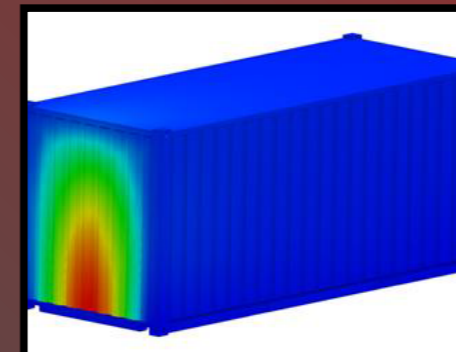
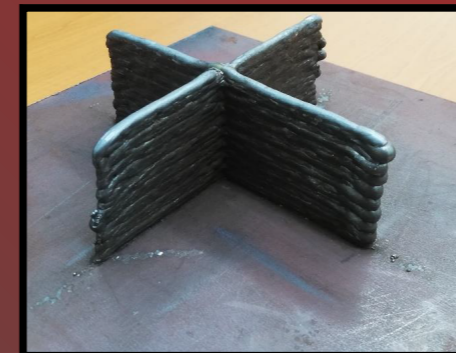
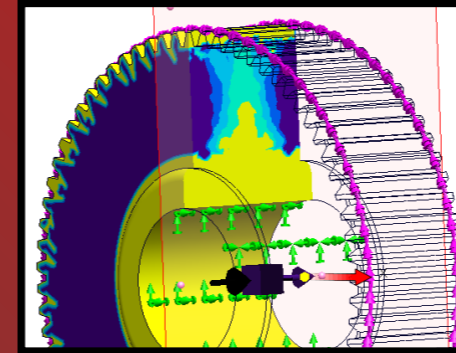




ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

TECHNOLÓG



ISSN 1337-8996

DOI: <https://doi.org/10.26552/tech.J.2023.1>

Ročník 15
marec 2023

1/2023

TECHNOLÓG

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

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

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

Evidenčné číslo MK SR-2800/08, EV 10/22/EPP
ISSN 1337-8996, Online ISSN 2730-0501

Adresa redakcie:

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

Telefón: 041-513 2764

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

Vydáva Žilinská univerzita v Žiline v EDIS-vydavateľstve UNIZA
Univerzitná HB, 010 26 Žilina, IČO 00 397 563

Šéfredaktor - editor in chief:

výkonný redaktor - executive editor:

redaktor - redactor:

vedecký redaktor - scientific editor:

doc. Ing. Ján MORAVEC, PhD.

doc. Ing. Ján Dižo, PhD.

Ing. Elena Kantoríková, PhD.

prof. Ing. Jozef PILC, CSc.

redakčná rada - editorial board:

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

doc. Ing. Silvia MALÁKOVÁ, PhD. (SK)

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

Ing. Vladimíra BIŇASOVÁ, PhD. (SK)

doc. Ing. Jozef BÍLIK, PhD. (SK)

doc. Dr. - Inž. Janusz MUSIAL (PL)

Dipl. Ing. Eva REGER (D)

doc. Ing. Ludmila DULEBOVÁ, PhD. (SK)

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

doc. Ing. Ján DIŽO, PhD. (SK)

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

doc. Ing. Ján MORAVEC, PhD. (SK)

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

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

prof. Ing. Eva TILLOVÁ, PhD. (SK)

prof. Ing. Peter DEMEČ, CSc. (SK)

prof. Ing. Jan SUCHÁNEK, CSc. (CZ)

prof. Dr. Ing. Milan SÁGA (SK)

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

prof. Dr. Ing. Miroslav NESLUŠAN (SK)

prof. Ing. Danka BOLIBRUCHOVÁ, PhD. (SK)

prof. Ing. Emil EVIN, CSc. (SK)

prof. Ing. Alžbeta SAPIETOVÁ, PhD. (SK)

Magazin TECHNOLOG

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

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

Evidenznummer MK SR-2800/08.

ISSN 1337-8996

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

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

Fax: +421 (0) 41-513 1535

Email: jan.moravec@fstroj.uniza.sk

Журнал ТЕХНОЛОГ

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

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

Регистрационный номер MK SR 2800 - /08.

ISSN 1337 - 8996

Адрес редакции: Жилінська універзіта, стpоїніцка факулта, Універзітна 1, 01026 Жіліна

Телефон: 041-513 2764, 513 2814

Факс: 041-513 1535

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

OBSAH

ZOZNAM RECENZENTOV	5
EDITORIÁL	6
DIELO A ŽIVOT GEORGIA AGRICOLU	8
DODATOČNÉ SPRACOVANIE SPEKANÝCH MATERIÁLOV <i>Elena Kantoríková</i>	12
NÁVRH PROGRAMU PRE AUTOMATICKÉ VYHODNOTENIE OBRAZU VTLAČKU ZOSNÍMANÉHO CCD KAMEROU <i>Katarína Pijáková, Ondrej Štalmach, Milan Sága, Milan Vaško</i>	16
PREHĽAD DOTERAJŠIEHO VÝSKUMU VÝROBY HARMONICKÉHO PREVODU <i>Daniela Kepeň Harachová, Silvia Maláková, Samuel Sivák</i>	22
TVÁRNENIE V HYDRAULICKOM PROSTREDÍ EXPLÓZIOU <i>Ján Moravec</i>	28
MANÉVROVATEĽNOSŤ A STABILITA POHYBU KLBOVÉHO AUTOBUSU, SYSTÉM HST <i>Volodymyr Sakhno, Juraj Gerlici, Viktor Poljakov, Oleksandr Kravchenko, Iryna Chovcha, Ján Dižo</i>	32
UZATVÁRANIE KONCOV RÚR V TVAROVEJ LISOVNICI <i>Ján Moravec</i>	41
VÝROBA OZUBENÝCH KOLIES POMOCOU 3D TLAČE <i>Silvia Maláková, Daniela Kepeň Harachová, Samuel Sivák</i>	45
КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ГОРНЫХ ВЕЛОСИПЕДОВ, ЧАСТЬ 2. <i>Ян Диžo, Мирослав Блатницький, Вадим Васильевич Ищук, Денис Молнар, Себастьян Солчанский, Борис Плайдичко</i>	51
GENERATÍVNY DIZAJN PRI KONŠTRUKČNOM NÁVRHU TVAROV TELIES ČELNÝCH OZUBENÝCH KOLIES <i>Samuel Sivák, Silvia Maláková, Daniela Kepeň Harachová</i>	55
ORGÁNY RIADITEĽNOSTI A STABILITY LETÚNOV, 2. ČASŤ <i>Sebastián Solčanský, Ján Dižo, Miroslav Blatnický, Vadym Ishchuk</i>	60
ACCOMPANYING PHENOMENA DURING CASTING OF ALUMINIUM ALLOYS <i>Marek Galčík, Marek Brůna, Martin Medňanský</i>	65
LEAN MANAGEMENT, LEAN PRINCIPLES, LEAN MANUFACTURING <i>Ivan Litvaj</i>	69
ŠTRUKTÚRA HLINÍKOVÝCH ZLIATIN PRE VYSOKOTLAKOVÉ ODLIEVANIE <i>Martin Medňanský, Marek Brůna, Marek Matejka</i>	72
USING THE COLD METAL TRANSFER (CMT) METHOD FOR WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM) APPLICATIONS <i>Martin Frátrik, Miloš Mičian</i>	76

**ANALÝZA POZDĹŽNEHO ZAŤAŽENIA KONTAJNERA SO STENAMI
VYROBENÝMI ZO SENDVIČOVÝCH PANELOV**

80

Glib Vatulia, Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Yevhen Krasnokutskyi

**CORROSION BEHAVIOR OF THE AISi5Cu2Mg ALLOY
WITH VARYING Zr**

84

Lukáš Širanec, Dana Bolibruchová, Daniel Kajánek

ZOZNAM RECENZENTOV PRÍSPEVKOV

doc. Ing. **Dalibor BARTA**, PhD.
doc. Ing. **Jozef BILÍK**, PhD.
Ing. **Vladimíra BIŇASOVÁ**, PhD., DiS.
doc. Ing. **Miroslav BLATNICKÝ**, PhD.
doc. Ing. **Marek BRŮNA**, PhD.
doc. Ing. **Ján DIŽO**, PhD.
Ing. **Elena KANTORÍKOVÁ**, PhD.
Ing. **Radoslav KOŇÁR**, PhD.
Ing. **Borislav MELO**, PhD.
doc. Ing. **Ján MORAVEC**, PhD.
Ing. **Roman STROKA**, PhD.

EDITORIÁL

Motto: “*Knihy sú nemí učítelia.*”

Aulus Gellius

Vážení autori, čitatelia a priaznivci, tento rok je pre náš časopis jubilejným, už pätnástym. Nebudem dlho rozpisovať cestu časopisu *Technológ*, pretože za jeho úspešným napredovaním stoja desiatky, ba už stovky hodín usilovnej práce s príspevkami, ktoré posielajú prispievatelia.

V priloženej tabuľke je veľmi ľahko možné si vyhľadať ako časopis napreduje a je potrebné sa iba tešiť, že vydavateľský zámer sa podaril a snaha redakcie nebola daromná. Celkový počet príspevkov presiahol tisícku a bolo ich publikovaných 1 011. Ako je známe, príspevky a potrebné informácie z publikovaných článkov vedeckého časopisu *Technológ* sa dajú ľahko vyhľadať v elektronickej verzii. Od minuloročného čísla *Technológa* 4/2022 vychádza v dvoch mutáciách: tlačenej a elektronickej. Týmto nesporne ide o skvalitnenie celého vydavateľského zámeru a takisto je stálou snahou redakčného kolektívu prinášať nové vylepšenie publikácie pre široké spektrum záujemcov a čitateľov. Všetky prijaté príspevky sú podrobené odbornej kontrole a recenzované anonymne dvomi z uvedených recenzentov v každom konkrétnom čísle časopisu. Redakcia si vyhradzuje právo na redakčnú úpravu textu príspevkov.

Všetkým prajem veľa zdravia a úspechov v novom roku, ktorý je pre vedecký časopis *Technológ* významný, lebo je preň jubilejný. Všetkým prispievateľom osobitne želám veľa zdraru a mnoho vedeckých úspechov v tomto aj nasledujúcich rokoch. Ako prejav uznania dostane každý prispievateľ, ktorý uverejnil minimálne desať príspevkov v uplynulých rokoch, pamätný list časopisu.

Ján Moravec
šéfredaktor a editor

PREHLAD POČTU PRÍSPEVKOV

Rok	Číslo								Σ
	1.	2.	3.	4.	5.	Mimoriadne číslo	Σ		
2009	11	-	-	-	-	12	23		
2010	9	9	-	-	-	44	67		
2011	7	6	5	18	-	28	64		
2012	9	47	10	10	-	-	76		
2013	8	7	52	67	6	-	137		
2014	11	45	12	8	-	-	76		
2015	9	40	43	10	-	-	111		
2016	8	9	23	20	-	-	60		
2017	31	6	13	-	-	-	50		
2018	12	25	15	-	-	-	52		
2019	14	32	11	9	-	-	78		
2020	11	12	22	29	-	-	75		
2021	11	20	19	13	-	-	63		
2022	26	23	18	12	-	-	79		

DIELO A ŽIVOT GEORGIA AGRICOLU

Ján MORAVEC

Abstrakt: V príspevku je uvedený stručný prehľad života a diela *nemeckého* humanistického autora *Georgia Agricola* - zakladateľa modernej náuky o baníctve a spracovaní kovov.



Georgius Agricola

Georgius Agricola, vlastným menom *Georg Bauer* (niekedy sa vyskytuje aj tvar *Pauer*) sa narodil 24.03.1494 v *Glachau* (*Sasko*). Kvôli jeho leviemu podielu pri položení vedeckých základov baníckych vied mu súčasníci dali aj prívlastok - Otec mineralógie. Veľa sa o ňom a jeho rodine nedochovalo, lebo mesto *Glachau* viackrát vyhorelo a veľa listín v mestskom archíve zhorelo, takže množstvo prameňov je nenávratne stratených.

Agricola chodil do školy v *Glachau*, *Zwickau* a vysokoškolské štúdium završil v *Lipsku*. Jeho záujem sa sústreďoval na teológiu, filozofiu a filológiu. K jeho priateľom patrila *prof. P. Mosselus*. Po troch rokoch štúdia opustil univerzitu v *Lipsku* ako bakalár. Následne sa stal učiteľom na mestskej škole v *Zwickau*. Po dvoch rokoch sa vrátil do *Lipska*, kde pôsobil ako lektor u *prof. Mosella* a svoj záujem sústredil na medicínu. V roku 1524 po smrti svojho dobrodincu a priateľa *prof. Mossela* odišiel *Agricola* na študijnú cestu do *Talianska*, aby rozvíjal svoj záujem najmä o prírodné vedy a lekárstvo. Už v roku 1526 je opäť v *Nemecku* a nasledujúci rok 1527 nastúpil ako lekár v českom *Jáchymove*. Doktorský gradus získal na univerzite vo *Ferrare* a počas pobytu v *Benátkach* spolupracoval na editovaní a vydaní diela antického lekára *Galéna* s názvom *Galenus librorum Pars I. - V.*

Dôvod, prečo sa usadil v *Jáchymove* vysvetľuje v predslove k dielu *Bermanus, sive de re metallica*, kde zdôrazňuje potrebu pestovania prírodných vied a znalostí o kovy a ich zlúčeninách a takisto nasledujúcom aplikovaní v medicíne. Píše: „*Tieto veci dali prednostne podnet k tomu, aby som sa usadil v rudnatej oblasti.*“ *Agricola* bol nadaný dobrou pozorovacou schopnosťou a predstavivosťou. Jeho sila spočívala v pokojnej, trpezlivej a usilovnej práci. Bol veľmi všestranný. Z *jáchymovského* obdobia pochádza jeho prvý odborný spis *Bermanus, sive de re metallica dialogus*, ktorá vyšla v roku 1530 a neskôr ešte osemkrát. Kniha je podľa vtedajších zvyklostí zostavená ako dialóg formou otázok a odpovedí medzi *Bartolomejom Bermanom* (*Agricolovým* priateľom) a dvoma ďalšími učenými doktormi.

Niekedy po roku 1530 odišiel *Agricola* z *Jáchymova* a od roku 1533 žil ako mestský fyzik v *Chemnitzi*. *Jáchymov* ale veľmi často navštevoval.

Agricola napísal mnoho prác, ale všetky zostali v tieni jeho životného diela *De Re metallica libri XII*. Uvedené dielo je výsledkom dvadsať ročnej poctivej a trpezlivej práce. Vydania knihy sa *Agricola* nedožil. Zomrel štyri mesiace pred jej vydaním. Samotné dielo je bohato ilustrované a obsahuje 273 drevorytov. Pre nás je zaujímavý fakt, že *Agricola* opisuje aj stredoslovenskú banskú oblasť a *Kremnicu*. Pre začiatok ťažby v *Kremnici* udáva fantastický údaj, že vrah sa tam zlato ťažilo už v 7. storočí (!).

Vo venovaní *Re Metallica* vládcovi *Móricovi Saskému* a jeho bratovi *Augustovi* spomína predchodcov (antických) zaoberajúcich sa podobnou témou. Sú to *M. Varro*, *C. Plinius Secundus* a jeho *Naturalis Historia*,

Stratón z Lampsaku a jeho práca O banických strojoch. Nasledujú dvaja nemeckí (neznámi) autori s knihami: *O dôkaze banickej hmoty a kovoch*, *O rudných žilách*. Ďalej Vannocio Biringuccio zo Sieny (latinsky): *O liatí, oddeľovaní a spájaní kovov*. Agricola uzatvára: „Je veľa kníh o tejto veci, ale všetky sú nezrozumiteľné, pretože títo spisovatelia pomenúvajú veci inými, než vlastnými názvami”.

Z toho vyplýva, že Agricola vytýka nejednotnú klasifikáciu a nomenklatúru javov a faktov v predmetnej oblasti. Preto jedným z cieľov *Agricolu* bolo i zjednotenie pojmov, čo sa mu podarilo.

Životné dielo *O baníctve a hutníctve* sa stalo na viac ako dve storočia neprekonanou metou, čiže až do konca 18. storočia.

Agricola opustil cestu neplodných úvah a obrátil pozornosť k exaktnému pozorovaniu a samotnému bádaniu. Žiaľ, nevenoval sa experimentom, hoci bol bystrý pozorovateľ.

Odborné spisy písal výhradne po *latinsky*. *Agricolove* zbierky hornín a nerastov boli na vysokej vedeckej úrovni, podrobne spracované a zdokumentované. Ako človek a vzdelanec vtedajšej doby písal aj teologické pojednia, takže nás nesmie prekvapiť, že ani takáto oblasť neušla jeho pozornosti. Nie je to nič výnimočné, veď aj *Johannes Kepler* takisto okrem vysoko odborných matematických a tiež fyzikálnych kníh písal teologické rozpravy.

Záverom je ešte potrebné dodať, že *Agricola* bol činný aj vo verejnej správe a viac krát bol zvolený mešťanostom v *Chemnitzi*. Panovník, kurfirst *Móric Saský* ho poveroval diplomatickými úlohami, ktoré splnil k spokojnosti panovníka.

Agricola skonal po štvordňovej chorobe 21.11.1555 v *Chemnitzi* ako „*Meisenský Plínius*”. Takto vzletne ho pomenoval *prof. Gesner* a neskôr bol, ako bolo uvedené, nazvaný „*Otec mineralógie*”. Ako katolík bol pochovaný v zámočkej kaplnke v *Zeitze*.

Dielo *G. Agricolu* malo najväčší význam pre baníctvo a hutníctvo počas dvesto rokov. Svoju hodnotu dielo *Dvanásť kníh o baníctve a hutníctve* nestratilo veľmi dlho a slúžilo ako učebnica. Ešte do polovice dvadsiateho storočia vyšli tri vydania jeho diela - *anglicky, nemecky a česky*.

Obsah diela *De Re Metallica libri XII*.

1. Kniha *Všeobecné pojednanie o význame kovov a baníctve*.
2. Kniha *Hľadanie rudných žíl*.
3. Kniha *Rudné žily, žilky a ich premiestňovanie*.
4. Kniha *Organizácia banických úradov*.
5. Kniha *Dolovanie- rúbanie žíl a banické meranie*.
6. Kniha *Banické stroje a nástroje*.
7. Kniha *Skúšanie rúd*.
8. Kniha *Drvenie, plavenie a praženie rúd*.
9. Kniha *Tavenie rúd*.
10. Kniha *Oddelovanie striebra od zlata a olova od striebra*.
11. Kniha *Oddelovanie striebra od medi*.
12. Kniha *Výroba soli, liadku, vitriolu, síry a skla*.

Agricolovo dielo z rokov 1520 ÷ 1555:

1. *Libellus de prima ac simplici institutione grammatica*, Leipzig 1520
2. Dve teologické rozpravy z roku 1522 (nevyšli tlačou).
3. *Galení Librorum pars I.-V.* Venezia 1525 (spolueditor).
4. *Bermanus, sive de re metallica*, Basel 1530, *Lutetia Parisorum* 1541, *Basel* 1546, *Leipzig* 1546, *Venezia* 1550. Ďalšie vydania z rokov 1558, 1612, 1657, 1778, 1806.
5. *Reč o tureckom nebezpečenstve*, (nemecky, lebo bola určená širokému okruhu verejnosti), *Nürnberg* 1531, *Jáchymov* 1531
6. *Oratio de bello adversur Turcam suscipiendo*, *Basel* 1538.
7. *Libri quinque de mensuris et ponderibus*, *Venezia*, *Basel*, *Lutetia Parisorum* 1553, potom v rokoch 1535, 1550, 1552.

8. *Epistola ad Plateanum*, Basel 1534.
9. *De ortu et causis subterraneorum*, Basel 1546, Venezia 1550, 1558, 1612, 1657, Freiberg 1806 ÷ 1812.
10. *De natura eorum quae effluent ex terra*, Basel 1546, Venezia 1550, 1558, 1612, 1657, Freiberg 1806 ÷ 1812.
11. *De natura fossilium*, Basel 1546, Venezia 1550, 1558, 1612, 1657.
12. *De veteris et novis metallis*, Basel 1546, Venezia 1550, 1558, 1612, 1657.
13. *De Animantibus subterraneis*, Basel 1549, 1556, (súčasne s *De Re Metallica*), ďalej 1561, 1563 (talianske vydania), 1614, 1621, 1657.
14. *De Peste*, Basel 1554, 1607, 1611.
15. *De Re Metallica*, Basel 1556, 1557, talianske vydanie 1561, 1563, Frankfurt 1580 (nemecky), Basel 1621 (jedno vydanie latinské a jedno nemecké, Basel 1657, Londýn 1912 (anglicky), Berlín 1928 (nemecky), Praha 1932 (česky).

Vysvetlivky k zemepisným názvom: Leipzig - Lipsko, Venezia - Benátky, Basel - Bazilej, Lutetia Parisorum - Paríž, Nürnberg - Norimberk.

Agricolovo dielo sa dá rozdeliť na niekoľko častí. Číslo v zátvorke udáva poradie vzniku kníh.

A. Spisy pedagogicko-filologické:

Knižka jednoduchého základného vyučovania gramatiky (1.).

B. Spisy teologické:

Dve teologické rozpravy (2.),

List z námestia (8.).

C. spisy lekárske:

Päť Galénových kníh (3.) - spolueditor,

O morovej nákeze (14.),

O dýchaní v podzemí (13.) - dá sa zaradiť aj k technickým prácam.

D. Spisy politické:

Reč o tureckom nebezpečenstve (5.),

Reč o podniknutí vojny proti Turkom (6.).

E. Spisy technické:

Bermanus alebo dialogická rozprava o kovoch (4.),

Päť kníh o meraní a vážení (7.),

O pôvode a vzniku podzemia (9.),

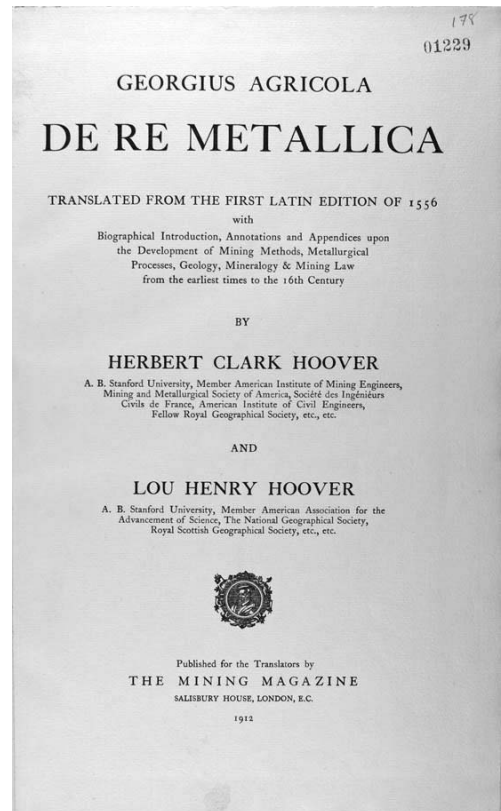
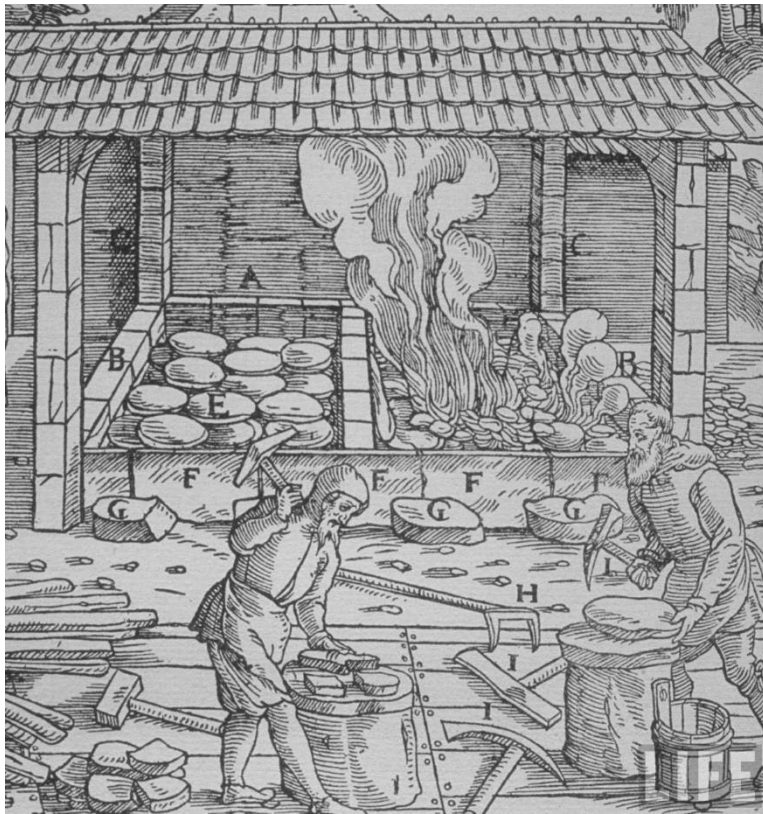
O pôvode nerastov v podzemí (10.),

O pôvode fosílií (11.),

Staré a nové kovy (12.),

O kovoch (prekladá sa aj názvom - Dvanásť kníh o baníctve a hutníctve) (15.).

Z jednoduchého rozdelenia *Agricolovho* diela vynikne všestrannosť autora, po ktorú sa celý život usiloval. Na nasledujúcej obrazovej prílohe je titulný list prekladu *De Re Metallica* do angličtiny z roku 1912. Ilustrácie z *De Re Metallica* sú prevzaté z českého vydania *Agricolovej* knihy z roku 1933.



A—WOOD. B—BRICKS. C—PANS. D—FURNACE. E—CRUCIBLE. F—PIPE.
G—DIPPING-POT.

Obr. 1. Ilustrácie z diela *De Re Metallica* a titulný list *anglického* prekladu knihy z roku 1912

Dodatočné spracovanie spekaných materiálov

Elena Kantoríková, Ing., PhD.*

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

Univerzitná 1, 010 26 Žilina.

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

Additional processing of sintered materials

Abstract: Powder metallurgy is a method of producing materials and products with required properties and required exact shapes. The development of new materials contributes to this. The general advantage of powder metallurgy is the possibility of producing parts of complex and precise shapes in large series and optimized production costs, resulting from lower energy requirements compared to casting and chip machining.

Keywords: Powder metallurgy, heat treatment, sintered materials

ÚVOD

Prášková metalurgia je metóda výroby materiálov a výrobkov s požadovanými vlastnosťami a požadovanými presnými tvarmi. Prispieva k tomu vývoj nových materiálov. Všeobecná výhoda práškovej metalurgie je možnosť výroby súčiastok zložitých a presných tvarov vo veľkých sériách a optimalizovaných výrobných nákladoch, vyplývajúcich z nižšej energetickej náročnosti oproti odlievaniu a trieskovému obrábaniu. No aby výroba súčiastok použitím práškovej metalurgie bola ekonomicky výhodná, je potrebné vyrábať väčšie série, keďže nástroje sú veľmi drahé. Taktiež dochádza k minimálnemu vzniku prebytočného materiálu. Pomocou práškovej metalurgie je dnes možné spracovať veľké množstvo kovov a ich zliatin.

Prášky sa pripravujú buď mechanicky, rozstrekom tekutého kovu alebo pomocou fyzikálno-mechanických a elektrochemických metód. Od použitej metódy prípravy prášku sa odvíja aj jeho morfológia. Po príprave prášku nasleduje jeho čistenie, premiešanie s mazivom a prášok je pripravený na formovanie a zhutnenie. Po zhutnení nasleduje spekanie, po ktorom materiál dosahuje svoje základné fyzikálne a pevnostné vlastnosti.

Na vlastnosti konečného výrobku vplýva množstvo faktorov. Od typu kovového prášku až po podmienky, pri ktorých bol prášok spekaný a od ďalšieho dodatočného spracovania po spekaní.

1 DODATOČNÉ OPERÁCIE

V praxi pri výrobkoch vyrobených práškovou metalurgiou a teda zo spekaných materiálov, môžu byť kladené vyššie nároky na opracovanie a vlastnosti, oproti vlastnostiam dosiahnutých len po spekaní bez ďalšieho spracovania. Napríklad môže ísť

o menšie tolerancie, zvýšené mechanické vlastnosti, odolnosť voči opotrebeniu alebo zvýšenú odolnosť voči korózii. Zlepšenie týchto vlastností sa dá dosiahnuť pomocou tzv. sekundárnych alebo dodatočných operácií. Dodatočné operácie, používané na zaistenie požadovaných vlastností po spekaní síce predražujú konečný výrobok, ale aj tak je vo väčšine prípadov proces výroby práškovou metalurgiou v porovnaní s inými technológiami výhodnejší, pri výrobe veľkého počtu kusov. Vlastnosti spekaných výrobkov najčastejšie ovplyvňuje ich vrodená pórovitosť [1, 2]. Konečná úprava závisí od druhu spekaného materiálu a účelu použitia výrobku. Medzi dodatočné operácie môžeme zaradiť:

- *tepelné spracovanie,*
- *chemicko-tepelné spracovanie,*
- *pokovovanie,*
- *odhrotovanie,*
- *kalibrovanie,*
- *trieskové obrábanie,*
- *zváranie,*
- *spájkovanie,*
- *infiltrácia,*
- *impregnácia,*
- *spracovanie v prehriatej pare,*
- *zvýšenie odolnosti voči korózii.*

1.1 Tepelné spracovanie

Používa sa za účelom zvýšenia pevnostných vlastností spekaných výrobkov. Princípy tepelného spracovania spekaných materiálov sú rovnaké ako v klasickej metalurgii. Pre kalenie sa najčastejšie

používa olej, nevhodné sú soľné kúpele. Pri vyššej pórovitosti je pri ohreve na kaliacu teplotu potrebné použiť ochrannú atmosféru. Prvým krokom pri určovaní potrebného spracovania povrchu spekaného výrobku je stanoviť, aké vlastnosti by mal povrch vykazovať v závislosti od podmienok jeho zaťažovania. Je rozhodujúce, či je spekaný výrobok určený na prácu v podmienkach abrazívneho opotrebenia pri vysokých alebo nízkych tlakoch, v podmienkach únavového zaťaženia, kontaktovej únavy korózie a pod. V prípade potreby zvýšenia pevnosti sa najčastejšie používajú:

- operácie realizované tepelným spracovaním,
- operácie na zníženie pórovitosti.

Tepelné spracovanie má význam len vtedy, ak je pórovitosť materiálu menšia ako 5 %. Pri väčšej pórovitosti je efekt zmien vyvolaných tepelným spracovaním potlačený prítomnosťou metalurgických defektov - pórov. Spekané materiály sa v dôsledku pórovitosti vyznačujú zhoršenou tepelnou vodivosťou, čo ovplyvňuje aj procesy ich tepelného spracovania. Z procesov tepelného spracovania sa najčastejšie používa kalenie, povrchové kalenie, popúšťanie a vytvrdzovanie. Pre materiály na báze Fe sa zvyčajne používa zušľachtovanie a pre materiály Al-Cu sa využíva precipitačné vytvrdzovanie [1].

1.2 Chemicko-tepelné spracovanie

Najčastejšie sa používa cementovanie a nitridovanie, ale aj ostatné druhy chemicko-tepelného spracovania, kedy sa povrch súčiastky do určitej hrúbky nasýti uhlíkom, dusíkom alebo ich kombináciou. Po cementovaní musí nasledovať kalenie. Chemicko-tepelným spracovaním sa vytvárajú povrchové vrstvy rôznej hrúbky a tvrdosti, čím dochádza aj k zvýšeniu odolnosti proti opotrebeniu. Pri pórovitých materiáloch sa požadované hrúbky vrstiev dosahujú rýchlejšie ako u kompaktných materiáloch [2].

1.3 Trieskové obrábanie

Výrobky práškovej metalurgie sa často označujú ako produkty, ktoré nie je potrebné dodatočne obrábať. Niekedy však môže byť ekonomicky výhodnejšie niektoré detaily obrobiť, ako zvyšovať náklady na presné lisovanie, resp. na zložitejší tvar lisovacieho nástroja. Pri trieskovom obrábaní výrobkov zo spekaných materiálov, ktoré vykazujú určitú mieru pórovitosti, je potrebné oproti trieskovému obrábaniu odliatkov zohľadniť, že:

- pri spekaných materiáloch je hĺbka spevnenia povrchu v dôsledku obrábania veľmi dôležitá, pretože póry pôsobia ako koncentrátoři napätia,
- teplota na špici nástroja spôsobuje oxidáciu pórovitého povrchu,

- pórovitosť povrchu spôsobuje vibráciu obrábacieho nástroja a jeho únavové namáhanie.

So zvyšovaním hustoty výrobkov sa podmienky obrábania približujú podmienkam obrábania odliatkov.

Vrodená pórovitosť spôsobuje pri obrábaní spekaných výrobkov nasledujúce problémy:

- póry sa môžu upchávať v dôsledku znečisteného povrchu,
- chladiace kvapaliny môžu preniknúť do povrchu,
- povrchy môžu byť nabité abrazívami z brúsenia, honovania, lapovania, superfinišovania.

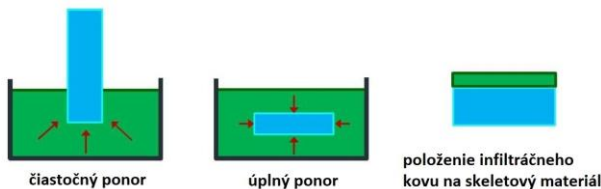
Niekedy sa obrábanie uskutočňuje po operácii predspekania, ktoré sa pri oceliach realizuje pri teplotách 850 °C až 950 °C. Po opracovaní sa výrobky ešte spekajú, prípadne kalibrujú. Medzi najčastejšie spôsoby trieskového opracovania spekaných súčiastok patrí sústruženie, frézovanie, brúsenie, vrtanie, výroba závitov. Predovšetkým je nevyhnutná pomocou dodatočného trieskového obrábania výroba dier, ktoré sa nachádzajú na bočných stenách súčiastok, pretože takéto diery sa nedajú tvarovať pri tvarovaní prášku [3].

1.4 Kalibrácia

Stupeň presnosti výrobku je daný tak presnosťou lisovacieho nástroja, ako aj stupňom zmraštenia pri spekaní. Výškové rozmery vyrábanej súčiastky sú menej presné, ako rozmery v horizontálnom smere, ktoré sú utvárané matricou. Zmraštenie, ku ktorému dochádza pri spekaní, nie je vo všetkých smeroch výlisku percentuálne rovnaké. Takže rozmery nástroja sa často stanovujú na základne charakteru výlisku a spracovávaného práškového materiálu. Podľa veľkosti a usporiadania tvaru výlisku môžu byť dosiahnuté rozmery v horizontálnom smere presnosti IT7 až IT9. Pre zvýšenie rozmerovej presnosti sa robí kalibrácia, ktorá umožňuje dosiahnuť presnosť IT6 až IT7. Spočíva v tom, že sa súčiastka prelisováva v kalibračnom nástroji, ktorý je vyrobený s nižšími toleranciami, ako nástroj na lisovanie. Pri kalibrovaní sa ďalej zvyšuje kvalita povrchu súčiastky a dochádza k spevneniu deformovanej povrchovej vrstvy. Dodržiavanie presnosti je náročnejšie pri zväčšujúcej sa hustote a pevnosti. Pri lisovaní v delených matriciach sa tolerancie sčítavajú. Pri väčších nárokoch na presnosť spravidla nasleduje mechanické opracovanie. Kalibrácia prebieha za značne znížených tlakov, ako v priebehu formovania [4]. Kalibrovanie spekaných súčiastok na báze Fe sa robí pri tlakoch 400 MPa až 600 MPa.

1.5 Infiltrácia

Infiltrácia kovom je napúšťanie spekaných kovových skeletov roztaveným kovom. Prebieha buď úplným ponorením do tekutého kovu alebo čiastočným ponorením, pričom sa tekutý kov nasaje do porézneho kovového výlisiku kapilárnymi silami. Ďalším spôsobom je polozenie nízkotavitel'ného kovu na porézny výlisok, do ktorého po prekročení teploty tavenia zatečie a vyplní v ňom póry a dutiny. Uvedené spôsoby infiltrácie sú uvedené na obr. 3.



Obr. 1. Spôsoby infiltrácie porézneho skeletového materiálu roztaveným kovom.

Pomocou infiltrácie sa dosiahne čiastočná eliminácia problému pórovitosti. Ocelové súčiastky sa infiltrujú na vyplnenie napr. meďou. Pri voľbe teploty infiltrácie sa riadime teplotou tavenia infiltrovaného materiálu, ktorá musí byť výrazne odlišná od teploty tavenia skeletového materiálu. Hodnota viskozity kovu, ktorým infiltrujeme skeletový materiál, má byť čo najnižšia. Nedostatočnú zmáčavosť možno odstrániť legovaním komponentmi znižujúcimi povrchovú energiu medzi tuhú a kvapalnou fázou [5]. Infiltráciou je možné vytvárať kompozitné materiály, ktoré by sa nedali pripraviť klasickou metalurgiou, a len ťažko cestou práškovej metalurgie.

1.5.1 Tlaková infiltrácia

Podstata metódy spočíva v tom, že pórovité teleso je ponorené do kúpeľa kvapalného kovu a následným pôsobením pretlaku inertného plynu na hladinu kovu penetruje kov do pórov telesa, kde zatuhne, čím sa vytvorí príslušná materiálová kombinácia. Proces sa realizuje v autokláve. Prednosťou metódy je vysoká produktivnosť, ekonomickosť a variabilnosť pri voľbe materiálových kombinácií, čo umožňuje netradičným spôsobom riešiť širokú škálu materiálových problémov najmä v oblasti tribológie, elektrotechniky, chemických a energetických zariadení, v leteckom a automobilovom priemysle. Technológia tlakovej infiltrácie ťažkotavitel'ných pórovitých telies (kremík, uhlík, ťažkotavitel'né kovy) kvapalnými kovmi s teplotou tavenia do 1200 °C, umožňuje vytvárať kompozitné materiály [5, 6].

1.6 Impregnácia

Takisto sa používa na elimináciu pórovitosti. Ocelové súčiastky sa impregnujú polyesterovou živnicou, olejom alebo voskom. Časti, ktoré chceme impregnováť, jednoducho ponoríme na niekoľko hodín do olejového kúpeľa [7]. Dobrá impregnácia sa

dá dosiahnuť, ak sa teplota kúpeľa pohybuje okolo 80 °C.

1.6.1 Impregnácia vo vákuu

Časti, ktoré chceme impregnováť olejom, sa vložia s košíkom do vákovej komory. Komora sa naplní olejom. Zvýši sa tlak v komore na atmosférický, olej z komory odčerpáme. Problémy môže spôsobiť vznik plynových bublín, ktoré vznikajú v dôsledku rozpustených plynov v oleji, plynov vzniknutých v dôsledku chemickej reakcie alebo plynov rozpustených v spekanom materiáli. Pri impregnácii živnicou sa väčšina prepojených pórov naplní živnicou najčastejšie na báze polyesteru alebo iného plastu. Impregnácia zlepšuje obrábiteľnosť povrchov. Jej nevýhodou je však nemožnosť ďalšieho tepelného spracovania impregnovaných súčiastok. Impregnovanie sa najčastejšie používa na súčiastky ako sú valce, pumpy, kompresory, brzdové piesty.

Problém pórov v súčiastkach, ktoré majú byť pokovované, rieši impregnácia živnicou. Vyplnenie pórov živnicou pôsobí preventívne proti zachytávaniu iných kvapalín, ktoré by sa neskôr mohli dostať na povrch a zničiť konečnú povrchovú úpravu. Impregnácia živnicou zvyšuje konštrukčnú pevnosť a eliminuje vnútornú koróziu. Ide o súčiastky ako časti dýz, pólové nadstavce, dekoračné časti automobilov [7, 8].

1.7 Zvýšenie odolnosti voči korózii

Pre materiály na báze železa ide o galvanické pokovovanie. Pred vlastným galvanickým pokovovaním sa póry zaplňujú napr. plastami. Na takéto povrchy sa nanášajú vrstvy medi, niklu, kadmia, cínu, zinku alebo chrómu [8].

1.8 Spracovanie v prehriatej pare

Prehriata para sa bežne používa na spracovanie súčiastok na báze Fe, najmä na zlepšenie odolnosti proti opotrebeniu, ale aj proti korózii. Počas spracovania v peci sa súčiastky ohrejú na teplotu 370 °C, na odparenie vlhkosti [9]. Následne sa do pece privedie para a teplota sa zvýši na 510 °C až 540 °C, kedy dôjde k oxidácii železa a všetky vnútorné aj vonkajšie povrchy sa pokrývajú tvrdým čiernym kovovým oxidom Fe_3O_4 . Následne sa aplikuje ochladzovanie v oleji. Hrúbka oxidickej vrstvy nesmie presiahnuť 10 μm .

1.9 Spájanie

Pri spekaných materiáloch možno použiť takmer všetky procesy spájania. Pri spájkovaní niekedy môže dôjsť k infiltrácii spekaného materiálu spájkou. V tom prípade je potrebné najskôr materiál infiltrovať zliatinou s bodom tavenia rovnakým alebo vyšším, ako je teplota tavenia spájky alebo použiť dostatočné množstvo spájky aj na infiltráciu aj na spájkovanie.

Na zváranie spekaných materiálov je možné použiť všetky konvenčné metódy zvárania [10].

ZÁVER

Výrobky z práškovej metalurgie majú svoje výhody, ale aj nevýhody. Medzi nevýhody patria nároky na nástroje, ktoré zabezpečujú tvárnenie prášku. Ďalšou nevýhodou je menšia hutnosť materiálu a teda aj pevnosť, spôsobená pórovitosťou materiálu. Medzi výhody práškovej metalurgie možno zaradiť rýchlú výrobu súčiastok, veľké využitie materiálu, vieme získať rovnomerne rozložené častice v štruktúre a teda homogenitu po celom priereze, získavame materiál s požadovaným chemickým zložením.

Dodatočné operácie umožňujú opracovať alebo zlepšiť vlastnosti spekaných súčiastok. Využívajú sa tie dodatočné operácie, ktoré sú nevyhnutné pre zabezpečenie požadovaných vlastností. Dodatočné operácie sa používajú vtedy, ak samotným tvarovaním prášku nie sú zabezpečené požadované výsledné tvary a tolerancie. Taktiež sa dodatočné operácie používajú, ak po spekaní nie je zabezpečená požadovaná tvrdosť, odolnosť voči opotrebeniu, odolnosť voči korózii a pod. Po operácii spekania je možné so súčiastkou vykonávať operácie ako s bežnými hutnými súčiastkami.

Pod'akovanie

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

LITERATÚRA

[1] IŽDINSKÁ, Z. - ŠVEC P. (2013): *Prášková metalurgia*. STU Bratislava, ISBN 978-80-227-3875-0.

[2] NEMČOK, O. (2011): *Prášková metalurgia*. 1. vyd. Dubnica nad Váhom, ISBN 978-80-89400-20-1

[3] SKOTNICOVÁ, K. - KURSA, M. (2013): *Prášková metalurgia*. Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-3378-1

[4] HOSFORD, W. F. (2005): *Mechanical behavior of materials*. New York, USA: Cambridge University Press, s. 425. ISBN 0-521-84670-6.

[5] HOULDCROFT, P. T. - JOHN, R. (2001): *Welding and Cutting: A Guide to Fusion Welding and Associated Cutting Processes*. s.l.: Welding and Cutting: A Guide to Fusion Welding and Associated Cutting Processes, s. 240. ISBN: 9781855735781.

[6] KRAUSE. (2020): *Krause Guss. Krause Präzisions-Kokillenguss GmbH*. [Online] Krause Präzisions-Kokillenguss GmbH. <https://www.krause-guss.com/material/aluminum-bronze/>.

[7] KUHN, H. - MEDLIN, D. (2000): *ASM Handbook*. Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation. Materials Park, Ohio: ASM International, ISBN 0871703890.

[8] New Coms International Ltd. (2020). *METALS - Copper alloys*. Dostupné na: <https://newcomssrl.com/en/leghe-di-rame/>.

[9] MORAVEC, J. - KANTORÍKOVÁ, E. - FABIAN, P. (2020): *Prášková metalurgia*. Žilina ISBN 978-80-554-1692-2.

[10] KOCH, H. - FRIEDRICH, L. J. - HINKEL, V. - LUDWIG, F. - POLITT, B. - SCHURIG, T. (1991): *Hollow cathode discharge sputtering device for uniform large area thin film deposition*. J. Vac. Sci. Technol., A 9, 2374.

Návrh programu pre automatické vyhodnotenie obrazu vtláčku zosnímaného CCD kamerou

Katarína Pijáková, Ing.*

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

Ondrej Štalmach, Ing., PhD.

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

Milan Sága, prof. Dr. Ing.

Katedra aplikovanej mechaniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: milan.saga@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2961

Milan Vaško, doc. Ing., PhD.

Katedra aplikovanej mechaniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: milan.saga@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2950 (2981)

Design of a program for automatic evaluation of the indentation image captured by a CCD camera.

Abstract: The aim is to create a program for the automatic evaluation of hardness from a series of images taken by a CCD camera. We will present the different functions of the proposed program. In the first step, we created an algorithm that selects the image with the most suitable sharpness from a series of images of different sharpness. In the second step, we created an algorithm that evaluated the imprint area on the selected image, from which it computed the resulting hardness. We then incorporate the algorithms into a single resulting program. We compare the measurements of the program with measurements at the *University of Žilina* and on a manual V 10/HT instrument.

Keywords: Indentation, hardness tests, image processing, CCD cameras.

ÚVOD

Skúška tvrdosti je mechanická skúška vlastností materiálu pre inžiniersky návrh, štruktúrnu analýzu a vývoj materiálu. Primárnym účelom testovania tvrdosti je určiť vhodnosť materiálu pre aplikáciu alebo špecifickú úpravu, ktorou materiál prešiel. Jednoduchosť testovania tvrdosti z neho robí najbežnejšiu metódu na skúmanie kovov a zliatin [1]. V dnešnej dobe automatizácie a robotizácie sa avšak tieto skúšky stále vykonávajú manuálne. Vyhodnocovanie výsledkov ovplyvňujú rôzne faktory. Najdôležitejší faktor je zaškolenie

zamestnancov, ktoré je časovo náročné a výsledky nie sú stopercentné. Z toho dôvodu sa zameriavame na vývoj algoritmov na automatický výpočet povrchu vtláčkov, ktoré nahrádzajú alebo podporujú manuálne vyhodnocovanie výsledkov.

Na automatický výpočet povrchu vtláčku existuje veľa metód, ktoré môžu byť pre daný problém použité. Predstavíme si ďalšie možnosti na automatické spracovanie meraní vtláčkov.

Prvé štúdie sú zamerané na detekciu povrchu vtláčku pomocou hľadania hraníc vtláčku. V štúdiu [2] použili metódu *Adaptive Ballon Active Contour*. Vyznačuje

sa tým, že nie sú potrebné kroky spracovania a následného spracovania, pretože matematická formulácia je odolná voči šumu. Hlavným prínosom je nová vnútorná energia krivky začlenená do tradičnej metódy obrysu. Umožňuje aby obrysová krivka vyhovovala vtlačeniu tvrdosti, aj keď vzorka obsahuje chyby. V práci [3] navrhli metódu hrubej a jemnej lokalizácie na presné umiestnenie rohu vtláčku. Na určenie polohy a veľkosti vtláčku používali proces hrubej lokalizácie. Počas jemnej lokalizácie sa lineárne rovnice okrajov vtláčku vypočítajú metódou prekladania čiar.

Následne aplikovali konvolučné neurónové siete na výpočet povrchu vtláčku. Konvolučnú neurónovú sieť používali [4] na analýzu obrazu, klasifikáciu objektov a detekciu oblastí objektov. Vyškolili ju na 1920 snímkach vtláčkov a naučili ju detegovať rohy vtláčkov. Využívajú konvolučnú neurónovú sieť na presnejšie meranie diagonálnej dĺžky vtláčku. V práci [5] vytvorili metódu konvolučných neurónových sietí na detekciu ohraničujúceho obdĺžnika vtláčku Vickersovej tvrdosti. Metóda automaticky extrahuje prvky, ktoré sú potrebné na rozpoznanie oblasti vtláčku. Používali dva typy CNN na presné meranie podľa Vickersa, aby zabezpečili presnejší výpočet povrchu vtláčku. Pre presnejšie meranie vtláčku, použili metódu CNN, na segmentovanie Vickersovho vtláčku od pozadia na obrázkoch. Na detegovanie používali obdĺžnik, ktorý ohraničuje vtláčok. Následne obdĺžnik použili na výpočet uhlopriečok vtláčku. Vďaka schopnosti strojového učenia CNN, môže navrhovaná metóda, ak je primerane vyškolená, presne segmentovať Vickersove vtláčky z obrázkov. [6]

V poslednej štúdii sa zamerali na hľadanie povrchu vtláčku s využitím 3D plôch. V štúdii [7] vytvorili novú metódu zloženú na 3D povrchovej topografii vtláčku pre robustnejšie meranie Vickersovej tvrdosti. 3D vyhodnocovacia metóda s informáciami v smere osi Z ponúka vysokú presnosť merania tvrdosti na povrchoch s rôznou kvalitou povrchu.

Hlavným cieľom bude vytvorenie programu na automatické vyhodnotenie Vickersovej tvrdosti zo série snímkov zosnímaných CCD kamerou a výpočet povrchu vtláčku.

Najskôr si popíšeme postup tvorby programu. V prvej časti programu si vysvetlíme, ako budeme spracovávať jednotlivé snímky z CCD kamery, aby sme dokázali zo série snímkov vybrať najostrejšiu snímku vtláčku. V druhej časti programu si vysvetlíme a popíšeme postup úpravy najostrejšej snímky vtláčku, aby sme mohli detegovať vtláčok a urobiť výpočet povrchu vtláčku. V ďalšej časti sa zameriame na porovnanie meraní a verifikáciu výsledkov z programu. Funkčnosť programu pre vyber najostrejšej snímky budeme overovať na dvoch meraniach na prístroji V 10/HT. Vytvorili sme súbor

devätnástich snímkov jedného merania pomocou CCD kamery, snímky majú rôznu kvalitu ostroti obrazu. Verifikáciu výsledkov povrchov vtláčkov budeme overovať na dvoch meraniach vytvorených na Žilinskej univerzite. Merania používame na verifikáciu výsledkov, pretože na Žilinskej univerzite prebiehalo meranie na prístroji ST-2000 Zwick Roell, ktorý ma v sebe zabudovaný program na automatické vyhodnocovanie vtláčkov. Na Žilinskej univerzite sme vytvorili na dvoch vzorkách štyri skúšky tvrdosti. Z meraní sme si vyexportovali snímky na výpočet merania povrchu vtláčku.

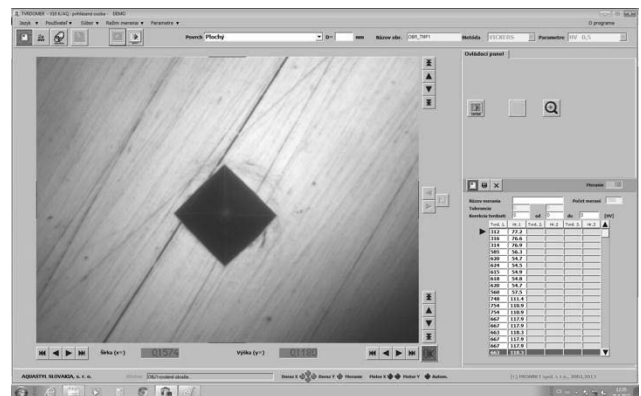
1 OPIS PROGRAMU

V programe *Matlab* sme vytvorili program na automatické vyhodnocovanie povrchu vtláčku. Pri tvorbe programu sme používali základné funkcie *Matlabu* a *Image Processing Toolbox*. Program sme si rozdelili na tri časti:

- úpravu jednotlivých snímkov a výber najostrejšej snímky vtláčku,
- úprava najostrejšej snímky na detegovanie povrchu vtláčku,
- výpočet povrchu vtláčku.

V prvom kroku musíme upraviť snímky, aby sme ich mohli použiť na ďalšie spracovanie. Ako môžeme vidieť na obr. 1, musíme riešiť viacero problémov:

- snímky sú vo farebnom prevedení - potrebná konverzia snímkov do monochromatickej farebnej škály,
- snímka vtláčku je vytvorená ako snímka obrazovky - je potrebné urobiť výrez oblasti, na ktorej sa nachádza vtláčok,
- snímky majú rôznu ostrosť - je potrebné vybrať najostrejšiu snímku.



Obr. 1. Originálna snímka

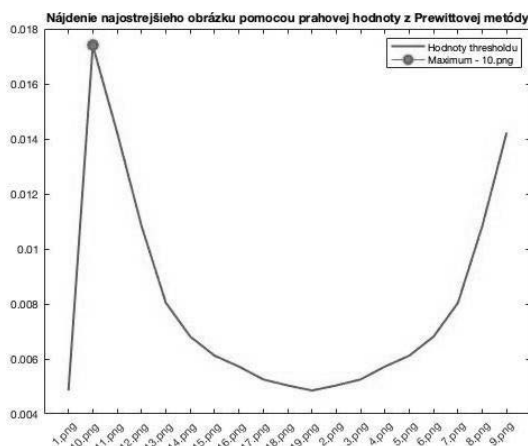
Pomocou cyklu „for“ načítavame postupne snímky zo série snímkov rôznej ostroti, ktoré boli vyhotovené pre konkrétny vtláčok. Najskôr snímky orežeme, aby sme sa zamerali iba na oblasť v okolí vtláčku. Pre ďalšie spracovanie je potrebné snímky prekonvertovať pomocou príkazu „rgb2gray“ do

monochromatickej farebnej škály odtieňov sivej. Nafotené snímky obsahujú okrem samostatného vtlaku aj rôzne chyby a šum. Na odstránenie menších chýb a šumu sme použili medián filter. Tento typ filtrovania sme zvolili, pretože pri odstraňovaní šumu a rôznych chýb zachováva ostrosť hrán.

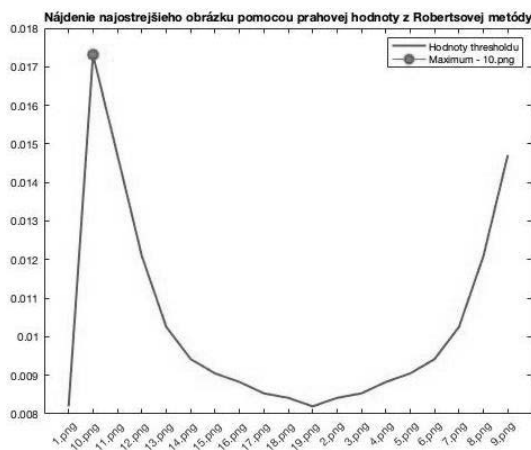
Pre nájdenie najostrejšej snímky budeme porovnávať prahové hodnoty snímok. Prahová hodnota je jedna z výstupných dát, ktoré používame pri metóde detekcie hrán. Pre nájdenie prahových hodnôt používame tri rôzne metódy detekcie hrán:

- Robertsovu metódu,
- Prewittovu metódu,
- Sobelovu metódu.

Upravené snímky sme na konci cyklu „for“ vkladali do jednej premennej, na ktorú sme následne aplikovali funkciu „edge“. Z funkcie „edge“ sme používali iba vypočítanú prahovú hodnotu tzv. *threshOut*. Hodnoty sme postupne ukladali do troch rôznych vektorov, pričom každý vektor patril jednej metóde na detekciu hrán. Pomocou funkcie „max“ sme našli vo vektore najväčšiu hodnotu. Pre rýchlejšie vyhodnotenie jednotlivých metód sme si vytvorili grafy.

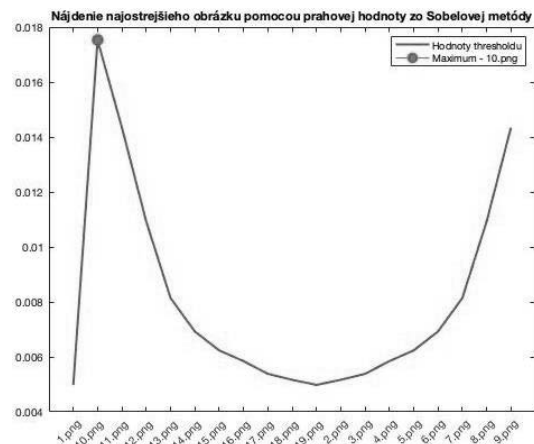


Obr. 2. Graf prahových hodnôt s použitím Prewittovej metódy



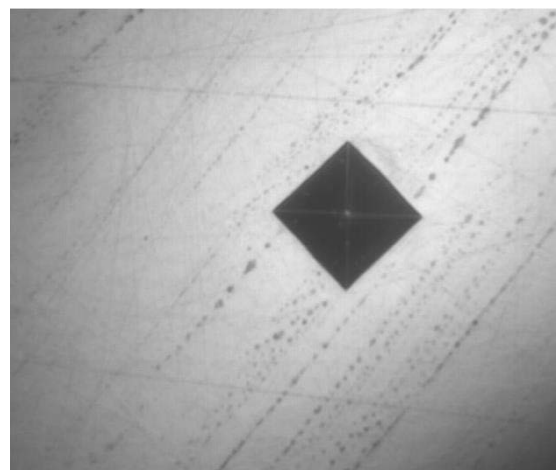
Obr. 3. Graf prahových hodnôt s použitím Robertsovej metódy

Na x-ovej osi sú zobrazené názvy snímok a na y-osi sú zobrazené prahové hodnoty snímok. Modrou krivkou sú znázornené prahové hodnoty snímok. Červeným bodom znázorňujeme najvyššiu prahovú hodnotu pre konkrétnu snímku.



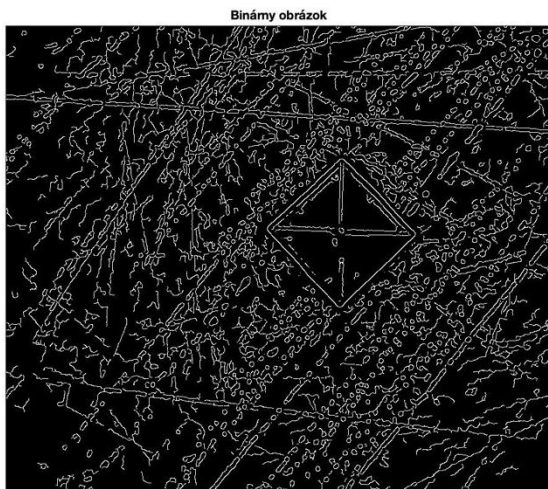
Obr. 4. Graf prahových hodnôt s použitím Sobelovej metódy

Tri metódy sme použili, aby sme porovnali tieto metódy navzájom a zistili, aké výsledky dostaneme pri ich použití. Nakoľko sa výsledky zhodujú, môžeme vo výslednom programe použiť, ktorúkoľvek metódu. Pomocou funkcie „max“ vieme zistiť aj pozíciu, na ktorej sa maximálna hodnota vektora nachádza a preto za predpokladu, že najostrejšiu snímku považujeme tú s maximálnou hodnotou *threshOut* vieme určiť, ktorá zo série snímok je najostrejšia (obr. 5).



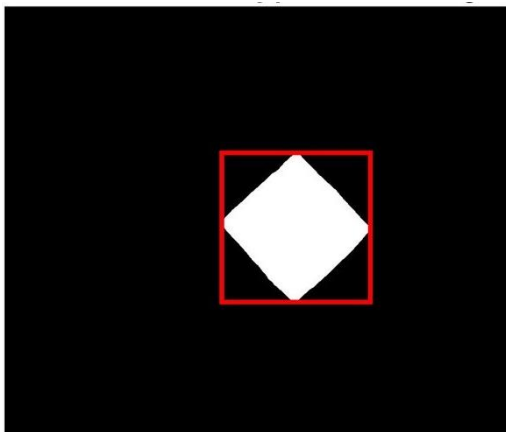
Obr. 5. Najostrejšia snímka

Pre vhodné pracovanie s obrazom pri detegovaní tvaru si musíme najskôr snímku prekonvertovať do binárnej snímky. Na transformáciu snímok sme zvolili funkciu detekcie hrán. Hlavným výstupom je binárny obrázok. Použili sme *Cannyho* metódu, pretože používa dve prahové hodnoty na detekciu silných a slabých hrán. Keďže táto metóda používa dve prahové hodnoty na detekciu hrán je menšia pravdepodobnosť, že bude ovplyvnená šumom (obr. 6).



Obr. 6. Binárna snímka

Ako môžeme vidieť na obr. 6, snímka obsahuje všetky hrany, ktoré sú na snímke. Pred ďalším postupom musíme snímku upraviť. Najskôr pomocou funkcie *imfill* vyplníme diery na snímke. Potom aplikujeme príkaz „*bwareopen*“. Tento príkaz odstráni zo snímky malé objekty, ktoré pre nás nie sú dôležité. Snímku máme takmer pripravenú na výpočet povrchu vtláčku. Pre nájdenie objektov sme použili funkciu *regionprops*. Táto funkcia obsahuje rôzne vlastnosti, ktoré môžeme použiť na hľadanie objektov na obrázkoch. V našom prípade sme zvolili vlastnosť *BoundingBox*. Pomocou vlastnosti sa nám okolo vtláčku vytvorilo orámovanie (obr. 7).



Obr. 7. Povrch vtláčku nájdený pomocou funkcie *BoundingBox*

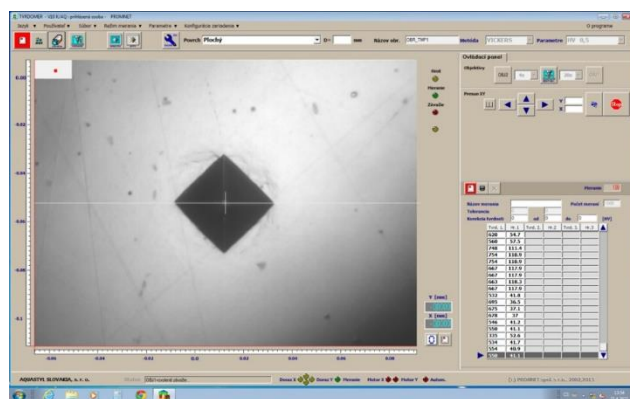
Rozmery orámovania sa zapisujú do vektoru, kde prvé čísla sú súradnice ľavého horného rohu, tretie číslo prislúcha horizontálnej šírke obdĺžnika a štvrté číslo je vertikálna výška obdĺžnika. pomôže vybrať a zobrazíť objekt, ktorý potrebujeme.

V poslednej časti programu riešime výpočet povrchu vtláčku. Pred výpočtom musíme najskôr priradiť hodnoty vo vektoroch popisujúcich rozmery orámovania (k premenným šírka a výška), ktoré popisujú uhlopriečky vtláčku. Rozmery uhlopriečok vtláčku musíme prepočítať z pixelov na milimetre, vďaka čomu je možné vypočítať povrch vtláčku. Na

prepočítanie pixelov na milimetre sme potrebovali zistiť presný rozmer pixelu, aby sme dostali čo najpresnejší výpočet povrchu vtláčku.

Nakoľko z merania na prístroji *V 10/HT* sme dostali snímky z obrazovky, na ktorých bola znázornená stupnica pre jednotlivé osi, mohli sme rozmer pixelu vypočítať ručne. Pomocou mierky, ktorá je okolo snímky (obr. 8) sme z *x*-ovej osi zistili, že na šírke 0,1 mm sa nachádza 646 pixelov a na *y*-osi sme zistili, že na výške 0,1 mm je 645 pixelov. Následne sme pomocou priamej úmery zistili, že jeden pixel má šírku 0,000155 mm a výšku 0,000155 mm.

Na univerzite sa povrchy vtláčkov počítajú pomocou automatického vyhodnocovacieho programu. Program si na základe vlastností kamery sám vypočíta rozmer jedného pixelu. V tomto prípade mal pixel rozmer 0,00023688664x0,00023688664 mm.



Obr. 8. Mierka snímky vtláčku

2 POROVNANIE MERANÍ S PRÍSTROJOM V 10/HT

V tejto časti sa budeme venovať porovnávaniu meraní medzi manuálnym prístrojom *V 10/HT* a nami navrhnutým programom. Robili sme merania na dvoch vzorkách s rozdielnou tvrdosťou. Z oboch meraní sme si vytvorili devätnásť snímok vtláčkov. Vtláčky boli odfotené rôznej ostrosti. Ostrosť snímky je ovplyvnená vzdialenosťou kamery od meranej vzorky. Pri výbere snímky vtláčku, sme si overovali funkčnosť programu. Súbor snímok bol spracovaný veľmi podobne a preto sme si vytvorili grafický pracovný postup.

Po spracovaní snímok nami navrhnutým programom. Povrch vtláčku pri prvom meraní vyšiel 571 mm². Povrch vtláčku pri meraní na tvrdomeri vyšiel 580 mm². Rozdiel medzi manuálnym meraním a výpočtom pomocou nami navrhnutého programu vyšiel 1,6%.

Povrch vtláčku pri druhom meraní vyšiel 673 mm². Povrch vtláčku na tvrdomeri *V 10/HT* vyšiel 682 mm². Rozdiel medzi meraním povrchu vtláčku na tvrdomeri a meraním pomocou programu je 1,3 %.

3 POROVNANIE MERANÍ SO ŽILINSKOU UNIVERZITOU

Na *Žilinskej univerzite* sme robili meranie pre dve vzorky s rozdielnou tvrdosťou. Počas merania sme na oboch vzorkách vytvorili viacero vtláčkov pre presnejší výpočet povrchu vtláčku a získanie vyššieho počtu dát.

Meranie využívame na verifikáciu vytvoreného programu, pretože prístroj na meranie mikrotvrdosti má tento program zabudovaný v tvrdomeri. V oboch meraniach sme vytvorili štyri snímky vtláčkov. Snímky sú zaostrené a nie je teda potrebné riešiť výber najostrejšej snímky vtláčku. Nebolo potrebné ručne zisťovať rozmer jedného pixelu, keďže program mal v sebe tento výpočet zabudovaný. Jeden pixel má rozmer $0,00023688864 \times 0,00023688864$ mm.

Pri spracovaní používame rovnaký princíp spracovania, ktorý sme si graficky znázornili.

Pri porovnávaní prvého merania medzi programom a *Žilinskou univerzitou* nám vyšli takéto výsledky. Prvý povrch vtláčku vyšiel 568 mm^2 . Povrch vtláčku na *Žilinskej univerzite* vyšiel 562 mm^2 . Rozdiel medzi meraniami je 1,1 %.

Druhý povrch vtláčku vyšiel 568 mm^2 . Povrch vtláčku na *Žilinskej univerzite* vyšiel 562 mm^2 . Percentuálny rozdiel medzi povrchmi vtláčku je 1,1 %.

Tretí povrch vtláčku vyšiel 582 mm^2 . Povrch vtláčku na *Žilinskej univerzite* vyšiel 572 mm^2 . Rozdiel medzi meraniami na univerzite a meraniami programu je 1,7 %.

Štvrtý povrch vtláčku vyšiel 565 mm^2 . Povrch vtláčku na *Žilinskej univerzite* vyšiel 562 mm^2 . Percentuálny rozdiel medzi výpočtami povrchov vtláčkov je 0,5 %.

V tomto meraní sa rozdiel medzi výpočtom povrchu vtláčkov pohybuje v rozmedzí od 0,5 % do 1,7 %.

Pri porovnaní druhého merania medzi programom a *Žilinskou univerzitou* nám vyšli takéto výsledky.

Povrch prvého vtláčku vyšiel 670 mm^2 . Povrch vtláčku vypočítaný na univerzite vyšiel 641 mm^2 . Percentuálny rozdiel medzi meraniami je 4,5 %. Takýto veľký rozdiel medzi meraniami mohol vzniknúť aj z dôvodu zlého merania na univerzite, pretože v ďalších troch meraniach sú hodnoty výsledkov povrchu vtláčku vyššie.

Povrch druhého vtláčku vyšiel 662 mm^2 . Povrch vtláčku vypočítaný na univerzite vyšiel 666 mm^2 . Rozdiel medzi výpočtom povrchu vtláčku na univerzite a programom je 0,6 %.

Povrch tretieho vtláčku vyšiel 666 mm^2 . Povrch vtláčku vypočítaný na univerzite vyšiel 658 mm^2 . Rozdiel medzi výpočtom povrchu vtláčku na univerzite a programom je 1,2 %.

Povrch štvrtého vtláčku vyšiel 670 mm^2 . Výpočet povrchu vtláčku na univerzite vyšiel 662 mm^2 .

Rozdiel medzi výpočtom povrchu vtláčky na univerzite a programom je 1,2 %.

V meraní sa percentuálny rozdiel medzi meraniami pohybuje od 0,6 % do 1,2 %.

ZÁVER

Hlavným cieľom bolo vytvorenie a verifikácia programu na automatické spracovanie snímky povrchu vtláčku vytvoreného CCD kamerou. Najskôr sme si predstavili a popísali jednotlivé funkcie programu.

Prvé porovnanie meraní bolo medzi prístrojom *V 10/HT* a nami vytvoreným programom. Porovnávali sme dve vzorky s rôznou tvrdosťou. Pri oboch meraniach sme vytvorili súbory devätnástich snímok. Snímky prechádzali od nezaostrenej snímky až po zaostrenú snímku a opäť k rozostrenej snímke. Boli merané postupne s rovnakým časovým krokom. Snímky boli vytvorené pomocou snímky obrazovky, pretože merací prístroj je určený na manuálne vyhodnocovanie výsledkov a toto bola jediná cesta, ako získať dáta na porovnanie. Snímky sme spracovali pomocou nami vytvoreného programu a overili sme si jeho funkčnosť pri výbere najostrejšej snímky vtláčku a výpočte povrchu vtláčku. Percentuálny rozdiel medzi meraniami na prístroji *V 10/HT* a programom boli od 1,3 % do 1,6 %.

Druhé porovnávanie výsledkov bolo so *Žilinskou univerzitou* a nami vytvoreného programu. Na *Žilinskej univerzite* sme robili meranie na dvoch vzorkách s rôznou tvrdosťou. Pri oboch vzorkách sme vytvorili štyri vtláčky a vyexportovali sme si snímky vtláčkov. Snímky boli zaostrené a nebolo preto potrebné v tejto časti riešiť výber najostrejšej snímky vtláčku. Bolo to umožnené, pretože merací prístroj na univerzite má v sebe zabudovaný program na automatické vyhodnocovanie povrchov vtláčkov. Preto sme dané meranie použili na verifikáciu vypočítaných povrchov vtláčkov s nami vytvoreného programu. Pri prvom meraní bol percentuálny rozdiel medzi *Žilinskou univerzitou* a programom od 0,5 % do 1,7 %. Pri druhom meraní bol percentuálny rozdiel medzi meraniami od 0,6 % do 1,2 %. V jednom meraní bol percentuálny rozdiel až 4,5 %. Tento rozdiel bol spôsobený nesprávnym vyhodnotením povrchu vtláčku na *Žilinskej univerzite*.

Na základe vyhodnotenia výsledkov, môžeme konštatovať, že cieľ na vytvorenie programu na automatické vyhodnotenie snímok povrchu vtláčkov vytvorených pomocou CCD kamery bol splnený, keďže rozdiel výsledkov bol menší ako 2 %.

PodĎakovanie

Tento článok vznikol za podpory KEGA projektu 054ŽU – 4/2021.

LITERATÚRA

- [1] CHANDLER, H. (2004): *Hardness Testing, 2nd Edition*. ASM International®, ISBN 0-87170-640-7, SAN: 204-7586.
- [2] FRANCISCO, D. L. - MOREIRA, MAURÍCIO N. - KLEINBERG, HEMERSON - F. ARRUDA et al. (2016): *A novel Vickers hardness measurement technique based on Adaptive Balloon Active Contour Method*.
Dostupné na:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417415006533#sec0007>
https://books.google.sk/books?id=rxg0qXoq4N0C&printsec=frontcover&dq=hardness+measurement&hl=sk&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=hardness%20measurement&f=false.
- [3] ZEXIAN, L. - FENG, Y. (2021): *A Novel coarse-to-fine Localization Algorithm for Automated Vickers Hardness Measurement*. Dostupné na:
https://www.researchgate.net/publication/355953671_A_Novel_coarse-to-fine_Localization_Algorithm_for_Automated_Vickers_Hardness_Measurement.
- [4] TANAKA, Y. - SEINO, Y. - HATTORI, K. (2018): *Vickers hardness measurement by using convolutional neural network*. Dostupné na:
https://www.researchgate.net/publication/328896872_Vickers_hardness_measurement_by_using_convolutional_neural_network.
- [5] TANAKA, Y. - SEINO, Y. - HATTORI, K. (2020): *Automated Vickers hardness measurement using convolutional neural networks*. Dostupné na:
https://www.researchgate.net/publication/342941188_Automated_Vickers_hardness_measurement_using_convolutional_neural_networks.
- [6] ZEXIAN, L. - FENG, Y. (2021): *Automated measurement of Vickers hardness using image segmentation with neural networks*. Dostupné na:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224121011106>.
- [7] DAEMI, B. - TOMKOWSKI, R. - ARCHENTI, A. (2020): *High precision 3D evaluation method for Vickers hardness measurement*. Dostupné na:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S007850620300305#sec0010>.

Prehľad doterajšieho výskumu výroby harmonického prevodu

Daniela Kepeň Harachová, Ing., PhD.*

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 9, 042 00 Košice.
E-mail: daniela.harachova@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 2366

Silvia Maláková, doc. Ing., PhD.

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

Samuel Sivák, Ing.

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

An overview of current research on harmonic gear

Abstract: Harmonic Drive, also called Harmonic Drive gear, harmonic gear, or strain wave gearing, mechanical speed-changing device, invented in the 1950s, that reduces the gear ratio of a rotary machine to increase torque. It operates on a principle different from that of conventional speed changers. Harmonic drive products are unique precision speed reducers playing important roles in robots, semiconductor manufacturing systems, factory automation equipment and furthermore, in aerospace equipment that may convey our human dreams.

Keywords: harmonic drive, flexible wheel, zero backlash gear, insertion the teeth.

ÚVOD

Úlohou harmonickej prevodovky je vytvorenie vysokého prevodového pomeru prostredníctvom jedného stupňa. V dôsledku toho, že u harmonických prevodov je jeden člen poddajný, majú tieto prevody v porovnaní s planétovými prevodmi tri zvláštnosti:

- prvá zvláštnosť spočíva v tom, že v zábere a tým i prenose sa súčasne zúčastňuje väčší počet zubov. Čím väčšie zaťaženie sa bude prenášať poddajným členom, tým sa bude zväčšovať i jeho deformácia a teda i väčší počet zubov sa bude nachádzať v ozubenom zábere,
- druhá zvláštnosť harmonického prevodu spočíva v tom, že v dôsledku zmeneného tvaru poddajného kolesa od zaťaženia, alebo v dôsledku zvoleného tvaru vačky generátora dochádza k veľmi malému relatívnemu pohybu medzi zubami, nachádzajúcimi sa v ozubenom zábere,

- tretia zvláštnosť je tiež podmienená tvarom poddajného kolesa a spočíva v zmenšení uhlov tlaku v kinematickej dvojici generátor vln – poddajné koleso, čo sa prejaví na zmenšení trecích strát tejto dvojice v porovnaní unášač – satelit u planétového prevodu.

Z uvedených zvláštností harmonických prevodov vyplýva, že tieto prevody v porovnaní s planétovými prevodmi majú menšie rozmery a vyššiu účinnosť.

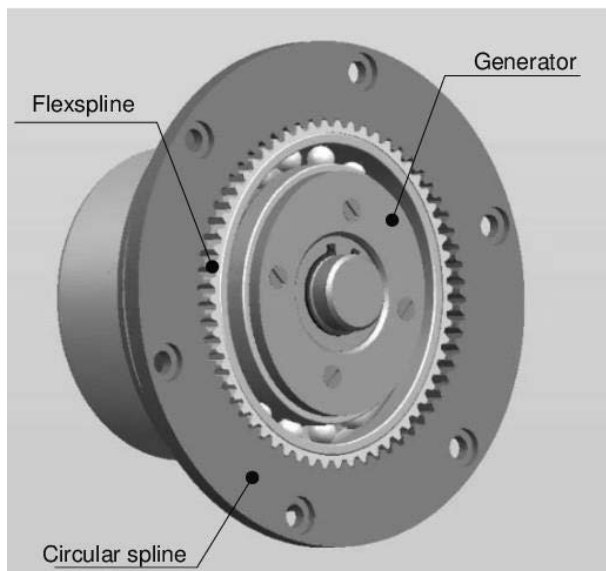
1 POPIS HARMONICKEJ PREVODOVKY

Harmonický ozubený prevod (obr. 1) je riešený ako plávajúci dvojnóbový vačkový generátor vln. Tá sa skladá z troch hlavných komponentov:

- generátor vln (*Wave Generator*),
- pružné ozubené koleso (*Flexspline*),
- tuhé ozubené koleso (*Circular Spline*).

Pružné koleso má vonkajšie ozubenie, tuhé koleso má vnútorné ozubenie. Obidve kolesá majú rovnaký modul a rozstup. Pružné koleso má menej zubov ako

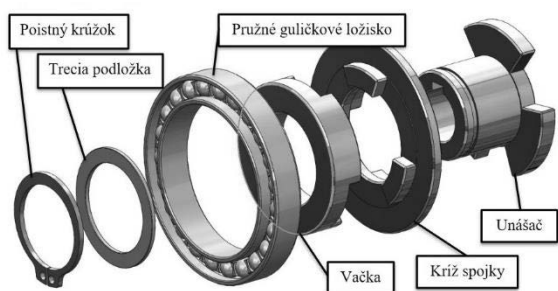
tuhé koleso. Pôsobením generátora vln sa pružné koleso zdeformuje a zuby pružného kolesa sa zasunú do zubových medzier tuhého kolesa – dostanú sa do záberu.



Obr. 1. Harmonická prevodovka

1.1 Generátor vln

Generátor vln je vo väčšine prípadov vstupným členom a je namontovaný na vstupný hriadeľ prevodovky. Nepresnosti suložením vstupného hriadeľa sú čiastočne eliminované pripojením generátora vln harmonického prevodu. Skladá sa z viacerých prvkov (obr. 2), pričom jej kľúčovými elementami sú vačka a špeciálne pružné guľkové ložisko.



Obr. 2. Zostava generátora vln harmonického prevodu

Vačka, ktorá má špeciálne upravený tvar, je spojená s poháňaným unášačom pomocou *Oldhamovej* spojky. Tento spôsob montáže s využitím spojky umožní relatívny pohyb medzi vačkou a unášačom.

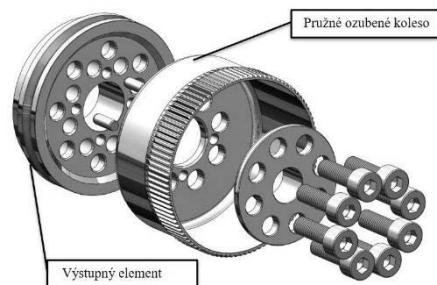
1.2 Pružné ozubené koleso

Pružné ozubené koleso je tvorené tenkostenným valcom, pričom na jeho vonkajšom okraji (otvorenom) sa nachádza vonkajšie ozubenie. Uzavretá časť valcovej nádoby je vo väčšine prípadov zosilnená, keďže sa k nej priamo pripája výstupný

hriadeľ prevodovky prenášajúci vysoké krútiace momenty.

Tvar pružného ozubeného kolesa závisí od typu vlnového generátora, ktorý sa zasúva pri montáži do otvorenej časti pružného ozubeného kolesa [1]. Obrázok 3 zobrazuje zostavu pružného ozubeného kolesa aj s montážou výstupného elementu prevodovky.

Skrz uzavretú časť valcovej nádoby sú vedené diery. Pomocou skrutiek vedených skrz tieto diery je následne primontovaný výstupný člen prevodového stupňa, ku ktorému sa dajú pripájať záťaže potrebným spôsobom.

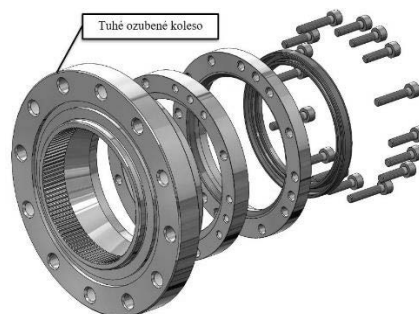


Obr. 3. Zostava pružného ozubeného kolesa harmonického prevodu

Pružné ozubené kolesa podlieha počas behu prevodovky neustálej deformácii od generátora vln a zároveň dochádza k viacnásobnému kontaktu v ozubení medzi pružným ozubeným kolesom a tuhým kolesom. Z tohto dôsledku je dôležitá správna voľba materiálu pružného ozubeného kolesa.

1.3 Tuhé ozubené koleso

Najtuhší element prevodovky je tuhé ozubené koleso, ktoré je tvorené vnútorným ozubením a zároveň je konštruované tak, aby celej zostave harmonickej prevodovky zaručilo čo najväčšiu pevnosť. Ozubenie je obklopené hrubým oceľovým prstencom vyrobeného z oceľovej liatiny zvýšenej pevnosti (obr. 4).



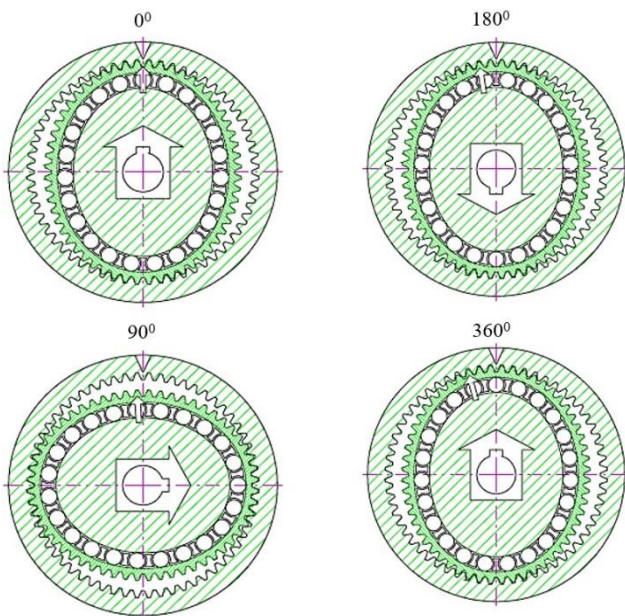
Obr. 4. Zostava tuhého ozubeného kolesa harmonického prevodu

Prstenc je na rozdiel od generátora vln kruhového tvaru a vo väčšine konfigurácii harmonického prevodu je počas celého chodu prevodovky v stabilnej

polohe, voči ktorej dochádza k rotačnému pohybu generátora vln a pružného kolesa.

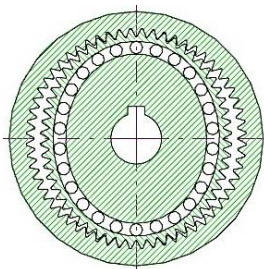
2 PRINCÍP PRÁCE HARMONICKEJ PREVODOVKY

1. Pružné koleso s vonkajším ozubením a počtom zubov o dva menšie ako tuhé koleso je deformované cez eliptický generátor vln, na ktorý je privádzaný vstupný otáčavý pohyb, a jeho zuby zapadajú do zubových medzier tuhého ozubeného kolesa v mieste hlavnej eliptickej osi (obr. 5).
2. Pri otáčaní generátora vln v smere hodinových ručičiek sa posúva záberová zóna s hlavnou eliptickou osou.
3. Pri otočení generátora vln o 180° v smere hodinových ručičiek sa relatívne posunie pružné koleso voči tuhému kolesu v opačnom smere o jeden zub.
4. Pri úplnom otočení generátora vln sa posunie pružné koleso o 2 zuby voči tuhému kolesu v opačnom smere.

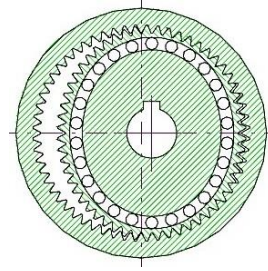


Obr. 5. Princíp práce harmonickej prevodovky

Pružné koleso má zaberat' s tuhým ozubeným kolesom po celej dĺžke, generátora vln musí byť umiestnený presne pod priestorom záberu. Pri montáži vlnového generátora je treba dbať, aby záber zubov bol rovnomerne rozložený na oboch stranách veľkej osi elipsy (obr. 6).



Obr. 6. Správne



Obr. 7. Nesprávne

Chybná montáž sa prejavuje zvýšeným vstupným krútiacim momentom a nerovnomerným hlučným chodom prevodovky (obr. 7).

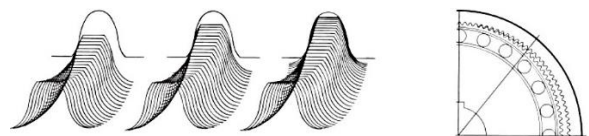
2.1 Ozubenie v harmonickej prevodovkách

Zo začiatku bolo pri harmonickej prevodovkách používané ozubenie s lichobežníkovými zubmi. Tieto prevodovky mali v zábere 15 % ÷ 20 % zubov, čo umožňovalo prenášať relatívne vysoký krútiaci moment [6]. Dochádzalo tu ale k opotrebovaniu zubov, hlavne ich špičiek, a následkom toho sa znižovala presnosť a opakovateľnosť (obr. 9).



Obr. 9. Pôvodné ozubenie harmonickej prevodovky

Z dôvodu zvyšovania nárokov na presnosť bol vyvinutý nový typ ozubenia pre harmonickej prevodovky označovaný ako „IH“ (obr. 10). U tohto nového typu ozubenia má bok zuba tvar evolventy a zlepšujú sa tým samozrejme vlastnosti ozubenia. Vďaka tomu, že je tu v zábere až 30 % zubov dochádza k ďalšiemu navýšeniu prenositeľného krútiaceho momentu, zvýšeniu torznej tuhosti a tiež zvýšeniu životnosti prevodu. Ďalej má tento typ nulový mŕtvý chod a z toho vyplývajúci presnosť a opakovateľnosť.



Obr. 10. Nový typ ozubenia „IH“

3 VLASTNOSTI HARMONICKÝCH PREVODOVKY

Harmonickej prevodovky sa vyznačujú možnosťou vysokého prevodového pomeru. V jednom stupni je možné dosiahnuť s komponentmi harmonickej prevodovky prevodový pomer až 160, pritom sú tieto prevodovky menšie a ľahšie ako klasické prevodové mechanizmy.

3.1 Účinnosť prevodu

Účinnosť zostavy komponentov harmonických prevodoviek je funkciou mnohých pracovných podmienok. Medzi hlavné činitele ovplyvňujúce účinnosť patria:

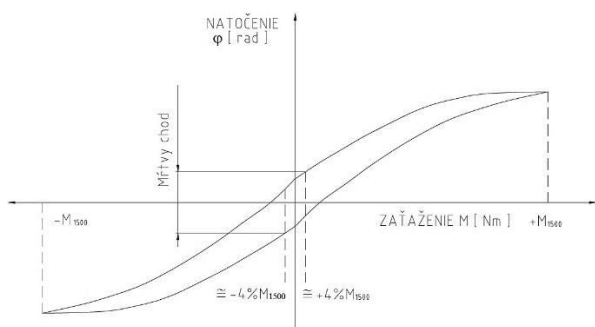
- zaťaženie prevodu,
- množstvo a viskozita použitého mazacieho prostriedku,
- vstupné otáčky.

Vyššia účinnosť sa dosahuje pri nižších otáčkach, nižšej viskozite oleja a pri vyšších prevodoch. Pri splnení týchto podmienok môže byť účinnosť až 90 %.

3.2 Mŕtvy chod (backlash) a tuhosť prevodu

Princíp fungovania *HP* je založený na mechanizme rotačne eliptickej deformácie *FS* pomocou eliptického *WG* a následným odvalovaním ozubenia. Tento mechanizmus však v sebe skrýva dva zdroje nelineárneho chovania harmonického prevodu:

- tuhosť prevodu,
- mŕtvy chod.



Obr. 11. Mŕtvy chod a tuhosť harmonickej prevodovky

Obrázok 11 [4] predstavuje záznam torznej tuhosti harmonického prevodu pri fixovanom vstupe. Jej hodnota sa mení s veľkosťou zaťaženia prevodu. So zväčšujúcim sa zaťažením sa dostáva vplyvom deformácii do záberu stále väčší počet zubov a torzná tuhosť sa zvyšuje.

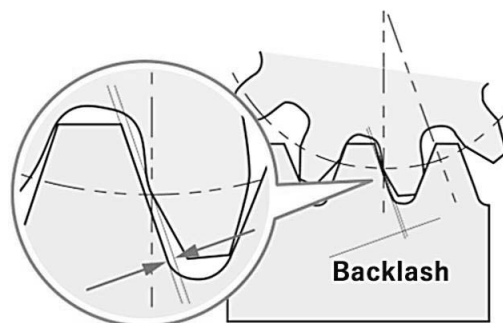
Mŕtvy chod (*Backlash*) (obr. 12) medzi zubami ozubenia je prítomný v ozubených prevodoch z rozličných dôvodov:

- zabezpečenie dostatočného mazania medzi zubami,
- eliminovanie príliš veľkého kontaktu v ozubení a prípadného zadrhnutie ozubenia.

3.2.1 Výrobné chyby a nepresnosti

Backlash je definovaný ako prebytočná vôľa medzi odvalujúcimi sa zubami (obr. 6 [21]) oproti ideálnemu prípadu odvalovania evolventného profilu, kedy uvažujeme ideálny stav bez vôle. V praxi sa mŕtveho chodu dosiahne úpravou profilu ozubenia

alebo zmenou (zvýšením) osovej vzdialenosti medzi dvojicou ozubených kolies. Maximálna hodnota mŕtveho chodu je pre harmonické prevody $v_{max} = 8,7 \cdot 10^{-4}$, tzn. 3 uhlové minúty [21]. Z tohto vyplýva, že harmonické prevody sú veľmi presné, čo je tiež jednou z ich predností.



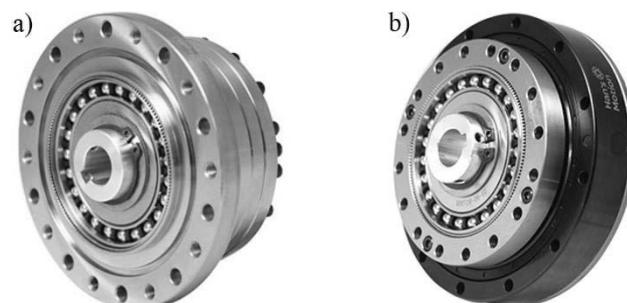
Obr. 12. Mŕtvy chod (*Backlash*)

5 ZÁKLADNÉ TYPY HARMONICKÝCH PREVODOVIEK (HP)

Tak, ako sa postupne vyvíjal trh a jeho požiadavky, tak sa aj harmonické prevody museli zdokonaľovať. Vývoj sa sústredil na presnosť, efektívnosť, zvyšovanie prenášaného krútiaceho momentu a životnosť komponentov. Ďalej boli vyvinuté komponenty veľmi tenké pre úsporu miesta a tiež komponenty s možnosťou vedenia hriadeľa stredom celku. Teraz si priblížime možnosti a vlastnosti jednotlivých komponentov.

Typ *HP* série *HMCG* - skladá z troch základných komponentov: flexibilný prevod, pevný prevod a generátor vln. Flexibilný prevod je štandardná konštrukcia v tvare pohára a jeho vstupný hriadeľ priamo spolupracuje s vnútorným otvorom generátora vln a spája sa s ním pomocou plochého kľúča alebo upevňovacej skrutky (obr. 13a).

HP série *HMHG* - patrí k štandardnej štruktúre dutého lemovania a celá konštrukcia je kompaktná. Jeho vstupný hriadeľ je spojený s vnútorným otvorom generátora vln cez *Oldhamovu* spojku (obr. 14b)).

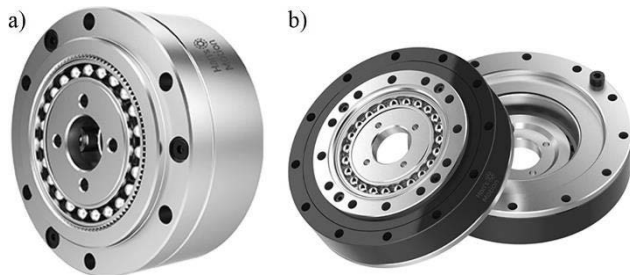


Obr. 13. a) *HP HMCG-II-E*, b) *HP HMHG-II*

Séria *HMCD* so záväzkom k nízkej hmotnosti a kompaktným rozmerom harmonickej prevodovky nielen zdedí výhody tradičných produktov, ale tiež realizuje odvážny tvarový dizajn založený na požiadavkách trhu. Štruktúru je ľahká a kompaktná,

takže *HP* je veľmi vhodný na použitie ako koncový spoj robota a redukcia klienta (obr. 14a)).

Séria *HMHD* je typ, kde sa presadzuje plochá štruktúra prevodu. Jeho axiálna dĺžka je polovičná ako u série *HMHG*. Pružné koleso využíva ultratenkú dutú prírubovú štruktúru a jej výstupná strana je inštalovaná s vysoko pevným krížovým valčekovým ložiskom. Vhodné pre aplikácie s požiadavkou na plochý dizajn (obr. 15b)).

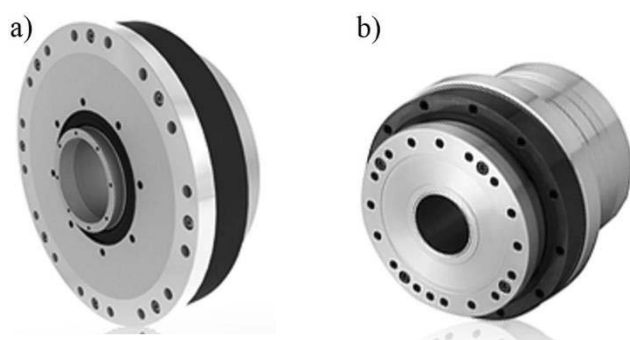


Obr. 14. a) *HP HMCD-II*, b) *HP HMHD-III* Jednoduchá jednotka

Bolo predstavených niekoľko nových sérií prevodoviek *Low Weight Harmonic Drive*, ktoré využívajú ľahké materiály krytu a optimalizovaný dizajn.

Prevodovky *CSG-LW* a *CSF-LW* sú o 30 % ľahšie ako predchádzajúce konštrukcie bez zníženia menovitého krútiaceho momentu alebo výraznej zmeny rozmerov rozhrania. Zahŕňajú súpravu komponentov *HP* v odľahčenom kryte a majú integrované vysokokapacitné krížové valčekové ložisko a výstupnú prírubu na podporu zaťaženia.

SHG-LW a *SHF-LW* (obr. 15a)) sú kompaktné prevodovky s dutým hriadeľom, ktoré sú o 20 % ľahšie ako štandardné jednotky *SHF*. Okrem funkcie dutého hriadeľa obsahuje prevodovka vysokokapacitné krížové valčekové ložisko a výstupnú prírubu na priamu montáž záťaže bez potreby dodatočného podporného ložiska.

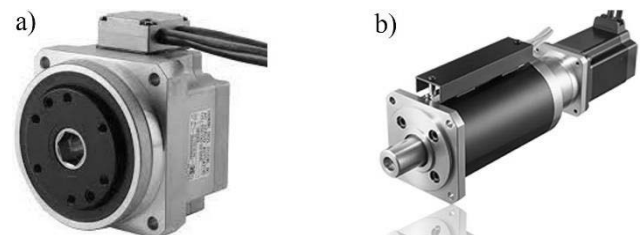


Obr. 15. a) *HP SHG-14-UH-LW*, b) *HP SHA-20*

AC servopohony série *SHA* poskytujú vysoký krútiaci moment. Tieto servopohony s dutým hriadeľom využívajú presné prevody *Harmonic Drive®* v kombinácii s bezkomutátorovým servomotorom a magnetickým absolútnym enkodérom. Pohon *SHA-20* (obr. 15b)) je najmenším pohonom v sérii *SHA*. Pohon s priemerom iba 94 mm a dĺžkou 108 mm

poskytuje maximálny krútiaci moment až 120 Nm [7]. Vyznačuje sa 17 mm dutým hriadeľom a robustným krížovým valčekovým ložiskom schopným niesť momentové zaťaženie 187 Nm.

FHA - tieto rotačné servopohony využívajú presné prevody *Harmonic Drive®* v kombinácii s výkonným bezkomutátorovým servomotorom a inkrementálnym kódovačom. *FHA* má nízky profilový faktor a má dutý hriadeľ cez stred výstupu. Táto vlastnosť dutého hriadeľa sa môže použiť na vedenie káblov, hadíc alebo laserov cez os rotácie (obr. 16a)).



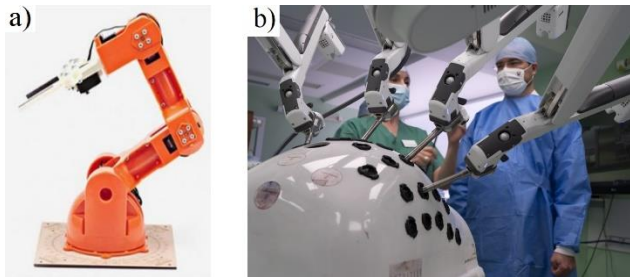
Obr. 16 a) pohon *FHA-C mini series*, b) pohon *LAH-80*

Lineárne pohony *LAH* sú dostupné v dvoch modeloch, *LAH-46* pre jednosmerné motory a *LAH-80* (obr. 16b)) pre krokové motory. Presná guľôčková skrutka poskytuje presnosť polohovania lepšiu ako 4 μm a opakovateľnosť 1 μm . Tento produkt je vhodný pre meracie prístroje, testovacie a kontrolné systémy, optické zariadenia, zariadenia na výrobu polovodičov a *LCD*.

6 HARMONICKÉ PREVODOVKY V PRAXI

Prevody a pohony *Harmonic Drive®* sa používajú v širokej škále aplikácií, z ktorých každá využíva inú charakteristiku technológie prevodov. Niektoré aplikácie závisia od nulovej vôle a vysokej presnosti polohy. Niektoré vyžadujú vysoký pomer krútiaceho momentu k hmotnosti. Ostatné závisia od jedinečných dostupných konfigurácií. Niektoré inštalácie využívajú všetky tieto atribúty. Priemyselná robotika (obr. 17a)) je jednou z hlavných oblastí použitia komponentov prevodovky *Harmonic Drive®*. Tieto aplikácie vyžadujú prevody s nulovou vôľou, s vysokou kapacitou krútiaceho momentu, vysokou torznou tuhosťou a vynikajúcou opakovateľnosť. Dizajn s dutým hriadeľom je tiež obľúbený, pretože umožňuje jednoduché, elegantné a spoľahlivé vedenie káblov. Prevodovky s veľkokapacitnými krížovými valčekovými ložiskami sa niekedy vyberajú kvôli ich kompaktnému tvaru a sú obzvlášť vhodné na použitie v osi robota, ktorá kladie na výstupné ložisko kľbu významné klopné momenty. Pokrok v oblasti medicínskeho vybavenia neustále zvyšoval požiadavky na vysoko presné riadenie pohybu. Príkladom toho sú prevodové jednotky používané v rotačných osiach stereotaktického manipulátora používaného na operácie mozgu (obr. 17b)).

Manipulátor je šesťosové robotické rameno, ktoré podporuje operačný mikroskop používaný chirurgom. Ako operácia postupuje, mikroskop prekrýva počítačové údaje o aktuálnom pohľade na operačnú oblasť, pričom funguje ako *head-up* displej, ktorý chirurga sprevádza počas operácie. Presnosť a spoľahlivosť *Harmonic Drive* sú rozhodujúce pre úspešné chirurgické zákroky.



Obr. 17. a) priemyselný robot, b) robotických chirurgických systémov pri operácii nádoru v mozgu

ZÁVER

Vyspelé mechatronické systémy dnešných polohovacích mechanizmov majú čoraz vyššie nároky na presnosť translačných a rotačných pohybov. Súčasťou mechatronického systému je taktiež riadiaca jednotka ovládajúca daný pohonový systém. Harmonické prevodovky majú široké uplatnenie v dôsledku špecifických a jedinečných vlastností vyplývajúcich z ich mechanizmu. Tento mechanizmus je založený na odvalovaní ozubenia spôsobeného eliptickou deformáciou pružného ozubeného kolesa. Má vynikajúce vlastnosti predovšetkým v ustálenom stave za konštantných otáčok a za vhodných okolitých podmienok. Tieto mechanizmy mimo ustálenej oblasti vykazujú veľmi nelineárnu charakteristiku a výrazne sa prejavuje kinematická chyba prevodu. Tieto charakteristiky sú zapríčinené z rozličných faktorov, predovšetkým z dôsledku konštrukcie prevodu.

Nelineárna torzná tuhosť prevodového mechanizmu spôsobuje problémy pre riadenie a reguláciu pohonovej sústavy. Táto problematika je aktuálna v mnohých oblastiach aplikácie harmonického prevodu, predovšetkým v aplikáciách s prioritou na presnosť polohovania.

Pod'akovanie

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

LITERATÚRA

- [1] IANICI, S. - IANICI, D. (2019): *Contributions to determining the trajectory of a point on the average fiber of the flexible wheel of a double harmonic transmission*. Analele Universitatii 'Eftimie Murgu' Vol. 26, no. 1, p. 99-106 ISSN: 1453-7397.
- [2] KRAJŇÁK, J. - URBANSKÝ, M. - ŽUĽOVÁ, L. (2022): *Investigation of air temperature change in the flexible element depending on connecting holes number during compressing of this element*. Projektowanie, badania i eksploatacja. - Bielsko-Biala (Poľsko) : Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Białej s. 299-306 [print]. - ISBN 978-83-66249-97-4
- [3] HARACHOVÁ, D. - MALÁKOVÁ, S. (2022): *Possibilities of use and characteristics of high-precision transmissions in machinery*. MM Science Journal. - Praha (Česko): MM Publishing Roč. 2022-November, s. 6014-6019 [print, online]. - ISSN 1803-1269.
- [4] *Katalóg HP RR SLOVAKIA* (2012).
- [5] CZECH, P. - ŁAZARZ, B. - TUROŃ, K. (2017): *Influence of conditions of vehicle motion on its economy*. Autobusy No. 6, p. 136-142 ISSN: 1509-5878.
- [6] *Katalóg - Harmonic Drive Gearbox - Harmonic Gearbox Solutions* (2018).
- [7] *Lightweight Harmonic Drive® Gears and Actuators Help Improve the Productivity of Factory Automation Systems*: online - www.harmonicdrive.net
- [8] CHEN, X. - LIU, Y. - XING, J. - LIN, S. - XU, W. (2014): *The parametric design of double-circular-arc tooth profile and its influence on the functional backlash of harmonicdrive*. Mech. Mach. Theory, roč. 73, s. 1–24.
- [9] NIKITIN Y. - BOŽEK P. - TURYGIN A. (2022): *Vibration diagnostics of spiroid gear*, Roč. 30, č. 1, s. 69. ISSN 2450-5781

Tvárnenie v hydraulickom prostredí explóziou

Ján Moravec, doc. Ing., PhD.*

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

Univerzitná 1/8215 010 26 Žilina.

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

Formation in a hydroenvironment by explosion

Abstract: The article describes and analyses the issue of explosive sheet metal forming in a hydro environment. In the introductory part, the necessary theoretical and technological knowledge is presented, which is necessary as a theoretical introduction to the issue. The explosion process in a liquid environment is described. The reflection from the surface and bottom of the tank used in the experiment is important. The paper only offers a view of the theoretical side of the process, because the legislative framework does not yet allow direct experimental work to be carried out, which must be done by a certified specialist in the handling of explosives.

Keywords: forming, explosion, sheet metal, pressure wave reflection, liquid environment

1 ÚVOD

Tvárnenie plechov pomocou energie uvoľnenej detonáciou výbušnín je jednou z progresívnych technológií. Uvedená metóda však vyžaduje pre svoj ďalší úspešný vývoj dôkladné pochopenie podstaty tvárniaceho procesu, vymykajúceho sa veľkosťou deformačnej rýchlosti a počiatočných parametrov energetického zdroja doposiaľ bežným meradlám. Prehlbovanie znalostí v tomto smere je však viazané prednostne na uplatnenie poznatkov o šírení rázových vln plniacich úlohu tvárniaceho nástroja [1].

Najpoužívanejším prenosovým prostredím býva voda. Tvárnenie prebieha buď v stabilnej vodnej nádrži, alebo sa potrebný vodný stĺpec získa naplnením napr. polyetylénového vaku vodou. V každom prípade môžu ovplyvniť tvárniaci pochod odrazy rázových vln od dna a stien nádrže a od hladiny. Minimálna, resp. dostatočná výška vodného stĺpca je potom dôležitá z hľadiska optimálneho využitia energie výbušniny. Príspevok sa venuje tomuto problému a uvádza výpočet nutnej výšky hladiny spolu so zisťovaním veľkosti zosilnenia účinku pri odraze od dna a stien nádrže.

1.1 Odborné pramene k problematike

Pre analyzovanie uvedenej oblasti sú k dispozícii ako vstupné zdroje, ktoré predstavujú dostatočnú základňu pre nasledujúce výskumy. Sféra plošného tvárnenia sa ukazuje ako schodná pre takéto pôsob spracovania kovov [1-3].

Aplikovaním hydrotvárnienia vo sfére strojárskkej výroby sa zaoberajú zdroje a takisto preberajú a prinášajú potrebné poznatky [6-8, 10-12, 14-16].

Dôležitá je pri tomto takisto analýza problematiky odrazu tlakovej vlny os stien a dna nádrže. Dôležité výpočty a opisy týchto javov sú zhrnuté v [4-5, 7-8, 13].

2 ROZBOR PROBLÉMU

2.1 Technológia tvárnenia explóziou

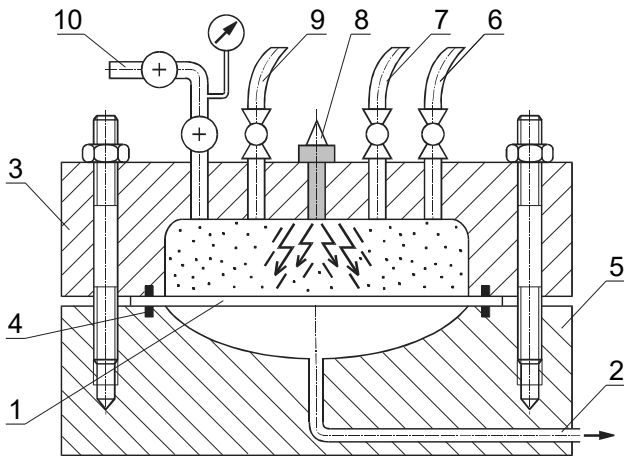
Táto technológia je určená ako bolo uvedené, pre tvárnenie pevných materiálov najmä plechov, ktoré sa nedajú tvárniť obvyklými spôsobmi. Veľká tvárniaca rýchlosť pôsobením explozívnych tlakov odstraňuje ťažkosti pri spracovaní týchto materiálov. Tvárnenie explóziou sa dá rozdeliť na dve skupiny (metódy):

Prvá využíva tlak vzniknutý spálením, napr. pušného prachu, v uzavretom priestore. Vzniknutý tlak pôsobí na plech ako kvapalina pri hydrotvárnení. Plech musí byť dobre utesnený a z dutiny lisovnice je potrebné vyčerpať vzduch. Spôsob je vhodný pre výrobu veľkých výtlačkov v malých sériách. Na výrobu stačí lisovnica zhotovená z dreva, plastu alebo betónu.

Druhá metóda využíva prenos tlakovej vlny vzniknutej pri explózii pomocou kvapaliny. V lisovnici je utesnený plech a nad ním je kvapalina (zvyčajne voda) s určitou výškou vodného stĺpca. Rozborom tohto sa zaoberá nasledujúca časť príspevku. Vo vode je vhodne umiestnená trhavina, ktorá sa odpáli elektrickou iskrou. *Podmienka:* rešpektovanie príslušných predpisov (zákon o zbraniach a streľive), bezpečnosť práce a z konštrukčného hľadiska musí byť nástroj dostatočne tuhý a pevný.

Na doplnenie je na obr. 1 schéma nástroje pre

tvárnenie explóziou s použitím výbušných zmesí plynov. Výbušná zmes (zvyčajne $H_2 + O_2$) sa zapáli elektrickou iskrou v upravenej hlave nástroja a utesnený plech sa tvárni v tvárnici do požadovaných parametrov.



Obr. 1. Schéma nástroja pre tvárnenie explóziou: 1 - tvárnený materiál, 2 - odsávanie vzduchu, 3 - zmiešavacia komora, 4 - tesnenie, 5 - tvárnica, 6 - prívod horľavého plynu (výbušniny), 7 - prívod kyslíka, 8 - zapalovanie, 9 - vyplachovací ventil, 10 - výfuk.

2.1.1 Explózia vo vodnom prostredí

Pri detonácii guľovej výbušniny vo vode vznikne rázová vlna, ktorej amplitúdu p_{max} v ľubovoľnej vzdialenosti R od centra výbuchu možno popísať vzťahom vychádzajúcim zo zákona geometrickej podobnosti:

$$p_{max} = A \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{G}}{R} \right)^\alpha, \quad (1)$$

kde p_{max} - tlak na čele rázovej vlny,

R - vzdialenosť [m];

G - hmota [kg];

A, α - konštanty, ktoré charakterizujú danú výbušninu a prenosové prostredie.

Ako bolo experimentálne dokázané [2, 3], možno pokles tlaku v závislosti od času v rázovej vlne vyvolané detonáciou vyjadriť exponenciálnou funkciou v tvare:

$$p(t) = p_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

kde t - čas meraný od okamihu priechodu čela rázovej vlny daným bodom,

τ - časová konštanta (konštanta útlmu), ktorá charakterizuje pokles tlaku v závislosti od času.

Platí:

$$-\frac{1}{\tau} = \frac{\partial p}{\partial t} \cdot \frac{1}{p}. \quad (3)$$

Dôležitou charakteristikou rázovej vlny je špecifický impulz I_{sp} , ktorý je daný výrazom:

$$I_{sp} = \int_0^\tau p(t) \cdot dt, \quad (4)$$

kde τ - doba trvania rázovej vlny.

Dosadením (2) do (4) bude:

$$I_{sp} = p_{max} \cdot \int_0^\tau e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot dt. \quad (5)$$

V integráli vzorca (5) sa môže horná medza τ nahradiť ∞ bez dopustenia sa veľkej chyby, pretože tlak v zadnej časti vlny je po dobe $t \approx (5 \div 7) \cdot \tau$ zanedbateľný. Riešením potom vychádza:

$$I_{sp} = p_{max} \cdot \tau. \quad (6)$$

Pri dopade rázovej vlny na rozhraní sú pomery charakterizované podmienkami:

$$u_1 - u_2 = u_3 \quad (7)$$

a

$$p_1 + p_2 = p_3, \quad (8)$$

kde u - rýchlosť častíc prostredia,

p - tlak na čele rázovej vlny.

Indexy 1, 2, 3 označujú parametre dopadajúcej, odrazenej a prejdenej vlny.

Exaktné riešenie výpočtu odrazeného a prejdeneho tlaku je náročné. Pri rázových vlnách šíriacich sa v málo stlačiteľnom prostredí sa môže použiť tzv. akustické priblíženie, pri ktorom sa zanedbáva zmena rýchlosti šírenia čela rázovej vlny s tlakom. Zavedením tejto aproximácie pre vodu sa pre nie príliš vysoké tlaky (rádovo 100 MPa) neurobí veľká chyba. Odrazený a prejdený tlak sa potom bude rovnať pri kolmom dopade rázovej vlny na rozhraní [3, 4, 6, 7, 13]:

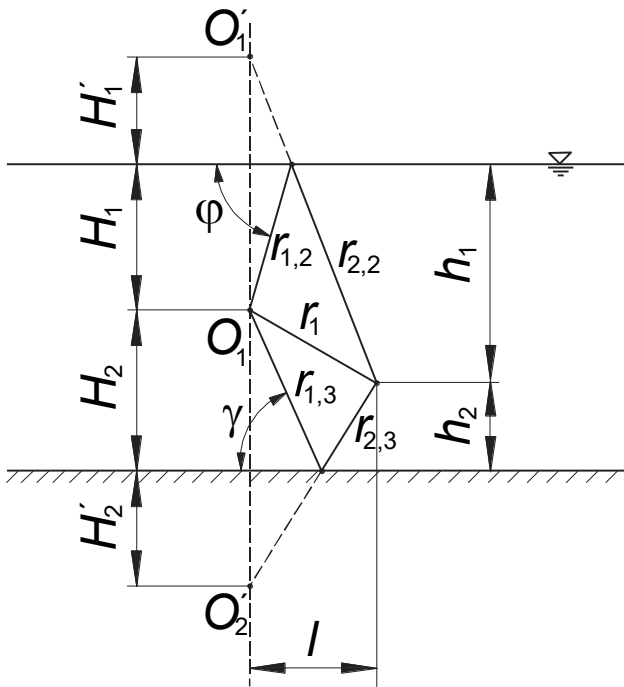
$$p_2 = \frac{\rho_1 \cdot c_1 - \rho_0 \cdot c_0}{\rho_1 \cdot c_1 + \rho_0 \cdot c_0} \cdot p_1, \quad (9)$$

$$p_3 = \frac{2 \cdot \rho_1 \cdot c_1}{\rho_1 \cdot c_1 + \rho_0 \cdot c_0} \cdot p_1, \quad (10)$$

kde ρ_1, c_1 - hustota a rýchlosť zvuku v prostredí, do ktorého sa rázová vlna šíri,

ρ_0, c_0 - hustota a rýchlosť zvuku v pôvodnom prostredí.

Podobný rozbor otázok, súvisiacich s odrazom rázových vln od hladiny a dna nádrže, je v [3-5, 7, 8]. Do tlakov na čele rázovej vlny 100 MPa je možné pre riešenie tejto úlohy použiť jednoduchú geometrickú interpretáciu, ktorá vyplýva z akustického priblíženia. Na obr. 2 je schematicky znázornený odraz rázovej vlny od hladiny a odo dna nádrže. Doba, počas ktorej bod M nebude ovplyvnený odrazom od hladiny a odo dna, ale len vystavený účinku dopadajúcej rázovej vlny, bude daná časovým rozdielom medzi príchodom dopadajúcej a odrazenej vlny. Tento časový rozdiel bude tým väčší, čím väčšia je vzdialenosť náložky a bodu M od hladiny a dna (alebo steny) nádrže.



Obr. 2. Schéma odrazu rázovej vlny od hladiny a dna nádrže: O - centrum výbuchu, M - bod merania

3 ODRAZ OD HLADINY

Pri uvažovaní rozhrania voda - vzduch zo vzorca (9) vyplýva, že pri odraze na tomto rozhraní vznikne vo vode ťahové napätie. Experimentálne merania síce ukázali, že pri určitých podmienkach je voda schopná zniesť ťahové napätie až 28 MPa, avšak normálne dochádza ku kavitácii a rýchlemu poklesu tlaku na atmosférický [3, 4]. Odraz na hladine sa prejaví teda tým, že v okamihu príchodu odrazenej vlny do daného bodu dôjde k poklesu tlaku v dopadajúcej (primárnej) rázovej vlně.

Časový rozdiel Δt_1 medzi príchodom dopadajúcej vlny a vlny odrazenej od hladiny bude daný približne výrazom:

$$\Delta t_1 = \frac{1}{c_0} \cdot [(R_{1,2} + R_{2,2}) - R_1] = \frac{1}{c_0} \cdot \left[\sqrt{L^2 + (H_1 + h_1)^2} - \sqrt{L^2 + (h_1 - H_1)^2} \right], \quad (11)$$

kde c_0 - rýchlosť zvuku vo vode,

L - vzdialenosť kolmých priemetov náložky a daného bodu na hladinu,

H_1 - vzdialenosť náložky od hladiny,

h_1 - vzdialenosť sledovaného bodu od hladiny.

Špecifický impulz dopadajúcej rázovej vlny I_{1sp} sa vypočíta zo vzťahu (neberie sa do úvahy ovplyvnenie odrazom od dna stien):

$$I_{1sp} = p_{1max} \int_0^{\Delta t_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} dt = p_{1max} \tau_1 \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_1}{\tau_1}} \right). \quad (12)$$

Po dosadení vzťahu (1) do (12), vyjde konečný výraz pre špecifický impulz v tvare:

$$I_{1sp} = A \cdot \left[\frac{\sqrt[3]{G}}{\sqrt{L^2 + (h_1 - H_1)^2}} \right]^\alpha \cdot \tau_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_1}{\tau_1}} \right). \quad (13)$$

Zo vzorca (13) vyplýva, že I_{1sp} bude ovplyvnený odraznou vlnou od hladiny, ak bude $\Delta t_1 < (5 \div 7) \cdot \tau_1$. Toto približné riešenie vyhovuje len pokiaľ odraz od hladiny je normálny, to znamená, ak je uhol dopadu rázovej vlny na hladinu $\alpha \geq \alpha_{kr}$, α_{kr} je kritický uhol.

Platí:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{H_1 + h_1}{L} \right), \quad (14)$$

$$\alpha_{kr} = p_1 \cdot \sqrt{\frac{n+1}{2 \cdot n \cdot B}},$$

kde n a B sú konštanty (pre vodu $n = 7,15$, $B = 304,5$ MPa).

Pri $\alpha < \alpha_{kr}$ dochádza k nepravidelnému odrazu a akustické riešenie nie je možné použiť. Z tohto rozboru vyplýva, že nedodržanie potrebnej výšky hladiny nad náložou výbušniny bude mať za následok podstatné zníženie účinku, a teda rovnako nižší koeficient využitia energetického zdroja.

ZÁVER

V článku bolo poukázané na problematiku tvárnenia explóziou, ktorá sa akosi dostala do úzadia a jedným z cieľov príspevku bolo aj upozorniť na túto vysoko produktívnu technológiu tvárnenia s minimálnymi nákladmi na výrobu. Prínos takéhoto riešenia je v odstránení vysokej prácnosti na výrobu nástroja pri použití jednoduchých metód výroby častí nástroja.

LITERATÚRA

- [1] MORAVEC, J. (2016): *Hydrotvárnenie, Hydroforming*. EDIS vyd. ŽU v Žiline, ISBN 978-80-554-1205-4.
- [2] MORAVEC, J. (2003): *Nekonvenčné technológie tvárnenia kovov*. ŽU v Žiline, ISBN 80-8070-094-X.
- [3] VACEK, J. (1975): *Rozbor vlivu rozměru vodní nádrže na energii rázové vlny při tváření plechů*. Strojirenství 17/9.
- [4] HENRYCH, J. (1983): *Dynamika výbuchu a její užití*. Academia Praha.
- [5] BERÁNEK, J. (1984): *Tváření výbuchem*. Práce Praha.
- [6] MORAVEC, J. (2011): *Nekonvenčné metody tvárnenia*. EDIS vyd. ŽU v Žiline, ISBN 978-80-554-0389-2.
- [7] BREPTA, R. - PROKOPEC, M. (1972): *Šíření napěťových vln a rázy v tělesech*. ACADEMIA Praha.

- [8] BREPTA, R. (1980): *Šíření podélných vln v diskrétních homogénních řetězcích*. Výzkumná zpráva ÚT- ČSAV.
- [9] HRIVŇÁK, A. - POLÁK, K. (1989): *Teória tvárnenia a nástroje*. ALFA Bratislava.
- [10] HRIVŇÁK, A. - PODOLSKÝ, M. - DOMAZETOVÍČ, V. (1992): *Teória tvárnenia a nástroje*. ALFA Bratislava, ISBN 80-05-01032-X.
- [11] MACHEK, V. (1983): *Zpracování tenkých plechů*. SNTL Praha.
- [12] MORAVEC, J. (2005): *Využitie poznatkov z mechaniky tekutín v oblasti oobjemového tvárnenia kovov*. *Hydraulika a pneumatika*, VII. 1-2, str. 18-20, ISSN 1335-5171.
- [13] MORAVEC, J. (2006): *Odraz od hladiny na rozhraní voda - vzduch pri tvárnení explóziou v hydraulickom prostredí*. *Hydraulika a pneumatika*, VIII. 1-2, str. 63-64, ISSN 1335-5171
- [14] MORAVEC, J. (2006): *Prispevok ku problematike tvárnenia v hydroprostredí*. *Hydraulika a pneumatika*, VIII. 1-2, str. 55-57, ISSN 1335-5171.
- [15] MORAVEC, J. (2008): *Dopredné pretláčanie kovov v hydroprostredí*. *Zborník AENMT*, str. 343-348, ISBN 978-80-8070-826-9.
- [16] POLÁK, K. - KULÍŠEK, J. (1986): *Hydrodynamické tvárnenie kovov, Strojnícka ročenka 87, str. 136-140 Teória tvárnenia a nástroje*. ALFA Bratislava.

Manévrovateľnosť a stabilita pohybu kĺbového autobusu, systém HST

Volodymyr Sakhno, prof., Dr.Sc. Tech.

Katedra automobilového inžinierstva, Fakulta automobilového a strojného inžinierstva,
Národná dopravná univerzita,
St. M. Omelyanovicha-Pavlenka, 01010, Kyjev, Ukrajina.
E-mail: svp_40@ukr.net, Tel.: + 38 067 66 55 344

Juraj Gerlici, prof. Dr. Ing.

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

Oleksandr Kravchenko, prof., Dr.Sc. Tech.*

Katedra automobilových a dopravných technológií, Fakulta počítačovo-integrovaných technológií,
mechatroniky a robotiky,
Štátna univerzita v Zhytomyre,
St. Chudnovskaya 103, 100 02 Zhytomyr, Ukrajina.
Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: avtoap@ukr.net, Tel.: + 38 050 91 38 228

Viktor Poljakov, prof., Dr.Sc. Tech.

Katedra automobilového inžinierstva, Fakulta automobilového a strojného inžinierstva,
Národná dopravná univerzita,
St. M. Omelyanovicha-Pavlenka, 01010, Kyjev, Ukrajina.
E-mail: poljakov_2006@ukr.net, Tel.: + 38 067 38 61 468
Alexander Petrovič Kravčenko

Iryna Chovcha, Ing.

Katedra automobilových a dopravných technológií, Fakulta počítačovo-integrovaných technológií,
mechatroniky a robotiky,
Štátna univerzita v Zhytomyre,
St. Chudnovskaya 103, 100 02 Zhytomyr, Ukrajina.
E-mail: 0980478368@ukr.net, Tel.: + 38 098 04 78 368

Ján Dižo, doc. Ing., PhD.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2650

Manoeuvrability and stability of movement of an articulated bus, a HST system

Abstract: The mathematical model of a hinged-rear bus with a system of turning a hook-and-loop section for a dynamic way of turning is broken down. For the developed model, indicators of manoeuvrability and stability of the bus were appointed. The input of the design parameters of the bus and the trailer, the transfer ratio of the control drive and the magnitude of the galvanic moment to the indicators of the manoeuvrability of the bus are analysed. On the basis of the results, in the analysis of the rational values of the gear ratios, which ensure the proximity of the trajectories of the characteristic points of the bus and the trailer, the value of the gear ratio of 0.85 was selected, which ensures the minimum value of the *RMK*.

ÚVOD

Jedným z hlavných problémov dnešného veľkomesta je globálna kríza normálneho fungovania mestského média v dôsledku štrukturálneho rastu úrovne automobilizácie, preplnenia cestných a uličných bariér dopravnými prúdmi. Veľkomestá majú problémy s dopravou už dlhší čas a intenzívna motorová doprava viedla k prudkému zníženiu rýchlosti verejnej dopravy. Dôvodom sú zápchy na uliciach. Hlavným dopravným zameraním veľkých miest je metro. Vytráca sa problém „spiacich“ mikroštvrtí, keďže nie sú omráčené metrom. Jedným zo spôsobov, ako problém vyriešiť, je preťaženie moderných autobusov, najmä rozumu skvelej triedy, aby smrad nekrížil premávku. Takéto autobusy je možné organizovať v takzvanom systéme vysokorýchlostnej dopravy (angl. *high-speed transport - HST*) [1].

Projekt *HST* presúva autobusy do špeciálne viditeľných a často oplotených oblastí. Hlavný vozeň metrobusu je prvou líniou izolácie na ceste k iným druhom dopravy. Spravidla sa vyberajú príslušníci autobusov zostávajúcej generácie, vybavených motormi do 300 kW. Ak áno, ako v metre, v salónoch metrobusu sa transfer poskytuje na miesta na parkovanie. Vďaka tomuto, len jeden dvolankový autobusový vlak s dĺžkou do 22 m prepraví až 200 cestujúcich. Pri výstavbe akéhokoľvek autobusu, vrátane metrobusu s nadrozmernou kapacitou, je potrebné poistiť hmotnosti a geometrické obmedzenia, ktoré sú stanovené v regulačných dokumentoch.

Tieto obmedzenia je schopný splniť kĺbový autobus (*KA*) s dĺžkou 18,5 m. Pri celkovej dĺžke autobusu nad 18,5 m je potrebné riadenie kolies zadnej časti *KA*. Autobusy s riaditeľnou zadnou nápravou sú však náchylné na bočné vychýlenie prívesu, čo je potrebné zohľadniť pri výbere a zdôvodňovaní konštrukčných a hmotnostných parametrov vozidla.

1 ANALÝZA LITERATÚRY

Podľa skorších štúdií je možné ukazovatele manévrovateľnosti *KA* určiť pomocou kolies, ktoré sú tuhé v bočnom smere.

V práci [2] je podľa získaných rovníc pre súradnice charakteristických bodov uhol zloženia kĺbového autobusu s celkovou dĺžkou 20 m. sú definované celkové polomery *KA* a jej celkový jazdný pruh (*CJP*) pre rôzne typy zákrut, ktoré sú určené dĺžkou prechodovej trajektórie, ktorá je určená časom a rýchlosťou pohybu *KA*, uhlom natočenia. kruhovej trajektórie a dĺžky počiatkovej trajektórie.

Analýza výpočtov ukázala, že najväčšia hodnota *CJP* autobusu nastáva pri pohybe v kruhu.

Trajektórie charakteristických bodov autobusu a prívesu, a teda aj celkový jazdný pruh kĺbového autobusu, sa získajú bez zohľadnenia bočného vychýlenia pneumatík, čo môže výrazne ovplyvniť (do 15 %) tak manévrovateľnosť, ako aj stabilita pohybu kĺbového autobusu. Preto pri praktickej implementácii *KA* s riadeným prívesom treba zvoliť kompromisný zákon na základe komplexnej analýzy rôznych kritérií riadenia a ich vplyvu na dynamické správanie jazdnej súpravy v stacionárnom aj nestabilnom režime pohybu.

Charakteristickým znakom návrhu funkčných systémov, ktoré zabezpečujú stabilitu a manévrovateľnosť akýchkoľvek vozidiel vrátane *KA*, sú paralelné procesy navrhovania, optimalizácie a modelovania ich dynamiky pohybu, berúc do úvahy multikritériá niekedy protichodných úloh [3]. Ako je známe, charakteristiky stability pohybu a manévrovateľnosti *KA* sú určené kombináciou prevádzkových, hmotnostných, geometrických a konštrukčných parametrov jeho modulov. Vo všeobecnosti sú požadované pomery týchto parametrov z hľadiska stability a manévrovateľnosti rozdielne aj pre rovnaké vozidlo v rozsahu prevádzkových zaťažení a rýchlostí. V dôsledku toho je ťažké získať presné štrukturálne parametre a kvantitatívne ukazovatele v počiatkových štádiách tvorby *KA* podľa kritérií stability pohybu a manévrovateľnosti [3-5].

Výber a optimalizácia parametrov *KA* pre celý rozsah prevádzkových rýchlostí a zaťažení vyžaduje diferenciálne pohybové rovnice. Takéto rovnice rôzneho stupňa zložitosti sú uvedené v prácach [6 - 7, atď.]. Pre dvojčlánkové kĺbové autobusové vlaky sú rovnice na určenie manévrovateľnosti a stability pohybu uvedené v prácach [8-9] a pre trojčlánkové - v prácach [10-12].

V citovaných prácach sa analyzoval vplyv konštrukčných a prevádzkových faktorov na hodnotu kritickej rýchlosti priamočiareho pohybu, najmä sa zistilo, že jej zvýšenie možno dosiahnuť zvýšením základne autobusu a prívesu, ako napr. ako aj hmotnosť autobusu a koeficienty odporu proti priehybu kolies hnacej nápravy náprav autobusu a prívesu. Súčasne sa zväčšuje vzdialenosť od ťažiska k zadnej náprave autobusu, zväčšuje sa vzdialenosť od ťažiska k bodu spojenia autobusu s prívesom, zvyšuje sa hmotnosť autobusu, prívesu a súčiniteľa odporu kolies hnanej nápravy autobusu vedie k zníženiu kritickej rýchlosti cestného vlaku. Zároveň tieto

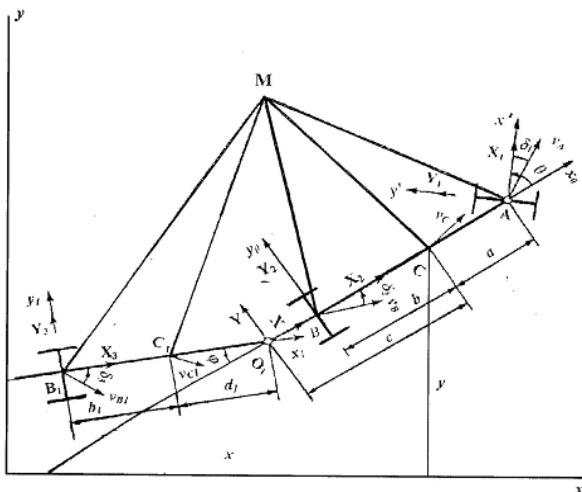
faktory môžu byť počas fungovania KA ovplyvnené rôznymi spôsobmi.

Účelom práce je zvýšiť manévrovateľnosť a stabilitu pohybu KA s riadenou návesnou časťou z dôvodu výberu racionálnych kompozičných a hmotnostných parametrov jednotlivých článkov a ich riadiacich systémov.

1 VÝSLEDKY VÝSKUMU

Už skôr bolo stanovené, že KA môže byť konkurencieschopným metrom s kapacitou 180 ÷ 200 cestujúcich. Pri tejto kapacite cestujúcich by mala byť celková dĺžka autobusu v rozmedzí 21,5 ÷ 22,5 m. Pre rovnomerné zaťaženie náprav vozidla by rozloženie cestujúcich medzi autobusom a prívesom malo byť v rozmedzí 2:1,5 pre základňu autobusu do 5,5 ÷ 6,5 m a príves do 5,0 ÷ 6,0.

$$\begin{aligned}
 & (m + m_2) \cdot \dot{V} - m_2 \cdot (d_1 \cdot \sin \varphi_1 \cdot \omega + m_2 \cdot l_1 \cdot \sin \varphi_1 \cdot \ddot{\varphi}_1) + m \cdot \omega \cdot U + m_2 \cdot \omega \cdot (U + \omega \cdot c) + m_2 \cdot l_1 \times \omega^2 \cdot \cos \varphi_1 = \\
 & = Y_1 \cdot \sin \theta - X_1 \cdot \cos \theta + Y_1' \cdot \sin \theta - X_1' \cdot \cos \theta - \sum (X_{11} + X_{11}') + \sum [(Y_2 + Y_2') \cdot \sin \theta_2 - (X_2 + X_2') \cdot \cos \theta_2] - X_{2gal} \cdot \cos \theta_2, \\
 & (m + m_2) \cdot \dot{U} - (c \cdot m_2 + m_2 \cdot d_1 \cdot \cos \varphi_1) \cdot \dot{\omega} + m_2 \cdot l_1 \times \cos \varphi_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + (m + m_2) \cdot \omega \cdot V - m_2 \cdot d_1 \cdot \omega^2 \cdot \sin \varphi_1 = \\
 & = Y_1 \cdot \cos \theta - X_1 \cdot \sin \theta + Y_1' \cdot \cos \theta - X_1' \cdot \sin \theta + (Y_{11} + Y_{11}') + (Y_2 + Y_2') \cdot \cos \theta_2 - (X_2 + X_2') \cdot \sin \theta - X_{2gal} \cdot \sin \theta_2, \\
 & -c \cdot m_2 \cdot \dot{U} + (I + c^2 \cdot m_2) \cdot \dot{\omega} + c \cdot m_2 \cdot d_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 - c \cdot m_2 \cdot \omega \cdot V + c \cdot m_2 \cdot d_1 \cdot \omega^2 \sin \varphi_1 = (X_1 \cdot \sin \theta - Y_1 \cdot \cos \theta) \cdot \\
 & \cdot (\varepsilon \cdot \sin \theta + a) + (Y_1' \cdot \cos \theta - X_1' \cdot \sin \theta) \cdot (\varepsilon \cdot \sin \theta + a) + (Y_1 \cdot \sin \theta - X_1 \cdot \cos \theta) \times (H + \varepsilon \cdot \cos \theta) - (Y_1' \cdot \sin \theta - X_1' \cdot \cos \theta) \cdot \\
 & \cdot (H + \varepsilon \cdot \cos \theta) - c \cdot (Y_{11} + Y_{11}') \cdot b_2 - c \cdot [(Y_2 + Y_2') \cdot \cos \theta_2 - (X_2 + X_2') \cdot \sin \theta_2] - X_{2gal} \cdot \sin \theta_2 \times \frac{B}{2} + M_{ct1} + M_{p1} + M_{h1}, \\
 & m_2 \cdot d_1 \cdot \sin \varphi_1 \cdot \dot{V} + m_2 \cdot d_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot \dot{U} - [I_1 \cdot \dot{\omega} + (I_2 + m_2 \cdot d_1^2) \cdot \ddot{\varphi}_1] + [V \cdot \cos \varphi_1 - (U - \omega \cdot c) \cdot \sin \varphi_1] \cdot m_2 \cdot d_1 = \\
 & = \sum l_1 \cdot [(X_2 + X_2') \cdot \sin \theta_2 + (Y_2 + Y_2') \cdot \cos \theta_2] + M_{ct2} + M_{p2} + M_{h2} - M_{gal},
 \end{aligned} \tag{1}$$



Obr. 1. Schéma nestabilnej rotácie KA

Schéma výpočtu KA je znázornená na obr. 1. Predná náprava hnacieho článku vozidla KA má riadené kolesá, ktorých priemerný uhol natočenia θ sa rovná polovici súčtu uhlov natočenia vonkajších a vnútorných kolies. Zadná náprava je neotočná a je umiestnená za ťažiskom autobusu. Vlečná časť KA spočíva na náprave, ktorej kolesá môžu byť buď neotáčavé alebo otočné (všeobecnejší prípad platí pre otočné kolesá). Uhol natočenia týchto kolies je

označený θ_2 . Okrem toho sa brzdný moment na jednom z kolies nápravy prívesu používa na korekciu trajektórie prívesu vzhľadom na trajektóriu autobusu, keď sa vozidlo pohybuje po zakrivených trajektóriách.

Známa sústava rovníc popisujúcich pohyb KA na nestabilnej zákrute [2] je doplnená o brzdný moment na jednom z kolies nápravy prívesu a je zapísaná v tvare (1), kde:

m , I je hmotnosť a centrálny moment zotrvačnosti autobusu vzhľadom k zvislej osi,
 m_2 , I_2 je hmotnosť a centrálny moment zotrvačnosti prívesu vzhľadom k zvislej osi,
 θ , θ_1 – uhly sklonu autobusu a prívesu,
 φ_1 je uhol autobusu a prívesom,
 V , U , V_2 , U_2 sú pozdĺžne a priečne priemety

rýchlostí ťažiska autobusu a prívesu na os pohybujúceho sa súradnicového systému, ktoré sú s nimi neustále spojené,

ω - uhlová rýchlosť autobusu,

$M_{gal} = f(\varphi_k, \dot{\varphi}_k)$ je brzdný moment na nápravovom kolese prívesu, ktorý slúži na korekciu trajektórie jazdnej súpravy,

M_c je moment odporu voči otáčaniu prívesu,

$X_{1,2,3}, Y_{1,2,3}, X'_{1,2,3}, Y'_{1,2,3}$ sú pozdĺžne a priečne reakcie povrchu vozovky na kolesá ľavej a pravej strany autobusu a prívesu.

Interakcia kolies s nosnou plochou v priečnom smere je opísaná prostredníctvom reakcie povrchu vozovky v závislosti od uhla vychýlenia nelineárnou hypotézou:

$$Y = K_1 \cdot \delta^1 - K_2 \cdot \delta^3 + K_3 \cdot \delta^5. \tag{2}$$

Stabilizačné momenty pneumatiky sú tiež opísané ako nelineárna závislosť od uhla predstihu:

$$M_{ct} = \sigma_1 \cdot \delta^1 - \sigma_2 \cdot \delta^3 + \sigma_3 \cdot \delta^5. \tag{3}$$

kde $k_1, k_2, k_3, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ sú charakteristiky pneumatík riadiaceho modulu kolies (RMK);

- momenty viskózneho trenia v riadení sú úmerné uhlom natočenia poháňaných kolies:

$$\begin{aligned} M_{h_1} &= h_1 \times \dot{\theta}, \\ M_{h_2} &= h_2 \times \dot{\phi}, \end{aligned} \quad (4)$$

kde h_1 a h_2 sú koeficienty viskózneho trenia v častiach riadenia,

M_{r_1} , M_{r_2} - momenty pružnosti v ovládaní riadenia prednej a zadnej nápravy sú úmerné uhlom natočenia poháňaných kolies:

$$\begin{aligned} M_{r_1} &= \chi_1 \times \dot{\theta}, \\ M_{r_2} &= \chi_2 \times \dot{\phi}, \end{aligned} \quad (5)$$

kde χ_1 a χ_2 sú koeficienty tuhosti pohonu riadenia.

Koeficient odolnosti proti priečnemu posunu k je definovaný ako:

$$k = k_o \cdot \frac{\sqrt{1 - \left[\frac{X}{(\phi \cdot G)^2} \right]}}{1 + 0,375 \cdot \frac{X}{G}}, \quad (6)$$

kde k_o je koeficient odolnosti voči bočnému vychýleniu pri absencii pozdĺžnych síl na koleso, G je vertikálne zaťaženie kolesa,

X je hodnota pozdĺžnej sily daná pomerom.

$$X = \begin{cases} \frac{M_k}{r}, & \text{ak } \frac{M_k}{r} < \phi \cdot G \\ \phi \cdot G, & \text{ak } \frac{M_k}{r} \geq \phi \cdot G \end{cases}, \quad (7)$$

kde M_{gal} je brzdný moment pôsobiaci na koleso prívěsu.

Uhly odchýlky osí KA sa zapisujú v tvare:

- pre RMK autobusu:

$$\delta_1 = \theta - \arctg \frac{u + \omega \cdot (a - c \cdot \cos \theta) - c \cdot \theta \cdot \cos \theta}{V + c \cdot (\omega + \theta) \cdot \sin \theta}, \quad (8)$$

- pre skelet autobusu s neriaditeľnou nápravou:

$$\delta_2 = \arctg \frac{-u + b \cdot \omega}{v - \varepsilon \cdot \omega}, \quad (9)$$

- pre nápravu prívěsu:

$$\delta_3 = -\arctg \frac{V \cdot \sin \phi + (u - \omega \cdot v) \cdot \cos \phi - (\omega - \dot{\phi}) \cdot d}{V \cos \phi - (u - \omega \cdot v) \cdot \sin \phi} - \alpha, \quad (10)$$

Hodnoty V , U , ω , ϕ_1 sa získajú z dynamických rovníc cestného vlaku. Súradnice ťažiska a uhol kurzu autobusu sa určujú pomocou kinematických rovníc:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cdot \cos \theta - U \cdot \sin \theta, \\ \dot{y} &= V \cdot \sin \theta - U_{cjs} \cdot \theta, \\ \dot{\theta} &= \omega. \end{aligned} \quad (11)$$

Účelom zavedenia riadenia prívěsu je zníženie celkového jazdného pruhu vozidla, čo poskytuje

potrebnú manévrovateľnosť napríklad pri jazde v kruhu, pre ktorú musí byť splnená rovnosť $R_B = R_E$ v dôsledku otáčania kolies prívěsu. Sústruženie kolesových vozidiel vr. a prívěsu, možno vykonať otáčaním jeho kolies a brzdením kolies na jednej strane alebo kombináciou týchto dvoch spôsobov, ďalej len kombinovaný spôsob riadenia prívěsu.

Rovnica dynamiky kruhového pohybu KA s kombinovaným spôsobom riadenia otáčania má nasledujúci tvar:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \frac{\operatorname{tg} \bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} \cdot \operatorname{tg}^2 \bar{\alpha}} \times \left[\frac{1}{m \cdot L} \cdot \left(\frac{M_{k1}}{r_{d1}} - \frac{M_{k2}}{r_{d2}} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{f \cdot g}{L} - \frac{f \cdot h}{L^3} \times \left(V_{x1}^2 + b \cdot \frac{dV_{x1}}{dt} \right) \cdot \operatorname{tg}^2 \bar{\alpha} \right], \end{aligned} \quad (12)$$

kde ω je uhlová rýchlosť prívěsu v rovine cesty,

t je čas,

$\bar{\alpha}$ priemerný uhol natočenia vodiacich kolies prívěsu,

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{2} \cdot \alpha' + \alpha'', \quad (13)$$

kde α' a α'' sú uhly natočenia vnútorných (vzhľadom k stredu otáčania) a vonkajších vodiacich kolies,

b je vzdialenosť od nápravy k ťažisku prívěsu,

m je hmotnosť prívěsu,

L je pozdĺžny rázvor prívěsu,

M_{k1} a M_{k2} sú brzdné momenty na vonkajších a vnútorných kolesách prívěsu,

r_{d1} a r_{d2} sú dynamické polomery ľavého a pravého kolesa prívěsu ($r_{d1} = r_{d2} = r_d$),

f je koeficient valivého odporu kolies prívěsu,

h je výška ťažiska prívěsu,

i_z je polomer zotrvačnosti prívěsu vzhľadom na vertikálnu os,

V_{x1} je lineárna rýchlosť cestného vlaku v smere pozdĺžnej osi.

Z rovnice (12) je vidieť, že rozdiel brzdných momentov na kolesách prívěsu je:

$$\Delta M_{k1} = M_{k1} - M_{k2} \quad (14)$$

zvyšuje uhlové zrýchlenie prívěsu v rovine vozovky.

Uvedme rovnicu (12) v tvare:

$$\frac{d\omega}{dt} = a(\alpha) \cdot [b(M) - c - d(v, a)] + k(\alpha, M), \quad (15)$$

$$\text{kde } a(\alpha) = \frac{\operatorname{tg} \bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} \cdot \operatorname{tg}^2 \bar{\alpha}},$$

$$b(M) = \left[\frac{1}{m \cdot L} \cdot \left(\frac{M_{k1}}{r_{d1}} - \frac{M_{k2}}{r_{d2}} \right) \right], \quad c = \frac{f \cdot g}{L},$$

$$d(v, \alpha) = \left[\frac{f \cdot h}{L^3} \times \left(V_{x1}^2 + b \cdot \frac{dV_{x1}}{dt} \right) \cdot \text{tg}^2 \bar{\alpha} \right],$$

$$k(\alpha, M) = \left[\frac{B}{2 \cdot L^2 \cdot m} \cdot \text{tg} \bar{\alpha} \times \left(\frac{M_{k1} - M_{k2}}{r_{d1}} \right) \right].$$

Ako vyplýva z (15), uhlové zrýchlenie prívěsu za iných konštantných podmienok výrazne závisí od rozdielu momentov na kolesách nápravy. Preto je dôležité identifikovať vplyv rozdielu momentov na kolesách nápravy prívěsu na ukazovatele manévrovateľnosti vozidla. Na to budeme predpokladať, že uhlové zrýchlenie prívěsu $\frac{d\omega}{dt} = 0$ a

lineárne zrýchlenie (pozdĺž osi x) $\frac{dv_x}{dt} = 0$. Potom dostaneme:

$$a(\alpha) \cdot [b(M) - c - d(v, a)] + k(\alpha, M) = 0. \quad (16)$$

Keďže $a(\alpha \neq 0)$, potom:

$$[b(M) - c - d(v, a)] + k(\alpha, M) = 0. \quad (17)$$

Riešime rovnicu (17) vzhľadom na α . Zároveň berieme do úvahy, že pri ustálenom pohybe sa zložky rovnice (15) $b(M)$ a c navzájom rovnajú. Za tejto podmienky $d(v, \alpha) = k(\alpha, M)$, t. j.:

$$\left[\frac{f \cdot h}{L^3} \times \left(V_{x1}^2 + b \cdot \frac{dV_{x1}}{dt} \right) \cdot \text{tg}^2 \bar{\alpha} \right] = \left[\frac{B}{2 \cdot L^2 \cdot m} \cdot \text{tg} \bar{\alpha} \times \left(\frac{M_{k1} - M_{k2}}{r_{d1}} \right) \right] \quad (18)$$

alebo

$$\left[\frac{f \cdot h}{L^3} \times \left(V_{x1}^2 + b \cdot \frac{dV_{x1}}{dt} \right) \cdot \text{tg}^2 \bar{\alpha} \right] - \left[\frac{B}{2 \cdot L^2 \cdot m} \cdot \text{tg} \bar{\alpha} \times \left(\frac{M_{k1} - M_{k2}}{r_{d1}} \right) \right] = 0. \quad (19)$$

$$u = \frac{k_1 \cdot [-v^2 \cdot (m \cdot a \cdot L_1 + m_1 \cdot b_1 \cdot (a + c)) + l \cdot b \cdot k_2 \cdot L_1] \cdot v}{v^2 \cdot [(b \cdot k_2 - a \cdot k_1) \cdot (m \cdot L_1 + m_1 \cdot b_1) - c \cdot m_1 \cdot b_1 \cdot (k_1 + k_2)] + l^2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot L_1 + 2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot L_1 \cdot a \cdot b} \cdot \theta,$$

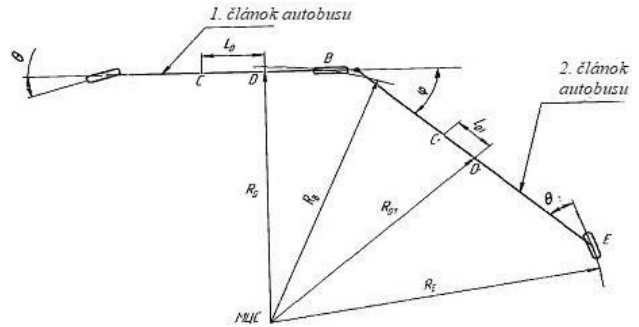
$$\omega = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot l \cdot L_1 \cdot v}{[(k_1 \cdot a - k_2 \cdot b) \cdot L_1 \cdot m + ((a + c) \cdot k_1 + (c - b) \cdot k_2) \cdot b_1 \cdot m_1] v^2 - k_1 \cdot k_2 \cdot l^2 \cdot L_1} \cdot \theta, \quad (21)$$

$$\varphi = \frac{[(-b_1 \cdot k_3 \cdot (a + c) + d_1 \cdot k_2 \cdot l) m_1 - k_3 \cdot a \cdot m \cdot L_1] \cdot v^2 + ((l - c) \cdot a + (b + c) \cdot b - l) \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot L_1 \cdot k_1}{(1 + i_{RSN}) \cdot k_3 \cdot [(m_1 \cdot b_1 + m \cdot L_1) \cdot (k_2 \cdot b - k_1 \cdot a) - m_1 \cdot k_2 \cdot L_1 \cdot c] \cdot v^2 + k_1 \cdot k_2 \cdot l^2 \cdot L_1} \cdot \theta.$$

Po vyriešení rovnice (19) dostaneme:

$$\text{tg} \bar{\alpha} = \frac{\left[\frac{B}{2 \cdot L^2 \cdot m} \times \left(\frac{M_{k1} - M_{k2}}{r_{d1}} \right) \right]}{\frac{f \cdot h}{L^3} \times \left(V_{x1}^2 + b \cdot \frac{dV_{x1}}{dt} \right)}. \quad (20)$$

Podľa získanej rovnice (20) sa určí veľkosť momentu na kolesách nápravy prívěsu, ktorý zabezpečuje jej natočenie do uhla zhodného s uhlom natočenia riadených kolies. Tým je zabezpečená potrebná manévrovateľnosť vozidla napríklad pri kruhovom pohybe, pre ktorý musí byť splnená rovnosť $R_B = R_E$. Požadovaný prevodový pomer i_{RSN} mechanizmu riadenia otočnej nápravy (kolesa) prívěsu sa určuje v nasledujúcom poradí.



Obr. 2. Schéma SZA s riadeným prívěsom

Riešením systému linearizovaných rovníc definujúcich stacionárny režim získame nasledujúce hodnoty fázových premenných vo všeobecnom tvare (21).

Na základe zistených hodnôt fázových premenných sa určujú parametre trajektórie charakteristických bodov prívěsu (obr. 2):

$$R_D = \frac{v}{\omega}, \quad L_D = \frac{u}{\omega}, \quad R_{D1} = \frac{v_1}{\omega}, \quad L_{D1} = \frac{u_1}{\omega},$$

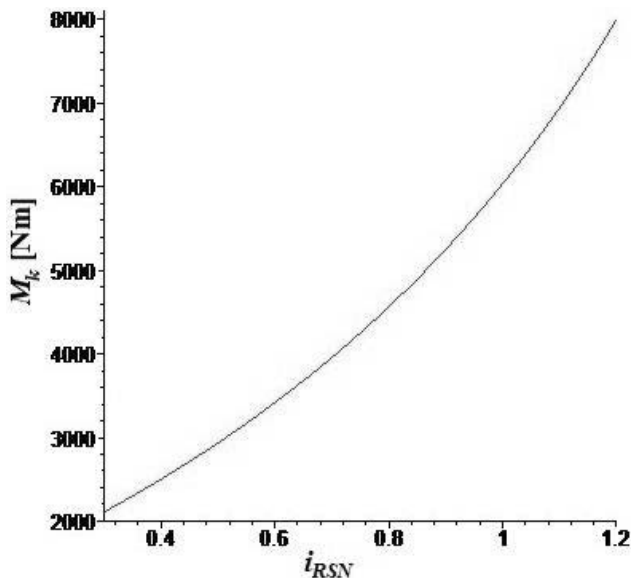
$$R_B = \sqrt{R_D^2 + (CB - L_D)^2}, \quad (22)$$

$$R_E = \sqrt{R_{D1}^2 + (C_1E - L_{D1})^2}.$$

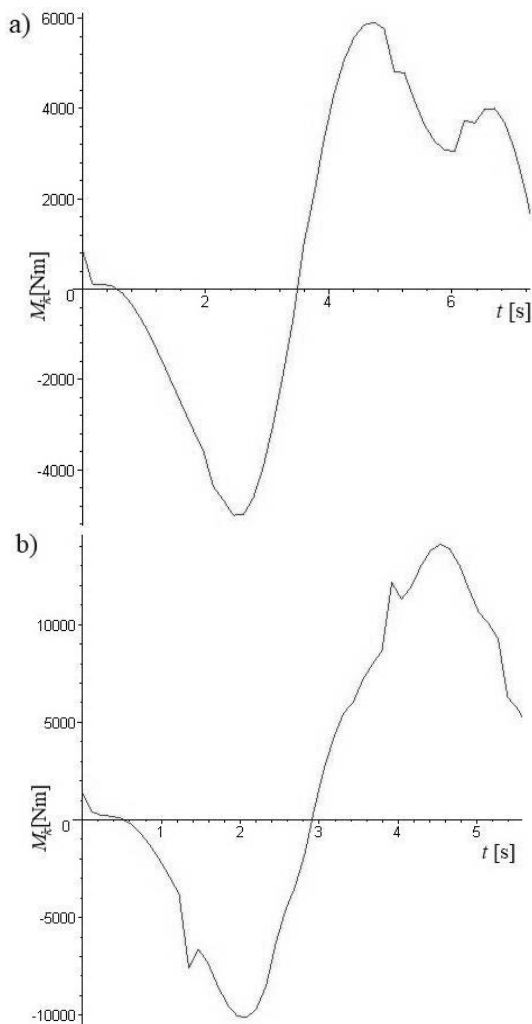
Indikátory manévrovateľnosti sa určujú počas kruhového pohybu vozidla. Nasledujúce hodnoty parametrov sú akceptované ako počiatočné hodnoty: $g = 9,81$; $a = 3,40$; $b = 2$; $b_1 = 2,085$; $d_1 = 2$; $c = 4,39$;

$L = 22,0$; $B = 2,2$; $m = 16000$; $k_f = 0$; $m_2 = 9900$; $k_1 = 160000$; $k_2 = 326000$; $v = 5$; $\sigma_1 = \sigma_2 = 20$; $k_3 = 165000$; $k_{k1} = 2600$; $k_{k2} = 200$; $h_1 = 30$; $h_2 = 30$.

Na obr. 3 je znázornená závislosť momentu na kolesách nápravy prívěsu od prevodového pomeru riadiaceho mechanizmu.



Obr. 3. Závislosť momentu M_k od prevodového pomeru i_{RSN}



Obr. 4. Zmena momentu na náprave prívěsu pri vykonávaní manévru „posun“ KA pri rýchlostiach: a) $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, b) $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

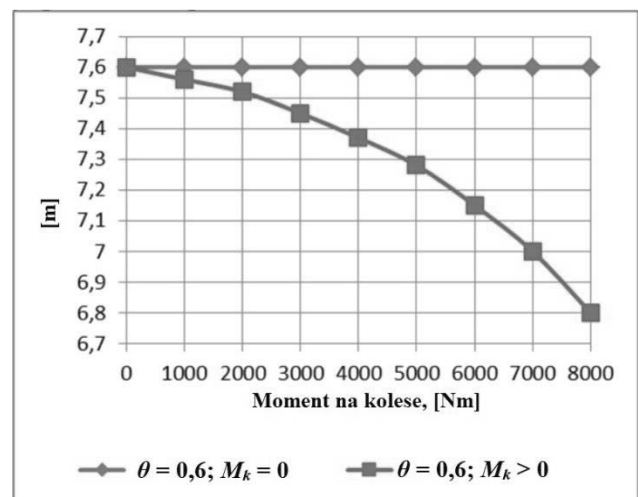
Ako vyplýva z uvedenej závislosti, so zvyšovaním prevodového riadiaceho mechanizmu i_{RSN} sa progresívne zvyšuje moment na kolese prívěsu, čo môže viesť k strate stability pohybu KA. Táto závislosť bola aproximovaná nasledujúcim výrazom:

$$M_k = 2300 + \frac{i_{RSN} - 0,35}{0,0002985 - 0,000124 \cdot i_{RSN}}. \quad (23)$$

Rovnica (23) neobsahuje rýchlosť pohybu, ktorá výrazne ovplyvňuje veľkosť momentu na náprave prívěsu. Na obr. 4 ako príklad ukazuje, ako sa mení moment M_k s rýchlosťou pohybu pri vykonávaní manévru "posunutie".

Na základe výsledkov analýzy racionálnych hodnôt prevodových pomerov, ktoré poskytujú približnú zhodu trajektórií charakteristických bodov autobusu a prívěsu, bola hodnota prevodového pomeru $i_{RSN} = 0,85$, zvolený, ktorý zabezpečuje minimálnu hodnotu *RMK*.

Integrácia sústavy rovníc (1) bola vykonaná pre stanovený prevodový pomer riadiaceho pohonu nápravy (kolesa) prívěsu. Počas integrácie sa polomery trajektórií charakteristických bodov autobusu a prívěsu pod riadiacim systémom 1, ktorý zahŕňa len otáčanie kolies autobusu ($\theta = 0,6 \text{ rad}$) a dynamický ($\theta = 0,6 \text{ rad} + \text{brzdenie jedného z kolies prívěsu}$) pod riadiacim systémom 2 (obr. 5).



Obr. 5. *RMK* KA pre rôzne systémy riadenia prívěsov

Ako je zrejme z obr. 5, 22-metrový riadiaci systém celkovej dĺžky pre ovládanie iba kolies autobusu nezabezpečuje splnenie predpisov *EHK OSN* týkajúcich sa manérovateľnosti (prípustné *RMK* - 7,2 m), zatiaľ čo riadiaci systém s kolesom brzdenie v momente $M_k > 5500 \text{ Nm}$ túto podmienku spĺňa.

Účinok ovládania prípojného vozidla čiastočným brzdením kolies na jednej strane je v prvom priblížení ekvivalentný účinku výsledných trecích síl. Veľkosť polomeru otáčania KA zároveň závisí nielen od uhla natočenia riadených kolies autobusu, ale aj od veľkosti brzdného momentu a kolesa, na ktoré je aplikovaný. To je veľmi dôležité pri konštrukcii hybridných autobusov s elektrickým pohonom na náprave ťahadla prívěsu, pretože je možné korigovať nielen trajektóriu ťahadiel prívěsu, ale aj stabilitu kĺbového autobusu.

Pri výskume takého zložitého dynamického systému, akým je systém riadenia nápravy prívěsu, je naliehavá otázka stability jej pohybu a k stabilite proti bočnému šmyku a prevráteniu, tradičnej pre samostatné autá, sa pridáva aj stabilita proti sklopeniu. Cestné vlaky so sprievodcom majú vlastnosti, ktoré chýbajú v prípade jednotlivých vozidiel. Vo všeobecnosti nie je stabilita celého systému určená len stabilitou jednotlivých väzieb, ale je potrebná analýza zohľadňujúca vzájomné pôsobenie väzieb. To však súvisí s riešením diferenciálnych pohybových rovníc šiesteho rádu.

Na vyriešenie problému stability KA s riadenou nápravou prívěsu je potrebné sformulovať rovnicu rušeného pohybu. V nekritických prípadoch podľa Ljapunova sa možno obmedziť na analýzu lineárnej aproximácie stacionárneho pohybu cestnej súpravy, pre ktorú systém rovníc (1) pripúšťa riešenie $U = 0$, $\omega = 0$, $\varphi_1 = 0$, $(\theta = 0)$ a ktorému zodpovedá pohyb po rovine vozovky všetkých bodov jazdnej súpravy s rýchlosťou v po priamke $\theta = \text{konšt.}$ Berme takýto pohyb ako nerušený. Pre takýto pohyb je kritická rýchlosť KA v_{kr} definovaná ako:

$$v_{kr}^2 = k_t \cdot (l - \lambda) \cdot \frac{[k_1 \cdot k_2 \cdot (l - \lambda) + k_1 \cdot \sigma_2 - k_2 \cdot \sigma_1]}{F}, \quad (24)$$

kde:

$$F = k_t \cdot [m \cdot (k_1 \cdot a - k_2 \cdot b) - (m + m_1) \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) - m_1 \cdot k_2 \cdot (l - \lambda)] - m \cdot (k_1 \cdot \lambda + \sigma_1) \cdot (k_2 \cdot \lambda + \sigma_2) - m_1 \cdot \sigma_1 \cdot (k_2 \cdot l - \sigma_2).$$

Správnou voľbou tuhosti $k_t \leq k_{t^*}$ modulu volantu autobusu pre neriaditeľné kolesá prívěsu je možné dosiahnuť absenciu kritickej rýchlosti, ktorá je charakteristická pre moderné konštrukcie automobilov:

$$k_{t^*} = \frac{m \cdot (k_1 \cdot \lambda + \sigma_1) \cdot (k_2 \cdot b + \sigma_2) + m_1 \cdot \sigma_1 \cdot (k_2 \cdot l + \sigma_2)}{m \cdot (k_1 \cdot a - k_1 \cdot a_1) - (m + m_1) \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) - m_1 \cdot k_2 \cdot (l - \lambda)}. \quad (25)$$

Pri KA je možné zvýšiť kritickú rýchlosť pohybu správnym výberom ramena stabilizácie riadených kolies (sklon osi čapu v pozdĺžnej rovine) λ . Pre rameno stabilizátora kolies autobusu dostaneme:

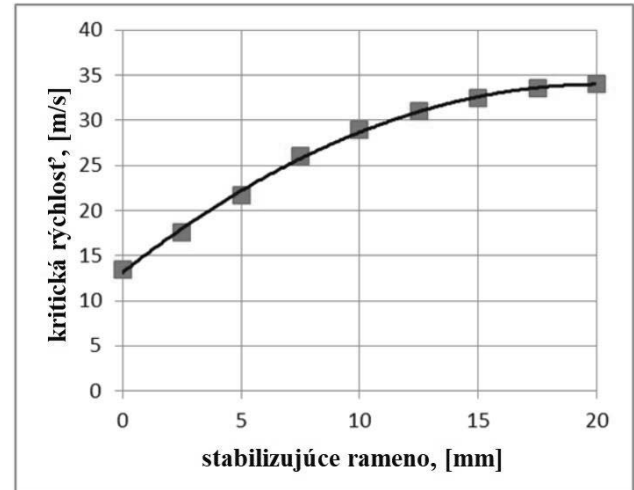
$$\lambda = \frac{k_2 \cdot [m \cdot (k_1 \cdot a_1 - k_2 \cdot b) - (m + m_2) \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) - m_2 \cdot k_3 \cdot l]}{k_t \cdot (k_1 \cdot m - k_3 \cdot m_2) + m \cdot k_1 \cdot (k_3 \cdot d_1 + \sigma_2)} - \frac{\sigma_1 \cdot [m \cdot (k_1 \cdot b + \sigma_2) + m_2 \cdot (k_3 \cdot d_1 + \sigma_2)]}{k_t \cdot (k_1 \cdot m - k_3 \cdot m_2) + m \cdot k_1 \cdot (k_3 \cdot d_1 + \sigma_2)}. \quad (26)$$

Na obr. 6 je znázornená závislosť kritickej rýchlosti KA od stabilizačného ramena riadených kolies autobusu.

Ďalej bola vykonaná štúdia vplyvu štruktúrnych a prevádzkových faktorov na manérovateľnosť a stabilitu pohybu KA, ktorá bola hodnotená na základe kritickej rýchlosti pohybu (v_{kr}) metódou plánovania experimentu [2].

Aby bolo možné rozšíriť výsledky výskumu na KA rôznych dispozičných schém, bolo navrhnuté

vykonať výpočty pomocou bezrozmerných parametrov.



Obr. 6. Závislosť kritickej rýchlosti KA v_{kr} stabilizačného ramena riadených kolies autobusu

Rozsah zmien bezrozmerných parametrov sa volí s prihliadnutím na vlastnosti konštrukcií existujúcich KA a požiadavky na geometrické a hmotnostné parametre platné v krajinách EÚ.

Posudzoval sa vplyv nasledujúcich parametrov, ktoré sa menili v rámci zvolených limitov:

- geometrické parametre:

$$a' = \frac{a}{L} = 0,20 \div 0,80; \quad L' = \frac{L}{D} = 0,35 \div 0,80;$$

$$c' = \frac{c}{L} = 0,00 \div 0,40; \quad d' = \frac{d}{L_1} = 0,00 \div 0,80; \quad (27)$$

$$L_2' = \frac{L_2}{D_2} = 0,13 \div 0,38,$$

kde L, L_1 - základňa autobusu a prívěsu,

D, D_2 - celková dĺžka autobusu a prívěsu,

- hmotnostné parametre autobusu a prívěsu:

$$m' = \frac{m}{m + m_2} = 0,35 \div 1,10, \quad (28)$$

$$m_2' = \frac{m_2}{m + m_2} = 0,35 \div 0,80,$$

- koeficienty odolnosti voči priečnemu vychýleniu pneumatík náprav jazdnej súpravy:

$$k_1' = \frac{k_1}{k_0} = 0,60 \div 1,20; \quad k_2' = \frac{k_2}{k_0} = 0,60 \div 1,50; \quad (29)$$

$$k_3' = \frac{k_3}{k_0} = 0,60.$$

Na základe výsledkov výpočtu vplyvu geometrických a hmotnostných faktorov na CJP sa dospelo k týmto záverom:

- základňa autobusu a prívěsu majú najvýznamnejší vplyv na výšku CJP. Rast týchto faktorov zvyšuje CJP cestného vlaku;

- také faktory ako poloha stredov olejových článkov jazdnej súpravy a poloha spojovacieho bodu návesu a autobusu, hmotnostné parametre jazdnej súpravy a koeficienty odporu jej kolies majú malý vplyv.

Podobné výpočty sa vykonali na štúdiu vplyvu štrukturálnych a prevádzkových faktorov na ukazovatele stability cestnej súpravy. Na základe výsledkov výpočtov sa dospelo k týmto záverom:

- základňa prívesu a jeho dĺžka prakticky neovplyvňujú hmotnosť jazdnej súpravy,
- hmotnosť autobusu prakticky neovplyvňuje v_{kr} ,
- zníženie hmotnosti prívesu zvyšuje hmotnosť jazdnej súpravy,
- rázvor kĺbového autobusu do značnej miery závisí od tuhosti pneumatík na zadnej náprave autobusu,
- zvýšenie koeficientu odporu voči bočnému vychýleniu pneumatík prednej nápravy autobusu vedie k zvýšeniu v_{kr} ,
- zvýšenie tuhosti pneumatík nápravy prívesu znižuje hmotnosť jazdnej súpravy.

Úpravou tlaku vzduchu v pneumatikách náprav cestnej súpravy je možné zmeniť koeficient odporu proti priečnemu vychýleniu, a tým zvýšiť v_{kr} cestnej súpravy.

ZÁVER

Podľa vyvinutého modelu sa určujú ukazovatele manérovateľnosti a stability pohybu autobusu. Analyzoval sa vplyv konštrukčných parametrov autobusu a prívesu, prevodového pomeru riadiaceho pohonu a veľkosti brzdného momentu na manérovateľnosť autobusu.

Na základe výsledkov analýzy racionálnych hodnôt prevodových pomerov, ktoré poskytujú približnú zhodu trajektórií charakteristických bodov autobusu a prívesu, bola zvolená hodnota prevodového pomeru $i_{RSN} = 0,85$, ktorá zabezpečuje minimálnu hodnotu *RMK*.

Pod'akovanie

Tento výskum podporila Kultúrna a vzdelávacia grantová agentúra MŠ SR v projekte č. KEGA 036ŽU-4/2021: „Implementácia moderných metód počítačovej a experimentálnej analýzy vlastností komponentov vozidiel do vzdelávania konštruktérov dopravných prostriedkov budúcnosti.“

Tento výskum podporila Kultúrna a vzdelávacia grantová agentúra MŠ SR v projekte č. KEGA 031ŽU-4/2023: „Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného programu Vozidlá a motory.“

LITERATÚRA

- [1] AVAKOS-BRAVO, V. - ARELLANO, C. C. - PEREZ, D. A. P. - CRUZ, M. H. (2020): *Forecasting People's Influx on Mexico City Metrobus Line 1 Using a Fractal Analysis*. Communications in Computer and Information Science, Vol. 1276 CCIS, pp. 92-105, GIS LATAM Conference, 28-30 September 2020.
- [2] SAKHNO, V. P. - POLYAKOV, V. M. - SHARAY, S. M. - MUROVANY, I. S. - OMELNICKÝ, O. E. (2021): *Kĺbové autobusy. Manérovateľnosť a stabilita*: monografia - Luck: IVV Lutsk National Technical University, 288 s.
- [3] SAKHNO, V. - IGOR MUROVANY, I. - SHARAI, S. - SELEZNEV, V. (2017): *Comparative evaluation of maneuverability of large and extra large class buses*. Mobile machines. International scientific conference, Kaunas, Lithuania. Aleksandras Stulginskis University, pp. 38-47.
- [4] SAKHNO V. P. - MARCHUK, M. M. - MARCHUK, R. M. (2017): *Study of long haul truck movement along the curvilinear trajectory while steering a carryall semi-trailer - container by braking the wheels of one axle*. INMATEH - Agricultural Engineering, Vol. 52, Issue 2, pp. 107-112.
- [5] SAKHNO, V. P. - BILICHENKO, V. V. - POLYAKOV, V. M. - OMELNYJSKIY, O. E. (2018): *Manérovateľnosť metrobusov*. Herald of machinebuilding and transport: vedecký časopis. Ministerstvo školstva a vedy Ukrajiny, Vinnická národná technická univerzita. - Vinnyca: VNTU, č. 2(6), pp. 131-140.
- [6] SAKHNO, V. P. - VERBYTSKYI, V. G. - BONDARENKO, A. E. - ENGLEZI, A. O. (2007): *Pohybové rovnice modelu štvorčlánkového kĺbového vozidla*. Avtoshlyahovyk Ukrainy, Bulletin Severného vedeckého centra TAU. Č. 10., pp. 117-120.
- [7] SAKHNO, V. P. - BONDARENKO, A. E. - GLINCHUK, V. M. - ENGLIEZI, O. A. (2009): *Pohybové rovnice trojčlánkového cestného vozidla typu "B-Double"*. Avtoslyahovyk Ukrainy, Bulletin Severného vedeckého centra TAU, č. 12, pp. 164-169.
- [8] V. SAKHNO, V. - POLJAKOV, V. - MYROVANY, I. - SELEZNOV, V. (2016): *Determination of movement stability of especiality large class hybrid bus with active trailer*. INMATEN – Agricultural engineering, Vol. 49, No. 2, pp. 107-118.
- [9] SAKHNO, V. P. - POLYAKOV, V. M. - MUROVANY, I. S. - SELEZNOV, V. E. (2016): *K predbežnému posúdeniu stability hybridného autobusu mimoriadne veľkej triedy s aktívnym prívesom*. Bulletin Kharkiv National Road University, Issue 75, pp. 75-82.

- [10] SAKHNO, V. - GERLICI, J. - POLIAKOV, V. - KRAVCHENKO, O. - OMELNITSKY, O. - LACK, T. (2018): *Road train motion stability in BRT system*. XXIII Polish-Slovak Scientific Conference Machine Modelling and Simulation, Book of abstracts, September 4-7, Rydzyna Poland, pp. 49-57.
- [11] SAKHNO, V. - OMELNYTSKYI, O. - POLIAKOV, V. (2018): *Otázka týkajúca sa ovládateľnosti metrobusu*. Systemy i srodki transportu samochodowego. Badania, konstrukcja i technologia. Wybrane zagadnienia, Monografia no. 12, Seria: Transport, Rzeszow, pp. 101-108.
- [12] SAKHNO, V. P. - POLYAKOV, V. M. - OMELNYCKYJ, O. E. (2018): *Manévrovatel'nost' trojčlánkového metrobusu*. Vedecký zborník z medzinárodnej vedecko-praktickej konferencie „Nové technológie rozvoja cestnej dopravy“. - Charkovská národná automobilová a cestná univerzita. Vedecko-výskumné expertné forenzné centrum Ministerstva vnútra Ukrajiny, pp. 305-308.
- [13] LOBAS, L. G. - VERBYTSKYI, V. G. (1990): *Kvalitativne a analytické metódy v dynamike kolesových vozidiel*. - Kyjev: Vedecké stanovisko, 232 s.
- [14] ISTED, C. J. - EDDY, C. - CEBON, D. (2022): *Performance assessment of urban goods vehicles*. Vehicle System Dynamics, Vol. 60, No. 7, pp. 2469-2493.
- [15] UBAIDILLAH - SETIAWAN, B. A. - ARIDHARMA, A. P. - LENGANA, B. W. - CAESAR, B. P. P. (2018): *Steering characteristic of an articulated bus under quasi steady maneuvering*. AIP Conference Proceedings 1931.
- [16] FELICE, A. D. - MERCANTINI, M. - SORRENTINO, S. (2021): *Stability analysis of articulated bus in straight-ahead running manoeuvre*. Journal of Applied and Computational Machines, Vol. 7, No. 3, pp. 1649-1662.
- [17] WENWEI, W. - WEI, Z. - HANYU, Z. - WANKE, C. (2020): *Yaw stability control through independent driving torque control of mid and rear wheels of an articulated bus*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 234, No. 13, pp. 2947-2960.
- [18] MICHALEK, M. M. (2020): *Lining-Up Stabilizers for Pusher and Puller Articulated Vehicles*. Advances in Intelligent Systems and Computing, 1196 AISC, pp. 917-927.
- [19] AURELL, J. - WINKLER, C. B. (1995): *Standard test procedures for the lateral stability of heavy vehicle combinations*. Proceedings of the International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, pp. 463-471.
- [20] EMHEISEN, M. A. - EMIRLER, M. T. - OZKAN, B. (1995): *Lateral stability control of articulated heavy vehicles based on active steering system*. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Vol. 11, No. 8, pp. 575-582.
- [21] YANG, F. - CAO, X. - XU, T. - JI, X. (2022): *A skid-steering method for path-following control of distributed-drive articulated heavy vehicles*. IEEE Access, 10, pp. 31538-31547

Uzatváranie koncov rúr v tvarovej lisovnici

Ján Moravec, doc. Ing., PhD.*

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

Univerzitná 1, 010 26 Žilina.

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

Closing the ends of the pipes in a shaped press

Abstract: The paper describes the issue of closing pipe ends in a pressing tool specially designed for this work. Theoretical relations from the theory of forming form the necessary basis for the subsequent design of the tool. production process. A simple tool with the application and consideration of theoretical knowledge usually brings a significant effect expressed not only financially, but also qualitatively, which was also confirmed in this case.

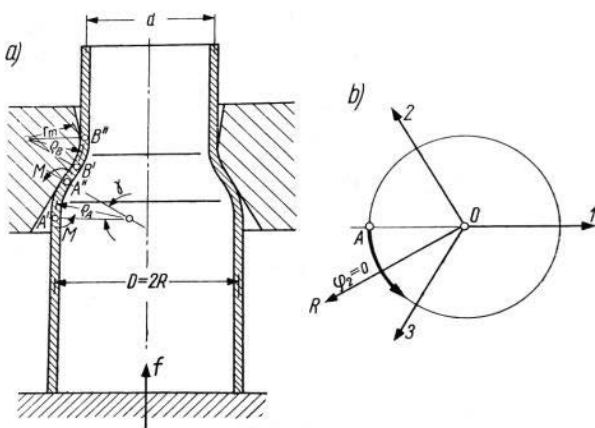
Keywords: pipe, forming tool, die, technological process.

ÚVOD

Uzatváranie koncov rúrok je práca, ktorá vo viacerých ohľadoch špecifická. Problematike sa venovali príspevky [1-6]. V nich bola pozornosť venovaná možnosti využitia obrábacieho stroja pri uzatváraní koncov oceľových rúrok. Poznatky, ktoré sú v nich zhrnuté nie je potrebné na tomto mieste opakovať, pretože text príspevkov je ľahko prístupný a záujemca ich nájde bez námahy. V nasledujúcom texte je zhrnutá teoretická aj praktická stránka problému, kde je pozornosť venovaná zužovaniu koncov medených rúrok v tvarovej lisovnici.

1 TEORETICKÉ POZNATKY

Na obr.1 je schematicky zobrazený pochod zužovania koncov rúrok v ťažnici s kužeľovitou dutinou [7-10].



Obr. 1 Zužovanie rúrky v kužeľovitej ťažnici

V počiatočnej fáze procesu sa okraj rúrky, ktorá je pritlačovaná v ťažnici sa ohýba do stredu. Takisto sa materiál posúva po kužeľovitom povrchu ťažnice, čo je sprevádzané zmenšovaním vnútorného priemeru

rúrky. Počas tohto pochodu je materiál vystavený len pôsobeniu tlakových obvodových napätí pretože na koniec rúrky nepôsobí žiadna pozdĺžna sila. Takáto napätosť vyvoláva deformáciu konca rúrky podľa vzťahu $-\varphi_1 = 2 \cdot \varphi_2 = 2 \cdot \varphi_3$, ktorému zodpovedá čiara OA v schéme deformácií na obr. 1b. Keď bude priemer otvoru zodpovedať priemeru d_2 , bude hrúbka

materiálu v tomto mieste $s' = s^o \cdot \sqrt{\frac{d_1}{d_2}}$.

Sila potrebná pre túto časť tvárniaceho pochodu sa označí F' . Pri ďalšom vtláčovaní rúrky do otvoru ťažnice sa na konci začne vytvárať valcovitá časť s priemerom d_2 , pričom hrúbka materiálu v priereze $B-B$ a jeho medza klzu bude ešte nejakú dobu vzrastať, až sa pochod úplne stabilizuje a zmení sa na stacionárny. Hrúbka plechu s dosiahne hodnotu $s \approx s^o \cdot d_1/d_2$, priebeh deformácie zodpovedá priamke OR na obr. 1b. Takisto sa ustáli hodnota sily F . Pretože sila F' zodpovedajúca úkonu čiastočného uzavierania rúrky je o minimálnu hodnotu menšia než sila F zodpovedajúca úplnej stabilizácii procesu (obr. 2 vpravo) [13-16].

Na obr. 3 je schematicky znázornený proces uzatvárania konca rúrky v ťažnici, ktorej obrys tvorí kruhový oblúk s polomerom R .

Potrebná sila pri predpoklade, že ide o stacionárny proces sa určí:

$$\varphi_{icelk.} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{s}{4 \cdot R} \right),$$

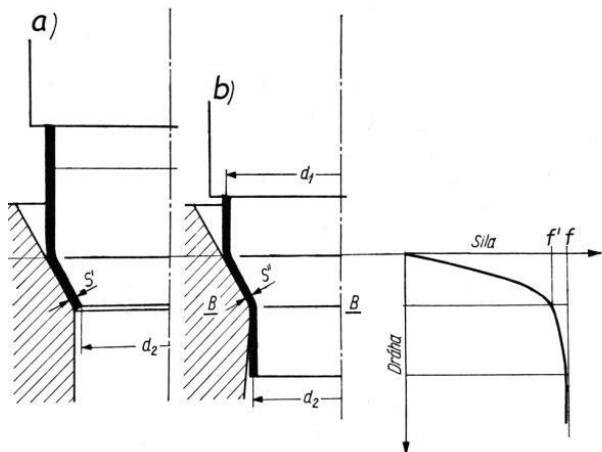
$$F = \pi \cdot d_1 \cdot s \cdot \frac{\lambda}{\eta} \cdot \sigma_n \cdot \varphi_{icelk.} \quad (1)$$

Pri uvažovaní, že maximálna sila je obmedzená nebezpečenstvom deformácie stláčaného úseku rúrky, bude $F_{\max} = \pi \cdot d_1 \cdot s \cdot \sigma_K$.

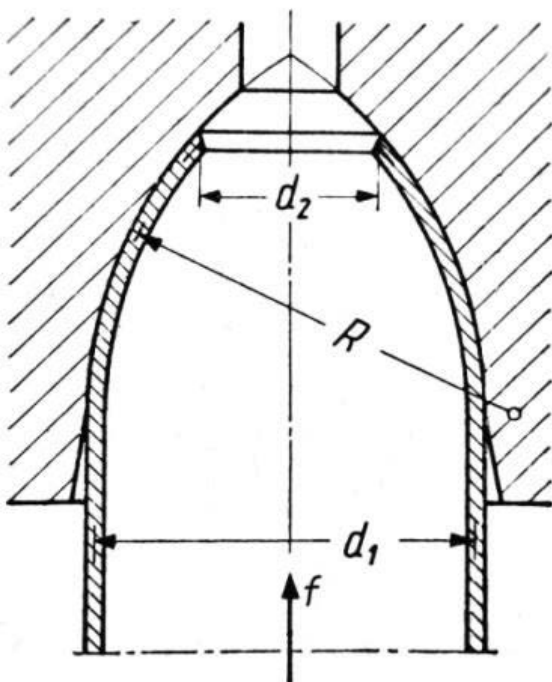
Maximálna deformácia, ktorú je možné dosiahnuť v tomto procese, sa určí z podmienky

$$\varphi_{\text{icelk.}} < \frac{\eta}{\eta \cdot \lambda} \cdot \frac{\sigma_K^o}{\sigma_K}, \text{ kde } n \text{ je technologický súčiniteľ}$$

bezpečnosti.



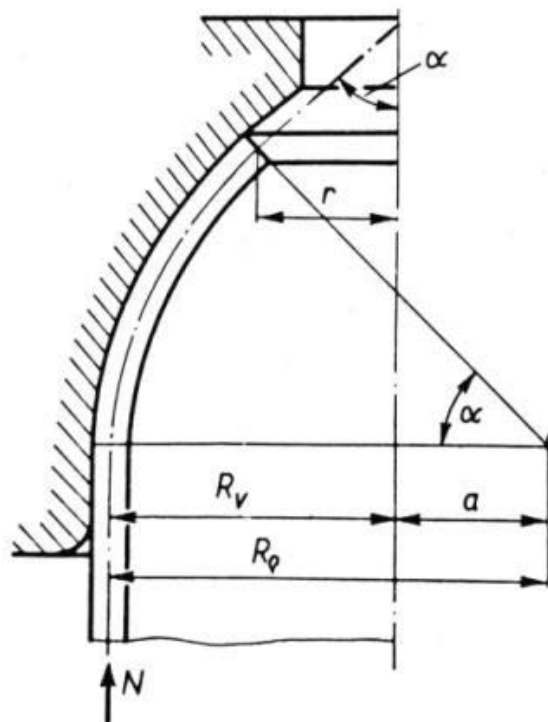
Obr. 2. Uzatváranie konca rúrky ako východisková fáza stacionárneho pochodu zužovania



Obr. 3. Ťažnica s obrysom kruhového oblúka

1.1 Zužovanie valcovitého výtvarku

V tomto odseku je opísaná problematika zužovania valcovitého tenkostenného výtvarku v lisovnici, ktorá má konštantný polomer krivosti tvoriacej pracovnej dutiny (obr. 2) [5, 6].



Obr. 4. Ťažnica s konštantným polomerom krivosti

Ohnisko plastickej deformácie je v tomto prípade rozložené v oblasti s konštantným polomerom krivosti strednej plochy R_0 v pozdĺžnom reze. V tvárniacom procese na kraji výtvarku sa zmení polomer z východiskovej hodnoty R na požadovanú hodnotu r . Súčasne rastie aj uhol α_0 medzi dotyčnicou v strednej ploche v pozdĺžnom reze na kraji výtvarku a osou symetrie od $\alpha_0 = 0$ až do hodnoty, ktorá sa dá

$$\text{vyjadriť pomocou } R, a, r_0, \cos \alpha_0 = \frac{a+R}{R_0} + \frac{a+r}{R+a}.$$

Súčasne sa v tvárniacom procese polomer ρ ľubovoľnej časti výtvarku v dôsledku posuvu voči pracovnému povrchu lisovnice znižuje, čo znamená, že deformácia v dotyčnicovom smere je záporná (skrátene).

Pretože výtvarok sa v tvárniacom procese vtláča do lisovnice silou F_N budú pôsobiť v stenách východiskového polotovaru tlakové napätia $\sigma_{\rho \max}$, ktoré sa v ohnisku plastickej deformácie v dôsledku znižovania ľubovoľného polomeru ρ skúmanej časti znižujú až na nulu pre prípad, že $\rho = r_0$. Za predpokladu, že radiálne napätie je tlakové a dotyčnicová deformácia záporná, môžeme považovať aj dotyčnicové napätie za tlakové [6].

Pre pomer $R_0/s > 10$ sa môže považovať stav napätosti v ohnisku plastickej deformácie s dostatočnou presnosťou za rovinný. Ak sa napätie σ_ρ v ohnisku plastickej deformácie mení od 0 až do hodnoty $\sigma_{\rho \max}$, krajnými hlavnými normálovými napätiami budú σ_θ a σ_N , pričom $\sigma_N \approx 0$. Podmienka plasticity podľa

hypotézy maximálneho šmykového napätia pre takýto prípad bude $\sigma_{\theta} = -\sigma_K$.

Rozloženie napätí σ_{θ} v ohnisku plastickej deformácie pri zužovaní v lisovnici s tvoriacou plochou $R_p = \text{konšt.}$ sa dá získať pomocou súčasného riešenia rovnice rovnováhy (2):

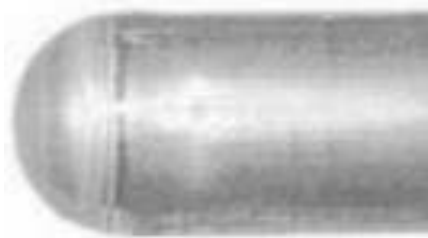
$$\begin{aligned}\sigma_1 - \sigma_2 &= \pm \sigma_K \\ \sigma_2 - \sigma_3 &= \pm \sigma_K \\ \sigma_3 - \sigma_1 &= \pm \sigma_K\end{aligned}\quad (2)$$

a rovnice (3):

$$\rho \cdot \frac{d\sigma_p}{d\rho} + \sigma_{\varepsilon} - \sigma_{\theta} - \frac{f \cdot \rho}{\sin \alpha} \cdot \left(\frac{\sigma_p}{R_p} + \frac{\sigma_{\theta}}{R_{\theta}} \right) = 0. \quad (3)$$

2 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Pre experimentálne overenie teoretických poznatkov bol zvolený nasledujúci postup. Lisovnica s kruhovým oblúkom bola vyrobená pre rúrky $\varnothing 15$ mm s dĺžkou 18 mm. Rúrka má vnútorný priemer 13 mm. Rúrka je z medi vyžihanej na potrebnú tvrdosť, teda aby sa dal dobre v lisovnici tvárniť. Ako tvárniaci stroj bol použitý jednoduchý pákový lis, ktorý bol k dispozícii v laboratóriu tvárniacej techniky. Samotná lisovnica nebola tepelne spracovaná, pretože pre malú sériu siedmich vzoriek nebolo potrebné nijako tepelne spracovať teleso lisovnice. Postupne sa podrobili tvárneniu všetky rúrkové vzorky. Ako masivo bol použitý olej. Ukázalo sa, že aplikácia oleja bola nevyhnutná, pretože medená rúrka vykazovala značný odpor voči pretvárneniu, keď nebolo použité masivo. Na obr. 5 je detail konca rúrky po tvárnení v kruhovej lisovnici za studena. Experiment možno hodnotiť ako úspešný, pretože uzatváranie koncov rúrok potvrdilo vhodnosť aplikácie a zohľadnenie teoretických poznatkov spolu s konštrukčným vyhotovením lisovnice.



Obr. 5. Koniec rúrky po tvárnení

3 VÝSLEDKY

Po vykonaní experimentov sa potvrdil predpoklad o vhodnosti použitia uvedeného postupu pre danú prácu. Opísaným spôsobom sa dajú tvárniť konce

rúrok a tieto efektívne uzavierať. V prípade úplného uzavretia rúrky musí riešenie byť doplnené uzavretím diery na čele rúrky. Úplné uzavretie sa ale požaduje v minimálnom počte prípadov, väčšinou sa cez čelo vedú rôzne nátrubky a vyústenia so závitmi.

4 DISKUSIA

Zohľadnime možnosť aplikácie ohrevu pri uzavieraní koncov ocelových rúrok. Hlavným cieľom ohrevu pri tvárnení je zníženie pretvárneho odporu pri súbežnom zvýšení tváriteľnosti ocele. Vysoké teploty podporujú čiastočnú homogenizáciu chemickej a štruktúrnej nerovnorodosti, čiastočné alebo úplné rozpustenie precipitátov - karbidov, nitridov, karbonitridov. Zlepšuje sa aj kvalita hraníc zrn obmedzením výskytu mriežkových porúch a čiastočným rozpustením nečistôt. Parametre ohrevu je nevyhnutné voliť tak, aby sa zamedzilo nebezpečnému zhrubnutiu zrna, nadmerným stratám opalom a oduhlíčením, alebo opačne nauhličením povrchu a vzniku trhlín z tepelného pnutia [4, 5]. Mechanické vlastnosti materiálu majú značný vplyv na prípustnú rýchlosť ohrevu a odolnosť ohrievanej ocele voči vzniku tepelných trhlín. Dôležité sú najmä v oblasti teplôt do 500 °C až 550 °C, kedy oceľ prechádza z pružného do plastickeho stavu. Rozhodujúcimi podmienkami ohrevu sú: výška teploty ohrevu, rýchlosť ohrevu, celkový čas ohrevu. So zvyšujúcou teplotou sa deformačný odpor trvalo znižuje a pri teplotách nad 1250 °C klesá pri väčšine ocelí pod 50 MPa. Hrubozrnná prehriata oceľ má zníženú plasticosť a preto ju treba spracúvať opatrne. Celková doba ohrevu má byť minimálna pre dosiahnutie rovnomerného prehriatia materiálu.

ZÁVER

Príspevok svoj stanovený cieľ naplnil v tom zmysle, že jednoznačne potvrdil vhodnosť overeného riešenia a poukázal na veľké možnosti pri prelínaní technológií vo výrobnom procese. Opísané riešenie je vhodné pre rozličné firmy, pretože kvalita a ostatné požiadavky na produkciu výrobkov sa dajú realizovať jednoduchším spôsobom. Jednoduchý nástroj s aplikáciou a zohľadnením teoretických poznatkov spravidla prináša značný efekt vyjadrený nielen finančne, ale aj kvalitatívne, čo sa potvrdilo aj v tomto prípade.

LITERATÚRA

- [1] MARCINIAK, Z. (1984): *Theorie der Blechformung*. SNTL Prague.
- [2] MARCINIAK, Z. - DUINCE, J.L. - HU, S.J. (2004): *Sheet Metal Forming*. Bittenworth - Heinman, ISBN 0-7506-5300-0.
- [3] STOROŽEV, M.V. - POPOV, J. A. (1981): *Teória tvárnenia kovov*. Alfa Bratislava.

- [4] MORAVEC, J. (2017): *Unconventional forming of Tube Ends*. Hutník, Wiadomosci hutnicze, Tom. LXXXIV (84) Sierpien 2017, Nr. 8str.377-379, ISSN 1230-3534, eISSN 2449-8997.
- [5] MORAVEC, J. (2007): *Nekonvenčné využitie obrábacieho stroja v tvárnení*. NT 07, Žilina 21.6.2007, CD s. 37-41, ISBN 978-80-8070-714-9.
- [6] KUMAR, S. (2008): *Technology of Metall Forming Processes*. New Delhi, India, p. 358, ISBN 978-81-208-3425-0.
- [7] MORAVEC, J. (2015): *Theory of metals forming*. EDIS ZU Zilina, 332 str. ISBN 978-80-554-1095-1.
- [8] *Metal Forming Handbook*. Springer Verlag Berlin, ISBN 3-540-61185-1.
- [9] NIKEL, Z. (1990): *Theory of forming*. FMMI, VSB – TU Ostrava.
- [10] POLAK, K. (1985): *Forming theory and tools*. SVST Bratislava.
- [11] JOHNSON, W. - MAMALIS, A. G. (1998): *Plasticity and metal forming*. Cambridge.
- [12] KUNDAR, S. (2004): *Technology of Metal Forming Processes*. ISBN 978-81-203-3425-0.
- [13] BOLJANOVIC, V. (2005): *Sheet Metal forming processes and die Design*. ISBN 0-8311-3182-9.
- [14] PEARCE, R. (2010): *Sheet Metal forming*. ISBN 0-7503-0101-5.
- [15] *Metal Forming Handbook*. Springer Verlag Berlin, ISBN 3-540-61185-1.
- [16] HOSFORD, W.F. - CADDEL, R.M. (2011): *Metal Forming, Mechanics and Metallurgy*. Cambridge Uni.Press, ISBN 978-1-107-00452-8.

Výroba ozubených kolies pomocou 3D tlač

Silvia Maláková, doc. Ing., PhD.*

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

Daniela Kepeň Harachová, Ing., PhD.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 9, 042 00 Košice.
E-mail: daniela.kepen.harachova@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 2366

Samuel Sivák, Ing.

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

Manufacturing of gear wheels using 3D printing

Abstract: Gear transmission can consist of gear wheels that are made of different materials and technologies. The manufacturing process of gear wheels depends mainly on the required properties and the choice of material. Less expensive methods can be used for gears where the load is minimal and high precision is not required. Such methods include, for example, the production of plastic wheels by injection into molds or additive manufacturing. Today, additive technologies are being used more and more, which, among other things, are also used to produce gears. In this article, various types of additive technology are described, as well as materials that are often used in this method of production.

Keywords: gear wheel, manufacturing, additive manufacturing.

ÚVOD

Postup výroby čelných ozubených kolies závisí hlavne na požadovaných vlastnostiach a na voľbe materiálu. Presnosť ozubenia pri obrábaní ovplyvňuje najmä kinematika obrábacieho procesu, technologické základne, nástroj, spôsob upnutia obrobku a rezné prostredie [1-5]. Pri ozubeniach, kde je minimálne zaťaženie a nie je vyžadovaná vysoká presnosť, je možné použiť menej nákladné metódy [6, 7]. K takýmto metódam patrí napríklad výroba plastových kolies vstrekaním do foriem alebo aditívna výroba.

Aditívna výroba je synonymom k dnes stále viac populárnej 3D tlači. V minulosti bola táto technológia nazývaná tiež *rapid prototyping*, avšak dnes to už nie je úplne správne pomenovanie, keďže tento pojem označuje spôsob výroby vhodný k rýchlemu a relatívne lacnému vytváraniu prototypov, nie konečných výrobkov.

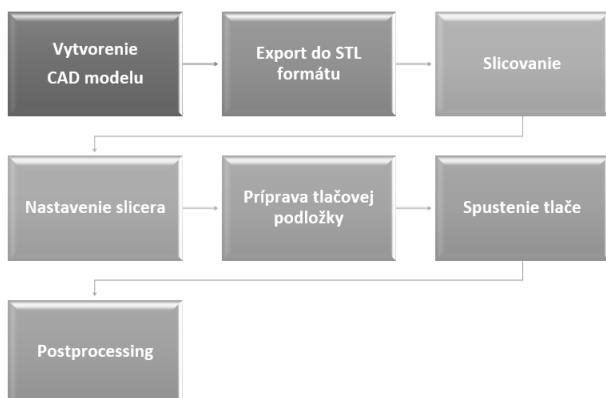
Na rozdiel od obrábania, kedy sa pre získanie požadovaného tvaru objektu materiál odoberá,

aditívna technológia je proces, pri ktorom vzniká výrobok postupným nanášaním tenkých vrstiev materiálu na seba, zvyčajne jednotnej hrúbky [8-12]. Takýmto spôsobom pridávania 2D vrstvy na vrstvu vznikne 3D objekt. Každá vrstva je prierezom danej časti objektu. Pretože vrstva nemôže byť nekonečne tenká, bude väčšinou finálny výrobok vykazovať nejaké známky nanášaných vrstiev. Čím bude vrstva tenšia, tým sa bude hotový výrobok podobať prvotnému modelu. Výhodou aditívnej výroby je možnosť zhotoviť takmer akýkoľvek tvar. Naopak nevýhodou je isté obmedzenie v materiáloch, ktoré je možné použiť.

Ozubené prevody môžu pozostávať z kolies, ktoré sú vyrobené z rôznych materiálov a rôznymi technológiami [13]. Dnes sa čím ďalej, tým viac používajú aditívne technológie, ktoré sa okrem iného používajú aj na výrobu ozubených kolies. V tejto príspevku sú popísané rôzne druhy aditívnych technológií a taktiež materiály ktoré sa často používajú pri tomto spôsobe výroby.

1 PROCES VÝROBY POMOCOU ADITÍVNEHO MODELOVANIA

Celý proces aditívnej výroby obsahuje radu krokov od vytvorenia digitálneho CAD modelu k fyzickému objektu (obr.1).



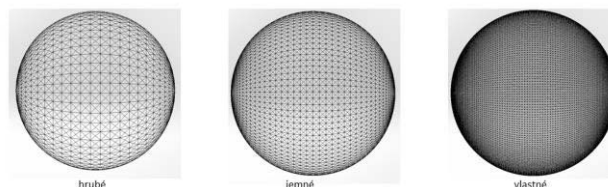
Obr. 1. Proces výroby pomocou aditívneho modelovania

1.1 Vytvorenie CAD modelu

Vytvorenie 3D modelu v CAD systéme. Všetky časti sú popísané modelom, ktorý plne popisuje povrch modelovaných objektov. Túto požiadavku splňuje pravdepodobne akýkoľvek profesionálny CAD softvér, ale taktiež množstvo voľne dostupných programov. 3D model je možné získať vymodelovaním vlastného modelu, stiahnutím už hotového modelu alebo 3D skenovaním existujúceho objektu.

1.2 Export do STL formátu

Hotový a uložený 3D objemový model je možné konvertovať do špeciálneho súborového formátu, známeho ako *STL* (*Standard Triangulation Language*). Tento formát sa často využíva v aditívnej výrobe pre export modelov pre prípravu výroby 3D tlačou, teda stavbou kovových a plastových dielov vrstvou po vrstve. Zápis *STL* súboru môže byť buď textový (*ASCII*), alebo binárny, ktorý sa používa bežnejšie, pretože je oveľa kompaktnejší a má menšiu veľkosť. Pri 3D tlači sa tento formát označuje ako prechodový. Služi spravidla len pre prevod súboru z CAD softwaru do 3D tlačiarne. Model, ktorý sa prevedie do *STL* formátu reprezentuje povrch ako súbor trojuholníkov rôznych veľkostí v závislosti na požadovanom rozlíšení. Čím je rozlíšenie vyššie, tým budú trojuholníky menšie, tzn. že povrch modelu bude hladší ale čas výpočtu modelu bude dlhší. *STL* model je rozdelený do veľmi tenkých vrstiev pozdĺž roviny osí *X* a *Y*. Každá vrstva je postavená na predchádzajúcu vrstvu a pohybuje sa nahor smerom v smere osy *Z*. Pre 3D tlač je nevyhnutné, aby všetky normály boli správne nastavené smerom z daného objektu. Pri exporte modelu pre 3D tlač si môžeme zvoliť rozlíšenie ako hrubé, jemné alebo vlastné (obr. 2).



Obr. 2. Možnosti rozlíšenia pri exporte do formátu *STL*

1.3 Vytváranie vrstiev (Slicovanie)

Formát *STL* je pre tlačiareň nezrozumiteľný a nie je možné ho ihneď tlačiť. *STL* súbor je vstupom pre program, ktorý sa obecné nazýva krájač (*slicer*) (napr. *PrusaSlicer*, *Simplify3D*, *Cura*). Ďalším vstupom do slicera sú parametre a nastavenia, ktoré určujú kvalitu tlače, chladenie, teplotu, typ filamentu a pod. Výstupným súborom zo slicera je súbor vo formáte *G-code*. Prevod *STL* do formátu *G-code* spočíva v tom, že model je v sliceri rozrezaný na tenké vrstvy sú vytvorené cesty pohybov extrudera v jednotlivých vrstvách. Najčastejšie sa 3D modely šíria pomocou formátu *STL* a potom je už na každom užívateľovi ako tzv. naslicuje model podľa svojich požiadaviek a potrieb v závislosti na použítom materiáli a tlačiarne.

1.4 Nastavenie slicera

Medzi základné nastavenia slicera patria:

- teplota filamentu a podložky,
- výška vrstvy,
- *vertical shells/Perimeters* (obvody),
- *horizontal shells/Solid layers* (plné vrstvy),
- *infill* (výplň),
- *supports* (podpery),
- *brim* (golier),
- *skirt* (obrys),
- *raft*,
- chladenie.

1.5 Príprava tlačovej podložky

Aby bola tlač úspešná je dôležitá správna príprava tlačovej podložky. Zlá príprava by mohla mať za následok odlepenie tlačeného objektu od podložky a tým by tlač neúspešná. Tlačové podložky, ako aj iné časti 3D tlače prešli svojím vývojom. Od nevyhrievaných k vyhrievaným podložkám, tlač na zrkadlo, používanie laku na vlasy pre zvýšenie adhézie a pod. Zmenu priniesol povrch v podobe *PEI* fólie. Tento povrch pred tlačou netreba nijako špeciálne upravovať okrem jeho odmastenia.

1.6 Spustenie tlače

Jedná sa vlastne o čítanie vygenerovaného *G-code* a posielanie ho do tlačiarne. Počas celej doby tlače musí

byť zaručené, že tlačiareň bude postupne dostávať inštrukcie z *G-code* súboru.

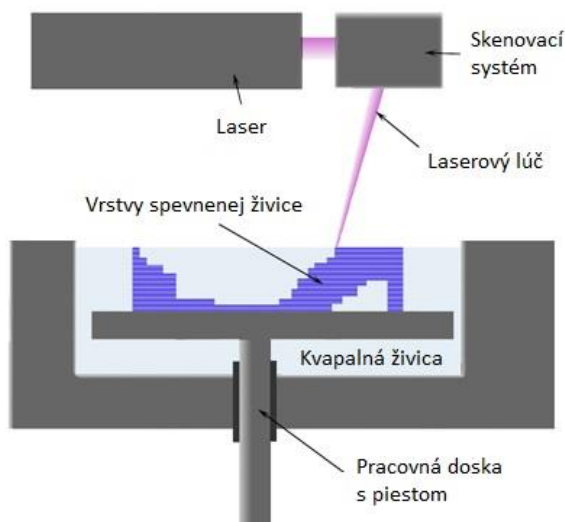
1.7 Postprocessing

Vytlačené modely môžeme väčšinou ihneď po vytlačení použiť ako funkčné diely. *Postprocessing* je potrebný ak máme vyššie nároky na vzhľad výtlačku. Hotový model je možné následne brúsiť, laminovať, maľovať akrylovými farbami, striekať farbou, pieskovať, vŕtať alebo frézovať.

2 DRUHY ADITÍVNYCH TECHNOLOGIÍ

Existuje množstvo druhov aditívnych technológií, ktoré sa odlišujú v spôsobe vytvárania jednotlivých vrstiev modelu a použitými materiálmi.

Stereolitografie (SLA) je najstaršou technológiou 3D tlače, ktorá bola vynájdená už v roku 1986 (*Charles Hull*). Je to metóda založená na princípe vytvrdzovania tekutej živice za pomoci ultrafialového lasera (obr. 3). Zo všetkých technológií aditívnej výroby je najkomplikovanejšia, ale zato aj najdetailnejšia, preto výsledkom je najlepšia kvalita povrchu a najlepšie prevedenie detailov.



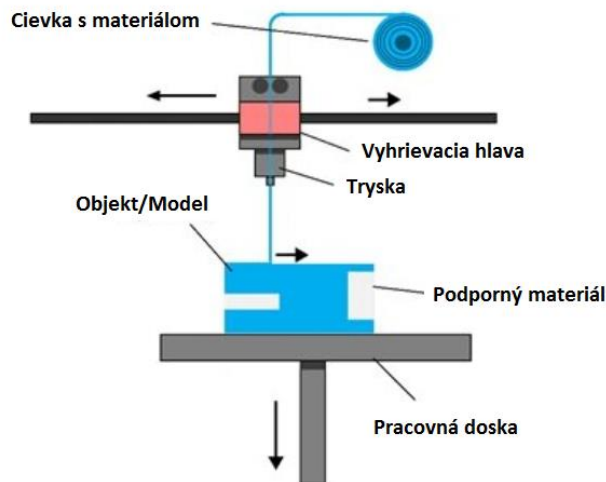
Obr. 3. Princíp stereolitografie technológie 3D tlače

SLA je vhodnou technológiou vtedy, keď je požadovaná vysoká presnosť, vzhľad a detail súčiastky. Naopak nie je to vhodná technológia ak je rozhodujúcim kritériom rýchlosť výroby modelu.

FDM (Fused Deposition Modeling) alebo tiež *FFF (Fused Filament Fabrication)* je asi najpopulárnejšia technológia 3D tlače, vzhľadom k počtu dostupných tlačiarní na trhu od základných po profesionálne tlačiarne vysokej kvality.

Princíp technológie *FDM* (obr. 4) spočíva v tavení a vytlačovaní materiálu dýzou vo forme vlákna na podložku, kde je svojím pohybom vo dvoch osiach postupne nanášaná veľmi tenká vrstva materiálu v rovine horizontálneho prierezu budúceho výrobku,

ktorá ihneď po nanesení stuhne. Model vzniká od spodnej časti k hornej. Materiál (*filament*) sa privádza z cievky k pohyblivej hlave, ktorá je riadená servomotormi. Vlákno prechádzajúce cez tlačovú hlavu je roztavené výhrevnými telesami. Takto roztavený materiál je cez dýzu vytlačovaný na povrch vyrábanej súčiastky.



Obr. 4. Princíp technológie *FDM* 3D tlače [13]

4 VÝROBA OZUBENÝCH KOLIES 3D TLAČOU

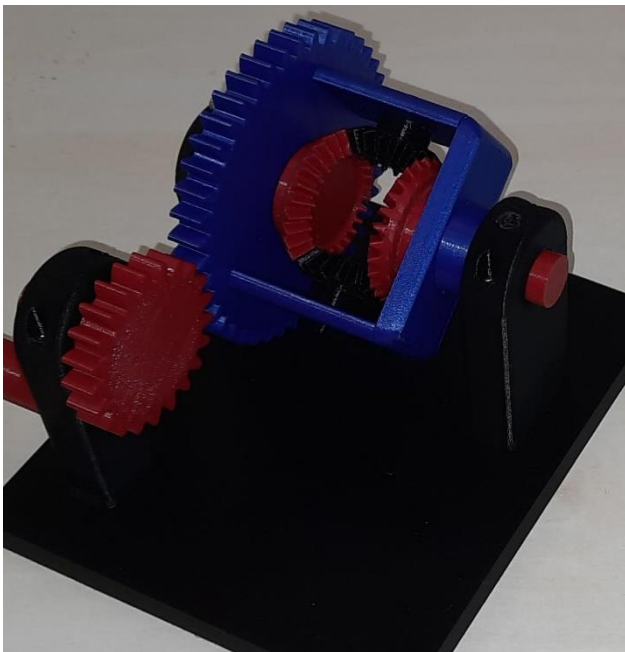
Výroba ozubených kolies je jednou z najnáročnejších oblastí strojárkej výroby, závisí od mnohých faktorov. Na výrobcov ozubených kolies sú kladené neustále väčšie a väčšie nároky. Ozubené kolesá musia byť vyrábané rýchlejšie, lacnejšie a vo vyššej kvalite.

Aby sa výroba neustále posúvala vpred a boli uspokojené požiadavky trhu musia technológovia, konštruktéri a iní odborní pracovníci neustále vyvíjať nové technológie a metódy výroby, ktoré budú efektívnejšie a produktívnejšie [14].

Výroba funkčných dielov pre koncové použitie už nie je doménou výhradne konvenčných technológií. Oblasť, ktorá v súčasnosti začína vzostup a to platí aj pri výrobe ozubených kolies sú aditívne technológie.

Použitie ozubených kolies aditívnou technológiou v súčasnosti je možné, ale závisí od funkcie ozubenia a od požiadaviek na ich prevádzku. Zároveň je potrebné brať do úvahy aj sériovosť výroby. Pri potrebnom veľkom množstve ozubených kolies je vhodnejšie zvoliť konvenčný spôsob výroby ozubených kolies. Pri malých výrobných sériách a pri zložitejších tvaroch ozubených kolies by bolo možné zvoliť aj spôsob výroby ozubených kolies aditívnymi technológiami. Aditívne technológie, hlavne tie ktoré sa venujú výrobe súčiastok z kovu je málo preskúmaná téma a preto výskum venovaný aditívnym technológiám má vysoký potenciál.

Na obr. 5 sú modely ozubených kolies vyrobené pomocou 3D tlače. Tieto modely slúžia ako učebné pomôcky pri výučbe prevodových mechanizmov.



Obr. 5. Modely ozubených kolies vyrobených pomocou 3D tlače

Existuje mnoho spôsobov, ako vyrobiť ozubené kolesá 3D tlačou, ktoré budú rovnako odolné ako konvenčne vyrobené kolesá. Toto sú niektoré z nich:

- teplota filamentu - väčšina vlákien používaných na výrobu 3D tlačených ozubených kolies je termoplastická. Je potrebné si uvedomiť, že každý materiál má svoje jedinečné vlastnosti vrátane požiadaviek na teplotu. Pri 3D tlači je dôležité poznať teplotné požiadavky filamentov, aby sa dosiahol čo najlepší výsledok. Môžu sa použiť vyhrievacie podložky, aby sa vytlačené plasty ochladzovali pomalšie. Vyhneme sa tak deformácii, zmršťovaniu a vrstvy budú dobre priľnavé. Z tohto dôvodu by sa pri 3D tlači s termoplastickými vláknami mali vypnúť chladiace ventilátory,
- prekrytie výplne - na rozdiel od konvenčnej výroby nám aditívne technológie dávajú možnosť nastavenia výplne výrobkov. 3D tlačiarne majú túto jedinečnú funkciu s názvom „Prekrytie výplne“, pomocou ktorej môžeme nastaviť, koľko výplne chceme použiť. Pri 3D tlači je to veľmi dôležitý parameter, pretože správne nastavenie prekrytia výplne nám zvyšuje pevnosť medzi výplňou a obvodom modelu. Vo všeobecnosti platí, čím vyššie je percento prekrytia výplne, tým pevnejší bude vytlačený objekt. Avšak nastavenie príliš vysokého percenta výplne, spôsobí značnú spotrebu materiálu a predĺži čas tlače. Je preto potrebné nastaviť primerané prekrytie výplne (väčšinou 15 % ÷ 50 %), aby bol výsledný model dostatočne pevný, ale na druhej strane ekonomicky výhodný,
- zníženie chladenia - niektorí výrobcovia využívajú chladenie na zlepšenie kvality povrchu 3D tlačených predmetov. Tento proces však môže spôsobiť slabé miesta, ak sa vykoná neefektívne. Vystavenie 3D tlačených modelov náhlej zmene teploty môže viesť k nárastu amorfných štruktúr, ktoré by mohli ovplyvniť celistvosť ozubených kolies. Navyše rýchle ochladenie vytvrdí vytlačený predmet rýchlejšie. To môže spôsobiť, že sa vrstvy ľahko oddelia, pretože materiály majú menej času na spojenie. Každé plastové vlákno vydrží rôzne úrovne teplôt. PLA je zatiaľ jediný materiál, ktorý veľmi dobre funguje so silnými chladiacimi ventilátormi. Ak teda použijeme iný plastový materiál, je lepšie znížiť výkon chladiaceho ventilátora, aby sa časti počas procesu tlače pevne spojili,
- výška vrstvy - pri 3D tlači nám definuje rozlíšenie alebo detail objektu. Čím je výška vrstvy nižšia, tým je model zložitejší. Uprednostňuje sa nižšia výška vrstvy aj kvôli tomu, že vrstvy budú mať lepšiu priľnavosť, čo zvyšuje pevnosť a trvanlivosť. Okrem toho bude menej otvorených priestorov, ktoré môžu tvoriť

slabé miesta vo vytlačennom modeli.

Ozubené kolesá vyrobené 3D tlačou sú dnes aplikované aj v rôznych priemyselných odvetviach. Na obr. 6 je model komerčne vyrábanej planétovej prevodovky, kde boli ozubené kolesá nahradené kolesami vyrobenými.

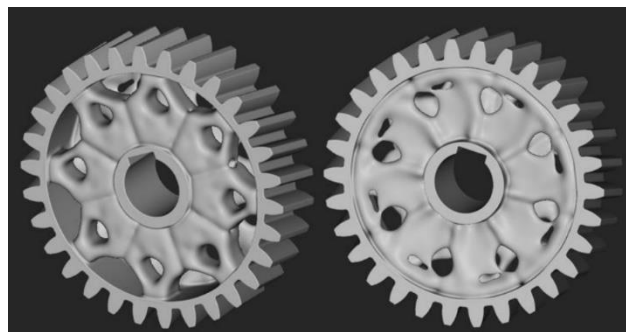


Obr. 6. Planétová prevodovka s ozubenými kolesami vyrobenými pomocou 3D tlače

Jedná sa o funkčnú náhradu pôvodného strojovo obrábaného hliníkového kolesa. Pre výrobu satelitov bola použitá technológia tavenia plastovej struny *FDM* a kompozitný materiál s prímiesou 15 % uhlíkových častíc, ktoré zabezpečili vysokú tuhosť a pevnosť planétového kolesa. Vďaka nízkej hustote kompozitu $1,08 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ oproti $2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ hustoty hliníku a použitím optimálnej vnútornej výplne sa dosiahlo zníženie hmotnosti o vyše 60 % pôvodnej hmotnosti, pri zachovaní funkčnej pevnosti a tuhosti.



Obr. 7. Rôzne tvary telies ozubených kolies vyrobených pomocou 3D tlače



Obr. 8. Využitie generatívneho dizajnu pri optimalizácii tvaru telesa ozubeného kolesa

Ďalšou výhodou je možnosť vyrobiť tvary telies ozubených kolies, ktoré nie je možné vyrobiť štandardnými technologickými postupmi výroby (obr. 7).

Tradičné výrobné metódy ponechávajú len obmedzený priestor na skutočnú optimalizáciu ozubených kolies, pretože je príliš nákladné vyrábať také tvary telies ozubených kolies, ktoré by boli prispôbené požiadavkám a výsledkom generatívneho dizajnu (obr. 8). Je to spôsobené najmä tým, že by bolo potrebné vykonať niekoľko jednotlivých krokov a v prípade potreby vytvoriť alebo zakúpiť vhodné nástroje. Jedným zo spôsobov, ako to obísť, je použitie 3D tlače, ktoré ponúka možné riešenie v tom, že prostredníctvom procesov je možné vyrobiť ozubené koleso v jednom kuse a bez ďalších nástrojov.

ZÁVER

Výroba ozubených kolies už nie je záležitosťou výhradne konvenčných technológií. Aditívna výroba sa dnes využíva v mnohých odvetviach (medicína, astronautika, umenie, móda, stavebníctvo a pod.) a výnimkou nie sú ani funkčné diely zariadení, ku ktorým patria aj ozubené kolesá. Neustály rast dopytu po týchto súčiastkach, núti výrobcov premýšľať o inovatívnych spôsoboch ako ich vyrábať rýchlejšie. Väčšina firiem v dnešnej dobe ponúka výrobu ozubených kolies pomocou *FDM* tlačiarne, keďže tieto zariadenia sú najviac dostupné a najrozšírenejšie. Teda materiálom takýchto kolies je väčšinou plast (*Nylon*, *PLA*, *PETG*, *ABS*). Preto sa takéto kolesá používajú skôr na prenos menších výkonov. Dalo by sa povedať, že ozubené kolesá vyrobené aditívnymi technológiami sú omnoho menej odolné ako klasicky vyrobené ich náprotivky z kovu, ale neustály vývoj, napredovanie a nové materiály v oblasti 3D tlače toto tvrdenie postupne spochybňujú.

Pod'akovanie

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia grantových projektov: 029TUKE-4/2021

„Implementácia moderných edukačných prístupov pri konštruovaní prevodových mechanizmov“ a VEGA 1/0528/20 „Riešenie nových prvkov ladenia mechanických sústav“.

LITERATÚRA

- [1] PAGAC, M. - HAJNYS, J. - HALAMA, R. - ALDABASH, T. - MESICEK, J. - JANCAR, L. - JANSKA, J. (2021): *Prediction of Model Distortion by FEM in 3D Printing via the Selective Laser Melting of Stainless Steel AISI 316L*. Applied Sciences 2021, 11(4), p.1656.
- [2] CZECH, P. - ŁAZARZ, B. - TUROŃ, K. (2017): *Influence of conditions of vehicle motion on its economy*. In: *Autobusy* No. 6, p. 136-142 ISSN 1509-5878.
- [3] CHEN, X. et al. (2018): *User-Driven Generative Design*. In: *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems 2018*, ACM Press, New York, New York, USA, pp. 1-12.
- [4] MANTIČ, M. - KULKA, J. (2022): *Effect of notch geometry change on draw rod durability*. In: *Engineering Failure Analysis*. Amsterdam (Nemecko): Elsevier, Roč. 141, p. 1-12.
- [5] KRAJŇÁK, J. - URBANSKÝ, M. - ŽUĽOVÁ, L. (2022): *Investigation of air temperature change in the flexible element depending on connecting holes number during compressing of this element*. In: *Projektowanie, badania i eksploatacja*. - Bielsko-Biala (Poľsko): Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Białej p. 299-306.
- [6] MORAVEC, J. - KOPAS, P. - JAKUBOVIČOVÁ, L. - LEITNER, B. (2018): *Experimental casting of forging ingots from model material*, MMS 2017 MATEC Web of Conference, pp. 157.
- [7] KOPAS, P. et al. (2019): *Fatigue characteristics of welded high strength steel in the low cycle region of loading*. MATEC Web of Conferences, Volume: 254, p. 1-10.
- [8] KUEKA, J. a kol. (2018): *Failure analysis of the foundry crane to increase its working parameters*. *Engineering Failure Analysis*. No. 88, pp. 25-34.
- [9] CZECH, P. (2018): *Autonomous vehicles: basic issues*. *Scientific Journal of Silesian University of Technology = Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej: Series Transport: Seria Transport.*, 100, pp. 15–22.
- [10] GREGA, R. - KRAJŇÁK, J. - MORAVIČ, M. (2018): *Experimental verification of the impact of a technical gas-using pneumatic coupling on torsional oscillation*. *Scientific Journal of Silesian University of Technology = Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej: Series Transport: Seria Transport.*, č. 99, pp. 55-63.
- [11] SAPIETOVÁ, A. (2018) *Simplified computation methodology for contact forces on tapered rolling bearing with flexible parts*. *Scientific Journal of Silesian University of Technology*, Volume 99, pp. 177–182.
- [12] MANTIČ, M. a kol. (2016): *Autonomous online system for evaluating steel structure durability*. *Diagnostyka*. Vol. 17, no. 3 pp. 15-20. - ISSN 1641-6414.
- [13] STRÍTESKÝ, O. (2019): *Základy 3D tisku*. Praha: Prusa Research a.s., p. 61.
- [14] ZHANG, Y., MAO, K., LEIGH, S., SHAH, A., CHAO, Z. (2020): *A parametric study of 3D printed polymer gears*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, pp. 4481–4492.

Конструктивные особенности современных горных велосипедов, часть 2.

DOI:
<https://doi.org/10.26552/tech.C.2023.1.8>

Ян Дижо, к.т.н., доц.*

Кафедра транспорта и подъёмно-транспортных машин, Машиностроительный факультет, Жилинский университет в Жилине, Универзитна 1, 010 26 Жилина.
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Тел.: + 421 41 513 2560

Мирослав Блатницкий, к.т.н., доц.

Кафедра транспорта и подъёмно-транспортных машин, Машиностроительный факультет, Жилинский университет в Жилине, Универзитна 1, 010 26 Жилина.
E-mail: miroslav.blatnicky@fstroj.uniza.sk, Тел.: + 421 41 513 2659

Вадим Васильевич Ищук, Инж.

Кафедра транспорта и подъёмно-транспортных машин, Машиностроительный факультет, Жилинский университет в Жилине, Универзитна 1, 010 26 Жилина.
E-mail: vadym.ishchuk@fstroj.uniza.sk, Тел.: + 421 41 513 2563

Денис Молнар, Инж.

Кафедра транспорта и подъёмно-транспортных машин, Машиностроительный факультет, Жилинский университет в Жилине, Универзитна 1, 010 26 Жилина.
E-mail: denis.molnar@fstroj.uniza.sk, Тел.: + 421 41 513 2659

Себастьян Солчанский, Инж.

Кафедра транспорта и подъёмно-транспортных машин, Машиностроительный факультет, Жилинский университет в Жилине, Универзитна 1, 010 26 Жилина.
E-mail: sebastian.solcansky@fstroj.uniza.sk, Тел.: + 421 41 513 2563

Борис Плайдичко, Бц.

Кафедра транспорта и подъёмно-транспортных машин, Машиностроительный факультет, Жилинский университет в Жилине, Универзитна 1, 010 26 Жилина.

Design solutions of modern terrain bikes, the 2nd part

Abstract: Cycling and bicycles become still more and more popular. People transport themselves to the work, to the school, to shops and other by bicycles. Bicycles represent quite effective transport means regarding to production of gas emissions, noise emissions together with better possibilities to leave them near to wanted facilities. However, bicycles are suitable for recreations. Currently, trips to nature are very popular. For safe cycling, it is appropriate to use a proper bicycle. There are terrain bicycles, which have the design customized for riding in the heavy-road conditions. This article includes an introduction to the topic of design modern terrain bicycles, their main types and description of their basic characteristics.

ВВЕДЕНИЕ

Велосипед одно из самых важных открытий человечества, его значение равнозначно изобретению печатного станка. В течение последнего столетия рамы велосипедов изготавливаются из стали. Она достаточно прочна, надежна, имеет долгий срок службы. Сейчас для

изготовления рам используются самые разные материалы: *сталь* с различными примесями (*хром, никель, марганец, молибден*), *алюминий, титан, полимеры*, армированные *алюминиевыми* волокнами, *формованный пластик, дерево* и даже *бамбук*. Углеродное волокно является наиболее используемым материалом для изготовления рам

велосипедов для профессионального использования в спортивных дисциплинах из-за его легкого веса.

Горный велосипед все больше входит в нашу культуру, становится способом проведения досуга, способом расслабления. Похоже, мы переживаем возвращение нового золотого века велосипедов.

1 ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ ГОРНЫХ ВЕЛОСИПЕДОВ

Существует ряд ключевых факторов и характеристик, которые влияют на обеспечение хороших ходовых качеств горного велосипеда.

1.1 Геометрия велосипедной рамы

Основная конструкционная функция рамы велосипеда это сохранение прочности под нагрузкой, обеспечение опоры для велосипедиста, надежное крепление колес, поглощение усилий, возникающих при педалировании и торможении. Геометрия рамы оказывает значительное влияние на способность велосипеда реагировать на маневры велосипедиста, на поведение велосипеда при подъеме в гору, при спуске и на его отзывчивость на поворотах. Это напрямую влияет на ощущение езды, комфорт и безопасность. С точки зрения конструкции, ромбовидная рама, состоящая из двух треугольников, представляется наиболее удачным вариантом дизайна.

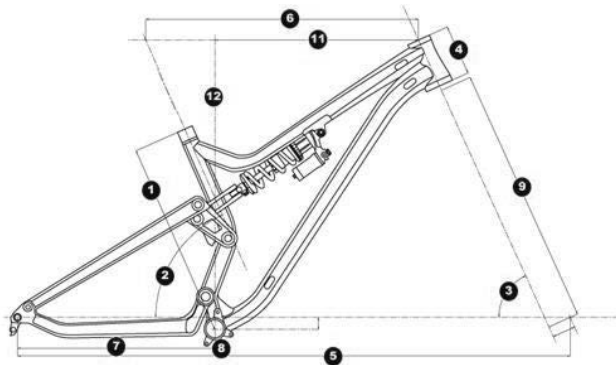


Рис. 1. Геометрия велосипедной рамы

Объяснение основных терминов, связанных с геометрией велосипедной рамы, показанных на рис. 1:

1. Длина подседельной трубы - это расстояние от кареточного узла велосипеда до конца этой трубы. Она используется для определения размера велосипеда. Вместе с длиной верхней трубы рамы они определяют размер рамы. Рама меньшего размера лучше управляется и, по сравнению с более длинными рамами, обладает большей жесткостью и устойчивостью к деформации при кручении.

- Угол наклона подседельной трубы - это угол, который образует подседельная труба с горизонтальной плоскостью. Вместе с углом наклона рулевого стакана и длиной треугольника рамы угол наклона подседельной трубы определяет позицию велосипедиста. При меньшем угле наклона подседельной трубы центр тяжести смещается назад, что является преимуществом при езде вниз, но может привести к подъему переднего колеса на крутых склонах при езде вверх по склону. При большем угле наклона подседельной трубы центр тяжести смещается вперед, что выгодно при езде в гору. Для горных велосипедов угол наклона седла варьируется от 65° до 80° .
- Угол наклона рулевого стакана - это угол, который образует рулевой стакан (труба впереди велосипеда, где располагается рулевая колонка и шток вилки) с прямой соединяющей оси переднего и заднего колеса. Этому углу уделяется наибольшее внимание при проектировании геометрии рамы велосипеда, поскольку он оказывает наибольшее влияние на устойчивость велосипеда и величину нагрузки на раму за рулевым стаканом. Чем меньше угол наклона рулевого стакана, тем выше устойчивость при спуске с крутых склонов с высокой скоростью, но на низких скоростях это приводит к замедленной реакции велосипеда на действия велосипедиста и может вызвать раскачивание велосипеда из стороны в сторону при движении в гору. Для горных велосипедов значение угла наклона рулевого стакана варьируется от 62° до 75° .
- Длина рулевого стакана - вместе с длиной подседельной трубой определяет размер рамы велосипеда. Удлинение рулевого стакана приведет к смещению центра тяжести назад и уменьшению эффективной длины верхней трубы рамы. Поэтому, чтобы минимизировать длину, под рулевым штоком используется шайба, позволяющая отрегулировать руль на подходящую высоту без удлинения рулевого стакана.
- Колесная база - это расстояние от центра оси заднего колеса до центра оси переднего колеса, которое влияет на устойчивость велосипеда. Короткая колесная база имеет преимущество в виде легкости управления, но при этом велосипед легко опрокинуть на переднее или заднее колесо. И наоборот, длинная колесная база повышает устойчивость велосипеда, но также делает велосипед менее маневренным.

6. Эффективная длина верхней трубы (*top tube lenght*) - это горизонтальное расстояние от центра рулевого стакана до виртуального продолжения подседельной трубы. На неё также влияет угол наклона подседельной трубы. Это один из определяющих параметров при выборе подходящего размера рамы, который определяет необходимое расстояние до руля, для комфортной посадки велосипедиста.
7. Длина цепных перьев заднего треугольника (*chainstay*) - это длина от кареткового узла велосипеда до точки крепления заднего колеса. Она напрямую связана с маневренностью велосипеда. Слишком короткая конструкция снижает устойчивость при езде на крутых подъемах и может мешать использовать более широкие колесные шины или большего количества задних звезд механизма переключения передач.
8. Провис каретки (*BB drop*) - расстояние от центра каретки до линии проведенной между осями переднего и заднего колес. Чем больше провис каретки, тем ниже каретка. Для горных велосипедов чем каретка ниже, тем быстрее можно проходить повороты и тем стабильнее становится велосипед, поскольку центр тяжести велосипедиста смещается вниз, уменьшая при этом возможность нежелательного подъема велосипеда на переднее или заднее колесо, а также улучшая перенос центра тяжести из стороны в сторону. Однако слишком большое смещение центра тяжести вниз может стать недостатком при педалировании в нижнем положении педали, которая может зацепиться за неровности рельефа. С этим понятием связана высота каретки (*BB height*) - это расстояние от центра каретки до земли. Более высокое положение кареточного узла ассоциируется с лучшей маневренностью велосипеда и улучшает способность переносить центр тяжести вперед или назад, что используется велосипедистами при езде по памп-трекам.
9. Длина передней вилки - это расстояние от точки крепления переднего колеса до рулевого стакана. Данная величина оказывает значительное влияние на управляемость и устойчивость велосипеда.
11. Вылет (*reach*) - это горизонтальное расстояние между кареточным узлом велосипеда и центром верхней части рулевого стакана (рис. 7).
12. Высота руля (*stack*) - это вертикальное расстояние между верхней частью рулевого

стакана и кареточным узлом велосипеда (рис. 7).

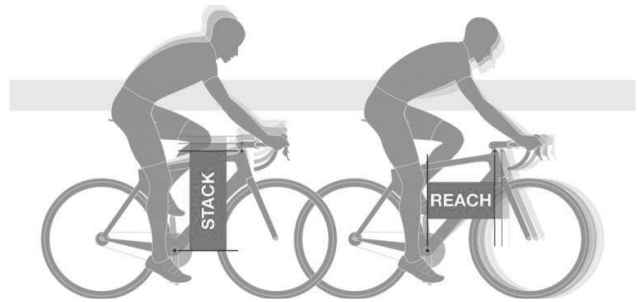


Рис. 2. Высота руля (*stack*) и вылет (*reach*) [2]

Также с геометрией рамы связано понятие *standover* - это расстояние (пространство) между промежностью велосипедиста и верхней трубой в месте ее соединения с подседельной трубой, когда велосипедист стоит, опираясь на велосипед. Эта величина зависит от длины ног велосипедиста и поэтому очень индивидуальна, она зависит не только от параметров геометрии рамы.

2 МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАМЫ ВЕЛОСИПЕДА

Конструкция рамы велосипеда в значительной степени определяет его ходовые качества, поэтому выбор подходящего материала для ее изготовления очень важен. Основными критериями выбора являются прочность, гибкость, жесткость, низкая хрупкость, малый удельный вес, устойчивость к коррозии и т.д. Помимо этих основных критериев, при выборе материала необходимо также учитывать сложность и особенности его технологической обработки. Не менее важным является экономический вопрос, а именно цена материала и цена его обработки.

Материалы, используемые для изготовления велосипедных рам, можно разделить на металлы и неметаллы. Из металлов в основном используется сталь, алюминий и титан, а их свойства улучшаются с помощью различных примесей. В конструкции велосипедных рам из неметалла используются композитные материалы с эпоксидной матрицей и углеродными волокнами (карбон), реже - дерево, бамбук и, в исключительных случаях, графен.

2.1 Сталь

Преимуществами стали в качестве материала, для изготовления рам велосипедов являются прочность, хорошая обрабатываемость, жесткость, высокая гибкость и низкая стоимость по сравнению с другими материалами.

Недостатками являются высокая плотность (и, следовательно, большой вес изделия) и низкая коррозионная стойкость.

Качественные стальные трубы для изготовления рам высокого класса производят компании *Reynolds* (сталь *Reynolds 531* и *Reynolds 753*), *Columbus* (сталь *XCr*, *Niobium* и *Nirvacrom*), *Dedacciai* (сталь *DR-Zero* и *DR-Zerouno*) [3].

2.2 Титан

До появления композитных материалов *титан* был самым передовым материалом для изготовления рам. Он очень легкий (его плотность составляет $4500 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$), эластичный, обладает отличной пластичностью, но относительно мягкий.

Его прочность примерно в два раза ниже, чем у стали. Для повышения прочности велосипедной рамы используются трубы большего диаметра. Поскольку удельный вес титана меньше, чем у стали, рама, даже если она изготовлена из более толстых титановых труб, будет легче стальной.

Титан и его сплавы требуют технологически сложного подхода к обработке и сварке; сварка может производиться только в атмосфере аргона, что значительно удорожает производство титановых рам.

2.3 Алюминий

Алюминий имеет низкую плотность ($\rho = 2700 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$), хорошо поддается горячей и холодной формовке и устойчив к коррозии. Однако он обладает низкой прочностью, которую можно повысить путем холодной формовки. Низкая прочность материала компенсируется увеличением диаметра труб рамы.

Из-за высокой жесткости и низкой эластичности, рама изготовленная из *алюминия*, может внезапно сломаться при многочисленных воздействиях нагрузок. Решением данной проблемы является использование утонченных труб, стенки которых в середине в два/три раза тоньше, чем на концах труб (*double-buttet* или *triple-buttet*) [3].

2.4 Карбон (углепластики)

Карбон (углепластики) - это краткое название композитного материала с матрицей из полимерных (например, эпоксидных) смол и углеродными (*карбоновыми*) волокнами. Композиты образуются путем соединения двух простых материалов. Матрица - это основной материал, она выполняет функцию связующего элемента, от нее зависит температура и условия обработки композита [4]. Вторым компонентом

композита являются переплетённые нити углеродного волокна, которые выполняют армирующую функцию. От расположения которых зависят механические свойства композита. Слабым местом композитов являются соединения. Самым уникальным свойством углерода является его анизотропия - проявление различных свойств среды в различных направлениях внутри этой среды [3].

ВЫВОДЫ

Представленный материал в данной статье является продолжением работы по проектированию горного велосипеда конкретной конструкции. Конечным продуктом работы будет велосипед для скоростного спуска по бездорожью, предназначенный как для гонок, так и для активного отдыха. Представленные знания, о таких конструкционных параметрах как размеры и используемый материал, являются необходимой отправной точкой в проектировании и производстве горного велосипеда.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Tento výskum podporila Kultúrna a vzdelávacia grantová agentúra MŠ SR v projekte č. KEGA 036ŽU-4/2021: „Implementácia moderných metód počítačovej a experimentálnej analýzy vlastností komponentov vozidiel do vzdelávania konštruktérov dopravných prostriedkov budúcnosti.“

Tento výskum podporila Kultúrna a vzdelávacia grantová agentúra MŠ SR v projekte č. KEGA 031ŽU-4/2023: „Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného programu Vozidlá a motory.“

ЛИТЕРАТУРА

[1] ПЛАЙДИЧКО, Б. (2020): *Дизайн внедорожного велосипеда* (На словацком языке). Бакалаврская работа, Жилинский университет в Жилине, Машиностроительный факультет, номер. 28230920201016.

[2] БИМДЖИМ (2017): *Краткий велосипедный словарь: геометрия рамы и подробное объяснение терминов* [в сети], Доступна с: <https://www.mtbiker.sk/clanky/8807/kratky-cyklisticky-slovník-geometria-ramu-a-hlboky-vyklad-pojmov.html>.

[3] РОДЖЕРС, С. (2015): *Собери свой велосипед*. Байкер, Вин. 7, Но. 2, пп. 32-39, ISSN 1337-981X EV 3231/09.

[4] МАТНЕТ (2006): *Научно-исследовательская и инновационная сеть в области материалов и технологий* [в сети], Доступна с: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=9>.

Generatívny dizajn pri konštrukčnom návrhu tvarov telies čelných ozubených kolies

Samuel Sivák, Ing.

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

Silvia Maláková, doc. Ing., PhD.*

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

Daniela Kepeň Harachová, Ing., PhD.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 9, 042 00 Košice.
E-mail: daniela.kepen.harachova@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 2366

Generative design for constructional design of spur gear wheel bodies

Abstract: A paper was prepared related to current design engineering advancements. Topological optimization and generative design were some of these advancements. The process of topology optimization was explained in the following chapters. Each step is broken down into a paragraph, where it is explained and illustrated with a picture. In a *SolidWorks* program, topology optimization is detailed step-by-step. The last part, which lays out the subsequent approach and other possibilities, summarizes the benefits and drawbacks of this software's approach.

Keywords: Design; topology; structure optimization; topology optimization.

ÚVOD (DOTERAJŠIE POZNATKY)

Počas fázy koncepcného návrhu v procese vývoja výrobku inžinieri a dizajnéri vyvíjajú a posudzujú viaceré možnosti návrhu pri hľadaní najlepších riešení. Postupy zvolené a rozhodnutia urobené počas tejto fázy majú významný vplyv na všetky neskoršie fázy vývoja výrobku vrátane oblastí, ako je výroba, produkcia, kvalita, náklady a iné [1]. Podľa *Andersona* [2] možno údajne až 80 % nákladov na výrobok identifikovať počas fázy návrhu.

Vývoj technológií, najmä v oblasti výpočtového výkonu, strojového učenia a súvisiacich algoritmov, prispel k vytvoreniu inteligentných systémov automatizácie návrhu. Vďaka vysokovýkonnej výpočtovej kapacite, ktorú ponúka *cloud*, sú teraz realizovateľné zložité optimalizačné výpočty a iterácie, ktoré predtým nebolo možné dokončiť. To umožňuje konštruktérom rýchlo vykonávať zložité simulácie na testovanie rôznych konfigurácií výrobkov za rôznych okolností, ktoré poskytujú dôležité informácie na výber optimálnych možností konštrukcie. Na druhej strane rýchly pokrok aditívnej

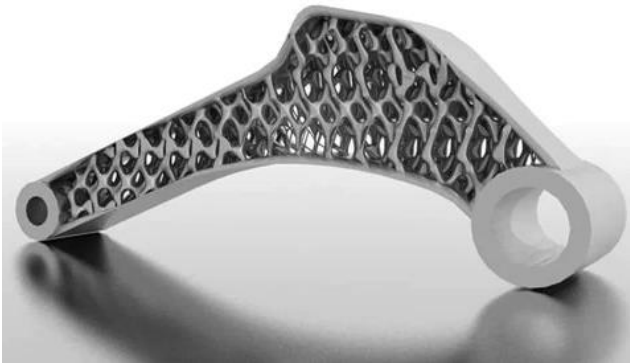
výrobnej technológie vedie k významným zmenám vo výrobe a navrhovaní výrobkov. Umožňujú vyrábať zložité geometrie, ktoré by inak nebolo možné vyrobiť pomocou konvenčných výrobných techník [3].

Využívanie *CAD* systémov sa čoraz častejšie začleňuje do procesu navrhovania a toto začlenenie je podporované rozširujúcim sa rozsahom a možnosťami systémov [4]. Inžinieri začali vytvárať softvér na optimalizáciu topológie založený na *CAD*, ktorý dokáže poskytnúť najlepšie návrhy pre určité konštrukcie [5]. Takéto programy môžu meniť súčasné návrhy, zahrnúť do návrhu explicitné funkcie a vytvárať úplne nové návrhy. Tento nedostatok sa vyriešil začlenením algoritmov generatívneho navrhovania do softvéru *CAD*. Hlavným cieľom týchto programov je podporovať kreativitu dizajnérov vytváraním širokej škály alternatív dizajnu.

1 GENERATÍVNY DIZAJN

Rozvoj generatívneho dizajnu začal už v osemdesiatych rokoch minulého storočia, kde

väčšina publikácií a informácií bola len v teoretickej rovine bez nejakej konkrétnej aplikácie v akomkoľvek priemysle. Prvým odvetvím, v ktorom sa začal používať generatívny dizajn bola architektúra [6]. To odštartovalo záujem aj zo strany akademických pracovníkov, ktorí začali tento druh dizajnu rozvíjať, nakoľko sa tu nachádzal potenciál v spojení výpočtovej techniky a evolučných postupoch pre doposiaľ neštandardné a kvalitné výstupy. V oblasti dizajnu *Vajna a kol.* [7] vyvinuli auto genetickú teóriu dizajnu skúmaním podobností medzi procesom dizajnu v súvislosti s tvorbou dizajnu a prirodzeným procesom evolúcie (obr. 1).



Obr. 1. Výsledok generatívneho dizajnu

Podľa evolučnej teórie možno proces postupu metódy opísať ako neustále zlepšovanie základného riešenia riadiaci sa počiatočnými podmienkami, okrajovými podmienkami a obmedzeniami. Tieto faktory ovplyvňujú postup dizajnu a otvárajú mu nové priestory. Vzhľadom na rôznorodosť použitia, generatívny dizajn v súčasnosti nemá všeobecne akceptovanú koncepciu. Podľa *Shea a kol.* [6] sú "systémy generatívneho navrhovania zamerané na vytváranie nových procesov navrhovania, ktoré poskytujú priestorovo vynaliezavé, ale efektívne a zostaviteľné návrhy s využitím súčasných výpočtových a výrobných možností". Podľa *Krishna* [8] je "generatívny dizajn" dizajnérsky riadená, parametricky obmedzený proces skúmania dizajnu, ktorý využíva parametrické nástroje CAD určené na podporu dizajnu ako vznikajúceho procesu. V súčasnosti však existujú aplikácie používané pri návrhu, ktoré presahujú použitie štandardných nástrojov CAD a nie sú obmedzené parametrickými modelmi [9].

Pomocou procesu taktiež známeho ako generatívny dizajn, ktorý zahŕňa určitú automatizáciu a autonómiu procesu, sa vytvorí niekoľko návrhov. Proces návrhu napodobňuje evolučný proces v prírode tým, že začína s jedným alebo viacerými rôznymi návrhmi a časom ich mení na riešenia, ktoré sú vhodnejšie pre požiadavky ohraničené konkrétnymi podmienkami. Riešenia Kritérií návrhu, ktoré nie sú splnené, alebo obmedzené, ktoré nie sú vyhovujúce, sa vyradia a

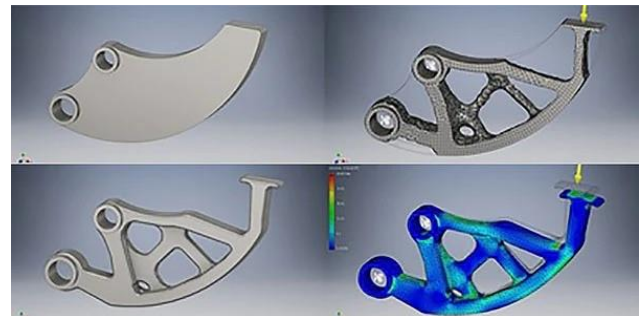
proces hľadania (evolúcie) sa posúva iným/novým smerom.

Termín "generatívny dizajn" sa často používa na označenie počítačom podporovaného dizajnu napriek tomu, že ho možno vykonať aj pomocou pera, papiera a súboru pravidiel. Vytvorené výsledky môžu mať rôzne formáty vrátane obrázkov, modelov, zvukov a animácií.

2 TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZÁCIA

Metóda nazývaná topologická optimalizácia má za cieľ maximalizovať rozloženie materiálu v danom zvolenom priestore, pričom zohľadňuje zaťaženie a medzné podmienky. Často sa využíva v počiatočnej fáze návrhu na štúdium a posúdenie rôznych možností konštrukcie v súlade s vopred stanovenými kritériami, ako je okrem iného zníženie hmotnosti, zvýšenie tuhosti, zníženie napätia a zníženie deformácie [5].

Programy na optimalizáciu topológie sú vytvorené s cieľom uľahčiť prácu používateľom, ktorí sa zaoberajú iteračnými procesmi návrhu a analýzami viacerých variantov. Podporujú tiež kreativitu, ktorá ponúka často prehliadané riešenia. Spolu s tvarovou a rozmerovou optimalizáciou je topologická optimalizácia jednou z troch základných podkategórií konštrukčnej optimalizácie. Zatiaľ čo pri optimalizácii tvaru treba zabezpečiť kritéria a ciele konštrukcie (napríklad zníženie koncentrácie napätia alebo predĺženie únavovej životnosti), pri optimalizácii tvaru sa zohľadňujú špecifické charakteristiky obrysu určené umiestnením uzlov (obr. 2).



Obr. 2. Postup a výsledok topologickej optimalizácie

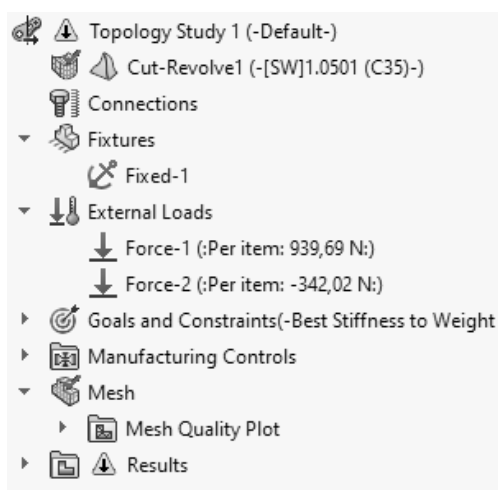
S cieľom získať najlepšie riešenie z hľadiska hmotnosti, napätia, deformácie a ďalších faktorov sa pri rozmerovej optimalizácii upravujú hodnoty konštrukčných parametrov súvisiacich s plochami prierezu prvkov. Často je to používané pri riešení problémov s nosnými tyčami, ráhami budov a nosníkovými konštrukciami. Tieto metódy na rozdiel od topologickej optimalizácie umožňujú len zmenu hodnôt ich parametrov, nie pridávanie alebo odstraňovanie nových prvkov alebo dutín v konštrukcii prvkov [10]. Na rozdiel od topologickej optimalizácie, ktorá jednoducho potrebuje zadaný počiatočný objem, prístupy tvarovej a rozmerovej

optimalizácie potrebujú počítačový parametrický model, ktorý umožní optimalizáciu.

3 APLIKÁCIA PRI NÁVHRU TVAROV TELIES ČELNÝCH OZUBENÝCH KOLIES

Na digitalizáciu modelu sa využili možnosti 3D modelovania a účinné nástroje na automatizáciu návrhu zabudované v programe *SolidWorks*. Konštruktér brať do úvahy, že optimalizovaný model nemôže byť rozdelený na viacero telies ako jedno a musí byť jednotný. Ide o zásadnú požiadavku, pretože modul optimalizácie topológie *SolidWorks* nepodporuje súčasnú optimalizáciu viacerých dielov/telies alebo zostáv. Hoci je potrebné vziať do úvahy, že niektoré prvky musia byť z hľadiska geometrie nezmenené (otvory, funkčné profily...). V takom prípade musí mať model hranice definujúce túto oblasť

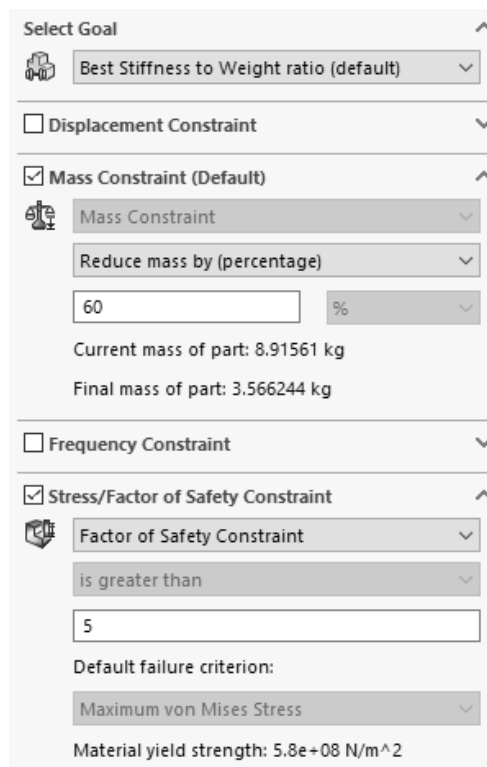
Vonkajšie zaťaženia a votknutia sa definujú rovnakým spôsobom ako pri simulácii metódou konečných prvkov. Jediný rozdiel je v tom, že silové zaťaženie sa umiestni na každý zub ozubeného kolesa, aby sa zabezpečil "vzorový" (opakovaný) tvar optimalizovaného ozubeného kolesa, čo znamená, že nebudú existovať úseky s menšou alebo žiadnou podporou (obr. 3).



Obr. 3. Definovanie zaťaženia a votknutí

Ďalej je potrebné určiť optimalizačné ciele a kritéria topologickej optimalizácie. Pri danej podmienke redukcie materiálu bude cieľom topologickej optimalizácie zredukovať objem telesa na požadované kritérium, ale zároveň aby výsledná geometria dosahovala najvyššiu tuhosť telesa. Definícia cieľa a kritérií ovplyvní úbytok materiálu. Geometria riešenia s najväčšou tuhosťou je daná úbytkom materiálu a finálnym tvarom optimalizovaného telesa, takým spôsobom, že objemy sa odstraňujú z „plného“ telesa (obr. 4). Obmedzenia definujú horné a dolné kritéria pre najväčšie posunutie, ktoré sa môže zobraziť v 3D modeli, alebo

zadávať obmedzenia na podiel hmoty, ktorá sa môže odstrániť.

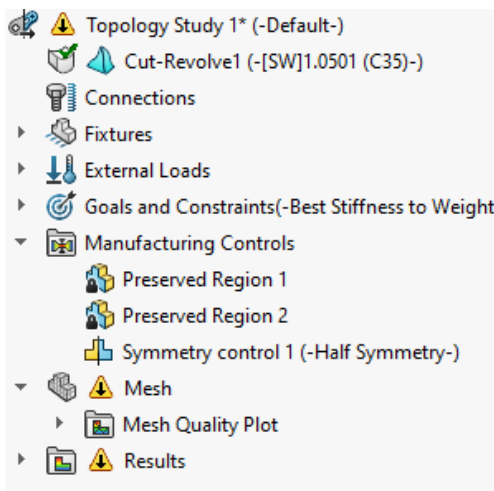


Obr. 4. Definovanie cieľov optimalizácie

Materiál sa v procese optimalizácie topológie rozloží tak, aby sa dodržal cieľ optimalizácie pri daných geometrických kritériách. Využitie konvenčných výrobných postupov, ako je odlievanie alebo kovanie, však môže spôsobiť problémy pri vytváraní 3D modelu. Aplikácia vhodných kritérií riadenia výroby optimalizačnom modeli môže zabrániť vzniku podrezaní a dutých kusov. Kritériá riadenia výroby zaručujú, že optimalizovaný 3D model sa dá napríklad správne vylisovať alebo vybrať z formy. V simulácii *SolidWorks* sú k dispozícii štyri rôzne typy výrobných podmienok:

- kritérium hrúbky - udáva kritérium pre optimalizáciu topológie modelu, aby sa zabránilo vytváraniu častí s ťažko vyrobiteľnými stenami, ktoré sú príliš tenké, alebo častí, ktoré sú príliš hrubé,
- zachovanie plôch - toto kritérium pridá do 3D modelu zachované časti (plôch), ktoré sa počas optimalizácie topológie nezmenia, čím sa zachová geometria týchto povrchov, ktoré sú pre funkčnosť modelu kľúčové (obr. 5),
- kritérium symetrie - optimalizovaný 3D model je symetrický voči jednej alebo viacerým vopred určeným rovinám pomocou kritéria symetrie. V závislosti od rozloženia konštrukcie možno zvoliť rovinnú symetriu, ktorá je buď polovičná, štvrtinová alebo osminová,

- kritérium formy - táto funkcia simuluje extrakciu optimálneho 3D modelu z formy.

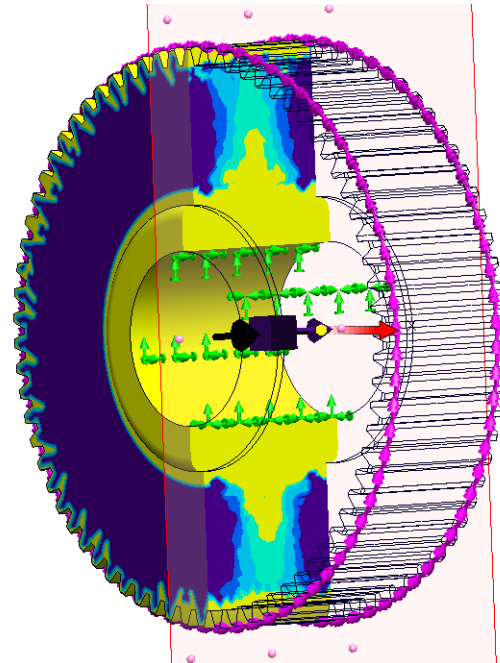


Obr. 5. Definovanie kritérií riadenia výroby

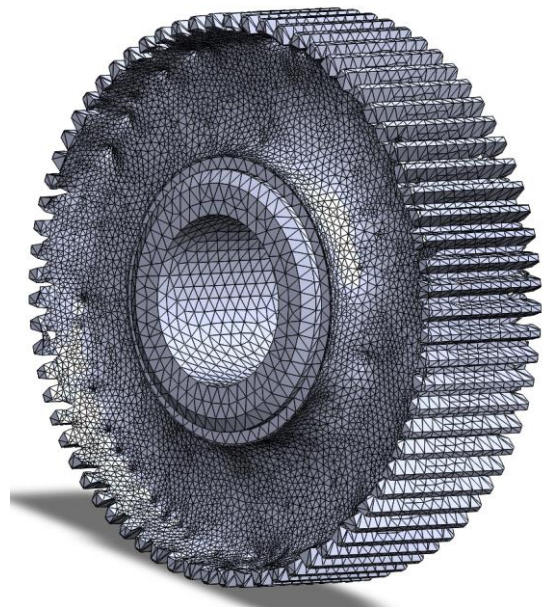
Po nadefinovaní kritérií optimalizácie a zvolení hraničných podmienok nasleduje samotná optimalizácia. Proces je automatický, riadený algoritmi, avšak je vhodné pred je ho začiatkom nastaviť počet iterácií, ktoré ma vykonať. Iterácie slúžia ako čiastkové simulácie upravených objemov, pričom každá nasledujúca iterácia má za cieľ vytvoriť optimalizovanejší tvar ako predošlá. Prirodzene čím väčšie množstvo iterácií je zvolených tým lepšie výsledky avšak je to na úkor času kde sa doba optimalizácie predlžuje. Výsledok optimalizácie je vo forme farebne odlíšeného modelu (podobne ako pri MKP) kde farby delia objemy od „prebytočných“ cez „vhodných na ponechanie“ až po „nutné na ponechanie“ (obr. 6).

Výsledné modely sa exportujú to či už objemových alebo plošných formátov. Avšak tie je potrebné upraviť „vyhladiť“ nakoľko výsledky sú vzťahované na geometriu vytvorenú sieťou konečných prvkov (obr. 7).

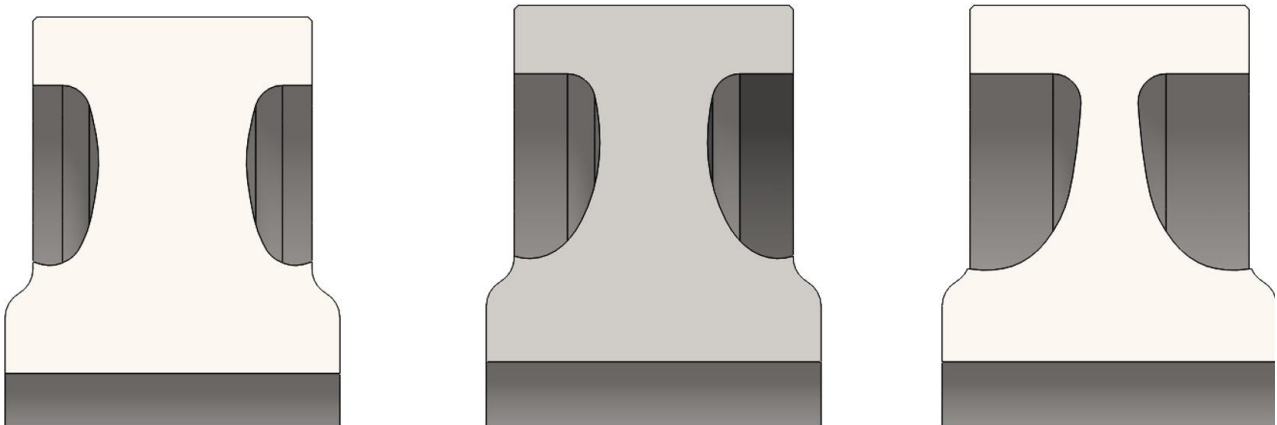
Cieľom bolo navrhnuť ozubené koleso s čo najnižšou hmotnosťou pri čom ďalším posudzovaným paramet-



Obr. 6. Výsledky topologickej optimalizácie



Obr. 7. Vyexportovaný model



Obr. 8. Výsledné tvary stojiny kolesa

rom bola tuhosť ozubenia. Na tuhosť ozubenia vplýva výraznou mierou hrúbka venca pod zubami a tá bola stanovená na konštantnú hodnotu pre všetky novovzniknuté varianty. Upravené tvary stojiny kolies vyzerali po úprave nasledovne (obr. 8).

ZÁVER

Optimalizovaný 3D model môže byť exportovaný ako plošný model, pevné teleso alebo grafické teleso. Ak bude model vytvorený na 3D tlačiarňi bez dodatočných dizajnových úprav, vhodné alternatívy sú "Surface body" (plošný model) a "Solid body" (pevné teleso). Keď sa vyberie možnosť "Graphic body" (grafické teleso), optimálny návrh sa exportuje vo formáte reprezentácie hraničnej geometrie, ktorý je vhodnejší na úpravy a dodatočné úpravy. V prvom 3D modeli SolidWorks umožňuje vloženie exportovaného grafického telesa. Po prekrytí dvoch 3D modelov je prvým krokom určenie ich rozdielov. Najjednoduchším postupom na dosiahnutie tohto cieľa je urobiť optimalizovaný model nepriehľadným a upraviť priehľadnosť pôvodného modelu na polopriehľadný.

V aplikácii SolidWorks sa vyskytol problém s plochami, ktorých tvar je potrebné zachovať. Náboj, ktorý zabezpečuje spojenie kolesa s hriadeľom a ozubenie s určitou hrúbkou venca pod ním, aby sa zachovala tuhosť ozubenia, sú zachované plochy pre optimalizáciu topológie. Skutočnosť, že hrúbka venca bola stanovená na konštantnú hodnotu a teda nebola optimalizovaná, je ďalším nedostatkom spomínaného postupu. Nasledujúce postupy budú zahŕňať a riešiť aj tieto nedostatky.

Pod'akovanie

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

LITERATÚRA

- [1] WANG, L. - SHEN, W. - XIE, H. - NEELAMKAVIL, J. - PARDASANI, A. (2002): *Collaborative conceptual design - state of the art and future trends*. Computer-Aided Design, 34(13), pp.981-996.
- [2] ANDERSON, D. (2014): *Design for Manufacturability*. CRC Press.
- [3] BICI, M. - BROGGIATO, G. - CAMPANA, F. (2016): *Topological Optimization in Concept Design: starting approach and a validation case study*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp.289-299.
- [4] HORVÁTH, I. (2004): *On some Crucial Issues of Computer Support of Conceptual Design*. Product Engineering, pp.123-142.
- [5] QUERIN, O. (2017): *Topology design methods for structural optimization*. London, United Kingdom: Academic Press.
- [6] VAJNA, S. a kol. (2005): *The Autogenetic Design Theory. An evolutionary view of the design process*. Journal of Engineering Design, 16(4), pp. 423-440.
- [7] KRISH, S. (2011): *A practical generative design method*. Computer-Aided Design, 43(1), pp. 88-100.
- [8] CHEN, X. a kol. (2018): *Forte: User-Driven Generative Design*. Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM Press, New York, New York, USA, pp. 1-12.
- [9] KAZI, R.H. a kol. (2017): *DreamSketch: Early Stage 3D Design Explorations with Sketching and Generative Design*. Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '17, ACM Press, New York, New York, USA, pp. 401-414.
- [10] TEJANI, G. - SAVSANI, V. - PATEL, V. - SAVSANI, P. (2017): *Size, shape, and topology optimization of planar and space trusses using mutation-based improved metaheuristics*. Journal of Computational Design and Engineering, 5(2), pp.198-214.

Orgány riaditeľnosti a stability letúnov, 2. časť

Sebastián Solčanský, Ing.*

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

Ján Dižo, doc. Ing., PhD.

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

Miroslav Blatnický, doc. Ing., PhD.

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

Vadym Ishchuk, Ing.

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

Flight control and stability surfaces, part 2

Abstract: This paper deals with flight control and stability surfaces, which is a comprehensive overview of control and stability surfaces of an aeroplane, especially three main control surfaces elevator, ailerons and rudder. These are analysed from the perspective of functions, locations, divisions and aeromechanics. Part of the paper is dedicated to the definition of aircraft, the division of aircraft and the structure of the aeroplane.

Keywords: control, stability, surfaces, aeroplane, aeromechanics

ÚVOD

Ľudstvo už od pradávna vzhládalo na oblohu a ku hviezdám. Voľnosť a sloboda vtákov, ktoré lietali nad oblakmi ľudí fascinovali a chceli získať schopnosť letu. Začiatok moderného letectva sa datuje do roku 1783, kedy po prvýkrát vzlietol teplovzdušný balón. O 120 rokov neskôr ľudstvo prekonalo ďalší míľnik a v roku 1903 vzlietlo prvé lietadlo ťažšie ako vzduch, ktoré skonštruovali bratia *Wrightovci*. Obrovský rozmach lietadiel ťažších ako vzduch nastal v medzivojnovom a vojnovom období, kedy sa začínajú objavovať čoraz výkonnejšie, rýchlejšie a ovládateľnejšie stroje. Vrcholom vojnového obdobia sa stal prúdový motor a prvé pokusy s raketovými motormi. Obrovský posun v pred nastal v období studenej vojny v čase kozmických pretekov medzi *Spojenými štátmi americkými* a *Sovietskym zväzom*, a to konkrétne 12. apríla 1961, keď sa *Jurij Alexejevič Gagarin* stal prvým človekom vo vesmíre a o osem rokov neskôr 21. júla 1969, keď *Neil*

Armstrong s posádkou *Apolla 11* pristáva na *Mesiaci* a stáva sa tak prvým človekom na inom vesmírnom telese. Bola to túžba človeka po lietaní, ktorú má v sebe už od počiatku, a ktorá mu umožnila aby sa o 63 rokov neskôr od prvého letu dostal až na *Mesiac*.

1 LIETADLO

Lietadlo definujeme ako zariadenie, ktoré je schopné lietať v atmosfére nezávisle od zemského povrchu, prepravovať na palube osoby alebo náklad, dokáže bezpečne vzlietať a pristávať a byť aspoň čiastočne riaditeľné [1].

1.1 Rozdelenie lietadiel

Lietadlá je možné rozdeliť na základe viacerých znakov.

Lietadlá ľahšie ako vzduch prekonávajú zemskú gravitáciu aerostatickým spôsobom, preto sa v tejto skupine lietadiel stretávame s pojmom *aeorstaty*.

Podľa *Archimedovho* zákona sa takto vytvorený vztlak rovná tiaži vzduchu rovnakého objemu ako má lietadlo. Také lietadlo je teda teleso s menšou hmotnosťou ako hmotnosť vzduchu ním vytlačeného. Lietadlá ťažšie ako vzduch sa vo vzduchu udržiavajú vztlakovými silami, vytváranými v podstate aerodynamickými spôsobom pri obtekaní nosných plôch prúdom vzduchu. Táto skupina lietadiel sa nazýva *aerodiny*.

Bezmotorové lietadlá využívajú na prekonávanie odporu proti pohybu zložku hmotných síl pri kĺzavom lete alebo prebytok rýchlosti a zotrvačnosti pohybu.

Motorové lietadlá majú pohonnú jednotku, vytvárajúcu ťah, ktorý sa využíva na prekonávanie odporu vzduchu proti pohybu lietadla.

1.2 Konštrukcia letúna

Letún (obr. 1) je motorové lietadlo ťažšie ako vzduch, pri ktorom vztlak potrebný na let vyvolávajú aerodynamické sily na nosných plochách nepohyblivých proti lietadlu. Ide o najpoužívanejší druh lietadla, ktorý má veľmi dobrú stabilitu a riaditeľnosť v rýchlostiach, pre ktoré je určený. Letún má pomerne vysokú minimálnu rýchlosť a nie je schopný vznášať sa vo vzduchu.

Letún tvorí *drak*, *pohonná sústava* a *výstroj*.



Obr. 1. Letún

1.2.1 Drak

Drak je hlavná konštrukčná časť letúna a obsahuje:

- nosnú sústavu,
- trup,
- chvostové plochy,
- riadenie,
- pristávacie zariadenie.

Nosná sústava je základnou časťou draku. Je to krídlo, ktoré vytvára vztlak potrebný na udržanie letúna vo vzduchu. Súčasne obsahuje aj zariadenia, ktoré s uvedenou funkciou priamo súvisia, ako kormidlá priečneho riadenia, zariadenia na zníženie veľkosti vzletovej a pristávacej rýchlosti a niekedy aj ďalšie ostatných systémov.

Trup vytvára priestor na umiestnenie posádky, cestujúcich, nákladu a výstroja. Spája ostatné časti

draku do jedného celku, predovšetkým nosnú plochu a chvostové plochy. Obsahuje značnú časť riadiaceho systému letúna, niektoré časti pristávacieho zariadenia, väčšinu výstroja a niekedy aj inštaláciu pohonných jednotiek.

Chvostové plochy sú zariadeniami stability a riaditeľnosti letúna. Zvyčajne sú v nich uložené aj časti systému riadenia.

Riadenie letúna slúži na ovládanie kormidiel priečneho, výškového a smerového kormidla. Patria sem aj všetky ovládacie prvky rôznych systémov letúna, ktoré sú schopné vyvolať zmenu polohy letúna v priestore.

Pristávacie zariadenie umožňuje vzlet, pristátie a rolovanie letúna po zemi alebo vode. Ďalej slúži na tlmenie síl, ktoré vznikajú pri pristávaní a umožňuje mechanické brzdenie letúna na zemi.

1.2.2 Pohonná sústava

Pohonná sústava letúna je súhrn všetkých zariadení slúžiacich na pohon letúna a tvorí ju skupina pohonných jednotiek a ich príslušenstva. Pohonná sústava vytvára ťažnú silu, ktorej pôsobením letún prekonáva odpor vzdušného prostredia a dosahuje potrebné výkony [1].

1.2.3 Výstroj

Výstroj letúna tvorí súbor všetkých prístrojov, ktoré nie sú súčasťou draku a pohonnej sústavy. Časť výstroja má na starosti bezpečnosť, tzn. že sem patria navigačné a letové prístroje, automatické riadenie, klimatizácia, výškové vybavenie a pod.. Ďalej sem patrí aj vybavenie pre cestujúcich, pilota a zariadenia, ktoré sú špecifické pre daný druh letúna.

2 ORGÁNY RIADITEĽNOSTI A STABILITY

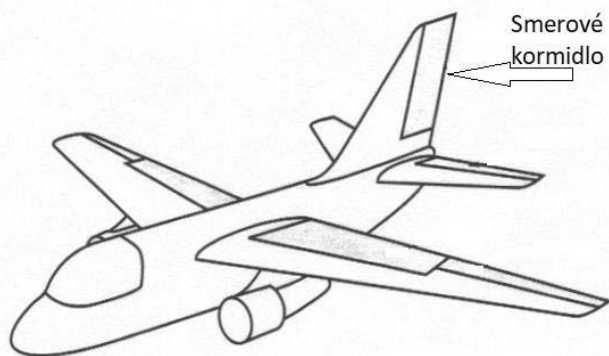
Vzájomná poloha ťažiska a neutrálneho bodu letúna určuje jeho pozdĺžnu a stranovú stabilitu. Stabilita letúna je teda určená vzájomným nastavením krídel, trupu a chvostových plôch.

Zariadenia, ktoré sú schopné meniť polohu neutrálneho bodu letúna zabezpečujú riaditeľnosť. Medzi takéto zariadenia patrí napr. smerové alebo výškové kormidlo, krídelka, vyťahovacie prostriedky atď.

2.1 Smerové kormidlo

Smerové kormidlo je jedna zo základných riadiacich plôch, ktorá je umiestnená zvyčajne na vertikálnej chvostovej ploche. Na obr. 2 je zobrazené smerové kormidlo a jeho umiestnenie. Úlohou smerového kormidla je zabezpečiť kontrolovaný pohyb nosu letúna zo strany na stranu, tzn. umožňuje rotáciu okolo vertikálnej osi. Pohyb, ktorý letún vykonáva pri

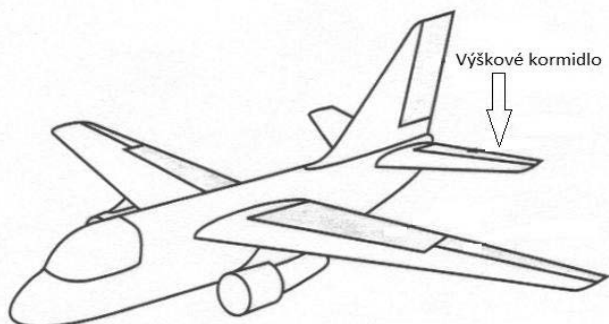
vychýlení smerového kormidla sa nazýva zatačanie (angl. *yaw*).



Obr. 2. Smerové kormidlo

2.2 Výškové kormidlo

Rovnako ako pri smerovom kormidle ide o jednu z hlavných riadiacich plôch, ktorá sa najčastejšie umiestňuje v zadnej časti letúna na vertikálne stabilizačné plochy (obr. 3), ale môže byť umiestnená aj v prednej časti letúna, napr. pri usporiadaní typu kačica. Výškové kormidlo ovláda pohyb nosu letúna okolo priečnej osy, tento pohyb sa nazýva klopenie (angl. *pitch*). Väčšina letúnov má dve výškové kormidlá, pričom každé je umiestnené na jednej časti vertikálnych chvostových plôch. Výškové kormidlo mení uhol nábehu krídiel do lokálneho smeru letu, čím zaisťujú stúpanie alebo klesanie letúna [2].

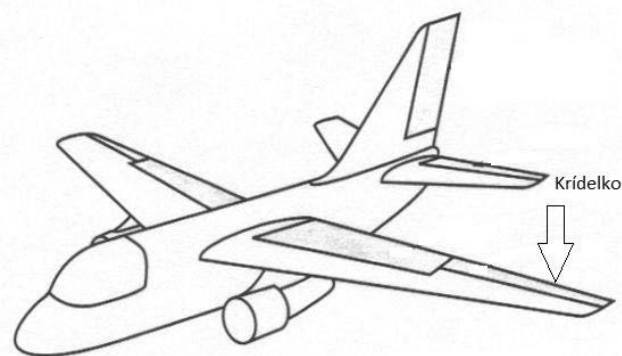


Obr. 3. Výškové kormidlo

2.3 Krídelká

Kormidlá priečného riadenia musia zabezpečiť zmenu uhla priečného sklonu letúna a taktiež jeho vyrovnanie po nežiadúcom naklonení. Na tento účel sa používajú *krídelká*. Ide o poslednú hlavnú riadiacu plochu z trojice smerové kormidlo, výškové kormidlo a krídelká. Krídelká sa nachádzajú na odtokovej hrane pri koncoch krídel, ako vidno na (obr. 4). Krídelká pracujú protichodne, tzn. ak je jedno vychýlené dohora druhé je vychýlené nadol a opačne. Hlavnou úlohou krídeliek je teda zabezpečiť klopenie krídla hore alebo dole, tento pohyb sa nazýva klonenie (angl. *roll*). Nevýhodou krídeliek je, že spôsobujú

nepriaznivý krútiaci moment, čo sa dá eliminovať vhodnou konštrukciou krídeliek.



Obr. 4. Krídelka

Podľa konštrukcie delíme krídelka na:

- jednoduché,
- na špičke krídla,
- *Friseho*,
- diferencované.

2.3.1 Jednoduché krídelka

Jednoduché krídelká sa využívali v minulosti najmä v období začiatkov letectva a v medzivojnovom období. Tieto krídelká nefungujú na princípe protichodnosti ale vždy sa vysúva len jedno krídelko a druhé zostáva v krídle, čo znižuje ovládateľnosť letúna [3].

2.3.2 Krídelka na špičke krídla

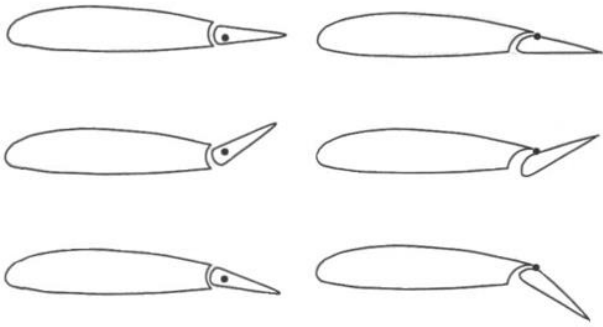
Krídelka na špičke krídla sú ako už z názvu vyplýva umiestnené na špičke krídla. Ide o predchodcu moderných typov krídeliek, ktoré už pracovali v protichodnom režime. Využívali najmä na prototypoch a na sériových strojoch sa nahrádzali konvenčnými typmi.

2.3.3 Friseho krídelka

Friseho krídelká (obr. 5 vpravo) majú špeciálne tvarovanú prednú časť a zavesenie a to takým spôsobom, že pri vychýlení smerom nadol ostáva predná časť schovaná za krídlom no pri vychýlení smerom nahor táto predná časť vystupuje z profilu krídla, čo má za následok zvýšenie aerodynamického odporu, ktorý pomáha vyrovnávať nepriaznivý odpor vzniknutý na druhom krídle.

2.3.4 Diferencované krídelka

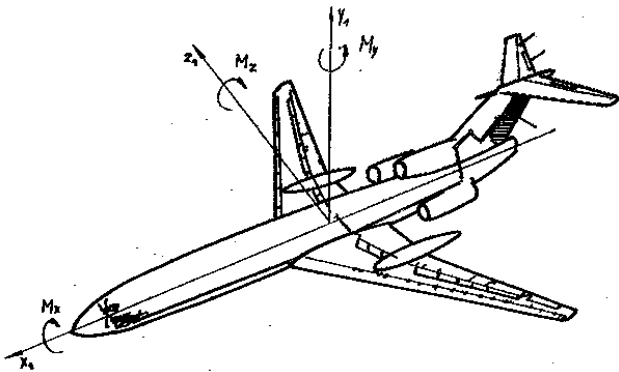
Diferencované krídelká (obr. 5 vľavo) sú také, ktoré majú odlišnú výchylku smerom nahor a nadol, pričom väčšia výchylka je nahor. Výsledkom je väčšie rozrušenie prúdu vzduchu a potlačenie nežiaducich účinkov krídeliek.



Obr. 5. Diferencované krídelká (vľavo), Friseho krídelká (vpravo)

3 ORGÁNY RIADITEĽNOSTI Z HĽADISKA AEROMECHANIKY

Na opis orgánov riaditeľnosti z hľadiska aeromechaniky je potrebné definovať súradný systém, ktorý je pevne spojený s lietadlom (obr. 6).



Obr. 6. Súradnicový systém lietúna

Začiatok tohto systému bude v ťažisku lietúna. Je potrebné sledovať zmenu tohto súradného systému ku súradnému systému, ktorý je pevne spojený so zemou. Vzájomná poloha týchto sústav je daná uhlami ψ , γ , ϑ , kde:

- ϑ je uhol klopenia,
- γ je uhol klonenia,
- ψ je uhol zatačania.

3.1 Aeromechanika výškového kormidla

Výškové kormidlo pracuje na princípe zmeny efektívneho profilu krídla na horizontálnom stabilizátore. Zmenou uhla vychýlenia na zadnej strane profilu krídla sa mení vytváraný vztlak. Pri vychýlení smerom nadol dochádza k zvýšeniu vztlaku a naopak pri vychýlení smerom nahor dochádza k zníženiu vztlaku, ktorý môže byť až negatívny. Zmena vztlakovej sily vytvára vzhľadom na ťažisko lietúna klopivý moment zobrazený na (obr. 7) [4].

Riadiaci moment sa vypočíta podľa vzťahu (1):

$$\Delta M_{zv} = Y_i^\alpha \cdot \eta_{vk} \cdot \delta_{vk} \cdot x_{vk}, \quad (1)$$

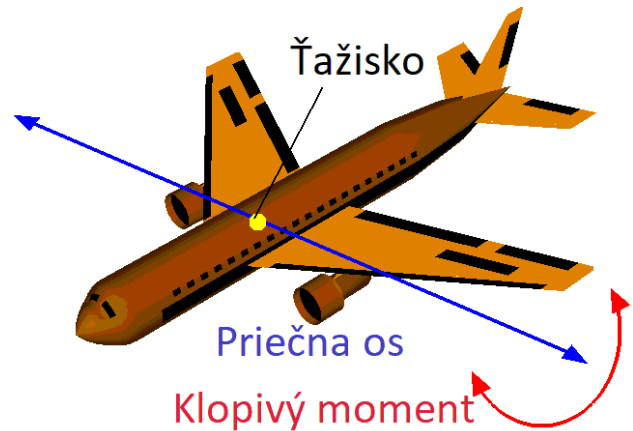
kde Y je aerodynamická sila vztlaku,

α je uhol nábehu danej časti lietúna,

η_{vk} je koeficient účinnosti výškového kormidla,

δ_{vk} je uhol vychýlenia výškového kormidla,

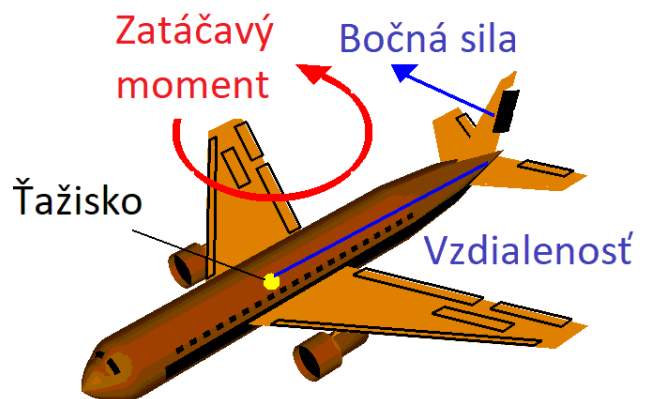
x_{vk} je súradnica pôsobenia výslednej riadiacej sily výškového kormidla.



Obr. 7. Moment od výškového kormidla

3.2 Aeromechanika smerového kormidla

Pohyb kormidla, tzn. jeho vychýlenie z horizontálnej chvostovej plochy spôsobuje zmenu sily generovanej na chvoste lietúna, ktorá sa využíva na vytvorenie a riadenie otáčavého pohybu. Smerové kormidlo mení efektívny profil krídla na vertikálnom stabilizátore. Zmena uhlu nábehu potom spôsobuje zväčšenie vztlaku na opačnej strane. Táto sila pôsobí na tlakové centrum horizontálneho stabilizátora, ktorý je určitú vzdialenosť od ťažiska lietúna, čo má za následok vznik zatačavého momentu (obr. 8) [4].



Obr. 8. Moment od smerového kormidla

Bočná sila teda vytvára momenty k osiam x_1 a y_1 , ktoré sú dané vzťahmi (2) a (3):

$$\Delta M_{xsk} = \Delta Z_{sk} \cdot Y_{vchp} = C_{zvchp}^\delta \cdot q_{vchp} \cdot S_{vchp} \cdot y_{vchp} \cdot \delta_{sk}, \quad (2)$$

$$\Delta M_{ysk} = \Delta Z_{sk} \cdot L_{vchp} = C_{zvchp}^\delta \cdot q_{vchp} \cdot S_{vchp} \cdot \delta_{sk}, \quad (3)$$

kde ΔZ_{sk} je zmena bočnej sily od smerového kormidla,

Y_{vchp} je aerodynamická sila od vertikálnej chvostovej plochy,

C_{vchp}^{δ} je koeficient bočnej sily derivovaný podľa vychýlenia smerového kormidla,

q_{vchp} je dynamický tlak vertikálnych chvostových plôch,

S_{vchp} je plocha vertikálnej chvostovej plochy,

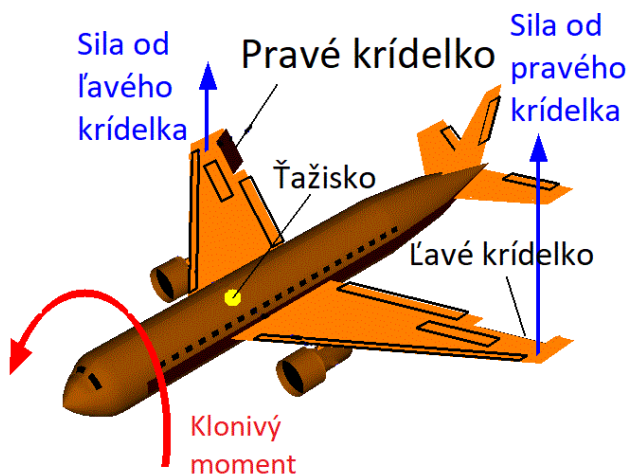
y_{vchp} je vzdialenosť ťažiska od tlakového centra vertikálnej chvostovej plochy,

δ_{sk} je uhol vychýlenia smerových kormidiel,

L_{vchp} je vzdialenosť tlakového centra vertikálnej chvostovej plochy od ťažiska.

3.3 Aeromechanika smerového kormidla

Krídla fungujú na princípe zmeny efektívneho profilu vonkajšej časti krídla. Zmena uhlu nábehu na zadnej strane krídla mení množstvo generovaného vztlaku týmto krídlom. Čím viac je krídelko vychýlené smerom nadol tým väčšia kladná vztlaková sila sa generuje. Z dôvodu protichodnej funkcie bude krídelko na druhom krídle vychýlené smerom nahor, čo má za následok zmenšenie vztlakovej sily na danom krídle. Vzhľadom na rozdielne vztlaky generované jednotlivými krídlami dochádza vplyvom tejto silovej dvojice k vytvoreniu klonivého momentu (Obr. 9.), čo má za následok rotáciu letúna. Zároveň v dôsledku zmeny tangenciálnej zložky celkovej aerodynamickej sily vzniká zatáčavý moment na tej strane krídla, ktorého krídelko je vychýlené smerom nadol.



Obr. 9. Moment od krídeliek

Ak C_Y^{δ} je konštanty v celom rozpätí krídel, potom prírastok normálovej zložky vztlakovej sily od výchylky krídeliek je definovaný podľa vzťahu (4):

$$\Delta Y_k = C_Y^{\delta} \cdot \eta_k \cdot S_k \cdot \delta_k, \quad (4)$$

kde C_Y^{δ} je koeficient vztlakovej sily derivovaný podľa výchylky,

η_k je účinnosť krídeliek,

S_k je plocha krídeliek,

δ_k je výchylka krídeliek.

ZÁVER

Článok zhŕňa základnú definíciu lietadla a delenie lietadiel na základe prekonávania gravitačnej sily. Je definovaná základná konštrukcia letúna a sú popísané jednotlivé časti. Ďalej sú v článku popísané tri základné riadiace plochy ich umiestnenie, funkcia a základný princíp ich činnosti z hľadiska aeromechaniky.

Pod'akovanie

Tento výskum podporila Kultúrna a vzdelávacia grantová agentúra MŠ SR v projekte č. KEGA 036ŽU-4/2021: „Implementácia moderných metód počítačovej a experimentálnej analýzy vlastností komponentov vozidiel do vzdelávania konštruktérov dopravných prostriedkov budúcnosti.“

Tento výskum podporila Kultúrna a vzdelávacia grantová agentúra MŠ SR v projekte č. KEGA 031ŽU-4/2023: „Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného programu Vozidlá a motory.“

LITERATÚRA

- [1] BEŇO, L. (1988): *Lietadlá*. Bratislava: Alfa.
- [2] JUNAID, A. (2012): *Steering an Aircraft: Use Elevators for Longitudinal Control in Planes*.
- [3] RATHBUN, B. J. (1929): *Aeroplane construction, operation and maintenance*. Chicago: Periscope Flim LLC. ISBN: 978-1-935327-12-7.
- [4] SLYŠKO, A. (1973): *Aeromechanika II: letové vlastnosti lietadiel*. Bratislava: Alfa.

Accompanying phenomena during casting of aluminium alloys

Marek Galčík, Ing.*

Department of Technological Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: marek.galcik@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2771

Marek Brůna, Assoc. prof. Ing., PhD.

Department of Technological Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: marek.bruna@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2756

Martin Medňanský, Ing.

Department of Technological Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: martin.mednansky@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2771

Abstract: An oxide layer is formed on the surface of a molten aluminium alloy when it is exposed to the surrounding atmosphere. The oxide layer on the surface of the melt is not harmful. The problem occurs when it is entrained into the melt volume and solidifies in the casting. The paper deals with the formation of the oxide layer, its types and the formation of a double oxide layers.

Keywords: aluminium alloys, oxide layer, bifilm

INTRODUCTION

The quality of the used input material significantly determines the final quality of the final castings, as well as the quality of the prepared liquid metal. Just before casting, the prepared melt must be checked and, if necessary, modified in such a way that it meets at least the minimum requirements for its quality and should remove as much impurities as possible from it. To minimize the amount of internal defects in castings, it is necessary to prepare a high quality liquid metal. A high quality liquid metal is considered to be a metal that basically does not contain impurities. Above all, it concerns double oxide layers, as well as elements levelling and opening these layers. In aluminium alloys, such elements are iron, *hydrogen* and other gases. The quality of the liquid metal should not be taken for granted, and without proper processing, this requirement is often not fulfilled. The starting point for achieving a clean and high quality melt is the quality of the input material from which the melt is prepared. Since a combination of primary foundry alloys and secondary foundry alloys made by *remelting* recoverable material is used for melting, care must be taken to increase the iron content of the melt, which leads to an increased amount of harmful intermetallic phases. From the research of recent

years, the presence of *reoxidation* processes and the formation of double oxide layers is considered to be a key problem affecting the final quality of castings from *aluminium* alloys. That is why it is important to understand the causes and mechanisms of their formation, which will make it possible to eliminate a certain amount of them during the casting process by using a suitable technological solution [1-3].

1 OXIDE LAYER FORMATION

When liquid *aluminium* reacts with *oxygen*, the equilibrium solubility of oxygen in aluminium is extremely small. Nevertheless, *aluminium* and its alloys contain large amounts of oxides. This is due to the reaction of *oxygen* with the melt surface, as *aluminium* has a high affinity for *oxygen*. Within a few milliseconds (probably 10 ms to 100 ms), a continuous amorphous oxide layer of Al_2O_3 (Fig. 1), several nanometres thick, is formed on the melt surface. This is called primary oxidation. Secondary oxidation, which is the oxidation occurring from the metal being poured until the mould cavity is filled, and tertiary oxidation, which occurs in the casting during solidification, are also called *reoxidation*. Oxidation occurs in both solid and liquid states and the extent of oxidation increases with increasing

temperature. The formation of oxide layers and the development of *reoxidation* processes have the most significant influence on the formation of defects in *aluminium* alloy castings. Since the melting temperature of the *aluminium* oxide is about 2000 °C, it will only ever be present in the melt in the solid phase [2, 4, 5].

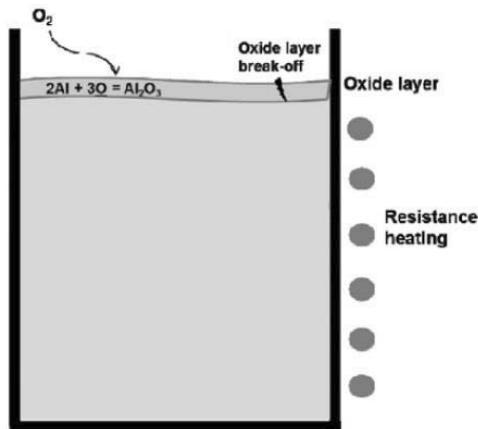


Fig. 1. Reaction of oxygen with the melt surface [6]

Although *oxygen* can only react with the surface of the melt, a large number of oxides are present in the castings. It is for this reason that the surface layer can be entrained into the volume of liquid metal. The presence of *oxygen* in *aluminium* must therefore be understood from a mechanical point of view, as it is a mechanical process and not a chemical one [2].

The entire surface area of the melt is covered with a continuous old oxide layer (Fig. 2a) until it is mechanically disturbed. Mechanical stresses may cause the oxide layer to tear (Fig. 2b), when the melt surface is again in contact with *oxygen* (Fig. 2c). As a result, a new oxide layer is again formed within a few milliseconds (Fig. 2d). It is therefore important to avoid mechanical surface disturbances as much as possible, as this produces an increasing amount of oxides [7].

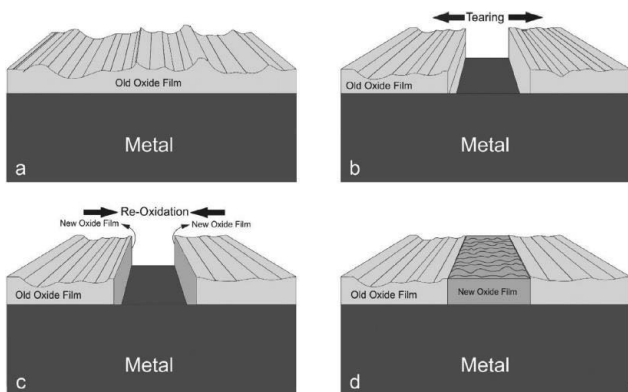


Fig. 2. Mechanical failure of the surface oxide layer [7]

2 OXIDE TYPES IN ALUMINIUM ALLOYS

The most commonly occurring oxides in *aluminium* alloys, depending on the chemical composition, are

Al_2O_3 oxides, Al_2MgO_4 spinels and *MgO* magnesium oxides. In *aluminium* alloys containing up to 0.005 wt. % Mg, pure *aluminium* oxide Al_2O_3 is formed on the surface. In *aluminium* alloys with a *magnesium* content between 0.005 to 2 wt. %, a layer of Al_2MgO_4 , known as spinel, is formed. At Mg contents above 2 wt. %, pure *magnesium* oxide MgO is formed on the surface. In fact, most *aluminium* alloys in use contain some *magnesium*, so that the oxide layer of *aluminium* formed almost immediately on the melt surface is converted to spinel over a period of time. The change in the type of oxide layer is also related to its morphology. Under the microscope, these films have characteristic shapes. The newly formed *aluminium* layer is typically 20 nm to 50 nm thin with a relatively smooth surface (Fig. 3a). The morphology of the spinel resembles a large number of crystals or sandpaper grains (Fig. 3b). *Magnesium* oxide films are wavy in shape and are roughly ten times thicker than *aluminium* oxide films (Fig. 3c) [2, 8].

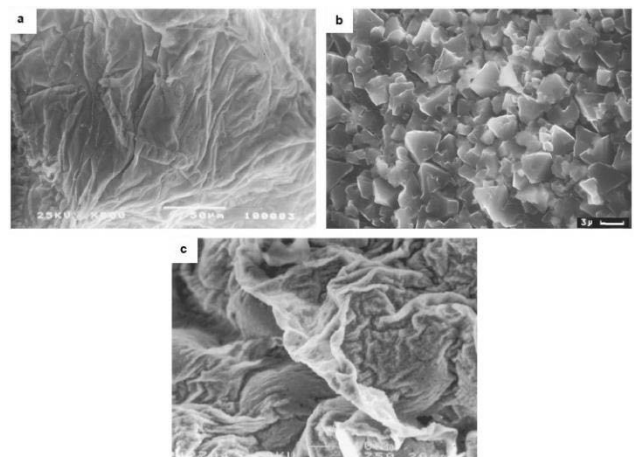


Fig. 3. Oxide layers: a) Al_2O_3 , b) Al_2MgO_4 , c) MgO [2]

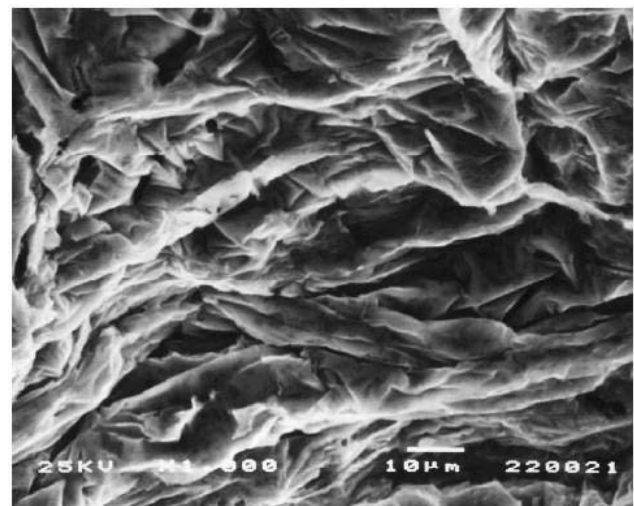


Fig. 4. REM image of the surface of a new oxide [9]

Depending on the thickness and growth time, two types of oxides are known, young oxides (thin) and old oxides (thick). The extremely fast reaction of the *aluminium* alloy melt with air allows oxide layers to form during the filling process. During filling, the free

surface of the melt may be unstable or expand and tear. These areas are then exposed to air and moisture in the mould. This results in thin oxide layers called young oxides. Unlike old oxides, young oxides have a very short exposure time to air. Therefore, young oxides are referred to as amorphous Al_2O_3 oxides with thicknesses of only a few nanometres. Such thin oxide layers can easily be folded by turbulence and enter the melt. The morphology of the young oxides shows a large number of thin and sharp edges (Fig. 4). If adhered to the melt, some of these oxides can bond to each other and trap air between the layers [9].

Old oxides develop by the thickening of the oxides that originally existed on the surface of the ingots during melting and also during the transport of the melt from the furnace to the crucible. As the name implies, old oxides are formed when exposed to an oxidizing atmosphere for a long period of time, so they have time to thicken. Old oxides are less sensitive to deformation due to turbulence during filling as they have a higher solidity than young oxides. As a result, they have a less wavy surface compared to the surface of young oxide (Fig. 5) [9].

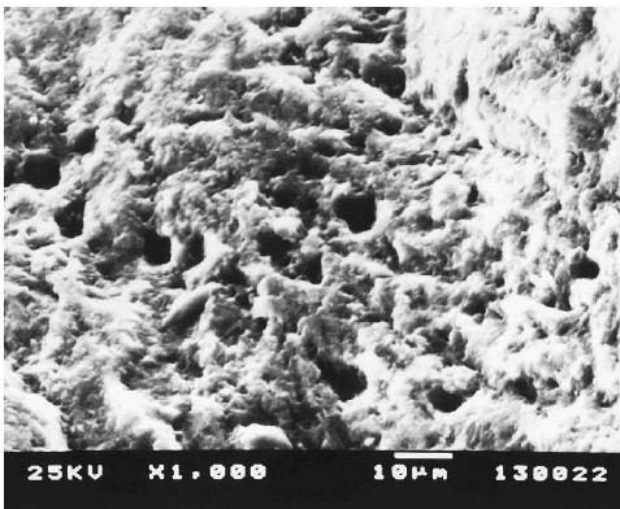


Fig. 5. REM image of the surface of an old oxide [9]

The types of oxide layers formed as a function of time and thickness are shown in Tab. 1. Layers of the 'new' oxide type in the form of thin layers are formed during mould filling. The 'old 1' type oxides in the form of flexible surface layers are formed during melt transfer.

Tab. 1. Oxide types formed on the melt surface of aluminium alloys [8]

Oxide type	new	old 1o	old 2	old 3
Layer thickness [µm]	1	10	1000	1000
Layer formation time	0.01 s to 1s	10 s to 1 min.	10 min. to 1 hour	10 hours to 10 days

Thick and almost inflexible 'old 2' oxides are likely to be formed in melting furnaces and solid 'old 3' oxide in plate form is most likely to be formed in holding furnaces [8].

The differences in the structure of new and old oxides due to the difficulty of analysing nanometre layers are not fully understood. However, there are studies that shed light on the evolution of oxides. Nyahumwa *et al.* have suggested that the structure of the oxide layer evolves from amorphous to γ and then λ phase. Upon contact of the melt surface with air, an amorphous layer of Al_2O_3 forms almost immediately as it does not have sufficient time to crystallize. This layer, a few tens of nanometres thick, covers the entire surface. It is this amorphous layer that is considered to be the new oxide. The thin amorphous layer of Al_2O_3 starts to crystallise into $\gamma-Al_2O_3$ within five to ten minutes. The crystallization is influenced by the melt temperature, the exposure time and the thickness of the amorphous Al_2O_3 . It is because of the longer time of formation that this oxide is called old oxide. During crystallization, thermal and volume expansion occurs and tensile and transformation stresses are generated within the layer. The tensile stresses cause local distortions of the layer and surface cracks are formed. The melt at the crack location reacts again with the air and a new amorphous layer is formed at the crack location, which grows in the same direction. Over a longer period of time, a transformation occurs at the melt surface, which involves a further reduction in the volume of the oxide as $\gamma-Al_2O_3$ transforms to $\alpha-Al_2O_3$ (corundum). This transformation process requires a longer time at a higher temperature, e.g. in a holding furnace. Due to the high hardness of corundum, its presence in the casting is undesirable as it causes worse machining. The transformation of the amorphous Al_2O_3 layer to $\gamma-Al_2O_3$ and then to $\alpha-Al_2O_3$ leads to a 24 % reduction of the oxide volume. This volume reduction caused by the transformation causes further cracks and the formation of new amorphous layers. This growth cycle continues until the layer is strong enough to withstand the stresses generated at the surface [4, 8, 9].

3 MECHANISM OF DOUBLE OXIDE LAYER FORMATION

The formation of an oxide layer on the surface of the melt is not harmful, as long as the layer remains on the surface of the melt as it prevents further oxidation. The problem only occurs when this layer is submerged in the melt volume. The oxide layer of the aluminium alloy melt exposed to turbulence in the furnace, in the crucible or during the casting process in the gating system and in the mould cavity can be folded or cracked due to turbulence. The turbulence induced wave causes the oxide layers to be folded into each other and the folded double oxide layer is

entrained into the melt volume (Fig. 6). In this process, gas (mixture of O_2 , N_2 , Ar , etc.) is trapped between the interfaces of these layers. Such a double oxide formed by folding of the layers is known by the term bifilm, which was introduced by Prof. Campbell. Once the bifilm is formed in the melt volume, the internal atmosphere between the halves of the bifilm is consumed by continued oxidation and nitridation, which is controlled by diffusion of ions through the layer. The folding and entraining of the double oxide layer does not necessarily occur solely by wave formation, as shown in Fig. 6. It can also occur due to contraction of the free surface of the liquid metal, while the oxide layer itself, which is solid, is not capable of contraction, and so the excess surface area of the oxide layer must be folded. As the melt stream front advances (Fig. 7a), the oxide layer is trapped against the mould walls and tearing of the oxide layer occurs at the thinnest point of the front. As the melt stream front recedes (Fig. 7b), the solid oxide layer is entrained into the melt [2, 8, 10].

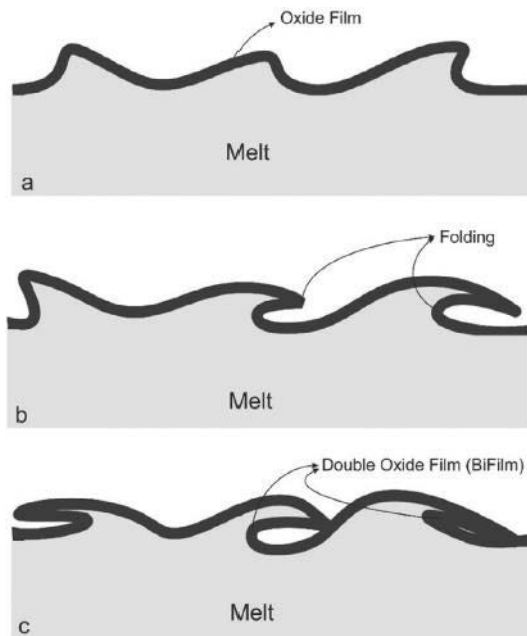


Fig. 6. Formation and entraining of a double oxide layer into the melt volume [7]

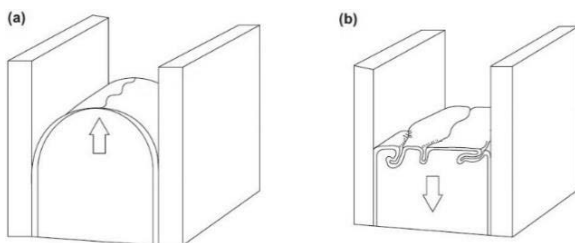


Fig. 7. Free surface liquid metal contraction and oxide layer entraining [2]

CONCLUSION

The greatest impact on the final quality of the castings is when the oxide layer is entrained into the melt and solidifies in the casting. Several studies in recent years

have shown that entrained oxide layers in the casting act as initiators of porosity, and hydrogen contributes to pore formation by its diffusion between the layers, thereby enlarging the pore. Therefore, it is necessary to focus on minimizing the melt surface turbulence during the casting process. By reducing the amount of these, it can be assumed that there will be fewer pores in the casting and hence better quality.

Acknowledgement

This article was produced within the UNIZA Grant System Project 01/2022 (17375).

REFERENCES

- [1] JOLLY, M. (2005): *Prof. John Campbell's Ten Rules for Making Reliable Castings*. Oxford: Elsevier Ltd, p. 1054. ISBN: 978-0-444-63509-9.
- [2] CAMPBELL, J. (2015): *Complete Casting Handbook 2nd edition*. Oxford: Elsevier Ltd. 1054 p. ISBN 978-0-444-63509-9.
- [3] BRŮNA, M. - BOLIBRUCHOVÁ, D. - PASTIRČÁK, R. (2017): *Analýza reoxidačných procesov vo vtokovej sústave pri odlievaní Al zliatin*. Slévárenství, pp. 300-303, ISSN: 0037-6825.
- [4] LYU, C. - PAPANIKOLAOU, M. - JOLLY, M. (2019): *Numerical Process Modelling and Simulation of Campbell Running Systems Designs*. The Minerals, Metals & Materials Series, pp. 53-64. ISBN: 978-3-030-06034-3. DOI: 10.1007/978-3-030-06034-3_5.
- [5] BOLIBRUCHOVÁ, D. - PASTIRČÁK, R. (2018): *Zlievarenská metalurgia neželezných kovov*. Žilina: EDIS, p. 167. ISBN: 978-80-554-1463-8.
- [6] GÖKELMA, M. et al. (2015): *Observation on inclusion settling by LiMca and PoDFa analysis in aluminium melts*. In: International aluminium journal, Vol. 91, pp. 56-67.
- [7] JALILVAND, M. M. et al. (2021): *Surface oxidation study of molten Mg–Al alloys by oxide/metal/oxide sandwich method*. Journal of Magnesium and Alloys, ISSN: 2213-9567. DOI: 10.1016/j.jma.2020.10.004.
- [8] GOPLAN, R. - PRABHU, N. K. (2011): *Oxide bifilms in aluminium alloy castings – a review*. Materials Science and Technology, Vol. 27, pp. 1757-1769.
- [9] PARK, J. M. (2009): *Behaviours of Bifilms in A356 Alloy during Solidification: Developing Observation Techniques with 3-D Micro X-ray Tomography*. Ph.D. Thesis, University of Birmingham, UK, p. 98.
- [10] CAMPBELL, J. (2011): *The Origin of Griffith Cracks*. Metallurgical and Materials Transactions B. Vol. 42, Issue 6, pp. 1091-1097.

Lean management, lean principles, lean manufacturing

Ivan Litvaj, Ing., PhD.*

Department of Power Systems and Electric Drives, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, University of Zilina, University of Zilina, 010 26 Zilina, Slovak Republic.
E-mail: ivan.litvaj@feit.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2168

Abstract: My article is focused on one main topic, the topic of lean management. I describe lean management in the article, in basic definitions, principles, and contexts. I do not deal in detail with individual elements and aspects of lean management in the article, because that was not the goal of the article. I define lean management, and its meaning in business practice, further I describe the principles of lean management and lean production.

Keywords: lean management, lean concept, lean principles, lean manufacturing, waste.

INTRODUCTION

One of the most effective and proven approaches and ways to reduce overall costs in the company is reducing waste, reducing waste generation, eliminating waste, and eliminating all types of waste in the company. The goal of lean management, which I focus on in the article, and the goal of lean production is to identify, locate, analyse, and eliminate waste in the company, to eliminate waste in all business processes. To eliminate waste, we use a process we call value stream mapping. Thus, one of the main goals of lean production is the identification, analysis, and elimination of "seven types of waste in production and the enterprise as a whole." Seven types of waste: storage, waiting, defects, overproduction, movement, transportation, and reprocessing. These seven types of waste occur in most processes, in most production operations, and in most production enterprises, they exist where production takes place. To identify, analyse and eliminate waste, it is important to understand what is waste, what is waste, and where it occurs. I think that the correct and functioning implementation of lean management and lean manufacturing will positively affect the corporate culture and, naturally, the overall results of the company. However, lean management is primarily about increasing added value, it is aimed at eliminating all activities that do not have added value for the customer.

The lean manufacturing tools are not limited to industry only but are being used in many areas as shown in Fig. 1. However, the scope is not limited these sectors only, it can be applied from a family to space company [1].

Lean thinking is being used to decrease setup

times, group sizes, and inventories. Lean is all about removing misuse in the project. This comprises waste in time as well as cost. As project have reduced costs and improved class, the primary competitive gauge is the capability to react to the customer [2].



Fig. 1. The main areas to implement *Lean manufacturing* [1]

1 LEAN MANUFACTURING

It is a standardized approach for the identification and elimination of waste (non-value-added process/activities) for achieving perfection.

A systematic approach for maximization of value and elimination of waste. A systematic/standardized approach that reduces the time frame between the customer's order and delivery of product through waste elimination [3].



Fig. 2. Lean Manufacturing [3]

2 LEAN MEANING

Lean means elimination or minimizing of any kind of waste/non-value-added activity within the manufacturing process. (e.g., 3M waste – *Muda*, *Mura*, and *Muri*, etc.)



Fig. 3. Normally 95 % of Total Lead Time is Non-Value Added [3]

Removal of unwanted activity/process that has no value from the customer's perspective. Lean is a value-added process for which customer is willing to pay. There are various *Lean Manufacturing Tools* or ways to be Lean:

- *Lean 5S.*
- *7 waste of Lean Manufacturing.*
- *Value Stream Mapping-VSM.*
- *KAIZEN.*
- *POKA-YOKE.*
- *Total Quality Management-TQM.*
- *Total Preventive Maintenance-TPM.*
- *Six Sigma-DMAIC.*
- *Single Minute Exchange of Die-SMED.*

- *Just In Time-JIT.*
- *Continuous Improvement/PDCA.*
- *Cellular Manufacturing.*
- and many more *Lean Manufacturing Tools...*

3 LEAN PRINCIPLES

5 Lean Principles defined by James Womack & Daniel Jones are:

1. *Value* – value must be specified for the product from the customer's point of view.
2. *Value Stream* – identify the *value stream* for each product from the supplier to the end customer.
3. *Flow* – make value *Flow* without interruption along the value stream.
4. *Pull* – an organization must establish a *Pull* and let the customer *Pull* value from the supplier/producer.
5. *Perfection* – an organization must strive for *Perfection*.



Fig. 4. Lean Principles [3]

Lean principles are comprehensively explained by *James Womack & Daniel Jones* in his book - "*Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth*".

Lean Concept | Benefits

- *Waste Elimination,*
- *Maximize Value,*
- *Reduction of Lead Time,*
- *Reduction of Variations,*
- *Product Flow without interruption,*
- *Pull of the Customer,*
- *Continuous Improvement [3].*

CONCLUSION

My article is focused on the topic of lean management, it is the main topic of the post. I describe lean management in the post in basic definitions,

principles, and contexts. I focused on this main goal, i.e., in a limited space to acquaint the reader with the basics of lean management, the basics of lean production, the basic principles of lean management, its meaning, and its goals, and the justification of lean management in industrial practice.

REFERENCES

[1] VIKAS, G. - PANNIWALA, M. (2015): *Lean manufacturing: a review*. International Journal of Science Technology & Management. Volume 3, Issue

2, July, 2015. Available from: <https://www.avjournals.com>. ISSN: 2321-774X.

[2] ROSE, A.M.N. – DEROS, B.M.D. - RAHMAN, M.N.A.B. (2010): *Development of framework for lean manufacturing implementation in SMEs Asia pacific*. Industrial Engineering and Management Systems Conference, Melaka, Dec. 7-10, 2010.

[3] *LEAN MANUFACTURING. LEAN PRINCIPLES. LEAN 5S*. January 25, 2021. Available from: [https://Lean Manufacturing | Lean Principles | Lean 5S \(techqualitypedia.com\)](https://Lean Manufacturing | Lean Principles | Lean 5S (techqualitypedia.com))

Štruktúra hliníkových zliatin pre vysokotlakové odlievanie

Martin Medňanský, Ing.*

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

Marek Brúna, doc. Ing., PhD.

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

Marek Matejka, Ing., PhD.

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

Structure of aluminium alloys used in high-pressure die casting

Abstract: The aim of the presented paper was to carry out a review of the internal structure of alloys used for high-pressure die casting (HPDC) and to experimentally perform a structural analysis of $AlSi_9Cu_3(Fe)$ alloy. Several castings with varying casting parameter – maximum plunger speed v_{max} were cast. In pre-selected critical locations, a change in porosity was observed with the change of the speed, and the casting samples with $v_{max} = 2$ and $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ showed the lowest porosity. The effect of v_{max} was also observed on the shape and size of the structural components, where at higher v_{max} the eutectic Si grew in length and decreased in thickness. EDS analysis determined found intermetallic phases to be $\alpha-Al(Fe,Mn,Cr)Si$ in the shape of a rhombic dodecahedron with sizes as small as $2 \mu\text{m}$ and Al_2Cu occurring in both modifications – oblong grains and globular ternary eutectic.

Keywords: HPDC, Al-Si alloy, porosity, structure

ÚVOD

Zliatiny Al-Si, tzv. silumíny, sú najčastejšie používaným typom zliatin pre vysokotlakové odlievanie. Podstatná časť produkcie hliníkových odliatkov je tvorená silumínmi, a to vďaka svojim výborným zlievarenským a dobrým mechanickým vlastnostiam. Na odlievanie tlakovým liatím sú primárne určené:

- zliatiny Al-Si:
 - eutektické - na liatie pod tlakom sa používajú pre svoju dobrú zabiehavosť a dlhú životnosť foriem. Používajú sa na výrobu tenkostenných členitých odliatkov, kde sa vyžaduje odolnosť voči korózii,
 - podeutektické - použitie tam, kde záleží na výbornej ťažnosti a odolnosti voči korózii,
 - Al-Si s prísadou horčíka - umožňuje čiastočné vytvrdzovanie vyhriatím odliatkov počas niekoľkých hodín na $150 \text{ }^\circ\text{C} \div 180 \text{ }^\circ\text{C}$,

- zliatiny Al-Si-Cu - kde je obsah Si väčší než obsah Cu. Majú zníženú odolnosť voči korózii a vyskytuje sa v nich väčší obsah nečistôt,
- zliatiny Al-Mg - napriek vynikajúcim mechanickým vlastnostiam zliatin s 10 % Mg je veľký interval tuhnutia pre liatie pod tlakom nevýhodný. Zliatina má sklon k lepeniu odliatku na formu, preto sú často potrebné úpravy formy [1].

1 ŠTRUKTÚRNE ZLOŽKY Al-Si ZLIATIN

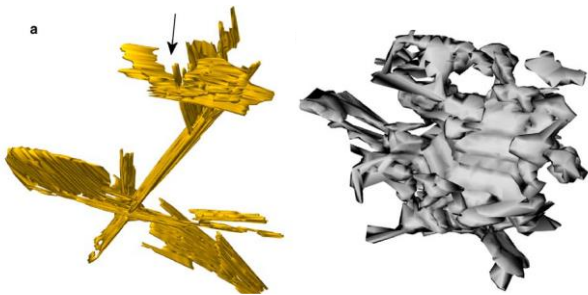
Podeutektická zliatina Al-Si sa skladá z primárnych dendritov substitučeného tuhého roztoku α a eutektika vylúčeného v medzidendritických priestoroch. Štruktúru eutektickej zliatiny Al-Si tvorí eutektikum, pri modifikovaných zliatinách aj jednotlivé kryštály α fázy. Štruktúra nadeutektickej zliatiny Al-Si je tvorená

matricou *eutektika* a v nej sa nachádzajúcich častíc primárneho *Si*.

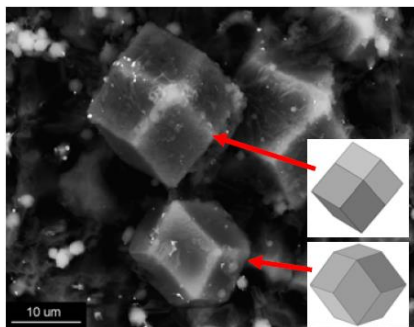
Dendrity $\alpha(Al)$ pri vysokotlakovom odlievaní dosahujú veľkú jemnosť v dôsledku rýchleho ochladzovania v kovovej forme priamej závislosti medzi tlakom v tavenine a kritickou veľkosťou zárodka. V dôsledku čoho sú dosahované vyššie mechanické vlastnosti [2, 3].

Eutektikum je mechanická zmes substitučného tuhého roztoku $\alpha(Al)$ a kryštálov takmer čistého *eutektického kremíka*, vznikajúca priamo z taveniny pri *eutektickej* premene. [4] *Eutektikum* sa v procese vysokotlakového liatia vylučuje prednostne v zrnitej a lamelárnej morfológii [5].

Železo je v *hlinikových* zliatinách považované za nečistotu. V *Al-Si* zliatinách vytvára intermetalické fázy s nepriaznivým účinkom na mechanické vlastnosti. Všeobecne je obsah *Fe* prijateľný do 0,5 hm. %. Špecifikom vysokotlakového odlievania je, že obsah *Fe* do 1 hm. % nie je problémom, nakoľko zabraňuje priváraníu odliatkov na kovové formy [3]. Prídavok *Fe* môže znížiť ťažnosť materiálu odliatku, ale zvýšiť medzu klzu a tvrdosť odliatku [6].



Obr. 1. 3D zobrazenie *Fe* intermetalických fáz v tvare dosiek a čínskeho písma [7]



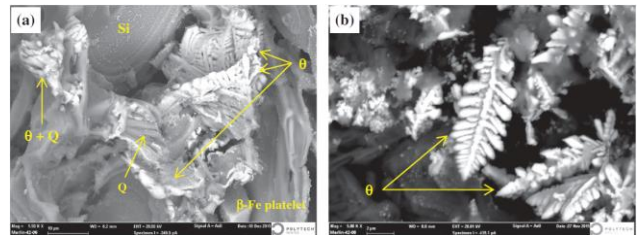
Obr. 2. *Železitá* fáza v tvare dvanásťstenu [8]

Z hľadiska vplyvu na mechanické vlastnosti je najmenej výhodná morfológia dlhých a hrubých dosiek fázy $\beta-Al_5FeSi$, ktoré sa na metalografickom výbruse prejavujú ako ihlice (obr. 1 vľavo). V dôsledku ich prítomnosti dochádza k poklesu ťažnosti, zníženiu pevnosti a lomovej húževnatosti.

Výhodnejším zložením a tvarom intermetalickej fázy *Fe* je čínske písmo $\alpha-Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$, ktorá vzniká pridaním dostatočného množstva *Mn* [7].

Pridaním vedľajších prísadových prvkov *Mn* a *Cr* bola v zliatine $AlSi_9Cu_3(Fe)$ odlievanej vysokotlakovým liatím experimentálne zistená prítomnosť železitej intermetalickej fázy *železa* $\alpha-Fe$ vo forme *rombického* dvanásťstenu (obr. 2) [8].

Med' sa v mikroštruktúrach odliatych technológiou vysokotlakového liatia môže vyskytovať v dvoch modifikáciách fázy Al_2Cu - samostatne ako drobné oválne zrno s vysokou koncentráciou *Cu*, alebo ako ternárne *eutektikum* $Al-Al_2Cu-Si$, ktoré možno pozorovať v tepelne nespracovaných zliatinách ako kompaktné oválne útvary z množstva guľových častíc [4].



Obr. 3. Modifikácie Al_2Cu fázy vo vysokotlakových odliatkoch [11]

Pórovitosť je spôsobená prítomnosťou plynov. Najškodlivejšími plynmi pre *hlinikové* zliatiny sú *vodík*, *kyslík* a *vodná para*. Do taveniny sa dostávajú z atmosféry, výmurovky pece, téglikov, náradím. Pri styku roztaveného kovu s vodnou parou dochádza k disociácii vody. *Kyslík* reaguje s *Al*, *vodík* sa v roztavenom kove rozpúšťa. Iným zdrojom prítomnosti *vodíka* môže byť vsádzka, ak sa pridáva do taveniny bez dôkladného predohrevu. *Vodík* je viazaný vo forme vody v póroch a vo forme hydroxidov na zoxidovanom povrchu v podobe $Al(OH)_3$, z ktorého sa uvoľňuje [3]. Špecifikom vysokotlakového liatia je pórovitosť vznikajúca uzatvorením vzduchu v tavenine počas plnenia formy. Pri pomalom pohybe piesta môže nastať zvíernenie taveniny, uzavru sa v nej plyny, a to odrazením vlny od konca plniacej komory. Pri rýchlom pohybe piesta môže nastať prevalenie vlny, kedy sa plyny uzavru v tavenine. Pórovitosť sa znižuje zvýšením tlaku lisovania [9, 10].

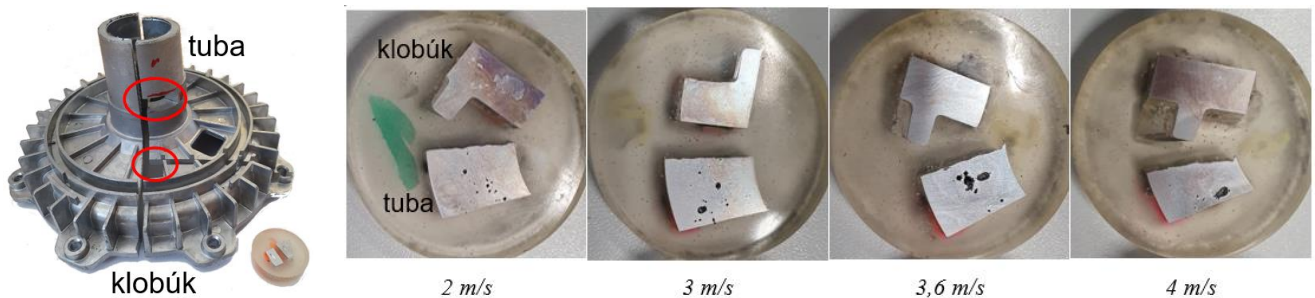
EXPERIMENTÁLNE POZOROVANIE

Úlohou experimentu bolo porovnať štruktúru konštrukcie elektromotora, tlakovo odliateho zo zliatiny $AlSi_9Cu_3(Fe)$ vo firme *Rosenberg Slovakia spol. s r. o., Medzev*. Obsah prísadových prvkov v experimentálnej zliatine je uvedený v tab. 1.

Tab. 1. Chemické zloženie zliatiny $AlSi_9Cu_3(Fe)$

Chemické zloženie [hm. %]						
<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>
10,3	0,72	2,1	0,16	0,13	0,02	0,07

Experimentálne odliatky boli odliate v štyroch variáciách, a premenným parametrom bola maximálna rýchlosť lisovacieho piesta v plniacej komore $v_{\max} = 2, 3, 3,6$ a $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Po natavení vsádzky a odplynení taveniny bolo odlievanie vykonané na tlakovom lejacom stroji s horizontálnou studenou komorou *CLH 630.02P*. Na základe skôr vykonanej simulácie priebehu tuhnutia taveniny a mikropórovitosti boli z každého odliatku zvolené dve miesta vhodné na pozorovanie - vzorka z tubovej časti vzhľadom na to, že ide o najvýraznejší tepelný uzol, a vzorka z teknostennej časti klobúka. Vzorky boli preparované zaliatím do *dentakrylu*, ďalej brúsené brúsnyimi papiermi so zrnitosťou 100 až 1000 a leštené. Ako leptadlo bola použitá kyselina *HF* v koncentrácii 0,5 % počas 15 sekúnd.



Obr. 3. Odliatok nosnej konštrukcie elektromotora a vizuálne pozorovanie makroštruktúry kritických miest.

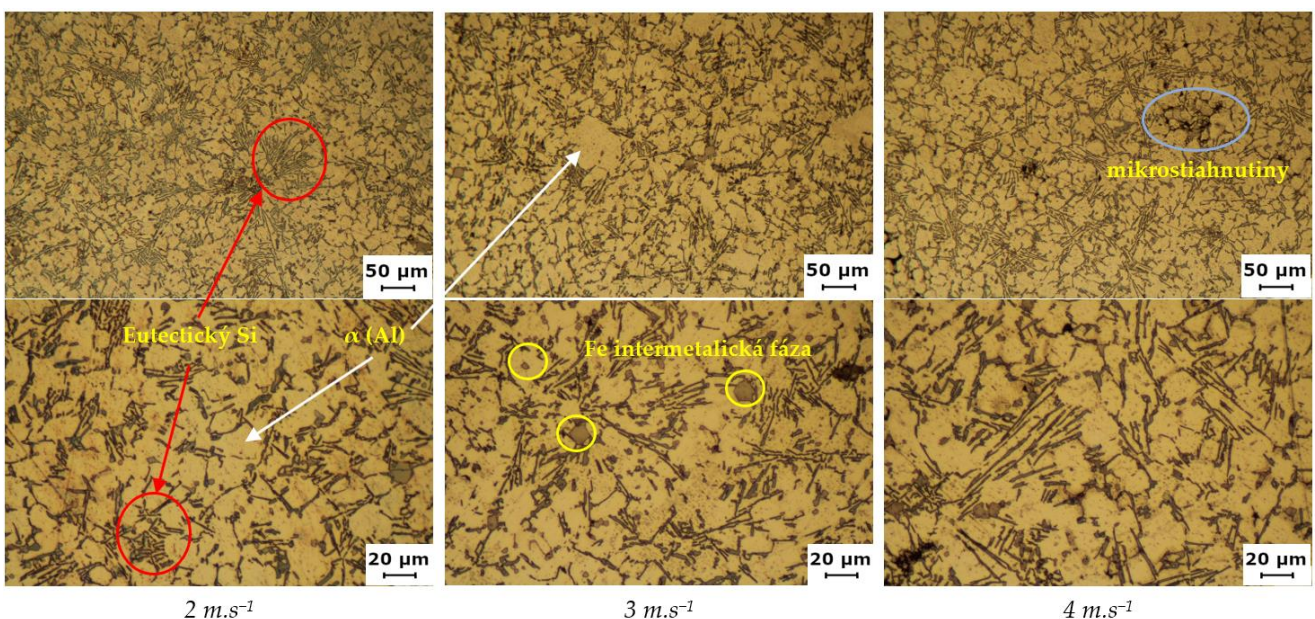
Vizuálnou kontrolou makroštruktúry vzoriek voľným okom bolo zistené, že pri nízkych rýchlostiach pohybu piesta sú dutiny (či póry, bubliny, riediny alebo stiahnutiny) v pozorovanom priereze tubovej časti odliatkov rozptýlené po stredovej časti medzikružia. So zvyšujúcou v_{\max} sa dutiny zväčšujú a zhlukujú, ich počet však zdanlivo klesá. Berúc do úvahy kombináciu čo najmenej veľkosti a početnosti chýb, za najviac vyhovujúci možno považovať s

$v_{\max} = 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Klobúkové časti oboch geometrických variantov odliatkov pri všetkých štyroch experimentálnych rýchlostiach pohybu piesta sa pri pozorovaní voľným okom javia ako bezchybné.

Pozorovanie mikroštruktúry prebiehalo na svetelnom mikroskope *Neophot 2* v svetlom poli pri zväčšení 200 a 500x. So zmenou maximálnej rýchlosti pohybu piesta možno pozorovať zmenu veľkosti *eutektického kremíka* a *dendritov α -fázy*. *Eutektikum* má nemodifikovanú morfológiu vo forme hexagonálnych lamiel, ktoré sa v rovine prejavujú ako tmavé ihlice (obr. 5). So zvyšujúcou rýchlosťou sa ihlice predlžujú a stenčujú. Možno sledovať prítomnosť mikroštruktúr kopírujúcich *dendritickú* stavbu zliatiny. Najčastejším zdrojom pórovitosti sú kapsule zachyteného vzduchu v strhnutých oxidických

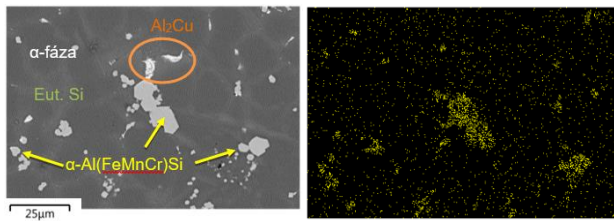
blanách. Na snímkach so zv. 500x možno pozorovať prítomnosť polyedrických intermetalických fáz. Ďalšie skúmanie týchto fáz prebehlo pomocou *EDS* analýzy.

Výsledky *EDS* analýzy potvrdzujú výskyt prvkov *Fe*, *Cr* a *Mn* majoritne v polyedrickej fáze v strede obr. 6 vľavo, rovnako aj v menších fázach. Malé polyedrické intermetalické fázy s veľkosťou už od $2 \mu\text{m}$ vyskytujúce sa aj v snímkach svetelnej



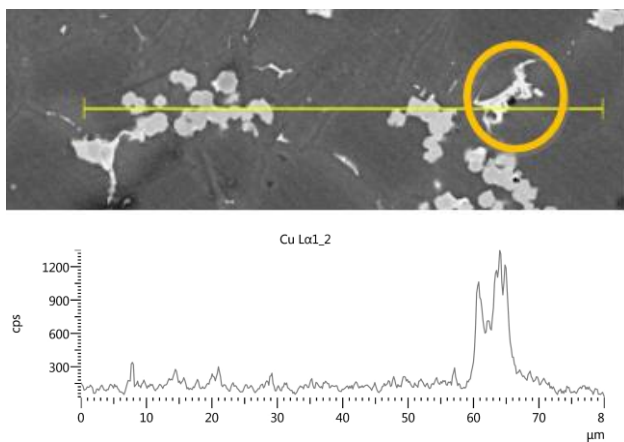
Obr. 4. Mikroštruktúra tubových častí odliatkov pri 200- a 500-násobnom zväčšení.

mikroskopie teda možno považovať za dvanásťstennú fázu $\alpha\text{-Al}(\text{Fe},\text{Mn},\text{Cr})\text{Si}$, čo korešponduje s výsledkami iného experimentu [8].



Obr. 5. EDS analýza Fe intermetallickej fázy - mikrofotografia a analýza prítomnosti Fe

Čiarová EDS analýza umožnila určiť zakrúžkovanú kompaktnú fázu ako Al_2Cu . Vo vzorkách sa však fáza prejavovala aj v eutektickej modifikácii vo forme guľovitých častíc.



Obr. 6. Čiarová EDS analýza Cu fázy

ZÁVER

Cieľom predloženého príspevku bolo vykonať rešerš poznatkov o vnútornej stavbe zliatin používaných na vysokotlakové odlievania a experimentálne vykonať štruktúrnú analýzu zliatiny $\text{AlSi}_9\text{Cu}_3(\text{Fe})$, z ktorej bol vysokotlakovým odlievaním zhotovený odliatok. Pridanou hodnotou príspevku je vyhotovenie viacerých odliatkov so zmenou parametra odlievania - rôzne rýchlosti posuvu piesta v_{max} . Vo vopred vybraných kritických miestach bola so zmenou rýchlosti pozorovaná zmena pórovitosti, pričom za vyhovujúcejšie možno považovať vzorky odliatkov s $v_{\text{max}} = 2$ a $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vplyv v_{max} bol pozorovaný aj na tvare a veľkosti štruktúrnych zložiek, kde pri vyšších v_{max} eutektický Si rástol do dĺžky a znižoval svoju hrúbku. EDS analýzou boli skúmané neznáme intermetalické fázy a bolo určené, že ide o fázu $\alpha\text{-Al}(\text{Fe},\text{Mn},\text{Cr})\text{Si}$ v tvare rombického dvanásťstenu s veľkosťou už od $2 \mu\text{m}$ a Al_2Cu vyskytujúcu sa v oboch modifikáciách. Predmetom ďalších experimentov môže byť dôkladné skúmanie vplyvu zmeny rýchlosti v_{max} na štruktúrne zložky zliatiny.

LITERATÚRA

- [1] RAGAN, E. et al. (2007): *Liatie kovov pod tlakom*. Prešov : s.n., 2007. ISBN 978-80-8073-979-9.
- [2] TALANDA, I. (2010): *Studium hlavných faktorů, které ovlivňují jakost u technologických procesu*. Brno: Vysoké učení technické, 2010, Závěrečná práce.
- [3] BOLIBRUCHOVÁ, D. - PASTIRČÁK, R. (2018): *Zlievarenská metalurgia neželezných kovov*. Žilina : EDIS – vydavateľské centrum ŽU, ISBN 978-80-554-1463-8.
- [4] TILLOVÁ, E. - CHALUPOVÁ, M. (2009): *Štruktúrna analýza zliatin Al-Si*. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline. ISBN 978-80-554-0088-4.
- [5] OUTMANI, I. - FOUILLAND-PAILLE, L. A. - ISSELIN, J. (2017): *Effect of Si, Cu and processing parameters on Al-Si-Cu HPDC castings*. s. 1.: Elsevier, 2017. 249 (2017) 559–569. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2017.06.043.
- [6] JIAO X.Y. - LIU, Y.X. - WANG, J. - LIU, W.N. - WAN, A.X. - WIESNER, S. - XIONG, S.M. (2022): *The microstructure characteristics and fracture behavior of the polyhedral primary iron-rich phase and plate-shaped eutectic iron-rich phase in a high-pressure die-cast AlSi10MnMg alloy*: Journal of Materials Science & Technology. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.09.014>
- [7] DINNIS, C. M. - TAYLOR, J. A. - DAHLE, A. K. (2005): *As-Cast morphology of iron-intermetallics in Al-Si foundry alloys*: Scripta Materialia. 2005, 53 955-958.
- [8] FABRIZI, A. - FERRARO, S. - TIMELLI, G. (2014): *The Influence of Fe, Mn and Cr Additions on the Formation of Iron-rich Intermetallic Phases in an Al-Si Die-casting Alloy*. Shape Casting: 5th International Symposium. DOI: 10.1007/978-3-319-48130-2_34.
- [9] MAJERNÍK, J. - GAŠPÁR, Š. - PODARIL, M. - KOLÍNSKY, J. (2019): *The Influence of the Gate Geometry on Selected Process Parameters in the High Pressure Die Casting Technology*: Manufacturing Technology February 2019, Vol. 19, No. 1. s. 101-106. ISSN 1213-2489.
- [10] MAJERNÍK, J. - GERKOVÁ, J. (2014): *Vplyv konštrukcie vtokového systému na kvalitu odliatkov* Portál pre odborné publikovanie, Ročník 7, č. 8, ISSN 1338-0087
- [11] BEROUAL, S. - BOUMERZOU, Z. - PAILLARD, P. - BORJON-PIRON, Y. (2019): *Comparative study on the microstructures and hardness of the AlSi10.6CuMg alloy produced by casting and high pressure die casting*: International Journal of Cast Metals Research.32(4):1-22, DOI: 10.1080/13640461.2019.1603681

Using the cold metal transfer (CMT) method for wire arc additive manufacturing (WAAM) applications

Martin Frátrik, Ing.*

Department of Technological Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: martin.fratrik@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2771

Miloš Mičian, Assoc. prof. Ing., PhD.

Department of Technological Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: milos.mician@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2768

Abstract: This work deals with the possibilities of applying the *MAG-CMT* welding method for the purpose of wire arc additive manufacturing (*WAAM*). The *WAAM* method was operated using an industrial robot and welding device for *MAG* welding. The aim of the work was to compare three methods of laying layers in order to assess their mutual mixing. Cross-shaped perpendicular walls that were mutually connected as of the welded component were assessed. The geometry, macrostructure, and total operating costs of individual variants were evaluated. The result was the determination of the most accurate and most economical variant of laying layers.

Keywords: *MAG-CMT*; *WAAM*; welding

INTRODUCTION

Wire arc additive manufacturing (*WAAM*) was patented in 1920, making it one of the oldest methods of additive manufacturing [1]. Now it is mainly used for local repair of damaged or worn components and to manufacture new components or pressure vessels. With the advent of sufficiently powerful software for designing and manufacturing (*CAD/CAM*), it enabled significant development of *WAAM* technology and expanded the area of its use. Current technologies make it possible to weld with an accuracy of 0.1 mm and with a melting rate between $1 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ and $10 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, depending on the welding method used. The *WAAM* method consists of placing many individual weld layers next to each other (or on top of each other). Components are thus formed by successive welding of individual layers along the trajectory of the future contour of the component (always from bottom to top) with a constant or adaptive thickness of welding wall, or by depositing material into these contours to create solid parts. Therefore, accurate models for the geometry of individual weld beams play an important role in determining the surface and dimensional accuracy of manufactured products.

Additive manufacturing by arc welding with cold welding wire is mainly used in the aviation, naval, automotive, and space industry [2]. The biggest advantage is the possibility of using existing welding

and robotic equipment. All filler materials, such as structural steels, high-alloyed steels, aluminium, titanium, nickel, copper and their alloys, can be used for processing by the *WAAM* [3-5]. It is therefore an economic alternative for the production of parts made of expensive (or difficult to process) materials, where conventional machining often results in an extremely high *BTF* (Buy to fly) ratio. This is the ratio of the "input" production material to the "output" material.

In terms of material costs, the welding wire used in *WAAM* is significantly cheaper than metal powder. This is because the *WAAM* is based on welding, an already well-established manufacturing technology. Additive arc welding technology hardware typically includes common welding equipment that is less expensive than many metal 3D printers available on the market. In addition, wire is usually easier to handle than powder, which requires the use of special protective equipment [2].

1 MATERIALS AND METHODS

The aim of the experimental part is the design and manufacturing of 3 different variants of depositing layers in the additive manufacturing of *WAAM* using *MAG-CMT* technology. The main goal is to produce a semi-finished part with the shape of a cross, with arm length 60 mm, arm width 5 mm and height of 50 mm (Fig. 1). Individual layers of welds are welded to a

12 mm-thick steel plate made of structural steel S355J2+N.

The filler material for welding was welding wire G3Si1 with a diameter of $\varnothing 1.0$ mm (EN ISO 14341-A: G 42 4 C1/M21 3Si1). G3Si1 is a copper-coated welding wire for welding structural steels with a minimum yield strength of up to 420 MPa and unalloyed structural steels with a maximum strength of 530 MPa.

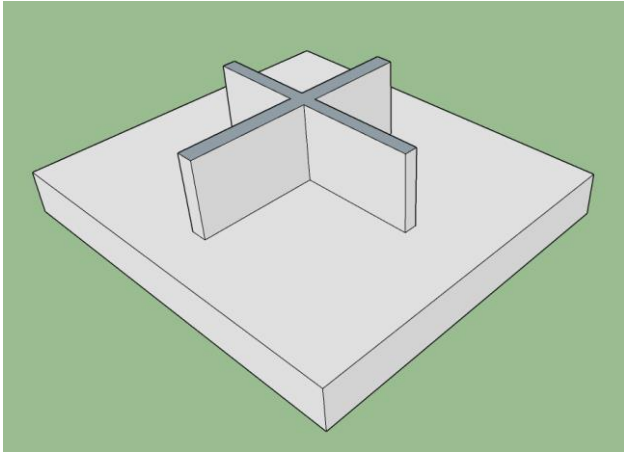


Fig. 1. Design of a semi-finished product made by the WAAM method

1.1 Welding procedure

The TPS 4000 device (Fronius, Austria) was used as the welding device. The torch of the welding machine was attached to the KUKA VKR 250/2 robotic arm. The assembly adapted in this way enables the accuracy of depositing layers up to 0.1 mm. Welding was performed by MAG technology in the Cold Metal Transfer (CMT) mode. As a shielding gas a mixture of 18 % CO_2 and 82 % of Ar was used. Welding parameters which are identical for all variants are shown in Tab. 1.

Tab. 1. Welding parameters for MAG-CMT welding

I [A]	U [V]	WFS [$m \cdot min^{-1}$]	Travel speed [$mm \cdot s^{-1}$]	Gas flow [$l \cdot min^{-1}$]
104	21.1	5.3	8.0	8.0

1.2 Variants of layering

Three variants of layering the test piece's weld layers were proposed. A total of 36 layers were applied to the welding of each method. The coordinates of the layer deposition direction are different in the variants to find out which variant will have the best geometry in the final evaluation and, at the same time, the best welding wire consumption, shielding gas consumption, and the smallest total welding time. Individual variants are shown in Fig. 2, Fig. 3, and Fig. 4. The welding process can be seen in Fig. 5 and the final part manufactured by the WAAM can be seen in Fig. 6.

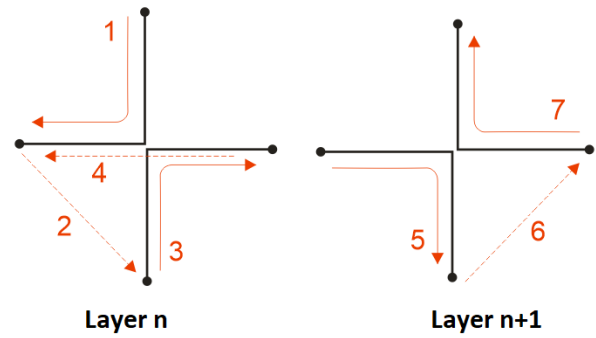


Fig. 2. Variant of layering No. 1

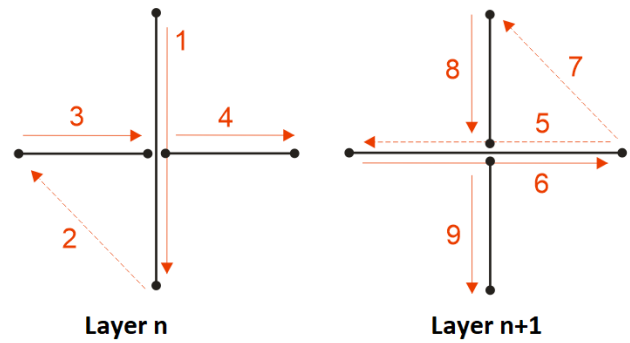


Fig. 3. Variant of layering No. 2

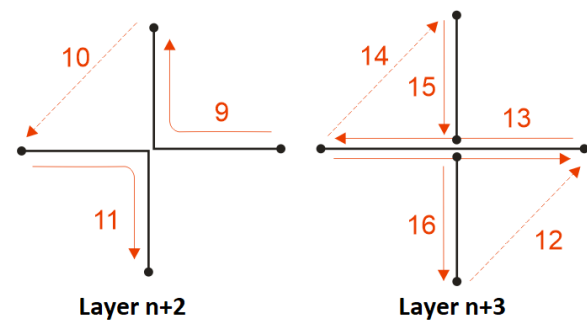
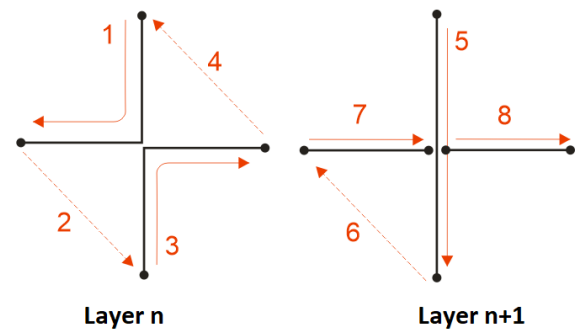


Fig. 4. Variant of layering No. 3



Fig. 5. The first layer welding of variant No. 3

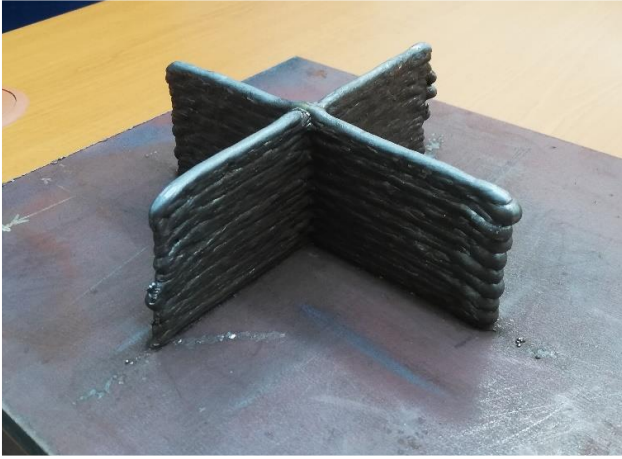


Fig. 6. Final part made by the WAAM as Variant No. 3

2 RESULTS AND DISCUSSION

The method of measuring the height and the width of individual arms at control points was chosen to compare the individual variants with each other. The control points are shown in Fig. 7 and are identical for each variant.

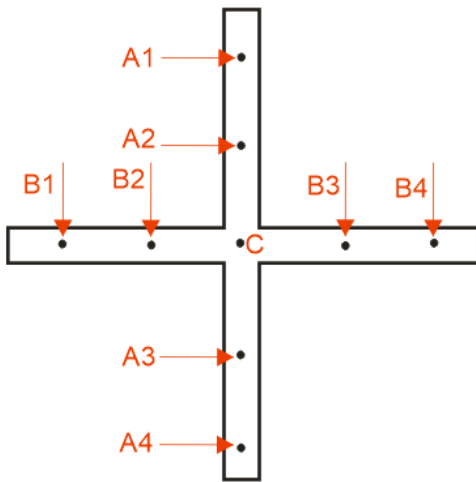


Fig. 7. Control points for measuring the height and the width of the samples

The results of measuring the height of the samples are shown in Tab. 2.

Tab. 2. Results of the height measurements at the control points [mm]

Variant No.	A1	A2	A3	A4	C
1	48.9	51.1	52.6	49.4	56.8
2	52.5	51.9	51.2	50.3	52.3
3	54.8	54.8	54.6	53.3	55.5
Variant No.	B1	B2	B3	B4	
1	52.7	53.0	52.8	52.2	
2	52.4	52.0	50.9	48.6	
3	53.1	53.5	52.5	51.7	

Tab. 3. Results of the width measurements at the control points [mm]

Variant No.	A1	A2	A3	A4	C
1	5.0	5.0	4.9	4.9	-
2	5.0	5.0	4.9	4.9	-
3	4.9	4.9	4.8	4.9	-
Variant No.	B1	B2	B3	B4	
1	5.0	5.0	5.3	5.2	
2	5.2	5.2	5.3	5.2	
3	4.9	4.9	5.1	5.0	

Together with the geometric parameters, the total manufacturing times, the consumption of the filler material and the consumption of the shielding gas were also assessed on all the test pieces. These values are listed in Tab. 4.

Tab. 4. Total time and material consumption for selected variants of the WAAM process

Variant No.	Total time of welding	Consumption of the filler material	Consumption of the shielding gas
1	23.3 min	0.88 kg	184 l
2	22.9 min	0.86 kg	181 l
3	23.0 min	0.87 kg	182 l

The total welding time was determined by the calculation in which the net welding time, and the net time performed by fast forward were included. Times were determined based on the common welding speed ($8.0 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$) and fast forward speed ($1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$). The calculations were based on the trajectories according to Fig. 2, Fig. 3 and Fig. 4.

Macrostructural analysis showed that the layers are connected without significant internal and external defects (e.g. cold joints, porosity, overflows, etc.). Macrostructure of the variant No. 1 is shown in Fig. 8 and microstructure of the variant No. 2 is shown in Fig. 9.



Fig. 8. Macrostructure of Variant No. 1



Fig. 9. Macrostructure of Variant No. 2

The cross-section was performed at the level of control point A3 for every assessed test piece (excluded the variant No. 3). For the variant No. 3 the macrostructural analysis wasn't performed.

CONCLUSIONS

Based on the measurements of the experimental test pieces, it is possible to state the differences between the assumed and actual geometric values. It is also possible to observe the difference between the individual variants of depositing the weld layers. The height measurements show that the variants No. 1 and No. 2 did not meet the requirements for the height of the test piece (50 mm). Shoulder width measurements showed that only variant No. 3 does not meet the required parameters (5 mm).

The indicators related to the total production time, the consumption of the filler material and the consumption of the shielding gas showed minimal differences between the individual variants. If the manufactured parts were not planned as serial production, the given differences can be considered negligible.

The height measurements showed that in the case of variant No. 3, it is sufficient to make only 35 layers to achieve the required height. By reducing the number of layers, it is possible to save approx. 5 l of shielding gas, 0.02 kg of the filler material and 0.6 min of the total welding time. Despite the insufficient arm width in the variant No. 3, the variant No. 3 can be considered the best.

Acknowledgement

This research was funded by agency VEGA, grant

number VEGA 1/0741/21 and VEGA 1/0044/22 and by agency APVV grant number APVV-16-0276 and Grant System of University of Zilina No. 1/2022 (17326).

REFERENCES

- [1] TWI. (2020): WAAM: *Wire Arc Additive Manufacturing* [Online]. 2020. [Cit. 2023-02-24]. Access: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/arc-based-additive-manufacturing-137>.
- [2] AUTONOMOUS MANUFACTURING. (2018): *An Introduction to Wire Arc Additive Manufacturing* [online]. 2020. [Cit. 2023-02-24]. Access: <https://amfg.ai/2018/05/17/an-introduction-to-wire-arc-additive-manufacturing/>.
- [3] VIMAL, K.E.K. - NAVEEN SRINIVAS, M. - RAJAK, S. (2020): *Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: A review*. *Materials Today: Proceedings*, 41, 8.
- [4] LE, V.T. - MAI, D.S. - DOAN, T.K. - PARIS, H. (2021): *Wire and arc additive manufacturing of 308L stainless steel components: Optimization of processing parameters and material properties*. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24,4, pp. 1015-1026.
- [5] DHINAKARAN, V. - AJITH, J. - FAHMIDHA, A.F.Y. - JAGADEESHA, T. - SATHISH, T. STALIN, B. (2019): *Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process of nickel based superalloys – A review*. *Materials Today: Proceedings*, 21, 1, pp. 920-925.

Analýza pozdĺžneho zaťaženia kontajnera so stenami vyrobenými zo sendvičových panelov

Glib Vatulia, Prof., Dr.Sc. Tech.

Zástupca riaditeľa pre vedeckú činnosť
Národná univerzita mestskej ekonomiky O. M. Beketovova
17 Marshala Bazhanova, 61002, Charkov, Ukrajina.
E-mail: glib.vatulia@kname.edu.ua

Juraj Gerlici, prof. Dr. Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215, 010 26 Žilina.
E-mail: juraj.gerlici@fstav.uniza.sk

Alyona Lovska, doc. Ing., Dr.Sc. Tech.

Katedra konštruovania vagónov a kvality produktov,
Ukrajinská štátna univerzita železničnej dopravy,
Feuerbakh sq., 7, 61050, Charkov, Ukrajina.
Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215, 010 26 Žilina.
E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com, Tel.: + 380 66 338 1946

Yevhen Krasnokutskyi, Ing.

Odbor "Vedecko-výskumný a konštrukčný technologický ústav železničnej dopravy"
Spoločnosť "Ukrajinské železnice", a.s.
Jerzy Giedroyc str., 5, 03150, Kyjev, Ukrajina.
E-mail: ek1520mm@gmail.com

Analysis of the longitudinal load of a container with walls created from sandwich panels

Abstract: The article presents the results of determining the longitudinal dynamic load of a container of standard size 1CC with sandwich panel walls. A mathematical model was developed that takes into account the longitudinal load of a container placed on a platform wagon during a displacement collision. The use of sandwich containers as components was found to contribute 10 % to the active container design in the longitudinal plane compared to the typical design. A calculation of the strength of the container was carried out. At the same time, the maximum voltages are 18.6 % lower than permissible. Conducted research in preparation for the creation of recommendations for the design of modern modular vehicle structures and increasing the production of the transport industry.

Keywords: ISO container, sandwich panel, container load, container strength, container transport.

ÚVOD

Zabezpečenie konkurencieschopnosti v oblasti železničného priemyslu si vyžaduje uvedenie do prevádzky vozidiel so zlepšenými prevádzkovými vlastnosťami. Kontajnerová preprava je dlhodobou jednou z najdôležitejších zložiek dopravnej infraštruktúry.

Pre zabezpečenie ďalšej efektívnosti prevádzky kontajnerovej dopravy je dôležité zavádzať nové konštrukčné riešenia pri navrhovaní kontajnerov.

Je dôležité povedať, že v prevádzkových podmienkach môže dôjsť k poškodeniu kontajnerov v dôsledku zaťaženia, ktoré na ne pôsobí počas prepravy rôznymi druhmi dopravy. Jednými z najrozhodujúcejších sú dynamické zaťaženia s

premenlivým účinkom. Takéto zaťaženie pôsobí nielen na kontajner, ale aj na náklad, ktorý je v ňom umiestnený. V dôsledku toho, že nákladu v kontajneri má svoj vlastný stupeň voľnosti, môže dôjsť k dodatočnému zaťaženiu jeho konštrukcie. Dôsledkom toho je poškodenie konštrukcie kontajnera. Táto skutočnosť si vyžaduje dodatočné náklady na udržiavanie kontajnerov v prevádzke a prevádzkyschopnom stave. Okrem toho môže ovplyvniť bezpečnosť a ekologickosť dopravy.

V tomto ohľade je dôležité uskutočniť výskum na zlepšenie konštrukcií kontajnerov s cieľom znížiť ich dynamické zaťaženie počas prevádzkových režimov.

Problematike zlepšovania nosných konštrukcií kontajnerov na zvýšenie efektívnosti ich prevádzky sa venuje značné množstvo publikácií. Zvláštnosti určovania hlavných ukazovateľov pevnosti komponentov nosnej konštrukcie kontajnera sa zvažujú v publikácii [1]. Vykonaný výskum umožnil sformulovať odporúčania pre bezpečnú prevádzku kontajnera. Autori však zároveň neskúmali zaťaženie kontajnera pri preprave po železnici, pretože jeho konštrukcia je schopná odolávať vyšším zaťaženiam.

Publikácia [2] poskytuje rozbor a vlastnosti navrhovania nosných konštrukcií ISO kontajnerov. Zvážili sa možné schémy ich zaťaženia v prevádzke. Hodnotila sa odolnosť konštrukcie proti pôsobeniu vonkajších zaťažení. Autori ale zároveň nenavrhlí riešenia zamerané na zlepšenie pevnosti konštrukcie.

Analýza dynamického zaťaženia kontajnera umiestneného na plošinovom vozni je vykonaná v práci [3]. Počíta sa s posunom plošinového vozňa naloženého 20-stopovými kontajnermi. Autori navrhli technické riešenia na zníženie dynamického zaťaženia kontajnerov aj plošinových vozňov zavedením pružných väzieb do ich nosných konštrukcií. Zároveň autori nezohľadnili vplyv navrhovaných riešení na pevnosť stien kontajnera.

Práca [4] zdôrazňuje vlastnosti vytvorenia vylepšeného kontajnera na prepravu potravinárskych produktov (napr. ovocia a zeleniny). Uvádzajú sa hlavné požiadavky na navrhovanú nosnú konštrukciu kontajnera. V práci sú uvedené aj výsledky výpočtu pevnosti kontajnera pre hlavné prevádzkové zaťaženia. Je potrebné poznamenať, že pri navrhovaní tohto konštrukčného riešenia kontajnera autori nenavrhlí riešenia na zlepšenie jeho pevnosti počas prevádzkových režimov, najmä počas prepravy po železnici.

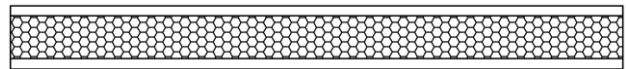
Pre zníženie zaťaženia skriň železničných vozidiel je možné v ich komponentoch použiť sendvičové panely. Napríklad v [5] je zdôvodnené použitie takýchto panelov na nákladnom vagóne. Autori naznačujú, že takéto vylepšenia sa dajú robiť nielen pri výrobe vozidiel, ale aj pri ich modernizácii. Podobné riešenie je navrhnuté v [6]. Autorský

kollektív zároveň zamerlal pozornosť na zlepšenie ukazovateľov spoľahlivosti nosných konštrukcií vozidiel zavedením kompozitných panelov. Bolo dokázané, že použitie takýchto panelov zlepšuje odolnosť skriň koľajových vozidiel voči zaťaženiu. Treba povedať, že tieto práce neskúmali dynamické zaťaženie stien vozňov vyrobených zo sendvičových panelov počas prevádzkových režimov. Nebrala sa do úvahy ani realizovateľnosť zavedenia sendvičových panelov na modulárne vozidlá, najmä kontajnery.

Z analýzy literárnych zdrojov vyplýva, že otázka vylepšovania kontajnerov na zvýšenie efektívnosti ich prevádzky je pomerne aktuálna. Zároveň nebola venovaná náležitá pozornosť zvyšovaniu ich pevnosti zavedením sendvičových panelov do nosných konštrukcií.

1 METODOLÓGIA

Pre zabezpečenie pevnosti nosnej konštrukcie kontajnera sa navrhuje vyrobiť jeho čelné a bočné steny vo forme sendvičových panelov (obr. 1).

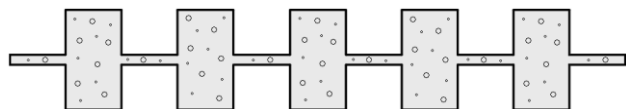


Obr. 1. Rez sendvičového panelu

Na určenie hrúbky plechov, ktoré tvoria sendvičový panel, sa vykonali príslušné výpočty pomocou *Bubnov-Galyorkinovej* metódy. Súčasne boli plechy pre každý úsek uvažované ako tenkostenné dosky so šírkou 2 m, výškou 2,6 m a hrúbkou 1,6 mm.

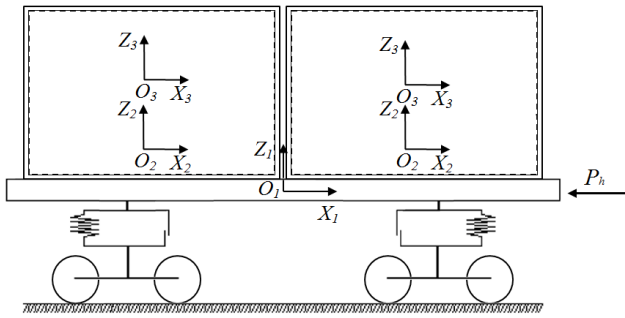
Na základe výpočtov sa zvolilo opláštenie z plechových panelov s hrúbkou 1,5 mm a hrúbka výplne, ktorá je medzi panelmi, je 33 mm.

Na zvýšenie pevnosti sendvičového panelu je vhodné vyrobiť plechy použiť plechy vyrobené s pravouhlým zvlnením (obr. 2). Toto rozhodnutie je odôvodnené skutočnosťou, že plech s pravouhlou konfiguráciou zvlnenia má väčší prierezový modul v porovnaní s inými variantmi jeho vyhotovenia. Parametre zvlnenia je možné zvoliť na základe momentu zotrvačnosti, resp. prierezového modulu odporu časti plechu.



Obr. 2. Rez sendvičového panelu vyrobeného z vlnitých plechov

Na určenie elasticko-viskózných charakteristík sendvičovej panelovej výplne sa vykonalo matematické modelovanie dynamického zaťaženia kontajnera umiestneného na plošinovom vozni a simuloval sa dynamický stav, ktorý zodpovedá nárazu vozňov pri posunovaní (obr. 3).



Obr. 3. Výpočtová schéma plošinového vozňa naloženého kontajnermi

Na tento účel bol vytvorený matematický model (1):

$$\begin{cases} M_v \cdot \ddot{q}_1 = P_h - \sum_{i=1}^n F_{tr} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2), \\ M_n \cdot \ddot{q}_2 = F_{tr} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + C \cdot (q_2 - q_3) + \\ + \beta \cdot (\dot{q}_2 - \dot{q}_3), \\ M_{nac} \cdot \ddot{q}_3 = C \cdot (q_2 - q_3) + \beta \cdot (\dot{q}_2 - \dot{q}_3), \end{cases} \quad (1)$$

kde M_v [t] - celková hmotnosť plošinového vozňa,

P_h [kN] - hodnota pozdĺžnej sily pôsobiacej na automatické spriahadlo (3500 kN [7]),

n - počet kontajnerov umiestnených na plošinovom vozni,

F_{tr} [kN] - sila trenia medzi dorazmi kovania a kovaniami,

M_n [t] - hmotnosť kontajnera,

M_{nac} [t] - hmotnosť nákladu,

C [kN·m⁻¹] - tuhosť plniva,

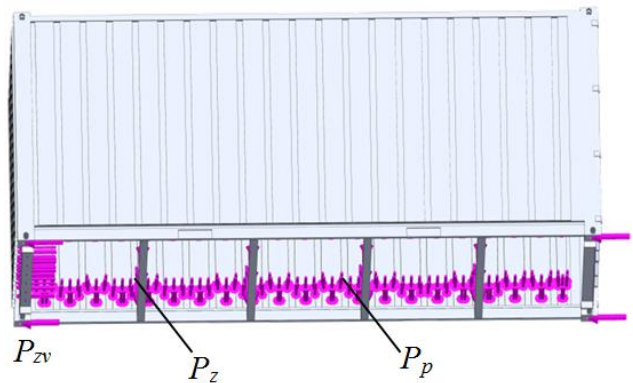
β [kN·s·m⁻¹] - koeficient viskózneho tlmenia plniva,

q_1, q_2, q_3 - súradnice určujúce pohyb plošinového vozňa kontajnera resp. nákladu vzhľadom na pozdĺžnu os.

Vypočítané zrýchlenie bolo brané do úvahy pri určovaní pevnosti kontajnera. Zároveň sa používa metóda konečných prvkov, ktorá je implementovaná v *SolidWorks Simulation*. Výpočtová schéma kontajnera je znázornená na obr. 4.

Pri zostavovaní výpočtovej schémy sa berie do úvahy, že nosná konštrukcia kontajnera je vystavená zvislému zaťaženiu P_z [kN], berúc do úvahy využitie plnej nosnosti kontajnera, pozdĺžnu silu P_{zv} [kN] pôsobiacu na armatúry, ako aj tlak rozpínania sypkého nákladu P_p [kPa] (obilia) na bočné a koncové steny. Tlak rozpery hromadného nákladu sa vypočíta podľa metódy uvedenej v [8, 9].

Pri vytváraní modelu konečných prvkov kontajnera boli použité štvorsteny. Optimálny počet prvkov je určený kombináciou grafickej a analytickej metódy. Počet uzlov MKP siete bol 71701 a počet prvkov 223937. Maximálna veľkosť prvku je 80 mm, minimálna je 16 mm. Minimálny počet prvkov bol 9, pomer nárastu veľkosti prvkov v sieti bol 1,7.

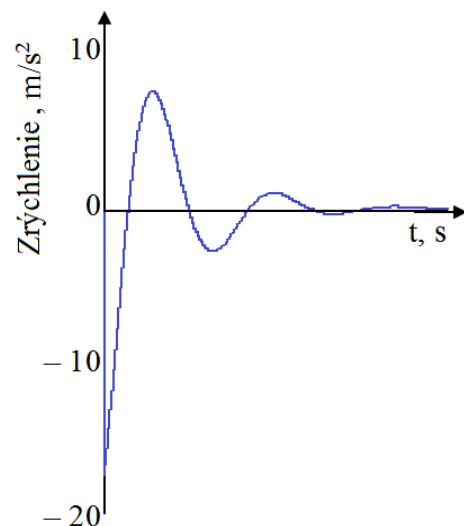


Obr. 4. Schéma výpočtu konštrukcie kontajnera

Upevnenie modelu bolo vykonané pomocou kovania. Konštrukčný materiál je oceľ 09G2S. Penový hliník sa používa ako materiál absorbujúci energiu, ako jeden z najbežnejších typov materiálov absorbujúcich energiu používaných v modernom strojárstve [10].

2 VÝSLEDKY

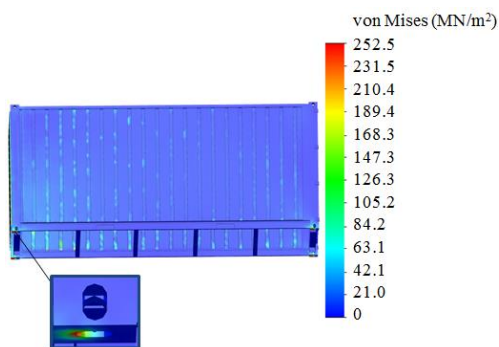
Na základe výpočtov pozdĺžneho dynamického zaťaženia kontajnera sa zistilo, že maximálne zrýchlenia nastávajú v počiatočnom momente dynamického procesu a sú okolo 18 m·s⁻² (obr. 5), ktoré neprekračujú prípustné hodnoty. Súčasne sa hodnota koeficientu tuhosti plniva rovná 27 kN·m⁻¹ a koeficient viskózneho tlmenia je 35 kN·s·m⁻¹. Tieto parametre sú určené postupným výberom za predpokladu, že zrýchlenia sú v rámci prípustných hodnôt.



Obr. 5. Zrýchlenia, ktoré pôsobia na kontajner pri manévrovacej zrážke

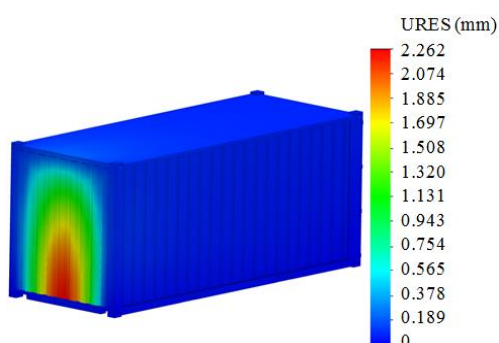
Výsledná hodnota zrýchlenia je o 10 % nižšia ako pri typickom dizajne kontajnera.

Výsledky výpočtov pevnosti kontajnera ukázali, že maximálne napätia sa vyskytujú v armatúrach kontajnera a sú 252,5 MPa (obr. 6), čo je o 14,7 % menej ako prípustná úroveň. Ako prípustné sa akceptuje napätie 310,5 MPa [7].



Obr. 6. Namáhaný stav konštrukcie kontajnera

Maximálne posuny boli zaznamenané v spodnej časti čelnej steny kontajnera a boli 2,3 mm (obr. 7).



Obr. 7. Pohyb v uzloch kontajnera

ZÁVER

Uskutočnilo sa modelovanie pozdĺžneho dynamického zaťaženia kontajnera štandardnej veľkosti ICC so sendvičovými panelovými stenami. Maximálne zrýchlenia kontajnera umiestneného na plošinovom vozni pri posunovacej zrážke sú cca $18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Výsledná hodnota zrýchlenia je o 10 % nižšia ako pri typickom dizajne kontajnera.

Uskutočnilo sa stanovenie pevnosti kontajnera so stenami zo sendvičových panelov pri pozdĺžnom zaťažení jeho konštrukcie. Súčasne sa v armatúrach kontajnerov vyskytujú maximálne napätia a dosahujú hodnotu $252,5 \text{ MPa}$, čo je o 18,6 % menej ako prípustná úroveň. Maximálne posuny boli 2,3 mm a boli zaznamenané v spodnej časti koncovkej steny kontajnera.

Realizovaný výskum prispeje k vytvoreniu odporúčaní pre návrh moderných konštrukcií modulárnych vozidiel a zvýši efektivitu dopravného priemyslu.

Pod'akovanie

Tento výskum podporila Kultúrna a vzdelávacia grantová agentúra MŠ SR v projekte č. KEGA 036ŽU-4/2021: „Implementácia moderných metód počítačovej a experimentálnej analýzy vlastností komponentov vozidiel do vzdelávania konštruktérov dopravných prostriedkov budúcnosti.“

Tento výskum podporila Kultúrna a vzdelávacia grantová agentúra MŠ SR v projekte č. KEGA

031ŽU-4/2023: „Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného programu Vozidlá a motory.“

REFERENCES

- [1] RZECZYCKI, A. - WISNICKI, B. (2016): *Strength analysis of shipping container floor with gooseneck tunnel under heavy cargo load*. *Solid State Phenomena*, 252, pp. 81–90.
- [2] GIRIUNAS, K. - SEZEN, H. - DUPAIX, R.B. (2012). *Evaluation, modeling, and analysis of shipping containerbuilding structures*. *Eng. Structures*, 43, pp. 48–57.
- [3] FOMIN, O. - GERLICI, J. - VATULIA G. LOVSKA A. - KRAVCHENKO K. (2021): *Determination of the Loading of a Flat Rack Container during Operating Modes*. *Applied Science*, 11, 7623. <https://doi.org/10.3390/app11167623>
- [4] IBRAGIMOV, N. N. - RAKHIMOV, R. V. - KHADZHIMUKHAMEDOVA, M. A. (2015). *Development of a container design for transportation of fruits and vegetables*. *Young scientist*, 21(101), pp. 168–173.
- [5] CHUAN-JIN, O. U. - BING-TAO, I. I. (2020): *Research and application of new multimodal transport equipment-swap bodies in China*. *E3S Web of Conferences*, 145. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014>
- [6] WRÓBEL, A. PŁACZEK, M. BUCHACZ, A. (2017): *An Endurance Test of Composite Panels*. *Solid State Phenomena*, 260, pp. 241–248. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.260.241>
- [7] DSTU 7598:2014. *Vantage carriages. For the first time to rebuild and design new and modernized cars with a gauge of 1520 mm (non-self-propelled)*. Kiev, 2015. 250 p.
- [8] ZEMLEZIN, I. N. (1965): *On the assessment of loads of expansion of bulk cargoes in the conditions of transportation of wagons on sea ferries*. Collection "Research of the dynamics of cars" Proceedings of the Central Research Institute of the Ministry of Railways, Vol. 307, pp. 37-63.
- [9] LOVSKA A. A. (2014): *Determination of the efforts of the bulk cargo spacer on the walls of the gondola car body during transportation by rail ferry*. Collection of scientific papers of the Ukrainian State Academy of Railway Transport, 143, pp. 54-57.
- [10] FOMIN, O. - GERLICI, J. - GORBUNOV, M. - VATULIA, G. - LOVSKA, A. - KRAVCHENKO K. (2021): *Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam*. *Materials*, 14 (12), 3420. <https://doi.org/10.3390/ma14123420>.

Corrosion behavior of the AlSi5Cu2Mg alloy with varying Zr addition

Lukáš Širanec, Ing.*

Department of Technological Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: lukas.siranec@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2771

Dana Bolibruchová, prof. Ing., PhD.

Department of Technological Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: danka.bolibruchova@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2772

Daniel Kajánek, Ing., PhD.

Research Centre UNIZA, University of Žilina,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: daniel.kajanek@uniza.sk, Tel.: +421 41 513 7622

Abstract: The aim of this paper was to analyze the impact of varying *zirconium* additions (0.05; 0.10; 0.15 and 0.20 wt. % *Zr*) on corrosion behavior of the *AlSi5Cu2Mg* aluminum alloy. Potentiodynamic polarization corrosion tests in 3.5 % *NaCl* solution demonstrated that the addition of *Zr* improved the thermodynamic corrosion stability of the *AlSi5Cu2Mg* alloy by shifting the corrosion potential to more positive values for all as-cast samples. The addition of *Zr* to the as-cast alloys also improved corrosion kinetics by lowering the corrosion current density.

Keywords: corrosion, *AlSi5Cu2Mg*, zirconium

INTRODUCTION

The automotive sector has undergone tremendous transformation recently. Automotive manufacturers are compelled to develop technical solutions to lower emissions and enhance fuel efficiency as a result of ever-stricter emission standards laws.

Aluminum alloys are among the irreplaceable materials used in the automotive industry. Due to their favorable weight ratio and strength properties, *aluminum* alloys are used in the production of engine parts (cylinder heads, engine blocks, and pistons) and body parts. With the advent of electromobility, their applications expanded to include the manufacture of electric motor housings, battery trays/covers. This fact affects research centers that must develop new *aluminum* alloys that will meet the ever-tightening criteria for advanced castings in the automotive industry.

In addition to a whole range of mechanical, physical, and tribological properties, *aluminum* alloys for castings in the automotive industry must also meet the requirements for sufficient corrosion resistance. The evaluation of the corrosion resistance of automotive parts is especially important for the castings of electric

car battery trays, which are located on the car chassis and are thus directly exposed to a corrosive environment (water, road salt, etc.) [1, 2].

There are several standardized tests to evaluate the corrosion resistance of *aluminum* alloys. One of them is the potentiodynamic polarization test, on the basis of which it is possible to characterize corrosion mechanisms, corrosion speed, and the susceptibility of the material to corrosion in a defined corrosion environment. The measurement is carried out in closed corrosion cells, which are connected to a laboratory potentiostat. In most cases, this is a three-electrode connection. A connection of this type is formed by the observed surface of the tested material, which serves as a working electrode, a *platinum* mesh as a counter electrode, and a reference electrode, most commonly a saturated calomel electrode (*SCE*), which has a potential shift of +0.2446 V in comparison to the standard hydrogen electrode (*SHE*). By the potentiodynamic polarization test, a metallic material is characterized on the basis of the dependence of current density and potential. During the test, the potential of the tested material shifts in the

Tab. 1. Chemical composition of the experimental alloys with varying Zr addition

Chemical composition [wt. %]									
Zr addition [wt. %]	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Ti	Sr	Zr	Al
0	5.47	1.91	0.29	0.18	0.02	0.013	0.01	0.0009	Bal.
0.05	5.67	1.91	0.29	0.19	0.02	0.013	0.01	0.05	Bal.
0.10	5.65	1.92	0.29	0.19	0.02	0.014	0.01	0.10	Bal.
0.15	5.55	1.91	0.29	0.19	0.02	0.014	0.01	0.12	Bal.
0.20	5.43	1.90	0.29	0.18	0.02	0.014	0.01	0.19	Bal.

anodic (or cathodic) direction - the sample gradually acts as a cathode and an anode. The potential of the tested material immersed in the electrolyte settles at a certain value with respect to the reference electrode, which corresponds to the corrosion potential E_{corr} . Corrosion potential E_{corr} is defined as the potential at which the rate of oxidation of the material is the same as the rate of reduction of one of the components of the corrosion environment. Polarization tests are based on measuring the current response due to a change in the potential (polarization) of the working electrode in a specified range and at a certain speed. Polarization caused by an external controllable source imposes a potential different from its equilibrium potential on the tested material via a current. Anodic polarization shifts the potential of the electrode towards more positive values - the electrode then behaves as an anode and electrons are released. By cathodic polarization, the potential of the electrode is shifted to more negative values, and a reduction reaction occurs [3, 4].

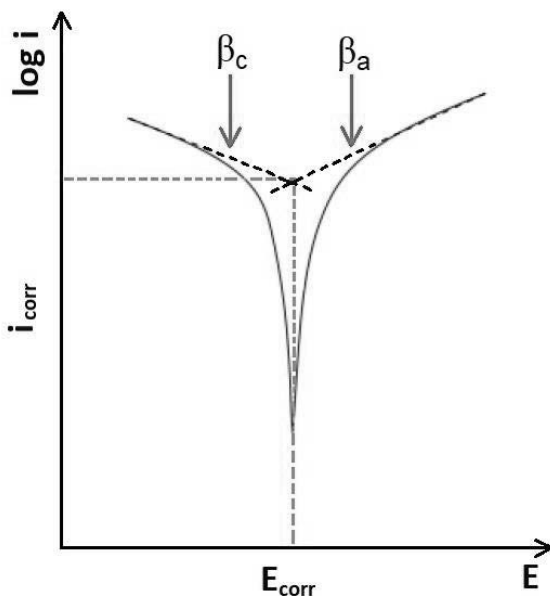


Fig. 1. Tafel analysis of the potentiodynamic curve [5]

The output from the potentiodynamic polarization test is a potentiodynamic curve, which is interpreted in semi-logarithmic coordinates. The anode and cathode partial curves are subsequently extrapolated by *Tafel*

analysis of the potentiodynamic curve (Fig. 1) and their slopes β_a and β_c are determined. The intersection of the linear part of the curves determines the values of the corrosion potential E_{corr} and the corrosion current density i_{corr} [5].

The aim of this experimental research was to determine the impact of varying Zr addition on the corrosion behavior of the *AlSi5Cu2Mg* alloy.

1 EXPERIMENTAL MATERIAL AND METHODS

AlSi5Cu2Mg aluminum alloy in a pre-modified state was used as an experimental material. This alloy is currently used to manufacture cylinder heads for gasoline engines. As part of the experiment, different experimental alloys with varying additions of Zr (0; 0.05; 0.10; 0.15 and 0.20 wt.% Zr) were made. Zirconium was added to the *AlSi5Cu2Mg* alloy in the form of *AlZr20* master alloy. The chemical composition of the experimental alloys is shown in Tab. 1.

The experimental alloys were made by gravity casting into a metal mold with temperature of 200 °C. The casting temperature was 780 ± 5 °C. 10 pieces of samples were made from each experimental alloy, of which 5 were subjected to evaluation of corrosion behavior in the cast state and 5 were subjected to heat treatment. For the purposes of heat treatment, the T7 mode was chosen, consisting of solutionizing at 500 °C for 6.5 hours, followed by rapid cooling in water at a temperature of 80 to 95 °C. Artificial aging took place at a temperature of 250 °C for 4 hours, followed by cooling in the air.

Corrosion testing of the experimental alloys was evaluated using potentiodynamic polarization (PD) tests in 3.5 % *NaCl* solution at laboratory temperature 20 °C. Measurements were performed in a three-electrode cell system on a laboratory potentiostat Biologic SP300, with the sample connected as a working electrode, platinum mesh as a counter electrode, and a saturated calomel electrode (SCE) serving as a reference electrode. After 10 minutes of potential stabilization, samples were tested with potentials ranging from -200 mV to +500 mV vs. the

open circuit potential (*OCP*) at a step rate of $1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$. *EC Lab 10.42* software was used to analyze measured *PD* curves using the *Tafel* extrapolation method, determining values of corrosion potential E_{corr} , corrosion current density i_{corr} , and *Tafel* coefficients a and c , as well as anodic and cathodic slopes of curves. Additionally, the corrosion rate r_{corr} was calculated. Samples were prepared by wet grinding with *P1200* sanding paper. Each experimental alloy was exposed to the *PD* test and measurements were repeated five times [6, 7].

2 POTENTIODYNAMIC POLARIZATION TESTS

Results of *PD* tests for a series of the experimental alloys are graphically presented in the form of representative *PD* curves in Fig. 2 and corresponding values of electrochemical characteristics obtained by *Tafel* analysis of the *PD* curves are presented in Tab. 2. This experiment presented two perspectives on the measured results: corrosion kinetics, as represented by the value of corrosion current density i_{corr} , and thermodynamics, as indicated by corrosion

potential values E_{corr} [8]. Data obtained indicated that heat treatment (*HT*) enhanced E_{corr} values for samples without *Zr* addition to more positive ones, pointing to the alloy's increased thermodynamic stability after *HT*. Regardless of *Zr*, the change in E_{corr} towards higher positive values was documented for as cast (*AC*) samples when inspecting the alloys with *Zr* addition. This suggested that the presence of *zirconium*, whether in solid solution or intermetallic phase, contributed to the improved thermodynamic corrosion response of the material to a corrosive environment. In comparison to their *AC* counterparts, the thermodynamic response of alloys with *Zr* addition appeared to be worse after *HT*. Furthermore, the E_{corr} values for each heat-treated experimental alloy revealed that the amount or form of *Zr* present in the alloy has no effect on corrosion thermodynamics, as no significant difference was observed among the heat-treated samples with *Zr* addition. This pattern was also seen in cast experimental alloys containing *Zr*.

However, in terms of corrosion kinetics, which is considered to be a more important factor when

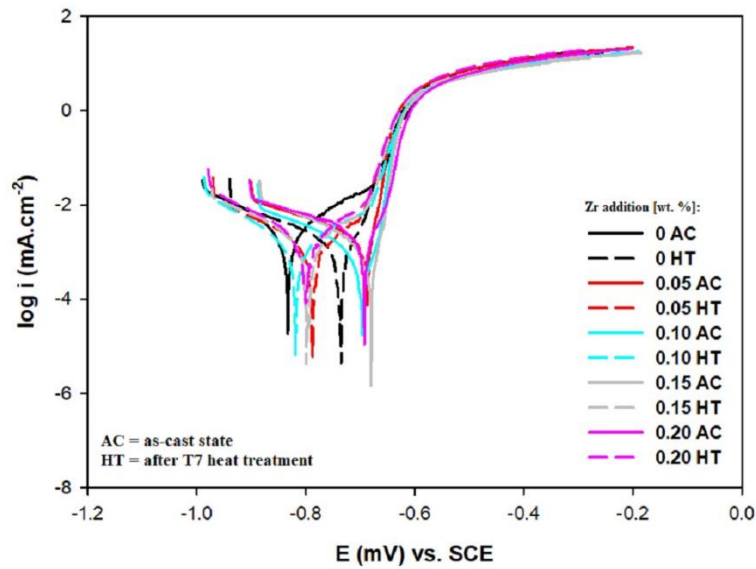


Fig. 2. Potentiodynamic curves measured in 3.5 % *NaCl* for various types of alloys

Tab. 1 Electrochemical characteristic obtained by *PD* tests in 3.5% *NaCl*

<i>Zr</i> addition [wt. %]	E_{corr} (mV)	i_{corr} ($\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)	β_a ($\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1}$)	β_c ($\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1}$)	r_{corr} ($\mu\text{m}\cdot\text{year}^{-1}$)
0 <i>AC</i>	-835	3.51	131	142	0.058
0 <i>HT</i>	-746	0.76	36	171	0.013
0.05 <i>AC</i>	-671	2.81	41	214	0.057
0.05 <i>HT</i>	-784	1.25	101	167	0.021
0.10 <i>AC</i>	-696	1.09	33	152	0.018
0.10 <i>HT</i>	-816	0.89	155	139	0.014
0.15 <i>AC</i>	-685	2.07	31	192	0.273
0.15 <i>HT</i>	-799	1.66	166	157	0.016
0.20 <i>AC</i>	-695	2.28	24	259	0.031
0.20 <i>HT</i>	-798	1.79	155	160	0.025

discussing the practical application of the alloy, microstructural changes related to heat treatment led to a suppression of corrosion current density i_{corr} , meaning that corrosion reactions were slower, and alloys degraded less intensely than their as cast (AC) counterparts. This was also reflected by lower values of corrosion rate r_{corr} for the alloys. The i_{corr} results of the as cast experimental alloys also showed that corrosion kinetics was tending to decrease with increasing Zr content compared to the 0 AC samples up to the 0.10 Zr and then it tended to increase with higher Zr content. However, i_{corr} values for the 0.15 AC and 0.20 HT experimental alloys were still lower compared to the as cast alloy without Zr addition, indicating that Zr presented in the solid solution to a greater extent (compared to Zr excluded in the form of intermetallic phases) is more suitable for the corrosion resistance of the alloy. Since the i_{corr} values were directly proportional to the corrosion rate, Zr addition in carefully chosen range appeared to be rather beneficial for improvement of corrosion resistance of the studied *AlSi5Cu2Mg* alloy in 3.5 % NaCl solution. Similar conclusions were presented also in the study of Kim et al. [9], where authors proposed improved corrosion resistance of 1xxx series Al alloy after addition of Zr in aggressive salt solution. However, these findings could be applied only when evaluating the as cast experimental alloys, since the electrochemical values showed that the highest corrosion resistance, with regard to i_{corr} , was obtained by the 0 HT alloy, showing that heat treatment offers more effective corrosion resistance than the presence of Zr in the alloy.

CONCLUSION

The aim of this research was to investigate the effect of varying additions of Zr on the corrosion properties of the *AlSi5Cu2Mg* aluminum alloy. Potentiodynamic polarization tests in 3.5 % NaCl solution revealed that the addition of Zr had a positive effect on the thermodynamic corrosion stability of the *AlSi5Cu2Mg* alloy due to a shift of the corrosion potential to a more positive value for all as cast samples. Moreover, the addition of Zr to the as cast alloys improved corrosion kinetics by lowering the corrosion current density, regardless of the form of its presence in the alloy. The highest corrosion resistance in 3.5 % NaCl with regards to corrosion current density was obtained by the alloy without Zr in heat treated state, meaning that heat treatment has a more significant impact on the corrosion resistance of the studied alloy than alloying with Zr.

Acknowledgment

This article was created withing the project of the KEGA grant agency 022ŽU-4/2021. The authors are grateful for the support.

REFERENCES

- [1] HAJDÚCH, P. - DJURDJEVIC, M. B. - BOLIBRUCHOVÁ, D. (2020): *New trends in the production of aluminum castings for the automotive industry*. Slévarenství, No. 1-2, pp. 5-7, ISSN 0037-6825.
- [2] HOAG, K. - DONDLINGER, B. (2016): *Cylinder block and head materials and manufacturing*. Vehicular engine design, pp. 97-115.
- [3] HADZIMA, B. - LIPTÁKOVÁ, T. (2008): *Fundamentals of electrochemical corrosion of metals*. EDIS – publishing house of the Univeristy of Žilina, ISBN: 978-80-8070-876-4.
- [4] DZIKOVÁ, J. - KAJÁNEK, D. - NOVÝ, F. - PASTOREK, F. (2021): *Corrosion of metal materials*. EDIS – publishing house of the Univeristy of Žilina, ISBN: 978-80-8070-554-1757-8.
- [5] ŠVECOVÁ, I. (2021): *The influence of ferric intermetallic phases on the structure and properties of secondary aluminum alloys based on Al-Si-Mg*. [dissertation thesis]. Žilina: University of Žilina, 2021. 132 s.
- [6] MHAEDE, M. - PASTOREK, F. - HADZIMA, B. (2014): *Influence of shot peening on corrosion properties of biocompatible magnesium alloy AZ31 coated by dicalcium phosphate dihydrate (DCPD)*. Materials Science and Engineering C, No. 39, pp. 330-335.
- [7] GHALI, E. (2015): *Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys: Understanding, Performance, and Testing*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 9780471715794.
- [8] KAJÁNEK, D. - PASTOREK, F. - FINTOVÁ, S. - BAČA, A. (2017): *Study of Corrosion Behavior of Dicalcium Phosphate-dihydrate (DCPD) Coating Prepared by Large Amplitude Sinusoidal Voltammetry (LASV) Technique on ZW3 Magnesium Alloy*. Procedia Engineering, No. 192. pp. 399-403.
- [9] KIM, Y. - PARK, J. - AN, B. - LEE, Y. - YANG, CH. - KIM, J. (2018): *Investigation of Zirconium Effect on the Corrosion Resistance of Aluminum Alloy Using Electrochemical Methods and Numerical Simulation in and Acidified Synthetic Sea Salt Solution*. Materials, No. 11.