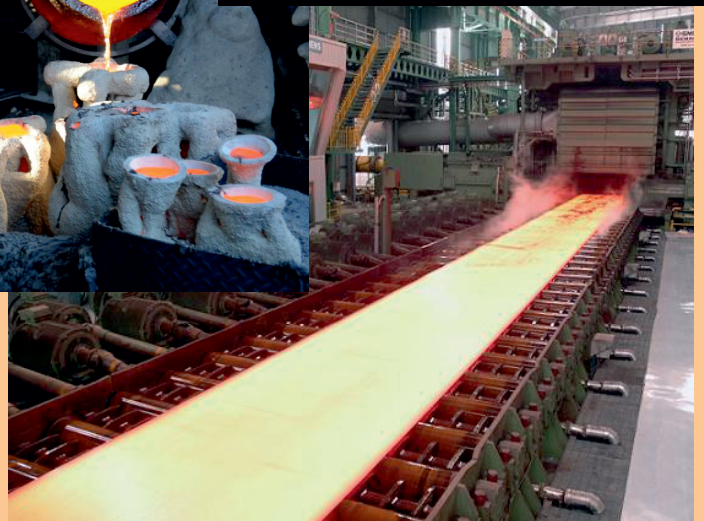
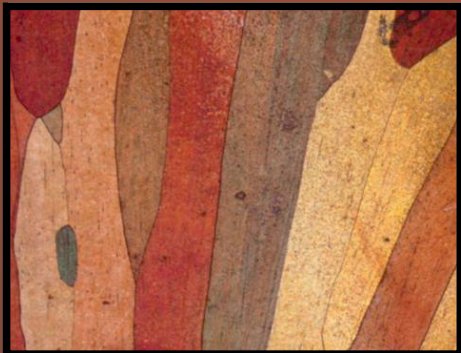
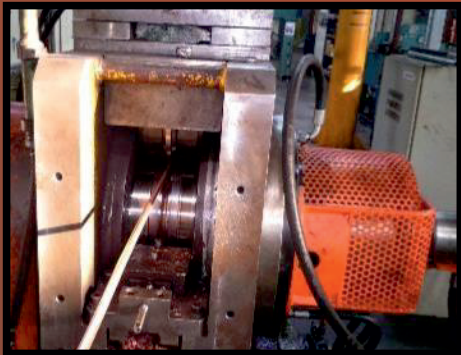




ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

TECHNOLÓG



Ročník 16
október 2024

3/2024

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)

prof. Ing. Alyona LOVSKA, Dr.Sc. Tech. (UA)

prof. Ing. Eva TILLOVÁ, PhD. (SK)

prof. Ing. Peter DEMEČ, CSc. (SK)

prof. Ing. Jan SUCHÁNEK, CSc. (CZ)

prof. Dr. Ing. Milan SÁGA (SK)

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

prof. Dr. Ing. Miroslav NESLUŠAN (SK)

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

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

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

OBSAH	
ZOZNAM RECENZENTOV	4
EDITORIÁL	5
ANDERS JONAS ÅNGSTRÖM	6
VPLYV TECHNOLOGIE TEPELNÉHO SPRACOVANIA NA TRIBOLOGICKÉ VLASTNOSTI VYBRANÝCH OCEĽOVÝCH MATERIÁLOV	8
<i>Jakub Harvanec, Miloš Mičian, František Nový</i>	
ANALÝZA VLASTNOSTÍ MEDENÝCH DRÔTOV VYROBENÝCH PRETLAČOVANÍM	13
<i>Jozef Bílik, Róbert Sobota</i>	
HODNOTENIE POHODLIA JAZDY V OSOBNOM VAGÓNE PROSTREDNÍCTVOM ROVINNÉHO DYNAMICKÉHO MODELU PRI ZVISLOM KMITANÍ	19
<i>Ján Dižo, Alyona Lovska, Miroslav Blatnický, Vadym Ishchuk</i>	
HODNOTENIE CELISTVOSTI ZVÁRANÝCH POTRUBNÝCH ZOSTÁV Z PLASTU KOMBINOVANOU SKÚŠKOU PEVNOSTI A TESNOSTI	24
<i>Radoslav Koňár, Lucia Grünermelová, Miloš Mičian, Viliam Leždík</i>	
INTELLIGENT WAREHOUSE SYSTEMS	30
<i>Vladimíra Biňasová, Peter Bubeník, Miroslav Rakyta, Marta Kasajová, Ján Zuzik</i>	
BLECHSSCHNEIDEN UNTER ANWENDUNG VON MATERIALLWÄRMUNG	34
<i>Ján Moravec</i>	
THE PERSPECTIVE OF USING INDUSTRY 4.0 IN ROBOTICS	37
<i>Vladimíra Biňasová, Peter Bubeník, Miroslav Rakyta, Marta Kasajová, Ján Zuzik</i>	

ZOZNAM RECENZENTOV PRÍSPEVKOV

Ing. Zdena BOHUŠOVÁ, PhD.
Ing. Aleš DITTRICH, Ph.D., Ing. Paed. IGIP
Ing. Marek DRLIČIAK, PhD.
prof. Ing. Eubomír HUJO, PhD.
Ing. Katarína KADUCHOVÁ, PhD.
Ing. Jaroslav KAŠPÁREK, Ph.D.
doc. Ing. Petr KAWULOK, Ph.D.
doc. Ing. Róbert LABUDA, PhD.
Ing. Ivan LITVAJ, PhD.
prof. Ing. Aleš SLÍVA, Ph.D.
Ing. Roman STROKA, PhD.

Príspevky boli recenzované dvomi nezávislými recenzentami, ktorí nie sú autormi ani spoluautormi príspevkov, nie sú z rovnakého pracoviska ako ktorýkoľvek z autorov, tak isto nie sú členmi redakčnej rady a ani redakcie časopisu.

The articles were reviewed by two independent reviewers who are not authors or co-authors of the articles, are not from the same workplace as any of the authors and are also not members of the editorial board of the journal.

Die Arbeiten wurden von zwei unabhängigen Gutachtern geprüft, die weder Autoren noch Mitautoren der Arbeiten sind, nicht aus demselben Fachbereich wie die Autoren stammen und keine Mitglieder der Redaktion oder des Redaktionsausschusses der Zeitschrift sind.



EDITORIÁL

Motto: “Človek, ktorý sa nebojí neznámeho vo vede, bojí sa neznámeho v morálke.”

Michelangelo Buonarotti

Vážení autori, čitatelia a priaznivci, už sme v jeseni tohto roka a hoci sa vonku strieda počasie a ročné obdobie, v časopise sa nič radikálne nemení. V časopise *Technológ* má každý prispievateľ svoje miesto. Niekedy v priebehu roku vyjde päť čísiel, inokedy vyjdú tri, čo ale nemení nič na fakte, že zverejňované príspevky sú na požadovanej úrovni kvality a ich grafické spracovanie znesie porovnanie s ďalšími podobnými časopismi. *Technológ* má za sebou nielen úspešnú, ale aj relatívne už dlhú cestu, ktorá je obrúbená mnohými stovkami článkov, o čom sa dá jednoducho presvedčiť letným zalistovaním v hocktorom z desiatok čísel *Technológa*. Verím, že redakcia naplňa očakávania a prináša vylepšenia časopisu určené pre široké spektrum záujemcov a čitateľov. Publikované vedecké príspevky sú recenzované anonymne dvomi z uvedených recenzentov v každom konkrétnom čísle časopisu.

Všetkým čitateľom, autorom a priaznivcom želám veľa invencie, zdravia a úspechov!

Ján Moravec
šéfredaktor a editor



Anders Jonas ÅNGSTRÖM (*13. august 1814, *Medelpad* –
†21. jún 1874, *Uppsala*)

Anders Jonas Ångström bol švédsky fyzik a jeden zo zakladateľov vedy o spektroskopii. *Ångström* je tiež dobre známy svojimi štúdiami astrofyziky, prenosu tepla, zemského magnetizmu a polárnej žiary. V roku 1852 *Ångström* sformuloval v *Optiska undersökningar* (*Optické výskumy*), zákon absorpcie, neskôr trochu upravený a známy ako *Kirchhoffov zákon tepelného žiarenia*. *Anders Jonas Ångström* sa narodil v *Medelpade* v rodine vidieckeho pastora *Johana Ångströma*. Vyštudoval v *Härnösande*. V roku 1833 sa presťahoval do *Uppsaly*, kde získal vzdelanie na *Uppsalskej univerzite*. Tu sa v roku 1839 stal docentom fyziky. V roku 1842 odišiel na observatórium v *Štokholme* nazbierať skúsenosti s praktickou astronomickou prácou a v nasledujúcom roku bol vymenovaný za správcu astronomického observatória v *Uppsale*. Zaujatý pozemským magnetizmom zaznamenal pozorovania kolísania magnetickej intenzity v rôznych častiach *Švédska*. *Štokholmská akadémia vied* ho poverila úlohou, ktorá bola dokončená až krátko pred jeho smrťou, vypracovať magnetické údaje získané na lodi *Eugenie* pri jej plavbe okolo sveta v rokoch 1851 až 1853.

V roku 1858 nahradil *Adolfa Ferdinanda Svanberga* na katedre fyziky v *Uppsale*. Jeho najvýznamnejšia práca sa týkala vedenia tepla a spektroskopie. Vo svojich optických výskumoch *Optiska Undersökningar*, prezentovaných *Kráľovskej švédskej akadémii vied* v roku 1853 poukázal nielen na to, že elektrická iskra poskytuje dve superponované spektrá, jedno z kovu elektródy a druhé z plynu, ktorým prechádza. Z teórie rezonancie sformulovanej *Leonhardom Eulerom* vyvodil, že žeravý plyn vyžaruje svetelné lúče rovnakej refragibility ako tie, ktoré dokáže absorbovať. Toto vyhlásenie, ako poznamenal *Sir Edward Sabine*, keď mu v roku 1872 udelil *Rumfordovu medailu Kráľovskej spoločnosti*, obsahuje základný princíp spektrálnej analýzy, a hoci bol niekoľko rokov prehliadaný, oprávňuje ho zaradiť sa medzi zakladateľov spektroskopie.

Od roku 1861 venoval osobitnú pozornosť slnečnému spektru. Jeho kombinácia spektroskopu s fotografiou na štúdium slnečnej sústavy viedla k dokázaniu, že atmosféra *Slnka* obsahuje okrem iných prvkov aj *vodík* (1862) a v roku 1868 publikoval svoj skvelý atlas normálneho slnečného spektra v *Recherches sur le specter solaire*, (*Výskumy slnečného spektra*), vrátane podrobných meraní viac ako tisíc spektrálnych čiar. Výsledky dlho zostali smerodajné v otázkach vlnovej dĺžky, hoci jeho merania boli nepresné o jednu časť na 7000 alebo 8000, pretože meter, ktorý používal ako štandard, bol príliš krátky. Odhliadnuc od nepatrných chýb v jeho hodnotách (asi 0,13 %) sa jeho atlas stal štandardným referenčným dielom pre nasledujúcich dvadsať rokov.

Ako prvý v roku 1867 preskúmal spektrum polárnej žiary a zistil a zmeral charakteristickú svetlú čiaru v jej žltozelenej oblasti. Ale mýlil sa, keď predpokladal, že tú istú líniu, ktorá sa často nazýva jeho menom, možno vidieť aj vo svetle zverokruhu. Bol zvolený za člena viacerých učených spoločností, vrátane *Kráľovskej švédskej akadémie* v roku 1850, *Kráľovskej spoločnosti* v roku 1870 a *Institut de France* v roku 1873. Je po ňom pomenovaná *Ångströмова jednotka* ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$), v ktorej sa niekedy merajú vlnové dĺžky svetla a medziatómové vzdialenosti v kondenzovanej hmote. Jednotka sa používa aj v kryštalografii, ako aj v spektroskopii. Na jeho počesť je pomenovaný kráter *Ångström* na *Mesiaci*.



Obr. 1. Predné strany kópie *Recherches sur le specter solaire* z roku 1868

Vo Švédsku oceňovali výsledky jeho vedeckej aktivity iba pomaly. Na príčine bola najmä jeho uzavretá povaha a odpor voči popularite. Pre zahraničie bol nedostupný, pretože publikoval švédsky. V rokoch 1870-1871 sa stal rektorom univerzity v *Uppsale*.

Na jeho počesť je pomenovaný takisto jeden z hlavných stavebných komplexov univerzity v *Uppsale*, *Laboratórium Ångström*. V tejto budove sídlia rôzne oddelenia vrátane *Katedry fyziky a astronómie*, *Katedry matematiky*, *Katedry inžinierskych vied*, *Ústavu vesmírnej fyziky* a *Katedry chémie*.

Anders Ångström zomrel v *Uppsale* 21. júna 1874 na *meningitídu* krátko pred svojimi šesťdesiatymi narodeninami.

LITERATÚRA

MURDIN, P. (2001): *Angstrom*. In: *Encyclopedia of Astronomy & Astrophysics* (1st ed.). CRC Press., eISBN 978-1003-2204-35, <https://doi.org/10.1201/9781003220435>

BOREC, T. (1989): *Dobrý deň, pán Ampère*. Alfa Bratislava, ISBN 80-05-00042-1.

Vplyv technológie tepelného spracovania na tribologické vlastnosti vybraných ocelových materiálov

Jakub Harvanec, Ing.*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: jakub.harvanec@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 51 513 2771

Miloš Mičian, doc. Ing., PhD.

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: milos.mician@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 51 513 2768

František Nový, prof. Ing., PhD.

Katedra materiálového inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: frantisek.novy@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 51 513 2607

The influence of heat treatment technology on the tribological properties of steel materials

Abstract: The heat treatment technology changes all sorts of materials properties. We examined the change of tribological properties of selected powder metallurgy materials and conventional steels, in this article. We used special testing equipment, for measuring the changes of friction coefficient of individual tested materials, before application of the heat treatment and after application of the heat treatment. We tested two types of powder metallurgy steels and two types of conventional steels. The changes in friction coefficient are shown in the table and charts. We used boronising, nitriding and surface hardening as procedures of heat treatment.

Keywords: boronising, tribological properties, heat treatment.

ÚVOD

Pomocou postupov tepelného spracovania (TS) sa dosahuje zmena štruktúry materiálu pri pôsobení teploty a výdrže na tejto teplote a tým zmenu vlastností daného materiálu [1]. V experimentoch sa použili postupy povrchového kalenia, nitridovania a boridovania. Nitridovanie a boridovanie patrí k postupom chemicko-tepelného spracovania, pri ktorom dochádza počas spracovania k difúznemu nasýteniu povrchovej vrstvy materiálov dusíkom (nitridovanie) a bórom (boridovanie) [1]. Tie pri reakcií s kovom vytvárajú na povrchu materiálu veľmi tvrdú, oteruvzdornú vrstvu zloženú z nitridov alebo boridov železa.

1 EXPERIMENTÁLNE MATERIÁLY

Zloženie práškových materiálov je uvedené v tab. 1. Z dôvodu, že chemické zloženie práškových materiálov sa určuje a zmiešava presne podľa

potreby, tak výsledný materiál obsahuje minimum nepriaznivých prvkov. V tomto prípade bol najväčší rozdiel medzi materiálmi *PM1* a *PM2* v obsahu *Cu*. Predpoklad pred vykonaním experimentu bol, že zvýšený obsah *Cu* bude priaznivo vplývať na koeficient trenia, ktorého hodnota by mala byť pri materiáli *PM2* nižšia v porovnaní s materiálom *PM1*.

Tab. 1. Chemické zloženie práškových materiálov

Materiál	<i>Cu</i> [%]	<i>C</i> [%]	Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]
<i>PM1</i>	1,8	0,75	7,1
<i>PM2</i>	4,0	0,60	7,0

Práškové materiály obsahujú okrem prvkov uvedených v tab. 1 aj 0,9 % maziva a spojiva, ktoré zlepšuje proces lisovania práškových materiálov a zabraňuje lepeniu materiálu na steny lisovacieho nástroja [6]. Konvenčné ocele boli vybrané kvôli

porovnaniu s práškovými materiálmi s tým že budú mať podobné mechanické vlastnosti ako zvolené práškové materiály.

Z prvkov chemického zloženia konvenčných ocelí v tab. 2 a tab. 3 majú najväčší význam prvky *C*, *Cr* a *Mo*, ktoré patria medzi karbidotvorné prvky a zároveň *C* a *Cr* zlepšujú kaliteľnosť ocele. Obmedzením pre aplikovateľnosť boridácie je obsah hliníka (max 0,3 %) a obsah kremíka (max 1%) [4]. Tieto predpoklady boli kľúčové pre zvolené druhy tepelného spracovania. Je zrejmé, že obe ocele majú rovnaký obsah uhlíka, no veľmi rozdielny obsah chrómu. To spôsobilo veľké rozdiely vo výsledkoch *TS*.

Tab. 2. Chemické zloženie ocele 15 142 [3]

Materiál	<i>C</i> [%]	<i>Si</i> [%]	<i>Mn</i> [%]	<i>P</i> [%]	<i>S</i> [%]	<i>Cr</i> [%]	<i>Mo</i> [%]
15 142	0,28 ÷ 0,35	max. 0,4	0,6 ÷ 0,9	max. 0,025	max. 0,035	0,9 ÷ 1,2	0,15 ÷ 0,3

Tab. 3. Chemické zloženie ocele 15 230 [2]

Materiál	<i>C</i> [%]	<i>Si</i> [%]	<i>Mn</i> [%]	<i>P</i> [%]	<i>S</i> [%]	<i>Cr</i> [%]	<i>Mo</i> [%]	<i>Ni</i> [%]
15 230	0,28 ÷ 0,35	max. 0,4	0,4 ÷ 0,7	max. 0,035	max. 0,035	2,8 ÷ 3,3	0,3 ÷ 0,5	max. 0,6

Vďaka nižšiemu obsahu chrómu, pri oceli 15 142, boli dosiahnuté lepšie výsledky po aplikácii nitridácie, naopak, vďaka zvýšenému obsahu chrómu v oceli 15 230, boli dosiahnuté lepšie výsledky po aplikácii boridácie. Tieto skutočnosti boli zistené až po vyhotovení a vyhodnotení jednotlivých skúšok na tepelne spracovaných vzorkách.

2 TEPELNÉ SPRACOVANIE

Pri spracovaní v atmosfére dusíka nitridy železa dosahujú tvrdosť až 1200 HV a tvoria sa pri teplote 470°C ÷ 580°C [1]. V tomto prípade sa použila nitridačná teplota 575°C, s výdržou na teplote 4 hod., v atmosfére $NH_3 + N_2$, s následným pomalým ochladzovaním.

Boridy železa dosahujú tvrdosť viac ako 2200 HV. Teplota boridácie môže byť zvolená v rozmedzí 850°C ÷ 1000°C [4], no pri špeciálnych druhoch boridácie je možné použiť teplotu 700°C (boridácia vo vákuu) a dokonca len 600°C pri boridácii v plazme. V experimente sa zvolila teplota boridácie 850°C s výdržou na teplote 6 hod. Avšak po analýze mikroštruktúry bolo zistené, že výsledná boridačná vrstva sa neprepojila s materiálom ale vytvorila sa len na jeho povrchu. Preto sa boridácia vykonala ešte raz s optimalizovanými podmienkami a to pri teplote 1000 °C s výdržou 6 hodín. Po následnej analýze bolo zistené, že boridácia bola úspešná a tak sa ďalej pokračovalo s analýzou tribologických vlastností, konkrétne k meraniu koeficientu trenia.

Taktiež sa na vzorkách aplikovalo povrchové kalenie, čo je postup tepelného spracovania, pri ktorom sa

pomocou induktora ohreje povrch súčiastky na požadovanú kaliacu teplotu a následne sa rýchlo schladí chladiacim médiom. Výdrž na teplote je veľmi krátka čo zabezpečí že sa zakalí len povrch súčiastky a nie celý objem. Tvrdosť, ktorú bolo možné dosiahnuť pri experimentálnom materiály bola od 700 HV10 do 850 HV10.

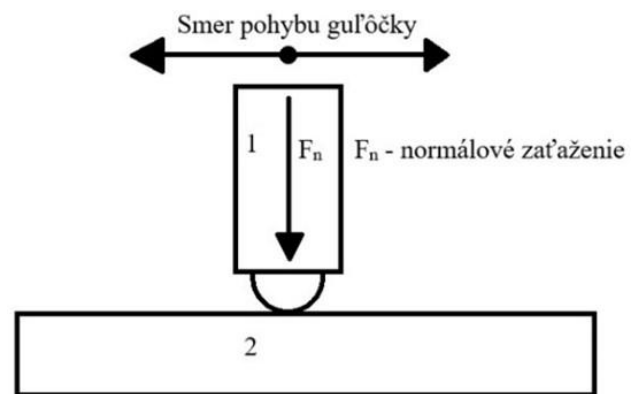
Vzorky boli pri ďalšom experimente značené podľa spôsobu tepelného spracovania a to dodatkovým znakom: *PK* - povrchovo kalená, *N* - nitridovaná, *B* - boridovaná. Vzorky bez dodatkového písmena označujú základný materiál bez *TS*.

Tvar skúšobných vzoriek bol hranolček s rozmermi 10°Ox10x100 mm, teda v tvare vhodnom pre skúšku

rázom v ohybe. Dĺžkový rozmer 100 mm je maximálny rozmer, ktorý je možné upnúť do zariadenia pre meranie koeficientu trenia.

3 TRIBOLOGICKÁ SKÚŠKA

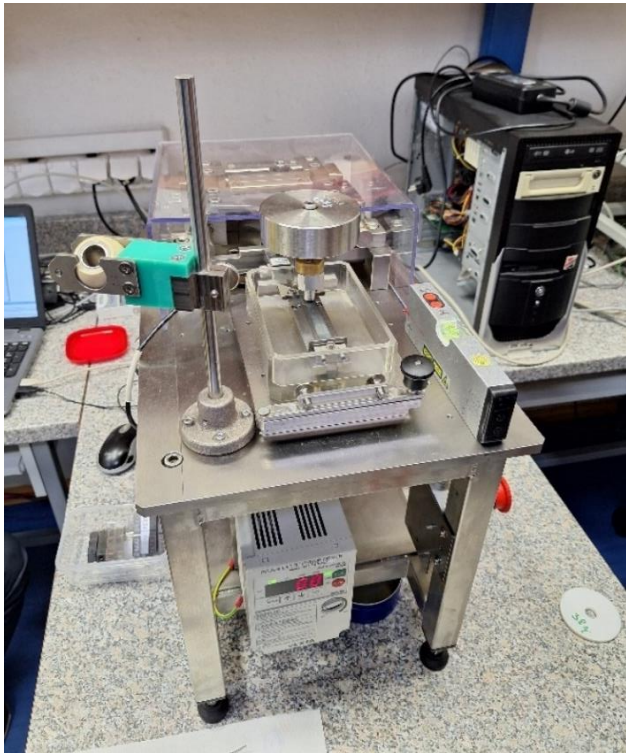
Trenie vzniká všade, kde sa voči sebe pohybujú dve telesá [5]. V tomto prípade to bola oceľová guľôčka z materiálu 100Cr6, ktorá sa pod zaťažením pohybovala po skúšobnej vzorke. Schéma tribologickej skúšky je zobrazená na obr. 1.



Obr. 1. Schéma tribologickej skúšky, 1 - prípravok s oceľovou guľôčkou, 2 - skúšobná vzorka

Pred samotnou skúškou, boli skúšobné vzorky očistené, aby sa na povrchu vzoriek nenachádzala mastnota alebo iné nečistoty, ktoré by ovplyvnili výsledok skúšky. Následne sa zvolili podmienky tribologickej skúšky. Rýchlosť priamočiareho vratného pohybu guľôčky po povrchu, bola 20 mm·s⁻¹. Testovací čas bol zvolený 6000 s, čo sa rovná vzdialenosti 100 m, ktorú guľôčka prejde po povrchu

skúšobnej vzorky. Skúšky prebiehali bez použitia maziva. Oceľová guľôčka bola zaťažená závažím s hmotnosťou 977 g a teda výsledná zaťažujúca sila, pôsobiaca na skúšanú vzorku bola 10 N. Experimentálny tribometer je zobrazený na obr. 2.



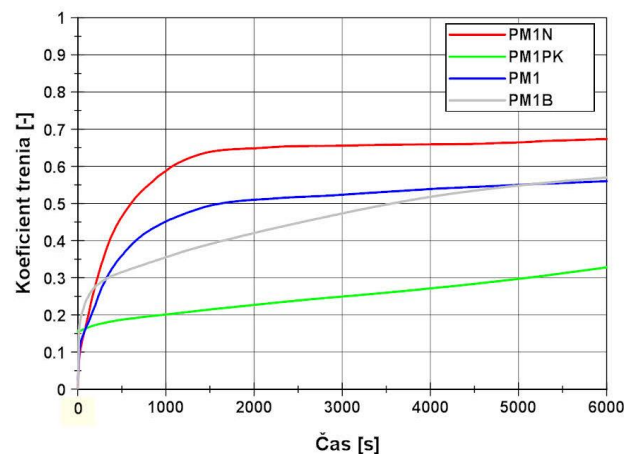
Obr. 2. Zariadenie pre meranie koeficientu trenia

Pri hodnotení vývoja koeficientu trenia sa hodnotia dve zóny. Prvá zóna, je zóna od začiatku skúšky až po bod, v ktorom sa hodnota koeficientu trenia ustáli. Druhá zóna, je oblasť od bodu ustálenia ďalej v čase. V tomto prípade k takémuto javu došlo len pri skúške materiálu *PM1* a *PM1N* a to v čase 2000 s. Preto sa tento čas vzal za smerodajný a v čase 2000 s sa vyhodnotili koeficienty trenia pre všetky materiály a ich varianty *TS*. Časové záznamy koeficientu trenia pri tribologickej skúške všetkých použitých vzoriek sú uvedené na obr. 3 až obr. 6. Hodnoty koeficientu trenia sú uvedené v tab. 4. Vzhľadom na celý priebeh koeficientu trenia je možné usúdiť, že pre práškové materiály sa najviac osvedčili postupy povrchového kalenia. Pri konvenčnej oceli 15 142 mal najlepší priebeh koeficientu trenia variant boridovaný, zatiaľ čo pri oceli 15 230 to bol variant nitridovaný.

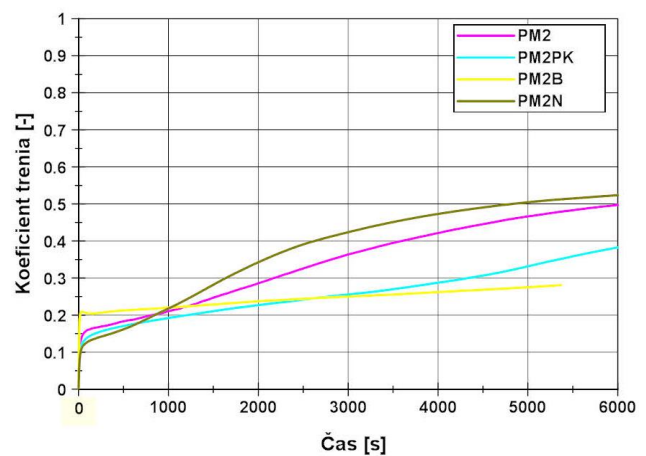
Pre ďalší výskum by bolo vhodné zmeniť parametre skúšky, a to buď zmenou zaťaženia, zvýšením rýchlosti pohybu guľôčky alebo predĺžením testovacieho času. Všetky tri varianty zmeny parametrov by spôsobili, že by sa koeficient po určitej dobe ustálil pri všetkých skúšaných vzorkách.

Tab. 4. Namerané hodnoty koeficientu trenia jednotlivých vzoriek v čase 2000 s

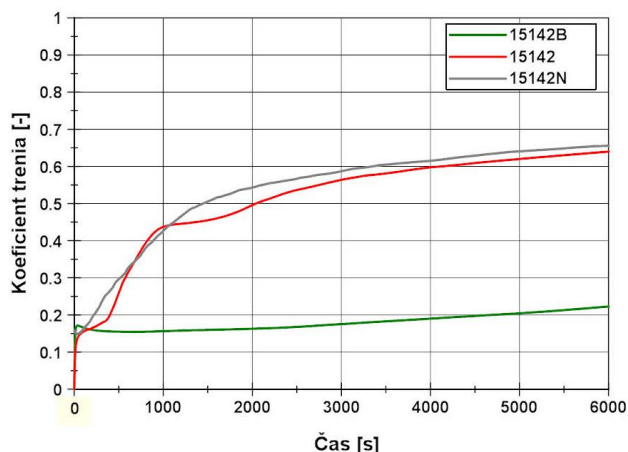
Označenie vzorky	Nameraný koeficient trenia [-]
<i>PM1</i>	0,51
<i>PM1PK</i>	0,24
<i>PM1N</i>	0,65
<i>PM1B</i>	0,42
<i>PM2</i>	0,28
<i>PM2PK</i>	0,23
<i>PM2N</i>	0,35
<i>PM2B</i>	0,25
15 142	0,5
15 142N	0,55
15 142B	0,17
15 230	0,52
15 230N	0,46
15 230B	0,48



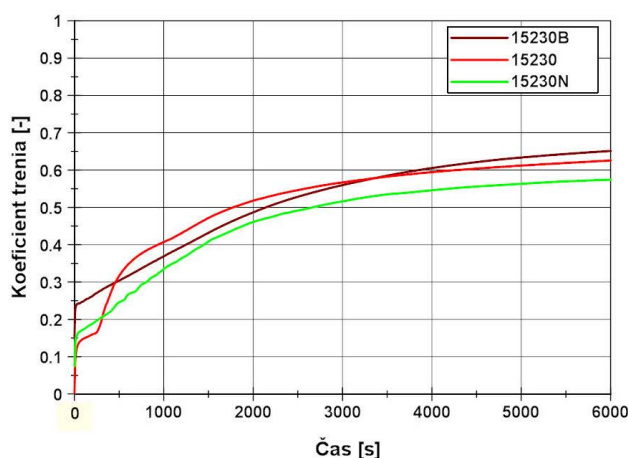
Obr. 3. Grafické znázornenie časového vývoja koeficientu trenia pre vzorky z materiálu *PM1* a jeho varianty



Obr. 4. Grafické znázornenie časového vývoja koeficientu trenia pre vzorky z materiálu *PM2* a jeho varianty



Obr. 5. Grafické znázornenie časového vývoja koeficientu trenia pre vzorky z materiálu 15 142 a jeho varianty



Obr. 6. Grafické znázornenie časového vývoja koeficientu trenia pre vzorky z materiálu 15 230 a jeho varianty

4 VYHODNOTENIE EXPERIMENTU

Pre práškový materiál s obsahom Cu 1,8 %, s označením *PM1* bol, s ohľadom na koeficient trenia, najvýhodnejší postup *TS* - povrchové kalenie. Pri tejto vzorke bol dosiahnutý koeficient trenia 0,24, kdežto pri ostatných variantoch, vrátane vzorky bez *TS*, boli namerané hodnoty viac než dvojnásobné.

Pri meraní koeficientu trenia práškoveho materiálu s obsahom medi 4 %, s označením vzorky *PM2* sa koeficienty trenia jednotlivých variant výrazne nelíšili, s výnimkou vzorky nitridovanej. Vzhľadom na zmenu ostatných vlastností po ďalšom skúmaní, bol pre tento druh materiálu stanovený najvýhodnejší postup *TS* - povrchové kalenie.

Pri konvenčnej oceli 15 142 boli pri meraní koeficientu trenia namerané najnižšie hodnoty pri vzorke boridovanej, a to 0,17. Avšak vzhľadom na ďalšie zmeny vlastností materiálu bol doporučený proces nitridácie, z dôvodu že pri nasledovnom hodnotení húževnatosti bolo zistené, že v materiáli po boridovaní prebehli štruktúrne zmeny, ktoré viedli k výraznému zníženiu vrubovej húževnatosti. Takýto materiál by bol v praxi takmer nepoužiteľný. Rázová

húževnosť konvenčných ocelí pred a po *TS* je uvedená v tab. 5.

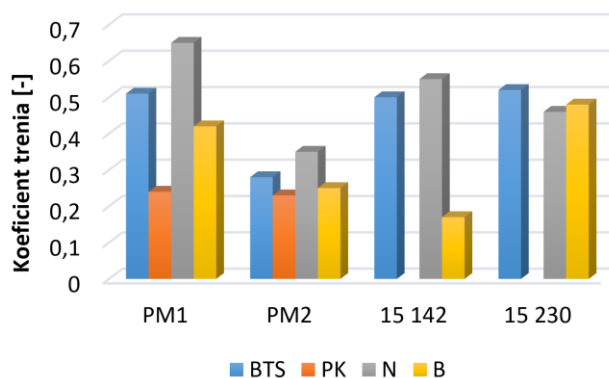
Tab. 5. Hodnoty rázovej húževnatosti konvenčných ocelí pred a po tepelnom spracovaní

Materiál	Priemerná hodnota vrubovej húževnatosti [$J \cdot cm^{-2}$]
15 142	131,5
15 142N	159,5
15 142B	5,3
15 230	91,1
15 230N	53,5
15 230B	128,8

Pri oceli 15 230 bol dosiahnutý najnižší koeficient trenia 0,46 pri vzorke nitridovanej a po aplikácii boridácie bol nameraný koeficient trenia 0,48, čo je porovnateľný výsledok. Vrubová húževnosť vzorky po nitridácii klesla o 42 %, kdežto po aplikácii boridácie stúpla o 41 %.

Priemerná mikrotvrdosť nitridovanej vzorky z ocele 15 230 bola 665 HV_{0,01} s maximom 826 HV_{0,01}, kým priemerná mikrotvrdosť boridovanej vzorky bola 3076 HV_{0,01}, s maximom 3662 HV_{0,01}. Po zistení týchto skutočností bol doporučený pre tento materiál proces boridácie.

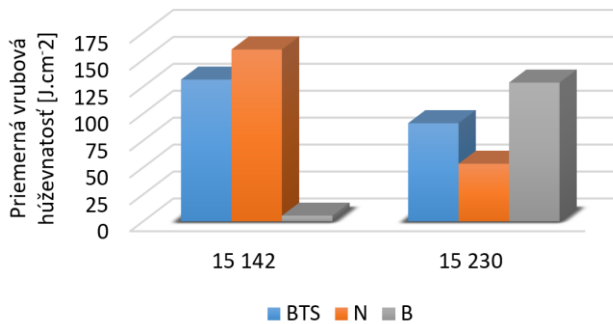
Na obr. 7 je znázornené grafické porovnanie hodnôt koeficientu trenia jednotlivých materiáloch pri všetkých variantoch *TS* v čase 2000 s.



Obr. 7. Porovnanie hodnôt koeficientu trenia jednotlivých materiáloch pri všetkých variantoch v čase 2000 s

Pri práškových materiáloch sa vrubová húževnosť nehodnotila, pretože tieto materiály sú všeobecne krehké a *TS* ovplyvnilo ich vrubovú húževnosť minimálne. Tieto materiály nie sú vhodné na rázovo zaťažované súčiastky. Naopak sú vhodné pre výrobu málo namáhaných súčiastok alebo pre výrobu súčiastok namáhaných na oter. Ich hlavnou prednosťou však je rýchla výroba tvarovo náročných súčiastok, ktorých výroba konvenčnými metódami by bola veľmi drahá a časovo náročná.

Na obr. 8 je znázornené grafické porovnanie hodnôt priemernej hodnoty vrubovej húževnatosti konvenčných ocelí pri všetkých variantoch TS.



Obr. 8. Porovnanie hodnôt koeficientu trenia jednotlivých materiálov pri všetkých variantoch v čase 2000 s

ZÁVER

Po vykonaní a vyhodnotení experimentálnych meraní bolo konštatované, že pre práškové materiály sú s ohľadom na koeficient trenia, najvýhodnejšie v oboch prípadoch postupocho povrchového kalenia. V prípade materiálu PM1 pri postupe nitridácie. Pri konvenčných oceliach boli dosiahnuté veľmi rozdielne výsledky, no vzhľadom na ostatné vlastnosti vybraných materiálov po tepelnom spracovaní, bol stanovený pre ocel 15 142

najvýhodnejší proces nitridácie a pre ocel 15 230 proces boridácie.

Pod'akovanie

Tento výskum bol podporený zo zdrojov APVV, číslo APVV-20-0427; KEGA, číslo KEGA 008ŽU-4/2022 a VEGA, číslo VEGA 1/0741/21 a VEGA 1/0044/22.

LITERATÚRA

- [1] GÁBRIŠOVÁ, Z. - BRUSILOVÁ, A. (2019): *Tepelné spracovanie, Návodý na cvičenia*. Bratislava: SPEKTRUM STU.
- [3] STEELNUMBER (2024): *European steel and alloy grades*. Dostupné na: https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=335.
- [4] MMSPEKTRUM (2024): *Vytváření tvrdých a otěruvzdorných povrchů pomocí boridování | MM Průmyslové spektrum* (mmspektrum.com) [online].
- [5] ENGINEERING (2024): Dostupné na: <https://www.engineering.sk/strojarsstvo-extra/16293-tribologicke-skusky-materialov>
- [6] MORAVEC, J. - KANTORÍKOVÁ, E. - FABIAN, P. (2020): *Prášková metalurgia*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, p. 130.

Analýza vlastností medených drôtov vyrobených pretlačovaním

Jozef Bílik, doc. Ing., PhD.*

Katedra tvárnenia kovov a plastov, Ústav výrobných technológií,
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave,
Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava.
E-mail: jozef.bilik@stuba.sk, Tel.: +421 915 761 406

Róbert Sobota, Ing., PhD.

Katedra tvárnenia kovov a plastov, Ústav výrobných technológií,
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave,
Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava.
E-mail: robert.sobota@stuba.sk, Tel.: +421 908 657 796

Analysis of the properties of copper wires produced by extrusion

Abstract: The article focuses on the production of copper wires by extrusion and the evaluation of their mechanical properties. The article presents the results obtained on the basis of tensile tests and on the basis of hardness measurement. The tests were carried out on a semi-finished product with a circular cross-section and on manufactured wires with a rectangular cross-section. The wires produced were 9.5x4.5 mm, 10.5x1.65 mm and 5.75x1.35 mm. The impact of the transformation on the microstructure of the produced wire was also monitored.

Keywords: copper wire, extrusion, reduction, strain.

ÚVOD

Článok sa venuje problematike riešenia výroby drôtov pretlačovaním určených najmä pre oblasť výroby káblov. Výroba drôtov je vysoko aktuálna vzhľadom na širokú oblasť ich využitia v rôznych odvetviach priemyselnej výroby. V článku je uvedená analýza procesu výroby z hľadiska dosiahnutia požadovanej kvality a produktivity výroby. V texte je analýza vlastností vstupného polotovaru a vlastností drôtu vyrábaného pretlačovaním v súvislosti s veľkosťou pretvorenia v procese pretlačovania. Pozornosť je zameraná na výrobu plochých medených drôtov s obdĺžnikovým prierezom.

Pri výrobe drôtov dochádza k výraznej zmene prierezu vstupného polotovaru, ktorý je najčastejšie vo forme valcovaného drôtu dodávaného vo zvitkoch. V súčasnosti sa pri výrobe drôtov najčastejšie využíva technológia ťahania cez prievlaky, a to najmä pri výrobe drôtov kruhového prierezu. Pri výrobe drôtov sa v niektorých prípadoch využíva aj technológia dopredného pretlačovania, ako je to napríklad pri výrobe drôtov pre zvaracie elektródy a pod. Okrem toho sa pri výrobe medených drôtov nekrhového prierezu využíva aj technológia pretlačovania, pri ktorej je polotovar vo forme zvitku a do pretlačovacej

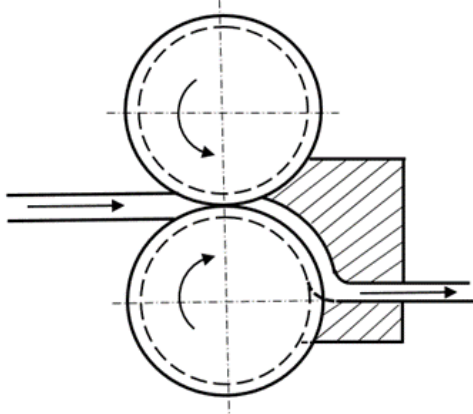
hlavy je tlačný pomocou valcov ktoré vyvíjajú pretlačovaciu silu.

1 PRÍPRAVA VZORIEK NA ANALÝZU VLASTNOSTÍ

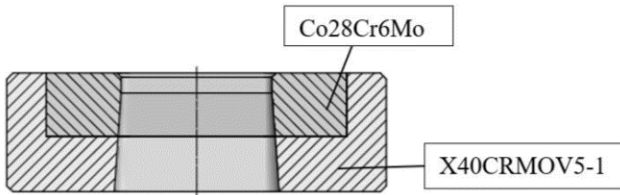
Analyzované drôty boli vyrobené v spoločnosti *Vicente Torns Slovakia a. s.*, ktorá používa pretlačovanie pomocou valcov a špeciálnych nástrojov (nožov), ktorých vonkajšia časť je z materiálu X40CRM0V5-1 a vnútorná, teda funkčná časť nástroja (noža), je z materiálu Co28Cr6Mo. Táto technológia je založená na podobnom princípe ako je technológia ECAR (*equal chanel angular rolling*) ktorá patrí medzi technológie intenzívnych plastických deformácií (IPD). Princíp technológie je uvedený na obr. 1.

Pri samotnom pretlačovaní v dôsledku výraznej plastickej deformácie a rýchlosti pretvorenia vzniká množstvo tepla a dochádza k ohrevu pretlačovaného materiálu až nad teplotu rekryštalizácie. Funkčné časti nástrojov na výrobu analyzovaných drôtov sú vyrobené z nástrojovej ocele 19554 (X40CRM0V5-1) a ocele Co28Cr6Mo (obr. 2).

Na obr. 2 je znázornené použitie daných materiálov na nástroj pri výrobe drôtov pretlačovaním.



Obr. 1. Princíp technológie výroby medených drôtov pretlačovaním



Obr. 2. Nástroj na výrobu drôtov pretlačovaním

Technologický proces výroby drôtu pretlačovaním je realizovaný vo výrobnej linke pozostávajúcej z odvíjacieho zariadenia, zariadenia na pretlačovanie pomocou valcov a špeciálnej pretlačovacej hlavy, chladiaceho zariadenia a navíjacieho zariadenia. Niektoré časti linky sú uvedené na obr. 3 až obr. 6.



Obr. 3. Vstup materiálu (polotovaru) do stroja medzi valce na pretlačovanie



Obr. 4. Pohľad na otvorenú výstupnú časť pretlačovacieho zariadenia s odklopeným špeciálnym nástrojom (pretlačovacou hlavou)



Obr. 5. Výstup drôtov z pretlačovacej hlavy a začiatok chladenia



Obr. 6. Chladenie drôtu po pretlačovaní

2 ANALÝZA VLASTNOSTÍ DRÔTOV

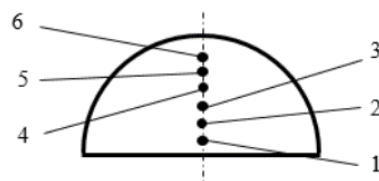
Na analýzu vlastností vybratých typorozmerov drôtov sa realizovalo meranie tvrdosti a určenie mechanických vlastností na základe ťahovej skúšky. Na sledovanie vplyvu deformácie na štruktúru bola použitá analýza mikroštruktúry pred a po pretlačovaní.

2.1 Výsledky merania tvrdosti HV5

Na analýzu boli používané dva typy medeneho polotovaru a tri typy drôtov vyrobených technológiou pretlačovania. Tvrdosť sa stanovila meraním podľa *Vickersa* na priečnom reze na vzorkách pripravených zo vstupného polotovaru a z vyrobených drôtov. Veľkosť záťaže bola 49,03 N (5 kp) a čas záťaže 10 s. Tvrdosť bola meraná na tvrdomery *ZWICK 3212* podľa normy *STN EN ISO 6507*.

2.1.1 Meranie tvrdosti HV5 na polotovare v priečnom reze

Na obr. 7 sú znázornené miesta merania tvrdosti na vstupnom polotovare s priemerom $\varnothing 12,7$ mm.



Obr. 7. Miesta merania tvrdosti na polotovare v priečnom reze

Namerané hodnoty tvrdosti vstupného polotovaru z bezkyslíkovej (OXY) a elektrotroskovo pretavovanej (ETP) medi sú uvedené v tab. 1 a tab. 2.

Tab. 1. Namerané hodnoty tvrdosti HV5 pre polotovary OXY

Miesto merania	1	2	3	4	5	6
Vzdialenosť od stredu [mm]	1	2	3	4	5	6
Tvrdosť HV5	55,2	54,6	60,3	63,5	64,2	71,2

Tab. 2. Namerané hodnoty tvrdosti HV5 pre polotovary ETP

Miesto merania	1	2	3	4	5	6
Vzdialenosť od stredu [mm]	1	2	3	4	5	6
Tvrdosť HV5	56,3	58,2	62,6	65,6	66,3	71,2

2.1.2 Meranie tvrdosti HV5 na vyrobených drôtoch v pričnom reze

Namerané hodnoty tvrdosti drôtu sú uvedené v tab. 3, tab. 4 a tab. 5.

Tab. 3. Namerané hodnoty tvrdosti HV5 pre drôt 9,5x4,5

Číslo merania	1	2	3	Stredná hodnota
Tvrdosť HV5	62,9	70,8	64,2	65,97

Tab. 4. Namerané hodnoty tvrdosti HV5 pre drôt 10,5x1,65

Číslo merania	1	2	3	Stredná hodnota
Tvrdosť HV5	58,2	56,5	62,6	59,10

Tab. 5. Namerané hodnoty tvrdosti HV5 pre drôt 5,75x1,35

Číslo merania	1	2	3	Stredná hodnota
Tvrdosť HV5	75,7	73,2	72,8	73,90

2.2 Výsledky z ťahových skúšok

Na meranie tvrdosti takisto aj na ťahové skúšky boli pripravené vzorky z dvoch typov polotovaru a troch typov drôtov. Ťahové skúšky boli robené na trhačke EU 40. Ide o takmer čistú meď. Polotovary: ETP (elektrotroskovo pretavovaná) a OXY (bezoxidová resp. bezkyslíková).

2.2.1 Výsledky pre vstupný polotovary

Polotovary OXY

Stredný priemer polotovaru (vzorky): $d_{OS} = 12,7$ mm.

Počiatková meraná dĺžka vzorky: $L_0 = 100$ mm.

Výsledky merania z ťahovej skúšky pre polotovary OXY sú uvedené v tab. 6.

Polotovary ETP

Stredný priemer: $d_{OS} = 12,7$ mm.

Počiatková meraná dĺžka vzorky: $L_0 = 85$ mm.

Výsledky merania z ťahovej skúšky pre polotovary ETP sú uvedené v tab. 7.

Tab. 6. Výsledky merania z ťahovej skúšky pre polotovary OXY

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ [kN]	12,4
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} [kN]	22,3
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R [mm]	77,5
Priemer krčka v mieste roztrhnutia d_R [mm]	6,1
Počiatkový prierez vzorky S_0 [mm ²]	126,6
Prierez v mieste roztrhnutia S_R [mm ²]	29,21
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	97,95
Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	176,15
Ťažnosť [%]	77,5
Kontrakcia [%]	76,9
Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu [-]	0,556

Tab. 7. Výsledky merania z ťahovej skúšky pre polotovary ETP

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ [kN]	13,0
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} [kN]	30,0
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R [mm]	76,5
Priemer krčka v mieste roztrhnutia d_R [mm]	6,3
Počiatkový prierez vzorky S_0 [mm ²]	126,6
Prierez v mieste roztrhnutia S_R [mm ²]	31,16
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	102,7
Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	237,0
Ťažnosť [%]	90,0
Kontrakcia [%]	75,4
Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu [-]	0,433

2.2.2 Výsledky pre vyrobené drôty

Pre každý typorozmer drôtu bola ťahová skúška realizovaná na dvoch vzorkách.

Tab. 8. Výsledky merania z ťahovej skúšky - vzorka č. 1

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ [kN]	4,7
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} [kN]	10,5
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R [mm]	75,0
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia Šírka x hrúbka [mm]	5,84x2,06
Počiatkový prierez vzorky S_0 [mm ²]	42,75
Prierez v mieste roztrhnutia S_R [mm ²]	12,03
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	109,9
Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	245,6
Ťažnosť [%]	50,0
Kontrakcia [%]	71,8
Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu [-]	0,447

Drôt 9,5x4,5 mm

Počiatočná meraná dĺžka vzorky: $L_0 = 150$ mm.

Výsledky z ťahovej skúšky vo forme nameraných a vypočítaných hodnôt pre vzorku č. 1 sú uvedené v tab. 8 a pre vzorku č. 2 v tab. 9.

Tab. 9. Výsledky merania z ťahovej skúšky - vzorka č. 2

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ [kN]	4,6
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} [kN]	10,4
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R [mm]	79,5
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia Šírka x hrúbka [mm]	5,73x2,08
Počiatočný prierez vzorky S_o [mm ²]	42,75
Prierez v mieste roztrhnutia S_R [mm ²]	11,92
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	107,6
Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	243,3
Ťažnosť [%]	53,0
Kontrakcia [%]	72,1
Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu [-]	0,442

Drôt 10,5x1,65 mm

Počiatočná meraná dĺžka vzorky: $L_0 = 150$ mm.

Výsledky z ťahovej skúšky vo forme nameraných a vypočítaných hodnôt pre vzorku č. 1 sú uvedené v tab. 10 a pre vzorku č. 2 v tab. 11.

Tab. 10. Výsledky merania z ťahovej skúšky - vzorka č. 1

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ [kN]	1,3
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} [kN]	3,96
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R [mm]	72,1
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia Šírka x hrúbka [mm]	7,22x1,14
Počiatočný prierez vzorky S_o [mm ²]	17,325
Prierez v mieste roztrhnutia S_R [mm ²]	8,23
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	75,04
Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	228,6
Ťažnosť [%]	48,1
Kontrakcia [%]	52,5
Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu [-]	0,328

Tab. 11. Výsledky merania z ťahovej skúšky - vzorka č. 2

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ [kN]	1,4
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} [kN]	4,1
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R [mm]	72,0
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia Šírka x hrúbka [mm]	7,60x1,12
Počiatočný prierez vzorky S_o [mm ²]	17,325
Prierez v mieste roztrhnutia S_R [mm ²]	8,512

Tab. 11. Výsledky merania z ťahovej skúšky - vzorka č. 2 (pokračovanie)

Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	80,8
Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	236,65
Ťažnosť [%]	48,0
Kontrakcia [%]	50,9
Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu [-]	0,341

Drôt 5,75x1,35 mm

Počiatočná meraná dĺžka vzorky: $L_0 = 150$ mm.

Výsledky z ťahovej skúšky o forme nameraných a vypočítaných hodnôt pre vzorku č. 1 sú uvedené v tab. 12 a pre vzorku č. 2 v tab. 13.

Tab. 12. Výsledky merania z ťahovej skúšky - vzorka č. 1

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ [kN]	0,72
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} [kN]	1,94
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R [mm]	64,5
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia Šírka x hrúbka [mm]	4,08x0,85
Počiatočný prierez vzorky S_o [mm ²]	7,762
Prierez v mieste roztrhnutia S_R [mm ²]	3,47
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	92,75
Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	249,9
Ťažnosť [%]	43,0
Kontrakcia [%]	55,3
Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu [-]	0,371

Tab. 13. Výsledky merania z ťahovej skúšky - vzorka č. 2

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ [kN]	0,70
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} [kN]	1,90
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R [mm]	63,2
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia Šírka x hrúbka [mm]	4,20x0,90
Počiatočný prierez vzorky S_o [mm ²]	7,762
Prierez v mieste roztrhnutia S_R [mm ²]	3,78
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	90,2
Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	244,8
Ťažnosť [%]	42,1
Kontrakcia [%]	51,3
Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu [-]	0,368

Vstupný materiál s priemerom $d_{0S} = 12,7$ mm aj z neho vyrobené drôty s rozmermi 9,5x4,5, 10,5x1,65 a 5,75x1,35 majú pomer medze klzu a pevnosti v ťahu menší ako 0,65, ako aj vysokú ťažnosť nad 40 %, čo svedčí o veľmi dobrých plastických vlastnostiach polotovaru aj vyrobených drôtov.

3 VÝPOČET VEĽKOSTI SKUTOČNÉHO PRETVORENIA A REDUKCIE

Z hľadiska priebehu procesu tvárnenia aj z hľadiska výsledných vlastností výtvarkov a teda aj drôtov významnú úlohu zohráva aj veľkosť pretvorenia, ktorá je jednou z termomechanických podmienok tvárnenia. Preto sa realizoval aj výpočet pretvorenia pri výrobe jednotlivých typorozmerov drôtov.

Priemer vstupného polotovaru pre všetky tri typorozmery drôtu: $d_{pol} = 12,7$ mm.

Prierez vstupného polotovaru: $S_{pol} = 126,61$ mm².

Časť prierezu vstupného polotovaru sa pred jeho vstupom do pretlačovacej hlavy odstráni orezaním a potom prierez vstupujúci do pretlačovacej hlavy po orezaní je:

$$S_o = S_{pol} - S_{or}, \quad (1)$$

kde S_{pol} - prierez vstupného polotovaru,

S_{or} - orezaný prierez.

Odpad pri orezávaní pred vstupom polotovaru do pretlačovacej hlavy tvoril pri súčasnom spôsobe výroby približne 7 %.

Potom orezaný prierez S_{or} , o ktorý sa zmenší pôvodný prierez polotovaru je:

$$S_{or} = 0,07 \cdot S_{pol} = 0,07 \cdot 126,61 \text{ mm}^2 = 8,86 \text{ mm}^2. \quad (2)$$

Prierez polotovaru vstupujúci do pretlačovacej hlavy po orezaní je:

$$S_o = 126,61 \text{ mm}^2 - 8,86 \text{ mm}^2 = 117,75 \text{ mm}^2. \quad (3)$$

3.1 Výpočet veľkosti pretvorenia pre jednotlivé typorozmery vyrobených drôtov

Výpočet veľkosti skutočného pretvorenia sa realizoval podľa vzorca:

$$\varphi = \ln \frac{S_o}{S}, \quad (4)$$

kde S_o - počiatočný prierez vstupujúci do pretlačovacej hlavy po orezaní,

S - prierez drôtu po pretlačovaní.

Výpočet veľkosti redukcie sa realizoval podľa vzorca:

$$R = \frac{S_o - S}{S_o} \cdot 100 [\%]. \quad (5)$$

Výsledky výpočtov sú uvedené v tab. 14.

Tab. 14. Veľkosť skutočného pretvorenia a redukcie pri pretlačovaní jednotlivých typorozmerov drôtov

Rozmery drôtu [mm]	Skutočné pretvorenie φ [-]	Redukcia R [%]
9,5x4,5	1,010	63,7
10,5x1,65	1,916	85,3
5,75x1,35	2,719	93,4

4 METALOGRAFIA

Na posúdenie vplyvu procesu výroby drôtov technológiou pretlačovania bola sledovaná aj mikroštruktúra pred a po pretlačovaní.

Príprava vzorky sa realizovala nasledujúco:

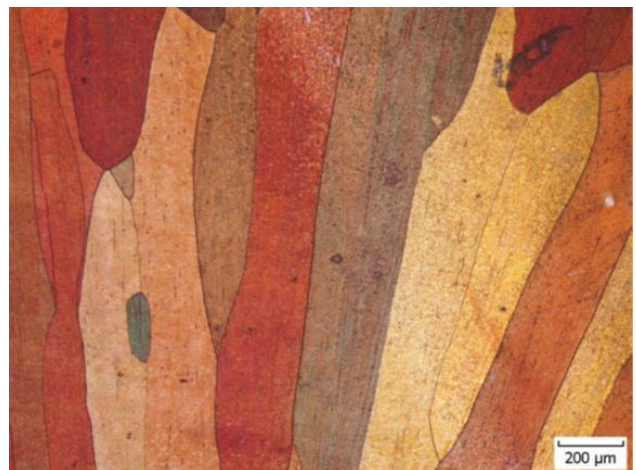
- delenie materiálu (odber vzorky),
- označenie,
- zalisovanie,
- brúsenie,
- leštenie,
- zviditeľnenie štruktúry leptaním.

Pri príprave vzoriek boli použité tri brúsne kotúče so zrnitosťou 120, 240 a 600, pričom boli nastavené otáčky 300 s⁻¹ a záťaž 30 N.

Bolo použité mechanické leštenie pomocou diamantovej pasty. Po každom leštení boli vzorky opláchnuté vodou a alkoholom.



Obr. 8. Mikroštruktúra polotovaru pred pretlačovaním



Obr. 9. Mikroštruktúra drôtu po pretlačovaní

Vzorky pred leptaním boli vyčistené vatou a alkoholom. Po leptaní vzorky boli umiestnené pod tečúcu vodu a opláchnuté alkoholom a vysušené teplým vzduchom. Na leptanie bolo použité leptadlo určené pre zliatiny medi Cu-Zn, a to 10 % roztok persíranu amónneho s dobou leptania 30 s.

Na obr. 8 je uvedená mikroštruktúra polotovaru pred pretlačovaním.

Na obr. 9 je zobrazená mikroštruktúra drôtu na pozdĺžnom reze po pretlačovaní.

ZÁVER

Článok sa zaoberal hodnotením výsledných mechanických vlastností vyrábaných drôtov. Na základe vykonaných skúšok na vstupnom polotovare ako aj na vybraných typorozmeroch vyrobených drôtov sa zistili výsledné mechanické vlastnosti a to medza klzu, pevnosť v ťahu, ťažnosť a kontrakcia. Výsledky potvrdili výborné mechanické vlastnosti vyrobených drôtov ako aj dobrú plasticitu vstupných polotovarov. Na vstupnom polotovare pomer medze klzu a pevnosti v ťahu ako jeden z ukazovateľov plasticity (húževnatosti) dosahoval hodnotu menšiu ako 0,6, pričom tento ukazovateľ u vyrobených drôtov technológiou kontinuálneho pretlačovania dosahoval hodnotu menšiu ako 0,5.

Pri výrobe drôtov pretlačovaním v dôsledku veľkého plastického pretvorenia, ktoré na základe výpočtov pre jednotlivé typorozmery drôtov dosahovalo hodnotu $\varphi = 1,01$ až $2,719$ a tiež v dôsledku trenia v pretlačovacom nástroji pri kontinuálnom procese výroby vzniká vysoká teplota presahujúca teplotu rekryštalizácie, ktorá tiež ovplyvňuje vlastnosti drôtov. Napriek tomu, štruktúra vyrobených drôtov vykazovala výraznú deformáciu.

Pri súčasnej výrobe týchto drôtov vzniká približne $7\% \div 8\%$ odpadu, pričom ide o drahý vstupný polotovar. Z toho dôvodu boli riešené aj možnosti zníženia odpadu. Tieto možnosti nie sú v príspevku uvedené.

Pod'akovanie

Článok vznikol s podporou grantovej úlohy KEGA 026STU-4/2023.

LITERATÚRA

- [1] BLAŠČÍK, F. (1984): *Technológia objemového tvárnenia*. Bratislava, ALFA.
- [2] BAČA, J. - BÍLIK, J. - TITTEL, V. (2010): *Technológia tvárnenia*. Bratislava, Nakladateľstvo STU, ISBN 978-80-227-3242-0.
- [3] EGERMEIER, V. - BALVAR, J. - DUCHOŇ, J. - ŠINGEL, J. - PŘIKRYL, J. (1976): *Řízeně ochlazovaný válcovaný drát a tažený drát*. Praha, TEVÚH, typové číslo: 735 212 3207.
- [4] MORAVEC, J. - BÍLIK, J. (2017): *Tvárníacie stroje a nástroje*. Žilina, UNIZA, ISBN 978-80-554-1339-6.
- [5] HRIVŇÁK, A. - PODOLSKÝ, M. - DOMAZETOVÍČ, V. (1992): *Teória tvárnenia a nástroje*. Bratislava, ALFA, ISBN 80-05-01032-X
- [6] FOREJT, M. - PÍŠKA, M. (2006): *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno, VUT Brno, Akademické nakladatelství CERM, 225 s., ISBN 978-80-2142-374-9.
- [7] PERNIS, R. (2007): *Teória tvárnenia kovov*. Trenčín, Trenčianska univerzita A. Dubčeka, 168 s., ISBN 978-80-8075-244-6.
- [8] MORAVEC, J. (2015): *Teória tvárnenia kovov*. Žilina, EDIS-vydavateľstvo ŽU, 332 s., ISBN 978-80-554-1095-1.

Hodnotenie pohodlia jazdy v osobnom vagóne prostredníctvom rovinného dynamického modelu pri zvislom kmitaní

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

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

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

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

Evaluation of ride comfort in a passenger wagon by means of a planar dynamic model when vertical oscillation

Abstract: The presented research is focused on a derivation of a mathematical model of a passenger wagon based on a dynamical model in a plane with three degrees of freedom. Vertical oscillation of a passenger wagon is calculated in two different software, namely *Matlab* and *Simpack*. It is considered that three degrees of freedom are defined as following: a vertical deflection of a front bogie frame, a vertical deflection of a rear bogie frame (in a running direction) and a vertical deflection of a wagon body. The *Lagrange's equations of the second kind method* is used for a derivation of the equations of motion, i.e. for a derivation of a mathematical model of wagon oscillation. Subsequently, the derived equations of motion are solved in the *Matlab* software as well as in the *Simpack* software. Both software apply calculation in a time domain. Evaluation of the results is focused on an investigation of ride comfort for passengers. This ride comfort is expressed by the N_{MV} index calculated in five points on a wagon body floor. These calculations come from the formulation defined in the corresponding standard. The results of the N_{MV} indices are presented in the bar graphs based on the numerical values of the N_{MV} indices.

Keywords: ride comfort, passenger wagon, dynamics, planar model, equations of motion.

ÚVOD

Osobné koľajové vozidlá, t. j. osobné vagóny musia spĺňať z hľadiska jazdných vlastností pomerne prísne kritériá. Konštruktéri koľajových vozidiel sa zameriavajú najmä na dve oblasti jazdných vlastností, a to na pohodlie jazdy a bezpečnosť jazdy. Dynamické vlastnosti osobných vagónov, pohodlie jazdy a bezpečnosť spolu úzko súvisia. Je to preto, že

časové závislosti dynamických výstupných veličín, akými sú zrýchlenia a dynamické sily cestujúci v osobných vagónoch počas jazdy citlivo vnímajú. Preto je posudzovaná dynamika koľajového vozidla zameraná na kmitanie koľajového vozidla. Vo všeobecnosti môže koľajové vozidlo kmitať (alebo sa pohybovať) v šiestich smeroch. Skúmanie týchto pohybov nie je jednoduché, najmä ak nie je k dispozícii špecializovaný výpočtový program.

Špecializovaný výpočtový program umožňuje zostaviť dynamický model a vykonať simulácie pre definované začiatočné podmienky. Takýto softvér dokonca často obsahuje preddefinované dynamické modely vagónov, lokomotív, električiek alebo celých vlakových súprav, čo šetrí čas a znižuje riziko nekorektného vytvorenia modelu. Najznámejšie výpočtové programy sú *Simpack*, *VI-Rail*, *Ansys Motion* a iné [1]. Na druhej strane vyššie obstarávacie náklady, ako aj náklady na údržbu a licencie programov môžu viesť k rozhodnutiu hľadať iný, lacnejší spôsob riešenia úloh. Jedným z možných spôsobov je neuvažovať všetky pohyby koľajového vozidla a jeho komponentov, ale len niektoré z nich, ktoré sú dominantné a dôležitejšie pre dynamickú odozvu koľajového vozidla. Pri jazde koľajového vozidla po trati dochádza v dôsledku nerovností koľaje k budeniu mechanického systému koľajového vozidla. Zvislé kmitanie je dôležité z pohľadu dynamiky koľajového vozidla [2-4].

Prezentovaný príspevok je zameraný na zostavenie rovinného dynamického modelu osobného vagóna pri jeho zvislom kmitaní a následné odvodenie matematického modelu osobného vagóna, ktorý by bolo možné riešiť v dostupnom programe *Matlab*. Výstupné veličiny sú porovnané s výsledkami získanými z výpočtového programu *Simpack*.

1 ODVODENIE MATEMATICKÉHO MODELU

Pre simulačné výpočty bol zvolený osobný vagón s dvoma podvozkami a štyrmi dvojkolesiami. Je vybavené systémom vypruženia s dvomi stupňami, dvomi stupňami vypruženia, a to primárnym a sekundárnym. Vedenie dvojkolesí má charakter kývačkového vedenia. Vo výpočtovom modeli osobného vozňa sú uvažované všetky telesá tuhé.

Pre účely výpočtov bol zvolený jeho rovinný model, ktorého dynamická schéma je zobrazená na obr. 1.

V prípade rovinného modelu je možné jednoduchším spôsobom odvodiť pohybové rovnice, t. j. matematický model.

V modeli sú uvažované tieto telesá: dvojkolesia, podvozky s hmotnosťou m_b [kg] a skriňa vozňa s hmotnosťou m_B [kg]. Dôležité parametre vozňa sú: L_B - vzdialenosť stredových čapov podvozkov [m], l_b - rázvor podvozkov [m], k_p - tuhosť primárneho pruženia [$N \cdot m^{-1}$], k_s - tuhosť sekundárneho pruženia [$N \cdot m^{-1}$], b_p - súčiniteľ tlmenia primárneho pruženia [$Ns \cdot m^{-1}$], b_s - súčiniteľ tlmenia sekundárneho pruženia [$Ns \cdot m^{-1}$]. Uvažovaný zjednodušený model zahŕňa lineárne charakteristiky jednotlivých prvkov vypruženia. Okrem toho sú prvky kontaktu koleso/koľajnica nahradené budiacimi silami, ktoré simulujú zvislé budenie vozidla.

Pri prvotnom priblížení uvažujeme tieto zovšeobecnené súradnice: zvislý pohyb rámov podvozkov z_{b1} a z_{b2} a zvislý pohyb skrine z_B .

Odvodíme pohybové rovnice kmitania vagóna s tromi stupňami voľnosti ($3^{\circ}V$). Na opísanie zvislého kmitania koľajového vozidla sú teda potrebné tri pohybové rovnice. Existuje niekoľko metód pre odvodenie matematického modelu [5]. Pohybové rovnice riešeného mechanického systému osobného koľajového vozidla sú v tomto prípade odvodené pomocou *Lagrangeových rovníc druhého druhu*:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} + \frac{\partial E_d}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial E_p}{\partial q_i} = F_i, \quad (1)$$

kde E_k - kinetická energia systému,

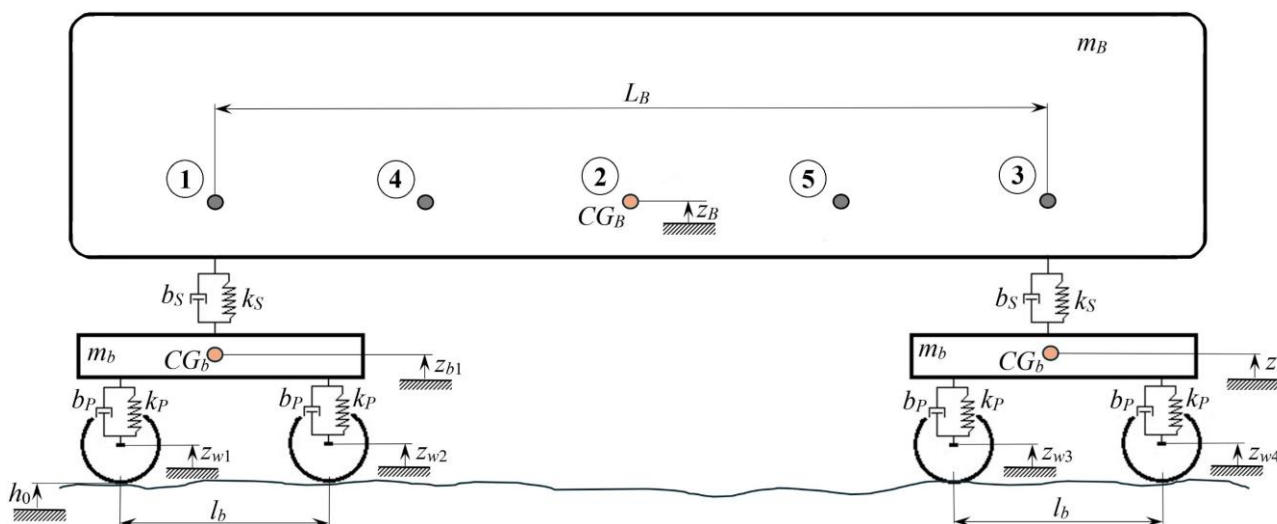
E_d - disipatívna energia systému,

E_p - potenciálna energia systému,

F_i - vonkajšie sily pôsobiace na sústavu,

q_i - zovšeobecnené súradnice.

Výsledné pohybové rovnice osobného vagóna pri uvažovanom kmitaní sú:



Obr. 1. Rovinný dynamický model osobného vagóna s $3^{\circ}V$

$$\begin{aligned}
& m_b \cdot z_{b1} + (b_s + 2 \cdot b_p) \cdot \dot{z}_{b1} - b_s \cdot \dot{z}_B + \\
& + (k_s + 2 \cdot k_p) \cdot z_{b1} - k_s \cdot z_B = b_p \cdot (\dot{h}_1 - \dot{h}_2) + \\
& + k_p \cdot (h_1 - h_2), \\
& m_b \cdot z_{b2} + (b_s + 2 \cdot b_p) \cdot \dot{z}_{b2} - b_s \cdot \dot{z}_B + \\
& + (k_s + 2 \cdot k_p) \cdot z_{b2} - k_s \cdot z_B = b_p \cdot (\dot{h}_3 - \dot{h}_4) + \\
& + k_p \cdot (h_3 - h_4), \\
& m_B \cdot z_B + b_s \cdot \dot{z}_{b1} - b_s \cdot \dot{z}_{b2} + 2 \cdot b_s \cdot \dot{z}_B + \\
& + k_s \cdot z_{b1} - k_s \cdot z_{b2} + 2 \cdot k_s \cdot z_B = 0,
\end{aligned} \quad (2)$$

resp. v maticovom tvare:

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} m_b & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 \\ 0 & 0 & m_B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{z}_{b1} \\ \ddot{z}_{b2} \\ \ddot{z}_B \end{bmatrix} + \\
& + \begin{bmatrix} b_s + 2 \cdot b_p & 0 & -b_s \\ 0 & b_s + 2 \cdot b_p & -b_s \\ -b_s & -b_s & 2 \cdot b_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{z}_{b1} \\ \dot{z}_{b2} \\ \dot{z}_B \end{bmatrix} + \\
& + \begin{bmatrix} k_s + 2 \cdot k_p & 0 & -k_s \\ 0 & k_s + 2 \cdot k_p & -k_s \\ -k_s & -k_s & 2 \cdot k_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_{b1} \\ z_{b2} \\ z_B \end{bmatrix} = \\
& = \begin{bmatrix} b_p \cdot (\dot{h}_1 - \dot{h}_2) + k_p \cdot (h_1 - h_2) \\ b_p \cdot (\dot{h}_3 - \dot{h}_4) + k_p \cdot (h_3 - h_4) \\ 0 \end{bmatrix},
\end{aligned} \quad (3)$$

kde h_1, h_2, h_3 a h_4 - výšky nerovností pod jednotlivými kolesami 1, 2, 3 a 4 [m],

$\dot{h}_1, \dot{h}_2, \dot{h}_3$ a \dot{h}_4 [m/s²] ich časové derivácie, t. j. rýchlosti. Ich hodnoty sa vypočítajú takto:

$$\begin{aligned}
h_1(t) &= h_0 \cdot e^{i \cdot \omega_t \cdot t}, & h_2(t) &= h_0 \cdot e^{i \cdot \omega_t \cdot \left(t - \frac{l_b}{v}\right)}, \\
h_3(t) &= h_0 \cdot e^{i \cdot \omega_t \cdot \left(t - \frac{L_B}{v}\right)}, & h_4(t) &= h_0 \cdot e^{i \cdot \omega_t \cdot \left[t - \left(\frac{L_B + l_b}{v}\right)\right]},
\end{aligned} \quad (4)$$

kde h_0 - amplitúda nerovnosti [m],

t - čas [s],

ω_t - uhlová budiaca frekvencia [rad/s] alebo [1/s],

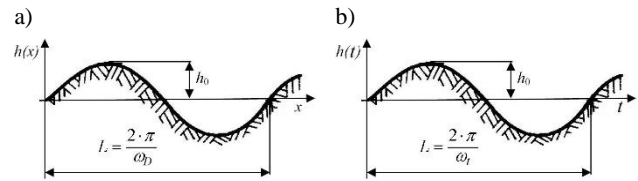
v - rýchlosť jazdy [m/s],

L_B, l_b - parametre vozidla [m] (obr. 1).

V reálnych aplikáciách je vozidlo buďené skutočnými nerovnosťami. Pre uvažovanie ich hodnôt vo výpočtoch by bolo potrebné najskôr tieto nerovnosti namerať, spracovať signály a vhodným spôsobom (najčastejšie formou vstupného súboru v požadovanom formáte) ich importovať do modelu [4]. Ďalšou možnosťou je uvažovať tzv. výkonovú spektrálnu hustotu nerovností, ktorá zohľadňuje štatisticky spracované hodnoty nerovností trate. Tento spôsob síce vernejšie zohľadňuje realitu v modeli,

avšak je náročný. Preto bol v riešenom prezentovanom prípade použitý zjednodušený prístup založený na budení mechanickej sústavy vagóna harmonickou funkciou. Takýto spôsob sa využíva v rôznych výskumných úlohách na určenie pohodlia jazdy vo vozidle, kritickej rýchlosti vozidla a pod. Pri definovaní harmonických nerovností je potrebné zadať dva údaje, a to vlnovú dĺžku nerovnosti a amplitúdu nerovnosti. Rozoznávajú sa tri rozdielne rozsahy vlnových dĺžok, a to $D_1 = (3 \text{ m}, 25 \text{ m})$, $D_2 = (25 \text{ m}, 70 \text{ m})$ a $D_3 = (70 \text{ m}, 200 \text{ m})$. Pre výpočty bola vybraná hodnota vlnovej dĺžky nerovnosti z intervalu D_2 . Amplitúdy nerovností dosahujú hodnoty do 11 mm. Do modelu boli vybrané dve hodnoty, a to 3 mm a 6 mm. Tieto hodnoty sú väčšie ako bežne reálne namerané, ale umožňujú lepšie ilustrovať ich vplyv na odozvu vozidla.

Do matematického modelu je teda potrebné predpísať nerovnosti pomocou harmonickej funkcie. Vyššie sú opísané dve skutočnosti, a to, že výpočty prebiehajú v časovej oblasti a že vlnová dĺžka nerovností je funkcia závislá od dráhy. Nerovnosti dráhy teda môžeme zapísať ako funkciu prejdenej dráhy (obr. 2a) a potom rozoznávame dráhovú frekvenciu ω_D [1·m⁻¹] alebo ako funkciu času (obr. 2b), potom rozoznávame uhlovú budiacu frekvenciu ω_t [1·s⁻¹].



Obr. 2. Porovnanie: a) dráhovej frekvencie a b) uhlovej budiacej frekvencie

Ich vzájomný vzťah je zřejmý z obr. 2a a obr. 2b. Nerovnosť v závislosti od času (obr. 2a) $h(t)$ a v závislosti od dráhy (obr. 2b) $h(x)$ je vyjadrená nasledovne:

$$h(t) = h_0 \cdot \sin(\omega_t \cdot t) = h_0 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t\right), \quad (5)$$

$$h(x) = h_0 \cdot \sin(\omega_D \cdot x) = h_0 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{D} \cdot x\right),$$

kde T - perióda [s],

x - prejdená dráha [m], pričom dráhová frekvencia je daná vzťahom:

$$\omega_D = \frac{2 \cdot \pi}{D}. \quad (6)$$

Keďže platí, že $\omega_t \cdot t = \omega_D \cdot x$ a tiež pre $v = \text{konšt.}$ platí, že $x = v \cdot t$, potom vzájomný vzťah medzi ω_D a ω_t je takýto:

$$\omega_t = \omega_D \cdot v = \frac{2 \cdot \pi}{D} \cdot v. \quad (7)$$

Ak porovnáme vzťahy (6) a (7), vidíme, že dráhová frekvencia nerovnosti nie je závislá od rýchlosti, ale uhlová budiaca frekvencia už od rýchlosti závislá je.

Do výpočtu sú teda definované uhlové budiace frekvencie pre jednotlivé rýchlosti jazdy osobného vagóna (v) a pre dráhovú frekvenciu (D). Pre výpočty boli zvolené rýchlosti jazdy $v = 60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Následne sa pri hodnotení dynamiky vozidla vychádza z hodnôt zrýchlení a ich vplyvu na pohodlie jazdy pre cestujúcich. Výsledky zo simulačných výpočtov sú uvedené v nasledujúcej kapitole príspevku.

2 VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV SIMULÁCIÍ

Ako je uvedené vyššie, výsledky simulačných výpočtov sú zamerané na vyhodnotenie zrýchlení. Tieto výstupy simulácií slúžia na vyhodnotenie úrovne pohodlia jazdy pre cestujúcich. Samotné vyhodnotenie pohodlia jazdy pre cestujúceho vyžaduje spracovať signál zrýchlení pomocou štatistických metód. Zjednodušene sa dá povedať, že tento proces je založený na rozdelení signálu zrýchlenia do 5-sekundových časových intervalov, následnom aplikovaní vážených funkcií a výpočte indexu jazdného pohodlia na podlahe vagóna N_{MV} podľa vzťahu [6]:

$$N_{MV} = 6 \cdot \sqrt{(a_{z-P95}^{W_d})^2}, \quad (8)$$

kde a_z - zrýchlenie v smere z [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$],

W_d - váhová funkcia,

$P95$ - 95-percentil distribučnej funkcie aplikovanej na signál zrýchlenia [6-11].

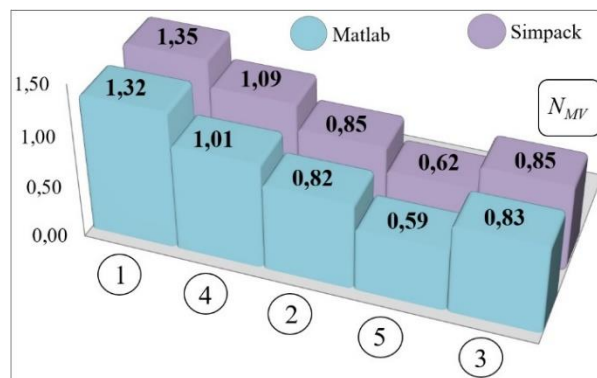
Ako je vidieť, v našom prípade sa pri výpočte pohodlia jazdy pre cestujúcich na podlahe vagóna berie do úvahy iba zrýchlenie vo zvislom smere (os z).

Tab. 1. Stupnica hodnotenia pohodlia jazdy N_{MV} [6]

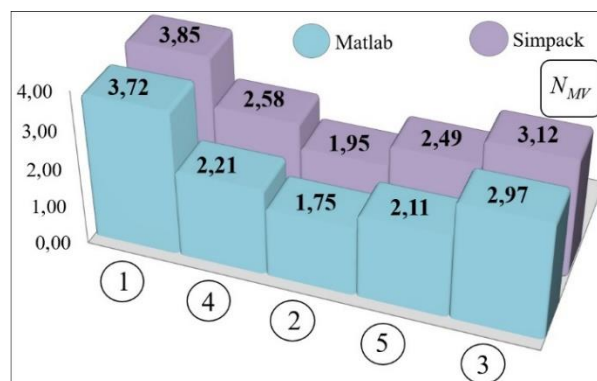
Úroveň pohodlia jazdy	Hodnota N_{MV}
veľmi pohodlné	$N_{MV} < 1,5$
pohodlné	$1,5 \leq N_{MV} < 2,5$
priemerne pohodlné	$2,5 \leq N_{MV} < 3,5$
nepohodlné	$3,5 \leq N_{MV} < 4,5$
veľmi nepohodlné	$N_{MV} \geq 4,5$

Získané výsledky simulačných výpočtov sú prezentované vo forme grafov (obr. 3 až obr. 6), ktoré znázorňujú pohodlie jazdy pre cestujúcich v jednotlivých bodoch 1 až 5 (obr. 1). Tieto grafy obsahujú výsledky pre program *Matlab* a aj pre program *Simpack*. Číselné hodnoty indexov N_{MV} vyjadrujú úroveň pohodlia jazdy. Vyššie čísla

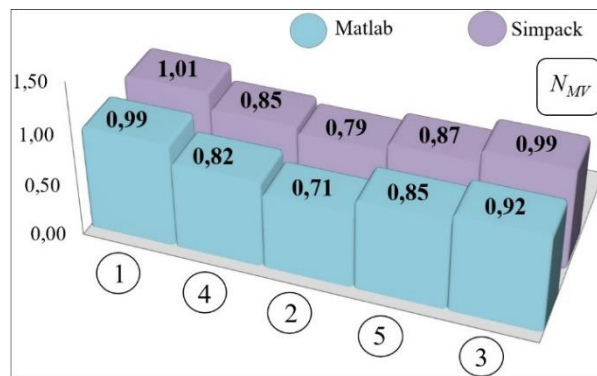
znamenajú nižšiu úroveň pohodlia jazdy pre cestujúcich (tab. 1).



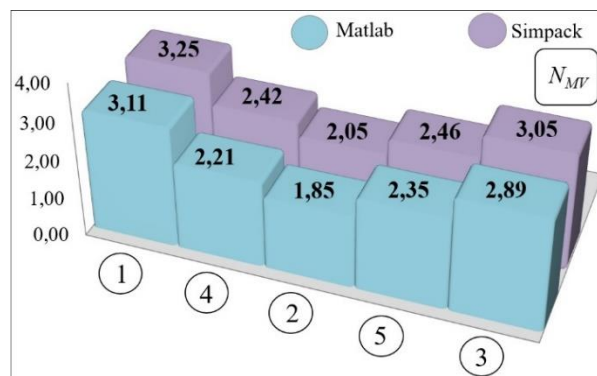
Obr. 3. Hodnotenie pohodlia jazdy, rýchlosť $v = 60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, výška nerovnosti $h = 3 \text{ mm}$



Obr. 4. Hodnotenie pohodlia jazdy, rýchlosť $v = 60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, výška nerovnosti $h = 6 \text{ mm}$



Obr. 5. Hodnotenie pohodlia jazdy, rýchlosť $v = 100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, výška nerovnosti $h = 3 \text{ mm}$



Obr. 6. Hodnotenie pohodlia jazdy, rýchlosť $v = 100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, výška nerovnosti $h = 6 \text{ mm}$

Vyhodnotenie získaných výsledkov vedie je nasledovné. Index pohodlia jazdy pri rýchlosti $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a amplitúdu nerovnosti 3 mm (obr. 3) dosahuje najväčšiu hodnotu v prednej časti vozidla, a to pre program *Simpack*, konkrétne 1,35. Podobne aj pre program *Matlab* vyšla najvyššia hodnota pohodlia jazdy pre cestujúcich v prednej časti, ale jej hodnota je v porovnaní so *Simpackom* menšia, je to 1,32. Ďalej sú na obr. 4 zobrazené výsledky tiež pre rýchlosť jazdy $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, ale pre výšku nerovností 6 mm. Tu je jasne vidieť, že dochádza k výraznému vybudeniu mechanickej sústavy vagóna, a teda aj k vyšším zrýchleniam v skrini. Hodnoty indexu pohodlia jazdy N_{MV} sú pre *Simpack* max. 3,85 v prednej časti a 3,72 pre *Matlab*, tiež v prednej časti. Zaujímavú situáciu je možné pozorovať pre rýchlosť $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (obr. 5 a obr. 6). Je možné si všimnúť, že napriek zvýšenej rýchlosti jazdy o $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ sú pre výšku nerovností s amplitúdou 3 mm hodnoty indexu pohodlia jazdy menšie ako pri rýchlosti $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, max. hodnota 1,01 v prednej časti vagóna. Pre 6 mm je maximálna hodnota 3,25 (*Simpack*), opäť v prednej časti, ale je stále menšia ako pri $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Dá sa usúdiť, že tieto nižšie hodnoty sú spôsobené naladením mechanickej sústavy vagóna (hmotnosti, súčinitele tuhostí a tlmenia) a budenie danými hodnotami je väčšie, pretože hodnota budiacej frekvencie je bližšie k vlastnej uhlovej frekvencii vagóna.

ZÁVER

Predkladaný výskum bol zameraný na skúmanie zvislého kmitania osobného koľajového vozidla. Tento výskum bol založený na zjednodušenom rovinnom modeli vozidla. Model vozidla bol opísaný pomocou pohybových rovníc a tieto rovnice boli odvodené pomocou *Lagrangeových rovníc druhého druhu*. Odvodený matematický model bol riešený v programe *Matlab* a *Simpack*. Tieto modely boli riešené v časovej oblasti pre definované podmienky, akými sú rýchlosť jazdy a výška amplitúdy nerovností trate. Ako výstupné veličiny boli zvolené zrýchlenia. Tieto zrýchlenia neboli hodnotené v jednoduchej forme, ale v spracovanej podobe so zameraním na výpočet indexov pohodlia jazdy N_{MV} . Vykonaný výskum ukázal, že obidva modely poskytujú veľmi podobné výsledky. To viedlo k záveru, že v prípade absencie drahšieho výpočtového programu je možné dosiahnuť uspokojivé výsledky aj na jednoduchšom modeli.

PodĎakovanie

„Táto práca vznikla vďaka podpore projektu VEGA 1/0308/14: Výskum dynamických vlastností mechanickej sústavy koľajových vozidiel s poddajnými komponentmi pri jazde v koľaji.“

„Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I03-03-V01-00131.“

LITERATÚRA

- [1] SAPIETOVA, A. - DEKYS, V. (2016): *Use of MSC.ADAMS software product in modelling vibration sources*. In: Communications - Scientific Letters of the University of Žilina, Vol. 18, No. 1a, pp. 101-107, ISSN 1335-4205.
- [2] LACK, T. - GERLICI, J. (2008): *Analysis of vehicles dynamic properties from: The point of view of passenger comfort*. In: Communications - Scientific Letters of the University of Žilina, Vol. 10, No. 3, pp. 10-18, ISSN 1335-4205.
- [3] GERLICI, J. - GORBUNOV, M. - NOZHENKO, O. - PISTEK, V. - KARA, S. - LACK, T. - KRAVCHENKO, K. (2017): *About creation of bogie of the freight car*. In: Communications - Scientific Letters of the University of Žilina, Vol. 19, No. 2, pp. 29-35, ISSN 1335-4205.
- [4] DIŽO, J. - BLATNICKÝ, M. - HARUŠINEC, J. - SUCHÁNEK, A. (2022): *Assessment of dynamics of a rail vehicle in terms of running properties while moving on a rail track model*. In: Symmetry, Vol. 14, No. 3, pp. 1-16, ISSN 2073-8994.
- [5] GORBUNOV, M. - GERLICI, J. - KARA, S. - NOZHENKO, O. - CHERNYAK, G. - KRAVCHENKO, K. - LACK, T. (2018): *New principle schemes of freight cars bogies*. In: Manufacturing Technology, Vol. 18, No. 2, pp. 233-238, ISSN 1213-2489.
- [6] EN 12299:2009 (2009): *Railway applications-ride comfort for passengers-measurements and evaluation*. Brussels: CEN.
- [7] DIŽO, J. - BLATNICKÝ, M. - STEIŠŪNAS, S. - SKOČILASOVÁ, B. (2017): *Assessment of a rail vehicle running with the damaged wheel on a ride comfort for passengers*. In: 22nd Slovak-Polish Scientific Conference on Machine Modelling and Simulations, MMS, September 5-8, Sklene Teplice, Slovak Republic, pp. 1-10. ISSN 2261-236X.
- [8] LOULOVÁ, M. - SUCHÁNEK, J. - HRUŠINEC, J. (2017): *Evaluation of the parameters affecting passenger riding comfort of a rail vehicle*. In: Manufacturing Technology, Vol. 17, No. 2, pp. 224-231, ISSN 1213-2489.
- [9] HAUSER, V. - NOZHENKO, O. - KRAVCHENKO, K. - LOULOVÁ, M. - GERLICI, J. - LACK, T. (2017): *Proposal of a mechanism for setting bogie wheelsets to radial position while riding along track curve*. In: Manufacturing Technology, Vol. 17, No. 2, pp. 186-192, ISSN 1213-2489.

Hodnotenie celistvosti zvaraných potrubných zostáv z plastu kombinovanou skúškou pevnosti a tesnosti

Radoslav Koňár, Ing., PhD.*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: radoslav.konar@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2799

Lucia Grünermelová, Ing.

TÚV SÚD Slovakia s.r.o.,
Matuškova 48, 976 31 Vlkanová.
E-mail: lucia.gruermelova@tuvsud.com, Tel.: +421 903 806 041

Miloš Mičian, doc. Ing., PhD.

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: milos.mician@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2768

Viliam Leždík, doc. Ing., PhD.

SPP - distribúcia, a.s.,
Závodská cesta 26, 010 22 Žilina.
E-mail: viliam.lezdik@spp-distribucia.sk, Tel.: +421 41 2424127

Evaluation of the integrity of welded plastic pipe assemblies by a strength and tightness combined test

Abstract: The welding of plastic pipes during the reconstruction and construction of new gas networks is often accompanied by non-compliance with technological discipline. One of the prominent problems in the verification of the quality of the work performed is connected with non-compliance with the technological discipline, namely the correct application of the strength and tightness test. Strength and tightness tests are often applied not according to a correctly approved testing methodology. These checks are often carried out inexpertly. This results in the identification of small gas leaks only when the leak checks are subsequently carried out in connection with additional interventions on the pipelines, such as repairs, installation of a branch, transshipment, reconstruction, etc. The leaks are located in the places of the original pipeline in the ground. However, most of the identified leaks arose during the implementation of the original gas pipeline networks, and not as an operational defect. These defects were not identified due to the incorrect application of the tightness test before the gas pipeline was put into operation.

Keywords: strenght test, tightness test, combined test, gas pipeline.

ÚVOD

Hodnotenie celistvosti potrubí je v súčasnosti veľmi aktuálnou témou. Pre hodnotenie celistvosti potrubných systémov ako celku, je v praxi používaná skúška pevnosti a skúška tesnosti. Požiadavky na jednotlivé skúšky sú jednoznačne zadefinované platnou legislatívou. Skúšky pevnosti a tesnosti môžu byť vykonávané postupne, alebo súčasne (kombinované). V článku sú popísané požiadavky na tieto skúšky pre plynovody z plastu s prevádzkovým tlakom do 10 kPa.

1 NORMATÍVNE POŽIADAVKY PRE PLYNOVODY S PREVÁDZKOVÝM TLAKOM DO 10 kPa

Definícia kombinovanej skúšky (angl. *combined test*) podľa *STN EN 12327* je skúšobná metóda, ktorou sa overuje splnenie požiadaviek na mechanickú pevnosť a tesnosť plynovodov, alebo plynových zariadení.

Základné podmienky skúšky podľa *STN EN 12327* pre pneumatické tlakové skúšky založené na meraní tlaku, alebo na meraní diferenčného tlaku sú:

- skúška sa musí vykonávať vzduchom alebo inertným plynom podľa technologického postupu,
- po dosiahnutí stanovenej hodnoty skúšobného tlaku sa skúšaný úsek musí odpojiť od zdroja tlaku,
- prvé odčítanie tlaku sa vykoná až po ustálení tlaku a teploty,
- tlak sa musí registrovať v priebehu skúšky, alebo zaznamenať na začiatku a na konci skúšky,
- splnenie požiadaviek na referenčnú nádobu pri metóde založenej na meraní diferenčného tlaku,
- počas skúšok sa zaznamenávajú hodnoty tlaku a teploty.

Základné podmienky skúšky podľa TPP 704 01 a v súlade s STN EN 1775 sú:

- skúška pevnosti sa musí vykonať tlakom väčším, alebo rovným 2,5-násobku najvyššieho prevádzkového tlaku, najmenej však 5 kPa. Maximálny prevádzkový tlak odberného plynového zariadenia stanoví projektová dokumentácia,
- pred skúškou pevnosti sa na ustálenie tlaku a vyrovnanie teplôt nechá skúšaný plynovod pod tlakom 15 min,
- Samotná skúška trvá:
 - 15 min. pre plynovody s vnútorným geometrickým objemom do 50 l,
 - 30 min. pre plynovody s vnútorným geometrickým objemom nad 50 l,
- po úspešnej skúške pevnosti sa vykoná skúška tesnosti skúšobným tlakom, ktorý sa rovná najmenej hodnote prevádzkového tlaku najviac však 15 kPa. Parametre pre skúšku tesnosti sú rovnaké, ako pre skúšku pevnosti.
- v prípade rovnakého skúšobného tlaku pre skúšku pevnosti a tesnosti, je možné tieto skúšky vykonať súčasne (kombinovaná skúška) za podmienok uvedených vyššie,
- ak nastane prípad, kedy je teplota okolia na začiatku a na konci tlakovej, alebo tesnostnej skúšky rôzna, je možné tlak prepočítať zmenu tlaku vplyvom teploty nasledovne:

$$p_2 = \frac{T_2}{T_1} \cdot (p_1 + p_{bar}) - p_{bar} \quad (1)$$

kde p_1 - tlak na začiatku skúšky [kPa],

p_2 - tlak na konci skúšky [kPa],

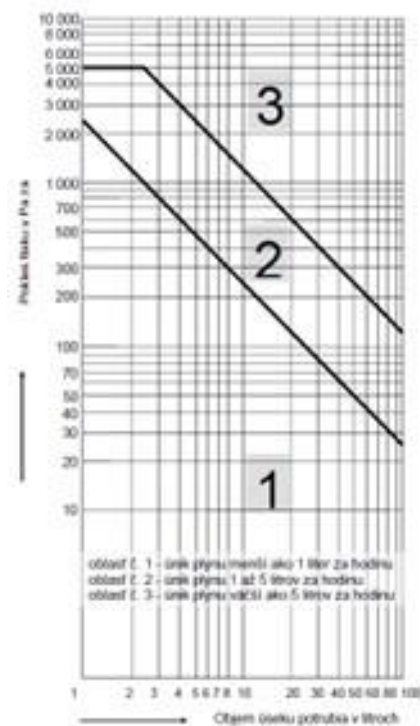
p_{bar} - barometrický tlak [kPa],

T_1 - termodynamická teplota okolia na začiatku skúšky [K],

T_2 - termodynamická teplota okolia na konci skúšky [K].

Plynovod je pevný a tesný, ak počas trvania skúšky nebol zistený žiaden pokles tlaku skúšobného média pri zohľadnení požiadavky na vhodnú citlivosť manometra (10 kPa) a presnosť merania (1 %) pre stanovený skúšobný tlak.

Pri identifikovanej netesnosti je dôležité zistenie množstva uniknutého plynu, ktoré je rozhodujúce na posúdenie celkovej prevádzkyschopnosti plynovodu. Hodnotenie prevádzkyschopnosti sa vykoná tak, že sa zistí pokles tlaku za 1 min. pri dodržaní rovnakých teplôt na začiatku a na konci skúšky. Pomocou vzorcov, alebo pomocou nomogramu (obr. 1) sa na základe daného geometrického objemu plynovodu určí stav tesnosti plynovodu.



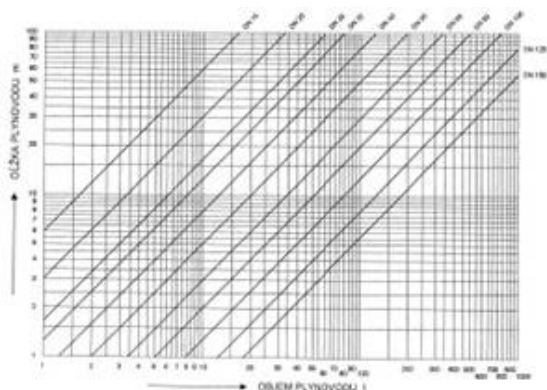
Obr. 1. Nomogram - stanovenie tesnosti potrubia

Tesnosť je možné určiť na základe porovnania poklesu tlaku Δp [$\text{Pa} \cdot \text{min}^{-1}$] s hodnotou vypočítanou na základe známeho objemu plynovodu nasledovne:

1. $\Delta p \leq 2400 \cdot V^{-1}$ - plynovod možno ďalej prevádzkovať (únik plynu je max. $1 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$),
2. $2400 \cdot V^{-1} \leq \Delta p \leq 12200 \cdot V^{-1}$ - do 30 dní sa musí vykonať oprava alebo utesnenie plynovodu (únik plynu je medzi $1 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ až $5 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$),
3. $\Delta p > 12200 \cdot V^{-1}$ plynovod je netesný a nie je schopný ďalšieho prevádzkovania (únik plynu je viac ako $5 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$),

kde Δp - je pokles tlaku [$\text{Pa} \cdot \text{min}^{-1}$],

V - geometrický objem príslušnej meranej časti plynovodu [l] - nomogram (obr. 2).

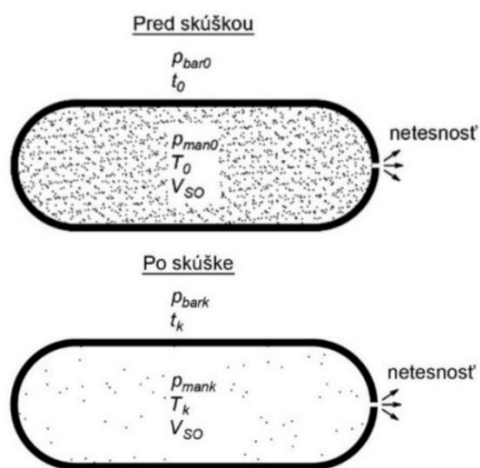


Obr. 2. Nomogram - stanovenie geometrického objemu plynovodu podľa dĺžky a svetlosti

Z konštant je možné spätne prepočítať dovolenú netesnosť q_n v štandardnej jednotke $\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, ktorá po prepočte pre konštantu 2400 je $q_n \leq 0,044 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, čo je únik max. $1 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$. Pre konštantu 12200 je hodnota $q_n \leq 0,2 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, čo je únik max. $5 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$.

Kombinovanú skúšku je vhodné doplniť pri všetkých ľahko prístupných a nezakrytých spojoch skúškou tesnosti nanesením penivého roztoku bublinkovou metódou podľa STN EN 1593, pričom minimálna hodnota netesnosti, ktorá sa dá detegovať pomocou tejto metódy je v súlade STN EN 1779 metóda C.2 je $q_n \leq 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

V prípade použitia referenčnej nádoby pri metóde založenej na meraní celkovej zmeny (poklesu) tlaku podľa STN EN 13184 je minimálny detegovaný únik stanovený podľa STN EN 1779 metóda D.1 na $q_n \leq 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 3. Parametre pre stanovenie netesnosti

Výpočtová metóda stanovenia netesnosti skúšaného objektu pre daný objem V_{so} je vyjadrená zmenou tlaku počas času skúšky. Upravený vzťah pre netesnosť je nasledovný:

$$q_n = \left[(p_{bar0} + p_{man0}) - (p_{bark} + p_{mank}) \right] \cdot \frac{V_{so}}{\left[\frac{T_0 + 273,15}{T_k + 273,15} \right] \cdot (t_k - t_0)} \quad (2)$$

kde p_{bar0} - barometrický tlak na začiatku merania [Pa],

p_{man0} - manometrický tlak na začiatku merania [Pa],

p_{bark} - barometrický tlak na konci merania [Pa],

p_{mank} - manometrický tlak na konci merania [Pa],

T_0 - teplota skúšobného plynu v nádobe na začiatku merania [°C],

T_k - teplota skúšobného plynu v nádobe na konci merania [°C],

V_{so} - objem skúšaného objektu [m^3],

t_0 - čas začiatku merania [s],

t_k - čas konca merania [s].

Výsledkom tlakovej skúšky a skúšky tesnosti je zápis. Zápis o tlakovej skúške a skúške tesnosti, musí obsahovať podľa STN EN 12327 a TPP 704 01, minimálne nasledujúce informácie:

- prevádzkovateľ plynovodu,
- meno osoby, ktorá vykonala skúšku,
- dátum skúšky,
- max. prevádzkový tlak systému,
- skúšobná metóda,
- hodnota skúšobného tlaku,
- skúšobné médium,
- trvanie skúšky,
- výsledok skúšky,
- certifikáty komponentov plynovodu ,
- dimenzia plynovodov, dĺžka plynovodov, geometrický objem plynovodov, počet osadených armatúr, použitý tlakomer.

2 VÝKON KOMBINOVANEJ SKÚŠKY PRI DODRŽANÍ LEGISLATÍVNEHO RÁMCA

V plynárenstve sa vykonávajú pevnostné a tesnostné skúšky za účelom preukázania pevnosti a tesnosti plynovodov a prípojok plynovodu podľa STN EN 12327 s hodnotami skúšobného tlaku vhodnými pre dimenziu potrubia, materiály, skúšaný objem a maximálny prevádzkový tlak.

Spôsob vykonania kombinovanej skúšky v súlade s legislatívou bude vysvetlený na zostave obr. 4. Zostava je vyrobená z materiálu PE100RC z potrubia DN100 (SDR17). Celková dĺžka zostavy je 1400 mm. Na zostave sú osadené dve odbočky, jedna typu DA DN50, ktorá je zredukovaná na DN25 pre pripojenie meracej zostavy, jej natlakovanie a pripojenie umelých netesností a druhá navrtavacia typu SA, ktorá je tvarovkou pri vysadzovaní odbočiek v praxi.



Obr. 4. Schéma experimentálnej zostavy pre výkon kombinovanej skúšky

2.1 Určenie objemu skúšaného objektu

Existuje viacero možností, ako stanoviť objem skúšaného objektu. Výber metódy stanovenia objemu závisí od veľkosti plynovodu, ako aj od dostupnej meracej techniky. Stanoviť objem plynovodu je možné podľa nasledovných metód:

- stanovenie objemu pomocou nomogramu na obr. 2 podľa dĺžky a svetlosti plynovodu,
- zmeranie objemu plynu pomocou prietokomeru na základe poklesu tlaku v potrubí a vypusteného objemu,
- výpočet objemu pomocou empirických vzorcov a geometrickej charakteristiky,
- určenie objemu statickou expanziou plynu, ktorá využíva referenčný objekt so známym objemom.

Referenčný objekt je prepojený cez ventil so skúšaným objektom, pričom všetky veličiny okrem objemu skúšaného objektu sú známe:

$$V_{SO} = V_Z \cdot \frac{\frac{P_Z}{T_Z} - \frac{P_E}{T_{ZE}}}{\frac{P_E}{T_{XE}} - \frac{P_X}{T_X}}, \quad (3)$$

kde V_{SO} - objem skúšaného objektu [m^3],

V_Z - objem referenčného objektu [m^3],

P_Z - absolútny tlak v referenčnom objekte pred prepojením [Pa],

T_Z - termodynamická teplota referenčnom objekte pred prepojením [K],

V_X - neznámy objem skúšaného objektu [m^3],

P_X - absolútny tlak v skúšanom objekte pred prepojením [Pa],

T_X - termodynamická teplota v skúšanom objekte pred prepojením [K],

P_E - absolútny tlak v oboch objektoch po prepojení [K],

T_{ZE} - teplota v referenčnom objekte po prepojení [K],

T_{XE} - teplota v skúšanom objekte po prepojení [K].

Objem bol v tomto prípade zmeraný pomocou statickej expanzie plynu a bol potvrdený výpočtom. Objem experimentálnej zostavy je $V_{SO} = 10,55 \text{ l}$.

2.2 Základné požiadavky na kombinovanú skúšku pevnosti a tesnosti

Skúšobné médium - skúška sa vykonáva zásadne vzduchom, alebo inertným plynom. Objekt sa tlakuje čistým a pokiaľ možno suchým plynom. Vstupná teplota plynu by mala byť podobná teplote vzduchu v skúšanom objekte z dôvodu skrátenia doby stabilizácie teploty.

Skúšobný tlak - odvíja sa od maximálneho prevádzkového tlaku odberného plynového zariadenia a je stanovený projektovou dokumentáciou. Skúška sa musí vykonávať podľa technologického postupu, kde minimálna hodnota skúšobného tlaku pri kombinovanej skúške je 5 kPa a max. 15 kPa. Skúšobný tlak kombinovanej skúšky bol v tomto prípade stanovený na 5 kPa.

Čas trvania skúšky - čas trvania skúšky určí projekt a je závislý od objemu skúšaného plynovodu a počtu rozoberateľných spojov na plynovode, trvá najmenej 30 min. pri objem plynovodu do 50 l a 45 min pri objeme na 50 l pričom zápisy sa vykonávajú v závislosti od použitej meracej techniky, min. raz za 1 min. Čas trvania kombinovanej skúšky bol v tomto prípade 30 min (15 min ustálenie + 15 min skúška).

Teplotná kompenzácia - vzhľadom k tomu, že zmeny teploty majú významný vplyv na celkový priebeh skúšky. Tento vplyv je veľakrát zanedbávaný. Preto je potrebné brať do úvahy aj kompenzáciu na zmenu teploty. Na tomto príklade sú využité možnosti digitálneho prístroja *SEITRON S500-3P*, ktorý umožňuje merať teplotu pomocou termočlánku typu *K* s presnosťou merania $0,1^\circ\text{C}$ termočlánok bol umiestnený v ochrannom púzdre vloženom do potrubia cez odbočku tak, aby sa teplota zaznamenávala vo vnútri zostavy. V prípade použitia vzorca z *TPP 704 01* pri zmene teploty o 1°C , by bola zmena tlaku 362,7 Pa, čiže ak neuvažujeme pri skúške tesnosti so zmenou teploty, môže to mať za následok nesprávne hodnotenie netesnosti.

Stanovenie citlivosti merania - zohľadnením požiadavky na vhodnú citlivosť manometra (10 Pa) a presnosť merania (1 %) pre stanovený skúšobný tlak, boli použité nasledovné meracie zariadenia:

- manometer *Prematlak* $0 \div 6 \text{ kPa}$ (výpočtom na základe triedy presnosti a informácií od výrobcu

manometra je presnosť merania manometra 95 Pa)

- digitálny prístroj *SEITRON S500-3P* (presnosť merania 10 Pa).

Stanovenie hodnoty dovolenej netesnosti - stanovená hodnota dovolenej netesnosti, ktorá je rozhodujúca na posúdenie celkovej prevádzkyschopnosti plynovodu podľa *TPP 704 01*, sa vykoná tak, že sa zistí pokles tlaku Δp [$\text{Pa} \cdot \text{min}^{-1}$] pri dodržaní rovnakých teplôt na začiatku a konci skúšky a objem plynovodu. Plynovod je možné považovať za tesný, ak je splnená podmienka $\Delta p \leq 2400 \cdot V^{-1}$. V tomto prípade je možné plynovod ďalej prevádzkovať, pričom únik pri splnení tejto podmienky je max. $1 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$. Táto hodnota musí byť stanovená v technologickom postupe skúšky, pričom by sa mal brať ohľad aj na všetky už vyššie spomínané skutočnosti a môže byť sprísnená.

Stanovenie tesnosti experimentálnej zostavy - v prvom kroku bola zostava skúšaná na tesnosť pri skúšobnom tlaku 5 kPa. Skúška trvala 30 min (15 min ustálenie a 15 min skúška tesnosti). Tlak bol meraný digitálnym tlakomerom *SEITRON S500-3P*, ktorého presnosť merania je 10 Pa. Tlakomer bol doplnený termočlánkom pre meranie teploty. Teplota bola meraná v strede skúšobného telesa, termočlánkom zasunutým do oceleového ochranného púzdra. Z nameraných údajov bola vypočítaná netesnosť zostavy. Netesnosť zostavy bola $q_n = 0,0001 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Na základe vypočítanej tesnosti je možné považovať zostavu za tesnú.

Overenie merania použitím umelo vytvorených netesností - overenie správnosti metodiky merania môžeme viacerými spôsobmi ako napr. aj pridaním umelo vytvorených chýb. V prvom prípade bola ako umelo vytvorená chyba použitá kapilára s rozmermi $\emptyset 0,3 \times 20 \text{ mm}$ umiestnená v zátke a zapojená do zostavy. Celkový poklesu tlaku pri konštantnej teplote z 5 kPa na 0 Pa bol dosiahnutý za 7 min, čo predstavuje hodnotu netesnosti $q_n = 0,12560 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. V druhom prípade bola použitá kapilára s rozmermi $\emptyset 0,13 \times 20 \text{ mm}$ umiestnená v zátke a zapojená do zostavy. Celkový poklesu tlaku pri konštantnej teplote z 5 kPa na 4,1 kPa bol dosiahnutý za 15 min, čo predstavuje hodnotu netesnosti výpočtovou metódou hmotnostným tokom únik $q_n = 0,01055 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Vypočítaná hodnota netesnosti je menšia ako dovolená netesnosť a preto by vyhovovala požiadavke stanovenej v *TPP 704 01*.

3 NÁSLEDNÉ SKÚŠKY TESNOSTÍ NANESENÍM PENIVÉHO ROZTOKU BUBLINKOVOU METÓDOU

Nevýhodou integrálnej metódy merania tesnosti pretlakom plynu je, že neidentifikuje presné miesto úniku, ale iba či je, alebo nie je únik prijateľný. Plynovodná zostava s nevyhovujúcou integrálnou

skúškou tesnosti pretlakom plynu sa musí v plynárenstve podrobiť skúškam pre lokalizáciu únikov vyhladávaním netesností pomocou stopovaciego plynu, alebo bublinkovou metódou. Lokalizačná metóda pomocou stopovaciego plynu pre tento účel využíva čuchacie prístroje, ktoré lokalizujú tzv. *merkaptan*. Po lokalizácii únikov a ich oprave sa pristúpi opätovne ku skúške podľa predpísaného postupu.

Druhou metódou je metóda bublinková pretlaková, kedy sa na natlakovaný plynovod aplikuje penotvorný roztok. Netesné miesta sú v tomto prípade lokalizované bublinami, vznikajúcimi unikajúcim médiom.

Na obr. 5 je príklad netesných elektrofúzných spojov na plynovode zistený pretlakovou bublinkovou metódou.



Obr. 5. Príklady netesných elektrofúzných spojov na plynovode [1]

Na základe predchádzajúcich experimentálnych skúsenosti možno konštatovať, že nestačí vykonávať kombinované skúšky pevnosti a tesnosti povrchne so záverečným stanoviskom, že zariadenie je pevné a tesné bez potrebného technického vybavenia (vhodné prístroje s dostatočnou presnosťou). Ide o meráciu zostavy pre meranie tlaku so zabezpečením merania teploty. Dôležitým parametrom je aj objem skúšanej zostavy, čo je základnou požiadavkou tejto skúšky. Záver takejto skúšky by mal byť, že je v súlade s požiadavkami *STN EN 12327* a *TPP 704 01*, ako aj schváleného technologického postupu skúšky.

ZÁVER

Kombinovaná skúška je spojením pevnostnej skúšky a skúšky tesnosti. Kombinovaná skúška slúži na overenie kvality montáže. Túto skúšku môžu vykonávať iba kvalifikované a certifikované osoby najmenej v 2. stupni pre metódu *LT* podľa *STN EN ISO 9712*. Z pohľadu pochopenia skúšky tesnosti pretlakom plynu by bolo vhodné, aby nielen osoby vykonávajúce skúšku, ale aj odborný pracovníci plynových zariadení mali možnosť zoznámiť sa a pochopiť metodiky a hodnotenia tesnosti na praktických príkladoch formou školenia v na to určených vzdelávacích organizáciách. Cieľom

školení by nemalo byť iba praktické školenie, ale tiež aj školenie ohľadom legislatívnych požiadaviek a výstupov zo skúšky. Tým by mal byť zápis zo skúšky (skúšobný protokol), ktorý musí spĺňať požiadavky vyplývajúce z legislatívy a zároveň dávať aj určitú ochranu, že metodika a následné použitie kombinovanej skúšky je nastavené odborne správne.

Pod'akovanie

Tento výskum bol podporený zo zdrojov APVV, číslo APVV-20-0427; KEGA, číslo KEGA 008ŽU-4/2022 a VEGA, číslo VEGA 1/0741/21 a VEGA 1/0044/22.

LITERATÚRA

- [1] LEŽDÍK, V. - KOŇÁR, R. - KOREŇOVÁ, N. (2020): *Opravy plynovodných potrubí vyko-návané technológiou zvarania*. Turany, Inštitút kvality a vzdelávania, spol. s.r.o., 2020, 166 s., ISBN 978-80969599-3-8.
- [2] KOPEC, B. (2008): *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno, CERM, 2008, ISBN 978-80-7204-591-4.

[3] VRZGULA, P. - FATURÍK, M., - MIČIAN, M. (2014): *New Inspection Technologies for Identification of Failure in the Materials and Welded Joints for Area of Gas Industry*. In: *Manufacturing technology*, 2014, 14(3), pp. 487-492. ISSN 1213-2489.

[4] YANG, J. et al. (2009): *Study on leak location technology for buried gas pipeline*. In: *International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*. IEEE, ISSN 2158-5695.

[5] GUI-XIN, Z. - SHUAI, M. (2024): *Leaking flow effect of a simply-supported pipe with a crack undergoing CF VIV*. In: *Ocean Engineering*, 303, 117775, ISSN 1873-5258.

[6] VRZGULA, P. (2017): *Metodika identifikačných a diagnostických technológií v plynárenstve so zameraním na skúšky tesnosti*. Dizertačná práca, č.: 28230120173001, Žilinská univerzita v Žiline.

[7] DEBNÁRIK, D. (2024): *Návrh a výroba skúšobnej zostavy určenej pre integrálnu skúšku tesnosti*. Diplomová práca, Žilinská univerzita v Žiline, 2024.

[8] Normy a špecifikácie z oblasti plynárenstva.

Intelligent warehouse systems

Vladimíra Biňasová, Ing., PhD., DiS.*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: vladimira.binasova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2727

Peter Bubeník, doc. Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: peter.bubenik@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2719

Miroslav Rakyta, doc. Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: miroslav.rakyta@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2737

Marta Kasajová, Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: marta.kasajova@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2707

Ján Zuzik, Ing.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: jan.zuzik@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2748

Abstract: Artificial intelligence can change the overall operation of a business and make work activities more efficient not only in terms of time but also economically. Individual enterprises are increasingly trying to incorporate artificial intelligence into production processes and the need to summarize knowledge about this trend is the main pillar of this paper.

Keywords: artificial intelligence, warehouse, intelligent warehouse.

INTRODUCTION

The *European Logistics Association* characterizes logistics as 'the organization, management and management and implementation of the flow of goods, from development and purchasing to production and distribution according to the final customer's order, so that all market requirements at minimum cost and minimum capital expenditure.

According to the *Council of Logistics Management*, logistics is "the process of planning, executing and managing the efficient, effective flow and storage of goods, services and related information from the point of origin to the point of consumption, the to satisfy customer requirements."

Kortschak defines logistics as "the science of coordinating active and passive elements of an

enterprise at a favorable time cost to improve its flexibility and adaptability to changing market conditions."

According to a survey by the *German Ifo Institute*, conducted in *August 2023*, uses only 13.3 % of the companies surveyed actively use *AI*. These are companies of different sectors and focuses, which shows that compared the logistics sector has a dominant and pioneering position. According to a 2024 analysis of research by *HERE Technologies*, the use of artificial intelligence in their companies, approximately 34 % of *U.S.* transportation and logistics companies. The study also revealed that *U.S.* companies are resistant to implementing artificial intelligence due to high costs (23 %), concerns about disrupting existing processes (12 %),

and problems associated with identifying suitable suppliers (11 %).

According to a 2020 survey on artificial intelligence in Slovakia conducted by *Slovak Centre for Artificial Intelligence Research*, the application of artificial intelligence in the transport and logistics sector up to 23 %.

1 TECHNOLOGIES OF INTELLIGENT WAREHOUSE SYSTEMS

Intelligent warehouse systems include several technologies using artificial intelligence for warehouse logistics. One of these is *NIMMSTA's* innovative industrial smart clock, which enables highly efficient picking, thanks to two-way interaction between the worker and the warehouse management system.

The watch allows product numbers to be entered directly via the display, for example during warehouse inventory, or to make corrections to inventory data during the picking process. The smartwatch also allows, with the help of built-in QR code readers, quickly scan and read information about a given product or package. Figure 1 shows *NIMMSTA's* industrial smartwatch [1, 2].



Fig. 1. Industrial smart watch [1]



Fig. 2. Amazon Robotics' GTP warehouse robots [4]

Warehouse robots are another AI technology that is a significant investment in improving the supply chain management of businesses. For example, retail giant *Amazon* owns its own brand of warehouse robots, *Amazon Robotics*. Today, *Amazon* has close to

200,000 robots in its warehouses across 26 distribution centers, where they assist workers in picking, sorting, shipping, and storing packages [3]. Figure 2 shows a warehouse robot from *Amazon Robotics*.

There are several types of warehouse robots:

- *Warehouse Drone* - warehouse drones are usually used for inventory management. They are equipped with barcode sensors that help in inventory management and inform warehouse workers when replenishment is needed,
- *Collaborative Robot (Co-bot)* - an industrial robot that can work safely alongside humans in a shared workspace. Helps reduce picking walking time and increase productivity,
- *Robotic Arm* - arms can be used for picking, loading empty boxes onto conveyor belts, or placing items into the sorting automated machine for outbound conveyor belts,
- *Autonomous Mobile Robots for Cargo Transportation* - these are used to put away goods, transporting pallets over long routes, placing empty pallets in their correct location,
- *Goods-to-Person Mobile Rack Transport Robot* Delivers products via mobile racking systems to workers' workstations.

2 EVALUATION OF THE POSSIBILITIES OF USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN LOGISTICS

The benefit of intelligent warehouse systems, mainly warehouse robots, is their high productivity and performing routine tasks at a consistent quality and speed. The use of intelligent warehouse systems increases safety in handling and the risk of damage to goods is also reduced. Also, these systems help in optimising warehouse space. They also have the advantage of being relatively quick to implement.

The disadvantages of smart warehouse systems include their high acquisition cost and difficult maintenance [6-8], for which personnel need to be trained. Specialised staff is also needed to operate the equipment. Another disadvantage is the fact that intelligent warehouse systems, but especially warehouse robots, cannot be used for other activity other than that for which they are programmed.

Shipping company *DHL*, in conjunction with *DRONAMICS*, the leading developers and operators of medium-haul cargo drones, are creating a network of short- and medium-haul transport drones. Figure 3 shows a delivery drone developed by *EHang* in cooperation with *DHL-Sinotrans*.

DHL-Sinotrans and *EHang* have launched their own network of transport drones in China, which is now fully operational. The *EHang* Falcon intelligent

drone, with eight propellers on four arms, is designed with multiple systems for full backup and intelligent and safe flight control modules. Among its high-performance features include vertical takeoff and landing, high-precision GPS and visual identification, intelligent flight path planning, fully automated flight, network connectivity and real-time planning time.



Fig. 3. DHL's EHang Falcon delivery drone [5]

As a fully automated and intelligent solution, the drones, which can carry up to 5 kg of cargo per flight, take off and land atop smart enclosures that have been specially developed for fully autonomous loading and unloading shipments. The smart cabinets can seamlessly interface with automated processes including sorting scanning and storage of express mail, they also contain more advanced features such as facial recognition and ID scanning [12-15].

CONCLUSIONS

Leading experts in the field of artificial intelligence are making predictions and it is expected that there will be wider implementation of AI in businesses of all sizes in the coming periods. These predictions are related to changing workforce dynamics, with greater automation impacting job creation and job destruction in equal measure. Increased use of robotics, autonomous vehicles and other AI-driven technologies is also expected.

The goal of artificial intelligence is to create programs and systems that can analyse data, learn from experience, solve problems, interact with people and even perform autonomous actions. Examples of AI applications include voice assistants, self-driving cars, disease diagnosis in medicine, product recommendations in e-commerce, data analysis in business processes and many others. Artificial intelligence [9-11] has a wide reach and has the potential to fundamentally impact many aspects of everyday life and a variety of industries, from technology and healthcare to transportation and manufacturing. It is an area of active research and innovation that is constantly

evolving and pushing the boundaries of what can be achieved in the field of computational intelligence.

Acknowledgements

This work was supported by project contract No. VEGA1/00524/22 and VEGA 1/0633/24.

REFERENCES

- [1] ANTONIUK, I. - SVITEK, R. - KRAJCOVIC, M. - FURMANNOVA, B. (2021). *Methodology of design and optimization of internal logistics in the concept of Industry 4.0*. In: Transportation Research Procedia, 55, 503-509.
- [2] BUCKOVA, M. - GASO, M. - PEKARCIKOVA, M. (2020): *Reverse logistic*. In: InvEnt 2020: Industrial engineering – Invention for enterprise - proceedings. Bielsko-Biala: Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humnistycznej.
- [3] BURGANOVA, N. - GRZNAR, P. - MOZOL, S. (2020): *Design of logistics system in production*. In: Technologie, procesy i systemy produkcyjne. Bielsko-Biala: Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Bialej, p. 11-18, ISBN 978-83-66249-56-1.
- [4] VAVRIK, V. - FUSKO, M. - BUČKOVÁ, M. - GASO, M. - FURMANNOVÁ, B. - STAFFENOVA, K. (2022): *Designing of machine backups in reconfigurable manufacturing systems*. In: Applied Sciences, Vol. 12, No. 5, p. 1-27, ISSN 2076-3417.
- [5] FILIPOVA, I. - DULINA, L. - BIGOSOVA, E. - PLINTA, D. (2021): *Modern Possibilities of Patient Transport Aids*. In: Transcom, Virtual conference 26 May - 28 May, Transportation Research Procedia, 55, pp. 510-517.
- [6] SUKALOVA, V. - STOFKOVA, Z. - STOFKOVA, J. (2022): *Human Resource Management in Sustainable Development*. In: Sustainability, Vol. 14, No. 21, 14258.
- [7] PATEL, R. (2024): *AI Route Optimization: Does it Really Make Delivery Operations Efficient?* Available on: <<https://www.upperinc.com/blog/ai-route-optimization/>>.
- [8] CHAMPION, A. (2024): *Demand Forecasting: Importance, Types, Methods, & How to Implement*. Available on: <<https://flow.space/blog/demand-forecasting/>>.
- [9] Jenkins, A. 2022. Demand Forecasting: Everything You Need to Know. Dostupné na internete: . JENKINS, A. 2024. What is Logistics? Importance, Benefits and Examples.
- [10] KHAN, M. (2023): *Revolutionizing Logistics and Transportation: The Impact of Autonomous Vehicles*. Available on:

<https://www.linkedin.com/pulse/revolutionizing-logistics-transportation-impact-vehicles-maaz-khan->

[11] KODYS (2023): *Picking and movement in the warehouse*. In: *Transport and Logistics: Monthly Magazine for Transport, Forwarding, Logistics and Wholesale* (in Slovak), Vol. 25, No. 2, pp. 50-51. ISSN 1338-3809.

[12] MIČIETA, B. (2005): *Distribution logistics* (in Slovak). University of Žilina, ISBN 80- 8070-432-5.

[13] RAKYTA, M. (2018): *Supply and distribution logistics* (in Slovak). University of Žilina: EDIS, p. 10-19, ISBN 978-80-554-1490-4.

[14] SYNOPSISYS (2024): *What is an Autonomous Car?* Available on:

<https://www.synopsys.com/glossary/what-is-autonomous-car.html>

[15] TABLEAU (2023): *What is the history of artificial intelligence (AI)?* Available on:

<https://www.tableau.com/data-insights/ai/history>.

[16] TRANSMETRICS (2023): *Logistics Demand Forecasting: The Benefits of AI & Applications*. Available on:

<https://www.transmetrics.ai/blog/logistics-demand-forecasting/>.

Blechschneiden unter Anwendung von Materialwärmung

Ján Moravec, doc. Ing., PhD.*

Abteilung für Technologisch Ingenieurwesen, Fakultät für Maschinenbau,
Žilinaer Universität,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slowakische Republik.
E-mail: jan.moravec@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2764

Sheet metal cutting with application of material heating

Abstract: In the paper, the theoretical part presents the issue of metal cutting. The experimental part deals with the investigation of the influence of temperature during the application of heating. The text of the paper is supplemented by a discussion and at the end of the paper there is an evaluation of the obtained results. The contribution appropriately and well complements a wide range of sheet metal cutting problems.

Keywords: sheet metal, samples, cutting.

EINLEITUNG

Das Schneiden ist eine spanlose Materialteilung, vor allem Blechteilung in benötigtem Maß, Form, Schnittqualität und natürlich in Anzahl der benötigten Teile. Beim Schneiden werden an Stelle der Deformation die Materialfäden unterbrochen und es kommt zur Abtrennung seiner Teile und zur Flächenvergrößerung um 100 %.

Der beschriebene Ablauf der Materialtrennung kommt am meisten vor im Bereich der spanlosen Formung und besitzt hier eine dominante Stellung.

1 THEORETISCHES TEIL

Kraft, die zur Materialtrennung im Prozess des Schneidens benötigt wird, ist direkt proportional der Schneidfläche, entlang der das Material getrennt wird und genauso der Materialfestigkeit im Schnitt τ_{ps} . Zum Ausrechnen der Schneidkraft F_S wird folgende Formel verwendet:

$$F_S = l \cdot s \cdot \tau_{ps} \cdot k = S \cdot \tau_{ps} \cdot k, \quad (1)$$

wobei l - Materiallänge in der Schnittplatte, bzw. Schnittumfang (mm),

s - Materialstärke [mm],

k - Koeffizient [1,2 bis 1,5],

τ_{ps} - Festigkeit im Schnitt [MPa],

S - Schneidfläche [mm²].

Die theoretische Größe F_S ausgerechnet erhöht sich auf Grund Reibung, Stumpfwerden der Schneide, Abweichungen der Materialstärke und anderen Ungleichmäßigkeiten, deswegen wurde in oben genannter Formel der Koeffizient k ergänzt, der die aufgeführten Fakten einbezieht. Allgemein bekannt

ist die deutliche Erhöhung der Scheidkraft beim dicken Schneiden, die auch durch eine verrostete oder anderes verschmutzte Oberfläche des Schneidmaterials beeinflusst wird.

Die Schneidetechnologie wird vor allem im kalten Zustand verwendet, also es wird keine Erwärmung verwendet. Das gilt für den Bereich der flächigen spanlosen Formung, also für die Blechverarbeitung. Im Falle des Schneidens und des Lochens bei Fertigstellung der Gesenkschmiedestücke handelt es sich um spanlose Formung mit Erwärmung. Im Hinblick auf die Schneidetechnologie ist es ein besonderer Fall aus dem Aspekt der Wärmeapplikation.

Die eigentliche Materialerwärmung muss genügend hoch sein, da der Stahl sollte nicht bei Temperaturen zwischen 100°C und 400°C bearbeitet werden, wenn der Stahl sich im Bereich der so genannten Blauglückblitze befindet.

Tab. 1. Die Stahlfestigkeit in der Schnittstelle in Abhängigkeit von der Temperatur

T [°C]	20	200	500	600	700	800	900
τ_{ps}	280-450	360	320	200	110	60	30
	350-550	450	450	240	130	90	60
	450-650	530	550	330	160	90	70
	520-750	600	580	380	190	90	70

Der Temperatureinfluss auf die Stahlfestigkeit ist in der Tabelle 1 ersichtlich. Die Daten in der Tabelle gelten für nicht gebrauchte (scharfe) tätige Teile des Schneidewerkzeugs.

Für Schneiden bei Wärme sind am besten Temperaturen im Bereich von 700°C ÷ 900°C.

2 EXPERIMENTALES TEIL

Für das experimentale Teil wurde das Blech mit Stärke 2 mm, STN 41 1375 verwendet. Die Zusammensetzung des Materials ist: C - max. 0,20 %, P - max. 0,050 %, S - max. 0,050 %.

Zum Schneiden wurden geschliffene Hebelschere verwendet. Die Anzahl der Muster beim Schneiden im kalten Zustand war 5 Stück, bei der Wärmeapplikation auch 5 Stück. Die Maße des Schnittmusters sind 50x50 mm.

2.1 Schneiden unter Wärmeanwendung

Die Muster wurden geschnitten bei der Temperatur um 700°C. Die Temperatur der Erwärmung betrug 710°C. Die Muster wurden im Ofen bei dieser Temperatur erwärmt, um sicher zu stellen, dass nach dem Rausholen aus dem Ofen ihre Temperatur 700°C beträgt. Die Temperatursenkung wurde in die Berechnung einbezogen.

Wenn im Anfangsmoment der Abkühlung des homogenes Körpers sich die Temperatur nach folgendem Gesetz verteilt: $\Theta_a = \Theta_a(x, y, z)$, kann man die Lösung in der Formreihe $\Theta(x, y, z, \tau) = \sum A_i \cdot \Theta_i(x, y, z) e^{-m_i \tau}$ darstellen. A_1, A_2, \dots, A_i sind Konstanten, die vom Anfangswärmezustand des Körpers abhängig und durch die Randbedingungen nach [2 s.184] bestimmt sind. Die Geschwindigkeit des regulären Kühlregimes für dünne Bretter nach der aufgeführten Quelle ist: $m_1 = a/(s/2)^2 B_i$ Das gilt für kleine Biot Nummer $B_i \ll 1$. Für große Biot Nummer $B_i \gg 1$ gilt: $m_1 = \pi^2/4 \cdot a/(s/2)^2$.

Im Hinblick auf den Charakter der Proben ist dieses als ausreichend zu bewerten. Auf dem Bild Nr. 2 sieht man der Zustand der Oberfläche nach dem Schneiden unter Wärmeanwendung.

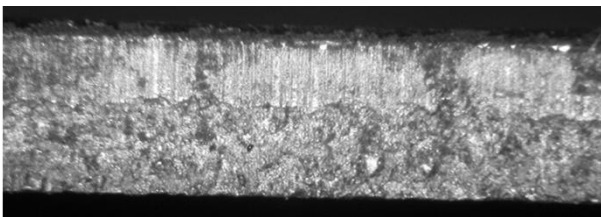


Bild 1. Oberfläche nach Schneiden unter Wärmeanwendung

3 DISKUSSION

Das Erhitzen des Metalls ist ein wichtiger Teil der Produktion, von dem der Erfolg anderer Vorgänge abhängt. Die allgemeinen Anforderungen an die Erwärmung bestehen darin, dass das Halbzeug möglichst gleichmäßig auf eine für die Umformung geeignete Temperatur erwärmt wird. Kornvergrößerung, innere Spannungen, Veränderungen der Metalloberfläche und Opalverlust

sollten auf ein Minimum beschränkt werden. Mit abnehmender Temperatur erhöht sich der Widerstand des Materials, was einen höheren Energiebedarf und weniger Abtrag bedeutet. Das Bestreben besteht darin, bei hoher Temperatur zu arbeiten, sofern nicht andere Gründe die Temperatur begrenzen. Für Stähle mit geringerem Kohlenstoffgehalt können Temperaturen bis 1250°C eingesetzt werden.

Die Induktionserwärmung erfüllt die wichtigen Anforderungen, die an die Erwärmung des Materials gestellt werden, d. h. J. perfekte Überhitzung des Materials, exakte Temperaturkontrolle, gleiche Aufheizzeit und bei teilweiser Erwärmung der Stabenden exakte Kontrolle der Heizlänge. Induktionserwärmung reduziert die Entkohlung und Oxidation des Materials.

Der Vorteil der Induktionserwärmung liegt in der Schnelligkeit, Betriebssicherheit, einfachen Bedienung und Wartung, verkürzten Aufheizzeit und Temperaturstabilität. Bei der Induktionserwärmung entsteht Wärme durch die Wirkung induzierter Wirbelströme direkt im erhitzten Objekt aufgrund seines ohmschen Widerstands.

Induzierte Wirbelströme durchdringen das erhitzte Material nicht gleichmäßig, die Intensität des Stroms nimmt zur Mitte des Materials hin gemäß einer Exponentialfunktion annähernd gemäß der Beziehung ab:

$$s = s_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}, \quad (2)$$

$$\alpha = 0,2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{f}{1000} \cdot \frac{\mu}{\delta}} = 0,2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{f \cdot \lambda \cdot \mu}{1000}}, \quad (3)$$

wobei s - Produktdichte [$A \cdot cm^{-2}$],

s_0 - Dichte des Produkts auf der Oberfläche des Objekts [$A \cdot cm^{-2}$],

f - Frequenz [Hz],

δ - spezifischer Widerstand des Materials [$\Omega \cdot mm^{-2}$], bei der gegebenen Temperatur,

μ - durchschnittliche Durchlässigkeit des Materials [$mm^2 \cdot m^{-1}$] bei der gegebenen Temperatur,

e - Basis des natürlichen Logarithmus = 2,7183,

λ - $1/\delta$, elektrische Leitfähigkeit [$m \cdot \Omega^{-1} \cdot mm^{-2}$],

x - Abstand von der Oberfläche des Materials zur Mitte [cm].

Aus der Gleichung folgt, dass hohe Frequenz, hohe Permeabilität und gute elektrische Leitfähigkeit dazu führen, dass die Eindringtiefe abnimmt. Wärme dringt durch Fluss, Strahlung und Leitung in das Material ein. Bis zu einer Temperatur von etwa 600°C herrscht Wärmeübertragung durch Strömung. Bei höheren Temperaturen dominiert die Wärmeübertragung

durch Strahlung (bis zu 95 %). Die übertragene Wärmemenge pro Zeiteinheit lässt sich aus der Gleichung ermitteln:

$$Q = c \cdot \left[\left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M}{100} \right)^4 \right] \cdot S_{ef} + \alpha \cdot (t_p - t_M) \cdot S_{ef}, \quad (4)$$

wobei c - Strahlungskoeffizient [$\text{cal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1}$],

α - Wärmeübergangskoeffizient

[$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{°C}$],

T_p, t_p - Ofentemperatur [K, °C],

T_M, t_M - Materialtemperatur [K, °C],

S_{ef} - wirksame Fläche des Materials [m^2].

In der Theorie der Erwärmung sprechen wir entweder von dünnen oder dicken Körpern. Bei dünnen Körpern mit $B_i < 0,25$ ist der Temperaturabfall beim Erhitzen gering und vernachlässigbar. Bei dicken Körpern $B_i > 0,5$ ist der Temperaturunterschied im Körper erheblich und verursacht thermische Spannungen, die bei den Berechnungen berücksichtigt werden müssen.

ABSCHLUSS

Artikel führt die erreichten Ergebnisse beim Blechschnitten unter bestimmten Wärmebedingungen und Wärmezustand des Körpers zusammen. Beim Recherchieren in der Fachliteratur wurde eine vergleichbare Zusammenfassung der Ergebnisse aus durchgeführten Experimenten nicht gefunden. Die Arbeit fügt sich passend in das breite Spektrum der Schnittenproblematik und der Schneidprozessen allgemein.

LITERATUR

- [1] MORAVEC, J. (2011): *Unkonventionelle Metallumformtechnologien*, EDIS - Verlag ŽU Žilina.
- [2] MORAVEC, J. (2000): *Schneiden von technischen Materialien*, EDIS- Verlag ŽU Žilina
- [3] MARCINIAK, Z. - DUNCAN, J. L. - HU, S. J. (2004): *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Butterworth-Heineman Jordan Hill, Oxford, 211 p., ISBN 0-7506-5600-0
- [4] MORAVEC, J. (2015): *Teória tvárnenia kovov*, EDIS vyd. UNIZA, ISBN 978-80-554-1095-1.
- [5] BOLJANOVIC, V. (2005): *Sheet Metal forming processes and die Design*. ISBN 0-8311-3182-9
- [6] *Metal Forming, Mechanics and Metallurgy*, Cambridge: Univ. Press. ISBN 978-1-107-00452-8
- [7] LANGE, K. (2004): *Lehrbuch der Umformtechnik*. Berlin: Springer- Verlag Berlin, 496 p. ISBN 978-35400-5197-8.
- [8] PEARCE, R. (2010): *Sheet Metal Forming*, ISBN 0-7503-0101-5.
- [9] MARCINIAK, Z. D. (2008): *Theory of Sheet metal forming*, Prague: Univ. Press. ISBN 978-1-107-00452-8.
- [10] MORAVEC, J. - KANTORIKOVA, E. (2022): *Heat treatment of parts of forming tools*. Zilina: Publishing house EDIS, 140 p. ISBN 978-80-554-1883-4
- [11] VATER, M. - LIENHART, A. (1982): *Bänder, Bleche, Rohre* 13, No.8.

The perspective of using Industry 4.0 in robotics

Vladimíra Biňasová, Ing., PhD., DiS.*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: vladimira.binasova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2727

Peter Bubeník, doc. Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: peter.bubenik@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2719

Miroslav Rakyta, doc. Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: miroslav.rakyta@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2737

Marta Kasajová, Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: marta.kasajova@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2707

Ján Zuzik, Ing.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: jan.zuzik@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2748

Abstract: The contribution focuses on the identification of new possibilities in the robotization of production and assembly processes. In the first section, theoretical knowledge from the given area is presented. The second section presents various trends in the field of artificial intelligence, autonomous technologies and the possibility of their use in the manufacturing industry. New technologies can help businesses with the implementation of individual technologies that can serve to improve production and assembly processes.

Keywords: Industry 4.0, robotization, new technologies.

INTRODUCTION

As a result of the constant transformation of the process, companies are forced to resort to adapting the industry in order to be able to continue competing in the market. Industry 4.0 differs from Industry 3.0 mainly by the development of new technologies used together with artificial intelligence (AI). Manufacturers are constantly integrating new technologies, including cloud computing and analytics, the Internet of Things (IoT), machine learning, and AI into manufacturing equipment. Smart industrial factories are equipped with a number of technologically advanced sensors, robotics and also built-in software that collects a lot

of data and then analyzes and evaluates it, enabling better decision-making [1-5]. Digital transformation in the industrial environment, including the intelligent connection of machines and processes through information and communication technologies, is changing the way manufacturers do business. The concept ensures immediate access to important data and an overview in real time, enabling faster and smarter decision-making in operations. All mentioned technologies lead to increasing efficiency, predictive maintenance, automation and, above all, improvement processes in industry. Its main objectives of Industry 4.0 are to make manufacturing and related industries faster,

more efficient, and more customer-centric while using automation and optimization to detect new business opportunities and models (Fig. 1).

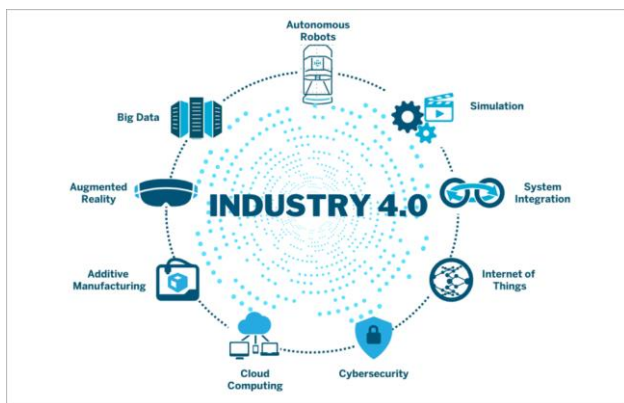


Fig. 1. Industry 4.0 refers to the fourth phase in the Industrial Revolution that focuses on interconnectivity, automation, machine learning and real-time data [5]

2 ROBOTIZATION

New surgeries in robotics are becoming more reliable and safer thanks to advances. Autonomous robots, humanoids, cloud robots, mobile robots, and pick-and-place robots represent the most influential robotics technology. The use of robotics will ensure greater endurance, accuracy and improve the capacity to quickly create personalized robots. Industry 4.0 raises questions about stability, openness and privacy. AI, cloud computing and data processing also increase the operability of industrial robotics. In order to secure the system against a cyber attack, the flow of data and the search for private information must be secured using robotic technology. One of the biggest advances in this area is software ethics and end-to-end protection, which covers privacy-enhancing technologies, smart encryption, and zero-trust security.

Figure 2 shows the directions of using robotics in Industry 4.0 in three different phases. Critical in-depth analysis is the process of analyzing data from different perspectives and summarizing it into useful information. Here, useful information is extracted from databases, from which supporting elements usable in Industry 4.0 are identified and subsequently serve for the overall improvement of processes.

Several main elements apply to robotics in Industry 4.0, including big data and networking. One of the basic pillars is connectivity. This means that the devices are connected and information is obtained from different sensor systems included in the control elements and they subsequently communicate with each other. The aim of the robots is to achieve zero downtime and optimal performance with the support of Industry 4.0. By using more sensors, you get less susceptibility to interference and thus reduce

unscheduled downtime, which is one of the most common sources of inefficient production

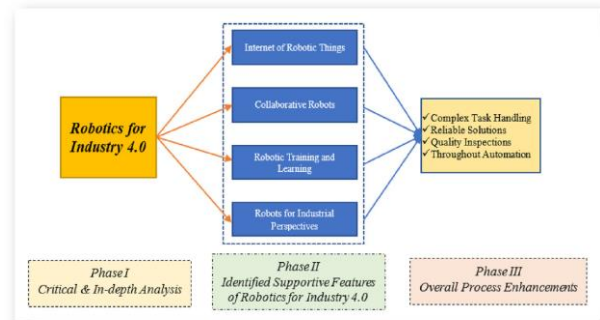


Fig. 2. Phases of robotics for Industry 4.0 [6]

3 PREDICTION OF THE USE OF ROBOTICS IN INDUSTRY

It is clear that the growing shortage of skilled labor in manufacturing firms trying to meet the demands of their customers, together with the uncertainty of time, problems in supply chains and rising energy costs due to the events of the past years, has led to more and more firms is beginning to consider the use of robotics to improve flexibility, resilience and sustainability in manufacturing [7].

Labor shortages are currently evident across all industries and are expected to persist for years to come. This shortage is the result of the aging of the population, but also the reluctance to accept jobs that are low-paid and therefore unattractive. By 2030, the number of vacant jobs is expected to increase to 85 million, which will not only slow down economic growth, but also force manufacturing companies to look for new strategies to solve this problem.

Demand for robotic technologies will be significant in countries where companies intend to relocate manufacturing operations to improve the resilience of their supply chain. The analysis carried out by *ABB Robotics* in 2022 among 1610 *American* and *European* companies shows that 74 % of *European* and 70 % of *American* companies plan to move production abroad. Of this number, 75 % of respondents in *Europe* and 62 % in the *US* indicated that they plan to invest in robotics and automation over the next three years.

Collaborative robots with higher payloads and advanced functions that enable safe collaboration with humans provide companies with new opportunities to use existing workforces more efficiently. Robots will also be gradually integrated into new industries such as gastronomy and healthcare, especially in laboratories and clinics. Currently at the *University of Texas Medical Branch (UTMB)* in the *USA*, where, thanks to the automation of the laboratory testing process, they have increased the number of tests performed per day from 15 to

1000. Due to the existing shortage of manpower, it is expected that robots will operate in similar workplaces in the coming years more and more operations [8-10].

4 ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND AUTONOMOUS TECHNOLOGIES

Currently, we observe a trend where more and more companies are investing in robotic solutions or looking for new ways of using them in various applications, it is crucial that the programming, operation and maintenance of robots are as simple as possible. Using the latest navigation technologies, a range of autonomous mobile robots can be significantly increased in speed, productivity and flexibility. Such innovative solutions help manufacturers move from traditional production lines to integrated, scalable and modular production cells while optimizing the handling of materials, parts and final products between different production sites [11].

Defective products often occur in production. One of the reasons is, for example, a missing or unidentifiable barcode, which results in downtime. In order to prevent the number of such cases, they try to implement various quality controls. The possibility of improvement is thanks to computer vision, where areas from AI are implemented, which trains computers to interpret and understand the visual world.

One solution is to place several cameras in strategic locations where people are usually placed to perform visual inspection. Using digital images from cameras and videos, it is possible to train computer vision models that allow analyzing scenes based on learned models. The cameras are programmed to accurately identify and classify objects. Subsequently, the device can consume each frame, perform analysis and generate output according to the learning model.

A schematic representation of the functioning of the inspection of pieces on the production line using AI is shown in Fig. 3.



Fig. 3. Manufacturing processes with dozens of applications dedicated to ERP system

Using these images and videos, the model can be trained to identify defects in real time within hours. The checks can be repeated at any time, and the data obtained can then be used to react to what the camera sees.

CONCLUSIONS

At the intersection of production and development, the *German* automaker *BMW* tests the concept of vehicles and their design using prototypes. However, the production of accurate prototypes is financially, but also time-consuming and often requires lengthy processes. Using virtual reality (VR) *Hololight Space* and augmented reality (AR) *HoloLens 2* from *Hololight*, real-life vehicle components such as bodywork and fenders are superimposed on true-scale holographic 3D CAD models. Within *Hololight Space*, engineers have the ability to visualize, manipulate and share 3D CAD data in a real-world environment. In the first step, the CAD files of the components from the online database are loaded directly into the VR *Hololight Space* application with a simple drag-and-drop. Using a head-mounted display such as *Microsoft's HoloLens 2*, intermediate results, possible variants or final concepts can be displayed in 3D.

Acknowledgements

This work was supported by project contract No. VEGA100524/22 and VEGA 1/0633/24.

REFERENCES

- [1] ANTONIUK, I. - SVITEK, R. - KRAJČOVIC, M. - FURMANNOVA, B. (2021). *Methodology of design and optimization of internal logistics in the concept of Industry 4.0*. In: *Transportation Research Procedia*, 55, 503-509.
- [2] BUCKOVA, M. - GASO, M. - PEKARCIKOVA, M. (2020): *Reverse logistic*. In: *InvEnt 2020: Industrial engineering – Invention for enterprise - proceedings*. Bielsko-Biala: Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej.
- [3] BURGANOVA, N. - GRZNAR, P. - MOZOL, S. (2020): *Design of logistics system in production*. In: *Technologie, procesy i systemy produkcyjne*. Bielsko-Biala: Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Bialej, p. 11-18, ISBN 978-83-66249-56-1.
- [4] VAVRIK, V. - FUSKO, M. - BUČKOVÁ, M. - GASO, M. - FURMANNOVÁ, B. - STAFFENOVA, K. (2022): *Designing of machine backups in reconfigurable manufacturing systems*. In: *Applied Sciences*, Vol. 12, No. 5, p. 1-27, ISSN 2076-3417.
- [5] FILIPOVA, I. - DULINA, L. - BIGOSOVA, E. - PLINTA, D. (2021): *Modern Possibilities of Patient Transport Aids*. In: *Transcom, Virtual conference 26 May - 28 May*, *Transportation Research Procedia*, 55, pp. 510-517.
- [6] SUKALOVA, V. - STOFKOVA, Z. - STOFKOVA, J. (2022): *Human Resource*

Management in Sustainable Development. In: Sustainability, Vol. 14, No. 21, 14258.

[7] PATEL, R. (2024): *AI Route Optimization: Does it Really Make Delivery Operations Efficient?* Available on: <<https://www.upperinc.com/blog/ai-route-optimization/>>.

[8] CHAMPION, A. (2024): *Demand Forecasting: Importance, Types, Methods, & How to Implement*. Available on: <<https://flow.space/blog/demand-forecasting/>>.

[9] MALEK, M. (2021): *Substantial capabilities of robotics in enhancing industry 4.0 implementation*.

In: Cognitive Robotics. Vol. 1, No.2, p. 58, ISSN 2667-2413.

[10] PARTEARROYO, M. et al. (2023): *Towards Industry 4.0: impact on production strategies* In. Procedia computer science, Vol. 219, p. 563-570, ISSN 1877-0509.

[11] PIXELPLEX (2024): *What Is the Industrial Metaverse and What Benefits and Opportunities Does It Hold?* [online]. [cit. 2024-19-1]. Available on: <https://pixelplex.io/blog/industrial-metaverse-guide/>

Magazin TECHNOLOG

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

Das Magazin TECHNOLOG publiziert Beiträge in folgenden Sprachen: Slowakisch, Tschechisch, Polnisch, Russisch, Englisch und Deutsch.

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

Evidenznummer MK SR-2800/08.

ISSN 1337-8996

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

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

Fax: +421 (0) 41-513 1535

Email: jan.moravec@fstroj.uniza.sk

Журнал ТЕХНОЛОГ

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

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

Регистрационный номер MK SR 2800 - /08.

ISSN 1337 – 8996

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

Telefón: 041-513 2764, 513 2814

Fax: 041-513 1535

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

ISSN 1337-8996

DOI: <https://doi.org/10.26552/tech.J.2024.3>