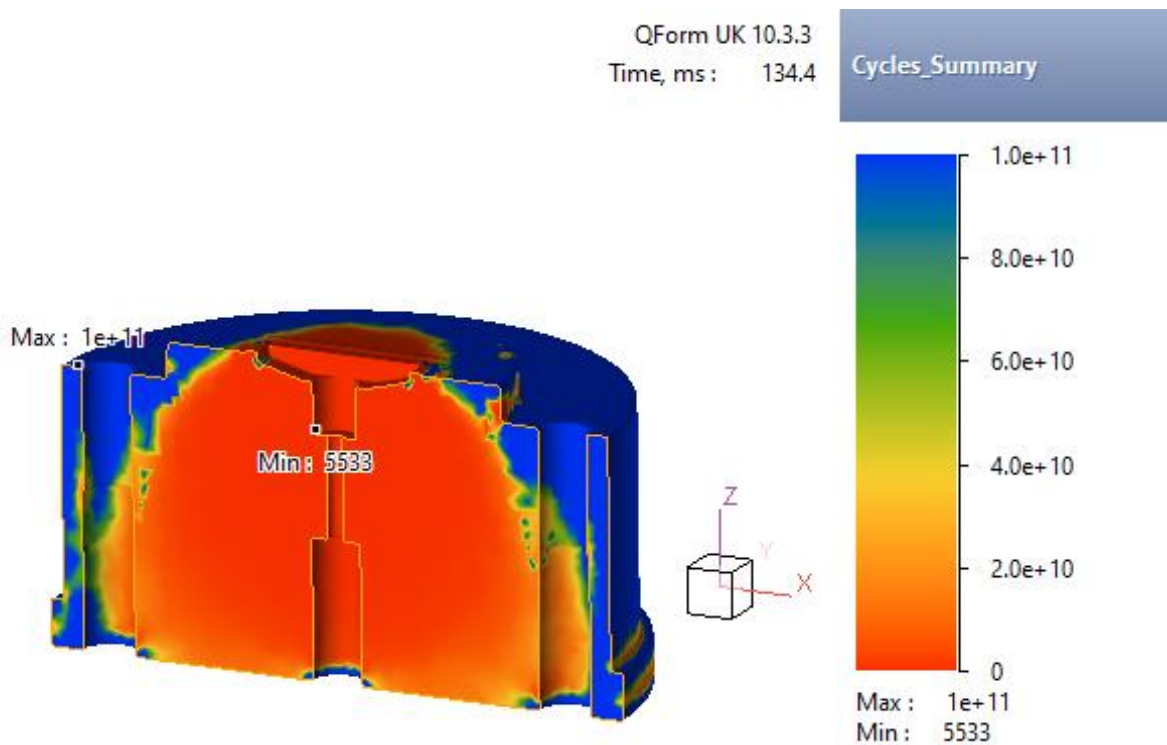


Fig. 14 Minimum number of cycles until fatigue cracking occurs - hand forging

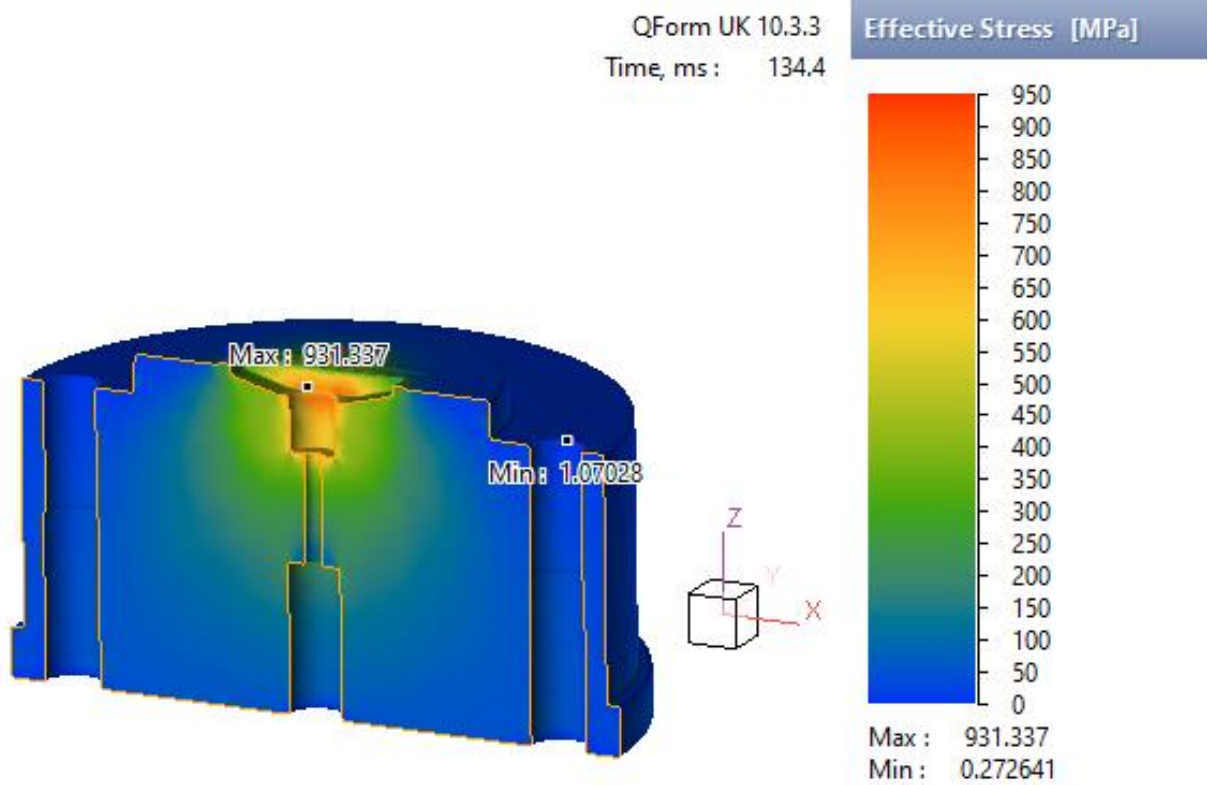


Fig. 15 The value of minimum and maximum stress occurring in the die at the fatigue crack initiation cycle - hand forging

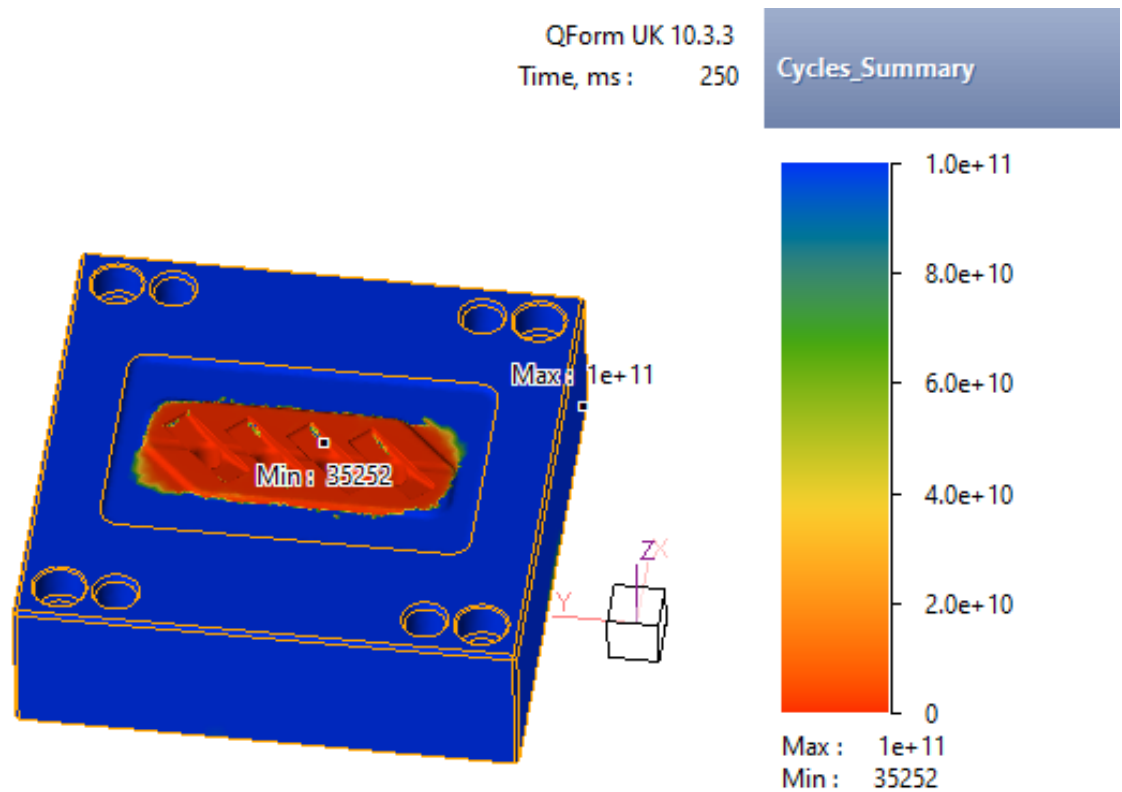


Fig. 16 Minimum number of cycles until fatigue cracking occurs - automatic forging

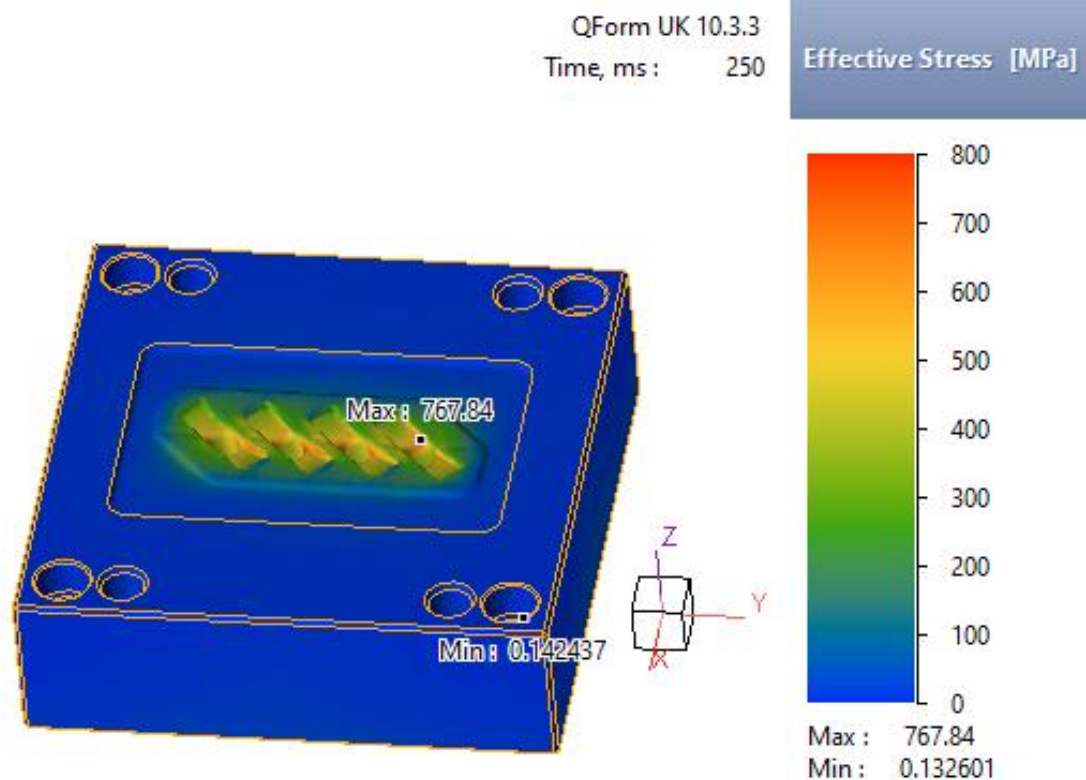


Fig. 17 The value of minimum and maximum stress occurring in the die at the fatigue crack initiation cycle - automatic forging

The computer simulation analysis indicates that fatigue cracking of the die in manual forging begins around the 5,533th production cycle, with the die experiencing a maximum stress of 931.337 MPa at that point. Conversely, in automatic forging, fatigue crack initiation occurs around the 35,252th cycle, with the die reaching a maximum stress of 767.84 MPa. This underscores the potential for over a sixfold increase in die durability with automatic forging, thanks to shorter, more consistent production cycles conducted at higher temperatures. Additionally, the lower maximum stresses reaching 163 MPa observed in automatic forging simulations further confirm this conclusion compared to manual forging.

4 Conclusions and perspectives

Automation and robotization of manufacturing processes, including hot die forging, is an irreversible path in the industrial economy. Entrepreneurs seeking to remain competitive see opportunities for developing their technology or machinery by building and purchasing dedicated robotic stations tailored to their needs [33-35]. In many cases, this not only fills the gap caused by the lack of qualified workers in the market but also allows for a significant increase in the number of forgings produced per unit of time while ensuring consistent quality.

In the case of the hot die forging process, the introduction of automation and robotization helps to reduce the physical strain on human workers, who would otherwise have to perform tasks in contact with high temperatures and engage in repetitive, often force-intensive activities. Automation also significantly enhances the consistency of process parameters, which is unattainable in manual forging due to the high complexity of the forging operations, characterized by a large number of parameters that need to be precisely set and monitored in each machine cycle. Stabilizing the forging process parameters, in turn, ensures proper working conditions for the forging tools, leading to an increase in their durability.

Hot forging tools are subjected to intense destructive forces during their operation, including cyclically varying high thermal and mechanical loads. These demanding and complex operational conditions prompt entrepreneurs to seek methods and solutions to reduce tool wear, particularly considering the high costs of purchasing die materials and manufacturing processes. Besides automation and robotization of the process, another way to achieve a higher number of forgings before the tools are deemed unfit for use is the application of multi-cavity dies. These allow for the production of two or more forgings per machine cycle. In the analyzed case, four forgings were produced from a single heated preform. The conducted studies focused on simulating the durability of such designed dies in the automatic forging operation, estimating the number of cycles until the first fatigue crack appears, and determining the minimum and maximum stresses occurring in the tool under these conditions.

The obtained results clearly highlight the advantage of automatic forging over manual forging, achieved through stable process conditions and the performance of forging tools. Referring to the actual manual forging process, where a set of forging tools is deemed unfit for use after approximately 80,000 forgings, compared to the simulated moment of the first fatigue crack occurrence, which amounts to 35,252 forgings in the automatic cycle, and multiplying this by the 4

workpieces obtained during one die cycle, we get a value of 141,008 produced forgings. It is important to note that the initial signs of die wear often do not disqualify it from further use, so the actual die life for the automatic forging process should be significantly higher.

Using company resources efficiently for designing and manufacturing forging tools is crucial. Simulation programs for forging processes and tool durability can lead to significant savings. While these simulations cannot predict every tool failure, they provide valuable insights on potential fatigue cracks, aiding technologists in decision-making. Simulations help verify operational parameters and tool design, ultimately saving time and costs by reducing the need for real production tests and modifications.

Another research topic related to studying the impact of automation on the durability of forging tools could be the analysis of the hot die forging process involving a multi-cavity toolset, but unlike the analyzed case where the preform was a single piece of material, each cavity in the die would be supplied with its dedicated preform. This should positively affect the mechanical loads on the die, thereby contributing to increased durability. However, this hypothesis requires confirmation through further testing.

Acknowledgement

The authors thank the Ministry of Education and Science for their financial support (the Implementation Doctorate program, Agreement No. DWD/4/22/2020 of 06.11.2020).

References

- [1] BERNAT, T., DUDA, J. (Eds.). (2023). *Business Impacts of COVID-19: International Business, Crisis Management, and the Global Economy* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003368687>
- [2] VARGAS-HERNÁNDEZ, J.G., VARGAS-GONZÁLEZ, O.C. (2024), *Global Supply, Production and Value Chains*, CHATTERJEE, T. (Ed.) *International Trade, Economic Crisis and the Sustainable Development Goals*, Emerald Publishing Limited, Leeds, pp. 277-297. <https://doi.org/10.1108/978-1-83753-586-620241019>
- [3] MELLER, A., SUSZYŃSKI, M., LEGUTKO, S., TRĄCZYŃSKI, M., CERNOHLAVEK, V. (2023). *Studies on a Robotised Process for Forging Steel Synchronizer Rings in the Context of Forging Tool Life*. *Manufacturing Technology Journal*, 23(1), 88-98. doi: 10.21062/mft.2023.002
- [4] AWASTHI, A., SAXENA, K. K., ARUN, V. (2021). *Sustainable and smart metal forming manufacturing process*. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2069-2079.
- [5] HUDA, Z., (2024). *Metal Forging*. In: *Metal Forming Processes*. Mechanical Engineering Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56760-5_6
- [6] GROOVER, M. P. (2019). *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems (7th ed.)*. Wiley, ISBN: 978-1-119-47521-7
- [7] EUROFORGE (2024). *WORLDWIDE Production 2022-FC2023, EUROFORGE Production 2022-FC2023*, <https://www.euroforge.org/activities-and-projects/>, accessed: 11.05.2024
- [8] <https://www.hmemental.com/en/>, raport wewnętrzny 2024
- [9] <https://www.theinsightpartners.com/reports/forging-market>, accessed: 11.05.2024
- [10] GRONOSTAJSKI, Z., KASZUBA, M., HAWRYLUK, M., ZWIERZCHOWSKI, M. (2014). *A review of the degradation mechanisms of the hot forging tools*. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14(4), 528-539.
- [11] ORODIJ, P. (2015). *Wear mechanisms and surface engineering of forming tools*. *Materiali in tehnologije*, 49(3), 313-324.
- [12] ZWIERZCHOWSKI, M. (2017). *Factors affecting the wear resistance of forging tools*. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62(3), 1567-1576.
- [13] KRAWCZYK, J., ŁUKASZEK-SOŁEK, A., ŚLEBODA, T., LISIECKI, Ł., BEMBENEK, M., CIEŚLIK, J., GÓRAL, T., PAWLIK, J. (2023) *Tool Wear Issues in Hot Forging of Steel*. *Materials*. 16(2):471. <https://doi.org/10.3390/ma16020471>
- [14] ATAY, G., COŞKUN, H., KAYNAK, Y. (2023). *Failure analysis of punches and investigation notch impact strength of tool steel cryogenic treated with tempering used in hot forging*. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1-8.
- [15] PINHEIRO, J. P., DA SILVA FARINA, P. F. (2024). *Failure analysis of hot stamping die*. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 21, 0-0.
- [16] ALTAN, T., NGAILE, G., SHEN, G. (Eds.). (2004). *Cold and hot forging: fundamentals and applications* (Vol. 1). ASM international.

- [17] MILAND, C., PANASIUK, W. (1982). *Increasing the life of forging tools: New materials, technologies and methods of investigation*. Journal of Mechanical Working Technology, 6(2-3), 183-191.
- [18] SHARMA, S., SHARMA, M., GUPTA, V., SINGH, J. (2023). *A systematic review of factors affecting the process parameters and various measurement techniques in forging processes*. steel research international, 94(5), 2200529.
- [19] ALESSIO, A., ANTONELLI, D., DOGLIONE, R., GENTA, G. (2023). *Application of design of experiments to forging simulations to increase die life expectancy*. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 17(3), 1351-1361.
- [20] GRONOSTAJSKI, Z., HAWRYLUK, M., WIDOMSKI, P., KASZUBA, M., NOWAK, B., POLAK, S., RYCHLIK, M., ZIEMBA, J., ZWIERZCHOWSKI, M. (2019). *Selected effective methods of increasing the durability of forging tools in hot forging processes*. Procedia Manufacturing, 27, 124-129.
- [21] MADHANKUMAR, S., NARAYANAN, K. H., HARINI, V., GOKULRAJ, K. V., SELVAKUMAR, S., DHARSHINI, R., DHARSHINI, K., HARIKRISHNAN, T. R. (2021). *Study and selection of hot forging die materials and hardness*. Materials Today: Proceedings, 45, 6563-6566.
- [22] FISHER, K., SCHWEIGER, H., HASENBERGER, J., DREMEL, H. (2002). *New tool steel for warm and hot forging*. In *The Use of Tool Steels: Experience and Research*, Proceedings of the 6th International Tooling Conference, Karlstad, Sweden (pp. 129-139).
- [23] HAWRYLUK, M., JANIK, M., GRONOSTAJSKI, Z., BAREŁKOWKI, A., ZWIERZCHOWSKI, M., LACHOWICZ, M., ZIEMBA, J., MARZEC, J. (2024) *Possibilities of Increasing the Durability of Punches Used in the Forging Process in Closed Dies of Valve Forgings by Using Alternative Materials from Tool Steels and Sintered Carbides*. Materials, 17(2):370. <https://doi.org/10.3390/ma17020370>
- [24] Şengül, Ü. M. R. A. N., ŞENGÜL, A. B. (2024). *Hot Forging Die Material Selection using Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Methods*. Materials Today Communications, 108352.
- [25] MELLER, A., LEGUTKO, S., SMOLIK, J. (2010). *Badanie wpływu warstw hybrydowych na trwałość matryc do kucia na gorąco*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, 30(4), 199-211.
- [26] LEGUTKO, S., MELLER, A., GAJEK, M. (2013). *Investigation of the influence of hybrid layers on the life time of hot forging dies*. Metalurgija, 52(2), 185-188.
- [27] PEDDINGHAUS, J., SIEGMUND, M., SIRING, J., WESTER, H., GIEDENBACHER, J., HUSKIC, A., BEHRENS B. A., BRUNOTTE, K. (2024) *Potential of near-surface temperature regulation in hybrid additive manufactured forging dies*. Materials Research Proceedings 41, 891-900, <https://doi.org/10.21741/9781644903131-97>
- [28] WIDOMSKI, P., KASZUBA, M., SOKOŁOWSKI, P., LANGE, A., WALCZAK, M., DŁUGOZIMA, M., GIEREK, M., CHOCYK, D., GŁADYSZEWSKI, G., BORYCZKO, B. (2023). *Nitriding of hardfaced layers as a method of improving wear resistance of hot forging tools*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 23(4), 241.
- [29] HAWRYLUK, M., LACHOWICZ, M., JANIK, M., ZIEMBA, J., GRONOSTAJSKI, Z. (2023). *Preliminary studies of increasing the durability of forging tools subjected to various variants of surface treatment used in the hot die forging process of producing valve forgings*. Engineering Failure Analysis, 143, 106886.
- [30] WIDOMSKI, P., KASZUBA, M., DOBRAS, D., ZINDULKA, O. (2021). *Development of a method of increasing the wear resistance of forging dies in the aspect of tool material, thermo-chemical treatment and PVD coatings applied in a selected hot forging process*. Wear, 477, 203828.
- [31] www.bohler.pl, accessed: 11.05.2024
- [32] www.uddeholm.pl, accessed: 11.05.2024
- [33] CERNOHLAVEK, V., KLIMENDA, F., HOUSKA, P., SUSZYNSKI, M. (2023). *Vibration Measurements on a Six-Axis Collaborative Robotic Arm - Part I*. Sensors, 23, 1629. ISSN: 1424-8220, IF: 3.847, DB WoS (Q2), OPEN ACCESS, <https://doi.org/10.3390/s23031629>
- [34] MELLER, A., SUSZYŃSKI, M., LEGUTKO, S., TRĄCZYŃSKI, M., MRÓZ, A., CERNOHLAVEK, V. (2023). *Optimizing Shock Absorber Operation for Improved Hot Forging Efficiency*. Manufacturing Technology Journal, 23(5), 663-669. doi: 10.21062/mft.2023.074
- [35] KLIMENDA, F., ŠTĚRBA, J., ČERNOHLÁVEK, V., PONIKELSKÝ, J., MAŘAN, P. (2021). *Draft of robotic workstation for laser engraving*. In: Manufacturing Technology. Vol. 21, No. 3, pp 357-363. ISSN: 1213-2489. DOI: 10.21062/mft.2021.049

Experimentální měření hluku kolaborativního šestiosého robotického ramene

Vít Černohlávek (0000-0001-6816-1124)¹, František Klimenda (0000-0001-7937-3755)¹, Zdeněk Růžička (0009-0008-3360-6996)¹, Jan Štěrba (0000-0002-2676-3562)¹, Artur Meller (0000-0001-6992-7822)², Marcin Suszynski (0000-0001-7926-0574)²

¹Faculty of Mechanical Engineering, J. E. Purkyne University in Usti nad Labem, Pasteurova 3334/7, 400 01 Usti nad Labem, Czech Republic. E-mail: vit.cernohlavek@ujep.cz, frantisek.klimenda@ujep.cz, zdenek.ruzicka@ujep.cz, jan.sterba@ujep.cz

²Faculty of Mechanical Engineering, Poznan University of Technology, artur.meller@doctorate.put.poznan.pl, marcin.suszynski@put.poznan.pl

Měření hluku kolaborativních robotů a jeho následné snižování představuje klíčový aspekt moderní automatizace v průmyslových a výrobních prostředích. S rostoucím nasazením těchto robotů, kteří pracují bok po boku s lidskými operátory, se stává důležité nejen zajistit bezpečnost a efektivitu, ale také zohlednit akustický komfort pracovníků. Hluk, který roboti produkují, může mít negativní vliv na zdraví zaměstnanců a jejich pracovní výkonnost. Tento článek se zaměřuje na metody měření hluku kolaborativních robotů a na různé techniky a technologie, které mohou přispět ke snížení hluku, čímž se zlepší pracovní podmínky a zvýší celková produktivita.

Keywords: Hluk, robot, kolaborativní robot, kobot, měření, experiment

1 Úvod

V posledních letech se kolaborativní roboti, známí také jako coboti, stali nedílnou součástí moderní průmyslové automatizace. Jejich schopnost pracovat v těsné blízkosti lidských pracovníků bez nutnosti bezpečnostních klecí představuje revoluci v oblasti výroby, montáže a dalších průmyslových procesů. Tato technologie přináší celou řadu výhod, včetně zvýšení produktivity, zlepšení kvality výrobků a flexibility v provozu. Nicméně s touto integrací přicházejí i nové výzvy, které je třeba řešit pro zajištění optimálních pracovních podmínek.

Jednou z těchto výzev je hluk, který kolaborativní roboti produkují během své činnosti. Hluk v pracovním prostředí může mít řadu negativních dopadů na zdraví zaměstnanců, jako je zvýšený stres, únavu, a v extrémních případech i trvalé poškození sluchu. Kromě toho může vysoká úroveň hluku ovlivnit komunikaci mezi pracovníky a celkovou pracovní atmosféru, což může vést ke snížení produktivity a kvality práce. [1,2]

Měření hluku kolaborativních robotů je prvním krokem k jeho efektivnímu řízení a snižování. Precizní měření umožňuje identifikovat konkrétní zdroje hluku a posoudit jejich intenzitu a frekvenční charakteristiky. K tomu se využívají různé nástroje a techniky, jako jsou zvukoměry, analyzátory frekvenčního spektra a akustické kamery. Tyto technologie pomáhají vytvářet detailní akustické mapy pracovního prostoru, které odhalují hlavní příčiny hluku.

Existuje několik metod měření hluku, které se používají v závislosti na konkrétních potřebách a podmínkách: Zvukoměry: Jsou základním nástrojem pro měření hladiny zvuku. Měří akustický tlak v decibelech (dB) a poskytují základní údaje o hlukové expozici. Moderní zvukoměry mohou zaznamenávat data po delší dobu a umožňují detailní analýzu změn hluku v průběhu času. Analyzátory frekvenčního spektra: Tyto nástroje rozkládají zvuk na jednotlivé frekvence a umožňují identifikovat specifické zdroje hluku podle jejich frekvenční charakteristiky. Frekvenční analýza je klíčová pro pochopení, jaké frekvence dominují v hlukovém profilu robota a jak mohou být cíleně tlumeny. Akustické kamery: Tyto pokročilé zařízení kombinují mikrofonní pole s vizuálními senzory, aby vytvořily vizuální reprezentaci zdrojů hluku. Akustická kamera dokáže přesně lokalizovat zdroje hluku v prostoru, což je nesmírně užitečné pro identifikaci konkrétních komponent nebo mechanismů, které produkují nejvíce hluku. Dlouhodobé monitorování: Pro komplexní posouzení hlukové expozice pracovníků se využívá dlouhodobé monitorování pomocí zvukoměrů umístěných na pracovišti. Tato data poskytují přehled o denních a týdenních hlukových vzorcích a umožňují posoudit kumulativní účinky hluku. [3-5]

Kolaborativní roboti jsou navrženi tak, aby mohli bezpečně spolupracovat s lidskými operátory. To znamená, že jsou vybaveni pokročilými senzory a bezpečnostními mechanismy, které umožňují detekci přítomnosti člověka a odpovídající reakce, jako je zpomalení nebo zastavení pohybu. I když jsou tyto roboti obecně tišší než tradiční průmyslové roboty, jejich pohybové mechanismy, motory a další komponenty stále produkují hluk, který může být vnímán jako rušivý. Hluk z kolaborativních robotů může mít různé zdroje: Pohonné systémy: Motory a převodovky jsou často hlavními zdroji hluku. Vysokorychlostní motory mohou produkovat vysokofrekvenční hluk, zatímco převodovky mohou přispívat k hluku nízkých frekvencí v důsledku mechanických vibrací. Pohyblivé části: Klouby a osy robotů mohou vydávat zvuky během pohybu, zejména pokud nejsou dostatečně promazané nebo pokud se pohybují po drsných površích. Interakce s prostředím: Když roboti manipulují s předměty nebo provádějí operace, jako je šroubování nebo svařování, může vznikat dodatečný hluk z kontaktu mezi robotem a pracovními materiály.

Po provedení měření hluku je důležité data správně analyzovat a interpretovat. Tento proces zahrnuje několik kroků: Identifikace hlavních zdrojů hluku: Analyzování frekvenčních spekter a akustických map pomáhá identifikovat konkrétní části robota nebo operace, které přispívají k celkové hlučnosti. Hodnocení expozice pracovníků: Je důležité posoudit, jaká

je úroveň hluku v pracovních zónách, kde se nacházejí lidské operátory. To zahrnuje měření hluku v různých vzdálenostech od robota a v různých pracovních podmínkách. Porovnání s normami a předpisy: Naměřené hodnoty hluku by měly být porovnány s platnými normami a předpisy týkajícími se hlukové expozice, jako jsou limity stanovené Mezinárodní organizací pro standardizaci (ISO) nebo národními hygienickými normami. Analýza dlouhodobých trendů: Data z dlouhodobého monitorování mohou odhalit vzorce hluku, které jsou spojeny s konkrétními výrobními procesy nebo změnami v pracovním prostředí. Tato analýza je klíčová pro implementaci dlouhodobých opatření ke snížení hluku. [6-9]

Po identifikaci zdrojů hluku je možné přistoupit k jejich eliminaci nebo alespoň redukci. Existuje několik přístupů ke snižování hluku kolaborativních robotů: Konstrukční úpravy: Zlepšení konstrukce robotů může výrazně snížit hluk. To zahrnuje použití materiálů s lepšími tlumícími vlastnostmi, optimalizaci pohybových trajektorií a úpravy vnitřních mechanických součástí, aby se minimalizovaly vibrace. Izolace a tlumení: Použití akustických krytů, tlumících podložek a izolačních materiálů kolem hlučných částí může efektivně snížit přenos hluku do okolí. Tyto metody jsou zvláště účinné v prostředích, kde je obtížné změnit samotnou konstrukci robota. Optimalizace pracovních podmínek: Přizpůsobení pracovního prostředí, jako je instalace zvukově izolačních panelů na stěny a stropy, může významně přispět ke snížení celkové hladiny hluku. Navíc správné uspořádání pracovního prostoru může minimalizovat expozici pracovníků nejhlučnějším oblastem. Pokročilé algoritmy řízení: Využití pokročilých řídicích algoritmů umožňuje optimalizovat pohyby robotů tak, aby byly co nejhladší a nejméně hlučné. Tento přístup zahrnuje i adaptivní řízení, které dokáže v reálném čase přizpůsobit provozní parametry na základě aktuálních podmínek. [10]

Snížení hluku kolaborativních robotů přináší mnoho výhod. Patří sem zlepšení pracovních podmínek a zvýšení spokojenosti zaměstnanců, což vede k vyšší produktivitě a menší fluktuaci pracovní síly. Kromě toho se snižují zdravotní rizika spojená s dlouhodobou expozicí hluku, což může vést k nižším nákladům na zdravotní péči a vyšší pracovní výkonnosti.

Existuje řada případových studií a praktických příkladů, které ukazují úspěšnou implementaci opatření ke snížení hluku. Například v automobilovém průmyslu bylo nasazeno několik kolaborativních robotů vybavených akustickými kryty a tlumícími materiály, což vedlo k významnému snížení hlučnosti na montážních linkách. Podobně ve výrobě elektroniky byla použita optimalizace pohybových trajektorií robotů, což vedlo k tišší a plynulejší činnosti.

2 Metodika měření

Plán měření byl postaven na základě stížnosti zaměstnanců ve výrobní hale pro výrobu filamentů pro 3D tiskárny. Produkce výrobní haly se zvýšila a potřebovali zvýšit rychlost kobota pro přesun filamentů z dopravníku na druhý dopravník dopravující filamenty do další části výroby balení. Cílem bylo nasimulovat pracovní prostředí zaměstnanců a podle toho navrhnout plán měření a změřit hluk kobota při různých rychlostech pohybu.

Pro nasimulování situace jsme použili kolaborativního robota s označením UR10. Kolaborativní robot vyvinutý společností Universal Robots. Jedná se o šestiosý robotický manipulátor, který je navržen tak, aby mohl spolupracovat s lidmi v průmyslových prostředích. UR10 má nosnost až 10 kilogramů a dosah až 1300 milimetrů, což z něj činí vhodnou volbu pro různé aplikace, jako je paletizace, balení, montáž a další.

Pro uchycení filamentu jsme použili uchopovací zařízení OnRobot. Tento Gripper je vyvinutý společností OnRobots speciálně pro spolupráci s kolaborativními roboty, jako je UR10 od Universal Robots. Jedná se o elektromechanický dvourstvý gripper, který umožňuje robotovi manipulovat s různými předměty v průmyslových aplikacích. [11]

2.1 Měřicí přístroje

Tab. 1 Použité přístroje při měření

Zvukoměrná souprava:	<input checked="" type="checkbox"/>	001 MEK UL - zvukoměr SVAN 979, v.č. 59710, ověřovací list č. 8012-OL-10373-23, vydaný dne 28.6.2023, platnost do 27.6.2025, - mikrofon G.R.A.S. 40AE, v.č. 286617, ověřovací list č. 8012-OL-10374-23, vydaný dne 28.6.2023, platnost do 27.6.2025,
Akustický kalibrátor:	<input checked="" type="checkbox"/>	005 MEK UL UL akustický kalibrátor SV 35 , v.č. 58646, kalibrační list č. 8012-KL-10398-21, vydaný dne 28.6.2023, platnost do 27.6.2025.
Digitální termohygrobarometr:	<input checked="" type="checkbox"/>	011 MEK UL, COMET C4130 , v. č. 16910277, kalibrační listy č. 4777F-21, platnost od 28.7.2021 do 27.7.2025 a 1429D-21 platnost od 3.8.2021 do 2.8.2025.
Dálkoměr:	<input checked="" type="checkbox"/>	030 MEK UL, HECHT 2006 LASER DISTANCE METER ser. č. 201800783.
Další pomůcky pro měření:	<input checked="" type="checkbox"/>	GEKO Křížový stojan od 0,3m do 1,8m

Zvukoměr SVAN 979 (Viz. Obr 1) je pokročilý přístroj používaný k měření hladiny hluku a zvuku v různých prostředích. Zde jsou některé základní informace o tomto zařízení: Typ přístroje: Zvukoměr SVAN 979 je digitální zvukový analyzátor, který může provádět různé typy analýz a měření související s akustikou a hlukem. Funkce: Tento přístroj nabízí široké spektrum funkcí, včetně měření úrovně hluku, analýzy oktávového spektra, analýzy frekvenčního spektra a dalších. Může být použit v různých aplikacích od průmyslových prostředí po měření hluku v obytných oblastech. Měření hladiny hluku: SVAN 979 umožňuje měření hladiny hluku v decibelech (dB) s různými váhovými funkcemi (A, C, Z), rychlostmi (fast, slow) a maximálními hodnotami (Peak, PeakC). To nám umožňuje provádět měření v souladu s různými normami a předpisy. Oktávová analýza: Tento zvukoměr může provádět analýzu oktávového spektra, což umožňuje detailní pohled na frekvenční složení hluku v různých pásmových šířkách. Další funkce: Mezi další funkce patří možnost ukládání dat, propojení s počítačem pro další analýzy, připojení externích mikrofonů a senzorů nebo přidáním SD karty pro navýšení kapacity uložení. Displej a ovládání: Zvukoměr SVAN 979 je obvykle vybaven grafickým LCD displejem, který umožňuje uživatelům snadnou navigaci a čtení naměřených dat. Ovládání může být prováděno pomocí vestavěných tlačítek nebo dotykové obrazovky, v závislosti na konkrétním modelu. Použití a aplikace: Tento zvukoměr se často používá v průmyslových odvětvích pro monitorování hluku v továrnách, v oblasti dopravy pro měření hluku způsobeného silničním provozem nebo letadly, v oblasti životního prostředí pro hodnocení hlukového znečištění a také v oblasti stavebnictví pro kontrolu hluku v budovách a infrastruktuře. Celkově je SVAN 979 profesionální nástroj pro měření a analýzu hluku, který nabízí širokou škálu funkcí a aplikací v různých odvětvích a prostředích. [12]



Fig. 1 Zvukoměr SVAN 979 [30]

Pro tuto práci jsme porovnávali a vyhodnocovali hladiny hluku u kolaborativního robota s označením UR10. Plánem měření bylo změřit hlučnost kolaborativního robota na přenášení výrobků/filamentů z dopravníku navíječnické linky na druhý dopravník který dopravuje filameny na balení. K nasimulování pracovního prostředí jsme zvolili kolaborativního robota UR10 umístěného u v budově FSI UJEP Cemmtech v místnosti C0.14 v suterénu.

Plán měření byl založen na stížnost pracovníků ve výrobní hale společnosti pro výrobu filamentů pro 3D tiskárny. Pracovníci na pracovní pozici navíjení cívky si stěžovali na kolaborativního robota, že je škodlivým zdrojem hluku a ruší pracovníky při jejich vykonávané činnosti. Kobot přesouvá navinuté cívky filamentů z dopravníku navíječnické linky na druhý dopravník pro balení kde pracovníci filament vezmou z dopravníku a uloží do krabice k expedici. Ve společnosti je nejčastěji vyrábějí filemanty s celkovou hmotností 1,25kg. Hmotnost 1kg má navinutý materiál na cívce. Samotná cívka má hmotnost 250g. Kobot ve výrobní hale nejčastěji pracuje při 40% své maximální rychlosti. Při větších zakázkách proto musí kobota zrychlit což má za následek zvýšení hluku. Vedoucí provozu chtěl navrhnout odhlučnění a změřit jaký je rozdíl mezi hladinou hluku 0,5m a 1,0m od zdroje hluku. [13]

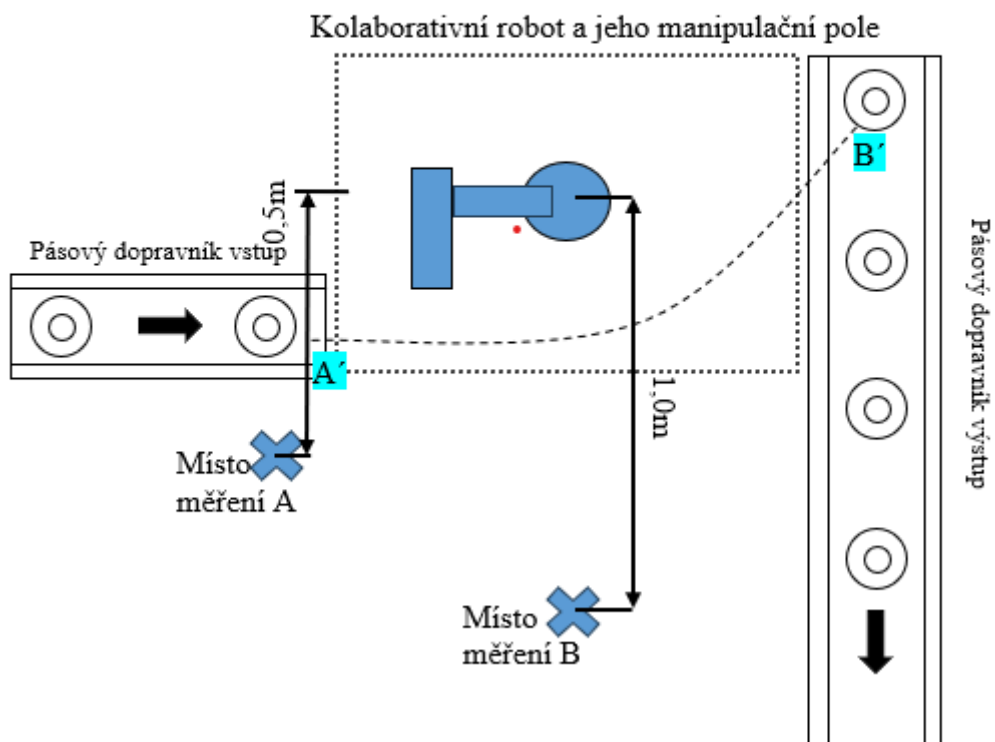
Začátkem experimentu jsme připravili měřicí přístroje a následně jsme vybrali měřicí místa. Mikrofon byl orientován směrem ke zdroji hluku. Pro simulaci pohybu a měření hlučnosti robota jsme použili kolaborativního robota určeného k přesouvání navinutých cívek filamentů z jednoho dopravníku na druhý. První měřicí bod (M1) byl umístěn ve vzdálenosti 0,5 metru od zdroje hluku při 20% rychlosti robota. Druhý bod (M2) byl rovněž ve vzdálenosti 0,5 metru, ale při 40% rychlosti. Třetí bod (M3) byl umístěn stejně, ale při 60% rychlosti. Čtvrtý (M4) a pátý bod (M5) byli umístěni při 80% a maximální rychlosti robota ve stejné vzdálenosti. Další měřicí body (M6 až M10) byly umístěny ve vzdálenosti 1,0 metru od zdroje při stejných rychlostech jako předchozí body. Výška mikrofonu byla nastavena na 1,5 metru nad podlahou, což odpovídá úrovni sluchu stojící osoby. Všechny naměřené hodnoty jsou zpracovány v tabulkách, umístění zvukoměru je zobrazeno na Obr. 3.

Před měřením byl zvukoměr zkalibrován na akustikou hladinu hluku 113,83 dB. Po kontrole měření byl rozdíl kalibrací $\pm 0,01$ dB viz. obr. č.2.



Fig. 2 Kalibrace zvukoměru SVANTEK 979 akustickým kalibrátorem SV 3

- filament s celkovou hmotností 1,25 kg



Místo měření A - je umístění hlukoměru na stativu ve výšce 1,5m nad úrovní podlahy a 0,5m od zdroje hluku
Místo měření B - je umístění hlukoměru na stativu ve výšce 1,5m nad úrovní podlahy a 1,0m od zdroje hluku

Fig. 3 Náskres plánu experimetnálního měření

2.2 Měření

Měření jsme provedli podle metodického návodu pro měření a hodnocení hluku a vibrací na pracovišti a vibrací v chráněných vnitřních prostorech stavby, Věstník MZ ČR, ročník 2013, část 4. Ministerstvo zdravotnictví vydává podle § 80 odst.1, písm. a) zákona č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, ve znění pozdějších předpisů metodický návod ke sjednocení postupu při měření a hodnocení hluku a vibrací na pracovišti a vibrací v chráněných vnitřních prostorech staveb. Budu posuzovat hluk na pracovišti podle nařízení vlády č.272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací v platném znění. K měření hluku na pracovišti se používají zvukoměry třídy 1 nebo třídy 2 vyhovující požadavkům ČSN EN 61672-1 nebo ČSN IEC 651+A1 a ČSN EN 60804+A2. Náš použitý měřicí zvukoměr patří do třídy 1 což splňuje požadavkům metodického návodu. Dále se provádí kalibrace zvukoměru. Kalibrace se provádí před měřením a po měření je provádí tzv. rozdíl. Kalibrátor je zkalibrován na hlukovou hladinu od ČMI se sídlem v Praze. Kalibrátor musí patřit do třídy 1 nebo 2, které vyhovují požadavkům ČSN EN 60942. Dále musí součástí měřicí techniky kalibrováný barometr. Co se týče měření hluku na pracovišti pro toto odvětví máme českou technickou normu ČSN ISO 1999 Akustika – Stanovení expozice hluku na pracovišti a posouzení zhoršení sluchu vlivem hluku¹⁾ a v ČSN EN ISO 9612 Akustika – Určení expozice hluku na pracovišti – Technická metoda. Primárně se ČSN EN ISO 9612 používá pro 2. třídu přesnosti, ale obecné zásady měření či strategie měření hluku jsou platné také pro 1. nebo 3. třídu přesnosti. Prodloužíme-li dobu měření hluku, postihneme více pracovních úloh a provedeme-li měření u více zaměstnanců ve skupině na daném pracovišti, sníží se rozšířená nejistota měření a můžeme se dostat do 1. třídy přesnosti nebo naopak.

Termíny „normalizovaná hladina expozice hluku pro běžnou dobu trvání pracovního dne 8h“ (ČSN ISO 1999, 3.6) a „hladina denní expozice hluku A“ (ČSN EN ISO 9612, 3.2) mají stejný význam jako ekvivalentní hladina akustického tlaku A LAeq, 8h za osmihodinovou směnu. [14-16]



Fig. 4 Umístění zvukoměru

Hluk na pracovišti lze hodnotit několika způsoby v závislosti na typu prostředí a charakteru práce:

Přípustné expoziční limity pro průmyslová pracoviště:

Ekvivalentní hladina akustického tlaku A (LAeq,8h) je stanovena na 85 dB.

Expozice zvuku A (EA,8h) je definována jako 3640 Pa²s.

Hygienické limity pro pracoviště vyžadující vysokou míru pozornosti a soustředění:

Na pracovištích, kde se vykonávají činnosti náročné na koncentraci a tvůrčí práce, by ekvivalentní hladina akustického tlaku A (LAeq,8h) neměla přesáhnout 50 dB.

Hygienické limity pro pracoviště v objektech výroby a skladování:

Pro prostředí, kde hluk není přímo spojen s pracovní činností, ale je způsoben větracími nebo vytápěcími systémy, je limit ekvivalentní hladiny akustického tlaku A (LAeq,T) stanoven na 70 dB

3 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty jsme zpracovali v programu SVANPC++. Program SVANPC++ je software vyvinutý společností Svantek pro správu dat a analýzu získaných z měřicích přístrojů pro měření hluku a vibrací. Společnost Svantek je známá výrobou a vývojem přesných a spolehlivých měřicích zařízení pro monitorování hluku, vibrací, kvality ovzduší a dalších parametrů životního prostředí.

SVANPC++ slouží k nahrávání, zpracování a analýze dat z měřicích zařízení, která jsou kompatibilní s tímto softwarem. Tento program poskytuje uživatelům možnost detailního zpracování naměřených dat, vytváření grafů, generování reportů a další pokročilé funkce pro vyhodnocování výsledků měření.

Mezi hlavní funkce programu SVANPC++ patří: Nahrávání a ukládání naměřených dat z měřicích zařízení. Zobrazení a analýza naměřených dat v podobě grafů, časových průběhů, spekter a dalších. Možnost vytváření a upravování reportů s výsledky měření. Export dat do různých formátů jako jsou xls nebo pdf.

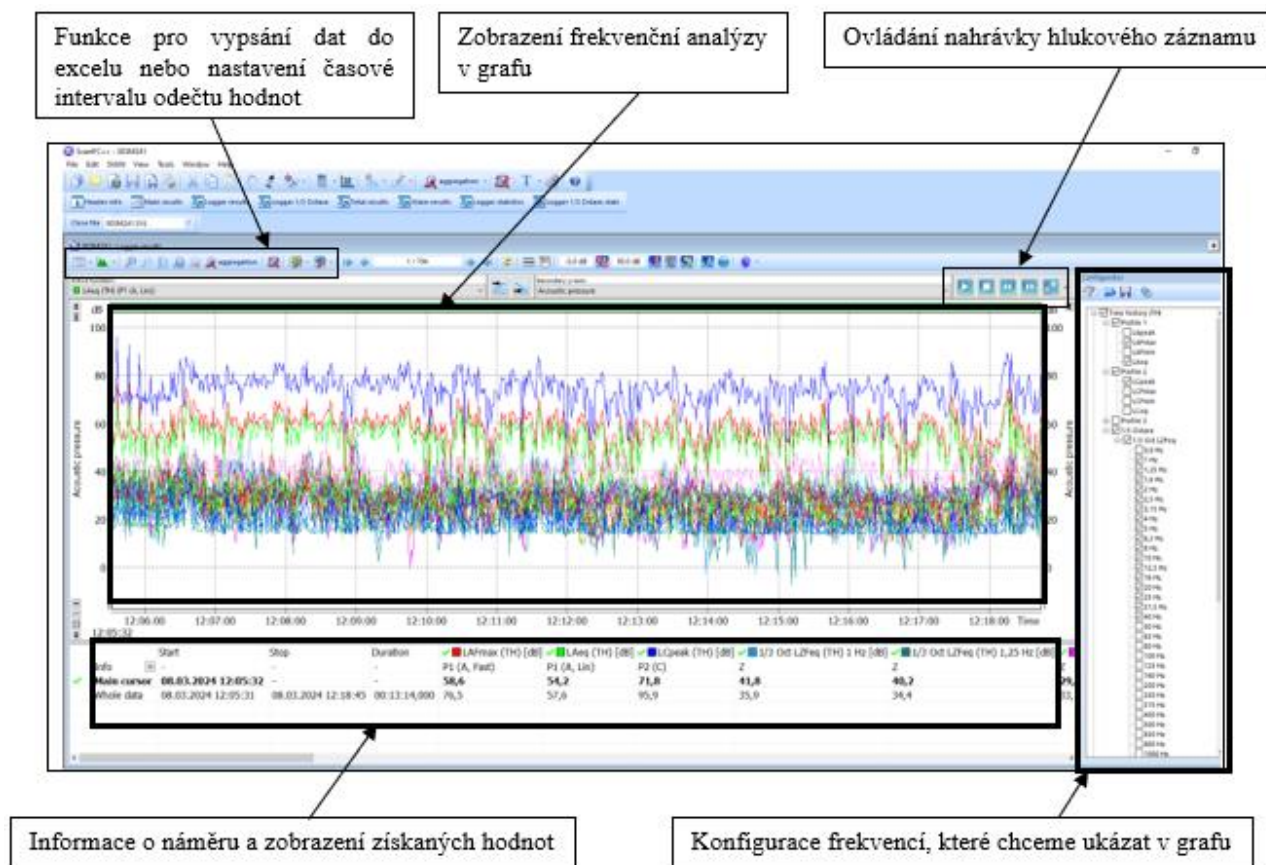


Fig. 5 Výstřížek z vyhodnocování v programu SVANPC++

Tab. 2 Naměřené hodnoty pro místo měření A

Druh hluku, parametr		Místo měření A - 0,5m					
		M1	M2	M3	M4	M5	M11
Ustálený a proměnný hluk [dB]	L_{AFmax}	74,5	76,2	74,5	75,9	78,3	59,1
	$L_{Aeq,T}$	52,4	55,7	56,0	58,1	61,0	51,0
Impulzní hluk [dB]	L_{Cpeak}	89,8	92,8	90,8	92,3	95,6	76,5
Infrazvuk $L_{teq,T}$ [dB]	1 Hz	31,8	33,6	21,1	34,1	36,5	23,2
	1,25 Hz	30,9	37,0	23,2	32,6	35,3	23,9
	1,6 Hz	29,9	40,7	25,1	30,8	30,4	22,8
	2 Hz	28,1	42,3	24,0	28,9	30,9	20,3
	2,5 Hz	30,1	44,1	22,3	29,4	25,8	22,0
	3,15 Hz	36,5	43,5	29,4	30,8	29,1	26,7
	4 Hz	39,6	42,3	30,4	33,6	31,5	27,2
	5 Hz	41,2	42,5	28,2	35,4	31,4	30,6
	6,3 Hz	39,6	40,9	30,5	40,0	36,1	29,3
	8 Hz	38,8	38,6	31,9	40,5	40,0	31,4
	10 Hz	44,7	45,0	37,0	43,8	43,4	38,2
	12,5 Hz	32,1	31,8	27,4	38,1	34,6	35,0
Nízkofrekvenční hluk $L_{teq,T}$ [dB]	16 Hz	34,6	36,5	32,0	47,0	39,9	35,8
	20 Hz	36,5	32,3	35,6	40,9	35,0	34,4
	25 Hz	38,2	34,2	43,7	41,9	34,6	34,9
	31,5 Hz	34,8	31,0	36,0	36,7	38,6	36,4
Vysokofrekvenční hluk $L_{teq,T}$ [dB]	40 Hz	31,9	32,0	35,1	38,3	35,4	37,2
	8000 Hz	35,6	34,7	36,8	37,7	38,9	35,8
	10000 Hz	35,7	34,6	36,2	37,4	38,1	34,2
	12500 Hz	30,7	29,6	31,3	32,6	33,2	29,0
Ultrazvuk $L_{teq,T}$ [dB]	16000 Hz	29,9	29,6	30,9	32,3	32,5	26,9
	20000 Hz	21,1	21,4	22,3	22,8	23,9	19,3

U místa měření M11 je náměr s použitím měkké podložky pro nasimulování pogumovaného dopravníku měření proběhlo ve vzdálenosti 0,5m od zdroje a mikrofon ve výšce 1,5m, rychlost kobota byla nastavena na 100%. Náměr M12 je také s použitím měkké podložky při dopadu filamentu s umístěním hlukoměru 1,0m od zdroje a mikrofon ve výšce 1,5m nad úrovní podlahy s tím že, hybnost kobota byla nastavena na maximální rychlost.

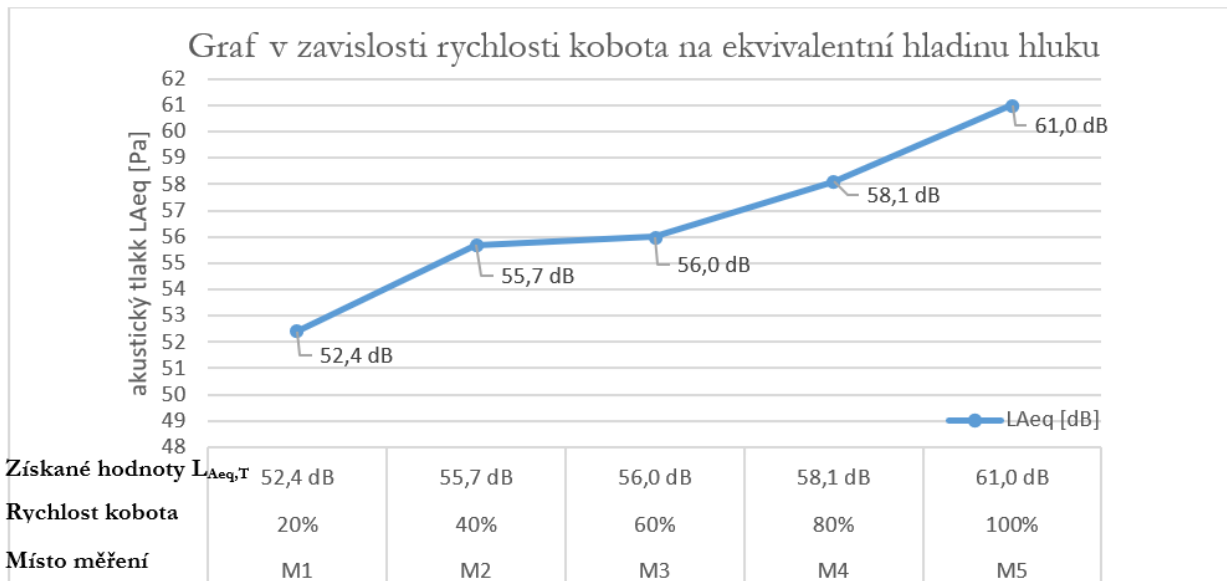
Tab. 3 Naměřené hodnoty pro místo měření B

Druh hluku, parametr		Místo měření B - 1,0m					
		M6	M7	M8	M9	M10	M12
Ustálený a proměnný hluk [dB]	L_{AFmax}	77,3	75,7	75,2	77,9	75,2	60,7
	$L_{Aeq,T}$	51,8	53,9	54,5	57,1	57,5	52,7
Impulzní hluk [dB]	L_{Cpeak}	93,1	92,5	91,7	92,1	91,7	78,7
Infrazvuk $L_{teq,T}$ [dB]	0,8 Hz	19,0	32,8	19,3	35,9	19,3	34,1
	1 Hz	21,4	34,2	23,4	33,0	23,4	37,8
	1,25 Hz	24,9	32,7	25,4	27,5	25,4	33,5
	1,6 Hz	25,7	31,0	17,8	28,7	17,8	32,3
	2 Hz	25,4	32,0	22,2	26,4	22,2	38,4
	2,5 Hz	26,8	32,0	27,8	28,9	27,8	44,9
	3,15 Hz	27,0	31,2	28,3	32,3	28,3	43,0
	4 Hz	28,9	30,1	29,8	33,1	29,8	39,4
	5 Hz	28,8	28,6	31,7	31,4	31,7	34,0
	6,3 Hz	29,2	31,0	33,0	37,4	33,0	37,0
	8 Hz	33,3	36,9	40,0	41,4	40,0	39,9
	10 Hz	27,8	30,7	34,1	40,4	34,1	31,8
	12,5 Hz	33,7	37,2	38,6	43,5	38,6	41,1
16 Hz	32,1	40,1	38,9	36,1	38,9	42,5	
Nízkofrekvenční hluk $L_{teq,T}$ [dB]	20 Hz	38,5	43,8	43,2	36,9	43,2	38,8
	25 Hz	33,4	33,7	35,7	31,5	35,7	38,1
	31,5 Hz	32,8	38,1	36,2	34,1	36,2	35,8
	40 Hz	31,7	32,8	34,9	32,8	34,9	41,1
Vysokofrekvenční hluk $L_{teq,T}$ [dB]	8000 Hz	30,4	30,6	33,5	31,4	33,5	41,3
	10000 Hz	25,0	25,9	28,6	26,3	28,6	35,1
	12500 Hz	23,0	23,0	26,0	23,5	26,0	33,7
	16000 Hz	16,7	17,3	18,9	17,6	18,9	23,8
Ultrazvuk $L_{teq,T}$ [dB]	20000Hz	77,3	75,7	75,2	77,9	75,2	60,7

Z naměřených hodnot nás zajímají hodnoty ustálený a proměnlivý druh hluku, kde získané hodnoty $L_{Aeq,T}$ byly porovnány s normou podle ČSN EN ISO 9612 a ČSN ISO 1999. Jelikož se jedná o hluk na pracovišti při 8h pracovní době, kdy je pracovník exponován hluku po dobu 8h své pracovní doby, kdy je stanovena hodnota ekvivalentní hladiny akustického tlaku $A_{LAeq,8h}$ rovná 85dB. Ostatními druhy zvuku jsme se nezabývali, jelikož jsme porovnávali s hygienickým limitem pouze $L_{Aeq,8h}$ pro pracovní hluk.

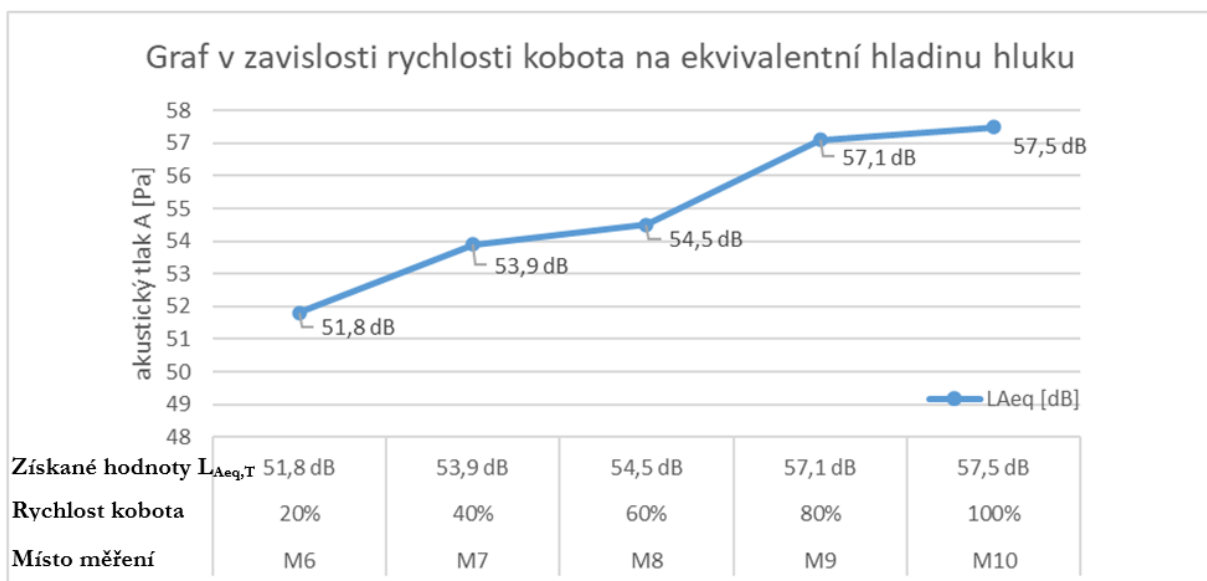
Tab. 4 Mikroklimatické podmínky při měření

místo odečtu	datum	čas	teplota vzduchu [°C]	relativní vlhkost vzduchu [%]	tlak vzduchu [hPa]
místnost C0.14	15.4.2024	11:22	20,7	43,0	998,7
venkovní prostor	15.4.2024	11:56	13,2	86,2	998,6



Obr. 6 Graf v závislosti rychlosti kobota na ekvivalentní hladinu hluku pro místa měření M1 až M5

Z grafu na Obr. 6 jsou získané hodnoty L_{Aeq} v závislosti na rychlosti kobota. Ze získaných hodnot jsme zjistili, že rychlost 20% a 100% kobota má rozdíl hodnot necelých 10dB. Zatím co u rychlosti 40% a 60% je velmi malý rozdíl 0,3dB. Tyto rozdíly jsou velmi zanedbatelné. Při vyšší produkci ve výrobě, kdy kobota má být nastaven na 80% rychlosti je rozdíl hluku 2,4dB oproti 40% základní rychlosti kobota ve výrobě. Z grafu můžeme pozorovat rostoucí křivku, to je způsobeno tím, že s vyšší rychlostí kobota se zvyšuje hladina hluku. Na Obr. 7 vidíme podobný graf akorát s měřením ve vzdálenosti 1,0m od zdroje hluku, tudíž hodnoty jsou nižší. To je způsobeno tím, že mikrofon je dál od zdroje hluku, nežádoucí okolní zvuky mají tendenci se ztrácet v pozadí a mikrofon zachycuje převážně pouze požadovaný signál. Tím se snižuje poměr signálu k šumu a celkový vnímaný hluk je nižší.



Obr. 7 Graf v závislosti rychlosti kobota na ekvivalentní hladinu hluku pro místa měření M6 až M10

V grafu na Obr. 7 můžeme vidět získané hodnoty L_{Aeq} rozdělené do jednotlivých naprogramovaných rychlostí kobota. Z grafu lze vyčíst, že hodnota se postupně zvyšuje s narůstající rychlostí kobota. U měření M6 je rozdíl přes 5,0 dB vůči M10, kdy rychlost kobota je maximální. Z místa měření M9 a M10 můžeme vidět, že hodnoty se liší o 0,4dB.

Tato hodnota je velice nízká a lidské ucho tento hluk ani nezaznamená. Naměřené hodnoty jsou o něco vyšší, než u měření M1 až M5 to jsme očekávali, jelikož zvukoměr byl umístěn dál od zdroje a to přesně 1,0m.

Měření hluku mohlo být ovlivněno několika faktory, které mohli zkreslit nebo ovlivnit výsledné hodnoty. Například prostředí, vzdálenost a umístění mikrofonu, typ operace kobota, stav a údržba kobota, změny v zatížení kobota a poslední řadě špatná kalibrace či chyba člověka.

4 Závěr

V kontextu rostoucí automatizace a integrace kolaborativních robotů do různých průmyslových odvětví je měření a snižování hluku nezbytným krokem k zajištění bezpečných a efektivních pracovních podmínek. Investice do technologií a metod, které umožňují kontrolu a redukci hluku, přináší nejen zlepšení pracovního prostředí, ale také ekonomické přínosy v podobě zvýšené produktivity a kvality výroby.

Měření se zaměřilo na analýzu hladin hluku v různých provozních režimech kolaborativního robota, konkrétně při různých nastavených rychlostech. Byly stanoveny měřicí body ve vzdálenostech 0,5 metru a 1,0 metru od zdroje hluku, což představuje typické pracovní pozice zaměstnanců. Mikrofon byl při měřeních umístěn v úrovni sluchu stojící osoby, tedy 1,5 metru nad zemí. Měření byla provedena při rychlostech od 20% do 100% maximální rychlosti robota, což umožnilo zjistit, jak rychlost ovlivňuje intenzitu hluku.

Z naměřených dat bylo zřejmé, že s rostoucí rychlostí robota dochází ke značnému nárůstu hluku, přičemž nejvyšší úrovně byly zaznamenány při maximálních rychlostech. Tyto výsledky byly porovnány s hygienickými normami pro pracovní prostředí, aby bylo zjištěno, zda intenzita hluku překračuje povolené limity.

Dále byla testována efektivita různých materiálů dopravníku v případě snižování hluku. Výměna tvrdého plastového materiálu dopravníku za měkký textilní nebo pryžovou podložku vedla k významnému snížení hluku o 10 dB. Tento zjištěný účinek ukazuje na možnost technických úprav, které by mohly být implementovány pro snížení hluku bez nutnosti snižování rychlosti robota, což by mohlo negativně ovlivnit produktivitu výroby.

Závěrem práce je doporučeno, aby vedoucí provozu zvážili instalaci měkkých materiálů na všechny dopravníky ve výrobní hale nebo přizpůsobili výšku pádu objektů tak, aby byla hladina hluku co nejnižší. Tato opatření by měla vést k vytvoření zdravějšího pracovního prostředí a dodržení regulačních požadavků na ochranu zdraví zaměstnanců před škodlivým hlukem.

Budoucnost automatizace spočívá nejen v technologickém pokroku, ale i v zajištění toho, aby tyto pokroky byly integrovány způsobem, který respektuje zdraví a pohodu pracovníků. Snižování hluku kolaborativních robotů je jedním z klíčových aspektů, který může přispět k udržitelnějšímu a lidskéjšímu průmyslovému prostředí. Tento článek se zaměřil na klíčové aspekty měření hluku kolaborativních robotů a přinesl přehled nejefektivnějších strategií a technologií pro jeho snižování, čímž přispěl k lepšímu porozumění této problematice a inspiroval k dalšímu vývoji v této oblasti.

Metodika měření hluku kolaborativních robotů zahrnuje pečlivé plánování, použití pokročilých měřicích zařízení a detailní analýzu získaných dat. Tento proces je nezbytný pro identifikaci zdrojů hluku a návrh efektivních opatření ke snížení hlučnosti. Dodržování vědeckých postupů a norem zajišťuje, že výsledky jsou spolehlivé a mohou být použity k zajištění bezpečného a komfortního pracovního prostředí. Snižování hluku kolaborativních robotů nejen zlepšuje pracovní podmínky, ale také přispívá k vyšší produktivitě a celkové efektivitě výrobních procesů.

Použité zdroje

- [1] BERNAT, P. a Zacharski, K.: Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu. [online] citace 13.srpna.2021 Dostupný z: <https://greif.cz/wp-content/uploads/2021/02/ITS075-01-Zaklady-akustiky-prirucka-pro-zacatecniky.pdf>
- [2] Aldersey-Williams, H. (2020). Dutch Light: Christiaan Huygens a vytváření vědy v Evropě. Pan Macmillan. s. 2–15, 417. ISBN 978-1-5098-9332-4. Archivováno z originálu dne 28. srpna 2021. Staženo 28. srpna 2021
- [3] NOVÝ, Richard. Hluk a chvění. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 400 s., ISBN 978-80-01-04347-9.
- [4] Ministerstvo zdravotnictví České republiky. Co je to hluk [online], vytvořeno dne 1.12.2015. Dostupné z: <https://mzd.gov.cz/co-je-to-hluk/>
- [5] Vlastimil Beran, Chvění a hluk, Fakulta elektrotechnická západočeské univerzity v Plzni, Vyd. 1. Plzeň září 2010, ISBN 978-80-7043-916-6
- [6] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Vyd. 1. Překlad Jan Obdržálek. Brno: Vutium, 2000, viii s., s. 330-576, příl. ISBN 80-214-1868-0.
- [7] Státní zdravotní ústav 2023 – 2024, Zdroje hluku a jak se měří, [online]. Dostupné z: <https://szu.cz/tema/zivotni-prostredi/hluk/zdroje-hluku-a-jak-se-meri/>
- [8] Zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, ve znění pozdějších předpisů. [online], účinnost od 1.1.2001. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-258>
- [9] Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, ve znění pozdějších předpisů. [online], účinnost od 1.11.2011. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2011-272>
- [10] SVANTEK © 2023 Project by IDH.agency, 2006, [online] Dostupné z: <https://svantek.com/products/svan-979-class-1-sound-vibration-level-meter/>
- [11] PONIKELSKÝ, J., CERNOHLÁVEK, V., ŠTĚRBA, J., HOUSKA, P.: Research of Robots in Cooperative Mode in Human Body Part Detection. In: Manufacturing Technology. Vol. 23, No. 1 (2023) pp 99-109. ISSN: 1213-2489. DOI: 10.21062/mft.2023.007
- [12] CERNOHLÁVEK, V.; KLIMENDA, F.; HOUSKA, P.; SUSZYŃSKI, M. Vibration Measurements on a Six-Axis Collaborative Robotic Arm—Part I. Sensors 2023, 23, 1629. ISSN: 1424-8220, IF: 3.847, DB WoS (Q2), OPEN ACCESS, <https://doi.org/10.3390/s23031629>
- [13] MELLER, A., SUSZYŃSKI, M., LEGUTKO, S., TRACZYŃSKI, M., CERNOHLÁVEK, V.: Studies on a Robotised Process for Forging Steel Synchronizer Rings in the Context of Forging Tool Life. In: Manufacturing Technology. Vol. 23, No. 1 (2023) pp 88-98. ISSN: 1213-2489. DOI: 10.21062/mft.2023.002
- [14] ČERNOHLÁVEK, V., KLIMENDA, F., ŠTĚRBA, J., PONIKELSKÝ, J., CHALUPA, M.: *Měření vibrací na šestiosém robotickém rameni*. CD – ROM pp. 31-38, IX. mezinárodní konference „Experimentální a výpočtové metody v inženýrství 2022“, Ústí nad Labem 2022, ISBN 978-80-7561-355-4
- [15] KLIMENDA, F., ŠTĚRBA, J., ČERNOHLÁVEK, V., PÍSAŘÍK, M.: *Využití šestiosého robotického ramene pro Pick and Place úlohu*. CD – ROM pp. 68-73, VIII. mezinárodní konference „Experimentální a výpočtové metody v inženýrství 2021“, Ústí nad Labem 2021, ISBN 978-80-7561-316-5
- [16] KLIMENDA, F., ŠTĚRBA, J., ČERNOHLÁVEK, V., PONIKELSKÝ, J., MAŘAN, P.: Draft of robotic workstation for laser engraving. In: Manufacturing Technology. Vol. 21, No. 3 (2021) pp 357-363. ISSN: 1213-2489. DOI: 10.21062/mft.2021.049

Experimentální měření a testování vytištěných 3D dílů

Alexandr Fales¹

¹Fakulta strojního inženýrství, Ústav technologie a materiálů, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 400 01 Ústí nad Labem. Česká republika. E-mail: alexandr.fales@ujep.cz

V rámci svojí disertační práce v její praktické části se zabývám výběrem vhodných parametrů 3D tisku pro díly robotické stavebnice, dále výběrem 3D tiskárny a stanovením souboru experimentálního měření a testování za účelem získání potřebných dat pro určení vhodného materiálu pro 3D tisk dílu robotické stavebnice a nastavení vhodných parametrů 3D tisku tak, abychom získali požadované vlastnosti dílu při zachování ekonomické výhodnosti 3D tisku. 3D tisk jako takový, ať už pro potřeby domácností, školní výuku či aplikace v průmyslu se objevuje v současné době prakticky všude. Prostupuje napříč obory jak v průmyslu, tak vědě, domácnostech a zejména ve výuce na technických oborech nejen vysokých škol. Aplikace do výuky od primárního vzdělávání, přes sekundární až po terciální je zásadní. Budoucí žáky a studenty je potřeba nejen seznámit s danou problematikou teoreticky, ale především prakticky a naučit je aplikovat 3D tisk optimálním způsobem a používat ho pro potřeby nejen robotiky tak, aby se dosáhlo sledovaného účelu a cíle v co nejkratším čase s využitím minima nákladů. V rámci své disertační práce vytvořím konstrukční návrh a výukovou metodiku učební pomůcky pro výuku robotiky na základních a středních školách tak, aby si mohli žáci a studenti, ale i pedagogové na svých školách jednotlivé díly robotické stavebnice vytisknout sami prostřednictvím technologie 3D tisku. Pomocí vytvořené metodiky budou schopni realizovat konstrukci robotického modelu vč programování, čímž se propojí a výrazně zmodernizuje výuka programování a robotiky. Měření v rámci testování jednotlivých dílů dle jejich použití v konstrukčních modelech robotické stavebnice budou realizována experimentálně a analyticky s cílem zajištění jejich optimálního provozně-funkčního hlediska. Toto hledisko bude v rámci vývoje hodnoceno prostřednictvím analýz vlivu charakteristických parametrů technologie 3D tisku (použitých konstrukčních prvků, materiálů a výrobních parametrů tisku). Hlavními aspekty hodnocení bude zejména vyrobitelnost v podmínkách a možnostech koncových uživatelů, kterými jsou právě základní a střední školy a dostatečné mechanické vlastnosti ve vazbě na použití učební pomůcky, přičemž těchto parametrů se dosáhne výběrem vhodného existujícího dílu odpovídající robotické stavebnice a podrobení ho experimentálnímu měření a testování destruktivními zkouškami.

Klíčová slova: díl, stavebnice, robotika, 3D tisk, VEX, VEX IQ, vzdělávání, destruktivní zkouška, tah, tlak

1 Výběr robotické stavebnice

V předchozím článku s názvem Edukační robotika jsem realizoval na toto téma výzkum, přičemž jsem se stručně zmínil o možnostech její realizace a během tohoto výzkumu jsem zjistil, že mezi nejrozšířenější robotické stavebnice na základních a středních školách jsou robotické stavebnice platformy VEX, konkrétně varianty VEX GO, VEX IQ generace 1 a generace 2, VEX EXP a VEX EV3, dále pak robotické stavebnice platformy LEGO, konkrétně LEGO WeDO 2.0, LEGO MINDSTORMS EV2 a EV3, LEGO SPIKE. Robotické stavebnice platformy LEGO, ale zažily velmi nepříjemnou situaci v době COVIDové a po ní, kdy vlivem nízkých celosvětových tržeb firma LEGO přestala jak s výrobou, tak i podporou svých stavebnic LEGO WeDO 2.0, LEGO MINDSTORMS EV2 a EV3, čímž se postupně začala v tomto důsledku vytrácet komunita kolem těchto stavebnic, díky které tyto stavebnice získaly na významu a svého času expandovaly na základní a střední školy. Tato tržní situace vedla logicky k faktu, že se pedagogové a všichni, kdo robotické stavebnice chtěli i na dále nebo zcela nově ve výuce používat, museli zaměřit na platformu jinou. A právě touto novou a nebývale rychle rostoucí platformou je VEX. Jedním z důvodů výběru je fakt, že se jako jediná platforma neustále rozvíjí a přináší naprosto jedinečný a ucelený komplex pro rozvoj kompetencí souvisejících s aplikací robotiky do procesu vzdělávání na základních, středních, ale i vysokých školách. Umožňuje nejen žáků a studentům postupný růst a osvojování si nezbytných dovedností potřebných pro logické myšlení a technický pře-hled, ale celkově vzbuzení a udržení zájmu o techniku jako takovou od jejího samotného začátku ve fyzice, kroužku robotiky, programování s prostupným přesahem do odborných předmětů na střední škole až po odporné semináře a přednášky na škole vysoké, tak i růst a rozvoj pedagogických pracovníků na všech úrovních v konceptu edukační robotiky včetně získání mezinárodních certifikátů pro jednotlivé robotické hračky a stavebnice platformy VEX, zapojení se do mezinárodních soutěží s platformou VEX a koučování týmů, lektorování lektorů, vývoj dílů, hraček a stavebnic, a mnoho dalšího. Platforma VEX mi vychází v porovnání se všemi ostatními platformami, s nimiž jsem se za 15 let práce ve školství a soukromém sektoru setkal či je přímo testoval jako ideální volba pro osobní rozvoj technika jako odborníka, tak i ve smyslu edukační robotiky pedagoga jako lídra výuky při zavádění robotiky do procesu vzdělávání. Co nejvíce oceňuji, je naprosto úžasná metodická podpora v podobě velmi rozsáhlé znalostní databáze obsahující kompletní logicky a úrovnostně na sebe navazující celky řešící seznámení, zavádění, výuku, programování, experimenty a spoustu dalších témat, obsahující perfektně a velmi podrobně za-pracované metodiky, typu vezmi si a začni. Tato přidaná hodnota je naprosto bezkonkurenční a není vázaná na předchozí požadované znalosti či dovednosti, ani žádnou povinnost si zakoupit jakýkoliv produkt z platformy VEX. Rozhodujícím faktorem pro výběr je i skutečnost, že se VEX opírá o principy edukační robotiky a staví na vzdělávacích metodách, které jsou součástí metod STEM, STEAM a

STREAM, což je dle mého názoru nejlepší metoda nejen pro výuku robotiky, polytechniky a programování vůbec. A dalším důvodem výběru je skutečnost, kdy byla v dubnu 2018 soutěž VEX Robotics Competition vyhlášena Guinnessovou knihou rekordů jako největší soutěž robotů na světě

Z hlediska počtu prodaných stavebnic platformy VEX v České republice:

- robotická stavebnice VEX GO prodáno 5945 stavebnic.
- robotická stavebnice VEX IQ prodáno 4832 stavebnic (z toho 1071 VEX IQg1)
- robotická stavebnice VEX EXP/V5/EDR prodáno 206 stavebnic.

Výběr robotické stavebnice je v tomto případě VEX GO a IQ.

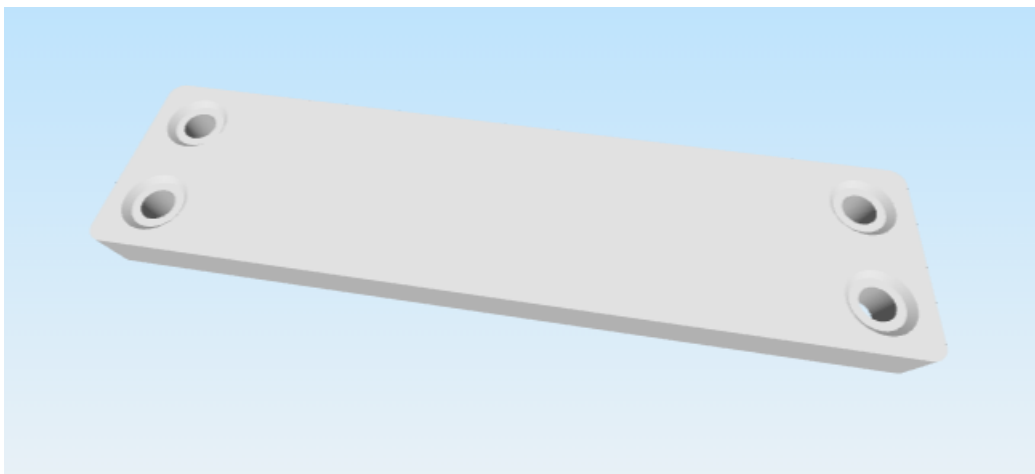
2 Výběr dílů k 3D tisku

Porovnáním obou stavebnic, kdy stavebnice VEX GO čítá 275 dílů a stavebnice VEX IQ 1000 dílů, byly vybrány 2 díly. Hledaný díl robotické stavebnice musel splňovat zejména následující podmínky a to:

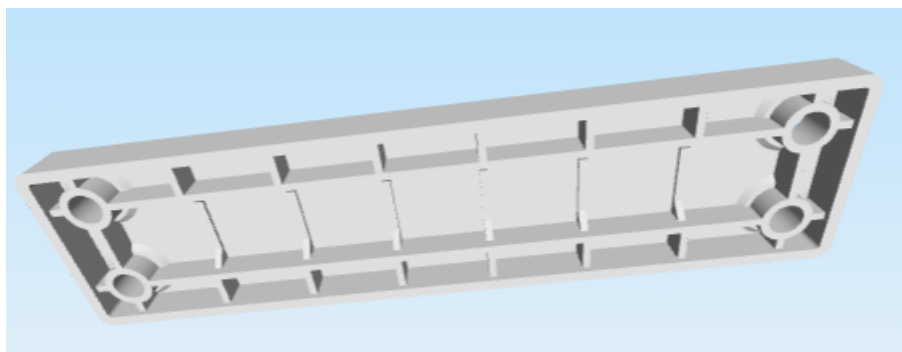
- nachází v obou typech stavebnice, jak VEX GO, tak IQ
- má vhodné rozměry pro uchycení do strojů a přípravků pro experimentálních měření a testování

Tato kritéria vedla pro delších rozvahách a různých forem porovnávání na 2 díly a to:

Vybraný díl 2x8 Smooth Panel (228-2500-524)

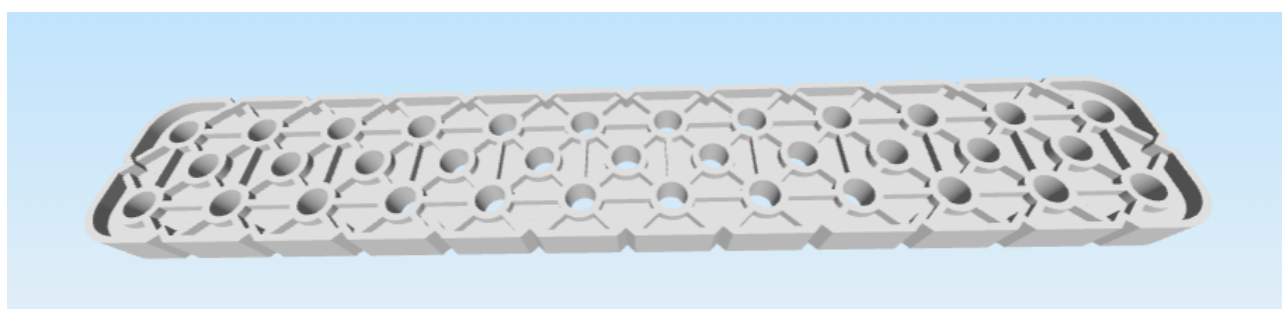


Obr. 1 Díl 2x8 Smooth Panel (228-2500-524) VEX – horní strana

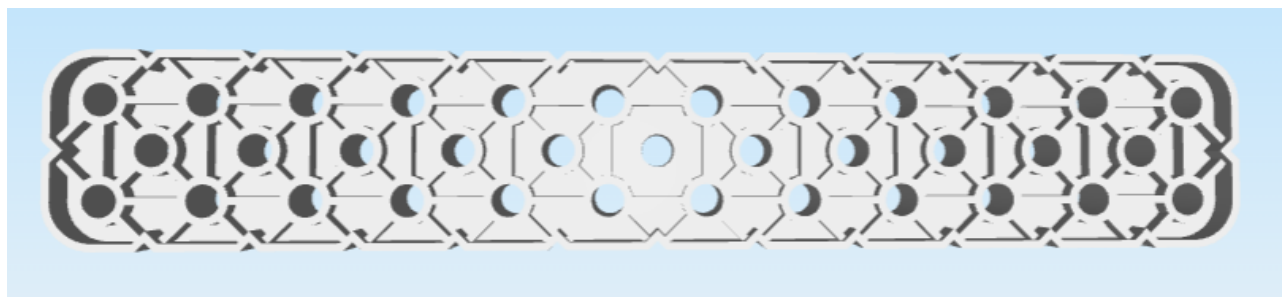


Obr. 2 Díl 2x8 Smooth Panel (228-2500-524) VEX – spodní strana

Vybraný díl 2x12 Beam (228-2500-026)



Obr. 3 Díl 2x12 Beam (228-2500-026) VEX – horní strana

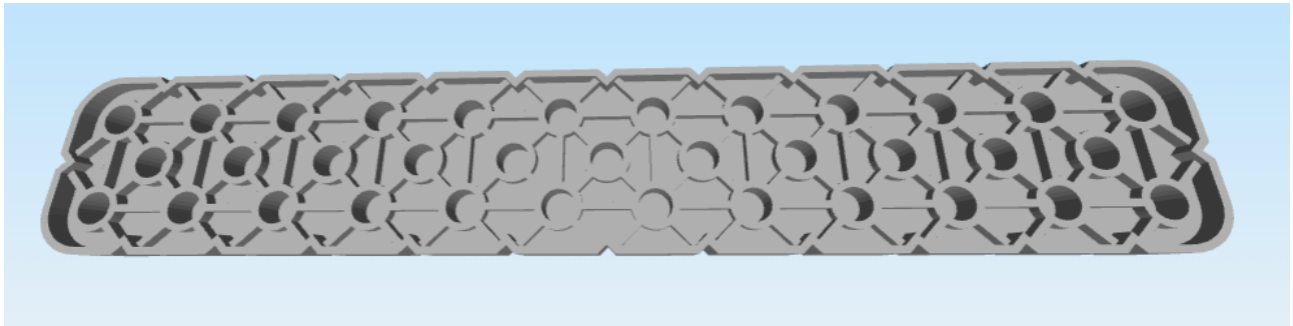


Obr. 4 Díl 2x12 Beam (228-2500-026) VEX – spodní strana

Následně byly tyto díly zajištěny v potřebném množství v originální podobě a následovalo uchycení do stroje a přípravku pro experimentální měření a testování. Díl 2x8 Smooth Panel (228-2500-524) se ukázal jako zcela nevhodný pro tento typ experimentálního měření a testování. Díl 2x12 Beam (228-2500-026) naopak zcela vyhovoval jak rozměrově, tak i z hlediska uchycení. Proto byl jako finální díl zvolen 2x12 Beam (228-2500-026).

3 Úprava model dílu k 3D tisku:

Po zkušebním tisku dílu 2x12 Beam (228-2500-026) jsem zjistil, že daný model není zcela ideální, resp. během slicování byl vytvořen rozsáhlý systém podpor, který představoval za prvé „zbytečnou“ spotřebu materiálu vzhledem ke skutečnosti tisku dílu pro potřeby destruktivního experimentálního měření a testování a dále výraznou časovou zátěž při odstraňování těchto podpor z vytištěného dílu. Z tohoto důvodu bylo potřeba model dílu následně upravit tak, aby byl tisk co nejrychlejší a nejjednodušší a následný postprocesing po tisku minimální, resp. žádný. U modelu došlo k zarovnání spodní strany a zneprůchodnění otvorů pro piny. Z hlediska testování tato skutečnost nemá zásadní vliv na výsledek, neboť se porovnávají rozměrově i tvarově naprosto stejné díly vytištěné z různých filamentů.



Obr. 5 Upravený díl 2x12 Beam (228-2500-026) VEX – spodní strana



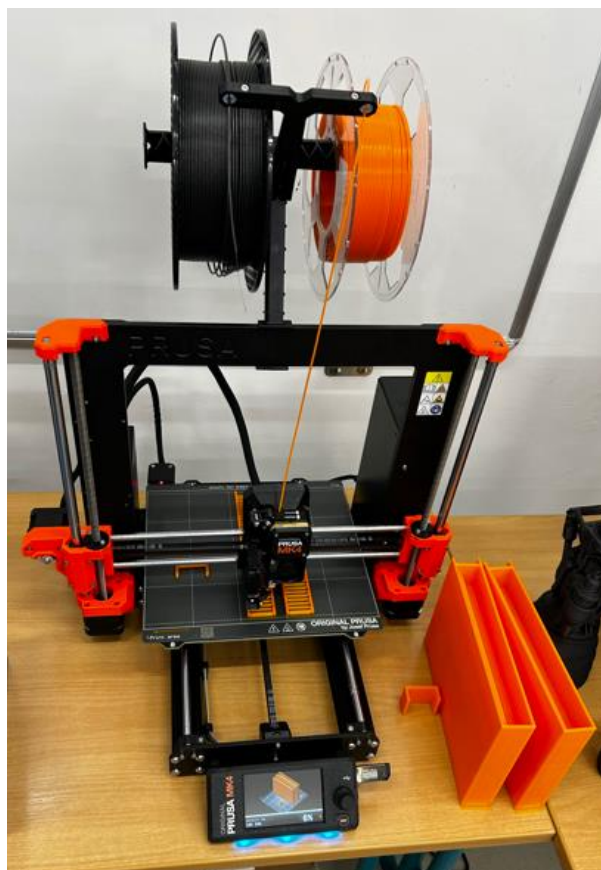
Obr. 6 Upravený díl 2x12 Beam (228-2500-026) VEX – spodní strana

4 Výběr tiskárny

Během realizovaného výzkumu pro potřeby zjištění, jaké robotické stavebnice se dnes používají pro výuku robotiky na základních a středních školách v České republice, byl sledován ještě další cíl výzkumu a to, jakým způsobem je realizován 3D tisk, resp. jakou 3D tiskárnu základní a střední školy používají, na jaké filamentsy se zaměřují a proč, jak jsou na tom z hlediska znalostí a dovedností v aplikaci 3D tisk ve smyslu typizace úrovní (nepolíbení, začátečníci, mírně pokročilí, pokročilí, experti). Výzkum proběhl formou osobních konzultací během školení, webinářů a projektových dní přímo s řediteli, zástupci ředitelů a pedagogy, kteří ve svých hodinách či ve volnočasových aktivitách buď používají nebo se chystají používat 3D tisk pro potřeby výuky. Celkem se zúčastnilo 2156 účastníků. Aktuálně jsou na základních a středních školách nejpoužívanější platformou 3D tiskáren tiskárny od firmy Prusa Research, kterou v roce 2012 založil český vývojář a kutil Josef Průša. Dnes v ní pracuje přes 700 lidí a každý měsíc odešle přímo z Prahy přes 10 000 tiskáren Original Prusa do 160 zemí z celého světa. Důvodem je skutečnost, že školy mohou získat např. tiskárnu Original Prusa MINI+ zcela zdarma pro potřeby výuky, pokud splní požadované podmínky. Sleva na vybrané zařízení pro školy a vzdělávací instituce. Dalším důvodem byla metodická podpora v rámci rozsáhlého portálu řešící opravdu všechna úskalí během 3D tisku, se kterým se můžete setkat. Dále naprosto úžasná podpora v podobě chatu s odborníky, dokonce i ve 3 ráno, kteří vám velmi ochotně, a hlavně správně poradí, jak daný problém velmi rychle vyřešit. Kvalita filamentů je další argumentem a v neposlední řadě skutečnost, že se jedná o českou firmu. Na výběr byly 3 typy tiskáren od Prusa Research:

- Original Prusa MINI+
- Original Prusa i3 MK3S+
- Original Prusa MK4

Rozhodl jsem se vybrat Original Prusa MK4, vzhledem ke skutečnosti, že je tato tiskárna nejnovějším produktem a dá se předpokládat, že si ji školy budou postupně pořizovat. Dále po seznámení s parametry a porovnání s ostatními typy a také protože je její hodnocení uživateli nejlepší a mimo jiné tyto tiskárny má ve vlastnictví Fakulta strojního inženýrství na UJEPu. Bližší informace včetně parametrů je možné nalézt na tomto odkazu: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/original-prusa-mk4-2/>



Obr. 7 Tiskárna Original Prusa MK4

5 Výběr filamentů a nastavení tisku

Během již zmiňovaného výzkumu pro potřeby zjištění, jaké robotické stavebnice se dnes používají pro výuku robotiky na základních a středních školách v České republice, kdy byl sledován ještě další cíl výzkumu a to, jakým způsobem je realizován 3D tisk, resp. jakou 3D tiskárnu základní a střední školy používají, na jaké filameny se zaměřují a proč, jak jsou na tom z hlediska znalostí a dovedností v aplikaci 3D tisk ve smyslu typizace úrovní (nepolíbení, začátečníci, mírně pokročilí, pokročilí, experti). Výběru filamentu jsem se obával, protože jsem předpokládal, že budou školy nakupovat nejrůznější značky a rozhodující pro ně bude cena, nikoliv kvalita. Jde o osobní zkušenosti při realizaci řady projektů a grantů s požadavkem na průzkumy trhu a výběrová řízení, kdy je prakticky u 90% všech finančních dotačních titulů rozhodujícím parametrem cena a díky tomu dochází leckdy k nákupu sice velmi levných filamentů, ale buď s velmi problematickou tisknutelností nebo dochází k poškozené tiskových plátů či opakovaným chybám v tisku aj. Tím se dostáváme k jednoznačnému závěru, plynoucímu i z řady diskuzí odborných fór a blozích firmem či znalostních databázích, kde se otázky kvality filamentů řeší. Nejpoužívanějším filamentem se ukázal Prusament filament, dále Fiber3D, Filament PM, a další.

PLA (Polylactid Acid) neboli kyselina polymlečná, což je biologicky rozložitelný termoplast vyráběný z přírodních materiálů (kukuřičného škrobu či cukrové třtiny). Má téměř nulovou smrštivost během tisku, dobré adhezivní vlastnosti vůči k tiskovému plátu, nižší pracovní teploty a výborná kvalita tisku bez nutnosti postprocesingu. Je vhodný pro tisky malých až středně velkých modelů. To z něj dělá ideální volbu pro začátečníky a celkově tisky realizované pro potřeby výuky. Má však nízkou teplotní odolnost, resp. při teplotách vyšších 60 °C dochází k plastickým deformacím. Dále je náchylný k postupnému rozkladu pod UV zářením (není to zase úplně zásadní, ale jsou patrné změny ve struktuře horních vrstev, které jsou tomuto záření dlouhodobě vystavené). Z mého pohledu zásadní je nízká mechanická pevnost, kdy se při nárazu snadno láme po vrstvách nebo do střepech a jeho soudržnost vrstev je také nižší. Tisknutelnost je se správným tiskovým profilem výborná a lze tisknout, jak na hladký ocelový tiskový plát, tak ocelový tiskový plát se zrnitým práškovým povrchem a saténovým práškovým povrchem.

Další častěji používaným filamentem byl PET-G (Polyethylene Terephthalate obohacený Glykolem). Ten je teplotně i mechanicky odolnější, což ho dělá pro naše potřeby ideální materiál pro tisk mechanicky namáhaných dílů robotické stavebnice. Dále je houževnatý a částečně elastický, tím je zajištěno, že nedojde k praskání dílů. Určitá nevýhoda ve vyšších

pracovních teplotách kvůli ohřevu tiskového plátu, čímž roste lehce energetická náročnost tisku a tím i cena. Dalším přirozeným nedostatkem je stringování, což tvorba vlásků. Lze ho snadno odstranit buď používáním vhodného teplotního tiskového profilu s následným postprocesingem. V neposlední řadě materiál vykazuje extrémní adhezi k tiskovému povrchu, z tohoto důvodu je vhodné tisknout na ocelový tiskový plát se zrnitým práškovým povrchem nebo saténovým práškovým povrchem.

Materiál ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) se objevil velmi málo z hlediska používání na základních a středních školách a jen u pedagogů s pokročilou zkušeností v oblasti 3D tisku, přičemž tyto školy měli tiskárny vybaveny modulárním uzavřeným boxem Original Prusa Enclosure pro vytvoření stabilního tiskového prostředí se zvýšenou teplotou. Což je známkou toho, že se již na škole realizuje pokročilý tiska z materiálů jako je např. ASA či ABS. Materiál ABS je amorfni termoplast s výbornými mechanickými vlastnostmi, houževnatostí a teplotní odolností až 100°C. ideální pro mechanicky namáhané díly s tepelnou odolností. Nevýhodou je obtížnější tisknutelnost, neboť je vysoce smrštivý, což vede k rozměrové přesnosti výtisku cca 1 až 2 %. Je proto nutné tisknout v uzavřeném teplotně regulovaném boxu. Dále během tisku dochází k uvolňování zdraví nebezpečných výparů a je naprosto nezbytné v dané místnosti větrat. Má horší odolnost vůči UV a vykazuje vysokou adhezi k tiskovému povrchu, z tohoto důvodu je vhodné tisknout na ocelový tiskový plát se zrnitým práškovým povrchem nebo saténovým práškovým povrchem. Z našeho hlediska převažují nevýhody zejména pak horší tisknutelnost a smrštivost nad výhodami, proto je tento materiál pro účely použití na základních a středních školách z hlediska tisknutelnosti dílů robotické stavebnice nevhodný, přesto si dovolím ho podrobit experimentálnímu měření a testování destruktivními zkouškami.

Materiál ASA (Acrylic Styrene Acrylonitrile) se objevil opět velmi málo z hlediska používání na základních a středních školách ze stejného důvodu jako materiál ABS. Jedná se o materiál nastupující za ABS. Technické parametry jsou stejné, ale vykazuje vyšší odolnost vůči UV záření a menší rozměrovou smrštivost. Nevýhodou je horší tisknutelnost a vyšší hyroskopická schopnost, proto je nutné ho skladovat v místnosti s minimální vlhkostí v uzavřeném obalu. Z našeho hlediska převažují nevýhody zejména pak horší tisknutelnost a smrštivost nad výhodami, proto je tento materiál pro účely použití na základních a středních školách z hlediska tisknutelnosti dílů robotické stavebnice nevhodný, přesto si dovolím ho podrobit experimentálnímu měření a testování destruktivními zkouškami.

Na výběr byly 4 filamenty a dovolím si je seřadit podle požadavků námi sledovaných a možnostech škol:

- PLA
- PET-G
- ABS/ASA

Rozhodl jsem se vybrat všechny materiály a podrobit je experimentálnímu měření a testování destruktivními zkouškami. Z hlediska tisku bude proveden výtisk se 100 % výplní. Slicování bude provedeno v PrusaSlicer 2.7.4., přičemž v nastavení tisku volím výšku mezi tiskovým plátem a hrotem trysky 3D tiskárny pro vyšší detaily vzhledem k tvarovým složitostem modelu 0,10 až 0,20 mm, čímž dojde i ke zpomalení tisku, což je opět žádoucí. Z hlediska rychlosti tisku se zaměřím na první vrstvu, přičemž rozhodně dle svých zkušeností i doporučení od řady profi tiskařů snížit tuto hodnotu na 10 mm/s. První vrstva je zásadní vrstvou pro celý proces tisku. V případě, jakýchkoliv nerovností či znečištění jak povrchu, tak trysky či volnějším řemenu se výrazně zvyšuje riziko tiskové chyby, což může vést až k odlepení výtisku. Z hlediska vzoru a velikosti výplně volím pro první tisk 100 % přímočarou výplň. Uvedené hodnoty jsou opět voleny s ohledem na skutečnost, že si dané díly robotické stavebnice budou tisknout žáci, studenti a pedagogové na základních a středních školách s různou úrovní zkušeností v oblasti 3D tisku i s různou úrovní vybavení.

6 Realizace a výsledky experimentálních měření a testování

Zkouška tahem

1) Podmínky měření:

- Datum měření: 14. 05. 2024
- Teplota 22,2 °C
- Tlak vzduchu: 997,7 hPa
- Vlhkost: 34,8 %

2) Cíl

Cílem testování je porovnat a vyhodnotit mechanické vlastnosti originálního dílu a dílů vytištěných z materiálů PLA, 2 různých PET-G, ASA a ABS na 3D tiskárně Original Prusa MK4. Experimentální test bude proveden pomocí statické zkoušky tahem. Předpokládané místo lomu zkušebních výtisků je část se dvěma otvory, popř. její blízké okolí. Sledujeme materiál, který vyjde ze zkoušky nejlépe, přičemž budou na daném materiálu následně probíhat další experimentální měření a testy v závislosti na konkrétním nastavení 3D tisku.

3) Popis a postup měření

- Příprava zkušebních výtisků – vizuální kontrola a odstranění případného stringování u PET-G, dále označení zkušebních výtisků dle tabulky níže.
- Nastavení trhačího stroje a softwarových parametrů (výběr stroje – Hegewald & Peschke inspect 100, výběr vhodných upínacích přípravků, rychlost tažení 10 mm/min, začínající zatížení F0 2 N).
- Upnutí zkušebního výtisku.
- Provedení testu – provedeny byly celkem 4 testy pro každou skupinu materiálů, vzhledem k tomu, že se výsledná síla výrazně neměnila a materiály vykazovaly podobné chování.
- Analýza výsledků – umístění lomů, maximální zatěžující síla do přerušení výtisků.

4) Zhodnocení měření

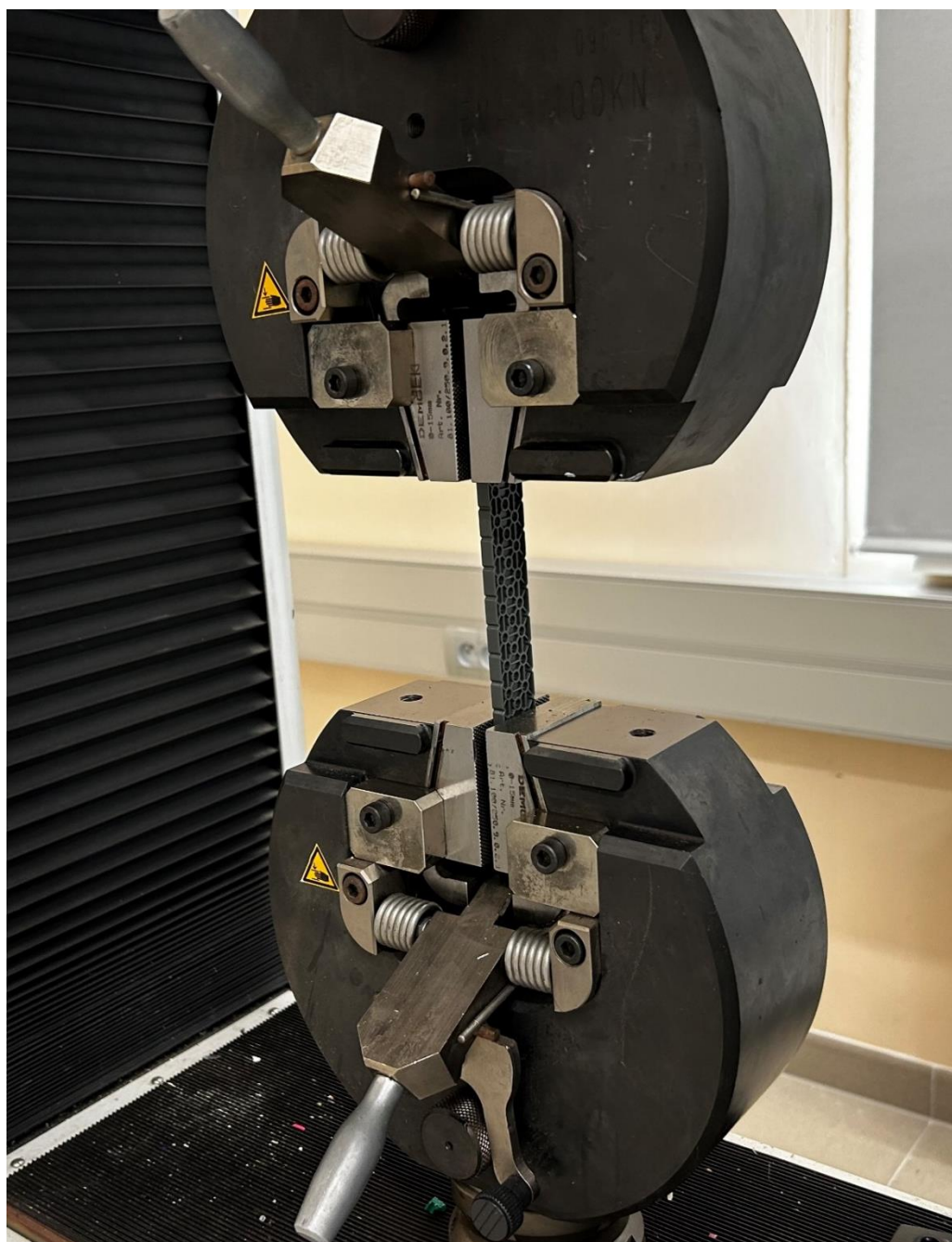
Z naměřených hodnot je patrné, že maximální hodnoty zatěžující síly jsou všech výtisku vyšší než u originálních dílů. Z hlediska nejvyšší hodnoty výsází jednoznačně materiály PET-G od obou firem, přičemž materiál PET-G2 od firmy Prusa Research konkrétně Filament PETG PRUSA RESEARCH 1,75 mm 1000 g Jungle Green (zelený) vykazuje plynulejší průběh hodnot zatěžující síly a vzhledem k jeho kvalitě se jeví jako ideální volba. I přestože hodnoty pevnosti v tahu jsou zjištěny z výtisku provedeném z vlákna filamentu o průměru 1,75 mm, lze předpokládat, že jsou mechanické vlastnosti materiálu PET-G právě ty požadované pro realizaci na 3D tisku dílů robotické stavebnice v podmínkách základních a středních škol. Nebyl proveden výpočet směrodatné odchylky. Pro toto měření a vyhodnocení není zásadní. Bude proveden následně po realizaci dalších testů, abychom získali hodnoty k porovnání odpovídajícím způsobem.

<i>Originální díl VEX</i>		<i>Materiál PLA</i>		<i>Materiál PET-G1</i>	
<i>Označení výtisku</i>	<i>Zatěžující síla F_{max}</i>	<i>Označení výtisku</i>	<i>Zatěžující síla F_{max}</i>	<i>Označení výtisku</i>	<i>Zatěžující síla F_{max}</i>
orig_1	2028	PLA_1	2611	PETG1_1	3906
orig_2	1927	PLA_2	2601	PETG1_2	3968
orig_3	1977	PLA_3	2579	PETG1_3	3917
orig_4	2090	PLA_4	2658	PETG1_4	3774
<i>Aritmetický průměr</i>	2005,5	<i>Aritmetický průměr</i>	2612,25	<i>Aritmetický průměr</i>	3891,25

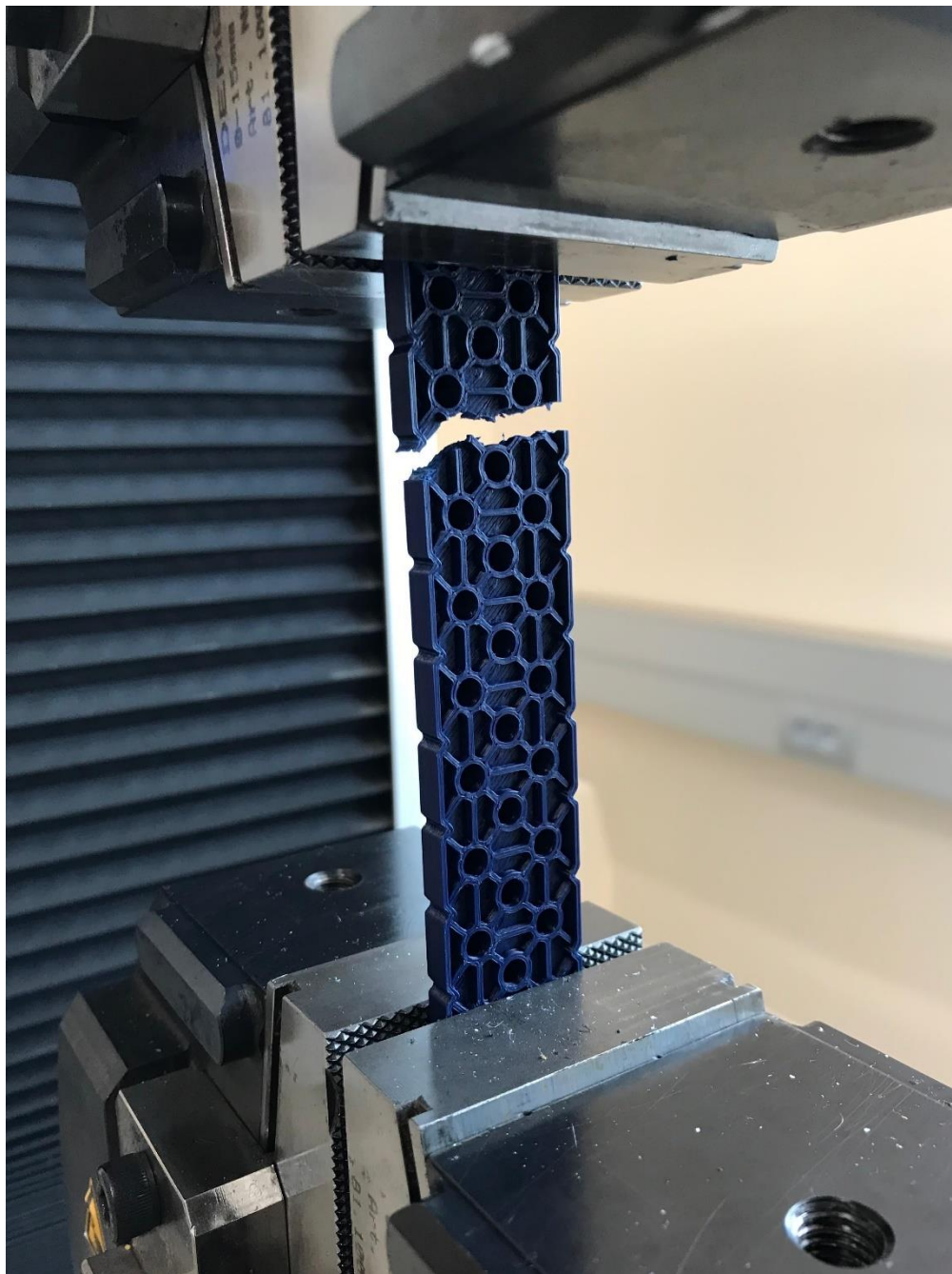
Tab. 1 Naměřené hodnoty ze statické zkoušky tahem – část 1

<i>Materiál PET-G2</i>		<i>Materiál ASA</i>		<i>Materiál ABS</i>	
<i>Označení výtisku</i>	<i>Zatěžující síla F_{max}</i>	<i>Označení výtisku</i>	<i>Zatěžující síla F_{max}</i>	<i>Označení výtisku</i>	<i>Zatěžující síla F_{max}</i>
PETG2_1	3568	ASA_1	2986	ABS_1	2674
PETG2_2	3513	ASA_2	3110	ABS_2	3020
PETG2_3	3458	ASA_3	2963	ABS_3	3032
PETG2_4	3609	ASA_4	2129	ABS_4	2946
<i>Aritmetický průměr</i>	3537	<i>Aritmetický průměr</i>	2797	<i>Aritmetický průměr</i>	2918

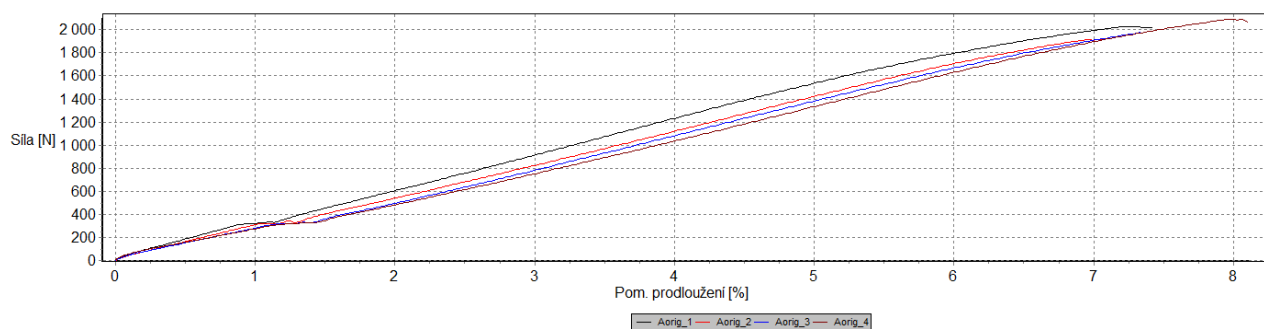
Tab. 2 Naměřené hodnoty ze statické zkoušky tahem – část 2



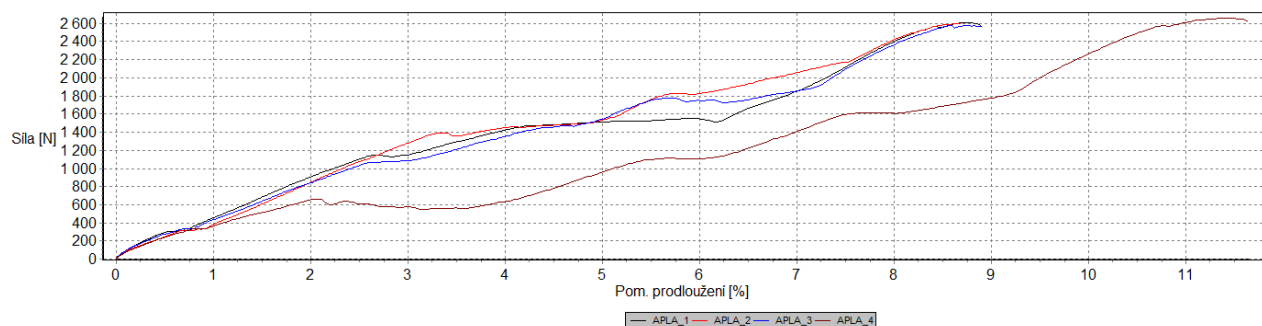
Obr. 8 Test statické zkoušky tahem – před zahájením testu



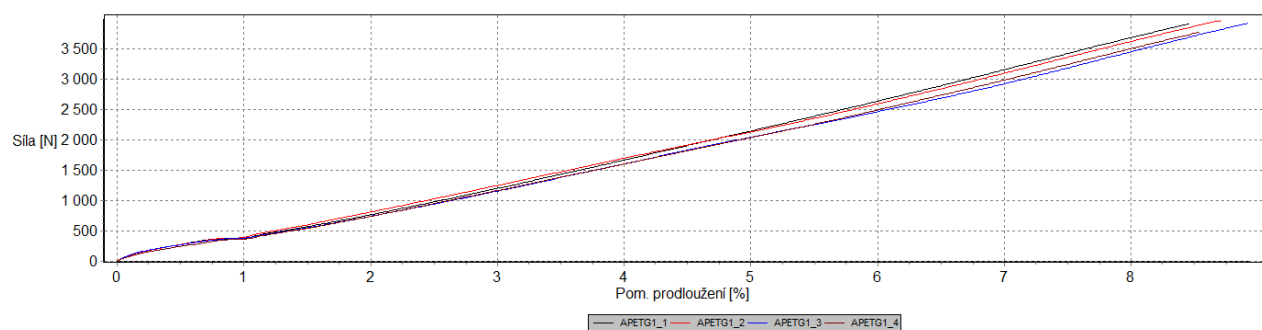
Obr. 9 Test statické zkoušky tahem – po skončení testu



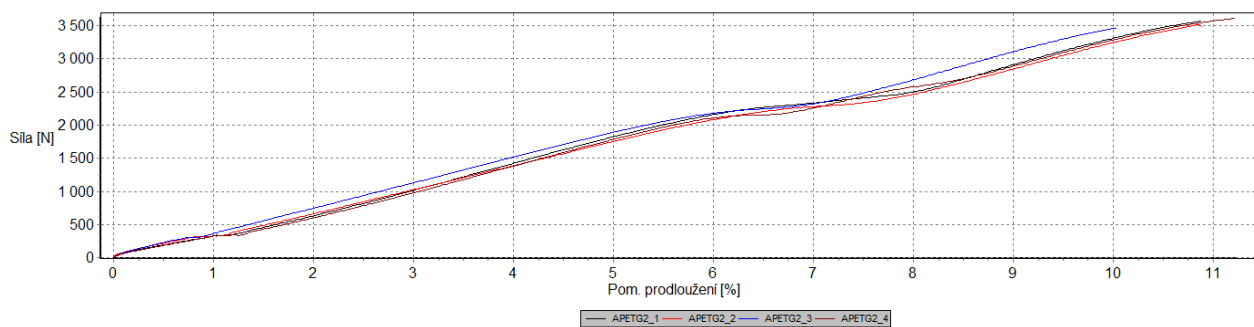
Graf. 1 Statická zkouška tahem – vícenásobné znázornění průběhů zatěžovacích sil – Originál



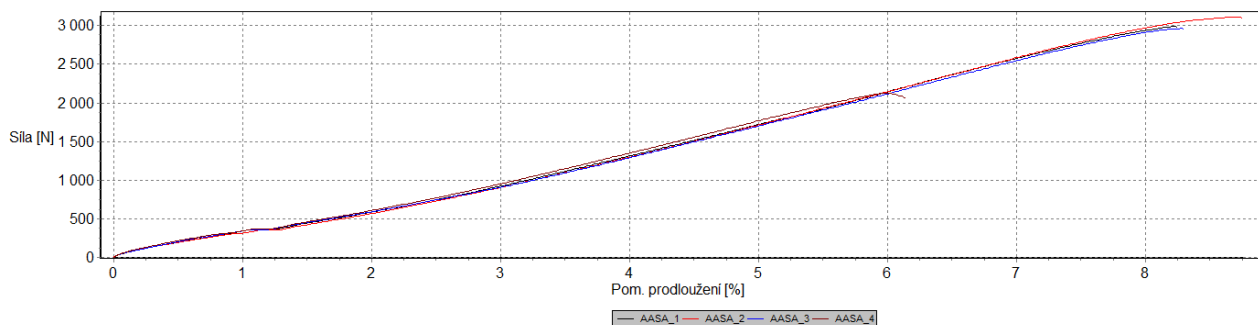
Graf. 2 Statická zkouška tahem – vícenásobné znázornění průběhů zatěžovacích sil – PLA



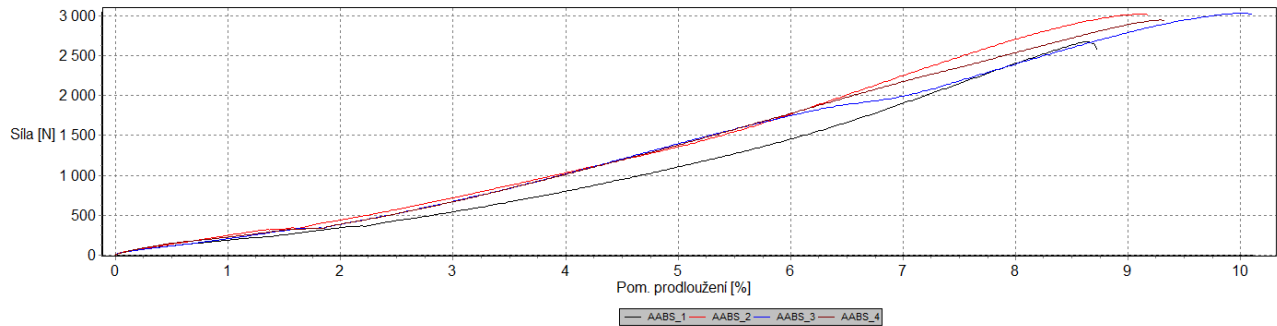
Graf. 3 Statická zkouška tahem – vícenásobné znázornění průběhů zatěžovacích sil – PET-G1



Graf. 4 Statická zkouška tahem – vícenásobné znázornění průběhů zatěžovacích sil – PET-G2



Graf. 5 Statická zkouška tahem – vícenásobné znázornění průběhů zatěžovacích sil – ASA



Graf. 6 Statická zkouška tahem – vícenásobné znázornění průběhů zatěžovacích sil – ABS

Zkouška tlakem

1) Podmínky měření:

- Datum měření: 14. 05. 2024
- Teplota 22,2 °C
- Tlak vzduchu: 997,7 hPa
- Vlhkost: 34,8 %

2) Cíl

Cílem testování je porovnat a vyhodnotit mechanické vlastnosti originálního dílu a dílů vytisknutých z materiálů PLA, 2 různých PET-G, ASA a ABS na 3D tiskárně Original Prusa MK4. Experimentální test bude proveden pomocí statické zkoušky tlakem. Předpokládá se, že dojde k průhybu až lomu jednotlivých dílů v místě tlaku případku. Sledujeme materiál, který vyjde ze zkoušky nejlépe, přičemž budou na daném materiálu následně probíhat další experimentální měření a testy v závislosti na konkrétním nastavení 3D tisku.

3) Popis a postup měření

- Příprava zkušebních výtisků – vizuální kontrola a odstranění případného stringování u PET-G, dále označení zkušebních výtisků dle tabulky níže.
- Nastavení trhačického stroje a softwarových parametrů (výběr stroje – Hegewald & Peschke inspect 100, výběr vhodných upínacích přípravků, rychlost tažení 10 mm/min, začínající zatížení F0 2 N).
- Upnutí zkušebního výtisku.
- Provedení testu – provedeny byly celkem 4 testy pro každou skupinu materiálů, vzhledem k tomu, že se výsledná síla výrazně neměnila a materiály vykazovaly podobné chování.
- Analýza výsledků – umístění lomů, maximální zatěžující síla do přerušení výtisků.

4) Zhodnocení měření

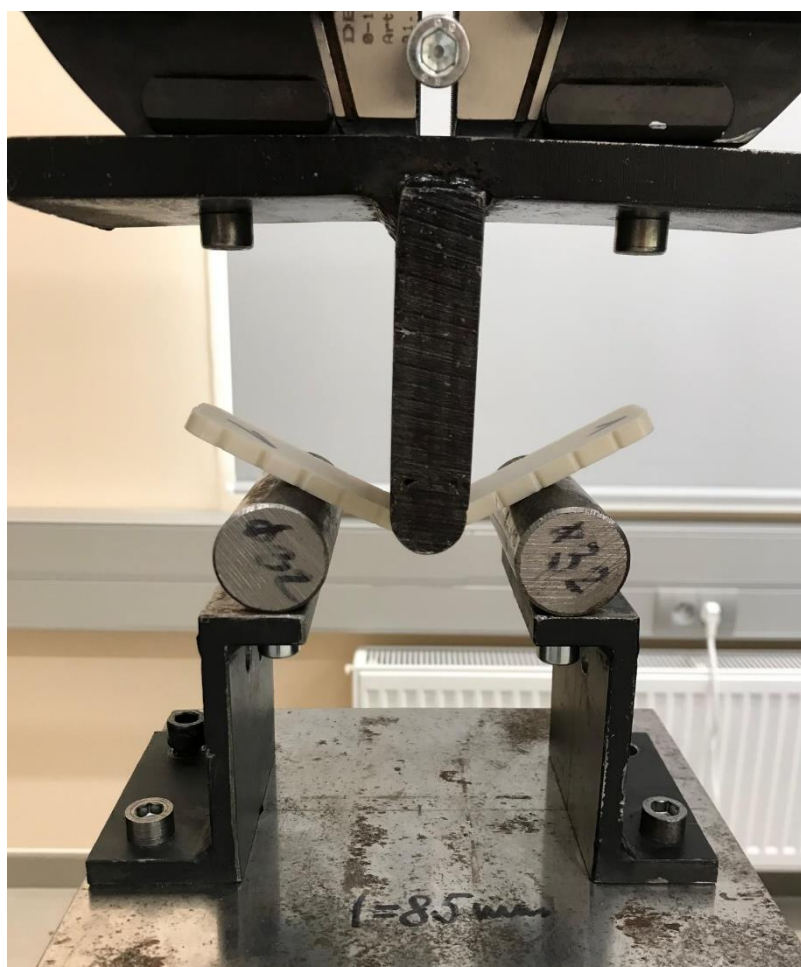
Z naměřených hodnot je patrné, že maximální hodnoty zatěžující síly jsou všech výtisků kromě výtisku z materiálu PLA vyšší než u originálních dílů. Materiál PLA v tomto ohledu nesplnil požadavek na průchod tímto testem. Vzhledem k tomuto zjištění nedoporučuji materiál PLA pro realizaci tisku jednotlivých dílů robotické stavebnice na 3D tiskárně. Z hlediska nejvyšší hodnoty vysází jednoznačně materiály PET-G od obou firem, přičemž materiál PET-G2 od firmy Prusa Research konkrétně Filament PETG PRUSA RESEARCH 1,75 mm 1000 g Jungle Green (zelený) vykazuje plynulejší průběh hodnot zatěžující síly a vzhledem k jeho kvalitě se jeví jako ideální volba. I přestože hodnoty pevnosti v tahu jsou zjištěny z výtisku provedeném z vlákna filamentu o průměru 1,75 mm, lze předpokládat, že jsou mechanické vlastnosti materiálu PET-G právě ty požadované pro realizaci na 3D tisku dílů robotické stavebnice v podmínkách základních a středních škol. Nebyl proveden výpočet směrodatné odchylky. Pro toto měření a vyhodnocení není zásadní. Bude proveden následně po realizaci dalších testů, abychom získali hodnoty k porovnání odpovídajícím způsobem.

<i>Originální díl VEX</i>		<i>Materiál PLA</i>		<i>Materiál PET-G1</i>	
<i>Označení výtisku</i>	<i>Zatěžující síla F_{max1}</i>	<i>Označení výtisku</i>	<i>Zatěžující síla F_{max1}</i>	<i>Označení výtisku</i>	<i>Zatěžující síla F_{max1}</i>
orig_1	146	PLA_1	180	PETG1_1	330
orig_2	144	PLA_2	168	PETG1_2	328
orig_3	125	PLA_3	182	PETG1_3	300
orig_4	134	PLA_4	192	PETG1_4	274
<i>Aritmetický průměr</i>	137,25	<i>Aritmetický průměr</i>	180,5	<i>Aritmetický průměr</i>	308

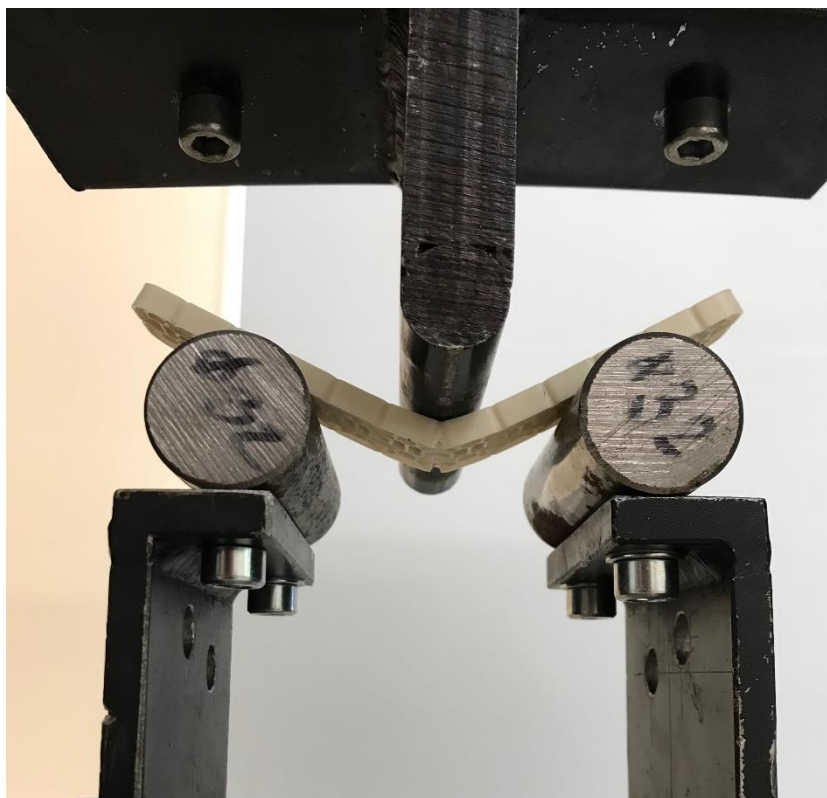
Tab. 3 Naměřené hodnoty ze statické zkoušky tlakem – část 1

<i>Materiál PET-G2</i>		<i>Materiál ASA</i>		<i>Materiál ABS</i>	
<i>Označení výtisku</i>	<i>Zatěžující síla F_{max1}</i>	<i>Označení výtisku</i>	<i>Zatěžující síla F_{max1}</i>	<i>Označení výtisku</i>	<i>Zatěžující síla F_{max1}</i>
PETG2_1	292	ASA_1	212	ABS_1	242
PETG2_2	282	ASA_2	222	ABS_2	240
PETG2_3	290	ASA_3	234	ABS_3	227
PETG2_4	290	ASA_4	226	ABS_4	233
<i>Aritmetický průměr</i>	288,5	<i>Aritmetický průměr</i>	223,5	<i>Aritmetický průměr</i>	235,5

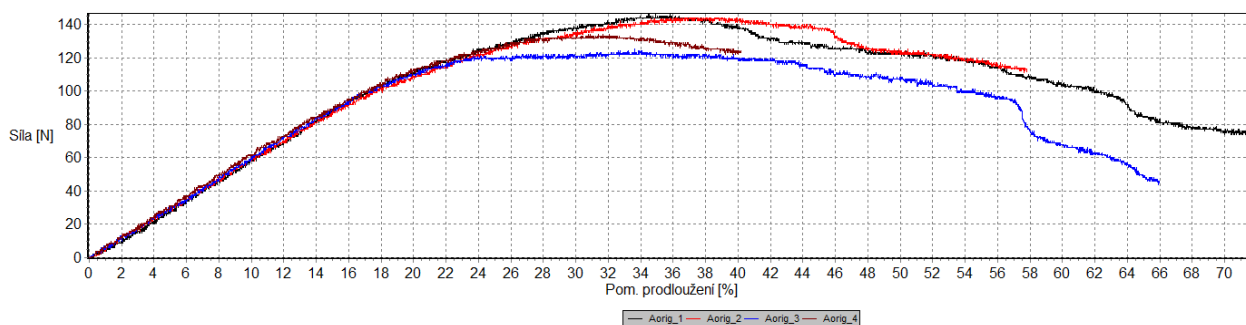
Tab. 4 Naměřené hodnoty ze statické zkoušky tlakem – část 2



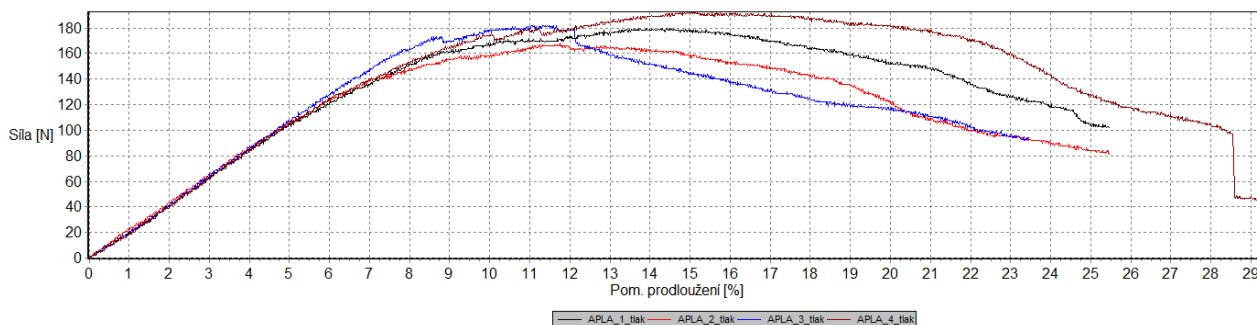
Obr. 10 Test statické zkoušky tlakem – před zahájením testu



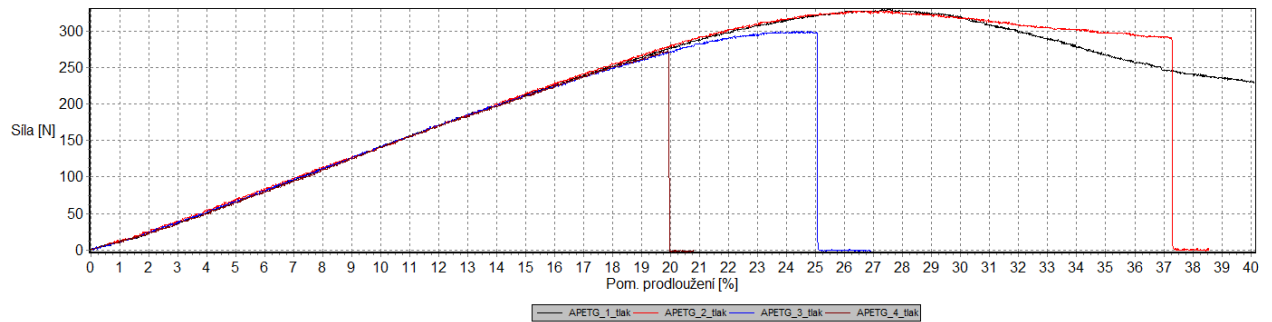
Obr. 11 Test statické zkoušky tlakem – po skončení testu



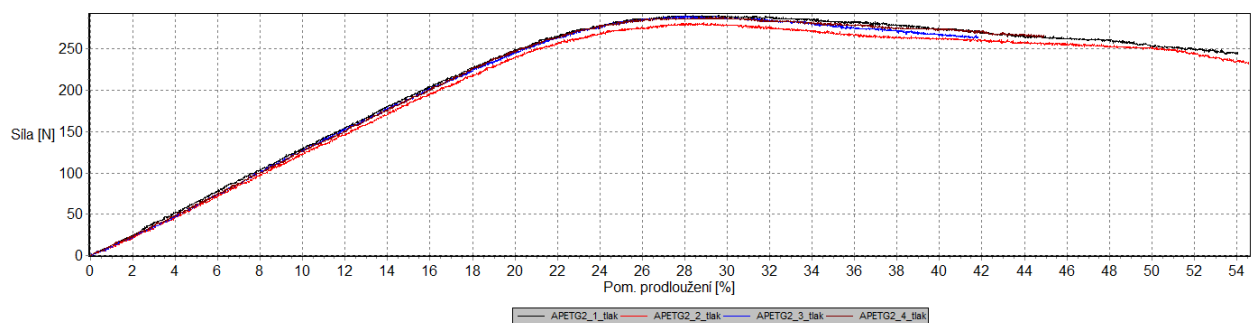
Graf. 7 Statická zkouška tlakem – vícenásobné znázornění průběhů zatěžovacích sil – Originál



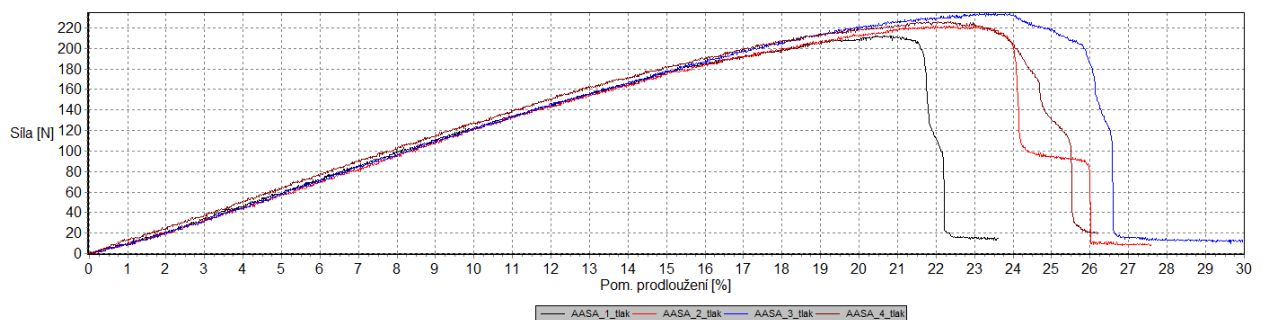
Graf. 8 Statická zkouška tlakem – vícenásobné znázornění průběhů zatěžovacích sil – PLA



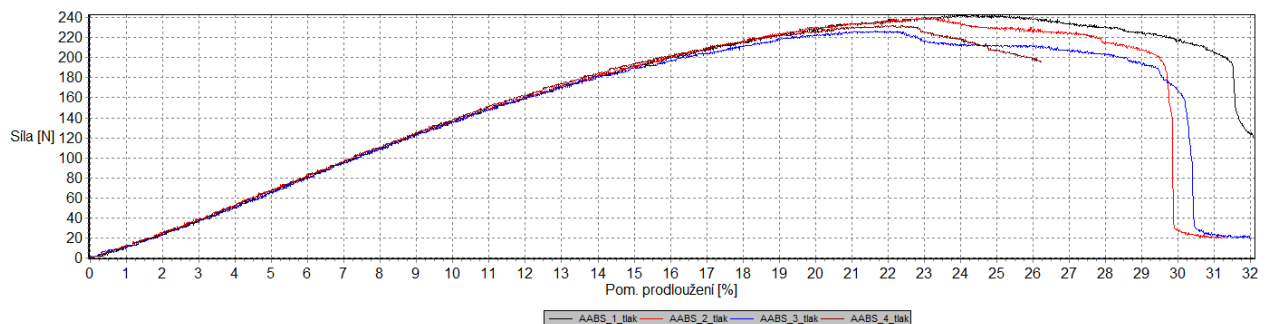
Graf. 9 Statická zkouška tlakem – vícenásobné znázornění průběhů zatěžovacích sil – PET-G1



Graf. 10 Statická zkouška tlakem – vícenásobné znázornění průběhů zatěžovacích sil – PET-G2



Graf. 11 Statická zkouška tlakem – vícenásobné znázornění průběhů zatěžovacích sil – ASA



Graf. 12 Statická zkouška tlakem – vícenásobné znázornění průběhů zatěžovacích sil – ABS

References

- [1] HORNE, R. a HAUSMAN, K. K. (2023). 3D Printing for dummies. 3. vyd. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc, 2023. 416 s. ISBN-13 978-1394169474.
- [2] BACH, M. (2018). Jak vyřešit nejčastější problémy při 3D tisku. Blog.prusa3D.cz. [online]. 2018. Dostupné z <https://josefprusa.cz/jak-vyresit-nejcastejsi-problemy-pri-3d-tisku/>.
- [3] FALES, A. (2023). Edukační robotika. Flashdisk pp. 169-172, X. mezinárodní konference „Experimentální a výpočtové metody v inženýrství 2023“, Ústí nad Labem 2023, ISBN 978-80-7561-411-7.
- [4] Autor neveden. (2024). materialpro3d, Materiálový slovník [online]. 2024. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/tpu/>
- [5] Autor neveden. (2024). Historie 3D tisku [online]. 2024. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/historie-3d-tisk/>

Pilotní testování mechanických vlastností tištěných obratlů

Patrik Balcar (ORCID ID: 0009-0007-4924-5681)¹, Petr Vachata (ORCID ID: 0000-0001-5956-436X)^{2,3}, Jan Lodin (ORCID 0000-0003-4137-1644)^{2,3}, Martin Svoboda (ORCID ID: 0000-0002-7344-1531)¹, Michal Lattner (ORCID ID: 0000-0002-3976-3940)¹, Antonín Svoboda (ORCID ID: 0000-0002-1749-5703)¹, Edita Pichlová³

¹ Fakulta strojního inženýrství, Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem. Pasteurova 3334/7, 400 01 Ústí nad Labem, Česká republika, patrik.balcar@ujep.cz, martin.svoboda@ujep.cz, michal.lattner@ujep.cz, svoban@email.cz

² Neurochirurgická klinika, Fakulta zdravotnických studií, Univerzita Jana Evangelisty Purkyně a Masarykova nemocnice, Krajská zdravotní a.s. v Ústí nad Labem, Sociální péče 3316/12A, 40113, Ústí nad Labem, Česká republika - petr.vachata@kzcr.eu, jan.lodin@kzcr.eu

³ Neurochirurgická klinika, Lékařská fakulta v Plzni, Karlova univerzita v Praze, alej Svobody 1655/76 323 00, Plzeň, Česká republika

⁴ Fakulta zdravotních studií, Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem. Sociální péče 3652/13, 400 11 Ústí nad Labem, Česká republika, edit.pichlova@gmail.com

V článku je popsán pilotní experiment mechanického zkoušení 3D tištěných obratlů s vloženým vrutem. Hlavním cílem této práce bylo ověření návrhu metodiky měření pro experimentální zjišťování mechanických vlastností obratlů vyrobených pomocí 3D tisku a rovněž i pro zjišťování únosnosti šroubu při jeho zavrtání do obratle. V práci je popsána konstrukce speciálního přípravku, pomocí kterého je možné upínat zkušební vzorky pro provedení tahové zkoušky. Pomocí trhacího stroje bylo provedeno vytrhnutí závrtných šroubů z reálného či tištěného obratle. Testování bylo provedeno na prasečích a 3D tištěných obratlích. K tvorbě tištěných obratlů byly využity CT snímky prasečích páteří, získané výpočtem tomografem. Pomocí této práce byly ověřeny mechanické vlastnosti tištěných i reálných obratlů. V návaznosti na tuto práci budou hledány vhodné tištěné materiály a potřebné parametry 3D tištěných vzorků tak, aby potřebnými mechanickými vlastnostmi odpovídaly a mohly nahradit lidské obratle. Poté bude možné provádět laboratorní šetření pro získání kvalitnějších výsledků při stabilizaci páteře. Provedenými experimenty byla ověřena metodika měření, byly porovnány naměřené hodnoty mezi reálnými a tištěnými obratli a rovněž byl i určen další směr výzkumu.

Keywords: obratel, tahová zkouška, šroub, mechanické vlastnosti, 3D tisk, stabilizace páteře

1 Úvod

Úrazy páteře a míchy jsou označovány pojmem spinální poranění. Většinou jsou součástí polytraumat, tzv. sdružených poranění. Tyto úrazy jsou velmi často spojeny s poraněními hlavy (až 74 %) a s poraněními hrudníku (až 62 %). Asi 5 % všech úrazů představují úrazy páteře. Při poranění páteře je 15 až 40 % případů spojeno i s poraněním míchy. Uvádí se, že 42 % případů zranění je v oblasti krční páteře, 30 % úrazů je v oblasti hrudní, 28 % připadá na bederní oblast. Poranění páteře mají charakteristiku poranění kostí, kloubů a vazů nebo meziobratlových plotének.

Poranění krční páteře zahrnuje:

- *frakturu obratlového těla;*
- *fraktury pediklů*
- *fraktury oblouku obratle*
- *frakturu laterálních a spinálních výběžků*
- *frakturu kloubních výběžků*
- *traumatický výběž meziobratlové ploténky;*
- *poranění vazů páteře s nebo bez dislokace obratlů*
- *poranění míchy bez známek poranění kostěných struktur (SCIWORA) [1]*

Podle Hrabálka (2011) nejčastějšími příčinami úrazů páteře uvádí:

- *dopravní nehody;*
- *pracovní úrazy způsobené například pády z výšky, zřávy, pády hornin;*
- *úrazy při sportování, které vznikají zejména při skocích do neznámé vody, vodním lyžování, volném lezení, závěsném létání, jezdectví, jízdě na horských kolech, sjezdovém lyžování, silničních závoděch apod.;*
- *pády;*
- *násilné trestné činy včetně tzv. syndromu týraného dítěte [2].*

Úrazy páteře se dále dělí na

- *přímé;*
- *nepřímé;*

U přímých úrazů (až 10 % případů) jde o zásahy přímo na páteř. Tyto úrazy nastávají nejčastěji při

- *kolizích chodce s vozidlem;*
- *dopadech na záda;*
- *napadení, kam patří zejména kopy útočnickem do zad oběti, údery tyčí do těla oběti, zřávy, střelná a bodná poranění;*

Nepřímé úrazy páteře se vyskytují nejčastěji (až 90 % případů). Úraz byl sice veden v jiné části těla, ale zatížení bylo přeneseno na páteř při hyperflexi, hypertenzi, nebo při zatížení přeneseném ve vertikální ose páteře. Jde například o úrazy při:

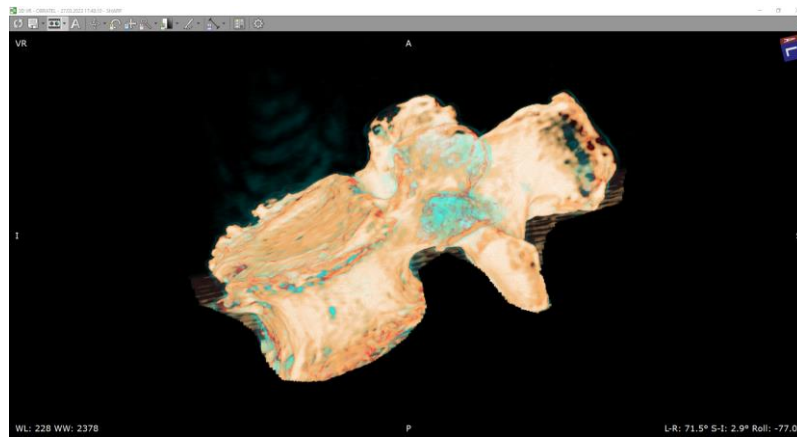
- *čelním nárazu při dopravních nehodách*
- *nárazech vozidla zezadu do chodce, cyklisty nebo do osoby sedící v zaparkovaném voze;*
- *několika násobném převrácení vozu ve vysoké rychlosti;*
- *dopadech (závodní automobily, cyklistika, lyžování);*

Osteosyntéza je operační léčba komplikovaných, často dislokovaných zlomenin, kdy konzervativní postup neumožňuje dosažení optimálního výsledku stran křivky páteře, uvolnění nervových struktur, nebo bezpečné a trvalé kostěné úzky. Je to chirurgická metoda spojování kostních struktur pomocí kovového materiálu. Tento materiál tvoří dlahy, šrouby nebo tyče, které se různě kombinují, aby se docílilo co možná nejlepší stability kosti. Kovový materiál fixuje páteř v optimální poloze jen do doby, kdy je úplně vytvořen kostní svalek, který následně funkci fixace trvale přebírá. U některých komplikovaných zlomenin je to rok, u méně komplikovaných zlomenin 3 až 6 měsíců. V některých případech může být fixační materiál operativně odstraněn. Současná kvalita operativních zákroků je již na vysoké úrovni. Problematika zkušebního zvyšování kvality a hledání různých možností spojování obratlů páteře má svá omezení, jelikož je nelze testovat na živých lidech. Použití kadaverózních modelů je taktéž limitováno. Jednou z možností se nabízí využití 3D tisku obratlů páteře a testování jejich spojování v laboratorních podmínkách. Nejprve však bude potřebné nalézt vhodný materiál a parametry 3D tisku a rovněž i vhodné validovaný postup pro převod CT snímků páteře pro tvorbu validovaných modelů obratlů, které budou využity pro 3D tisk.

Při tvorbě metodiky této práce byly využity výsledky řady vědeckých prací, ve kterých se autoři zabývali problematikou poranění páteře (Žuravský a kol., 2024, Fanta a kol., 2022, Ježdík a kol., 2021, Lopot a kol., 2019, Bittner a kol., 2018, Vondrášek a kol. 2018).

2 Metodika měření

V této části práce bude popsána navržená metodika pro testování únosnosti šroubů v tištěných či reálných obrazech. Prvotně byla provedena tvorba 3D modelu a jeho tisk. Převod CT snímků do 3D modelů je proces, který zahrnuje několik kroků, zahrnujících získání dat, jejich zpracování a následné vytvoření 3D modelu. Tento proces lze shrnout do několika oblastí. Prvním krokem bylo získání detailních snímků pomocí počítačové tomografie (CT). Skener pořizuje řadu rentgenových snímků z různých úhlů a kombinuje je, čímž vytváří detailní obraz vnitřních struktur těla, v našem případě obratlů. Po získání CT snímků bylo nutné provést segmentaci, což znamená oddělení zájmové oblasti např. kosti, orgány, nádory od okolních tkání. Tento krok byl prováděn pomocí specializovaného softwaru, který umožňoval manuální nebo automatizované označení různých tkání. V této práci byl využit licencovaný software Radiant (Obr. 1).



Obr. 1 Licencovaný software Radiant – tvorba modelu obratle

Segmentované obrazy byly poté zpracovány a přeměněny na sadu vrstev. Tyto vrstvy byly kombinovány do trojrozměrné datové struktury, obvykle ve formátu DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine). Z trojrozměrné datové struktury byl vytvořen povrchový model. Tento model byl generován pomocí algoritmů pro rekonstrukci povrchu, jako je Marching Cubes nebo podobné metody, které přeměňovaly segmentované vrstvy na polygonální síť.

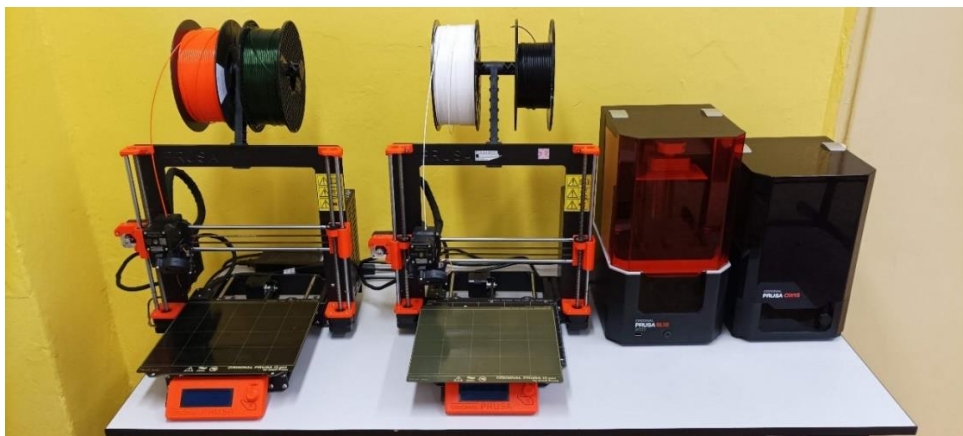
Výsledný 3D model bylo často nutné dále upravit a optimalizovat. To zahrnovalo vyhlazování povrchu, odstranění artefaktů a případnou redukci počtu polygonů pro zjednodušení modelu bez ztráty detailů.

Konečný 3D model byl exportován do formátu, který byl kompatibilní s 3D tiskárnami nebo jinými zařízeními pro další zpracování. Běžné formáty zahrnují STL, OBJ nebo PLY.

V závěrečné fázi může být 3D model použit pro 3D tisk, kde byl model fyzicky vyroben vrstvu po vrstvě, nebo pro digitální vizualizaci, což může být užitečné pro lékařské plánování, výuku nebo výzkum.

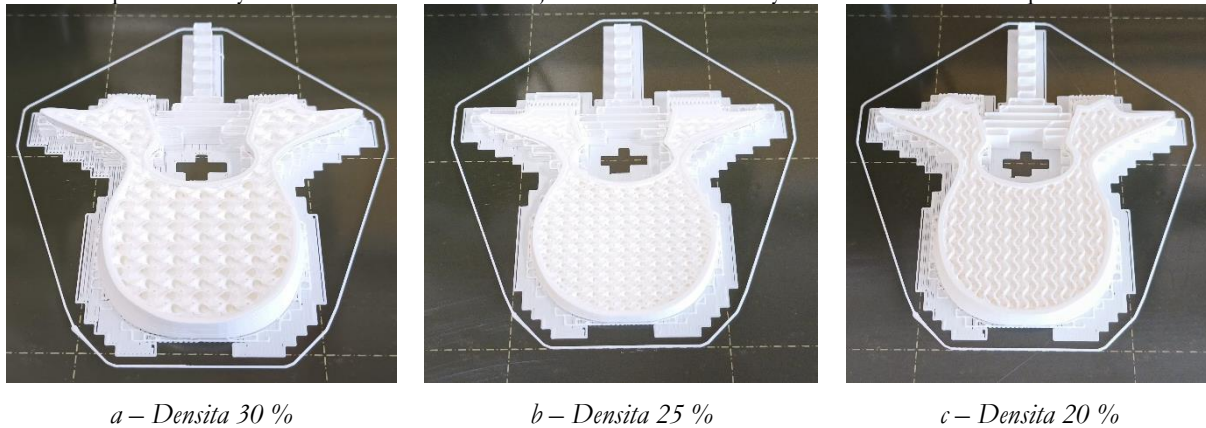
Díky tomuto procesu bylo možné získat přesné trojrozměrné modely anatomických struktur, obratlů člověka, které byly dále využity pro simulaci skutečných kostních struktur a po vytištění pro mechanické zkoušky.

3D tiskárny fungují na principu postupného přidávání materiálu, známého jako aditivní výroba, kde se objekt vytváří vrstvu po vrstvě (Obr. 2). Nejpoužívanější technologie je Fused Deposition Modeling (FDM), která spočívá v tavení plastového vlákna, filamentu, a jeho nanášení tryskou na podložku, kde postupně tuhne a formuje požadovaný tvar. Alternativní technologie zahrnují stereolitografii (SLA), která využívá fotopolymerní pryskyřici tvrdnoucí pod UV světlem (Obr. 3), a selektivní laserové slintování (SLS), kde laser sintruje práškový materiál, často kov nebo nylon, do pevné struktury. Mezi běžně používané tiskové materiály patří termoplasty jako PLA (polylaktid), ABS (akrylonitrilbutadienstyren) a PETG (polyethylentereftalát glykol), ale také kompozitní materiály obsahující dřevo, uhlíková vlákna či kovové částice, které poskytují speciální vlastnosti. Pryskyřice pro SLA tisk se liší v pevnosti, pružnosti a barevných možnostech, zatímco práškové materiály pro SLS mohou obsahovat sklo, keramiku nebo speciální slitinové kovy. Díky této rozmanitosti materiálů a technologií je 3D tisk využíván v mnoha odvětvích, od prototypování v průmyslu přes výrobu složitých lékařských implantátů až po kreativní umělecké projekty.



Obr. 2 Tiskárny použité pro tisk modelů 3D obratle, zleva 2x Original Prusa i3 MK3S+, Original Prusa SL1S SPEED, Mycí a vytvrzovací stanice (CW1S)

Densita při 3D tisku označuje hustotu materiálu v tištěném objektu a výrazně ovlivňuje jeho mechanické vlastnosti, hmotnost a spotřebu materiálu. Densita je často vyjádřena jako procentuální hodnota, která určuje, jaký podíl vnitřního objemu je vyplněn materiálem oproti dutinám Tab. 1. Při nastavení vyšší density je objekt pevnější a odolnější, protože má méně vnitřních dutin a větší objem materiálu, což je ideální pro funkční součástky nebo mechanicky namáhané díly (Obr. 3 a, b, c). Naopak nižší densita s větším podílem vnitřních prázdných prostorů snižuje hmotnost a šetří materiál, což je vhodné pro prototypování nebo dekorativní předměty. Optimální densita závisí na požadavcích aplikace – například díly určené pro strukturální použití mohou vyžadovat densitu 100 %, zatímco modely pro prezentaci mohou mít densitu okolo 10-20 %. Výběr správné density je tedy klíčový pro dosažení požadovaných vlastností tištěného objektu a efektivního využití materiálu a času při 3D tisku.



Obr. 3 Ukázky modelů obratlů s různou densitou plnění

Do obratlů byly zavrtány šrouby, které se běžně využívají při operacích typu PLIF (Posterior Lumbar Interbody Fusion) či TLIF (Transforaminal Lumbar Interbody Fusion). Ukázka rentgenového snímku se šrouby je uvedena na vidět na Obr. 4. Pro potřeby vytržení šroubu ve svislé ose byl zkonstruován speciální přípravek, který zajistil uchycení obratlů v požadovaném směru. Reálné či tištěné obratle byly do přípravku poté upnuty. Přípravek umožňoval snadné vkládání jednotlivých obratlů. Díky výměnným nosným čepům bylo umožněno vkládat vzorky odlišných rozměrů, vždy bylo i zajištěno, že tahová zkouška (vytržení šroubu) probíhala bez výrazné odchylky od svislé osy – kontrolováno pomocí vodováhy. Na Obr. 5 je vidět model obratle se zavrtaným šroubem v přípravku umístěném v trhacím stroji.



Fig. 4 Boční snímek RTG bederní páteře se stabilizací segmentu L4/5 TLIF technikou

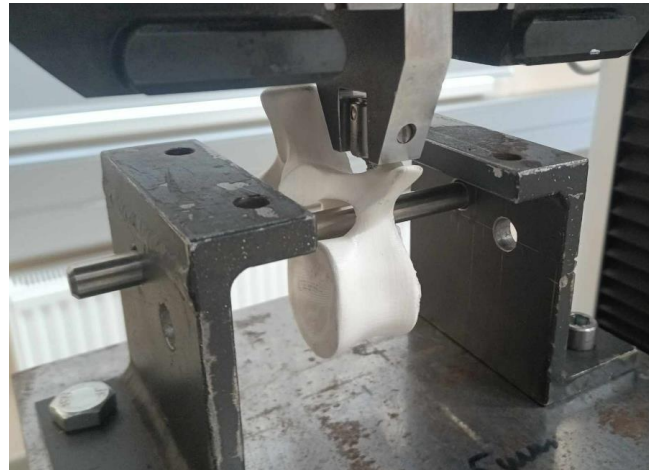


Fig. 5 3D model tištěného obratle se šroubem v přípravku trhacího stroje

Mechanické zkoušení obratlů bylo provedeno experimentálně na univerzální zkušební stroji Hegewald & Peschke, Inspekt 100 kN (Obr. 6). Zkušební stroj je schopen vyvinout maximální sílu v tahu i tlaku 100 kN.



Fig. 6 Trhací stroj Hegewald & Peschke

Zjišťované hodnoty byly:

- *maximální síla únosnosti šroubu – F_{max} [N]*
- *mez pevnosti obratle – R_m [MPa]*
- *procentuální shoda únosnosti šroubu při jeho vytržení u shodných obratlů [%]*

Označení vzorků bylo provedeno ve formátu s označením, zda se jedná o obratel skutečný či tištěný. U tištěných obratlů byly při označení uvedeny i parametry provedeního tisku.

- PR – reálný obratel prase domácí
- DR – reálný obratel prase divoké
- PT – tištěný obratel prase domácí
- DT – tištěný obratel divočák divoké

příklad označení: **PT1_PR1_SLA_30_8_0.2_1.6**

vysvětlení:

PT1_PR1 – tištěný obratel odpovídá tvarem obratli z prasete domácího s označením 1 (např. obratel Th5)

SLA – druh materiálu pro tisk

30 – 30 % výplně tisku

8 - bylo provedeno 8 vrstev

0.2 - mezera mezi jednotlivými vrstvami [mm]

1.6 - tloušťka stěny [mm]

Varianty použitých vzorků pro mechanické testování jsou přehledně zobrazeny v Tab. 1

Tab. 1 Varianty měřených vzorků – obratlů

Označení vzorku	Popis
PR1	reálný obratel prasete domácího
PR2	reálný obratel prasete domácího
PR3	reálný obratel prasete domácího
DR1	reálný obratel prasete divokého
DR2	reálný obratel prasete divokého
DR3	reálný obratel prasete divokého
PT1-PR1_SLA_20_8_0.2_1.6	tištěný obratel prasete domácího – výplň 20 %
PT2-PR1_SLA_25_8_0.2_1.6	tištěný obratel prasete domácího – výplň 25 %
PT3-PR1_SLA_30_8_0.2_1.6	tištěný obratel prasete domácího – výplň 30 %
PT4-PR1_SLA_35_8_0.2_1.6	tištěný obratel prasete domácího – výplň 35 %
PT5-PR1_SLA_40_8_0.2_1.6	tištěný obratel prasete domácího – výplň 40 %
DT1-PR1_SLA_20_8_0.2_1.6	tištěný obratel prasete divokého – výplň 20 %
DT2-PR1_SLA_25_8_0.2_1.6	tištěný obratel prasete divokého – výplň 25 %
DT3-PR1_SLA_30_8_0.2_1.6	tištěný obratel prasete divokého – výplň 30 %
DT4-PR1_SLA_35_8_0.2_1.6	tištěný obratel prasete divokého – výplň 35 %
DT5-PR1_SLA_40_8_0.2_1.6	tištěný obratel prasete divokého – výplň 40 %

3 Výsledky měření

Po provedeném měření na trhacím byly zjištěny hodnoty síly vytržení šroubu F_{max} [N] a meze pevnosti materiálu obratle R_m . Díky naměřeným hodnotám byla ověřena vhodnost využití navrženého speciálního přípravku pro upnutí obratlů v trhacím stroji. Byla zjištěna i přiblížení se hodnotám měřených veličin na reálných obratlích prasete domácího a divokého, které nebyly před zavrtáním šroubů nijak tepelně ani chemicky upraveny. Provedenými výsledky měření byla rovněž ověřována navržená metodika měření pro možnosti provádění dalších měření.

Tab. 2 Naměřené výsledky – tahová pilotní zkouška

Označení vzorku	F_{max} [N]	R_m [MPa]
PR1	2100	42
PR2	2972	59
PR3	2669	53
DR1	1644	33
DR2	1300	26
PT1-PR1_SLA_20_8_0.2_1.6	1989	125
PT2-PR1_SLA_25_8_0.2_1.6	1957	123
PT3-PR1_SLA_30_8_0.2_1.6	2334	147
PT4-PR1_SLA_35_8_0.2_1.6	2878	181
PT5-PR1_SLA_40_8_0.2_1.6	3042	191
DT1-DR1_SLA_20_8_0.2_1.6	1088	68
DT2-DR1_SLA_25_8_0.2_1.6	1391	87
DT3-DR1_SLA_30_8_0.2_1.6	1658	104
DT4-DR1_SLA_35_8_0.2_1.6	1976	124
DT5-DR1_SLA_40_8_0.2_1.6	1923	121

Tab. 3 Shoda naměřených hodnot – prase domácí – ukázka zpracování výsledků

Označení vzorku	F_{max} [N]	R_m [MPa]	rozdíl F_{max} [%]
PR1	2100	42	5,3
PT1-PR1	1989	125	
PR2	2972	59	18,7
PT2-PR2	3530	70	
PR3	2669	53	7,8
PT4-PR1	2878	181	

Na Obr. 4-6 jsou vidět vybrané grafické ukázky naměřených výsledků z tahové zkoušky.

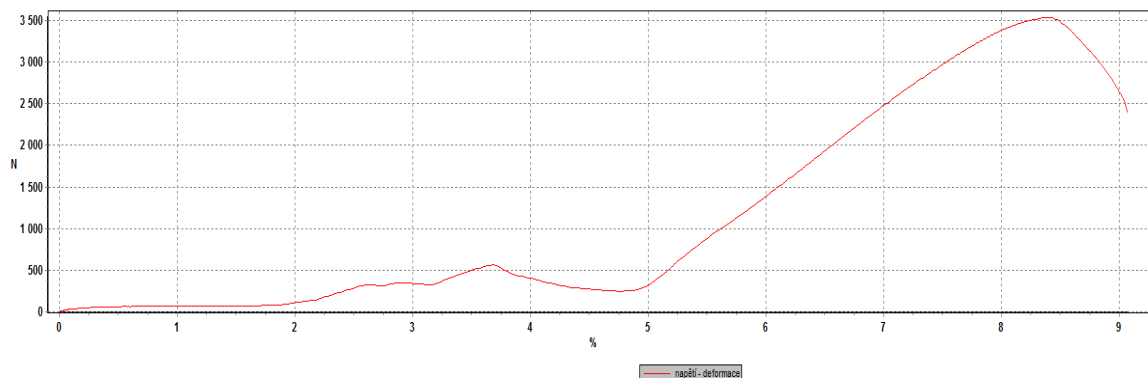


Fig. 4 Graf výsledků tahové zkoušky - vzorek PT2-PR2

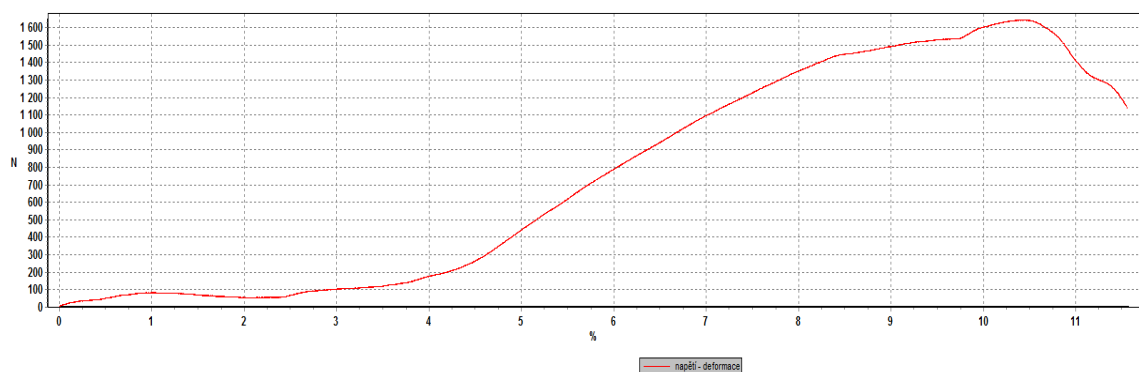


Fig. 5 Graf výsledků tahové zkoušky - vzorek DR1

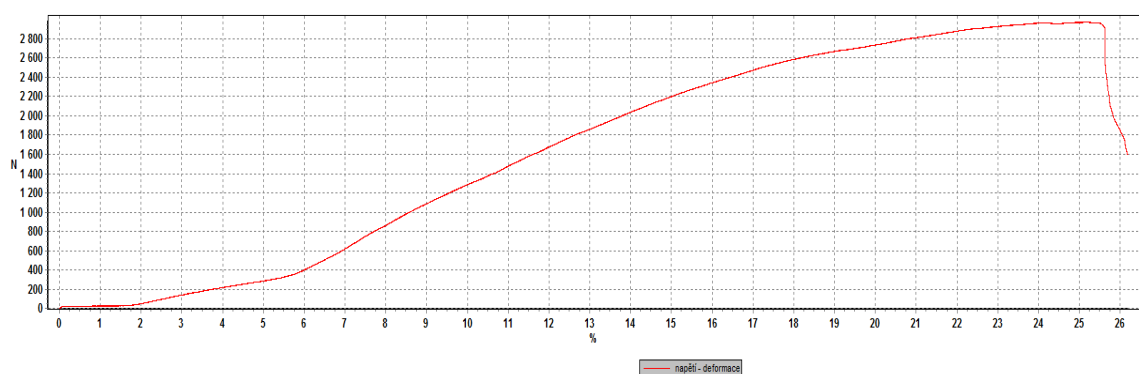


Fig. 6 Graf výsledků tahové zkoušky - vzorek PR2

4 Conclusion

Touto prací byla ověřena metodika měření, která bude využita při hledání vhodného tiskového materiálu a parametrů 3D tisku pro nalezení shodných vlastností mezi lidským obratlem nijak tepelně ani chemicky upraveným ve smyslu demineralizace a vytvořeným obratlem pomocí využití 3D tisku.

Díky získaným výsledkům bylo prokázáno, že vybraná měřicí soustava a nově navržený upínací přípravek splňují naše předpoklady. Je tedy možné tuto měřicí soustavu využívat k hledání vhodných tištěných materiálů a potřebných vlastností tisku tak, abychom našly takové, které budou co nejbližně přiblíženy skutečným obratlům člověka.

V další etapě tohoto výzkumu bude provedeno souhrnné měření, které bude zahrnovat větší počty měřených vzorků s různými variantami tištěných materiálů a vlastností tisku. Důvodem bude hledání cesty k dosažení vhodného materiálu a vlastností tisku tak, abychom mohli vyloučit statistickou nejistotu.

Poté bude možné začít zkoumat různé postupy ke zlepšování provádění stabilizací páteře člověka a jeho návratu po provedeném chirurgickém zákroku k lepší kvalitě života a pohybu.

Acknowledgement

Práce byla finančně podpořena interním grantem Krajské zdravotní a.s. IGA IG10 - 217111046

References

- [1] Dostupné na: [cit. 19. 2. 2021]
https://www.med.muni.cz/Traumatologie/Ortopedie_B/Ortopedie_2/Ortopedie_2.htm
- [2] HRABÁLEK, L.: Poranění páteře a míchy - 1. vydání, učební text, 2011, 28 stran, ISBN 978-80-244-2842-0
- [3] ŽURAVSKÝ I., NOVAK M., VACHATA P., SAMEŠ M., CHALUPA M., ŠVÁSTA A. SVOBODA M., BALCAR, P.: *Measurement of the dynamic load of the cervical vertebrae of the human spine – pilot experiment.* In: Manufacturing Technology, Vol. 24, No 1 (2024), ISSN: 1213-2489 DOI: 10.21062/mft.2024.006
- [4] FANTA O., LOPOT F., KUBOVÝ P., JELEN K., HYLMAROVÁ D., SVOBODA M. *Kinematic Analysis and Head Injury Criterion in a Pedestrian Collision with a Tram at the Speed of 10 and 20 km.h⁻¹.* Manufacturing Technology. 2022;22(2):139-145. doi: 10.21062/mft.2022.024.
- [5] JEŽDÍK, R., KONOPNÍK, P., RUND, M., SVOBODA, M, JELEN, K.: *Determination of material properties of laminates of 15T and T3 tram faces.* In: Manufacturing Technology, Vol. 21, No. 4 (2021) pp. 912-916, ISSN: 1213-2489 DOI: 10.21062/mft.2021.040
- [6] LOPOT, F., KUBOVY, P., JELEN, K., ŠORFOVÁ, M., TLAPÁKOVÁ, E., RULC, V., RULC, V., PURŠ, H., JEŽDÍK, R., SVOBODA, M.: *Collision between a Pedestrian and Tram - Pilot Experiment.* In: Manufacturing Technology, Vol. 19, No. 5 (2019) pp. 998-1002, ISSN: 1213-2489, DOI: 10.21062/ujep/408.2019/a/1213-2489/MT/19/6/998
- [7] BITTNER, V., ŠTRYNCL, R., JELEN, K., SVOBODA, M.: *Mathematical model of the RRR anthropomorphic mechanism for 2D biomechanical analysis of a deep squat and related forms of movement,* In: Manufacturing Technology, Vol. 18, No. 5 (2018) pp 704-708, ISSN: 1213-2489
- [8] VONDRÁŠEK, D., HADRABA, D., MATĚJKA, R., LOPOT, F., SVOBODA, M., JELEN, K.: *Uniaxial tensile testing device for measuring mechanical properties of biological tissue with stress-relaxation test under a confocal microscope,* In: Manufacturing Technology, Vol. 18, No. 5 (2018) pp 866-872, ISSN: 1213-2489

Posouzení ekonomického dopadu FV potenciálu na průmyslových objektech v městských oblastech pomocí open source nástrojů slunečního záření

Pavel Houška¹, Vladislav Sítář², Klára Caisová², Daniela Vysloužilová²

¹Fakulta sociálně ekonomická, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 400 01 Ústí nad Labem. Česká republika. E-mail: pavel.houska@ujep.cz

²Fakulta strojního inženýrství, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 400 01 Ústí nad Labem. Česká republika. E-mail: vladislav.sitar@ujep.cz, klara.caisova@ujep.cz, daniela.vyslouzilova@ujep.cz

Tato studie představuje posouzení ekonomického dopadu fotovoltaického (FV) potenciálu na výrobních halách v městských oblastech pomocí open source nástrojů slunečního záření geografického informačního systému (GIS). Použité nástroje pro odhad slunečního záření jsou PVGIS a zvolenými nástroji pro ekonomické ukazatele byly vnitřní výnosové procento (IRR) a čistá současná hodnota (NPV). Zvolená metodika byla implementována na městské oblasti – Hodonín, Pardubice, Chomutov, Olomouc, Klatovy a Cheb. Jednotlivá území se vyznačují odlišnou funkčností, morfologií a potenciálem pro výstavbu FV. Tento potenciál vykazuje ekonomické, prostorové a časové variace způsobené lokálními a globálními faktory. Tato studie také ukázala možný budoucí ekonomický a energetický potenciál městských oblastí s hustou průmyslovou zástavbou.

Klíčová slova: fotovoltaika (FV), vnitřní výnosové procento (IRR), čistá současná hodnota (NPV), open-source, geografický informační systém (GIS)

1 Úvod

Rostoucí potřeba energetické efektivity a udržitelného rozvoje městských oblastí vede k narůstajícímu zájmu o využívání obnovitelných zdrojů energie, zejména fotovoltaických (FV) systémů. Více než 80 % obyvatel nejrozvinutějších zemí žije v městském prostředí, kde se spotřebovává značné množství energie a produkuje velká část skleníkových plynů [1]. Výzkum ukazuje, že teoreticky by spotřeba elektřiny v mnoha zemích mohla být zcela pokryta využitím slunečního záření z relativně malého území [2]. V tomto kontextu je instalace FV systémů na střechy výrobních hal v městských oblastech nejen možností, ale nutností pro zajištění udržitelného rozvoje.

Jedním z klíčových problémů, které ovlivňují širší využití sluneční energie, jsou silné prostorové a časové variace vzorců slunečního záření, které jsou ovlivněny mnoha faktory [3]. Základní vzorce sezónních a denních změn dané astronomickými faktory jsou silně modifikovány měnícími se atmosférickými podmínkami, jako jsou oblačnost, aerosoly, vodní pára a ozón [4]. V místním měřítku jsou vzory dále modifikovány místními podmínkami, jako jsou viditelnost, teploty a další [4].

Současné globální a regionální databáze a služby solárních zdrojů poskytují pouze přibližné odhady založené na průměrných hodnotách. I když tyto data nabízejí přibližné hodnoty dostupné sluneční energie, odhady v lokálním měřítku se mohou výrazně lišit od obecných trendů [5]. Posouzení zdrojů solární energie v městských oblastech na místní úrovni proto vyžaduje kombinaci obecných a regionálních databází solárních zdrojů a analýzy místních podmínek [6]. Geografické informační systémy (GIS) představují důležitý nástroj pro komplexní zpracování prostorových informací, které umožňují efektivní hodnocení solárních zdrojů [7].

Ekonomické zhodnocení FV potenciálu na výrobních halách v městských oblastech je důležité pro rozhodovací procesy a plánování investic. Pro tento účel byly použity open source nástroje pro analýzu slunečního záření, jako je PVGIS, a ekonomické ukazatele, jako jsou vnitřní výnosové procento (IRR) a čistá současná hodnota (NPV) [8]. Tato metodika byla aplikována na několik městských oblastí v České republice, konkrétně Hodonín, Pardubice, Chomutov, Olomouc, Klatovy a Cheb. Každé z těchto území se vyznačuje odlišnou funkčností, morfologií a potenciálem pro výstavbu FV [8].

Výsledky ukazují, že potenciál FV systémů vykazuje ekonomické, prostorové a časové variace způsobené lokálními a globálními faktory. Tyto variace mají vliv na celkové ekonomické zhodnocení investic do FV systémů na střechách výrobních hal. Dále tato studie demonstruje možný budoucí ekonomický a energetický potenciál městských oblastí s hustou průmyslovou zástavbou [9]. Zohledněním těchto faktorů může být dosaženo optimálního využití FV systémů, což přispěje k snížení spotřeby energie z tradičních zdrojů a ke snížení emisí CO₂, čímž se podpoří cíl udržitelného rozvoje městských oblastí [10].

2 Metodika

- Metodika pro ekonomické a energetické hodnocení FV v městských oblastech se skládá z následujících kroků:
- Sběr dat a analýza modelového slunečního záření: Tato část zahrnuje sběr dat o slunečním záření pomocí databáze PVGIS. Analyzovány jsou prostorové a časové změny slunečního záření včetně vlivů atmosférických podmínek (oblačnost, aerosoly, vodní pára, ozón) a místních podmínek (viditelnost, teploty).

- Ekonomická analýza nákladů na výstavbu FV ve vybraných lokalitách: V tomto kroku jsou analyzovány náklady na výstavbu FV systémů v jednotlivých městských oblastech. To zahrnuje odhad nákladů na instalaci, údržbu a provoz FV systémů, stejně jako náklady spojené s infrastrukturními požadavky
- Vyhodnocení ekonomických ukazatelů v kontextu výsledků z databáze PVGIS: Tato část zahrnuje vyhodnocení ekonomických ukazatelů, jako jsou vnitřní výnosové procento (IRR) a čistá současná hodnota (NPV), na základě výsledků analýzy slunečního záření a nákladů na výstavbu. Ekonomické ukazatele jsou vyhodnocovány v kontextu potenciální produkce elektrické energie a výnosů z prodeje elektrické energie.

2.1 Lokální posouzení FV potenciálu

V poslední době byl hojně využíván Fotovoltaický geografický informační systém (PVGIS), který zahrnuje prostorovou databázi a nástroj pro odhad FV [2, 10]. Webová utilita pro odhady [11] poskytuje na místě posouzení potenciální výroby elektřiny z fotovoltaiky pro Evropu a Afriku.

Hodnocení ročního fotovoltaického potenciálu PVGIS je založeno na předpokladu 1 kWp systému připojeného k síti instalovaného v rámci stávající infrastruktury budovy. Celkový roční výstup elektřiny z FV systému, E_{out} [kWh], se hodnotí pomocí následující rovnice (1):

$$\frac{dE_{out}}{dt} = A_c \eta(t) \int_0^{365} E(t) dt \quad (1)$$

kde:

$\eta(t)$ je koeficient účinnosti přeměny energie (výkon ze systému/příkon ze Slunce), který závisí na různých faktorech měnících se v čase

A_c je plocha povrchu solárních článků systému [m^2]

$E(t)$ je sluneční záření [$W \cdot m^{-2}$]

t je čas

Sluneční ozáření integrované v průběhu roku s denním světlem dává roční sluneční ozáření G [$Wh \cdot m^{-2}$] a koeficient účinnosti přeměny energie lze nahradit středním ročním koeficientem účinnosti přeměny energie η_e (2):

$$E_{out} = A_c \eta_e G \quad (2)$$

V této studijní oblasti je předpokládán průměrný roční účinnosti přeměny energie η_e pro krystalický křemík je 0,15 (výchozí hodnota navržená obslužným programem PVGIS pro tuto zeměpisnou polohu) [12]. Pro účely této práce bylo předpokládáno, že instalace 1 kWp FV systému s polem solárních modulů vyžaduje cca 100 m^2 volné střešní plochy [2]. Tato hodnota také představuje kritérium pro minimální volnou plochu střechy potřebnou k tomu, aby byla budova zahrnuta do hodnocení.

Utility PVGIS vypočítává roční a měsíční hodnoty FV potenciálu pro vybranou lokalitu s parametry reprezentujícími hodnocenou střechu budovy. Parametry zahrnují geografickou polohu, sklon střechy a orientaci. Celková hodnota FV potenciálu pro budovu se vypočítá pomocí jednotkové hodnoty FV potenciálu a plochy střechy dostupné pro FV systém [1].

Výpočet PVGIS potenciálu FV pro konkrétní lokalitu je založen na prostorových datech automaticky převzatých z databáze PVGIS. Databáze je založena na zpracovaných klimatických datech z 566 pozemních meteorologických stanic pokrývajících období 1981–1990 včetně měsíčních průměrů denních součtů globálního a difúzního ozáření. Nadmořská výška a terénní prvky jsou reprezentovány digitálním výškovým modelem o délce 1 km. Technické podrobnosti o evropské solární databázi implementované v nástroji pro odhad PVGIS lze nalézt na její webové stránce a v literatuře [13, 14, 15].

3 Data

Vybrané studijní území zahrnuje několik měst v České republice: Hodonín, Pardubice, Chomutov, Olomouc, Klatovy a Cheb. Tato města byla vybrána na základě jejich různorodé funkčnosti, morfologie a potenciálu pro instalaci fotovoltaických (FV) systémů. Ve všech těchto městech byly zmapovány průmyslové areály, které jsou většinou zastoupeny velkými jedno – nebo vícepodlažními budovami s plochými střechami, příležitostně doplněnými vícepodlažními administrativními budovami. Sběr dat pro databázi GIS tvoří digitální ortofotomapa a digitální výškopis vytvořený z digitalizovaných vrstevnic topografických map v měřítku 1:10 000. Obě datové vrstvy jsou v rastrovém formátu s prostorovým rozlišením 1 metr.

3.1 Průmyslové zóny

Průmyslové oblasti představované vybranými městy jsou pro současnou lidskou společnost velmi důležité, koncentrují hlavní ekonomické aktivity. Jsou však také zdrojem různých ekologických a sociálních problémů. Průmyslové oblasti jsou proto předmětem výzkumu mnoha vědních oborů včetně fotovoltaiky. Například Štíri a spol. vyhodnotili, že průmyslové oblasti v mnoha zemích mohou poskytnout dostatečně velké plochy pro umístění fotovoltaických systémů s kapacitou, která by mohla zcela pokrýt roční spotřebu elektřiny [2]. Plánování budoucích fotovoltaických aplikací však vyžaduje hloubkovou analýzu prostorových a časových variací fotovoltaického potenciálu.

Je zřejmé, že střechy a fasády budov často poskytují vhodné povrchy pro instalaci solárních panelů [Obr. 1, 2, 3]. Zatímco analýza povrchů budov je poměrně jednoduchá, posouzení fotovoltaického potenciálu různých průmyslových zón je prozatím nepříliš probádaná problematika. Průmyslové zóny se liší podle morfologických a funkčních charakteristik často spojených se specifickými sociodemografickými a kulturními rysy [1]. Tyto faktory také hrají důležitou roli při využívání solární energie, a proto je rozumné analyzovat různé aspekty výroby a spotřeby FV elektřiny v průmyslovém prostředí.

Průmyslové areály jsou většinou zastoupeny velkými jedno- nebo dvoupodlažními budovami s plochými střechami, příležitostně doplněnými vícepodlažními administrativními budovami. Tyto střechy jsou ideální pro instalaci FV systémů, jelikož poskytují velké, nevyužité plochy s dobrým přístupem k slunečnímu záření. Tato studie se zaměřuje především na instalaci FV systémů na halách a administrativních budovách velkých firem, které představují významný potenciál pro výrobu obnovitelné energie.

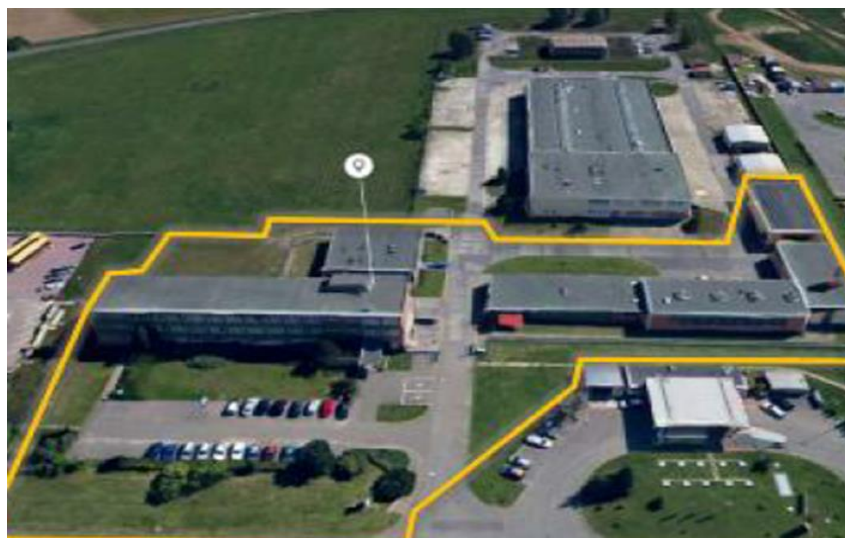
3.2 Vzor průmyslového objektu pro instalaci FV



Obr. 1 Cheb



Obr. 2 Pardubice



Obr. 3 Hodonín

3.3 Ekonomická data

Pro zpracování ekonomických podkladů byly využity dostupné informace o nákladech na instalaci, údržbu a provoz FV systémů. Vstupní data zahrnují ceny FV panelů, invertorů, montážních konstrukcí, kabeláže a dalších komponentů. Ekonomická data byla zpracována a analyzována s využitím softwaru pro ekonomické modelování, přičemž byly zohledněny místní podmínky a specifika jednotlivých měst.

Pro výpočet ekonomických ukazatelů, jako jsou vnitřní výnosové procento (IRR) a čistá současná hodnota (NPV), byly použity standardní metodiky a modely. Tato data poskytují detailní přehled o nákladech a potenciálních výnosech z instalace FV systémů v městských oblastech k roku 2022 [Tab. 1, 2].

Lokalita	Hodonín	Pardubice	Chomutov	Olomouc	Klatovy	Cheb
Velikost FVE (instalovaný výkon) [kWp]	18,04	15,58	61,50	20,09	11,48	8,20
Míra využitelnosti zdroje (vlastní spotřeba)	80,40%	79,80%	83,10%	77,70%	72,20%	78,00%
Dotace	35%	35%	35%	35%	35%	35%
Cena FVE [Kč/KWp]	25 498	25 658	24 159	25 381	25 992	26 359
Degradace [%]	0,0056	0,0056	0,0056	0,0056	0,0056	0,0056
Distribuční sazba/distribuční území (ČEZ/E-ON)	3 304	2 781	2 781	1 641	2 781	2 781
Cena silové elektřiny VT	2 696	2 172	2 172	1 033	2 172	2 172
Cena za systémové služby	114	114	114	114	114	114
Složka cena na podporu elektřiny z podporaných zdrojů	495	495	495	495	495	495
Daňová sazba	21%	21%	21%	21%	21%	21%
Celková roční výroba [kWh]	20 000	15 900	60 300	20 500	11 500	7 600
Vlastní spotřeba [kWh]	16 080	12 688	50 109	15 929	8 303	5 928
Přetoky [kWh]	3 920	3 212	10 191	4 572	3 197	1 672
Investiční výdaje na panely FVE celkem [Kč]	459 984	399 752	1 485 779	509 904	298 388	216 144
Náklady spojené s dotací (i podotační servis po 10 let)	121 500	133 500	92 500	83 900	92 500	74 900
Výše dotace	198 444	177 363	557 472	215 917	141 886	113 100

Tab. 1 Vstupní předpoklady

Lokalita	Olomouc	Cheb	Chomutov	Pardubice	Klatovy	Hodonín
Zjednodušené posouzení vhodnosti instalace FVE na objekty [Kč]	28 500	28 500	28 500	28 500	28 500	28 500
Dopracování návrhu optimální velikosti FVE [Kč]	90 500	90 500	90 500	90 500	90 500	90 500
Zpracování projektové dokumentace FVE ve stupni DPS [Kč]	124 000	104 000	124 000	161 000	124 000	151 000
Zpracování položkového rozpočtu FVE [Kč]	14 500	14 500	14 500	19 500	14 500	19 500
Zpracování žádosti o připojení výrobní k distribuční soustavě [Kč]	9 500	9 500	9 500	9 500	9 500	9 500
Zpracování požárně bezpečnostního řešení včetně vyjádření HZS [Kč]	35 500	25 500	35 500	35 500	35 500	29 500
Zpracování energetického posudku v souladu s požadavky RES+ [Kč]	49 500	49 500	49 500	49 500	49 500	49 500
Zpracování kompletní dotační žádosti v programu RES+ [Kč]	26 900	17 900	35 500	76 500	35 500	64 500
Získáním stavebního povolení / ohlášení stavby [Kč]	71 500	71 500	71 500	71 500	71 500	71 500
Konzultace při organizaci veřejné zakázky (cena za hodinu konzultace) [Kč]	3 000					
Kompletní podotační servis v průběhu udržitelnosti projektu [Kč]	97 500					

Tab. 2 Doprovodné náklady na výstavbu FV

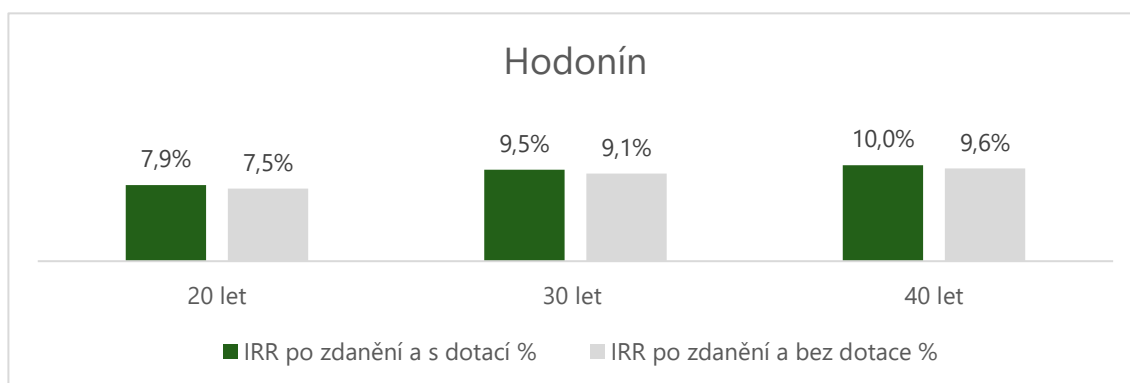
Dotace na podporu pořízení FV je koncipována do dotačního programu RES+ nové obnovitelné zdroje v energetice. Její výše je zamýšlena v řádu 35% a běží v režimu ex post. Nevýhodami výše zmíněné dotace jsou dodatečné náklady při pořízení i během doby udržitelnosti a to v přibližné výši 200 tis. Kč. Dále je nutný podotační management v předpokládané výši 7 500 Kč ročně na lokalitu. Předpokládaná doba udržitelnosti je 10 let a tudíž zde panuje další forma omezení a tou jest nemožnost prodeje dané nemovitosti s instalovanou FV. Dalším okrajovým negativem může být případná kontrola ze strany poskytovatele dotace či ze strany ERÚ.

4 Výsledky a diskuse

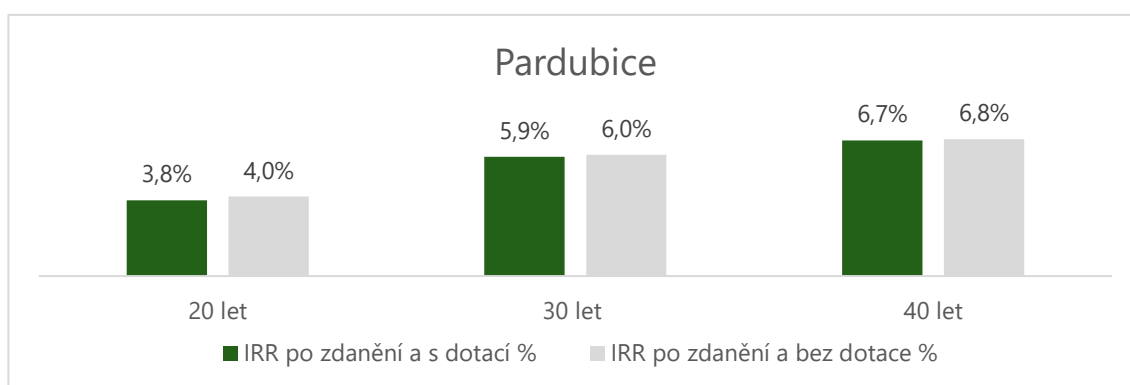
Dotace na podporu pořízení FV je koncipována do dotačního programu RES+ nové obnovitelné zdroje v energetice. Její výše je zamýšlena v řádu 35% z pořizovací ceny a běží v režimu ex post. Nevýhodami výše zmíněné dotace jsou dodatečné náklady při pořízení i během doby udržitelnosti a to v přibližné výši 200 tis. Kč. Dále je nutný podotační management v předpokládané výši 7 500 Kč ročně na lokalitu. Předpokládaná doba udržitelnosti je 10 let a tudíž zde panuje další forma omezení a tou jest nemožnost prodeje dané nemovitosti s instalovanou FV. Dalším okrajovým negativem může být případná kontrola ze strany poskytovatele dotace či ze strany ERÚ.

Lokalita	Hodonín	Pardubice	Chomutov	Olomouc	Klatovy	Cheb
Velikost FVE [KWp]	18,0	15,6	62,0	20,0	11,5	8,0
Cena [Kč bez DPH]	1,1 mil.	1,1 mil.	2,1mil.	1,1 mil.	0,9 mil.	0,8 mil.
Výroba [MWh]	20,0	16,0	60,0	20,5	11,5	8,0
Spotřeba (z výroby)	80 %	80 %	83 %	78 %	72 %	78 %

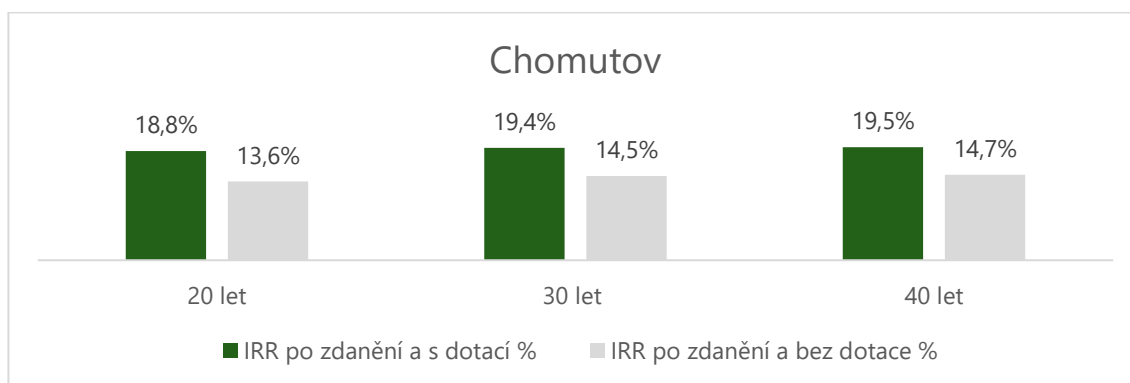
Tab. 3 Vstupní hodnoty pro výpočet návratnosti FV



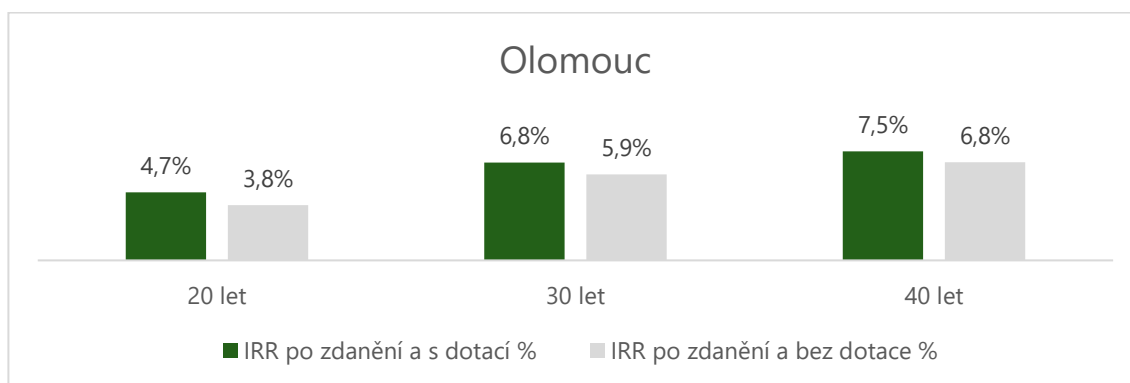
Graf. 1 Výnosnost investice v časovém horizontu pro lokalitu Hodonín



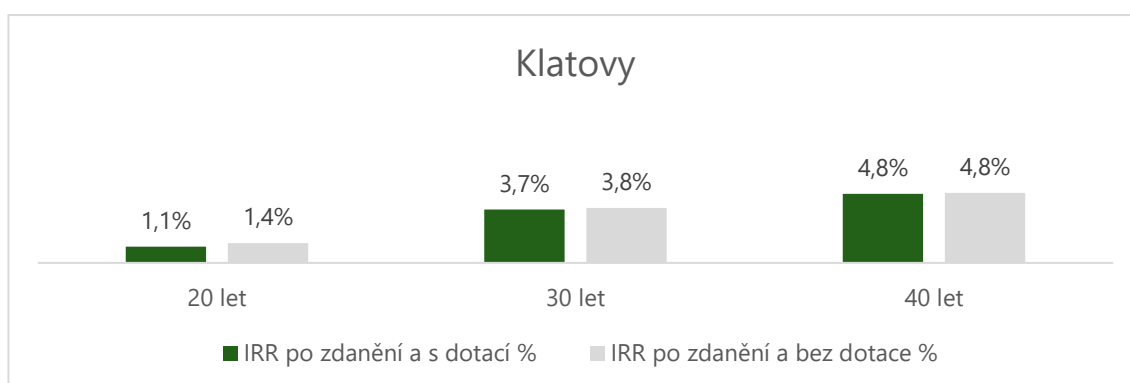
Graf. 2 Výnosnost investice v časovém horizontu pro lokalitu Pardubice



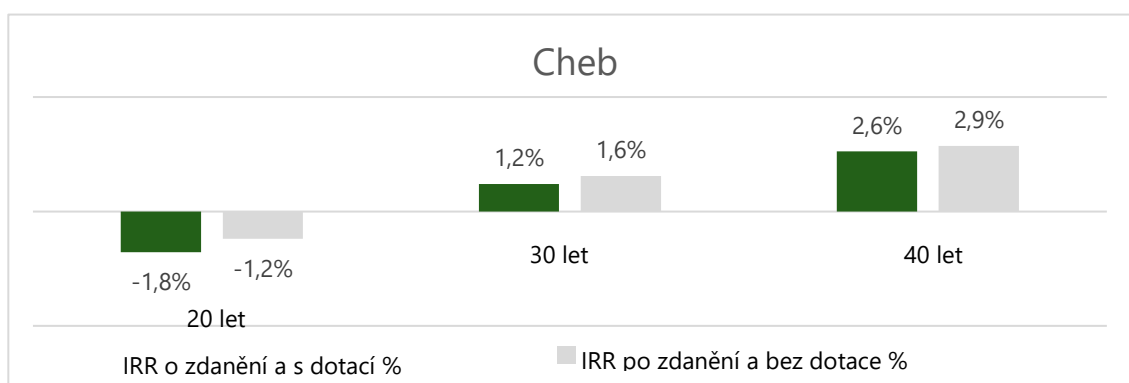
Graf. 3 Výnosnost investice v časovém horizontu pro lokalitu Chomutov



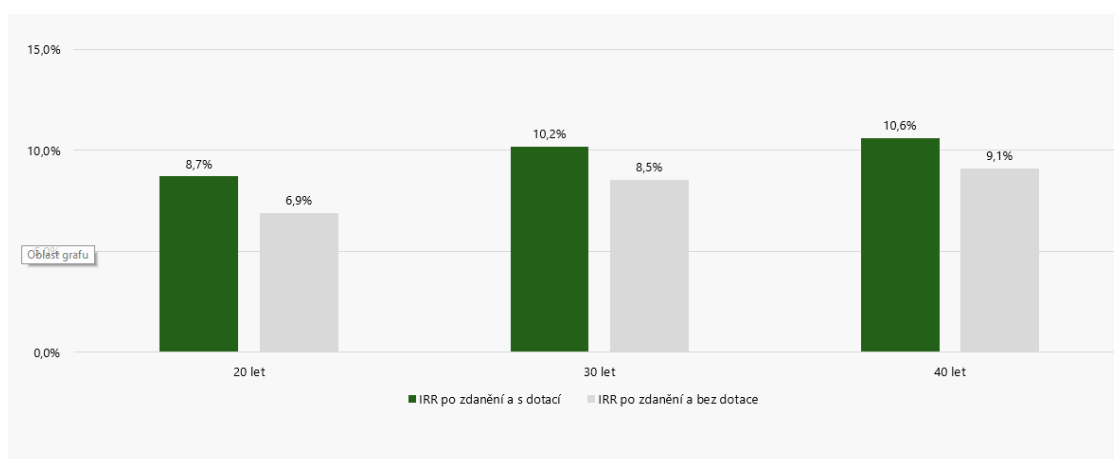
Graf. 4 Výnosnost investice v časovém horizontu pro lokalitu Olomouc



Graf. 5 Výnosnost investice v časovém horizontu pro lokalitu Klatovy



Graf. 6 Výnosnost investice v časovém horizontu pro lokalitu Cheb



Graf. 7 Průměrná výnosnost investice za všechny výstavby v časovém horizontu

Je důležité poznamenat, že efektivita FV systémů je ovlivněna nejen technickými a ekonomickými faktory, ale také místními podmínkami, jako je množství slunečního záření, teplota a stínění. Proto je nezbytné provést detailní analýzu a plánování před samotnou instalací FV systémů. Výnosnost investice v časovém horizontu 20, 30 a 40 let pro jednotlivé oblasti je reprezentativně zanesena v jednotlivých grafech [Graf 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Z dlouhodobého hlediska mají FV systémy potenciál výrazně přispět ke snížení závislosti na tradičních zdrojích energie a ke snižování emisí CO₂, což podporuje udržitelný rozvoj městských oblastí. Dále, implementace FV systémů může přinést ekonomické výhody nejen pro vlastníky budov, ale také pro širší komunitu tím, že se sníží náklady na energii a podpoří místní ekonomiku.

5 Závěr

Tato studie poskytla komplexní analýzu ekonomického dopadu instalace FV systémů na výrobních halách v městských oblastech. Výsledky ukazují, že investice do FV systémů jsou ekonomicky životaschopné, zejména při využití dostupných dotací. Další výzkum by měl zahrnovat podrobnější analýzu místních podmínek a dlouhodobých ekonomických a environmentálních přínosů FV systémů. Rovněž by bylo vhodné zkoumat inovativní finanční modely a mechanismy, které by mohly dále zlepšit návratnost investic a usnadnit širší přijetí FV technologií. Důležitým aspektem je také technologický vývoj a zvyšování účinnosti FV panelů, což by mohlo ještě více snížit náklady na výrobu elektřiny. Kromě toho by měla být věnována pozornost společenskému a politickému kontextu, včetně podpory ze strany vlád a městských úřadů, které mohou hrát klíčovou roli při urychlování přechodu k obnovitelným zdrojům energie. Celkově tato studie potvrzuje význam a potenciál FV systémů jako klíčového prvku pro dosažení udržitelného rozvoje a energetické nezávislosti městských oblastí.

6 Literatura

- [1] HOFIERKA, J., & KANŮK, J. (2009). Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools. *Renewable Energy, 34*(9), 2206-2214. doi:10.1016/j.renene.2009.02.021
- [2] ŠŮRI, M., HULD, T. A., DUNLOP, E. D., & OSSENBRINK, H. A. (2007). Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy, 81*(10), 1295-1305.
- [3] WALD, L. (2006). Available databases, products and services. In E. Dunlop, L. Wald, & M. ŠŮri (Eds.), *Solar energy resource management for electricity generation from local level to global scale* (pp. 29-41). Nova Science Publishers.
- [4] ROBINSON, D., & STONE, A. (2004). Solar radiation modelling in the urban context. *Solar Energy, 77*(3), 295-309.
- [5] HOFIERKA, J., HULD, T., CEBECAUER, T., & ŠŮRI, M. (2007). Open source solar radiation tools for environmental and renewable energy applications. In D. A. Swayne & J. Hrebicek (Eds.), *Environmental software systems: Dimensions of environmental informatics* (pp. 239-246). Springer.
- [6] ŠŮRI, M., HULD, T. A., DUNLOP, E. D., & HOFIERKA, J. (2007). Solar resource modelling for energy applications. In R. J. Peckham & G. Jordan (Eds.), *Digital terrain modelling: Development and applications in a policy support environment* (pp. 259-273). Springer.
- [7] GADSDEN, S., RYLATT, M., & LOMAS, K. (2003). Putting solar energy on the urban map: A new GIS-based approach for dwellings. *Solar Energy, 74*(5), 397-407.
- [8] ŠŮRI, M., & HOFIERKA, J. (2004). A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments. *Transactions in GIS, 8*(2), 175-190.
- [9] NETELER, M., & MITASOVA, H. (2004). *Open source GIS: A GRASS GIS approach* (2nd ed.). Kluwer Academic Publishers.
- [10] ŠŮRI, M., HULD, T. A., & DUNLOP, E. D. (2005). PV-GIS: A web based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe. *International Journal of Sustainable Energy, 24*(2), 55-67.
- [11] EUROPEAN COMMISSION. *PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System*. Online. Dostupné z: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>. [citováno 2024-6-20]
- [12] ŠŮRI, M., & HOFIERKA, J. (2004). A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments. *Transactions in GIS, 8*(2), 175-190.
- [13] ROBINSON, D., & STONE, A. (2004). Solar radiation modelling in the urban context. *Solar Energy, 77*(3), 295-309.

- [14] WALD, L. (2006). Available databases, products and services. In E. Dunlop, L. Wald, & M. Šúri (Eds.), Solar energy resource management for electricity generation from local level to global scale (pp. 29-41). Nova Science Publishers.
- [15] NETELER, M., & MITASOVA, H. (2004). Open source GIS: A GRASS GIS approach (2nd ed.). Kluwer Academic Publishers.