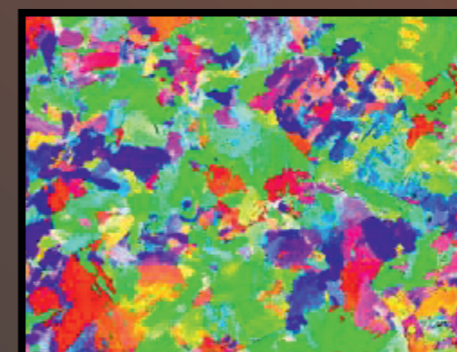
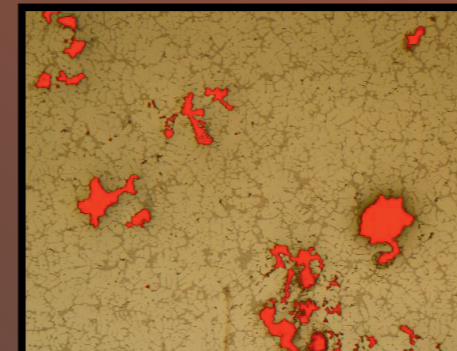
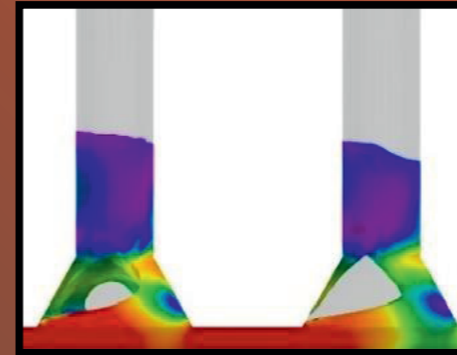




ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

TECHNOLÓG



ISSN 1337-8996

Ročník 14
máj 2022

2/2022

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

ISSN 1337-8996

Adresa redakcie:

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

Telefón: 041-513 2764

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

Vydáva Žilinská univerzita v Žiline v EDIS-vydavateľstve UNIZA

Univerzitná HB, 010 26 Žilina, IČO 00 397 563

šéfredaktor - editor in chief:

výkonný redaktor - executive editor:

redaktor - redactor:

vedecký redaktor - scientific editor:

doc. Ing. Ján MORAVEC, PhD.

doc. Ing. Ján Dižo, PhD.

Ing. Elena Kantoriková, PhD.

prof. Ing. Jozef PILC, CSc.

redakčná rada - editorial board:

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

prof. Ing. Pavol ŠVEC, CSc. (SK)

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

doc. Ing. Alexander SCHREK, PhD. (SK)

doc. Ing. Jozef BÍLIK, PhD. (SK)

doc. Dr. - Inż. Janusz MUSIAL (PL)

Dipl. Ing. Eva REGER (D)

doc. Ing. Ľudmila DULEBOVÁ, PhD. (SK)

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

doc. Ing. Ján DIŽO, PhD. (SK)

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

doc. Ing. Ján MORAVEC, PhD. (SK)

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

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

prof. Ing. Eva TILLOVÁ, PhD. (SK)

prof. Ing. Peter DEMEČ, CSc. (SK)

prof. Ing. Jan SUCHÁNEK, CSc. (CZ)

prof. Dr. Ing. Milan SÁGA (SK)

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

prof. Dr. Ing. Miroslav NESLUŠAN (SK)

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

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

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

Magazin TECHNOLOG

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

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

Evidenznummer MK SR-2800/08.

ISSN 1337-8996

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

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

Fax: +421 (0) 41-513 1535

Email: jan.moravec@fstroj.uniza.sk

Журнал ТЕХНОЛОГ

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

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

Регистрационный номер MK SR 2800 - /08.

ISSN 1337 - 8996

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

Телефон: 041-513 2764, 513 2814

Факс: 041-513 1535

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

OBSAH	
VEDECKÝ VÝBOR	5
ZOZNAM RECENZENTOV	5
EDITORIÁL	6
DIONÝZ ŠTÚR	7
KOVÁČSKE NÁRADIE V PREMENÁCH ČASU	9
STAV POVRCHU PO DYNAMICKOM GULÔČKOVANÍ AUSTENITICKEJ OCELE AISi 304	21
<i>Anna Mičietová, Peter Minárik, Mária Čilliková, Miroslav Neslušán, Jiří Čapek</i>	
KONŠTRUKČNÁ OPTIMALIZÁCIA TVARU TELIES OZUBENÝCH KOLIES POMOCOU 3D KONŠTRUKČNÝCH PROGRAMOV	25
<i>Samuel Sivák, Silvia Maláková, Daniela Harachová</i>	
OPTIMALIZÁCIA PROCESU ŤAHANIA GUMOU S VYUŽITÍM NUMERICKEJ SIMULÁCIE	31
<i>Julij Martyn Kulya, Miroslav Tomáš, Emil Evin</i>	
BORIDATION OF SINTERED CARBIDES AND Cr-Mo-V STEEL	35
<i>Elena Kantoriková, Ján Moravec</i>	
VPLYV TYPU FILTRAČNÉHO MÉDIA NA KVALITU ODLIATKOV Z AI ZLIATIN	41
<i>Marek Galčík, Marek Brůna</i>	
ŠTÚDIUM VPLYVU ZR NA VLASTNOSTI ZLIATINY AISi5Cu2Mg URČENEJ PRE VÝROBU HLÁV VALCOV	45
<i>Lukáš Šíranec, Dana Bolibruchová</i>	
ROZMEROVÁ A GEOMETRICKÁ ANALÝZA SÚČIASTOK PODĽA VŠEOBECNEJ ŠPECIFIKÁCIE (GPS)	51
<i>Jozef Bronček, Mário Drbůl, Viera Konstantová, Lukáš Kožienka</i>	
MOŽNOSTI SKÚŠANIA MATERIÁLOV MAGNETICKOU PRÁŠKOVOU METÓDOU	57
<i>Radoslav Koňár, Jozef Šutka</i>	
PREHEAD HISTORICKÉHO VÝVOJA A ANALÝZA SÚČASNÉHO STAVU DOPRAVNEJ A MANIPULAČNEJ TECHNIKY V ZÁBAVNOM PRIEMYSLE	61
<i>Miroslav Blatnický, Ján Dižo, Denis Molnár</i>	
BENCHMARKING AKO NÁSTROJ PRE HODNOTENIE UPLATNENIA POKROČILEJ TECHNOLOGIE RIADENIA VÝROBNÉHO PROCESU	65
<i>Peter Bubeník, Olha Kolesnyk, Miroslav Rakyta, Juraj Čapek</i>	
STANOVENIE KINETIKY RASTU AUSTENITICKÉHO ZRNA OCELE S960MC	70
<i>Martin Frátrik, Miloš Mičian, Libor Trško</i>	

ŽIAROBETÓNY PRE ZLIEVARENSKÝ PRIEMYSEL Z PRODUKCIE RMS KOŠICE s.r.o.	76
<i>Rastislav Hirjak, Viera Mišaneková, Dáša Chudíková, Radomír Šimko, Martin Piroško, Matúš Jaremko, Radoslav Uhrík</i>	
KONŠTRUKČNÉ CELKY POUŽÍVANÉ V STAVBE DOPRAVNEJ A MANIPULAČNEJ TECHNIKY V ZÁBAVNOM PRIEMYSLE	83
<i>Miroslav Blatnický, Ján Dižo, Denis Molnár</i>	
CUTTING OF CYLINDRICAL SEMI-FINISHED PRODUCTS OF ROLLING ELEMENTS	87
<i>Ján Moravec, Borislav Melo</i>	
ZVYŠKOVÉ NAPÄTIA PO ZVÁRANÍ OCELE S960MC	91
<i>Miloslav Málek, Miloš Mičian</i>	
OPTIMALIZÁCIA PARAMETROV ELEKTROISKROVÉHO TEXTÚROVANIA DOKONČOVACÍCH VALCOV VALCOVACEJ STOLICE OCEEOVÝCH PLECHOV POMOCOU PLÁNOVANÉHO EXPERIMENTU	95
<i>Emil Evin, Miroslav Tomáš</i>	
HYDRODYNAMICKÉ PODMIENKY PRÚDENIA SKLOVINY	101
<i>Ján Moravec</i>	
STAVIVÁ PRE TRVALÚ VÝMUROVKU LIACICH A NALIEVACÍCH PANIEV	105
<i>Ján Derďák, Dáša Chudíková, Radomír Šimko, Viera Mišaneková, Rastislav Hirjak, Eduard Sikora, Martin Piroško, Marcel Baba, Miroslav Kotora, Rastislav Kamenský</i>	
ADITÍVNE TECHNOLOGIE A ICH APLIKÁCIA V AUTOMOBILOVEJ VÝROBE	112
<i>Jozef Šutka, Radoslav Koňár</i>	
APLIKÁCIA VYBRANÝCH ŠTATISTICKÝCH METÓD PRI LASEROVOM REZANÍ OCELE	116
<i>Ivana Pobočíková, Vladimír Guldan</i>	
NUMERICKÝ VÝPOČET PARAMETROV ZJEDNODUŠENÉHO MATEMATICKÉHO MODELU SKÚŠOBNÉHO PRÚDOVÉHO A NAPÄŤOVÉHO IMPULZU	120
<i>Zuzana Sedliačková, Radoslav Chupáč</i>	
INFLUENCE OF FILTRATION ON THE DEFORMATION RESISTANCE OF ALUMINIUM ALLOY	123
<i>Ján Moravec, Elena Kantoriková</i>	
ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ КАК ФАКТОР БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ	127
<i>Александр Петрович Кравченко, Екатерина Александровна Кравченко, Ян Янович Дижо, Мирослав Янович Блатницкий</i>	

Vedecký výbor

prof. Ing. **Danka BOLIBRUCHOVÁ**, PhD. - predseda
doc. Ing. **Ján MORAVEC**, PhD.- výkonný predseda
prof. Dr. Ing. **Milan SÁGA**
prof. RNDr. **Peter BURY**, CSc.
prof. Ing. **Emil EVIN**, CSc.
prof. Ing. **Peter DEMEČ**, CSc.
prof. Dr. Ing. **Miroslav NESLUŠAN**
prof. Ing. **Georgij KODZASPIROV**, DrSc.
doc. Ing. **Richard PASTIRČÁK**, PhD.
doc. Ing. **Karel GRYC**, PhD.
doc. Ing. **Ladislav SOCHA**, PhD.
prof. Ing. **Viktor TITTEL**, CSc.
prof. Ing. **Ivo SCHINDLER**, CSc.
prof. Ing. **Pavol ŠVEC**, PhD.
doc. Ing. **Jozef BÍLIK**, PhD.
doc. Ing. **Alexander SCHREK**, PhD.

Zoznam recenzentov príspevkov

Ing. **Zdenka BOHUŠOVÁ**, PhD.
prof. Ing. **Danka BOLIBRUCHOVÁ**, PhD.
doc. Ing. **Miroslav BLATNICKÝ**, PhD.
prof. Ing. **Mária ČILLIKOVÁ**, PhD.
doc. Ing. **Ján DIŽO**, PhD.
doc. Ing. **Karel GRYC**, PhD.
doc. Ing. **Alexander SCHREK**, PhD.
Ing. **Radoslav KOŇÁR**, PhD.
prof. Ing. **Anna MIČIETOVÁ**, PhD.
Ing. **Borislav MELO**, PhD.
doc. Ing. **Ján MORAVEC**, PhD.
doc. Ing. **Richard PASTIRČÁK**, PhD.
prof. Ing. **Jozef PILC**, CSc.
prof. Ing. **Alžbeta SAPIETOVÁ**, PhD.

EDITORIÁL

Motto: “ *Spoločnosť kníh si možno zvoliť lepšie než spoločnosť ľudí. Tým skôr si medzi knihami vyberaj priateľa na celý život.* “

L. A. Seneca

V čísle 2/2022 vedeckého časopisu *Technológ* sú publikované pôvodné vedecké a odborné príspevky od autorov zo širokého spektra vedy a výskumu. Zverejnené články boli recenzované anonymne dvomi recenzentmi uvedenými v zozname recenzentov.

Zoradenie jednotlivých častí je urobené tak, ako sa ustálilo v minulosti. V úvode sa pozornosť venuje životu a vedeckému odkazu *Dionýza Štúra*, významného slovenského geológa, ba možno povedať, že otca slovenskej geologickej vedy svetového významu. Ako historický príspevok je zaradený článok s názvom *Kováčske náradie v premenách času*. Nasledujú príspevky zo sféry strojárskych technológií.

Prezentovaná je široká oblasť zaujímavých problémov, ktorých riešenia a závery sú zosumarizované v texte jednotlivých príspevkov a tieto predstavujú solídnu bázu poznatkov a zistení, na ktorých sa dá stavať ďalšie a hlbšie poznanie riešenej problematiky. V tomto roku sa redakcii podarilo získať pre celý vedecký časopis príslušné DOI číslo, takže s jeho pomocou si každý záujemca nájde potrebné odkazy a príspevky.

Ján Moravec
šéfredaktor a editor



Dionýz Štúr

Dionýz Štúr (* 2. apríl 1827, *Beckov* – † 9. október 1893, *Viedeň*) bol slovenský geológ a paleontológ, riaditeľ *Ríšskeho geologického ústavu vo Viedni*. Zaoberal sa geologickým mapovaním a fytopaleontológiou *Rakúska, Čiech, Moravy* a samozrejme *Slovenska*.

Narodil sa v *Beckove* v učiteľskej rodine *Jozefa Štúra* a *Jany (Johanky)* rodenej *Riznerovej*. Pokrstený bol ako *Dionysus Rudolphus Josephus*. Jeho otec *Jozef* pochádzal z *trenčianskej* rodiny *Štúrovcov*, bol synom *Jána Štúra*. *Dionýzov* otec *Jozef Štúr* bol bratranec *Samuela Štúra*. *Dionýz* a *Ludovít Štúr* boli teda bratrance v druhom stupni príbuzenstva. *Dionýz* mal viacerých starších súrodencov: z ktorých *Ludovít Jozef* a *Karol* (zomreli v novorodeneckom veku), *Karolína* (zomrela bezdetná v roku 1848).

Na strednú školu chodil v *Modre*, kam sa v 12 rokoch presťahoval s rodičmi a sestrou. Študoval aj na evanjelickom lýceu v *Bratislave*. V roku 1844 začal navštevovať viedenskú polytechniku, kde študoval matematiku, fyziku a chémiu. Neskôr, ovplyvnený prof. *Viliamom Haidingerom* sa začal zaujímať o prírodné vedy.

ODBORNÁ ČINNOSŤ

V roku 1846 nastúpil do múzea *Dvornej komory pre mincovníctvo a baníctvo*. V roku 1847 získal na základe svojej predošlej vedeckej činnosti štipendium a začal študovať na *Banskej akadémii v Štiavnicí*. V tomto období uverejnil svoju prvú vedeckú prácu o geológii okolia *Bratislavy* a *Modry*. Po absolvovaní akadémie sa vrátil naspäť do *Viedne*.

V roku 1849 bol založený *Ríšsky geologický ústav*, kde nastúpil v roku 1850. Hlavnou úlohou ústavu bolo prehľadné geologické mapovanie celej monarchie, na čom sa takmer 20 rokov podieľal aj *Dionýz Štúr*. Neskôr obrátil svoju pozornosť hlavne na fytopaleontológiu, v rámci ktorej dosiahol vysokú odbornosť najmä ako systematik a morfológ. V roku 1877 sa stal *Štúr* zástupcom riaditeľa *Ríšskeho geologického ústavu*. Po ôsmich rokoch, v roku 1855 sa stal i jeho riaditeľom. Túto funkciu zastával až do roku 1892. Publikoval okolo 300 vedeckých prác. Presadzoval teóriu o premenlivosti druhov, už pred vydaním *Darwinovho* diela. Viedol korešpondenciu s viacerými významnými vedcami svojej doby, ako bol *Murchison*, *Lyell*, *Darwin*, či *Purkyně* alebo *Palacký*. Zaujímal sa o problémy *Slovákov*, bol signatárom *Memoranda slovenského národa*, podieľal sa na zakladaní *Matice slovenskej* i gymnázií. Publikoval na *Slovensku*, odborné práce najmä vo *Viedni*. Písal aj pod pseudonymami *Diviš Štúr* a *Škorpion*.

Dionýz Štúr ako prvý rozpoznal geologickú pozíciu *karpatských melafýrov*. Do stratigrafie Karpát zaviedol dodnes používané termíny ako *karpatský keuper*, *lunzske* či *grestenské*. V bradlovom pásme identifikoval a pomenoval *púchovské sliene*, *orlovské vrstvy*, *upohlavské zlepence*, *súľovské zlepence*, a iné. Zaviedol tiež terminológiu pre pomenovanie krasových javov odvodenú z pomenovaní v *Dalmácii*, *Chorvátsku* a *Slovinsku*, mnohé tieto názvy sa používajú dodnes i vo svete. Bol tiež autorom pomenovania pohoria *Nízke Tatry*.

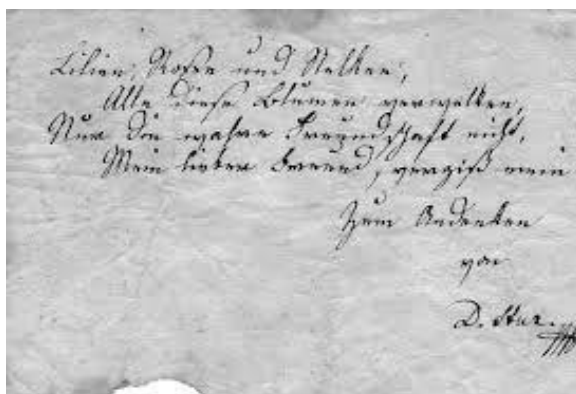
ZÁVER ŽIVOTA A RODINNÝ ŽIVOT

V roku 1855 sa oženil s rakúskou Nemkou Ceciliou Artlovou. Manželstvo zostalo bezdetné.

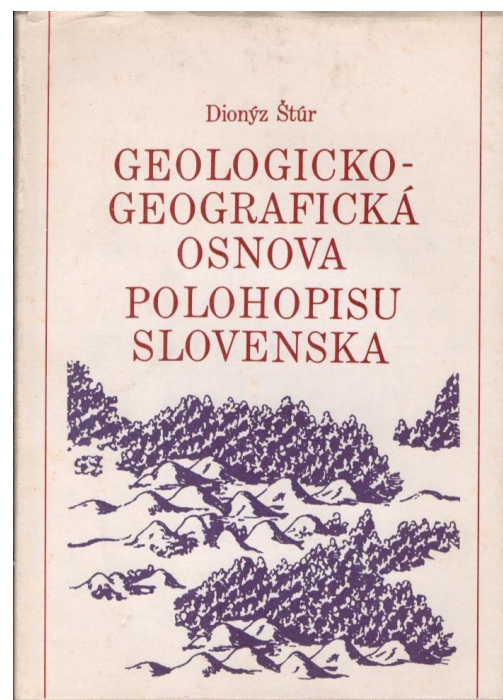
Zomrel vo Viedni 9. októbra 1893 po dlhšej srdcovej chorobe. Časť jeho veľkého herbára, ktorý daroval *Matici slovenskej*, je v SNM v Bratislave. Pre chudobných *slovenských* študentov zanechal študijnú základinu 15 tisíc zlatých. Svoju písomnú pozostalosť poručil *Národnému múzeu v Martine*. Pochovaný je na evanjelickom cintoríne vo Viedni. Jeho manželka zomrela v roku 1895 v *Modre*, je pochovaná po boku manžela vo Viedni.

Výber jeho významných prác bol publikovaný v monografii *Práce Dionýza Štúra Vybrané state* (1960), *Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, Bratislava*. K významným dielam zaoberajúcim sa územím dnešného Slovenska patria:

- *Geologische Übersichtsaufnahme des Wassergebietes der Waag und Neutra* (slov. Správa o geologickom mapovaní povodia Váhu a Nitry) (1860).
- *Beiträge zur kenntniss der flora, der süsswaserquarze, der congerien- und ceritchein- schichten im Wiener un Ungarischen Becken* (slov. Príspevok k poznaniu flóry sladkovodných kremencov, kongeriových a ciritových vrstiev Viedenskej a Uhorskej panvy) (1867).
- *Bericht über die geologische Aufnahme im oberen Waag- und Gran-Thale* (slov. Zpráva o geologickom mapovaní na hornom Považí a Horehróní) (1868).
- *Bericht über die geologische Aufnahme der Umgebungen von Schmöllnitz und Göllnitz* (slov. Zpráva o geologickom mapovaní okolia Smolníka a Gelnice) (1869).
- *Geologico-geografická osnova polohopisu Slovenska* (1862).



Rukopis Dionýza Štúra



KOVÁČSKE NÁRADIE V PREMENÁCH ČASU

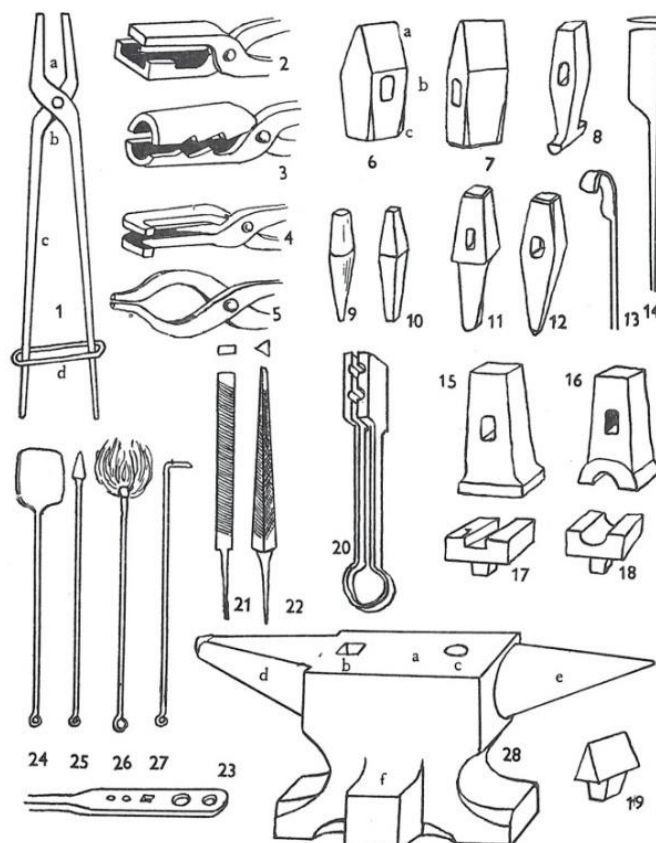
Ján Moravec

ÚVOD

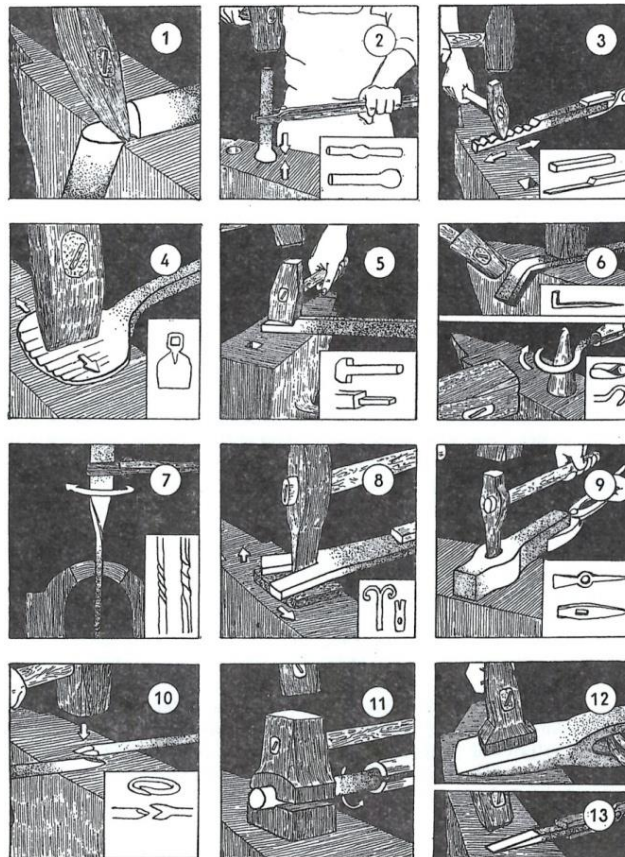
O vývine kováčskeho náradia počas dlhého obdobia som písal v príspevku [1] kde som uviedol dostupné zdroje k tejto oblasti. V citovanom článku je zaradený značný počet odborných zdrojov a literatúry, ktoré sa venujú tomuto fenoménu. Vzhľadom k tomu a takisto, že ide o môj príspevok, nepovažujem za potrebné opätovne uvádzať už citované zdroje, ktoré si záujemca ľahko vyhľadá v knižnici. Vzhľadom k zameraniu časopisu Technológ, považujem za vhodné uvedené doplniť v rámci nasledujúceho príspevku. Cieľom príspevku je čitateľovi ponúknuť komplexnejší prehľad o kováčskych nástrojoch, kde využívam najmä obrázky pre ilustrovanie tejto problematiky. Článok je najmä kompilátom potrebných údajov, ale napriek tomuto ponúka text záujemcovi dostatočný záber z problematiky technológie voľného ručného kovania.

1 ZÁKLADNÉ KOVÁČSKE PRÁCE

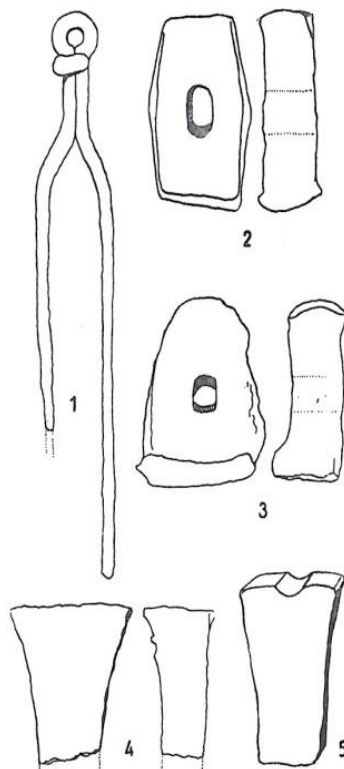
Náradie je samozrejme závislé od podmienok pri ktorých sa používa. Na nasledujúcom obrázku 2 sú uvedené všetky základné kováčske práce. Bližšie o problematike je uvedené v prácach [2,3] a preto si dovoľím čitateľa odkázať na ne, pretože sú ľahko dostupné v knižniciach. Na obr. 1 je pre ilustráciu súčasné kováčske náradie.



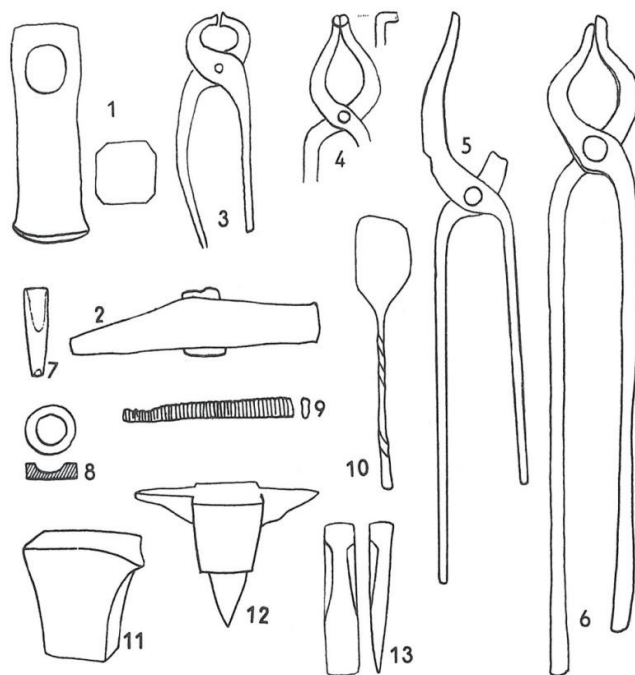
Obr. 1. Kováčske nástroje: 1 - kliešte (a - huba s čeľust'ami, b - oko, c - ramena, d - upínacie pútko), 2 - skrinkové kliešte, 3 - vlčie zuby, 4 a 5 - kliešte k uchopeniu tenkých predmetov, 6 - kladivo (a nos, b oko, c plôška), 7 - križové kladivo, 8 - žliabkové kladivo, 9 až 12 - priebojníky, 13 a 14 - sekáče, 15 - hladiaci sedlík, 16 - zápustkové kladivo, 17 a 18 - zápustky, 19 - babka, 20 - perová zápustka, 21 a 22 - pilníky, 23 - klincovka, 24- vyhňová lopatka, 25 - bodák, 26 - kropáč, 27 - hák na trosku, 28 - nákova (a - dráha, b - otvor pre zápustky, c - otvor k prebíjaniu, d - hranatý roh, e - kuželový roh, f - ubíjačka)



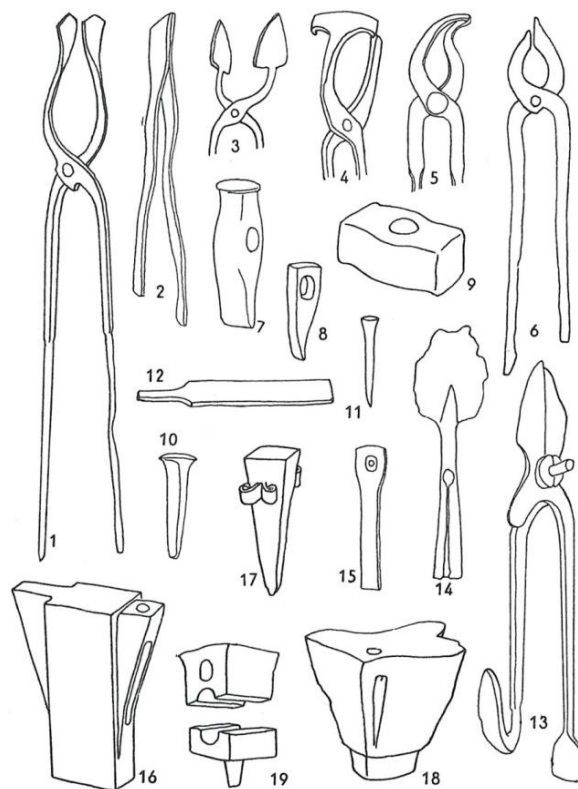
Obr. 2. Základné kováčske práce: 1 - odsekávanie, 2 - ubíjanie, 3 - vyt'ahovanie, 4 - rozširovanie, 5 - osadzovanie, 6 - ohýbanie do uhlov a do oblúkov, 7 - skrúcanie (tordovanie), 8 - štiepenie, 9 - prebíjanie, 10 - kováčske zváranie, 11 - kovanie v pomocnej zápustke, 12 - rovnanie (hladenie), 13 - ostrenie (Pozri aj obr. 13-21)



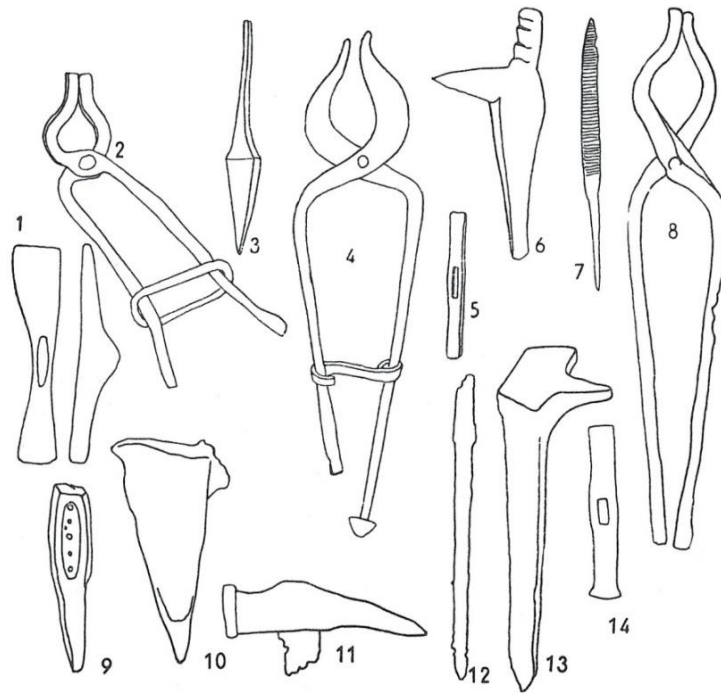
Obr. 3. Kováčske nástroje z doby halštatskej, Býčí skála, (Morava) kováčňa z vrstvy pod pohrebiskom: 1 - perové kliešte, 36 cm; 2 a 3 - ťažké kladiva, 12,5 a 16,5 cm, 4 a 5 - nákovky 9,5 a 11 cm



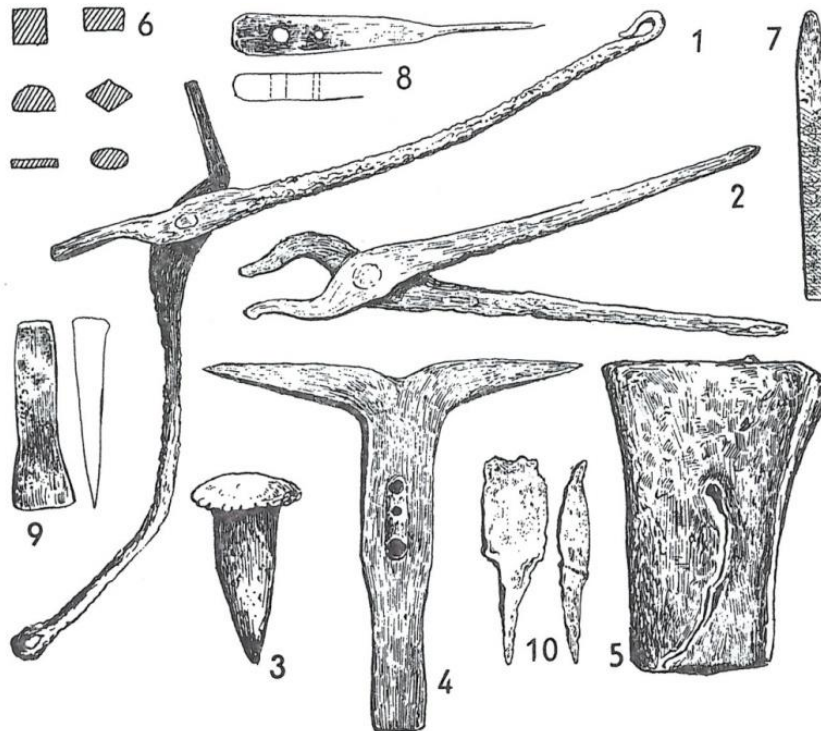
Obr. 4. Kováče nástroje z doby laténskej: 1 - Kappel, D, sedlík - 17 cm, 2 - Stradonice, CZ, kladivo 20 cm, 3 - Llyn Cerrig Bach, GB, kliešte d. - 19 cm, 4 Magdalensberg, AT, hákové kliešte, d. huby - 9 cm, 5 Kappel, kliešte d. - 51 cm, 6 - Llyn Cerrig Bach, kliešte d. - 52,5 cm, 7 Stradonice, CZ, hlavičkár na nity, d. - 6,6 cm, 8 Stradonice, CZ, zápustka, 2,8 cm, 9 Staré Hradisko, CZ, pilník d. - 14 cm, 10 Stradonice, vyhňová lopatka, d. - 20 cm, 11-12 Szalaszka, HU, kovadliny, v. - 11 a 12,5 cm, 13 Kappel, D, sekáč, d. - 13,5 cm



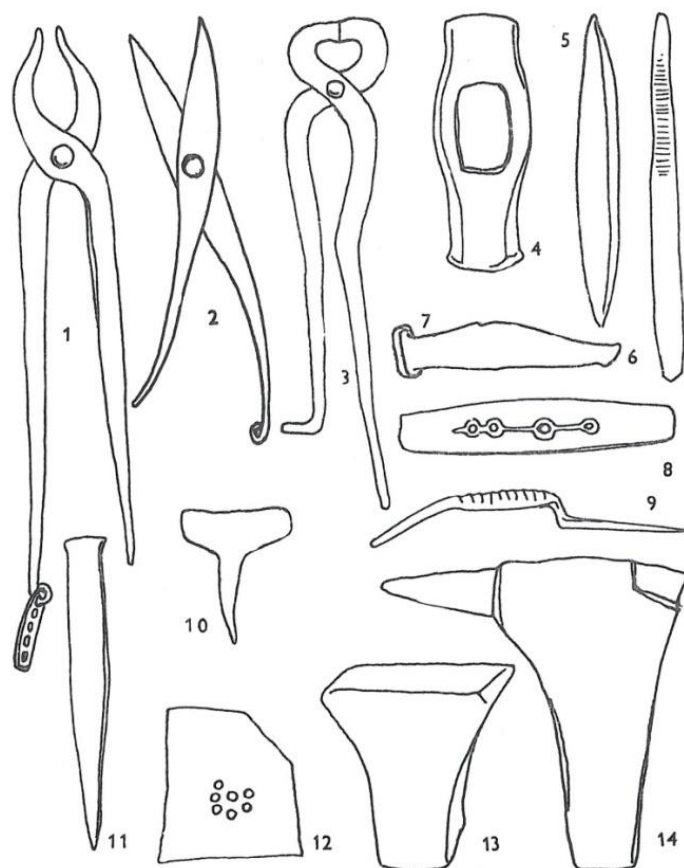
Obr. 5. Kováče nástroje z rímskych provincií: 1 - Saalburg, D, kliešte 49 cm, 2 - Seltz, F, perové kliešte 35,4 cm, 3 - Luxembourg, ploché kliešte cca 30 cm, 4 - Kreimbach, D, skrinkové kliešte 70 cm, 5 - Newstead, Škótsko, hákové kliešte 46 cm, 6 - Cannstatt, Württ, kliešte, 7 - Kreimbach, D, krížové kladivo 20,5 cm, 8 - Saalburg, D, sekáč 9 cm, 9 - Saalburg, D, ploché kladivo, 10 - Kreimbach, D sekáč 11,5 cm, 11 - Kreimbach, prebojník 10,7 cm, 12 - Moosberg, D, pilník, 13 - Sadovec, BG nožnice na plech 46 cm, 14 - Kreimbach, D, vyhňová lopatka cca 30 cm, 15 - Kreimbach, D, klincovka 17 cm, 16 - Museum St. Germain, D, kovadlina s otvorom 20 cm, 17 - Zugmantel, D, naklepávacia kovadlinka, 18 - Kreimbach, D, kovadlinka s otvorom, výška 21 cm, 19 - Pompeje I, zápustky.



Obr. 6. Kovárske nástroje z doby rímskej z tzv. barbarských území (1-7) a doby sťahovania národov: 1 - Siemonice, PL, kladivo 10 cm, 2 - Dessau, D, kliešte s putom cca 20 cm, 3-4 - Korytnica, PL, priebojník a kliešte, rozm. nev., 5-6 - Kalisz, PL., kladivko a ohýbacia kovadlinka, rozm. nev.; 7 - Rzadz (Ronsen), pilník, rozm. nev.; 8 - Schönebeck, D, kliešte 32,7 cm, 9 - Mezöbánd, RO., prievlak 10,5 cm, 10-12 - Poysdorf, AT., kovadlina, kladivo, pilník (zlatnícke náradie), d. 6, 12 a 17,5 cm, 13 - Schönebeck, kovadlina 22,3 cm



Obr. 7. Slovanské kovárske nástroje: 1 - Mikulčice, CZ, kliešte cca 30 cm, 2 - Vladimírske kurhany, Rusko, kliešte 20 cm, 3 - Hirschwang, AT, naklepávacia kovadlinka, 4-5 - Kněží Hora u Kyjeva, rohatá kovadlina s prievlakom, výška cca 18 cm, a bezrohá kovadlina výška 15 cm, 6 - Rusko, prierezy pilníkov, 7 - Děvičgora, Rusko, pilník, 8 - Kněží Hora, kľincovka, 9 - Pskov, sekáčik 5 cm, 10 - Rajky, Ukrajina, sekáč



Obr. 8. Kovárske nástroje zo severskej oblasti. 1-2 Romfoghjellen, D., kliešte a nožnice na plech, 36 a 25,8 cm; 3 Emiss, S, kliešte 29 cm; 4 Strand, D sedlík 10,9 cm; 5 Halleby, D., prebojník (?) 20,5 cm; 6 Engelhang, D pilník; 7 Melsom Nord-Kvelde, D. kladivo 12,6 cm; 8 Strand, D., prievlak na drôt 14,6 cm; 9 Bryn, D., pilník 25,2 cm; 10 Risegjerdet, D., sekáč 6,1 cm; 11 Bryn, D., sekáč 13,5 cm; 12 Sigtuna, D, preťahovacia doska; 13 Hen, D, kovadlina, výška 10 cm; 14 Bryn, D, nákova s rohom, výška 14,8 cm.

2 Z ČOHO VYRÁBALI

2.1 Železo a železné rudy

Železo, ferrum – Fe je chemický prvok VIII. A skupiny periodickej sústavy prvkov, atómové číslo 26, relatívna atómová hmotnosť je 55 847. Má bielu farbu, je lesklé, nepríliš tvrdé a ťažné. Je to feromagnetický kov s teplotou tavenia 1528 °C a varu 2735 °C, s hustotou 7,85. Železo bol známe už v pravekých dobách. Spolu so zvládnutím technológie výroby a spracovaní železa sa človek posunul k hraniciam modernej doby v čase a priestore. V zemskej kôre sa železo nachádza v zlúčeninách, v zemskom jadre je prevažne ako prvok. Je najrozšírenejším kovom na zemi. V horninách sa železo vyskytuje len zriedkavo a iba v malom množstve. Meteoritické železo obsahuje 5,5 – 20 % niklu. Hlavným zdrojom železa sú železné rudy.

Tieto sú: **hnedel'** (*limonit*) – hydroxid železitý $Fe_3 O_4 (OH)_4$ alebo $2Fe_2 O_3 \cdot H_2 O$. Je to najrozšírenejšia železná ruda. Limonit zo *Slovenského rudohoria* má zloženie :

$Fe - 57,00\%$, $Si O_2 - 3,30\%$, $CaO - 0,50\%$, $P - 0,1\%$.

krveľ (*hematit*) – kyslíčnik železitý $Fe_2 O_3$

magnetit (*magnetovec*) – kyslíčnik železnato – železitý $Fe_3 O_4$

goetit – vodnatý kyslíčnik železitý $FeO (OH)$

ocieľok (*siderit*) .

Z kremičitanov je to **chamosit**. Patrí tu ešte **kýz železný** (*pyrit*) – sírnik.

Doplňme ešte orientačne chemické zloženie niektorých iných rúd. (Pleiner)

Hematit $Fe - 33,20\%$, $Si O_2 - 28,80\%$, $Al_2 O_3 - 13,50\%$, $P - 0,5\%$.

Siderit $Fe - 38,90 \%$, $Si O_2 - 0,22 \%$, $CaO - 0,70 \%$, $MgO - 0,50 \%$, $Mn - 9,205 \%$.

Sférosiderit $Fe - 63,60 \%$, $Si O_2 - 14,30 \%$, $CaO - 5,20 \%$,

Magnetit $Fe - 57,40 \%$, $Si O_2 - 13,80 \%$, $Al_2O_3 - 1,20 \%$, $CaO - 3,90 \%$,

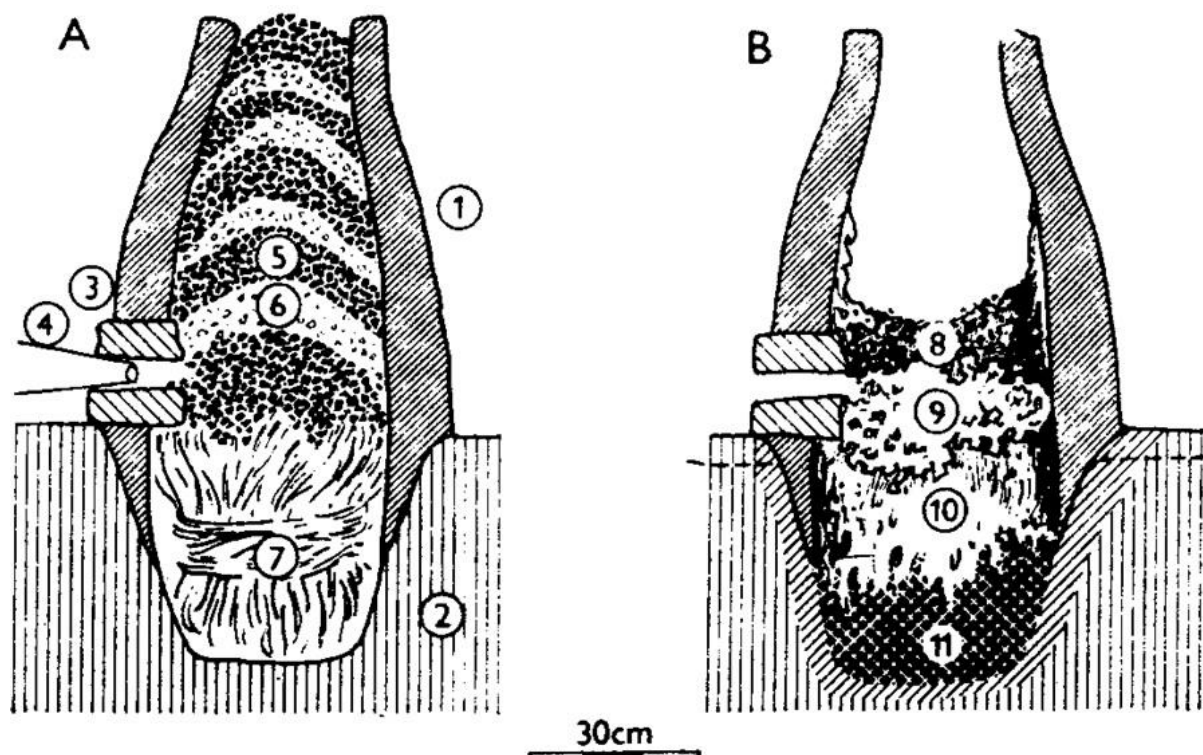
$Mn - 0,50 \%$.

Blatný limonit $Fe_2 O_3 - 42,34 \%$, ($Si O_2 - 58,62 \%$), $CaO - 6,70 \%$, $Mn - 23,02 \%$.

Dá sa predpokladať, že už v pravekých dobách boli rôzne slovenské ložiská, rozoznateľné na povrchu, využívané. Nízke Tatry - v strednej časti pohoria sa nachádzajú žily sideritu a limonitu. Do vencia Vysokých Tatier zasahuje výbežkom bohaté podkarpatské pásmo železných rúd ležiacich v dnešnom Poľsku. Vyskytuje sa tu hematit, limonit aj siderit. V Slovenskom rudohorí sa vyskytuje ociel'ok, siderit, limonit aj hematit.

2.2 Priebek tavenia rudy v peci

Kvalitná železná ruda (80 % Fe a 10 % Si) drvená na hráškové zrno s priemerom niekoľkých milimetrov bola predpražená na otvorenom ohnisku. Stala sa pórovitejšou a prístupnejšou pre redukčné plyny a čoskoro stratila svoju vlhkosť. Drevené uhlie bolo dodávané v zlomkoch s veľkosťou 10÷20 mm. Vsádzkový pomer hmotností bol 1:1. prívod vzduchu 200÷300 litrov za minútu. Teplota procesu bola 1300 °C÷1500 °C. Na obr. 9 sú znázornené spôsoby tavenia rudy a získanie železa na ďalšie spracovanie.



Obr. 9. Rekonštrukcia funkcie pece so zahĺbenou nístejou na základe laténskeho nálezu z Podborian a výsledkov experimentálnych taviieb. A - situácia pred tavbou: 1 - šachta, 2 - zahĺbená nístej, 3 - keramická výfuča, 4 - dúchadlo, 5 - drevené uhlie, 6 - železná ruda, 7 - snop slamy, blokujúca spočiatku dutinu nísteje, B: situácia po skončení tavy:

8 - zvyšky paliva, rudy, trosky, 9 - železná huba prestúpená troskou, 10 - blok trosky pretečenej cez póry železnej huby, 11 - zvyšky paliva v nísteji

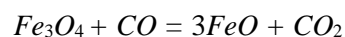
V princípe prebiehali v šachte pece pri dúchacom pochode podobné série redukčných reakcií ako pri pochode vysokopecnom, ale v dôsledku nižších teplôt nedochádzalo – i keď v zanedbateľnej miere a lokálne – k takému nasýteniu vznikajúceho železa s uhlíkom, aby sa mohlo roztaviť. Pri spaľovaní dreveného uhlia vznikal kyslíčnik uhličítý a kyslíčnik uhoľnatý, ktorý bol hlavným redukovadlom. Odoberal rude kyslík, prevádzal ju cez magnetické (Fe_3O_4) a wüstitické (FeO) štádium a uvoľňoval železo. Zmes plynov, v ktorých bol CO_2 v horných pásmach pece silno zastúpený, pôsobila aj pri teplotách pod 500 °C ešte redukčne. Redukované čiastočky metalického železa mohli mať od samého

začiatku značný podiel absorbovaného uhlíka, avšak pôsobením fyalitickej trosky ($2FeO.SiO_2$ s ďalšími zložkami rudnej hlušiny) a najmä vháňaného vzduchu sa celkom, alebo z veľkej časti opäť oduhlčili na pomerne mäkký, kujný kov s nízkym a nepravidelne rozdeleným obsahom uhlíka. Troska s asi päťnovým podielom kremičitej zložky bola pre svoj vysoký obsah kysličníka železnatého (cez 50 %) pri teplotách okolo 1300 °C dobre tekutá. V peciach so zahĺbeným nístejom pretekala pôrmi železnej huby, ktorá sa tvorila pri stenách v blízkosti ústia dúchadiel a prenikala do kotlovitého nísteja. Tam prepálila upchávku zo surového prútia alebo slamy a stuhla v podobe ťažkého bloku s hmotnosťou okolo 25÷50 kg (pri neskorších peciach tohto typu dosahovala hmotnosť troskovitého zliatku aj viac kilogramov).

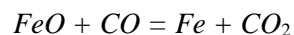
Určité druhy železných rúd, najmä druhy bez fosforu a so zvýšeným obsahom mangánu, tak isto ako vhodné vedenie dúchacieho procesu vytvárali predpoklady pre získavanie výraznejšej nauhličenej primárnej ocele. Bolo najmä potrebné zvýšiť podiel paliva vo vsádzke a upraviť prívod vzduchu tak, aby sa síce udržali čo najvyššie teploty v kritickom pásme, ale aby produkt nebol vzdušným prúdom druhotne oduhlčovany. Pri takomto pochode vznikali ťažko taviteľné trosky, s vyšším obsahom kremičitých zložiek a s nižším obsahom oxidu železnatého. Až do stredoveku sa nikde v strednej Európe nenachádzajú stopy používania troskotvorných prísad. V miestach maximálnych teplôt a v dotyku s palivom mohlo dochádzať aj k priamej redukcii rudy pevným uhlíkom, pričom sa vyvíjal ďalší kysličník uhoľnatý. Po štyroch až dvanástich hodinách, podľa veľkosti pece, nebolo už možné v tavbe pokračovať. Pec sa otvorila, prípadne sa jej šachta strhla a žeravá železná huba, nalepená pri ústi nísteja nad tuhnúcou troskou, sa odsekávala a potom posúvala na ďalšie spracovanie. Hlavne bolo potrebné odstrániť z nej trosku, ktorá prestupovala jej štruktúrou. Robilo sa tak pomocou nového ohrevu, ktorý uviedol železo do plastického stavu a trosku znova roztavil. Na toto bola potrebná väčšia otvorená vyhrievacia vyhňa alebo upravená pec s umelým dúchaním, kde sa dosiahlo teplôt nad 1200 °C. Po nahriatí vsádzky na teplotu 500 °C÷600 °C sa začal redukčný pochod. Vzdušný kyslík vstúpil do styku s rozžeraveným palivom a spálil ho na kysličník uhličitý CO_2 , ktorý sa ihneď redukoval stykom so žeravým uhlím na kysličník uhoľnatý CO podľa reakcie : $C + O_2 = CO_2$ a ďalej $CO_2 + C = 2CO$. tento jedovatý plyn spôsobil *nepriamu redukciiu* . Odňal rudo kyslík a zlúčil sa s ním znovu na kysličník uhličitý CO_2 .

Pričom kysličník uhoľnatý redukoval kysličník železitý Fe_2O_3 (rudu) na kysličník železnato – železitý Fe_3O_4 (sekundárny magnetit : $3Fe_2O_3 + CO = 2 Fe_3O_4 + CO_2$

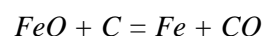
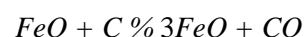
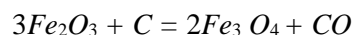
Tento kysličník sa ďalej pôsobením CO redukoval na kysličník železnatý FeO :



Pri teplotách do 900 °C sa časť FeO ďalej redukuje a uvoľňujú sa čiastočky železa:

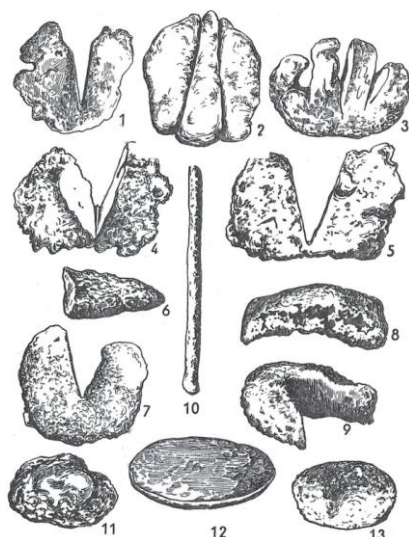


Hlušínové kysličníky (SiO_2 , TiO_2 , P_2O_5 , CaO , Al_2O_3 , a iné) je potrebné roztaviť pôsobením časti kysličníka železnatého FeO , čo sa deje pri teplotách 1100 °C÷1200 °C podľa povahy rudy a prípadne podľa toho, aké prísady boli použité. Z toho vyplýva , že viac než polovica FeO je v priamej výrobe spotrebovaná pri tvorbe trosky. Zvyšok FeO , pokiaľ sa neredukoval kysličníkom uhoľnatým a nebol viazaný v troske, redukoval sa ďalej na Fe – metalické železo, ktoré klesalo ďalej do nísteja na dno pece. Pri vyšších teplotách v niektorých pásmach pecného priestoru , napr. v nísteji alebo v blízkosti vzdušných foriem, dochádzalo pri *nepriamej redukcii* kysličníkom uhoľnatým tiež k *priamej redukcii* uhlíkom. Obe reakcie prebiehali niekedy súčasne pri rovnakých teplotách. Pri ľahšie redukovateľných rudách je ale podiel priamej redukcii menší.

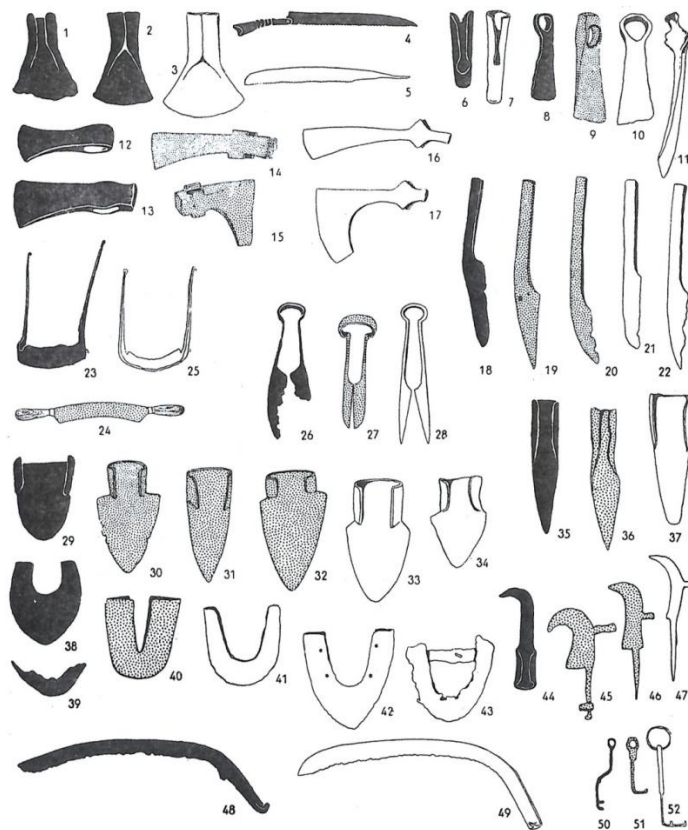


Pri dostatočnom žiare (okolo 1300 °C) sa vyredukované častice železa mohli v nísteji zvariť do jedného kusa – lupy.

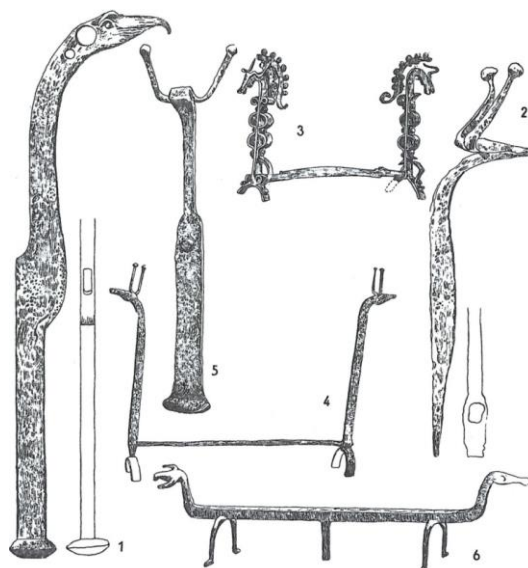
Vtedajšie taviace pece boli dedičmi riešení *Keltov*, prípadne sami *Kelti* sanovali potrebu nového obyvateľstva svojimi produktmi. *Germáni* neboli kultúrne ani politicky, hospodársky či vedomostne na takej úrovni ako *Kelti*, ktorí ale v tomto období mali svoj zenit za sebou.



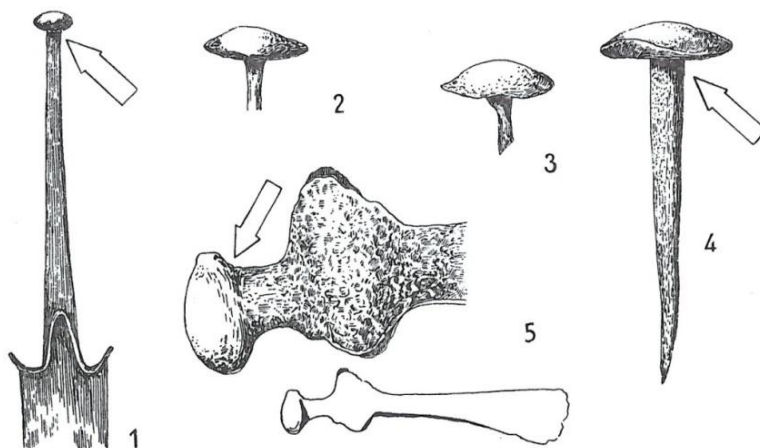
Obr. 10. Slovanské a škandinávské železné lupy: 1 - Närke, S., 2 - Bölinge, S., 3 - Alens Socken, S., 4 - Edland, D., 5 - Egge, D., 6 - Kolobrzeg, PL., 7 - Leczyca, PL., 8 - Novgorod, RUS., 9 - Vyšgorod, RUS., 10 - Piekary, PL., 11 - Gorodsk, RUS, 12 - Vasilevskij, RUS, 13 - Kneží Hora, RUS 1-5, 7, 9 - rozřaté lupy, 6, 8, 11, 13 - bochníkové lupy, 10 - prút, 12 - disk



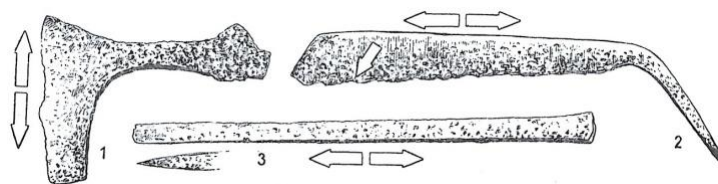
Obr. 11. Keltská tradícia provinciálneho a slovanského kováčstva podľa typológie. Sekery s tulejami: 1 - Starý Kolín CZ, 2 - La Tène, CH, 3 - Otaslavice CZ.; pítky nožovky: 4 - La Tène, 5 - Oslavany; nástroje s lalokmi: 6 - La Tène, 7 - Blažejovice, CZ.; kľúčovnica: 8 - La Tène, CH 9 - Moosberg, NL., 10 - Rajky, U., 11 - Brankovice, CZM.; sekery s uchom: 12 - Staré Hradisko, CZ., 13 - La Tène, CH, 14-15 - Mohuč-Mainz, D. 16-17 - Mutěnice, CZ.; krojidla: 18 - Igolomia, PL., 19 - RGZM Mainz, D., 20 - Orešac, Chor., 21 - Rajky, HU, 22 - Žitavská Toň, SK.; porezy: 23 - Sv. Jan p. Skalou, CZ, 24 - Saalburg, D.; 25 - Novgorod, RUS, perové nožnice: 26 - Starý Kolín, CZ., 27 - Heddernheim, D., 28 - Čáslav, CZ.; radlice: 29 - Starý Kolín, CZ., 30 - Podbakovača, SRB, 31 - Ussing Weilheim, D., 32 - Tuttlingen, D., 33 - Záhlinice, CZ., 34 - Čechůvky, CZ.; úzke radlice typu sošník: 35 - Steinsburg, D, 36 - Dalj, Srb, 37 - Novgorod, RUS.; kopanie lopát a rýřov: 38 - Stradonice, CZ, 39 - Lhotice, CZ., 40 - Winnigen, D., 41 - Mor. Sv. Ján, SK., 42 - Rusko, 43 - Rajky, H U.; vinárske a záhradnícke nože: 44 - Idria, Chor., 45 - Moosberg, D., 46 - Žeglica, BG., 47 - Mor. Sv. Ján, SK kopy: 48 - Steinsburg, D., 49 - Oslavany, CZ; kľúče: 50 - Steinsburg, D, 51 - Saalburg, D, 52 - Mor. Sv. Ján, SK



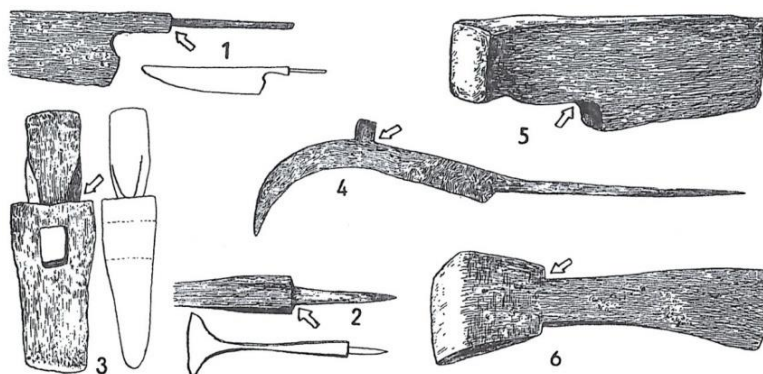
Obr. 12. Veľké výkovky z laténskej doby - železné kozlíky k ohnisku. Maximálne rozpätie výkovkov je 85 cm:
1-2 - Kappel, D, 3 - Capel Garmon, 4 - Standfordbury GB, 5 - Stradonice, CZ



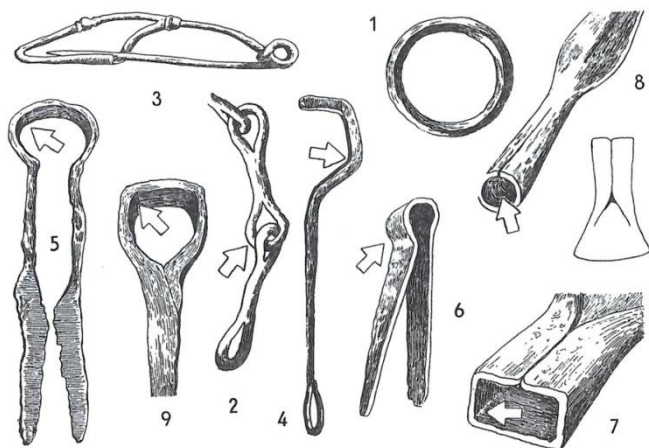
Obr. 13. Ubíjanie, 1 a 4 - La Tène, CH, 2-3 - Uherský Brod, CZ



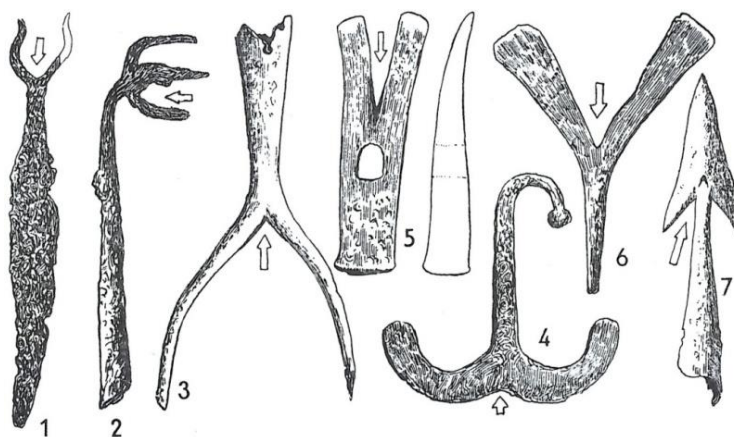
Obr. 14. Rozširovanie a vyťahovanie, 1 - Količín, CZ, 2 - Semice- CZ, 3 - Ivanovice na Hané, CZ



Obr. 15. Osadzovanie, 1 - 2 La Tène, CH, 3 - Steinsburg, D, Moravský sv. Ján, SK, 5 - Čáslav-Hrádek, CZ, 6 - Žitavská Tůň, SK



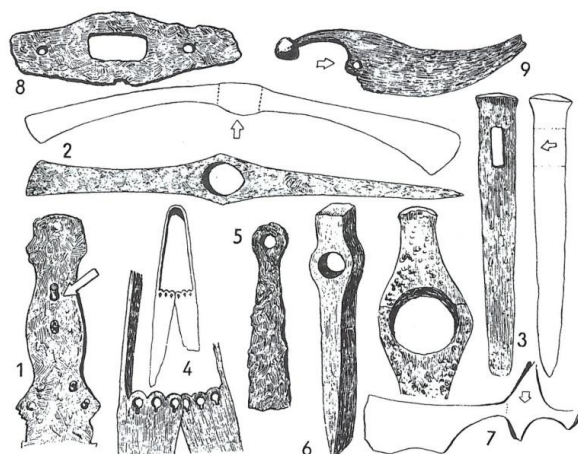
Obr. 16. Ohýbanie (1-6, 9) a zvinovanie (7-8) – Lovosice, CZ-Stradonice, CZ, 3 -Ponětovice, CZ, 4 - Ostprignitz, D, 5 - Haithabu, D, 6 - Staré Hradisko, Morava, 7 - La Tène, CH, 8 - Dobřichov, Třebická, CZ, 9 - Uherské Hradiště, CZ



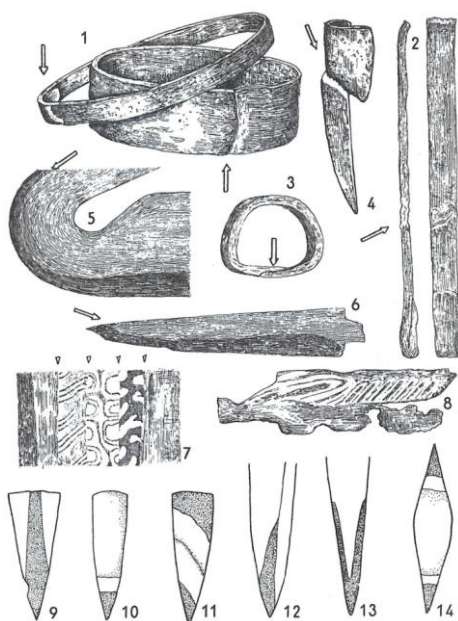
Obr. 17. Rozštepovanie: 1 - Rappena, D, 2 - Stradonice CZ, 3 - Steinsburg, D, 4 - Stradonice, CZ, 5 - Novgorod, RUS, Podhradi u Uh. Brodu, CZ, 7 - Dobřichov, CZ



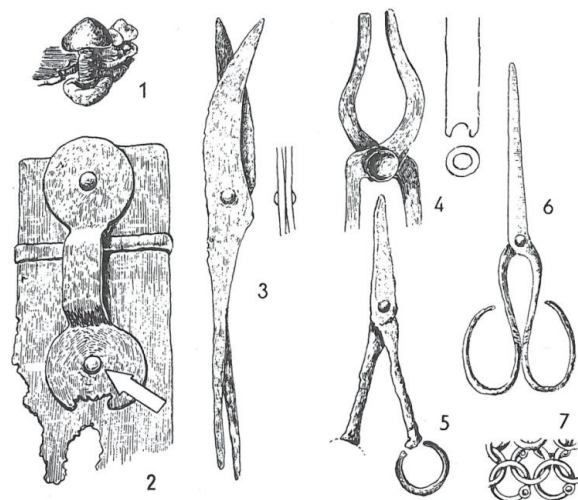
Obr. 18. Tordovanie: 1 - Lovosice, CZ, 2 - Starý Kolín, CZ, 3-5 - Novgorod, RUS



Obr. 19. Prebijanie: 1 - Břasy, CZ, 2 - skytský čakan, SK, 3 - Staré Hradisko, CZ, 4-5 - Dobřichov, CZ, 6 - Kapersberg, D, 7 - Kúty, SK, 8 - Staré Hradisko, CZ, 9 - Dobřichov, CZ



Obr. 20. Kovácke zvaranie: 1 - železné obruče ψ 15- 20 cm, 2 - hrivna, 3 - zvarný krúžok z keltského oppida, 4 - opravovaná slovanská radlica, 5 - leptaná ocieľka, 6 - nôž s navareným ostrím, 7 - detail damaskovaného zvarania franského meča, 8 - nôž so zvarokovým damaskom



Obr. 21. Nitovanie: 1 - Gánovce, SK, 2 - Klobouky, CZ, 3 - Hostýn, CZ, 4 - Newstead, Škótsko, 5 - Haithabu, D, 6 - Novgorod, RUS

ZÁVER

V predloženom príspevku je stručne uvedené o problematike kováčskeho náradia, ktoré sa vo svojej podstate zhodovali v rozličných historických dobách a tiež je zaujímavé, že jeho formy a tvar sú zhodné pre všetky uvedené nálezy z rozličných oblastí Európy. Text je doplnený aj opisom problematiky výroby železa pre ďalšie spracovanie kovaním. Železné výrobky prezentované na príslušných obrázkoch dávajú vyniknúť veľkému umeniu vtedajších majstrov kováčov. Príspevok je informačným doplnkom historických poznatkov o vývoji technológie kovania.

LITERATÚRA

- [1] MORAVEC, J. (2020): *Starý kováč a jeho pracovné náradie*, Technológ 3/2020, str. 9-22, ISSN 1337-8996.
- [2] MORAVEC, J. (2010): *Počiatky metalurgie na území Slobodnej Germánie*, ŽU Žilina, EDIS vyd., Žilina, 72 strán, ISBN 978-80-554-0238-8.
- [2] MORAVEC, J. (2010): *Prehľad vývoja kovania od jeho počiatkov do začiatku novoveku*, ŽU Žilina EDIS, 98 s. ISBN 978- 80-8070-554-0, 2. doplnené a opravené vydanie.
- [3] ASTON, M.- TAYLOR, T. (1998): *The Atlas of Archeology*, Dorling Kindersley Ltd. London.
- [4] BENINGER, E. (1937): *Die germanischen Bodenfunde in der Slowakei*, Reichenberg – Leipzig.
- [5] BOTERMANN, H. (2005): *Wie aus Galliern Römer wurden Leben in Römischen Reich*, Klett-Kotta, Stuttgart, ISBN 3-608-94048-0.
- [6] BURIAN, J. (1994): *Římské impérium*, Svoboda – Liberta, Praha.
- [7] CLARK, G. (1969): *World Prehistory*, Cambridge university Press London.
- [8] ČAPLOVIČ, P (1987): *Orava v praveku, vo včasnej dobe dejinnej a na začiatku stredoveku*, Osveta Martin.
- [9] EISNER, J. (1933): *Slovensko v pravěku*, Spisy Šafaříkovy učené společnosti, svazek 13, Bratislava.
- [10] FILIP, J. (1966, 1969): *Enzyklopädisches Handbuch zur Ur- und Frühgeschichte Europas-Manuel* I. (A-K), II. (L-Z), Prag.
- [11] FILIP, J. (1959): *Keltská civilizace a její dědictví*, Praha.
- [12] KOLNÍK, T. (1984): *Rímske a germánske umenie na Slovensku*, Tatran Bratislava.
- [13] NOVOTNÁ, M. (1993): *Svedectvá predkov*, vydavateľstvo Matice slovenskej, Martin, ISBN 80-8070-278-7.
- [14] NOVOTNÝ, B. a kol. (1986): *Encyklopédia archeológie*, Bratislava.
- [15] PAULÍK, J. - NOVOTNÁ, M. (1962): *Život a umenie doby železnej na Slovensku*, Bratislava.
- [16] PIETA, K. (1982 A): *Umenie doby železnej*, Tatran Bratislava.
- [17] PIETA, K. - MORAVČÍK, J. (1985): *Železiarne z doby rímskej vo Varíne*.
- [18] PLEINER, R. (1960): *Význam typologie železářských pecí v době římské ve světle nových nálezů z Čech*, PA 51, s. 184-220.
- [19] PLEINER, R.- RYBOVÁ, A. (red.) (1978): *Pravěké dějiny Čech*, Academia Praha.
- [20] PLEINER, R. (1995): *Výroba železa ve starokeltském světě*, Zvesti AÚ SAV 31, Nitra, s. 43-50.
- [21] PLEINER, R. (1962): *Staré evropské kováčství*, NČSAV Praha , s. 102-112.
- [22] PLEINER, R. (1958): *Základy slovanského železářského hutnictví v českých zemích*, Praha.

Stav povrchu po dynamickom guľôčkovaní austenitickej ocele AISi 304

Anna Mičietová, prof. Ing., PhD.*

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

Peter Minárik, RNDr., Ph.D.

Katedra fyziky materiálov, Matematicko-fyzikálna fakulta,
Univerzita Karlova,
Ke Karlovu 3, 121 16 Praha.
E-mail: Peter.Minarik@mff.cuni.cz, Tel.: + 420 951551490

Mária Čilliková, doc. Ing., PhD.

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

Miroslav Neslušán, prof. Dr., Ing.

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

Jiří Čapek, Ing., Ph.D.

Katedra inženýrství pevných látek, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
České vysoké učení technické v Praze,
Trojanova 13, 120 00 Praha
E-mail: jiri.capek@jfifi.cvut.cz, Tel.: +420-22435-8624

Surface state after shot-peening of austenitic steel AISI 304

Abstract: This paper deals with surface integrity after shot peening of AISi 304 under variable conditions expressed in term of shot-peening cycles and corresponding Almen intensities. Surface state is investigated from the point of view of surface topography, surface roughness and microhardness. Also phase transformation of paramagnetic austenite into strain induced martensite is investigated as well by the use of Barkhausen noise technique. It was found that the fraction of strain induced martensite grows with the number of shot-peening cycles and its extent penetrates deeper beneath the free surface. Furthermore, surface roughness decreases along with increasing number of cycles. Surface microcracking occurs after prolonged shot-peening cycles.

ÚVOD

Cyklické premagnetovávanie feromagnetických materiálov inicializuje nevratné a nekontinuálne pohyby Blochových stien (BW_s). Táto diskontinuita je spôsobená interferenciou BW_s s defektmi kryštalografickej mriežky ako sú precipitáty, dislokácie a iné. Tento jav sa nazýva Barkhausenov šum (MBN). MBN sa vyžíva v priemysle predovšetkým pri monitorizácii komponentov po brúsení. MBN je citlivý na zmenu napätového stavu, zmeny štruktúry, distribúcie karbidov, dislokačnej

hustoty a podobne. Pri brúsení sa využíva efekt tepelného popustenia povrchu, ktorý vedie v znížení dislokačnej hustoty a zmene stavu karbidov čo sa následne premieta do nárastu MBN [1, 2].

Okrem iných aplikácií sa MBN využíva aj pri monitorovaní procesov, kedy sa paramagnetický austenit transformuje na feromagnetický martenzit [3, 4]. Vysoká citlivosť MBN práve na tieto procesy súvisí s tým, že v podstate celý MBN signál je možné priamo vzťahovať k fázovej transformácii austenitu na

martenzit. Jednou z aplikácií kedy dochádza práve k takej to zmene je proces dynamického guľôčkovania povrchov (po anglicky shot – peening), kedy je povrch bombardovaný obvykle oceľovými guľičkami, ktorých vysoká kinetická energia sa premieňa na deformačný proces v povrchu, ktorý je vystavený tomuto procesu. Tento proces výrazne zvyšuje dislokačnú hustotu v povrchu, s tým súvisiacu jeho mikrotvrdosť, odolnosť voči cyklickému zaťažovaniu, alebo koróziu odolnosť [5, 6]. V prípade dynamického guľôčkovania je taktiež charakteristickým javom u niektorých austenitických ocelí aj práve spomínaná premena austenitu na deformačný martenzit [3, 7]. Tento článok sa preto zaoberá práve touto problematikou a poukazuje na výrazný vplyv podmienok dynamického guľôčkovania, predovšetkým počtu cyklov na stav povrchu vyjadrený v jeho topografii, drsnosti povrchu, mikrotvrdosti, intenzitu fázových zmien a s tým súvisiacou emisiou MBN.

1 PODMIENKY EXPERIMENTOV

Experimenty boli realizované na austenitickej oceli AISi 304, ktorá bola dodaná vo forme plechu o hrúbke 3 mm. Z tohto plechu boli nazerané vzorky o dĺžke 60 mm a šírke 20 mm. Dlhšia strana bola rezaná v smere valcovania plechu. Vzhľadom na prítomnosť deformačného martenzitu na povrchu plechu po valcovaní za studena, bola na všetkých vzorkách odleptaná vrstva o hrúbke 0.15 mm, aby sa zamedzilo miešaniu vplyvu deformačného martenzitu po valcovaní s tým, ktorý vzniká po guľôčkovaní.

Dynamické guľôčkovanie bolo realizované na špeciálnom zariadení vyvinutom práve na tento účel. Podmienky guľôčkovania boli nasledovné:

- Počet cyklov 2, 4, 6 a 8.
- Guľičky S170 (stredný priemer 0,43 mm).
- Lineárny posuv 10 mm·s⁻¹.
- Vzdialenosť od povrchu 70 mm.
- Tlak vzduchu 5 barov.

Po guľôčkovaní bola meraná jeho Almen intenzita a to prostredníctvom Almen pásov o hrúbke 1,295 mm, ktorá kontinuálne rástla od 0,7 mm po 2 cykloch až po 0,85 mm po 8 cykloch. Mikrotvrdosť HV0,05 bola meraná na zariadení Innova Test 400TM (50 g počas 10 s) a bola vypočítaná v piatich opakovaných meraniach. Drsnosť povrchu bola meraná v smere kolmo na smer valcovania plechu na dĺžke 5 mm na zariadení Hommel Tester T 2000.

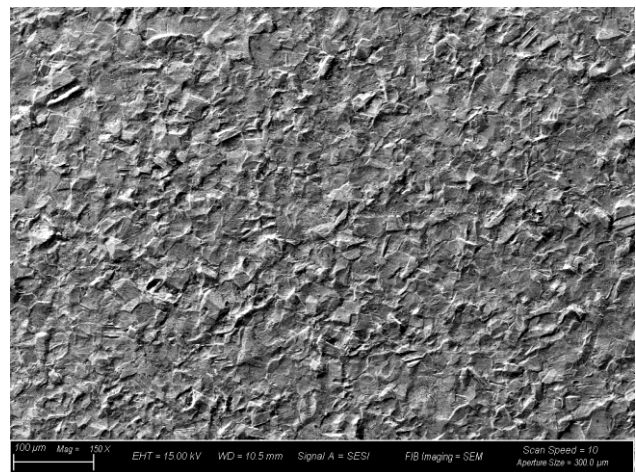
MBN merania boli realizované na prístroji RollScan 350 v softvéri MicroScan. MBN pulzy boli merané vo frekvenčnej oblasti od 10 do 1000 kHz (magnetizačná frekvencia 125 Hz, magnetizačné napätie 16 V, vzorkovacia frekvencia 6,7 MHz). MBN signál bol meraný v smere valcovania plechu

aj v smere kolmo naň. MBN predstavuje efektívnu hodnotu signálu.

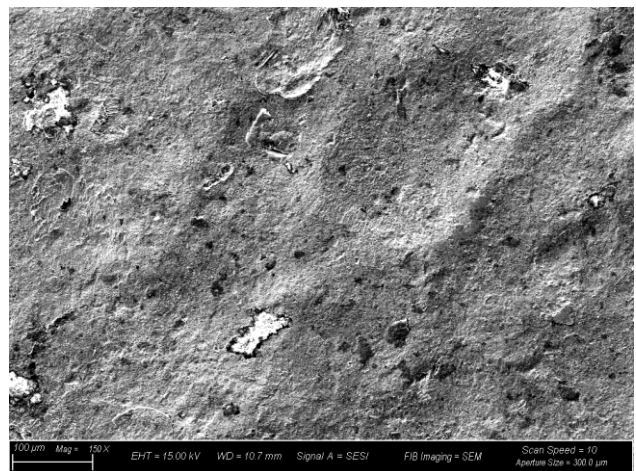
Podiel deformačne indukovaného martenzitu bol na povrchu meraný prostredníctvom XRD techniky na zariadení X'Pert PRO MPD difraktometer. SEM topografia povrchu ako aj prítomnosť mikro trhlín bola analyzovaná na zariadení Zeiss Auriga Compact.

2 VÝSLEDKY EXPERIMENTOV

Obrázok 1 ukazuje východiskový stav povrchu po leptaní, pokiaľ obrázok 2 ukazuje typický kráterovitý povrch po dynamickom guľôčkovaní (2 cykloch). Už po 2 cykloch je pokrytie povrchu 100 %. S rastúcim počtom cyklov dochádza k tomu, že výška kráterov klesá, ale na druhej strane dochádza k delaminácii povrchu. Pokiaľ po 4 cykloch je rozsah delaminácie zriedkavý, po 6 a hlavne 8 cykloch je intenzita delaminácie pomerne veľká a tento povrch je možné považovať z tohto hľadiska na preťažený. Záznamy drsnosti povrchu (obrázky 6 až 8) ukazujú, že drsnosť povrchu po 2 cykloch výrazne vzrastá a s ďalším počtom cyklov mierne klesá. Sumárne tento vývoj ukazuje obr. 9.



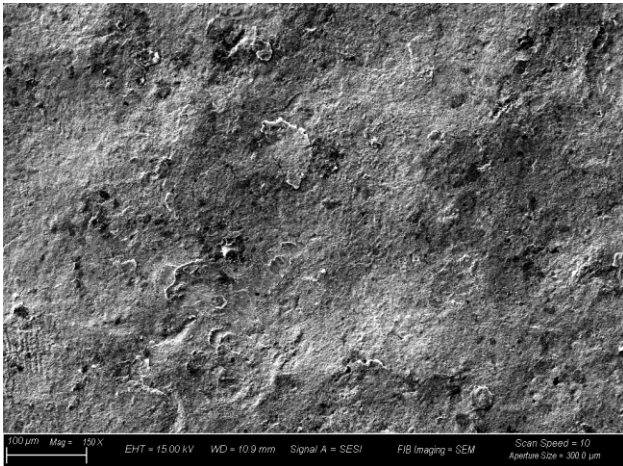
Obr. 1. SEM obrázok povrchu pred guľôčkovaním



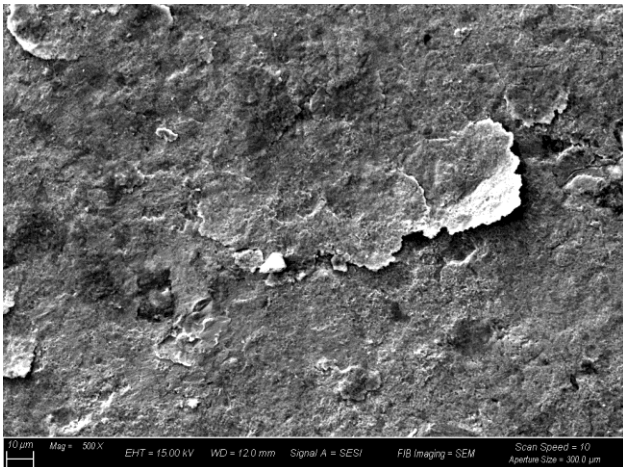
Obr. 2. SEM obrázok povrchu po 2 cykloch

To, že je povrch po guľôčkovaní poškodený indikuje aj zmena mikrotvrdosti v hĺbke približne 15 µm,

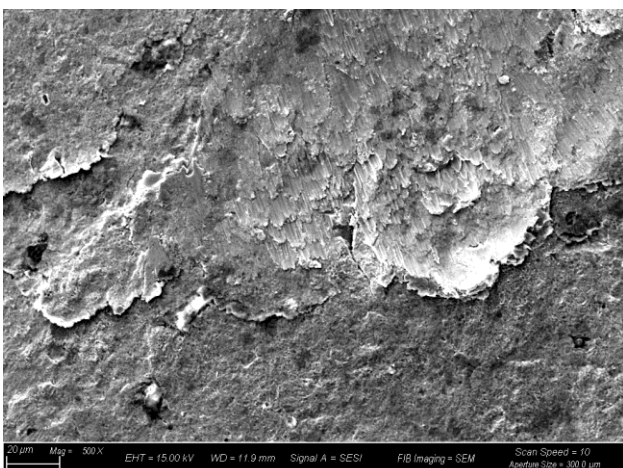
kedy je možné spočiatku vidieť prudký nárast HV0.05 a to do 4 cyklov guľôčkovania s následným miernym poklesom po 6 cykloch a prudkým po 8 cykloch (obr. 0). Nárast tvrdosti súvisí s vytvorením deformačného martenzitu na povrchu.



Obr. 3. SEM obrázok povrchu po 4 cykloch



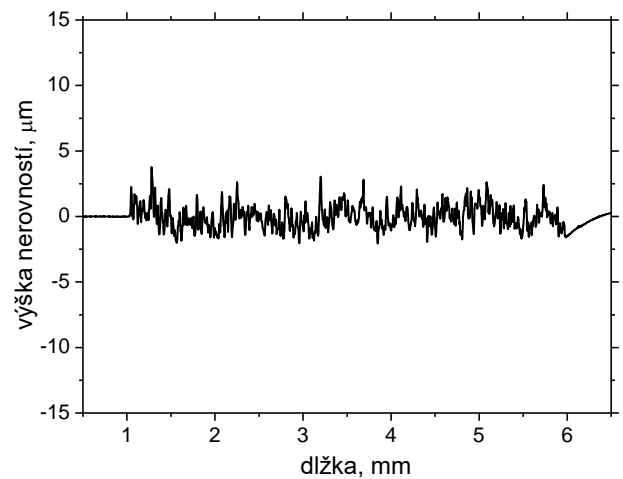
Obr. 4. SEM obrázok povrchu po 6 cykloch



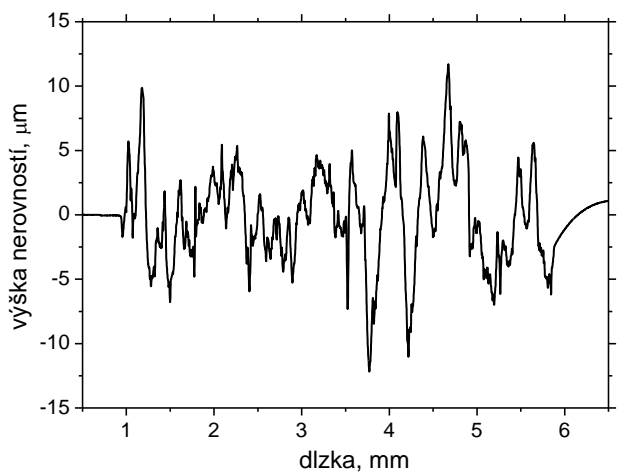
Obr. 5. SEM obrázok povrchu po 8 cykloch

Obdobný vývoj je možné pozorovať v súvislosti s podielom deformačného martenzitu na povrchu prostredníctvom XRD, kedy jeho maximum je možné pozorovať po 2 cykloch s následným miernym poklesom pre vyšší počet cyklov (obr. 11). Na druhej

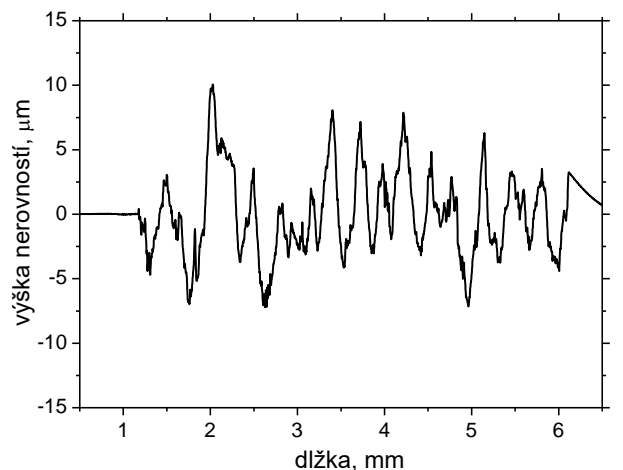
strane pre vyšší počet cyklov je možné pozorovať vyšší podiel martenzitu v hlbších vrstvách pod povrchom.



Obr. 6. Záznam drsnosti povrchu pred guľôčkovaním



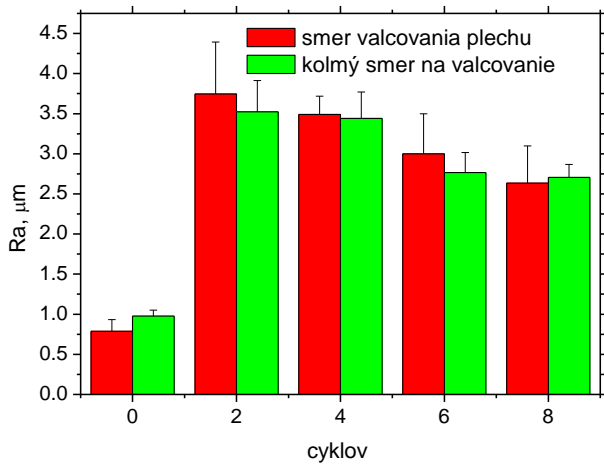
Obr. 7. Záznam drsnosti povrchu po 2 cykloch guľôčkovania



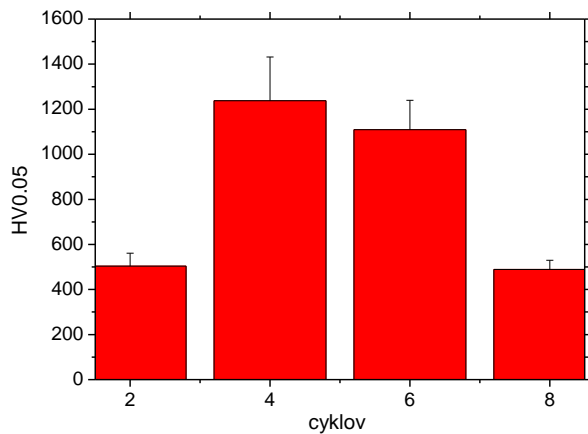
Obr. 8. Záznam drsnosti povrchu po 8 cykloch guľôčkovania

S rastúcim podielom martenzitu hlavne vo väčších hĺbkach súvisí aj rastúca hodnota MBN v oboch meraných smeroch ako to ukazuje obr. 12, pretože neferomagnetický austenit je transformovaný na feromagnetický martenzit. Obrázok 12 taktiež ukazuje, že MBN je v smere valcovania plechu

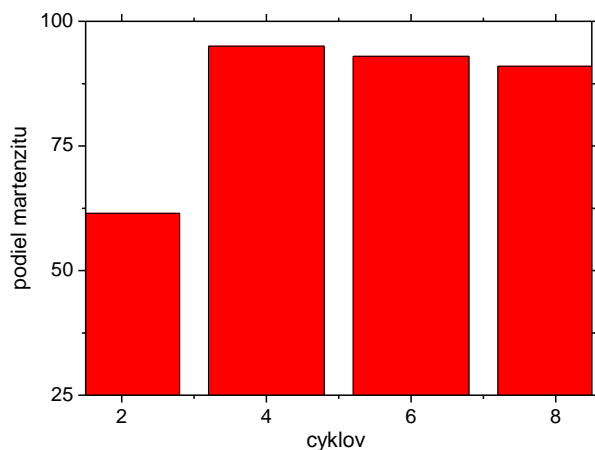
vyššie ako v kolmom smere v súvislosti s kryštalickou anizotropiou po valcovaní.



Obr. 9. Zmena Ra s počtom cyklov guľôčkovania



Obr. 10. Zmena HV0,05 s počtom cyklov guľôčkovania

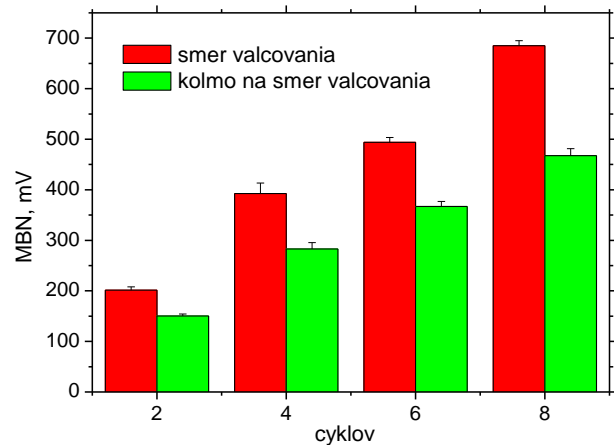


Obr. 11. Zmena podielu martenzitu na povrchu s počtom cyklov guľôčkovania

ZÁVER

Ukazuje sa, že optimálny počet guľôčkových cyklov je 4, kedy je povrch bez väčšieho počtu mikro trhlín a jeho tvrdosť je vysoká. S rastúcim počtom cyklov dochádza k poklesu tvrdosti v dôsledku

vzniku mikro trhlín ako dôsledok preťaženia povrchu opakovanou intenzívnou plastickou deformáciou.



Obr. 12. Zmena MBN s počtom cyklov guľôčkovania

PodĎakovanie

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

LITERATÚRA

- [1] MIČÚCH, M. et al. (2014): *Micro magnetic study of cutting conditions and grinding wheel wear influence on surface integrity*. Manufacturing Technology, Vol. 14, p. 66-71.
- [2] NESLUŠAN, M. et al. (2017): *Monitoring of grinding burn via Barkhausen noise emission in case-hardened steel in large-bearing production*. J. Mater. Proc. Technol., Vol. 240, p.104-117.
- [3] KLEBER, X. - BARROSO, S.P. (2010): *Investigation of shot-peened austenitic stainless steel 304L by means of magnetic Barkhausen noise*, Mater. Sci. Eng. A., Vol. 527, p. 6046-6052.
- [4] HAUŠILD, P. et al. (2013): *Characterization of strain-induced martensitic transformation in A301 stainless steel by Barkhausen noise measurement*, Mater. Design, Vol. 44, p. 548-554.
- [5] SEGURADO, E., et al. (2018): *Effect of low intensity shot peening treatments applied with different types of shots on the fatigue performance of a high-strength steel*, Surf. Coat. Technol., Vol. 340, p. 25-35.
- [6] TRŠKO, L. et al. (2017): *Influence of Severe Shot Peening on the Surface State and Ultra-High-Cycle Fatigue Behavior of an AW 7075 Aluminum Alloy*, J. Mater. Eng. Perform., Vol. 26, p. 2784-2797.
- [7] UNAL, O. - VAROL, R., (2015): *Surface severe plastic deformation of AISI 304 via conventional shot peening, severe shot peening and re-peening*, Appl. Surface Sci., Vol. 351, p. 289-295.

Konštrukčná optimalizácia tvaru telies ozubených kolies pomocou 3D konštrukčných programov

Samuel Sivák, Ing.*

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

Silvia Maláková, doc. Ing., PhD.

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

Daniela Harachová, Ing., PhD.

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

Design optimization of the shape of gear wheel bodies using 3D design programs

Abstract: Paper was devoted to new methods coming to wide use in design engineering. These methods contained of topology optimization and generative design. Although topology optimization is practiced for some time, the generative design is its biggest contender. Both methods were described in a way of how they work and what methodology needs to be abided. At the end, a comparison between advantages and disadvantages as well was done, taking into account use of both of them in gear wheel body optimization.

ÚVOD

Koncepčný dizajn je fáza procesu vývoja produktu, v ktorej inžinieri a dizajnéri vytvárajú a vyhodnocujú viaceré dizajnové alternatívy s cieľom nájsť najoptimálnejšie riešenia. Zvolené postupy a rozhodnutia prijaté v tejto fáze majú silný vplyv na všetky nasledujúce kroky vývoja výrobkov, ktoré zahŕňajú rôzne oblasti, ako je výroba, produkcia, testovanie, nákladnosť a iné [1]. Anderson [2] tvrdí, že až 80 % nákladov výrobku možno určiť do konca fázy návrhu. Preto sa pri návrhu musí zväžiť viacero požiadaviek, aby sa zabránilo hromadeniu dodatočných nákladov v neskorších krokoch vývoja.

S cieľom poskytnúť podporu kreativitě, umožniť rýchlejšiu výrobu a testovanie konceptov a urýchliť proces, boli vyvinuté rôzne konštrukčné programy. Pokrok v technológii, najmä v oblasti výpočtového výkonu, strojového učenia a súvisiacich algoritmov, položil základy pre vývoj inteligentných nástrojov na automatizáciu dizajnu. Vysokovýkonný výpočtový výkon, dostupný prostredníctvom cloudu, teraz umožňuje komplexné výpočty optimalizácie a iterácie, ktoré predtým nebolo možné

vykonať. Návrhári tak môžu spustiť pokročilé simulácie na testovanie rôznych konfigurácií produktov v rôznych podmienkach v krátkom čase, čo dáva hodnotné informácie pre správne zvolené rozhodnutia týkajúce sa každého aspektu návrhu. Na druhej strane rýchly vývoj aditívnych výrobných technológií vedie k významným zmenám vo výrobe a dizajne komponentov. Umožňujú výrobu komplexných geometrií, ktoré lepšie vyhovujú konštrukčným požiadavkám, pričom tieto nebolo možné vyrábať tradičnými výrobnými metódami [3]. Okrem toho sa vyvíjajú nové materiály, ktoré majú lepšie vlastnosti a sú kompatibilné s novými výrobnými technológiami.

Trendom používania CAD systémov je ich zakomponovanie do procesu návrhu, pričom táto integrácia je posilnená postupným zväčšovaním záberu a zvyšovaním možností týchto systémov [4]. Až do nedávneho objavenia sa programov, ktoré dokážu generovať návrhy v CAD na základe algoritmov, užívatelia aplikovali tradičný dizajnový pracovný postup, kde sa programy CAD používali iba na implementáciu návrhových nápadov, ale nie

na ich vývoj. Vyššie uvedené technologické pokroky viedli k zvýšenému záujmu o programy na vytváranie digitálnych návrhov a optimalizáciu, ktorých výsledkom boli zvyčajne ľahké štruktúry konštruované ako zložité organické tvary. Začiatkom 21. storočia začali inžinieri vyvíjať programy na optimalizáciu topológie založené na CAD, ktoré boli schopné generovať optimálne návrhy daných štruktúr. Takéto programy sú schopné upravovať existujúce návrhy, začleňovať explicitné prvky do dizajnu a vytvárať úplne nové návrhy; toto však väčšinou ocenili iba dizajnéri a inžinieri, a nie širšia oblasť produktového dizajnu [5]. Tento problém bol nedávno vyriešený zavedením programov generatívneho návrhu v softvéri CAD. Hlavným cieľom týchto programov je podporovať kreativitu dizajnérov vytváraním viacerých alternatív dizajnu.

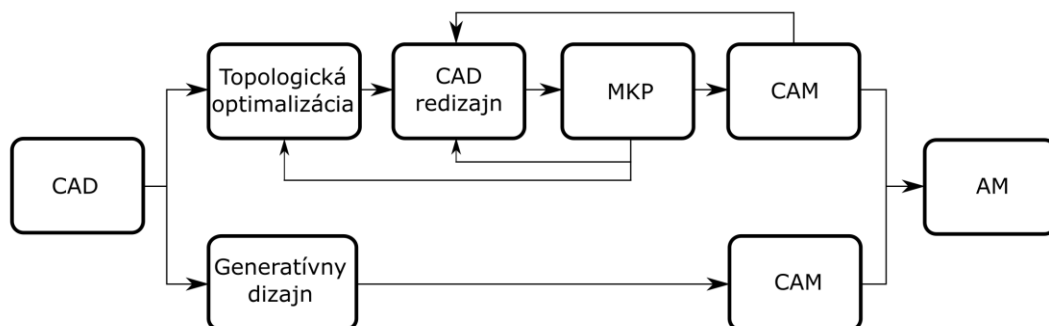
Cieľom tejto práce je preskúmať možnosti programov na optimalizáciu topológie a generatívneho návrhu a definovať výhody, nevýhody a rozdiely medzi nimi, aby sa dospelo k záveru, ktoré postupy by boli vhodnejšie na použitie vo fáze koncepcného návrhu.

1 METÓDY NÁVRHU

Konvenčný postup dizajnu začína procesom vývoja funkčných špecifikácií nad potrebami používateľov, ktoré sú zahrnuté v nasledujúcej fáze modelovania. Tie sa transformujú do geometrických tvarov pomocou CAD systémov. CAD systémy sa používajú najmä na tvorbu podrobného 3D modelu finálneho prvku a vytvorenie presných technických výkresov. Trojdimenzionálne modely sa potom overujú simulačnými programami, t. j. programami CAE (*Computer Aided Engineering*) a CAM (*Computer Aided Manufacturing*), pomocou analytických a testovacích funkcií, predtým, ako sú poslané do výrobných zariadení, ako sú obrábacie centrá, sústruhy alebo frézy, na výrobu finálneho produktu. Použitím systémov CAx (*Computer Aided Technologies*) [6] sa na jednej strane vyskytuje podpora a zjednodušenie dizajnu, na strane druhej môžu takéto systémy limitovať kreativitu návrhárov [7]. Je to hlavne preto, že súčasné CAD systémy umožňujú dizajnérom vytvárať 3D modely podľa

parametrického modelovania založeného na funkciách, ktorý bol zavedený na konci 80. rokov. Hlavnou výhodou tejto techniky bola jej schopnosť vytvárať flexibilné návrhy definované dizajnovými premennými a parametrickým charakterom. V nasledujúcich rokoch boli CAD systémy obohatené o ďalšie modelovacie a špecifické funkcie a taktiež boli integrované modulmi CAE a CAM, ktoré umožnili užívateľom pracovať v jednom virtuálnom prostredí. Moduly CAE umožňujú najmä analýzu konečných prvkov (MKP/FEA), pri ktorej sa štrukturálne štúdie riešia definovaním geometrie, medzných podmienok a počiatočných podmienok [8], zatiaľ čo CAM sa používa na posúdenie geometrie výroby vytvorenej v CAD prostredí. Po zvolení programu a cesty je možné vytvoriť a použiť kód v CNC stroji, ktorý vytvorí daný výrobok. Modelovací postup však zostal v podstate nezmenený a teda nepodporuje dizajnérov pri budovaní komplexnej geometrie modelov [9].

Príchod aditívnej výroby (AM) prelomil technologické obmedzenia subtraktívnej výroby, a taktiež ponúkol dizajnérom obrovský potenciál pre realizáciu tvarov a geometrií, ktoré nebolo možné dosiahnuť ešte pred niekoľkými rokmi. Napriek rastúcemu povedomiu o týchto potenciáloch, ako už bolo spomenuté, súčasné CAD systémy nedávajú inžinierom a dizajnérom možnosť ich plne využiť. Je to preto, že dizajnéri a užívatelia si musia prispôbiť funkcie navrhnuté pre konvenčné výrobné metódy, aby boli schopní vytvoriť zložitú geometriu výrobku. V skutočnosti CAD systémy používajú pre tieto funkcie rovnakú terminológiu ako tie, ktoré sa používajú vo výrobe a dizajne. Tieto funkcie sa potom vzťahujú na špecifické konvenčné výrobné procesy vyvinuté tak, aby ich efektívne využívali. Je preto jasné, že používanie CAD funkcií pre dizajn orientovaný na AM je únavná a pracovne náročná činnosť, ktorej výsledok do značnej miery závisí od individuálnych zručností a skúseností užívateľov [10]. V tejto súvislosti je zrejmé, že programy topologickej optimalizácie a generatívneho dizajnu by mohli byť efektívnou a užitočnou pomôckou nielen pre analýzu a optimalizáciu



Obr. 1 Schéma optimalizačných metód

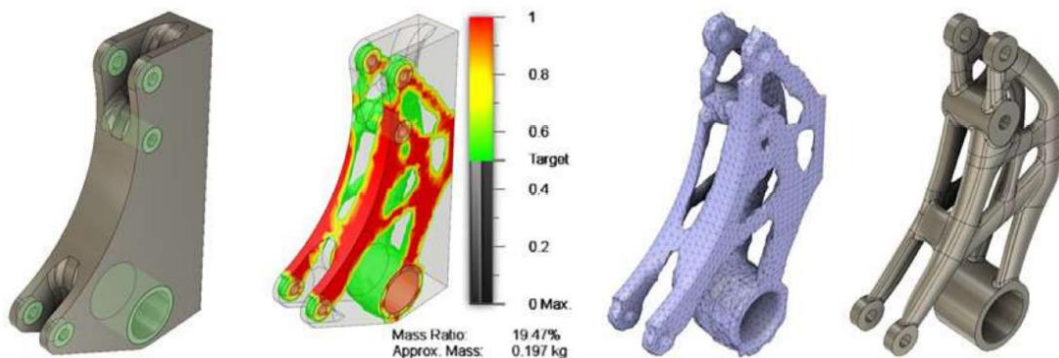
geometrických tvarov, ale najmä na podporu užívateľov v koncepčných a modelovacích fázach na definovanie tvaru 3D modelov.

Na rozdiel od tradičného dizajnového postupu, v ktorom sú CAD systémy používané na generovanie presnej geometrie, ktorá nasleduje po špecifikáciách užívateľa, zavedenie programov *TO* a *GD* umožňuje dizajnérom zamerať sa predovšetkým na funkciu navrhovaného výrobku namiesto formy, využitím optimalizačných programov na generovanie dizajnových alternatív. V skutočnosti, ako je znázornené na obr. 1, prvá etapa je spoločná pre obe metódy, kde je potrebné využiť CAD systém, ale len pre definíciu funkčných povrchov. Okrem toho je posledná fáza spoločná pre obe metódy a pozostáva z použitia CAM systémov na zabezpečenie presnej výroby. Na rozdiel od vyššie uvedených CAM systémov sú tieto systémy, špecifické pre AM, vytvorené na zvýšenie možnosti tlače, optimalizáciu orientácie dielu, počtu a typu podpier a len nedávno, na predpovedanie deformácií časti v dôsledku vysokého stresového gradientu vytvoreného počas tlače [11].

2 TOPOLOGIA

Topologická optimalizácia je metóda, ktorej cieľom je optimalizovať rozloženie materiálu v danom zvolenom priestore berúc do úvahy zaťaženie a medzné podmienky. Zvyčajne sa používa v počiatočnej fáze návrhu na preskúmanie a vyhodnotenie viacerých konštrukčných variantov podľa stanovených parametrov, ako je napr. zníženie hmotnosti, zvýšenie tuhosti, zníženie napätia, zníženie deformácií atď. [5]. Topologické optimalizačné programy sú vyvinuté na zjednodušenie práce užívateľov, ktorý vykonávajú iteratívne procesy navrhovania a analýzu viacerých variantov, taktiež podporujú kreativitu, pričom tá ponúka riešenia s ktorými sa často krát neuvažuje. Topológia optimalizácie je jednou z troch hlavných kategórií štruktúrnej optimalizácie spolu s optimalizáciou tvaru a rozmerov. Optimalizácia

tvaru zohľadňuje špecifikované parametre obrysov definovaných polohami uzlov, pričom musia byť pridelené konštrukčné kritériá a ciele (napr. zníženie koncentrácií napätia alebo zvýšenie únavovej životnosti) (obr. 2). Rozmerová optimalizácia mení hodnoty konštrukčných parametrov súvisiacich s prierezovými plochami prvkov s cieľom nájsť optimálne riešenie týkajúce sa hmotnosti, napätia, deformácií atď. Tá sa často aplikuje na úlohy týkajúce sa nosníkových konštrukcií, podporných tyčí a stavebných rámov. Na rozdiel od optimalizácie topológie tieto metódy neumožňujú prídanie alebo odstránenie nových prvkov alebo dutín v štruktúre prvku, iba zmenu hodnôt ich parametrov [12]. Okrem toho, metódy optimalizácie tvaru a rozmerov vyžadujú počiatočný parametrický model, aby bola optimalizácia možná, zatiaľ čo optimalizácia topológie vyžaduje iba definovaný počiatočný objem. Existuje mnoho metód topologickej optimalizácie založených na rôznych algoritmoch, ktoré môžu byť deterministické alebo stochastické. Stochastické algoritmy sú vhodnejšie pre vyhľadávanie viacerých riešení kvôli prvkovej náhodnosti, čo ich robí vhodnejšími pre koncepčnú fázu [13]. V algoritmoch sú objektívne funkcie zvyčajne definované ako funkcie minimalizácie alebo maximalizácie pre dané konštrukčné parametre. Každý optimalizačný algoritmus musí obsahovať aspoň jedno definované kritérium definujúce proces návrhu, čo je prípad jednoúčelovej optimalizácie (*SOA*). Často sa stáva, že existuje niekoľko kritérií, ktoré vytvárajú definíciu problému. Kritériá môžu byť protichodné, výsledkom čoho nie je jediné optimálne riešenie problému, ale určité množstvo riešení, ktoré spĺňajú dané kritériá avšak iným spôsobom. Metóda používaná na vyhľadávanie riešení, kde je potrebné splniť viacero kritérií, sa nazýva viac objektívna optimalizácia (*MOO*). Táto metóda je vhodná na použitie pri konštrukčných prípadoch, ktoré majú často protichodné kritériá. Jedným z typických príkladov protichodných kritérií je zníženie nákladov a zvýšenie koeficientu bezpečnosti, čo sa zvyčajne



Obr. 2. Postup topologickej optimalizácie vahadla

realizuje výberom materiálov, tuhosti a iných vlastností. Cieľom *MOO* je súčasne zahrnúť všetky kritériá do hľadaných riešení, ktoré majú najlepšie kompromisy medzi všetkými príslušnými kritériami. Prirodzene, tieto riešenia prinesú zlepšenie v jednom alebo niekoľkých aspektoch, avšak v iných sa zhoršia. To však neznamená že dané riešenia sú nepoužiteľné. Súbor bodov, ktoré majú rovnaké optimálne riešenia a ktoré nemožno zlepšiť v žiadnom z kritérií bez toho, aby sa znevýhodnilo aspoň jedno z ostatných, sa nazýva *Pareto - optimálny* [14]. Najčastejšie implementované metódy pre optimalizáciu topológie sú: metóda pevnej izotropnej mikroštruktúry s penalizáciou (*SIMP*) [15] ako metóda založená na prvkoch, diskrétné metódy, ako je evolučná metóda štruktúrálnej optimalizácie (*ESO*) [16], metóda nastavenia úrovni (*LSM*) [17] a kombinované metódy. Mnohé z komerčných topologických optimalizačných postupov používa metódu *SIMP*, ktorá je závislá siete, čo znamená, že vyžaduje počítačnú geometriu pre štúdiu. Tieto softwary sú z hľadiska funkčnosti schopné jedno objektivej optimalizácie alebo viac objektivej optimalizácie, ktorá je znížená na jeden objekt implementáciou zväží.

3 GENERATÍVNY DIZAJN

Výskum generatívneho dizajnu sa začal v 80. rokoch 20. storočia, ale v tom čase zahŕňal väčšinou publikácie, ktoré boli čisto teoretické, bez akéhokolvek príkladu aplikácie. S nadchádzajúcim rozvojom počítačov a technológií sa začali hľadať možné riešenia, ktoré by mohli využiť tieto nové zdroje na zlepšenie a umožnenie generatívneho dizajnu. Prvotný záujem sa prejavil v oblasti architektúry [18], ale čoskoro sa začali skúmať možné príležitosti a aplikácie aj v iných oblastiach, ktoré by kombinácia výpočtovej techniky a analógií čerpaných z evolučnej teórie mohla obohatiť. V oblasti projektovania, Vajna a kol. [19] zaviedli teóriu autogenetického dizajnu, kde skúmali podobnosti procesu navrhovania ako súčasti procesu vývoja produktu a prirodzeného procesu evolúcie. Uvádzajú, že „Proces vývoja produktu možno z evolučného hľadiska opísať ako nepretržitú optimalizáciu základného riešenia pri dodržaní počítačových podmienok, okrajových podmienok a obmedzení“. Tieto faktory ovplyvňujú vývoj dizajnu ako aj vytvárajú priestor pre dizajn. Môžu byť vyjadrené ako objednávky, požiadavky zákazníkov, spontánne nápady, usmernenia atď. a je možné ich meniť v priebehu procesu, ktorý je analogický zmenám prostredia vyskytujúcim sa v prírode. Kvôli pomerne veľkej oblasti aplikácií, stále neexistuje všeobecne akceptovaná definícia generatívneho dizajnu. *Shea a kol.* [18] opísal cieľ generatívneho

dizajnu nasledovne: „Systémy generatívneho dizajnu sú zamerané na vytváranie nových dizajnových procesov, ktoré vytvárajú priestorovo nové, no efektívne a zostaviteľné návrhy prostredníctvom využitia súčasných výpočtových a výrobných možností. *Krish* [20] ponúkol užšiu definíciu pre generatívny dizajn so zameraním na jeho implementáciu v *CAD*: „Generatívny dizajn je dizajnersky riadený, parametricky obmedzený proces skúmania dizajnu, ktorý funguje na založených parametrických *CAD* systémoch štruktúrovaných tak, aby podporovali dizajn ako vznikajúci proces.“. Avšak v súčasnosti existujú aplikácie v dizajne, ktoré nie sú viazané na parametrické modely a také, ktoré prekonávajú používanie štandardných *CAD* programov, napr. [21, 22].

Generatívny dizajn možno chápať ako metódu pri ktorej sa vytvára viacero návrhov, ktorá zahŕňa určitú mieru automatizácie a autonómie v procese. Evolučný prístup prírody je aplikovaný na proces navrhovania, počnúc jedným alebo viacerými rôznymi dizajnmi, a ktoré sa časom vyvíjajú do vhodnejších foriem pre dané stanovené podmienky. Návrhy, ktoré nevyhovujú podmienkam alebo nespĺňajú kritéria návrhu, sú vyradené a proces hľadania (vyvíjania) pokračuje inými smermi. Dizajnéri sú zapojení do procesu predovšetkým preto, aby stanovili obmedzenia a kritéria návrhu pred začiatkom generácie, ale mohli by byť zahrnutí aj zákazníci, aby mohli zasahovať do celého procesu generácie. Aj keď generatívny dizajn možno vykonať iba pomocou pera a papiera pomocou definovaného súboru pravidiel, tento výraz sa zvyčajne používa pre dizajn podporovaný výpočtom. Vygenerované výstupy môžu mať rôzne podoby: obrázky, modely, zvuky, animácie atď., a preto je možné túto metódu použiť v rôznych oblastiach ako architektúra, dizajn, umenie, hudba, móda a mnoho ďalších. Generatívny dizajn zvyčajne súvisí s použitím algoritmov ako základu pre tvorbu dizajnu.



Obr. 3. Postup generatívneho dizajnu vahadla

Nedávno boli zavedené generatívne konštrukčné programy ako samostatné moduly v mnohých komerčných *CAD* softvéroch pre dizajn. Programy

generatívneho návrhu sú spočiatku založené na algoritmoch používaných pri optimalizácii topológie, konkrétne na *LSM* metóde [17]. Pracujú s variabilnými hranicami namiesto lokálnych premenných hustoty, preto majú schopnosť byť sieťovo nezávislé [23], čím majú iné požiadavky na nastavenie dizajnu ako optimalizácia topológie. *LSM* sa vyznačuje flexibilitou a schopnosťou zvládať náročné topologické zmeny (obr. 3).

4 OPTIMALIZÁCIA TVARU TELIES OZUBENÝCH KOLIES

Pri optimalizácii tvaru telies ozubených kolies a to či už pri využití optimalizácie topológie alebo generatívneho dizajnu je dôležité si uvedomiť, že žiadna z vykonaných zmien nesmie vo veľkej alebo žiadnej miere ovplyvniť mechanické vlastnosti ozubenia. Menovite tuhosť, ktorá je samozrejme závislá na deformácii.

Proces optimalizácie začína z geometricky jednoduchšieho telesa, kde vieme zadefinovať jednotlivé parametre prvkov, ktoré budú použité pre vyplnenie optimalizovaného miesta. Tieto prvky môžu byť rovnomerne rozmiestnené v danom priestore.

Ďalej je tu možnosť „zbavenia sa“ prebytočného materiálu, kde si užívateľ vopred preddefinuje kritéria. Jedným z kritérií môže byť symetrickosť alebo aj asymetrickosť vytvorených prvkov, vytvorenie odľahčovacích otvorov a taktiež preddefinovanie minimálnej hrúbky prvkov.

Na obr. 4a) sú znázornené koeficienty bezpečnosti (v tomto prípade čím nižšie tým lepšie). Ako možno vidieť tak pojednávané koleso má potenciál pre optimalizáciu nakoľko koncentrátoary napätia majú vysokú bezpečnosť. Na obr. 4b) sú vyfiltrované časti, ktoré je potrebné zachovať, v opačnom prípade

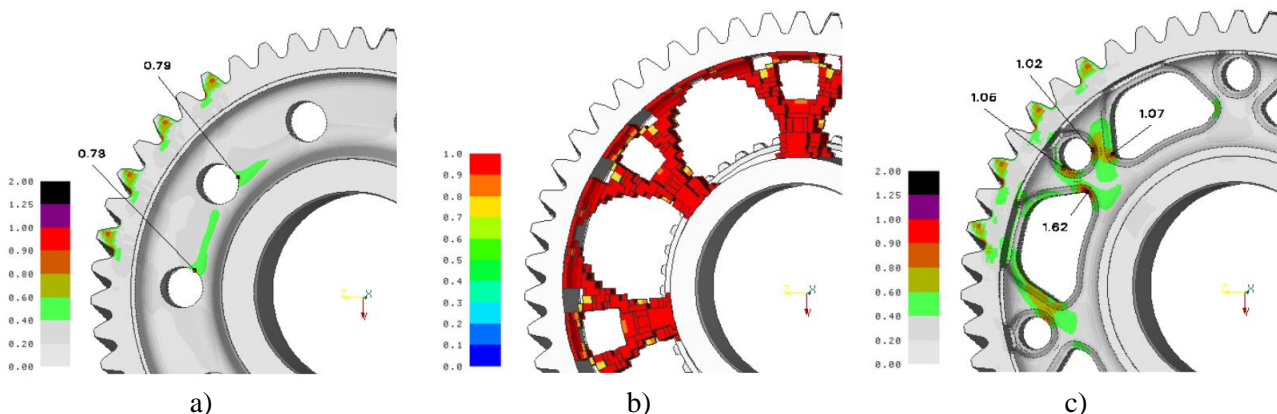
problém že po opätovnej analýze pomocou *MKP* boli zistené koncentratory napätia s koeficientom vyšším ako 1. V tomto prípade je každý takýto koeficient nežiaduci nakoľko daný materiál nevydrží. Po tomto zistení nasleduje opätovná úprava prvkov tela ozubeného kolesa berúc do úvahy tieto zistenia. Postup bol do značnej miery manuálny za účelom zaistenia ľahkej obrobiteľnosti kolesa pomocou konvenčných technológií.

ZÁVER

Optimalizácia topológie zvyčajne používa metódy optimalizácie závislé od siete, ako je *SIMP*, ktorá je široko skúmaná a upravená na úroveň, ktorá poskytuje užitočné optimálne výsledky, avšak počítačová geometria potrebná pre štúdiu obmedzuje konečný tvar generovaných návrhov. Na vyriešenie tohto problému z pohľadu používateľa je možné nastaviť počítačový model ako veľmi veľký dizajnový priestor, ale tento proces môže vyžadovať značné úsilie, ak existuje viacero komponentov so zložitými geometriami okolo cieľovej konštrukčnej časti. Ďalšou nevýhodou tohto programu je, že v rámci jednej štúdie vytvorí iba jeden dizajn.

Na druhej strane programy generatívneho návrhu založené na metóde množiny úrovní pre optimalizáciu nevyžadujú plne definovaný priestor na návrh, čo ponecháva viac možností pre algoritmus variácií návrhu. Nastavenie geometrie štúdie pre generatívny dizajn by však vyžadovalo, aby užívateľa prijali iný spôsob myslenia a prístupu k dizajnu. Programy generatívneho návrhu sú pomerne nové a ich algoritmy si stále vyžadujú ďalšie úpravy, aby bolo možné dosiahnuť kvalitné výsledky.

V súčasnosti ani jeden z programov nezohľadňuje náklady na materiál a výrobný proces, čo je jedným z hlavných problémov konštruktérov, preto by sa jeho



Obr. 1 Optimalizácia tela ozubeného kolesa

nastane nežiaduca koncentrácia napätia čo bude viesť k poškodeniu súčiastky za daných predpokladaných prevádzkových podmienok. Obrázok 4c) zobrazuje manuálne dotvorenú geometriu s ohľadom na obr. 4b), avšak nastáva

implementácia mala zväžiť pri budúcich verziách programov. Je však potrebný ďalší výskum, aby sa zistilo, ako by implementácia týchto programov v počítačových fázach ovplyvnila pracovný proces súčasného dizajnéra.

Pod'akovanie

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia projektu KEGA 029TUKE-4/2021 „Implementácia moderných edukačných prístupov pri konštruovaní prevodových mechanizmov.“

LITERATÚRA

- [1] WANG, L. - SHEN, W. - XIE, H. - NEELAMKAVIL, J. - PARDASANI, A. (2002): *Collaborative conceptual design — state of the art and future trends*: Computer-Aided Design, 34(13), pp.981-996.
- [2] ANDERSON, D. (2014): *Design for Manufacturability*: CRC Press.
- [3] BICI, M. - BROGGIATO, G. - CAMPANA, F. (2016): *Topological Optimization in Concept Design: starting approach and a validation case study*: Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp.289-299.
- [4] HORVÁTH, I. (2004): *On some Crucial Issues of Computer Support of Conceptual Design*: Product Engineering, pp.123-142.
- [5] QUERIN, O. (2017): *Topology design methods for structural optimization*. London, United Kingdom: Academic Press.
- [6] WERNER DANKWORT, C. - WEIDLICH, R. - GUENTHER, B. - BLAUROCK, J. (2004): *Engineers' CAx education—it's not only CAD*: Computer-Aided Design, 36(14), pp.1439-1450.
- [7] BARBIERI, L. - CALZONE, F. - MUZZUPAPPA, M. (2019): *Form and Function: Functional Optimization and Additive Manufacturing*: Springer: Cham, Switzerland, pp. 649–658.
- [8] BATHE, K. (1982): *Finite element procedures in engineering analysis*: Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- [9] TANG, Y. - ZHAO, Y. (2016): *A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance*: Rapid Prototyping Journal, 22(3), pp.569-590.
- [10] THOMPSON, M. - MORONI, G. - VANEKER, T. - FADEL, G. - CAMPBELL, R. - GIBSON, I. - BERNARD, A. - SCHULZ, J. - GRAF, P. - AHUJA, B. - MARTINA, F. (2016): *Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints*: CIRP Annals, 65(2), pp.737-760.
- [11] PAGAC, M. - HAJNYS, J. - HALAMA, R. - ALDABASH, T. - MESICEK, J. - JANCAR, L. - JANSKA, J. (2021): *Prediction of Model Distortion by FEM in 3D Printing via the Selective Laser Melting of Stainless Steel AISI 316L*: Applied Sciences, 11(4), p.1656.
- [12] TEJANI, G. - SAVSANI, V. - PATEL, V. - SAVSANI, P. (2017): *Size, shape, and topology optimization of planar and space trusses using mutation-based improved metaheuristics*: Journal of Computational Design and Engineering, 5(2), pp.198-214.
- [13] MEYER, A. - VAJNA, S., (2018): *Support of searching for solutions by automated structural optimization*. 15th International Design Conference.
- [14] DEB, K. (2001): *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms: An Introduction*.
- [15] ROZVANY, G. (2000): *The SIMP method in topology optimization - Theoretical background, advantages and new applications*.
- [16] XIE, Y.M. - STEVEN, G.P. (1994): *Optimal design of multiple load case structures using an evolutionary procedure*: Engineering Computations, 11(4), pp. 295-302.
- [17] JIA, H. et al. (2011): *Evolutionary level set method for structural topology optimization*: Computers and Structures, 89(5-6), pp. 445-454.
- [18] SHEA, K. - AISH, R. - GOURTOVAIA, M. (2005): *Towards integrated performance-driven generative design tools*: Automation in Construction, 14(2), pp. 253-264.
- [19] VAJNA, S. et al. (2005): *The Autogenetic Design Theory: An evolutionary view of the design process*: Journal of Engineering Design, 16(4), pp. 423-440.
- [20] KRISH, S. (2011): *A practical generative design method*: Computer-Aided Design, 43(1), pp. 88-100.
- [21] CHEN, X. et al. (2018): *Forte: User-Driven Generative Design*: Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems 2018, ACM Press, New York, New York, USA, pp. 1-12.
- [22] KAZI, R.H. et al. (2017): *DreamSketch: Early Stage 3D Design Explorations with Sketching and Generative Design*: Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '17, ACM Press, New York, New York, USA, pp. 401-414.
- [23] TYFLOPOULOS, E. et al. (2018): *State of the art of generative design and topology optimization and potential research needs*.

Optimalizácia procesu ťahania gumou s využitím numerickej simulácie

Juliy Martyn Kulya, Ing.*

Katedra automobilovej výroby, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Mäsiarska 74, 040 01 Košice.
E-mail: juliy.martyn.kulya@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 3528

Miroslav Tomáš, doc. Ing. PhD.

Katedra automobilovej výroby, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Mäsiarska 74, 040 01 Košice.
E-mail: miroslav.tomas@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 3524

Emil Evin, prof. Ing. CSc.

Katedra automobilovej výroby, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Mäsiarska 74, 040 01 Košice.
E-mail: emil.evin@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 3547

Optimisation of rubber forming process by using numerical simulation

Abstract: The paper focuses on the manufacturability optimization of the of case made of aluminium by the rubber forming process. Al6016 aluminium was considered as the material for the cover and its constitutive equations were defined by Hill 48 and Hollomon models. The Mooney-Rivlin hyperelastic material model described the material properties of the rubber-made punch. Simulation model was built in Pam stamp software and the results were evaluated as well. The results were optimized in terms of thickness thinning and punch stroke, for two different rubber hardness.

ÚVOD

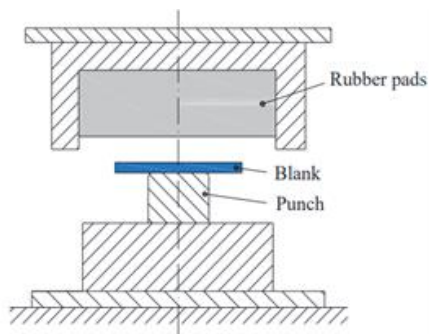
Tvárnenie gumou je jednou z nekonvenčných technológií tvárnenia, rovnako ako hydroforming, elektromagnetické tvárnenie, tvárnenie výbuchom a inkrementálne tvárnenie [1-3]. Tvárnenie gumou je výhodné na výrobu prototypových výliskov, kde úlohu matrice tvorí guma a nie je potrebný žiadny pridržiavač pre polotovar, čo zjednodušuje konštrukciu nástroja a výrobu prototypov. Metóda *Guerin* (obr. 1) využíva princíp rozťažnosti gumy uzavretej v oceľovom puzdre. Výhodou je, že guma nezanecháva na povrchu žiadne stopy. Nevýhodou je potreba veľkých síl, hoci veľké tlaky majú pozitívny vplyv na zvýšenie plasticity [1, 2]. Metóda *Marform* (obr. 2) je vhodná aj na hlboké ťahanie oceľových a nežeľzných plechov. Rozdiel je vo vrstve gumy - výška gumy musí byť trojnásobkom výšky výlisku, aby sa zabránilo rýchlemu opotrebovaniu a strate pružnosti gumy [2, 3].

V praxi a vo výskume viacerí autori porovnávali technológiu tvárnenia gumou s inými technológiami tvárnenia. *Peng* a kol. [4] skúmali tvárnenie gumou pre rôzne materiály, kde skúmali vplyv tvrdosti gumy na výsledok procesu. Pri simulácii autori použili hyperelastický *Mooney-Rivlinov* model na

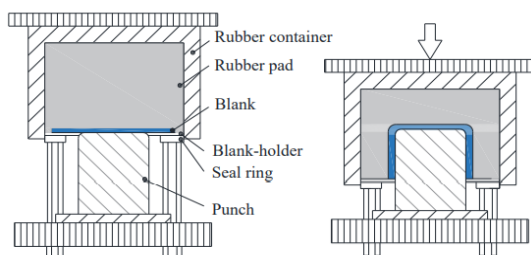
opis vlastností gumového ťažníka. Výsledkom skúmania bolo určenie tvrdosti gumy a trenia na dosiahnutie rovnomerného tvárnenia bez porušenia. *Afteni* a kol. [5], sumarizovali technológie tvárnenia gumou, kde opísali výrobu rôznych typov výliskov a rôzne typy výrobných metód - *Guerinov* proces, *Marform* proces, *Maslennikovov* proces, *Demarestov* proces, *Verson-Wheelonov* proces, *Verson-Hydroform* proces a *SAAB* proces. Analyzovali tiež výsledky numerickej simulácie vybraných technológií tvárnenia gumou pre vybrané typy výliskov pre automobilový a letecký priemysel. *Younis* a kol. [6] skúmali proces ťahania valca pomocou gumy a na overenie numerickej simulácie tvárnenia gumou použili experimentálne výsledky. Gumová tyč bola vyrobená z polyuretánu s rôznou tvrdosťou a hrúbkou. Numerickej simulácii boli určené vhodné parametre procesu pre rôzne tvary dna valcového výtlačku.

Príspevok predstavuje prípadovú štúdiu vyrobiteľnosti plechového komponentu - krytu - metódou tvárnenia pomocou gumy. Cieľom štúdie bolo overiť tvárniteľnosť hliníkového plechu pri spracovaní technológiou tvárnenia gumou. Proces bol optimalizovaný pre dve rôzne tvrdosti gumy

určené pre ťažník z hľadiska vplyvu na stenčenie materiálu a kontakt medzi ťažnicou a výlisikom.



Obr. 1 Metóda ťahania Guerin [5]



Obr. 2. Metóda ťahania Marform [5]

1 METODIKA NUMERICKEJ SIMULÁCIE

Hliník 6016 je hliníková zliatina série 6000: obsahuje významné legovanie horčíkom aj kremíkom a je určená primárne na tvárnenie. Označenie podľa normy EN je *AlSi1,2Mg0,4*. Hrúbka materiálu bola $a_0 = 1,2$ mm. Mechanické vlastnosti sú uvedené v Tab. 1 a základné údaje o materiáli boli použité nasledovne:

- Hustota: $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
- Youngov modul: $7\cdot 10^5$ MPa.
- Poissonova konštanta: 0,3.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti hliníka Al6016

Al6016	R_e [MPa]	r_0 [-]	r_{45} [-]	r_{90} [-]	K [MPa]	n [-]
	116	0,38	0,48	0,66	425	0,26

kde R_e je medza klzu (0°),

r_0 , r_{45} a r_{90} sú súčinitele normálovej anizotropie v smeroch 0° , 45° a 90° vzhľadom k smeru valcovania,

K je materiálová konštanta a n je exponent deformačného spevnenia.

1.1 Konštrukčné materiálové rovnice

Na opis správania sa materiálu počas simulácie je potrebné definovať podmienku plasticity a krivku spevnenia. Hill 48 predstavuje anizotropnú podmienku plasticity, ktorá zahŕňa súčinitele normálovej anizotropie uvedené v tab. 1. a ktorá bola použitá na opis prechodu medzi pružnou a plastickou oblasťou podľa vzťahu [7, 8]:

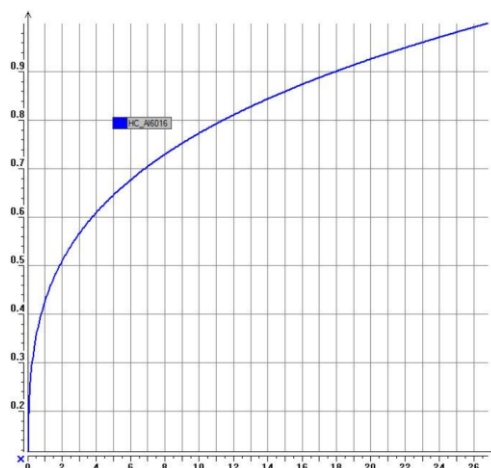
$$\sigma_1^2 = \frac{r_0 \cdot (1+r_{90})}{r_{90} \cdot (1+r_0)} \cdot \sigma_2^2 - \frac{2 \cdot r_0}{(1+r_0)} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 = (\sigma_1^y)^2 \quad (1)$$

Spevňovanie materiálu za medzou klzu bol použitý Hollomonov model spevnenia [9-11]:

$$\sigma = K \cdot \varphi^n \quad (2)$$

kde K je materiálová konštanta,

n je exponent deformačného spevnenia. Hodnoty konštánt pre Al6016 sú uvedené v tab. 1. Krivka napätie-deformácia na základe tohto modelu materiálu je znázornená na obr. 3.



Obr. 3. Krivka spevnenia materiálu Al6016

1.2 Materiálový model ťažníka

Materiál ťažníka z gummy bol definovaný Mooney-Rivlinovým hyperelastickým modelom. Na obr. 4 sú uvedené všetky parametre materiálu ťažníka, ktoré boli použité na simuláciu.



Obr. 4. Simulačný model pre spätné ťahanie modelového výťažku

V Mooneyho-Rivlinovom zovšeobecnenom modeli je hustota deformačnej energie v prípade stlačiteľnosti vyjadrená vzťahom [4, 12]:

$$W = W(I_1, I_2, I_3) = A(I_1 - 3) + B(I_2 - 3) + W(I_3) \quad (3)$$

kde W je hustota deformačnej energie,

A a B sú materiálové parametre,

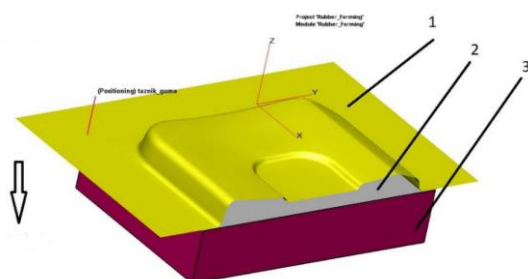
$W(I_3)$ je funkcia pre nestlačiteľnosť (pre Poissonovo číslo $\nu = 0,499$),

I_1 , I_2 a I_3 sú invarianty deformácií [11]. Parametre *Mooneyho-Rivlinovho* modelu pre dve tvrdosti gumového ťažníka použité pri simuláciách sú uvedené v tab. 2.

Tab. 2. Parametre *Mooney-Rivlinovho* modelu pre gumový ťažník [4]

Tvrdosť gummy [Shore °]	Konštanta A [MPa]	Konštanta B [MPa]
55	0,832	0,096
70	0,736	0,0184

Simulačný model, znázornený na obr. 5, bol vytvorený pre technológiu tvárnenia gumou. Model vychádza z tvaru ťažnice (1), ktorá bola importovaná do *PamStampu* vo formáte *.igs. Ďalej bol v simulačnom softvéri vytvorený gumový ťažník (3) a polotovar (2). Pri simulácii bol použitý obdĺžnikový polotovar s rozmermi 380x296 mm. Adaptívne sieťovanie bolo nastavené na polotovar s cieľom znížiť výpočtový čas s počiatočnou veľkosťou prvku 3,2 mm a úrovňou presieťovania 2. Ťažnica bola nastavená ako tuhý nástroj bez možnosti deformácie; gumový ťažník bol nastavený ako objemový nástroj a jeho vlastnosti boli definované *Mooney-Rivlinovým* hyperelastickým modelom materiálu.

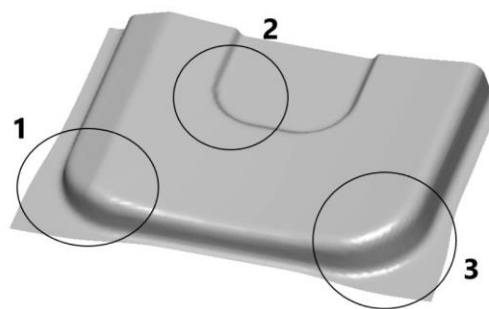


Obr. 5. Simulačný model ťahania gumou

2 DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

Výsledky simulácie tvárnenia hliníkového plechu boli hodnotené v 3 rôznych pozíciách, ktoré sú dôležité na dosiahnutie úplného kontaktu polotovaru a ťažnice na konci tvárnenia. Na obr. 6 sú znázornené vybrané pozície použité na posúdenie kontaktu polotovaru a ťažnice.

Pri tvrdosti Shore 55 pre gumový ťažník pri zdvihu 25 mm nedochádza k úplnému kontaktu vo všetkých troch vybraných polohách. Ak sa zdvih zvýši na 30 mm, potom dochádza k plnému kontaktu v rohoch ťažnice v polohách 1 a 3, vo vnútornej polohe výstupku 2 nedochádza k plnému kontaktu. Plný kontakt vo všetkých 3 polohách sa dosiahol pri zdvihu 35 mm.



Obr. 6. Rozhodujúce pozície na výlisku

V prípade tvrdosti gumového ťažníka Shore 70 pri zdvihu 25 mm sa tiež nedosiahol kontakt vo všetkých 3 polohách, pričom vyplnenie ťažnice bolo väčšie v porovnaní s tvrdosťou gummy Shore 55. Po zvýšení zdvihu na 30 mm došlo k úplnému kontaktu vo všetkých 3 polohách. Rovnako plný kontakt možno vidieť pri zdvihu 35 mm.

Zo všetkých simulácií boli vybrané dva najvhodnejšie varianty s rôznymi tvrdosťami gumového ťažníka. Pre Shore 55 je najvhodnejšia verzia so zdvihom 35 mm, pretože verzia so zdvihom 30 mm a zdvihom 25 mm nestačí na úplnú deformáciu plechu. Pre Shore 70 bol vybraný zdvih 30 mm, pri ktorom bol dosiahnutý plný kontakt plechu vo všetkých pozíciách. Verzie so zdvihom 25 mm nestačia na dosiahnutie plného kontaktu pre dve rôzne vybrané tvrdosti gummy.

V tab. 3 sú uvedené hodnoty stenčenia plechu vo vybraných pozíciách s rôznymi pre skúmané tvrdosti gummy a zdvihy ťažníka.

Tab. 3. Výsledky stenčenia plechu v 3 rôznych pozíciách pre dve rôzne tvrdosti gummy

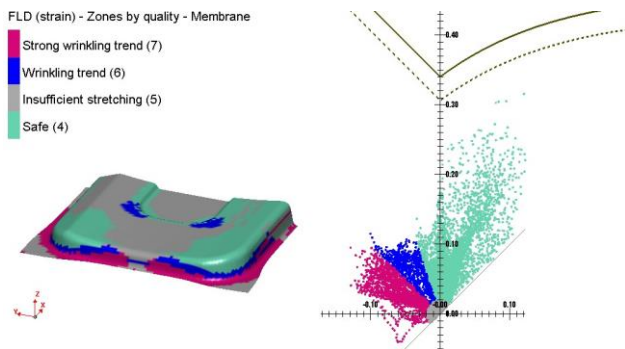
Tvrdosť gummy	Zdvih [mm]	Stenčenie [%]		
		Pozícia 1	Pozícia 2	Pozícia 3
Shore 55	25	15	7	9
	30	37	8	31
	35	37	8	31
Shore 70	25	27	9	28
	30	40	7	33
	35	40	7	33

Výsledky boli určené pomocou priebehu stenčenia, ktorý bol vytvorený v rovine rezu. Rovina bola umiestnená v najkritickejšom bode každej pozície. V tabuľke je uvedená najväčšia hodnota stenčenia plechu v každej pozícii.

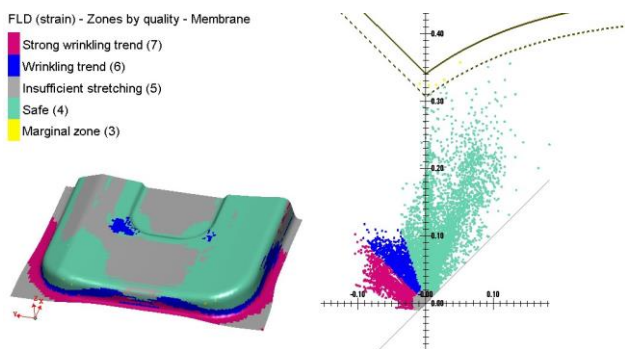
V prípade tvrdosti gummy Shore 55 došlo k porovnateľnému stenčeniu pri zdvihu 30 a 35 mm s maximálnou hodnotou 37 % v polohe 1. Podobne v prípade tvrdosti gummy Shore 70 je stenčenie porovnateľné pri 30 a 35 mm zdvihu s maximálnou hodnotou 40 %.

Po vyhodnotení výsledkov simulácie (kontakt, stenčenie) môžeme konštatovať, že na porovnanie vplyvu tvrdosti gumy sú vhodné dva varianty: pre tvrdosť Shore 55 je vhodný variant so zdvihom 35 mm a pre tvrdosť Shore 70 je vhodný variant so zdvihom 30 mm.

Rozloženie deformácií pri tvárnení gumou s rôznymi tvrdosťami a zdvihom je uvedené na obr. 7 pre tvrdosť gumy Shore 55 a zdvih 35 mm, resp. na obr. 8 pre tvrdosť gumy Shore 70 a zdvih 30 mm. Je možné konštatovať, že pri tvárnení predmetného krytu gumou nedôjde k porušeniu materiálu (hliníkového plechu) pre obidve tvrdosti gumy. Pri použití gumy s nižšou tvrdosťou je vyššia miera bezpečnosti procesu ťahania, nakoľko sú deformácie nižšie pod krivkou medzných deformácií.



Obr. 7. FLD diagram a rozloženie deformácií pri tvrdosti gumy ťažníka Shore 55 a zdvihu 35 mm



Obr. 8. FLD diagram a rozloženie deformácií pri tvrdosti gumy ťažníka Shore 70 a zdvihu 30 mm

ZÁVER

Príspevok rieši problematiku technológie tvárnenia plechov pomocou gumy. Cieľom bolo porovnať tvárnosť hliníkového plechu pri tvárnení gumovým ťažníkom s dvoma rôznymi tvrdosťami gumy Shore 55 a Shore 70.

Na základe výsledkov simulácie je možné konštatovať, že na porovnanie vplyvu tvrdosti gumy na tvárnosť plechu sú vhodné varianty pre Shore 55 so zdvihom 35 mm a pre Shore 70 so zdvihom 30 mm. Zvýšená tvrdosť gumy má za následok vyššiu hodnotu stenčenia (40 %) ako mäkkšia guma (37 %). Väčšie stenčenie je dôsledkom väčšieho prítlaču gumy z dôvodu jej vyššej tvrdosti.

Guma s tvrdosťou Shore 55 si vyžaduje väčší zdvih (35 mm) ako tvrdšia guma na dosiahnutie maximálneho kontaktu materiálu s ťahom. Oba varianty vykazujú tvárnenie bez porušenia.

Pod'akovanie

Výskum bol financovaný Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva Slovenskej republiky v rámci projektu VEGA 2/0800/19.

LITERATÚRA

- [1] MORAVEC, J. (2011): *Nekonvenčné metódy tvárnenia*, Žilina: EDIS-Žilinská univerzita, Slovensko, 187 s.
- [2] LENFELD, P. (2016): *Tvárení II*, Liberec: TU v Liberci, ČR, 110 s.
- [3] TKÁČOVÁ, J. (2017): *Vybrané konvenčné a nekonvenčné technológie*. Košice: TU, Slovensko, 183 s.
- [4] PENG, L. - HU, P. - LAI, X. - MEI, D. - NI, J. (2009): *Investigation of micro/meso sheet soft punch stamping process – simulation and experiments*. Materials & Design, Vol. 30, p. 783-790.
- [5] AFTENI, C. - COSTIN, G. - IABOB, I. - PAUNOIU, V. - VIRGIL, T. (2018): *A review on sheet metal rubber-pad forming*. The Annals of „Dunărea de Jos” University of Galați, Fasc. VI, p. 1-6.
- [6] YOUNIS, K.M. - ALJARJARY, A.I. - SHUKUR, J.J. (2019): *Numerical and experimental investigation of parameters affect the forming load during rubber pad sheet metal forming*. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, Vol. 518(3), p. 1-12.
- [7] BANABIC, D. (2010): *Sheet metal forming processes – constitutive modelling and numerical simulation*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, Switzerland, 301 s.
- [8] SLOTA, J. (2016): *Numerická simulácia tvárnenia plechov*, Košice: TU, Slovensko, 194 s.
- [9] HRIVNAK, A. - EVIN, E. (2004): *Tvárniteľnosť plechov*, Košice: TU, Slovensko, 223 s.
- [10] TOMÁŠ, M. - EVIN, E. - KEPIČ, J. - HUDÁK, J. (2019): *Physical Modelling and Numerical Simulation of the Deep Drawing Process of a Box-Shaped Product Focused on Material Limits Determination*, Metals, 9, art. num. 1058.
- [11] SCHREK, A. - BRUSILOVÁ, A. - ŠVEC, P. - GÁBRIŠOVÁ, Z. - MORAVEC, J. (2020): *Analysis of the Drawing Process of Small-Sized Seam Tubes*. Metals, 10, 709.
- [12] *PamStamp users guide*, ESI group (2020).

Boridation of sintered carbides and Cr-Mo-V steel

Elena Kantoríková, Ing., PhD.*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: elena.kantorikova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2763

Ján Moravec, doc. Ing., PhD.

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

Abstract: The article describes the method of boriding sintered carbides type *H1 (K10)* and *G1 (K20)* and tool steel *Cr-Mo-V*. The aim of this work is to analyze the knowledge about boriding of steels with the focus on the technological assumptions of the use of boriding in the production process of forming tools in order to increase the resistance to friction, abrasive and adhesive wear. Interestingly, boriding is still an unconventional method of surface treatment. The presented work deals with the structural analysis of borided layers. Steel samples of 1.2365 material and sintered carbides *H1 (K10)*, *G1 (K20)* borided with *EKabor 2* powder were monitored. For the testing of metallographic samples, the methodology developed for the study of the microstructure of sintered carbides was developed. The monitored samples, borided at 900 °C for 240 min, obtained a uniform layer 5 μm thick. An increase in microhardness of more than 700 HVM was measured for carbide *H1 (K10)* and almost 1500 HVM for *G1 (K20)*. The increase in hardness is due to the formation of dispersed cobalt borides *Co₂B* and *CoB*.

INTRODUCTION

Boridation can still be classified as an unconventional method of chemical-thermal treatment. Active boron can form borides of the *FeB* and *Fe₂B* type on the surface layer of borided components, which have a higher hardness than nitrided layers [1-3]. Active boron is formed in a saturating medium, which can be liquid, gaseous or solid in the form of powders and pastes. New possibilities for using and applying the known properties of metallic materials are constantly being sought. One of the possibilities is diffusion boriding because it can increase the service life of components and expand the field of application of construction materials [3, 4].

By boriding we mean saturating the surface of metals with boron, to increase the wear resistance during abrasive friction and friction at high temperatures. In terms of achieving surface hardness (approx. 2000 HV), boriding is the most effective method of surface hardening of steel components. Boridation research shows a precondition for successful application [5]. The method is suitable for simple components without sharp edges and high compressive or tensile stresses in the surface layer. Boridation on diesel pump liners has been practically verified, where they have shown higher abrasion resistance compared to cemented, nitrided or galvanically chromium-plated layers [5, 6]. An increase in abrasion resistance was also achieved for

tractor belt inserts, wire drawbar drawbars, drill bits for oil wells and punches.

Borided layers are also characterized by a low tendency to cold seize, which leads to their use on tools for chip and chipless machining [7, 8].

Boridation is based on the fact that the desired combination of properties is achieved by the diffusion of a foreign element into the surface of the part. While in cementation it is required to maintain a continuous transition from hard edge zone to soft core after curing and in nitriding a diffusion zone plays an essential role, only edge zone is important in boriding, i.e. boride layer [8-10]. The hardness profile in Fig. 1.

During boriding, a diffusion layer forms on the surface of the component in accordance with the *Fe-B* binary system. The actual surface is boron *FeB* (wt. Content 16.25% *B*), below it is the interlayer *Fe₂B* (8.84% *B*), deeper below the surface is a solid solution in *Fe* (α -phase), which touches the core [10]. During the boriding of alloy steels, complex borides of iron and alloying elements are formed on the surface. On carbon and low-alloy steels, the boride layer penetrates the core of the component in a characteristic, clearly toothed manner on the cut [11, 12].

The solubility of carbon in borides is exceptionally low (below 0.047 % C), so as borate crystals grow from the surface towards the core, carbon diffuses into the core and the concentration under the borided

layer increases at the same time. By displacing carbon with boron from the diffusion layer, such a carbon content just below the boride layer can be increased to a eutectoid concentration even in low-carbon steels. The chemical elements *Mo*, *W*, *Cr* slow down the growth of the layer and limit the formation of *FeB* teeth [10]. The layer thickness decreases and is smaller than that of carbon steels. This is caused by the diffuse transfer of these elements into the core (from the boride layer). At the same time, some elements diffuse from the core to the layer (*Ni*, *Mn*, *Si*). Silicon and carbon do not dissolve in the boride layer and are pressed into the matrix below the layer. This results in an additional intermediate layer with a hardness of only about 300 HV, which lies between the core and the surface layer in the case of steels with a *Si* content of about 1 % [10].

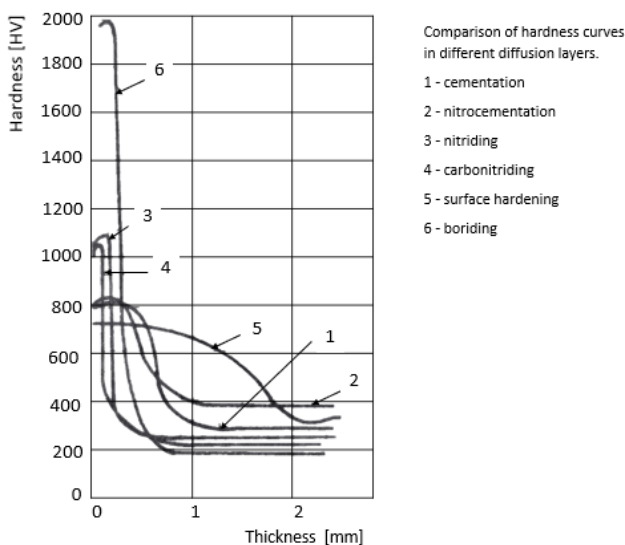


Fig. 1. The hardness profiles

The surface layer, austenitic steels with increased *Cr* content, consists mainly of *FeB*. The space between the grains is filled with boron compounds, therefore the adhesion of the borided layer is reduced. When the component is subjected to impact, the layer may peel off. Steels with a high *Cr* and *Ni* content have a higher surface roughness, therefore steels intended for boriding must not have a *Cr* content greater than 5 %.

Depending on the boron concentration and the boronation medium, the thickness and articulation of the individual bands of the borided layer differ, and some of the layers may be absent [11, 12]. The total thickness of the diffusion layer is in the range of 0.1 to 0.3 mm, the most suitable layer for industrial use is a layer with a thickness of about 0.2 mm.

The microhardness of *FeB* is between 1800 and 2200 HVM. alloying elements have minimal effect on the hardness of this component. The elements that slightly reduce the microhardness are *Al*, *Ni*, *Cu*, and the elements that slightly increase it are *Mo*, *W*, *Mn*,

Cr. Information on *Fe₂B* microhardness is different [17]. We can find that it is lower than *FeB* (1600 to 1800 HVM), but also higher (2200 to 2400 HVM). Hardness of *Fe₂B* does not affect the content of carbon or alloying elements. The hardness of borides does not depend on heat treatment either. The properties of solid solution α are not described in detail in the literature, but it can be assumed that they are (unlike borides) strongly dependent on the chemical composition of steel and its heat treatment after boriding [12].

1 PROBLEM STATEMENT

The first boriding experiments were performed by molten borax electrolysis. Boridation in solids, i. in powder or granular mixtures. From a technological point of view, boriding processes differ in the environment that carries the active boron, which diffuses into the surface layer of the components to form hard borides. The advantage of boriding in a solid environment is the wide variability, which allows you to change the potential of the boriding medium as needed [13].

The paper deals with the field of chemical-thermal treatment, specifically the sphere of boriding of active parts of forming tools. In practice, we encounter a situation where the active parts of the forming tools must be discarded, respectively. adjusted in various ways to achieve previous performance. Today, there are many classic and modern methods to increase the durability and longevity of such parts, where the most important are their surfaces, which must withstand operational influences. Among an entire range of heat treatment, chemical-thermal treatment, coating and other methods, the application of boriding technology of active surfaces has somehow remained in the background. In their contribution, the authors point out the theoretical basis and their applications in operation. The experimental part offers a good starting platform for the application of the presented technology on a wider scale in the field of production of components by forming.

The basic hypothesis was to examine the possibilities of using boriding technology to extend the durability of active surfaces. The analysis of the process determined that it was necessary to design samples on which the method was tested under laboratory conditions. During the research, our assumptions were confirmed, and the obtained results confirm that the proposed hypothesis proved to be correct.

2 MATERIALS AND METHODS

The experiments follow chromium tool steel 1.2365 (19 541) and sintered carbides. The samples are marked as steel 1.2365 and SC (sintered carbides) slices *H1* (*K10*) and *G1* (*K20*).

Chemical composition of steel 1.2365: 0.3 % C; 0.32 % Mn; 0.5 % Si; 3.0 % Cr; 3.0 % Mo; 0.6 % V. The hardness of the steel is 51 HRC. Borides are not intended for steels with a carbon content greater than 0.5 % and alloying elements greater than 6 %. This tool steel meets high demands on steel quality such as hardness and strength, toughness, tempering resistance, hardenability, dimensional stability. The steel is characterized by low sensitivity to sudden temperature changes and is especially suitable for water-cooled tools. The steel is well hot-formed and well machined in the soft annealed condition.

The experiments were performed on sintered carbides of the WC-Co type (carbide series G and H) on SC plates H1 (K10) and G1 (K20). The mechanical properties of the given carbides are in tab. 1. The basic structural components in WC-Co sintered carbides are: WC tungsten carbide, solid solution W and C in cobalt, designated as phase β , free graphitic carbon (an undesirable component because it increases the porosity and decreases the strength of WC-Co alloys), intermetallic phase Co_3W_3C , referred to as phase η (undesirable because it binds to the Co part, acting as a binder).

The sintered carbides of the WC-TiC-Co type additionally contain an α -phase in the structure, i.e. solid WC solution in TiC.

Experimental samples are hard alloys made by powder metallurgy technology. It consists of one or more high-melting metals and their carbides and another metal from the iron group, which we call the binder. They are used for the production of cutting inserts for machine tools and for stressed parts of forming tools. Their main structural component is tungsten and titanium carbide with a hardness of 2000 to 3200 HV. Cobalt ensures the connection of individual particles. The samples were made by sintering to form a liquid phase (Co) in a protective atmosphere. They contain small amounts of TaC. They belong to the group with low Cobalt content (Up to 8%). The properties of sintered carbides depend on the chemical composition, structure, internal condition and purity. The change in chemical composition will significantly affect the properties of sintered carbides.

Tab. 1. Mechanical properties of the sintered carbides H1 and G1.

Sintered carbides	Min. flexural strength [N·mm ⁻²]	Density [kg·m ⁻³]	Min. R_a hardness [surface]	Chem. composition [%]		
				WC	TaC	Co
H1 (K10)	1100	14500	89	94	1	5
G1 (K20)	1200	14600	88	94	-	6

3 BORIDATION TECHNOLOGY

The goal is to create a strong bond between the buried layer and the samples. The boring carbide backfill boring technology is shown in Fig. 2.

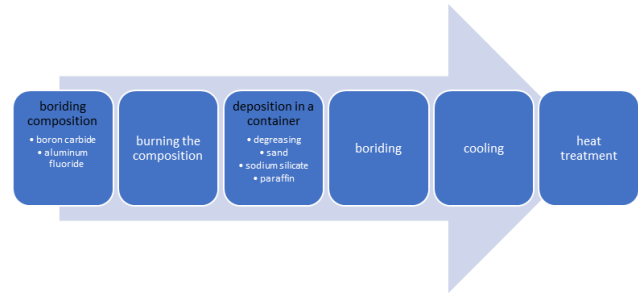


Fig. 2. Boridation technology

The preparation of the boriding mixture consists in mixing boron carbide powder containing 1.5 % of aluminum fluoride as activator for 90 min. The boriding mixture has a gray color. The firing temperature of the mixture is 450 °C for 2 hours, the height of the mixture layer is max. 100 mm. Samples must be completely free of surface impurities, degreased and not corroded. The storage of the samples is as follows: a layer of paraffin (amount up to 0.5 % of the boriding mixture) is poured on the bottom of the refractory vessel. The surface of the paraffin is covered with a boriding mixture with a layer of approx. 100 mm and a temperature of max. 100 °C. The samples are placed on a layer of the mixture 5 to 10 mm apart and from the walls of the vessel, covered with a boriding mixture and a thickness of 10 mm (single-layer deposition). After shaking and leveling, the samples must be below and above the min. 10 mm layer of boriding mixture. The surface is covered with a sealing insert, which is covered with 20 mm of sand. A 30 mm lump of sodium silicate is poured onto the leveled layer of sand. The kit thus prepared can be placed in an oven and borided.

Boridation: in the backfill of the powder mixture EKabor 2 at a temperature of 900±10 °C, endurance 240 min.

Test methods:

- a) Preparation of samples for metallographic evaluation:
 1. They were ground with a diamond grinding wheel to align the samples. Grain size 100/80 μ m.
 2. Grinding with boron nitride in the form of a suspension (kerosene + cubic boron nitride), applied to a gray cast iron wheel. The grain size of boron nitride is 30 μ m. the suspension was applied by brush to a rotating disc.
 3. Grinding with diamond powder dispersed in a paste, grain size 5 μ m.
 4. Polishing with a mixture of kerosene + dia 1, grain size 1 μ m.

- Etching of sintered carbides - 50% Murakami (20% K3 Fe (CN) 6; 20% KOH), ratio 1:1, etching temperature 18 to 20 ° C, endurance 5 min. Etching 1.2365 - 2% Nital.

Evaluation of microstructure on *Neophot* microscope 2.

b) Hardness measurement:

The hardness of the samples was determined by a hardness test according to the *Rockwell* digital hardness tester *RR-1D/AQ* (according to *STN EN ISO 6508*): 120° diamond cone; load 1470 N.

3 RESULTS

The structures of borided samples are described in the present work. In Fig. 3 on the left you can see the core of 1.2365 base steel made of fine-grained martensite with dispersed carbides. The needle character is easily identifiable. Boridation in *EKabor 2* powder created a continuous layer about 60 μm thick (Fig. 3). The layer is two-phase, it consists of complex borides of the *FeB*, *Fe₂B* type with a fragmented transition to the basic material.

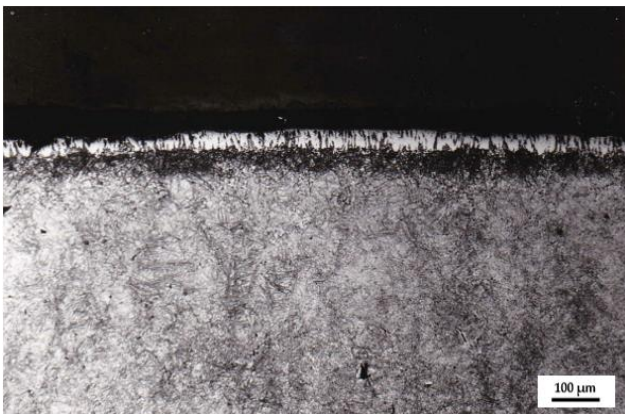


Fig. 3. Steel 1.2365

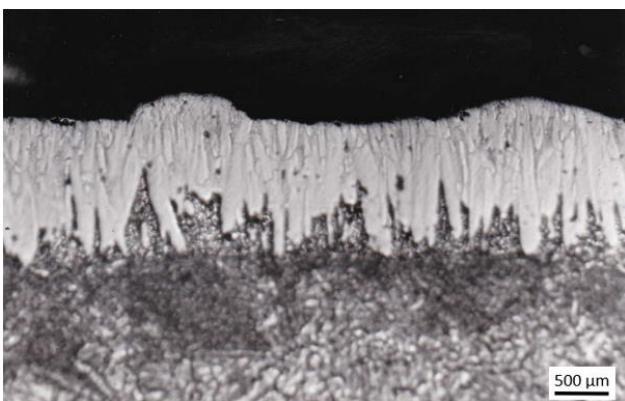


Fig. 4. Borided layer

The evaluation of sintered carbides shows borided samples, but for comparison, the article also lists unsintered SK blades of the same type *H1 (K10)* and *G1 (K20)*.

Sintered carbides of the *H1 (K10)* type are characterized by a fine structure with tungsten carbide grains which, after etching with a Murakami

etchant, have the shape of round and sharp-edged light gray crystals. Figure 5 represents the non-crystallization structure. The size of these carbide grains is 1 to 2 μm.

Sintered carbides of this type have a low content of cobalt, i.e. the β -phase, which after etching has the shape of a light to white fine mesh, which fills the space between the *WC* (tungsten carbide) grains. The thickness of the β -phase layer depends on its content in the alloy and on the grain size of the *WC*. The phase size β is 0.1 to 1 μm. Another structural component is free graphitic carbon, which has the shape of dark gray to black individual flakes or rings. In Fig. 5 shows boride sintered carbides of the *H1 (K10)* type. The surface layer appears in the form of dark formations in the β -phase network. The thickness of the boride layer is about 5 μm.

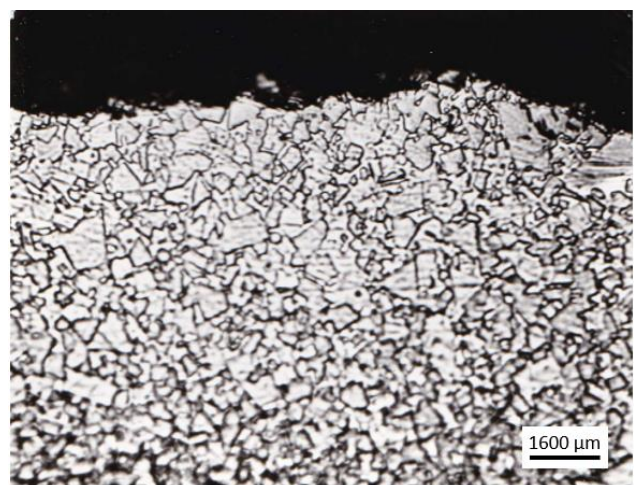


Fig. 5. Sintered carbides of type *H1 (K10)*.

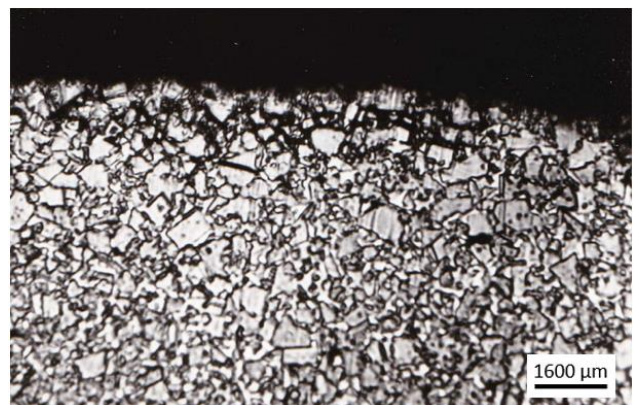


Fig. 6. Sintered carbides of type *G1 (K20)*.

In Fig. 6 is the microstructure of the unborated and borided *SK* plate type *G1 (K20)*. Sintered boxes of the *G1 (K20)* series contain *WC* grains, which after etching have the shape of light gray, medium-sized sharp-edged crystals, which are recrystallized. *WC* grain size is from 2 to 6 μm. Cobalt (β -phase) is found in the microstructure in the form of a fine network (light to white) between the toilet grains. Its size is 0.1 to 1 μm. Incomplete separation of the coupling phase creates β -phase regions that are

larger than the WC grains. Free graphitic carbon with a size of 0.1 to 1 μm occurs and black flakes. In Fig. 6, the boride layer is visible, which is located on the surface of the sample as a dark formation in the cobalt mesh. Even with this type of SK wafer, the layer thickness is 5 μm . The layer is even and continuous.

Tab. 2. Hardness

Sample	1.2365 without boriding	1.2365 borided	H1 (K10) without boriding	H1 (K10) borided	G1 (K20) without boriding	G1 (K20) borided
Hardness HV10	980	1092	1417	1290	1328	1378
Layer thickness	-	60 μm	-	5 μm	-	5 μm

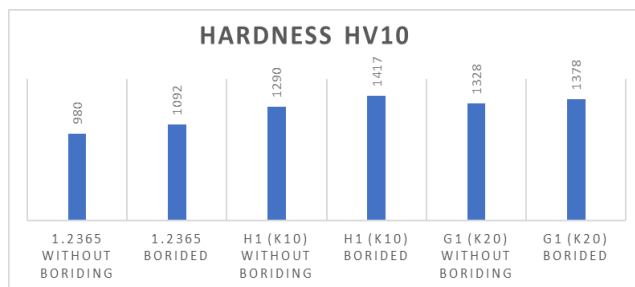


Fig. 7. Hardness HV10 for samples

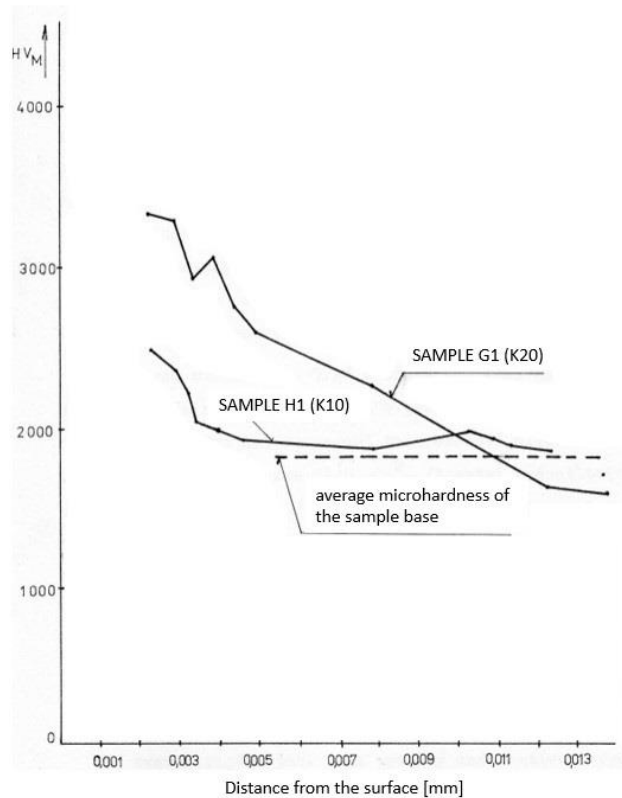


Fig. 7. Comparison of microhardness of borided sintered carbides type H1 (K10) and G1 (K20)

HV hardness tests of 10 kg/10 s were performed on all borided and non-borated samples. The samples

are ground and polished before the test. The evenness of the lower bearing surface and its parallelism with the measured surface were observed during the measurement. Borid increased the hardness of steel and sintered carbides in the surface layer.

This test determined the microhardness of both the core and the diffusion layer. For a better illustration, the measured values of the samples are plotted in the graph in Fig. 6. The dispersion of the structural components did not make it possible to measure the microhardness of the individual phases. This is because the size of the indentation when measuring the microhardness is larger even under the stated conditions than the dimensions of the individual structural components. The microhardness values represent the course of the hardnesses from the surface to the core of the sample, which makes it possible to verify the thickness of the boride layer (Fig. 7).

CONCLUSIONS

The presented article deals with the boriding of steel and sintered carbide samples. The study of the structure of borided samples in EKabor 2 powder is solved in the presented article. This research is created for the purpose of analysis of borided layers and the need for their further tests. Experimental work was performed on steel 1.2365 and sintered carbides type H1 (K10) and G1 (K20). It was found that:

- Borided steel 1.2365 has a two-phase layer composed of FeB and Fe_2B . The layer thickness is 60 μm , the surface hardness is 1092 HV 10. The surface roughness is 0.042 R_a .
- Sintered carbide H1 (K10) has a layer thickness of 5 μm , a fine structure with tungsten carbide grains. The size of carbide grains is 1 to 2 μm . The surface hardness is 1290 HV 10. The surface roughness is 0.077 R_a .
- Sintered carbide G1 (K20) has a layer thickness of 5 μm . The G1 (K20) sintered boxes contain WC grains, which are in the form of light gray, medium-sized sharp-edged crystals, which are recrystallized. WC grain size is from 2 to 6 μm . Free graphitic carbon has a size of 0.1 to 1 μm . The surface hardness is 1378 HV 10. The surface roughness is 0.038 R_a .
- These conclusions will be used for further study and analysis of boriding technology and boride layers.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by the Cultural and Educational Grant Agency of the Ministry of Education of the Slovak Republic in the project No.

KEGA 036ŽU-4/2021: Implementation of modern methods of computer and experimental analysis of the properties of vehicle components in the education of future vehicle designers.

REFERENCES

- [1] KRUKOVICH, M.G. - PRUSAKOV, B.A. - SIZOV, I.G. (2016): *Plasticity of Boronized Layers*. Springer Series in Materials Science (SSMATERIALS, volume 237) Springer International Publishing Switzerland.
- [2] ALTINTAŞ, A. - SARIGÜN, Y. - ÇAVDAR, U. (2016): *Effect of Ekabor 2 powder on the mechanical properties of pure iron powder metal compacts*. CSIC. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.073>.
- [3] BARUT, N. - YAVUZ, D. - KAYALI, Y. (2014): *Investigation of the kinetics of borided AISI 420 and AISI 5140 steels*. AKU J. Sci. Eng. 14 (1), 1–8.
- [4] GÜNEN, A. - ÇARBOĞA, C. - KURT, B. - ORHAN, N. (2013): *The Effect of Boron Powder Particle Size Used in Boriding Process on the Coating Layer*. Nevsehir University Journal of Science 2 (1), 12–19.
- [5] GERMAN, R.M. (2005): *Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing*, Ed. Metal Powder Industry, New Jersey, USA.
- [6] MUELLER, CH. - SCHRUFF, I. (2020): *Steel selection contributing to wear reduction of forging dies*. Kind & Co., Edelstahlwerk GmbH & Co. KG, Bielsteiner, 51674 Wiehl, Germany, pp. 124–130.
- [7] DITTRICH, A. - HABERLING, E. - ROSCHE, K. - SCHRUFF, I. (1989): *Legierungsoptimierung des Warmarbeitsstahles X 40 Cr Mo V 51 (1.2344) für großformatige, Werkzeuge mit hoher Zähigkeitsbeanspruchung*. Thyssen Edelstahl Techn.Ber. 15, pp. 63.
- [8] WICKS, W. Z.- JONES, N. F; PAPPAS, S. P. (1998): *Organic Coatings: Science and technology*. New York: Wiley-Interscience publication, 630 s. ISBN 0-471-24507-0.
- [9] GERSTENGERGER, J. (2010): *Borid surface creation*. In: Engineering. year XIV., no. 6, p. 36 - 37.
- [10] DEEBASREE, J. P., et al. (2004): *Laser boriding of austenitic type 304L stainless steel*. In: International Symposium of Research Students on Material Science and engineering 2004.
- [11] SMIRNYAGINA, N. N. et al. (2008): *Structure and properties of boride layers produced by electron beam in vacuum*. pp. 580–583.
- [12] SEN, S. et al. (2001): *Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel*. In Surface & Coatings Technology [online], vol. 135, pp. 173–177.
- [13] ADAMIAK, S. (2009): *Structure of carbon steels after remelting of the surface layer with the electric arc*. In Archives of Foundry Engineering [online], vol. 9, No. 2, pp. 177–180.

Vplyv typu filtračného média na kvalitu odliatkov z Al zliatin

Marek Galčík, Ing.*

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

Marek Brúna, doc. Ing., PhD.

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

Influence of filter media type on the Al alloy castings quality

Abstract: Submitted paper aims to further analyse the possibilities of melt velocity reduction in the gating system. In this work was designed the naturally pressurized gating system. Proposed design appears to be a suitable solution for reoxidation processes reduction. Disadvantage of this system is that the melt velocity is supercritical, which leads to splashes of the melt when entering gates. Main focus of experimental part is to find a proper way to reduce the melt velocity, which will consequently decrease the reoxidation processes. For the purpose of the melt velocity reduction, labyrinth filters, flat filters and foam filters effect were investigated and visualized by simulation software *ProCAST*. Experimental casts were carried out, to be able to verify the results of the simulations. Mechanical properties and porosity evaluation was investigated on casted samples. Flat and foam filter appeared to be a suitable to melt velocity reduction and it was associated with increasing mechanical properties of castings. Construction with foam filter achieved the best results.

ÚVOD

Reoxidácia má negatívny vplyv na výslednú kvalitu odliatkov Al zliatin. Vzniká hlavne počas plnenia vtokovej sústavy a dutiny formy [1, 2]. Reoxidačné procesy spôsobujú vznik dvojitéch oxidických vrstiev. Problémom je ich strhávanie do objemu tekutého kovu turbulenciou povrchu taveniny a ich následné stuhnutie v odliatku. Strhnuté oxidické vrstvy sa považujú za iniciátori pórovitosti, a preto môžu výrazne ovplyvniť mechanické vlastnosti odliatkov [3-5]. Reoxidačné procesy sú ovplyvnené hlavne konštrukciou vtokovej sústavy a rýchlosťou taveniny. Pre hliníkové zliatiny je potrebné, aby rýchlosť taveniny bola nižšia ako $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, pretože vyššia rýchlosť taveniny spôsobuje turbulenciu tekutého kovu, čo vedie k strhávaniu povrchových oxidických vrstiev do objemu taveniny [1].

Zlepšiť charakter prúdenia taveniny a znížiť jej rýchlosť je možné pomocou filtra vo vtokovej sústave. Charakter prúdenia závisí aj od typu použitého filtra a jeho umiestnenia vo vtokovej sústave. Filtračné médiá môžu tiež zvýšiť mechanické vlastnosti odliatku pomocou zachytávania nečistôt unášaných v tavenine [4, 5].

Úlohou práce bolo potlačiť reoxidačné procesy na minimum pomocou mierne pretlakovej vtokovej sústavy. Vysoká rýchlosť taveniny v tomto type

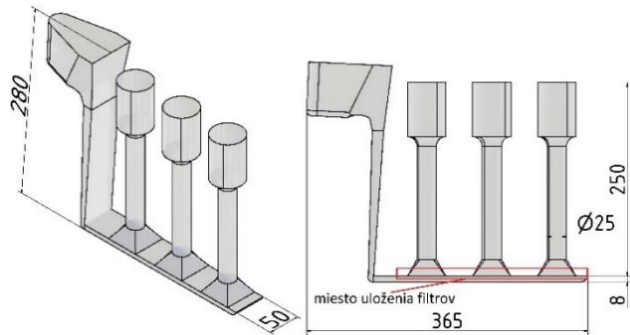
vtokovej sústavy bola očakávaná a hlavným cieľom bolo ju znížiť. Na tento účel boli použité bežné zlievarenské filtre a bol analyzovaný ich vplyv na kvalitu odliatkov.

1 METODIKA EXPERIMENTU

Vplyv labyrintového, tkaninového a penového filtra na rýchlosť taveniny a počet oxidov v odliatku bol pozorovaný pomocou simulačného softvéru. Ich vplyv na mechanické vlastnosti bol hodnotený po experimentálnych tavných. Na experimentálne účely bola použitá mierne pretlaková vtoková sústava s miernou modifikáciou. Jej priaznivý vplyv na redukciu reoxidácie pri plnení vtokovej sústavy bol pozorovaný v predchádzajúcej práci [6]. Pomer prierezov každej časti vtokovej sústavy bol rovnaký. Do konštrukcie vtokovej sústavy bol vložený filter a pozoroval sa efekt typu použitého filtra. Ako referenčná vtoková sústava bola použitá konštrukcia bez filtračného média. Na hodnotenie efektu filtra boli navrhnuté konštrukcie s labyrintovým filtrom, tkaninovým filtrom a penovým filtrom, ktoré boli umiestnené horizontálne nad rozvádzačím kanálom v oblasti zárezu (obr. 1).

Vplyv typu filtra na rýchlosť taveniny, prúdenie taveniny a počet oxidov bol skúmaný v prvej fáze

experimentu pomocou simulačného softvéru ProCAST.



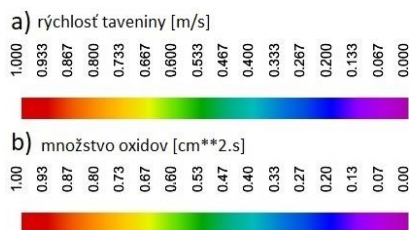
Obr. 1 Miesto uloženia filtrov vo vtokovej sústave

V druhej fáze experimentu bol analyzovaný vzťah medzi mechanickými vlastnosťami odliatkov a typom použitého filtra. Na účely experimentu bola použitá hliníková zliatina *AlSi7Mg0,3*. Odlievalo sa gravitačne do pieskových foriem pri teplote miestnosti z výšky 150 mm. Teplota taveniny pred odlievaním bola 730 ± 5 °C. Po experimentálnych tavných bola hodnotená pevnosť v ťahu, medza klzu, predĺženie a plošná pórovitosť v odliatkoch.

2 VÝSLEDKY A DISKUSIA

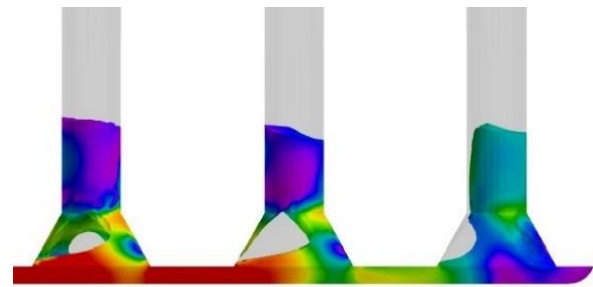
2.1 Hodnotenie pomocou simulačného softvéru

V tejto časti experimentu bol hodnotený vplyv typu filtra na prúdenie taveniny, počet oxidov v odliatkoch a rýchlosť taveniny na vstupe do dutiny formy. Stupnica rýchlosti taveniny a množstva oxidov je znázornená na obr. 2.

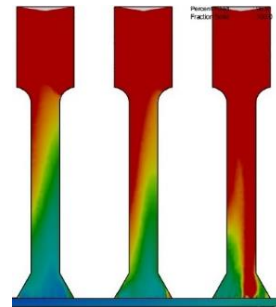


Obr. 2. Stupnica: a) rýchlosti taveniny, b) množstva oxidov

V mierne pretlakovej vtokovej sústave nedochádza k výraznému zníženiu rýchlosti taveniny počas jej plnenia. Podľa očakávania to malo za následok nadkritickú rýchlosť taveniny na vstupe do dutiny formy (obr. 3). Reoxidačné procesy a tým aj množstvo oxidov boli ovplyvnené rýchlosťou taveniny. Vysoká rýchlosť taveniny viedla k veľkej výške rozstreku, čo spôsobilo strhávanie dvojitého oxidického vrstiev do objemu taveniny. V tejto fáze plnenia podľa obrázku 3 došlo k preloženiu taveniny na vstupe do odliatku. Počas tohto procesu došlo k zachyteniu veľkého množstva vzduchu a strhnutiu oxidických vrstiev do taveniny. Výsledkom bolo veľké množstvo oxidov zachytených v odliatkoch (obr. 4).

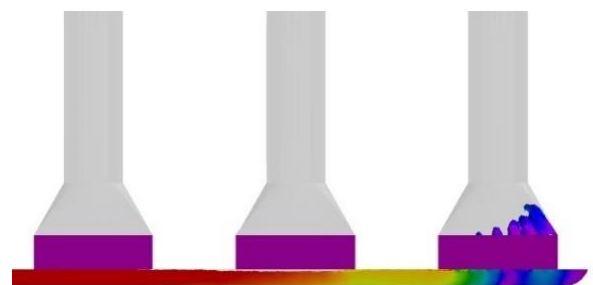


Obr. 3. Simulácia rýchlosti taveniny v konštrukcii bez filtra

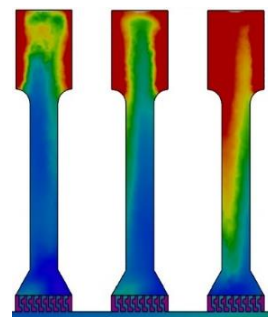


Obr. 4. Simulácia množstva oxidov v konštrukcii bez filtra

Labyrintový filter nie je typický pre odlievanie hliníkových zliatin, ale rozhodli sme sa analyzovať vplyv jeho geometrie na prúdenie taveniny. Podľa simulácie (obr. 5) labyrintový filter zabezpečil pokojnejšie plnenie dutiny formy. Je však vidieť, že tavenina na výstupe filtra je rozdelená do samostatných prúdov. Následne bol každý samostatný prúd preložený vedľajším prúdom taveniny. Dochádzalo teda k prekladaniu jednotlivých prúdov, čo spôsobilo strhávanie dvojitého oxidického vrstiev do objemu taveniny. Tento jav nie je vhodný a napriek zníženiu rýchlosti taveniny a zníženiu výšky rozstreku bolo v odliatku zachytené veľké množstvo oxidov (obr. 6).

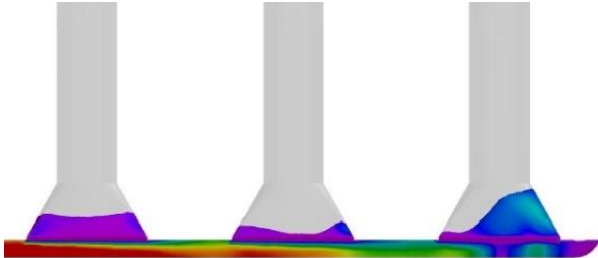


Obr. 5. Simulácia rýchlosti taveniny v konštrukcii s labyrintovým filtrom

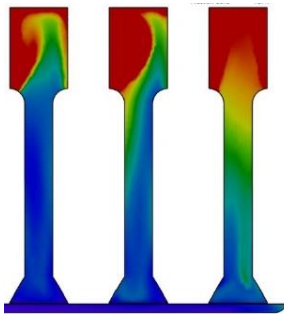


Obr. 6. Simulácia množstva oxidov v konštrukcii s labyrintovým filtrom

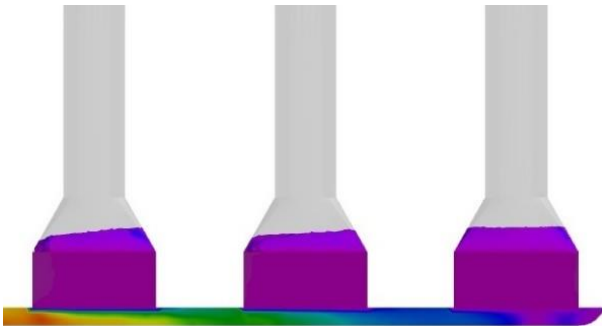
Konštrukcia s tkaninovým filtrom (obr. 7) a penovým filtrom (obr. 9) zabezpečila pokojné plnenie dutiny formy a zníženie miery rozstreku v porovnaní s referenčnou vtokovou sústavou. Tieto typy filtrov znížili rýchlosť taveniny, čo viedlo ku kontrolovanému plneniu dutiny formy, výška rozstreku bola minimalizovaná a teda tvorba dvojitej oxidickej vrstvy bola potlačená. To zabezpečilo výrazne lepšie výsledky z hľadiska množstva oxidov zachytených v odliatkoch (obr. 8, obr. 10).



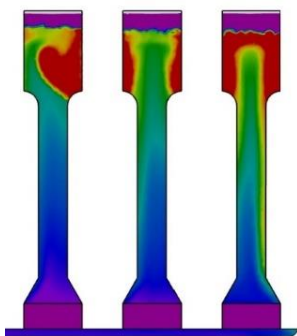
Obr. 7. Simulácia rýchlosti taveniny v konštrukcii s tkaninovým filtrom



Obr. 8. Simulácia množstva oxidov v konštrukcii s tkaninovým filtrom

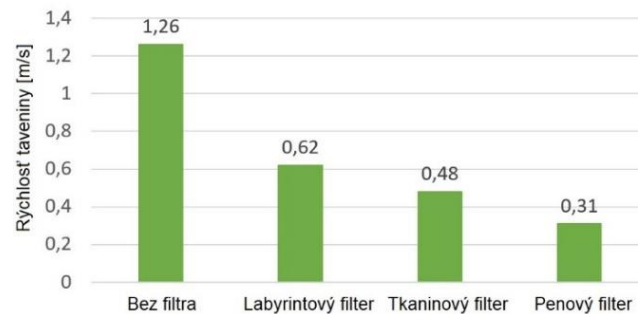


Obr. 9. Simulácia rýchlosti taveniny v konštrukcii s penovým filtrom



Obr. 10. Simulácia množstva oxidov v konštrukcii s penovým filtrom

Vplyv typu filtra na rýchlosť taveniny bol taktiež hodnotený prostredníctvom simulačného softvéru. Miestom hodnotenia rýchlosti bola plocha pri vstupe do odliatku. Rýchlosť bola hodnotená ako priemerná hodnota rýchlosti taveniny vo viacerých bodoch v rámci meranej plochy pri všetkých odliatkoch. Ako sa očakávalo, referenčná konštrukcia vtokovej sústavy dosiahla nadkritické hodnoty rýchlosti taveniny. Rýchlosť taveniny sa znížila použitím filtračného média. Konštrukcia s labyrintovým filtrom znížila rýchlosť taveniny o 50 %, s plochým filtrom o 60 % a s penovým filtrom sa znížila rýchlosť taveniny o 75 %. Obrázok 11 zobrazuje priemerné hodnoty rýchlosti taveniny.



Obr. 11. Hodnotenie rýchlosti taveniny

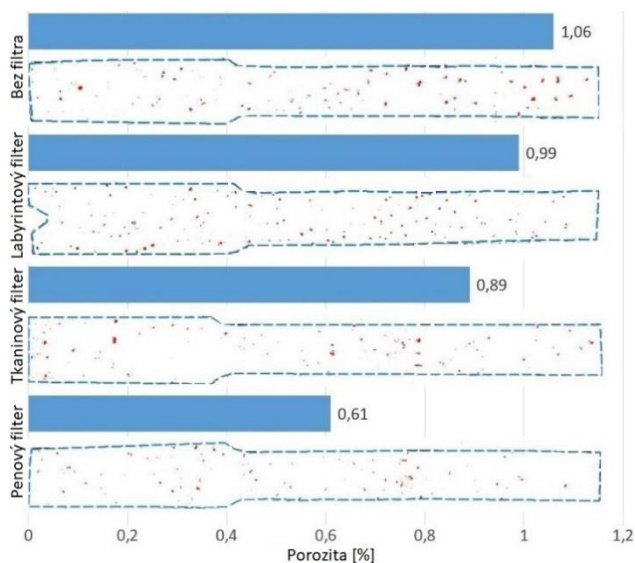
2.2 Hodnotenie porozity a mechanických vlastností

Experimentálne vzorky boli odliate za účelom vyhodnotenia vplyvu typu filtra na množstvo pórovitosti a mechanické vlastnosti. Kvantifikácia pórov bola analyzovaná pomocou softvéru, ktorý umožňuje vybrať všetky póry a vypočítať plochu, ktorú zaberajú vo vzorke. Obrázok 12 zobrazuje priemerné hodnoty pórovitosti pre každý typ filtra.

Bez zníženia rýchlosti taveniny dochádza v dutine formy k rozstreku, čo spôsobuje rozsiahlu reoxidáciu. Preto konštrukcia bez filtračného média dosiahla najhoršie hodnoty pórovitosti. Hodnota pórovitosti sa znížila použitím filtračného média. Najnižší účinok mal labyrintový filter vzhľadom na charakter prúdenia taveniny na výstupe filtra. Analýza pórovitosti odhalila, že penový filter výrazne znížil plošnú pórovitosť. To sa dá pripísať tomu, že v dutine formy sa zabránilo vzniku veľkého množstva dvojitého oxidického vrstiev. Plošná pórovitosť v tejto konštrukcii vtokovej sústavy bola znížená o cca 42 %.

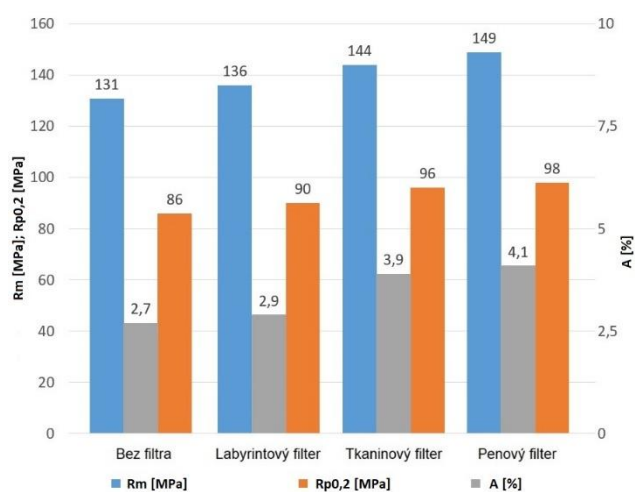
Ako sa očakávalo, v konštrukcii bez filtra sa dosiahlo najnižších hodnôt pevnosti v ťahu, medze klzu a predĺženia. Použitie filtra je spojené so zvýšením mechanických vlastností. Tieto mechanické vlastnosti sa zvyšovali so znižovaním plošnej pórovitosti. Obr. 13 znázorňuje priemerné hodnoty mechanických vlastností. Najlepšie výsledky mechanických vlastností boli dosiahnuté s penovým filtrom, kedy

došlo k zvýšeniu pevnosti v ťahu a medze kľzu približne o 15 % a predĺženia o 50 %.



Obr. 12. Hodnotenie plošnej pórovitosti

Po analýze simulácií a experimentálnych taviieb možno pozorovať prepojenie medzi mechanickými vlastnosťami a rýchlosťou taveniny na vstupe do dutiny formy. Tá súvisí s počtom oxidov zachytených v odliatku. Zvyšovanie počtu oxidov negatívne vplyva na pórovitosť, čo ovplyvňuje mechanické vlastnosti finálneho odliatku.



Obr. 13. Hodnotenie mechanických vlastností

ZÁVER

Mierne pretlaková vtoková sústava bola v práci navrhnutá s cieľom potlačenia reoxidácie. Kvôli nadkritickej rýchlosti taveniny je použitie navrhutej vtokovej sústavy v praxi zriedkavé. Experimentálne

práce preukázali, že rýchlosť taveniny môže byť znížená filtračným médiom. Po pozorovaní simulácií a po vykonaní experimentálnych taviieb možno konštatovať, že labyrintový filter nie je vhodný na potlačenie reoxidačných procesov. Hoci zabezpečil zníženie rýchlosti taveniny zhruba o 50 %, mechanické vlastnosti odliatkov boli takmer rovnaké ako v konštrukcii bez filtra. To je spôsobené nevhodným charakterom prúdenia taveniny na výstupnej ploche filtra. Výsledkom toho bolo veľké množstvo strhnutých oxidických vrstiev v objeme taveniny.

Z analyzovania simulácií možno konštatovať, že rýchlosť taveniny a výška rozstreku v odliatkoch boli výrazne znížené tkaninovým a penovým filtrom. Experimentálne taviiby preukázali ich pozitívny vplyv na mechanické vlastnosti odliatkov. Konštrukcia s penovým filtračným médiom dosiahla najväčšie zlepšenie kvality z hľadiska mechanických vlastností.

Pod'akovanie

Tento článok bol vytvorený v rámci projektu Grantového systému UNIZA 01/2021 (13858).

LITERATÚRA

- [1] CAMPBELL, J. (2015): *Complete Casting Handbook 2nd edition*. Oxford: Elsevier Ltd. 1054 s. ISBN 978-0-444-63509-9.
- [2] SONG, H. - ZHANG, L. - CAO, F. - GU, X. - SUN, J. (2020): *Oxide bifilm defects in aluminum alloy castings*. Materials Letters.
- [3] LIU, J. - WANG, Q. - QI, Y. (2019): *Atomistic simulation of the formation and fracture of oxide bifilms in cast aluminum*. Acta Materialia. pp.673-682.
- [4] JEZIERSKI, J. - DOJKA, R. - JANERKA, K. (2018): *Optimizing the Gating System for Steel Castings*. Metals. 8.
- [5] YAVUZ, H. - KARA, A. - CUBUKLUSU, H. E. - CE, O. B. - AYBARC, U. (2016): *The effect of filter type on filling during Low Pressure Die Casting: a numerical study*. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Vol. 75. 71-77.
- [6] REMIŠOVÁ, A. - BRŮNA, M. (2019): *Analysis of Reoxidation Processes with Aid of Computer Simulation*. Archives of Foundry Engineering. 19(4), 55-60.

Štúdium vplyvu Zr na vlastnosti zliatiny AlSi5Cu2Mg určenej pre výrobu hláv valcov

Lukáš Širanec, Ing.*

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

Dana Bolibruchová, prof. Ing., PhD.

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

Study of the Zr influence on the properties of the AlSi5Cu2Mg alloy intended for the production of cylinder heads.

Abstract: The aim of this paper was to analyze the impact of different zirconium addition (0.05; 0.10; 0.15 and 0.20 wt. % Zr) on selected properties of AlSi5Cu2Mg aluminum alloy. It is a new alloy for cylinder head castings and has only been used for a relatively short time. The specificity of this alloy is its chemical composition - specifically the low permitted Ti content, which makes it impossible to refine the grain structure of this alloy using standard Al-Ti-B grain refiners. The results of our research showed that increasing zirconium content had no effect on the increase in ultimate tensile strength, yield strength and hardness of as-cast samples. After T7 heat treatment, a more significant increase in UTS, YS and thermal conductivity occurred due to the precipitation of Cu- and Mg-rich strengthening precipitates. Zirconium-rich intermetallic phases were observed in the shape of separate thick needles or as a cluster of two crossed thinner needles. These phases were not affected even after heat treatment, indicating their high thermal stability. Increasing the Zr content was accompanied by an increase in liquidus temperature and area fraction of porosity values.

ÚVOD

V posledných rokoch sme svedkami výrazných zmien v automobilovom priemysle. Kvôli čoraz prísnejším predpisom o emisných normách sú výrobcovia automobilov nútení prichádzať s technologickými riešeniami na zníženie emisií a zlepšenie spotreby paliva. Okrem riešení na zlepšenie emisií, ako sú filtre pevných častíc, oleje s nízkou viskozitou alebo palivá s bio aditívami, uvádzajú automobilky na trh vozidlá s alternatívnymi pohonnými jednotkami (najmä hybridnými a plne elektrickými). Zavádzanie technologických riešení na znižovanie emisií sa dotýka aj výrobcov komponentov vozidiel (napr. častí motora, telies batérií, krytov elektromotorov). Vyššie uvedené komponenty sú výhradne vyrábané z hliníkových zliatin. Táto skutočnosť ovplyvňuje výskumné centrá, ktoré musia vyvíjať nové hliníkové zliatiny, ktoré budú spĺňať kritériá pre pokročilú odliatku automobilového priemyslu. Týmto spôsobom sa zabezpečí konkurencieschopnosť a udržateľnosť výroby v automobilovom sektore. Aj keď je súčasný trend v automobilovom priemysle založený na propagácii elektromobilov, svet ešte zďaleka nie je pripravený na úplný prechod k elektromobilite. Vysoké ceny elektromobilov,

nedostatočná infraštruktúra nabíjacích staníc, nedostatok vzácnych kovov na výrobu batérií a ich náročná recyklácia sú faktory, pre ktoré ešte stále nebudú v najbližších rokoch úplne nahradené fosilné palivá a konvenčné spaľovacie motory. Moderné spaľovacie dieselové a benzínové motory prešli v posledných desaťročiach výraznými zmenami. Spoločným menovateľom týchto zmien je takzvaný „downsizing“. Tento pojem vyjadruje snahu výrobcov poskytovať úspornejšie vozidlá s nižšími emisiami znížením zdvihového objemu motora a/alebo počtu valcov pri zachovaní alebo dokonca zvýšení výkonu motora. Výsledkom je, že špecifický výkon motora (popisujúci účinnosť motora z hľadiska pomeru výkonu k zdvihovému objemu) neustále rastie. To vedie k zvýšeniu teplôt a tlakov pri spaľovaní [1-3].

Hlavy valcov patria medzi tepelne najviac namáhané súčasti motora. Počas prevádzky musia odolávať teplotným zmenám, mechanickému zaťaženiu a koróznym účinkom výfukových plynov. Komerčne dostupné hliníkové zliatiny pre hlavy valcov (väčšinou na báze systému Al-Si-Cu-Mg) môžu pracovať pri teplotách do 200 °C. Nad touto teplotou dochádza k zhrubnutiu a rozpúšťaniu hlavných

Tab. 1. Chemické zloženie experimentálnych zliatin

Chemické zloženie [hm. %]									
Prídavok Zr [hm. %]	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Ti	Sr	Zr	Al
0	5,47	1,91	0,29	0,18	0,02	0,013	0,01	0,0009	zv.
0,05	5,67	1,91	0,29	0,19	0,02	0,013	0,01	0,05	zv.
0,10	5,65	1,92	0,29	0,19	0,02	0,014	0,01	0,10	zv.
0,15	5,55	1,91	0,29	0,19	0,02	0,014	0,01	0,12	zv.
0,20	5,43	1,90	0,29	0,18	0,02	0,014	0,01	0,19	zv.

spevňujúcich fáz (Mg_2Si alebo Al_2Cu) a nastáva zníženie mechanických vlastností. Hlavy valcov moderných motorov sú vystavené teplotám presahujúcim 200 °C a preto je potrebné zamerať sa na vývoj nových zliatin pre takéto použitie [4].

Jednou z možností, ako zabrániť poklesu mechanických vlastností pri teplotách nad 200 °C, je použitie legujúcich prvkov zo skupiny prechodných kovov (Zr, Ni, Mo atď.) Zo všetkých prechodných kovov je Zr v posledných rokoch predmetom viacerých výskumov. Očkujúci účinok zirkónia a vysoká teplotná stabilita Zr fáz sú atribúty, ktoré ho predurčujú k použitiu v nových typoch hliníkových zliatin pracujúcich pri zvýšených teplotách.

1 EXPERIMENTÁLNY MATERIÁL A METÓDY

Ako experimentálny materiál bola použitá hliníková zliatina $AlSi5Cu2Mg$ v predmodifikovanom stave. Táto zliatina sa v súčasnosti používa na výrobu hláv valcov benzínových motorov. V rámci experimentu boli vyhotovené experimentálne zliatiny s rôznym prídavkom Zr (0; 0,05; 0,10; 0,15 a 0,20 hm. % Zr). Zirkónium bolo pridané do zliatiny $AlSi5Cu2Mg$ vo forme predzliatiny $AlZr20$. Chemické zloženie experimentálnych zliatin je uvedené v Tab. 1. Z dôvodu zhoršenej rozpustnosti predzliatiny $AlZr20$ bol skutočný obsah Zr v experimentálnych zliatinách s prídavkom 0,15 a 0,20 hm. % Zr nižší.

Experimentálne zliatiny boli vyhotovené gravitačným odlievaním do kovovej formy s teplotou 180 až 200 °C. Teplota odlievania bola 745 ± 5 °C. Z každej experimentálnej zliatiny bolo vyhotovených 10 kusov vzoriek, z ktorých 5 bolo podrobených hodnoteniu vybraných vlastností v liatom stave a 5 bolo podrobených tepelnému spracovaniu a následnému hodnoteniu vlastností. Pre účely tepelného spracovania bol zvolený režim T7, pozostávajúci z rozpúšťacieho žihania pri teplote 500 °C po dobu 6,5 hodín nasledovaný rýchlym ochladením do vody s teplotou 80 až 95 °C. Umelé starnutie prebiehalo pri teplote 250 °C po dobu 4 hodín s následným ochladením na vzduchu.

Mechanické vlastnosti experimentálnych zliatin boli hodnotené na základe ťahovej podľa normy ISO 6892-1 na skúšobnom stroji *Inspekt desk* 50 kN.

Hodnotenie mikroštruktúry bolo vykonané na vzorkách s najlepšou kombináciou mechanických vlastností. Mikroštruktúra bola pozorovaná pomocou optického mikroskopu *NeoPhot 32* a rastrovacieho elektrónového mikroskopu *TESCAN LMU II* s analyzátorom *BRUKER EDX*. Vzorky na metalografické vyhodnotenie boli pripravené hrubým a jemným brúsením za mokra, dvojkrokovým leštením s použitím 3 a 1 μm diamantovej pasty a následným leptaním H_2SO_4 leptadlom.

Plošná pórovitosť experimentálnych zliatin bola vyhodnotená pomocou grafického softvéru *Quick Photo Industrial 3.1*. Na vyhodnotenie bolo vybraných päť náhodných miest na každej experimentálnej vzorke.

Tepelná vodivosť experimentálnych zliatin bola hodnotená metódou výrobcu zliatiny. Táto metóda bola založená na meraní elektrickej vodivosti pomocou konduktometra *Sigma Check 2* s dotykovým senzorom. Pre každú experimentálnu zliatinu sa uskutočnilo päť meraní. Získané hodnoty elektrickej vodivosti (σ) boli použité v empirickom vzorci (1) na výpočet hodnôt tepelnej vodivosti λ :

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

Tvrdosť experimentálnych zliatin bola hodnotená Brinellovou metódou pomocou tvrdomeru *Brinell Innovatest Nexus 3000* s guľôčkou s priemerom 5 mm so zaťažením 250 kp (2451,6 N) a dobou zaťaženia 10 sekúnd. Celkovo sa vykonalo 5 meraní pre každú experimentálnu zliatinu.

Proces kryštalizácie experimentálnych zliatin bol hodnotený pomocou termickej analýzy. Zariadenie na termickú analýzu pozostávalo z termočlánku typu K umiestneného v strede valcovej formy. Pomocou softvéru *LabView 2 Hz* sa zaznamenávali namerané hodnoty (teplota, čas) počas tuhnutia. Zo získaných údajov bola vygenerovaná krivka chladnutia a jej prvá derivácia.

2 TERMICKÁ ANALÝZA

Charakteristické teploty tuhnutia v závislosti od rôznych prídavkov Zr získaných z ochladzovacích

kriviek a ich prvých derivácií sú uvedené v tab. 2. Vyššie uvedené hodnoty predstavujú začiatok nukleácie jednotlivých štruktúrnych zložiek.

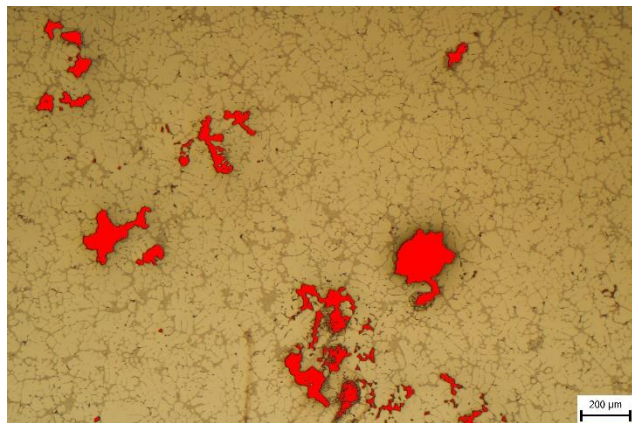
Tab. 1 Charakteristické teploty kryštalizácie štruktúrnych zložiek v experimentálnych zliatinách

Prídavok Zr [hm. %]	T_{liq}	T_{Al-Si}	T_{Mg2Si}	T_{Al2Cu}	T_{sol}
0	614,9	565,5	555,6	503,4	517,3
0,05	615,2	564,5	554,9	504,6	517,2
0,10	616,8	565,9	554,8	502,1	516,9
0,15	619,9	565,3	554,4	500,1	517,6
0,20	619,0	564,9	554,3	500,0	517,4

So zvyšujúcim sa prídavkom Zr sa zvyšovala teplota likvidu (T_{liq}), pričom najvyššiu hodnotu dosiahla vo variante s prídavkom 0,15 % hm. Zr. Zvýšenie teploty T_{liq} (a teda rozšírenie intervalu tuhnutia) môže nepriaznivo ovplyvniť náchylnosť experimentálnych zliatin na vznik trhlín za tepla.

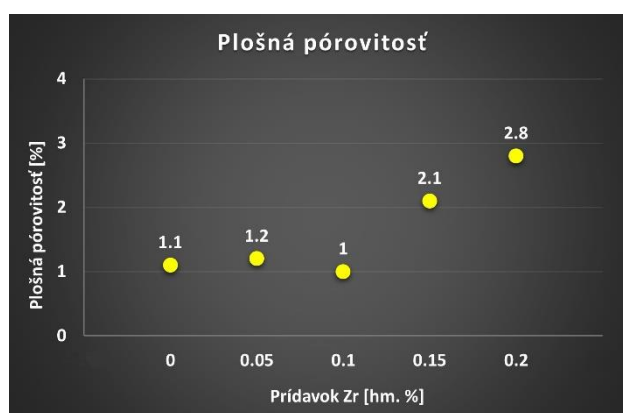
3 HODNOTENIE PLOŠNEJ PÓROVITOSTI

Vplyv Zr na pórovitosť sa hodnotil stanovením plošného podielu pórovitosti. Na každej experimentálnej zliatine sa na meranie vybralo päť rôznych miest. Póry (červené oblasti na obr. 1) boli detekované pomocou funkcie „analýza fáz“ v softvéri *Quick Photo Industrial 3.1*. Konečné hodnoty plošnej pórovitosti (obr. 2) predstavujú priemer z 5 meraní. Plošný podiel pórovitosti experimentálnej zliatiny bez prídavku Zr bol 1,1 %. Prídanie 0,05 a 0,10 hm. % Zr nemalo významný vplyv na hodnoty pórovitosti. Avšak prídanie 0,15 a 0,20 hm. % Zr viedlo k zvýšeniu plošného podielu pórovitosti o 90 a 155 %. Zvýšená pórovitosť môže nepriaznivo ovplyvniť mechanické vlastnosti alebo tlakovú tesnosť odliatkov. Pórovitosť môže byť sprevádzaná aj poklesom tepelnej vodivosti, keďže póry bránia prenosu tepla (tepelná vodivosť vzduchu v póroch je približne o štyri rády nižšia ako v Al matrici) [5].



Obr. 1 Príklad určenia plošného podielu pórovitosti (prídavok 0,20 hm. % Zr, liaty stav, lept. H_2SO_4)

Znížená tepelná vodivosť v dôsledku vyššej pórovitosti môže dramaticky znížiť výkon odliatkov hláv valcov.

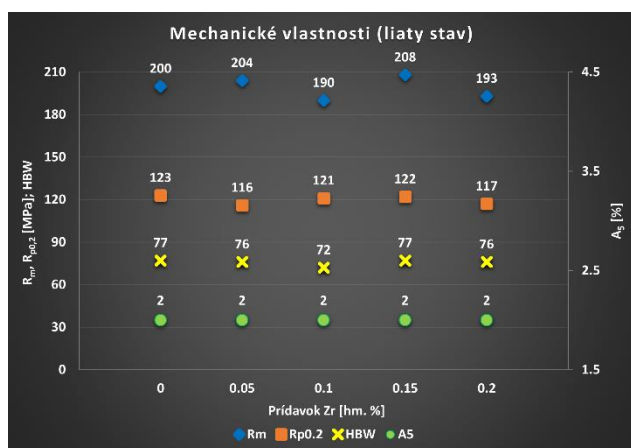


Obr. 2. Plošná pórovitosť experimentálnych zliatin v závislosti od prídavku Zr

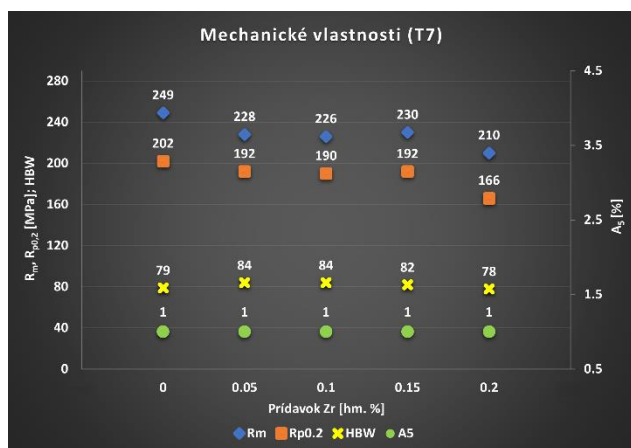
4 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Mechanické vlastnosti experimentálnych zliatin s odstupňovaným prídavkom Zr v liatom stave a po tepelnom spracovaní T7 sú znázornené na obr. 2 a obr. 3. Uvedené hodnoty predstavujú priemer piatich meraní pre každú experimentálnu zliatinu. Zo získaných výsledkov je možné konštatovať, že prídavok Zr v zliatine $AlSi5Cu2Mg$ významne neovplyvnil mechanické vlastnosti v liatom stave. Na základe toho možno predpokladať, že očakovaný efekt Zr nebol v zliatine $AlSi5Cu2Mg$ významný. Po tepelnom spracovaní T7 došlo k výraznejšiemu zvýšeniu R_m a $R_{p0,2}$. Je dôležité poznamenať, že spevňujúci účinok po tepelnom spracovaní nastal v dôsledku vzniku spevňujúcich precipitátov bohatých na Cu a Mg. Nakoľko hodnoty R_m a $R_{p0,2}$ tepelne spracovaných experimentálnych zliatin s prídavkom Zr nepreukázali významné zlepšenie v porovnaní so zliatinou bez prídavku Zr, možno konštatovať, že prídavok Zr uvedené hodnoty významne neovplyvnil. Hodnoty tvrdosti po tepelnom spracovaní sa mierne zvýšili (v porovnaní so zliatinou bez prídavku Zr) po pridaní 0,05 a 0,10 hm. % Zr o 6 % a po pridaní 0,15 hm. % Zr o 4 %. Pravdepodobnou príčinou bola kryštalizácia tvrdých fáz Al_3Zr , ktorá prispela k

celkovému zvýšeniu tvrdosti. Po tepelnom spracovaní sa hodnoty ťažnosti znížili z 2 na 1 % bez ohľadu na prídavok Zr.



Obr. 3. Mechanické vlastnosti experimentálnych zliatin v liatom stave

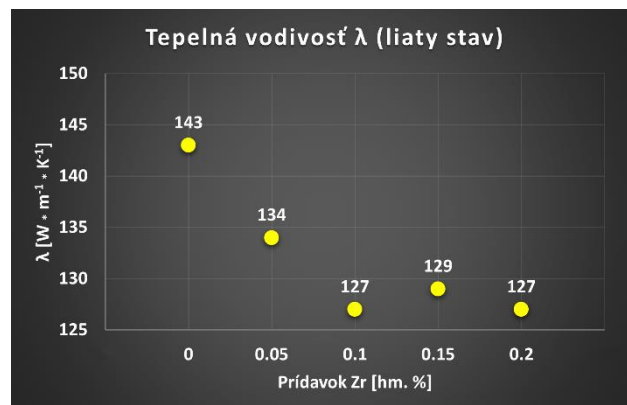


Obr. 4. Mechanické vlastnosti experimentálnych zliatin po tepelnom spracovaní

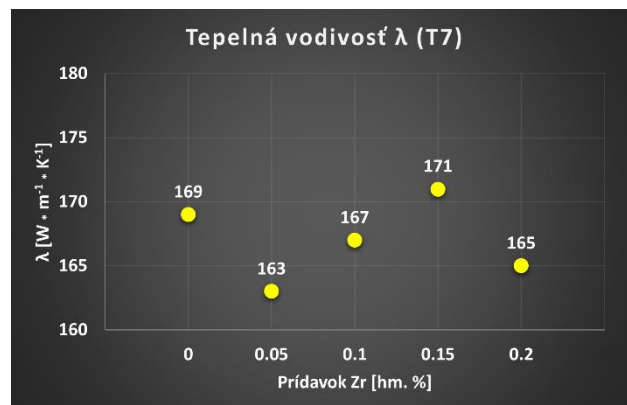
5 TEPELNÁ VODIVOSŤ

Pri vývoji nových typov hliníkových zliatin pre zložité odliatky v automobilovom priemysle sa kladie veľký dôraz nielen na mechanické vlastnosti, ale aj na dostatočnú tepelnú vodivosť. To je dôležité najmä pri odliatkoch hláv valcov moderných preplňovaných spaľovacích motorov s priamym vstrekaním paliva, kde môžu byť hlavy valcov počas prevádzky vystavené teplotám presahujúcim 200 °C. Pre dosiahnutie optimálnej teploty motora počas prevádzky je potrebné riešiť vplyv jednotlivých legujúcich prvkov na tepelnú vodivosť novo vyvíjaných zliatin [6]. Vplyv odstupňovaného prídavku Zr do zliatin *AlSi5Cu2Mg* na tepelnú vodivosť v liatom a tepelne spracovanom stave je znázornený na obr. 5 a obr. 6. Tieto hodnoty predstavujú priemer piatich meraní pre každú experimentálnu zliatinu. V závislosti od množstva pridaného Zr sa tepelná vodivosť experimentálnych zliatin v liatom stave znížila o 6 až 11 %. Bolo to spôsobené samotným prídavkom Zr, pretože tento legujúci prvok pôsobil z hľadiska tepelnej vodivosti

ako „nečistota“. Tepelná vodivosť zliatin je založená na pohybe nosičov tepelnej energie (voľné elektróny) a v dôsledku vibrácií atómov. Akýkoľvek legujúci prvok potom ovplyvňuje voľnú dráhu elektrónov a vibračný stav okolitých atómov. V dôsledku toho klesá tepelná vodivosť. Z toho dôvodu nastal pokles tepelnej vodivosti po pridaní Zr.



Obr. 5. Tepelná vodivosť experimentálnych zliatin v liatom stave

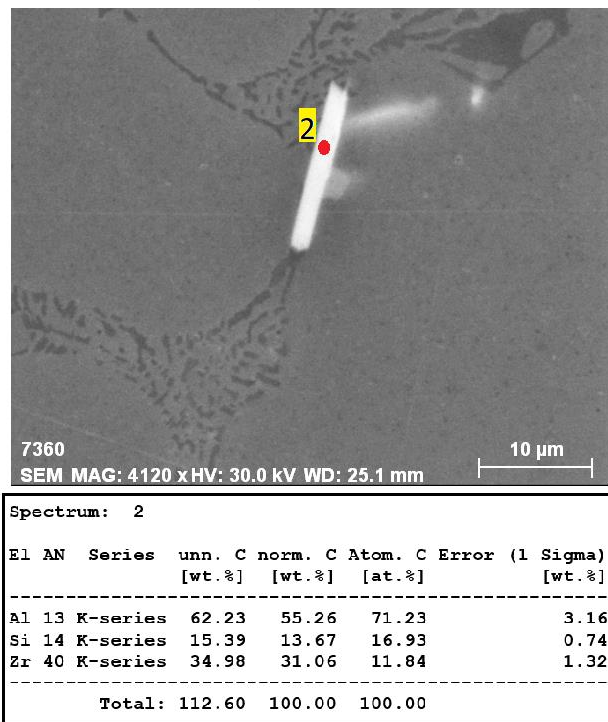


Obr. 6. Tepelná vodivosť experimentálnych zliatin po tepelnom spracovaní

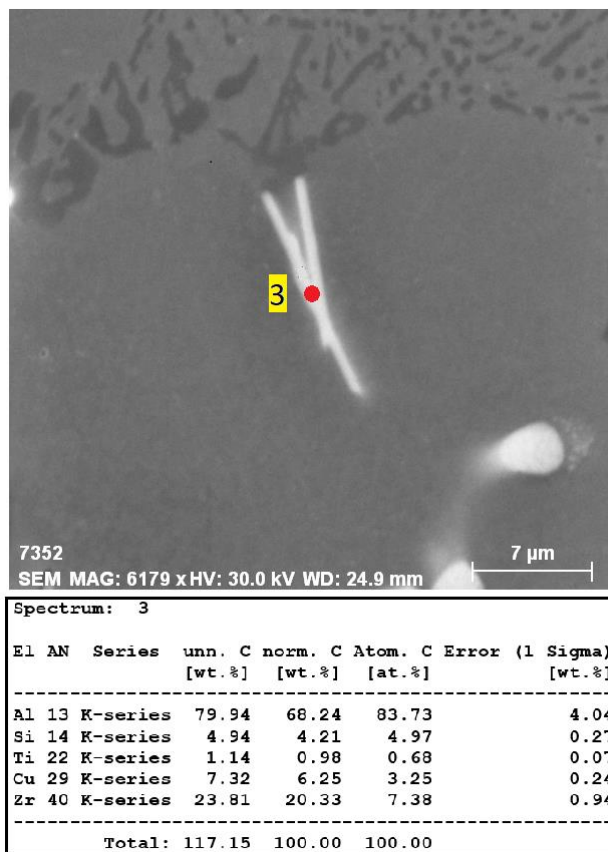
Tepelná vodivosť experimentálnych zliatin sa po tepelnom spracovaní T7 zvýšila o 18 % pre zliatinu bez prídavku Zr a o 22 až 33 % (v závislosti od množstva pridaného Zr) pre zliatinu s rôznym prídavkom Zr. Odstupňovaný prídavok Zr nemal negatívny vplyv na tepelnú vodivosť experimentálnych zliatin po tepelnom spracovaní, pretože hodnoty tepelnej vodivosti pre zliatinu bez Zr a s prídavkami Zr sa prakticky nezmenili. Z hľadiska tepelnej vodivosti je teda možné použiť zliatinu *AlSi5Cu2Mg* legovanú Zr pre ďalší vývoj pokročilých odliatkov ako sú napr. hlavy valcov pre vysokovýkonné motory. Zvýšenie tepelnej vodivosti experimentálnych zliatin po tepelnom spracovaní bolo spôsobené tvorbou jemných precipitátov s rovnomernou distribúciou, ktoré ochudobnili maticu o prísadové prvky. Nemenej dôležitým faktorom bola sferoidizácia a zhlukovanie častíc eutektického kremika, ktoré znižovali rozptyl elektrónov ako nosičov tepelnej energie a vytvárali priaznivejšie podmienky pre ich prechod [7-9].

6 MIKROŠTRUKTÚRA

V závislosti od prídavku Zr bola mikroštruktúra experimentálnych zliatin tvorená α -fázou, modifikovaným eutektikom a intermetalickými fázami na báze Cu, Mg, Fe a Zr.

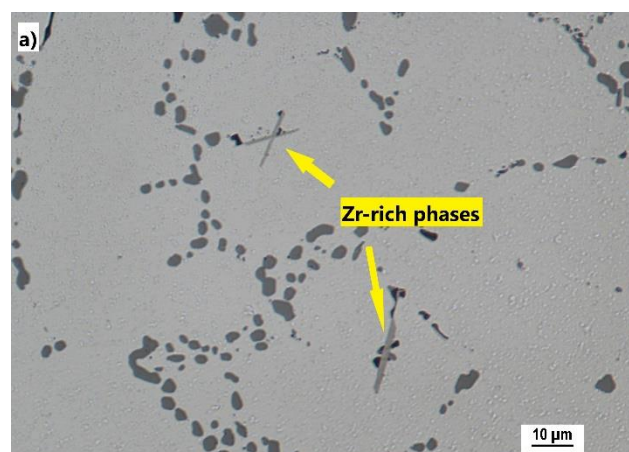


Obr. 7. Morfológia Zr fáz doplnená o EDX spektrum (prídavok 0,20 hm. % Zr, liaty stav, lept. H_2SO_4)

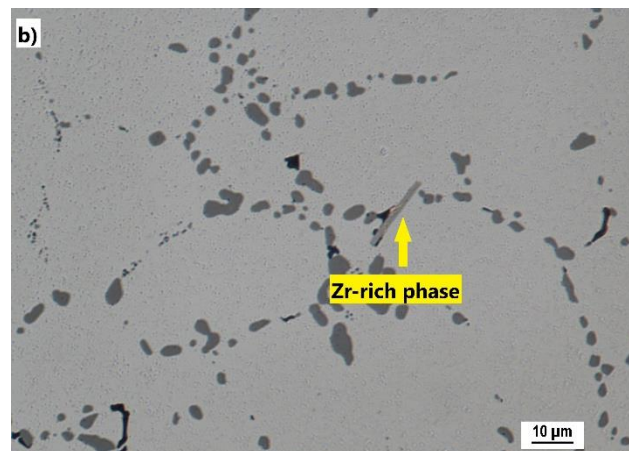


Obr. 8. Morfológia Zr fáz doplnená o EDX spektrum (prídavok 0,15 hm. % Zr, liaty stav, lept. H_2SO_4)

Intermetalické fázy bohaté na Zr boli pozorované v tvare samostatných hrubších ihlíc (obr. 7) alebo vytvárali zoskupenie dvoch tenších navzájom prekrížených ihlíc (obr. 8). Tieto fázy boli pozorované len v zliatinách s prídavkom 0,15 a 0,20 hm. % Zr. V zliatinách s prídavkom 0,05 a 0,10 hm. % Zr nebola zistená prítomnosť týchto fáz (pravdepodobne z dôvodu neprekročenia maximálnej rozpustnosti Zr v tuhom roztoku, pričom počas tuhnutia nevznikali žiadne intermetalické fázy bohaté na Zr).



Obr. 9. Prítomnosť Zr intermetalických fáz po tepelnom spracovaní T7 (prídavok 0,20 hm. % Zr, lept. H_2SO_4)



Obr. 10. Prítomnosť Zr intermetalických fáz po tepelnom spracovaní T7 (prídavok 0,15 hm. % Zr, lept. H_2SO_4)

Tepelné spracovanie T7 neovplyvnilo intermetalické fázy bohaté na Zr. Tieto ihlovité fázy (obr. 9 a obr. 10) boli pozorované bez akýchkoľvek zmien v ich morfológii alebo dĺžke v porovnaní so stavom po odliatí. To poukazuje na vysokú teplotnú stabilitu týchto fáz, ktoré neboli ovplyvnené ani pri zvýšených teplotách počas rozpúšťacieho žihania. Tieto poznatky môžu byť užitočné pri vývoji nových hliníkových zliatin pracujúcich pri zvýšených teplotách nad 200 °C (napr. hlavy valcov moderných spaľovacích motorov). Takéto fázy môžu spomaliť pokles mechanických vlastností v dôsledku zhrubnutia a rozpúšťania hlavných spevňujúcich fáz

na báze *Cu* a *Mg* a tým zvýšiť celkovú tepelnú stabilitu hliníkovej zliatiny.

ZÁVER

Cieľom tohto výskumu bolo preskúmať vplyv odstupňovaného prídavku *Zr* do hliníkovej zliatiny *AlSi5Cu2Mg* s cieľom vytvoriť novú zliatinu pre potenciálne využitie v oblasti výroby odliatkov hláv valcov. Výskum ukázal, že:

- Prídavok 0,15 a 0,20 hm. % *Zr* spôsobil nárast plošnej pórovitosti experimentálnych zliatin.
- Mechanické vlastnosti experimentálnych zliatin v liatom stave neboli po pridaní *Zr* cez predzliatinu *AlZr20* významne ovplyvnené.
- Výraznejší nárast hodnôt R_m a $R_{p0,2}$ nastal po tepelnom spracovaní *T7* v dôsledku precipitácie spevňujúcich precipitátov bohatých na *Cu* a *Mg* a nie v dôsledku prídavku *Zr*. Porovnaním mechanických vlastností tepelne spracovaných vzoriek sa zistilo, že prídavok *Zr* spôsobil pokles R_m o 8 až 16 % (v závislosti od prídavku *Zr*) a $R_{p0,2}$ o 5 až 18 % v porovnaní s experimentálnou zliatinou bez prídavku *Zr*.
- Hodnoty tvrdosti experimentálnych zliatin v liatom stave neboli významne ovplyvnené procesom legovania *Zr*. Po tepelnom spracovaní *T7* nastalo mierne zvýšenie hodnôt *HBW* po pridaní 0,05 a 0,10 hm. % *Zr* o 6 a 4 % (v porovnaní s hodnotami *HBW* zliatiny bez prídavku *Zr*).
- Ťažnosť experimentálnych zliatin bola znížená z 2 na 1 % po tepelnom spracovaní *T7* bez ohľadu na prídavok *Zr*.
- Tepelná vodivosť experimentálnych zliatin v liatom stave sa znížila v závislosti od množstva pridaného *Zr* o 6 až 11 %. Tepelná vodivosť experimentálnych zliatin sa po tepelnom spracovaní *T7* zlepšila o 18 % pre zliatinu bez prídavku *Zr* a o 22 až 33 % (v závislosti od množstva pridaného *Zr*) pre zliatinu s rôznym prídavkom *Zr*.
- Prítomnosť intermetalických fáz bohatých na *Zr* bola dokumentovaná len v experimentálnych zliatinách s prídavkom 0,15 a 0,20 hm. % *Zr*.
- Intermetalické fázy na báze *Zr* boli pozorované ako samostatné hrubšie ihlice alebo ako zoskupenie dvoch pretínajúcich sa tenších ihlic.
- Ihlicovité intermetalické fázy na báze *Zr* boli tiež pozorované s nezmenenou morfológiou aj po tepelnom spracovaní *T7*, čo naznačovalo ich vysokú tepelnú stabilitu pri zvýšených teplotách.

Pod'akovanie

Tento článok bol vytvorený v rámci projektu grantovej agentúry VEGA 1/0160/2022 a Grantového systému UNIZA 01/2021 (14862). Autori d'akujú za podporu.

LITERATÚRA

- [1] HAJDÚCH, P. - DJURDJEVIC, M. B. - BOLIBRUCHOVÁ, D. (2020): *Nové trendy vo výrobe hliníkových odliatkov pre automobilový priemysel*. Slévarenství, no. 1-2, pp. 5-7, ISSN 0037-6825
- [2] HOAG, K. - DONDLINGER, B. (2016): *Cylinder block and head materials and manufacturing*. Vehicular engine design, p. 97-115, ISBN: 978-3-7091-1859-7.
- [3] SIGLI, C. (2004): *Zirconium solubility in aluminium alloys*. Proceedings of the 9th International Conference on Aluminium Alloys, pp. 1353-1358.
- [4] KORES, S. - ZAK, H. - TONN, B. (2008): *Aluminium alloys for cylinder heads*. Materials and Geoenvironment, 55(3), pp. 307-317.
- [5] VANDERSLUIJ, E. - RAVINDRAN, C. (2019): *The role of porosity in reducing the thermal conductivity of B319 Al alloy with decreasing solidification rate*. The Minerals, Metals and Materials Society, 71(6), pp. 2072-2077.
- [6] LUMLEY, R. - DEEVA, N. - LARSEN, R. - GEMBAROVIC, J. - FREEMAN, J. (2012): *The role of alloy composition and T7 heat treatment in enhancing thermal conductivity of aluminum high pressure diecastings*. The Minerals, Metals and Materials Society, 44, pp. 1074-1086.
- [7] VANDERSLUIJ, E. - LOMBARDI, A. - RAVINDRAN, C. - BROCHU, A. - CHIESA, F. - MACKAY, R. (2015): *Factors influencing thermal conductivity and mechanical properties in 319 Al alloy cylinder heads*. Materials Science and Engineering A, 648, pp. 401-411.
- [8] VANDERSLUIJ, E. - REVINDRAN, C. - BAMBERGER, M. (2021): *Mechanisms affecting hardness and electrical conductivity in artificially-aged B319 aluminum alloy*. Journal of Alloys and Compounds, 867.
- [9] DONG, Z. - WANG, J. - GUAN, Z. - MA, P. - ZHAO, P. - LI, Z. - YAN, R. (2021): *Effect of short t6 heat treatment on the thermal conductivity and mechanical properties of different casting processes Al-Si-Mg-Cu alloys*. Metals 11(1450).

Rozmerová a geometrická analýza súčiastok podľa všeobecnej špecifikácie (GPS)

Jozef Bronček, doc. Ing., PhD.*

Katedra konštruovania a častí strojov, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: jozef.broncek@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2929

Mário Drbúl, doc. Ing., PhD.

Katedra obrábania a výrobných techník, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: mario.drbul@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2754

Viera Konstantová, Ing., PhD.

Katedra konštruovania a častí strojov, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: viera.konstantov@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2980

Lukáš Kožienka, Bc.

Katedra konštruovania a častí strojov, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: kozienka4@stud.uniza.sk

Dimensional and Geometrical Analysis of Components According to Geometrical product specification (GPS)

Abstract: International Standard *EN ISO 22081* sets out rules for the definition and interpretation of general geometric specifications and general dimensional specifications according to *Article 5.12 of ISO 8015: 2011*). The general *GPS* specifications apply individually to each characteristic of a geometric element or to a relationship between geometric elements for which no individual *GPS* specification of the same type is defined. The general *GPS* specifications, which prescribe general dimensional and geometric tolerances, make it possible to simplify the indications and thus the reading of the drawing documentation, while at the same time facilitating the selection of tolerances. The new standard *EN ISO 22081* replaces the standard *ISO 2768* and gives rules for the application of the general geometric and general dimensional specification.

ÚVOD

Na Slovensku, tak ako v ostatných členských štátoch *CEN*, sa v zmysle predpisov *CEN/CENELEC* preberajú postupne nové a revidované normy *ISO* zamerané na tvorbu technickej dokumentácie do sústavy národných noriem *STN*.

Cieľom príspevku je oboznámiť technickú verejnosť s obsahom normy medzinárodnej normy *STN EN ISO 22081* [1], ktorá je už zaradená do integrovaného systému noriem geometrickej špecifikácie výrobkov (*GPS*). Normu vypracovala technická komisia *ISO/TC 213* Rozmerová a geometrická špecifikácia výroku a jej kontrola. Medzinárodná norma *EN ISO 22081* stanovuje pravidlá pre definíciu a interpretáciu všeobecných geometrických špecifikácií a všeobecných

rozmerových špecifikácií podľa článku 5.12 normy *ISO 8015: 2011*). Norma *STN EN ISO 22081* ruší a nahrádza normu *STN ISO 22768-2* v celom rozsahu.

Nová norma priniesla oproti predchádzajúcemu vydaniu normy [2, 4, 5], viacero zmien, ako napríklad:

- Zrušili sa štyri triedy rozmerovej presnosti (c , m , f , v) – v pôvodnom zavedenom systéme štyroch tried presnosti bol výber hodnôt pre všeobecné rozmerové tolerancie pre prax nepružný, čo vytváralo podmienky pre vznik chýb vo výrobnom procese ako aj následne v kontrolnej fáze procesu výroby. Pružnosť hodnôt v novej norme je definovaná v podobe zápisu variabilných hodnôt (požiadaviek na

rozmer), alebo je možnosť odkázať na tabuľku platných hodnôt v technickej dokumentácii.

- Zrušili sa tri triedy geometrickej presnosti (*H*, *K*, *L*) – hodnota tolerancie sa zapíše v predpise indikátora všeobecnej geometrickej špecifikácie. (Pozn. Približne 30 rokov boli konštruktéri nútení používať štyri triedy presnosti pre všeobecné tolerancie dĺžkových a uhlových rozmerov a tri triedy presnosti pre všeobecné geometrické tolerancie).
- Na špecifikáciu geometrických prvkov sa použije charakteristika profilu povrchu. V zrušenej norme bolo ťažké jednoznačne interpretovať použitie všeobecných tolerancií vo výkresovej dokumentácii. Požiadavka „charakteristika profilu povrchu“ pokrýva celkový povrch súčiastky, pre ktorý nie je definovaná žiadna individuálna rozmerová alebo geometrická špecifikácia.

Všeobecné špecifikácie *GPS* sa aplikujú individuálne pre každú charakteristiku geometrického prvku alebo pre vzťah medzi geometrickými prvkami, pre ktoré nie je definovaná nijaká individuálna špecifikácia *GPS* toho istého typu. Všeobecné špecifikácie *GPS* sa považujú za súbor špecifikácií, ak nie sú špecifikované inak, a platia pre každú charakteristiku geometrického prvku a každý vzťah medzi geometrickými prvkami posudzovanými individuálne. Ak sa v titulnom bloku alebo v jeho blízkosti neuvádza nijaká všeobecná špecifikácia *GPS*, potom platia len tie individuálne špecifikácie *GPS*, ktoré sa uvádzajú v technickej dokumentácii výrobku.

Uvádzané postupy geometrického tolerovania možno bez akýchkoľvek problémov použiť aj pri zobrazovaní metódou premietania v treťom kvadrante a pri použití iných jednotiek pre hodnoty rozmerov a tolerancií. Možnosti zobrazenia špecifikácie v prípade, ak je možné prvky špecifikácie sprístupniť pomocou funkcie dopytu alebo iného dopytu na získanie informácie k *3D CAD* modelu, a pravidlá pre zaznamenanie špecifikácií k *3D CAD* modelom sa uvádzajú v norme *ISO 16792* [5, 6].

1 VŠEOBECNÁ KONCEPCIA NORMY

Tento dokument definujú dva typy všeobecných špecifikácií:

- Všeobecné geometrické špecifikácie – pomocou pravidiel *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, *F*.
- Všeobecné rozmerové špecifikácie – pomocou pravidiel *A*, *B*, *G*, *H*.

Tieto dve špecifikácie, ich použitie, stanovenie a označovanie sú v norme *ISO 22081* zavedené

pomocou ôsmich pravidiel *A*, *B*,... až *H*. Zavedené pravidlá opisujú jednotlivú problematiku takto:

- *Pravidlo A*: Základné pravidlo na stanovenie všeobecných geometrických špecifikácií pre integrálne geometrické prvky.
- *Pravidlo B*: Označovanie v technickej dokumentácii výrobku.
- *Pravidlo C*: Označovanie všeobecných geometrických špecifikácií.
- *Pravidlo D*: Používanie všeobecných geometrických špecifikácií.
- *Pravidlá E a F*: Systém základní.
- *Pravidlo G*: Označovanie všeobecných rozmerových špecifikácií.
- *Pravidlo H*: Používanie všeobecných geometrických špecifikácií.

2 VŠEOBECNÉ ROZMEROVÉ ŠPECIFIKÁCIE

Všeobecné rozmerové špecifikácie sa vzťahujú len na rozmerové prvky (*FOS*), ktoré nemajú individuálnu rozmerovú špecifikáciu, sú rozdelené na:

- Dĺžkové (lineárne) rozmery (\pm) podľa *ISO 14405-1*.
- Uhlové rozmery (\pm) podľa *ISO 14405-3*.

Všeobecné rozmerové špecifikácie sa majú použiť na každý rozmerový prvok uvedený v technickej dokumentácii a to buď :

- Uvedením rozmeru, ktorý definuje nominálnu hodnotu dĺžkového alebo uhlového rozmeru, ktorý nemá individuálnu toleranciu, nie je teoreticky presným rozmerom (*TED*) a nie je informatívnym rozmerom.
- Pomocou atribútu *CAD*, ktorý určuje nominálnu hodnotu rozmerového prvku.

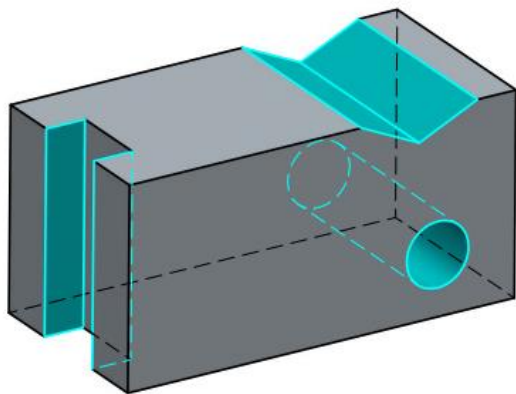
Na obr. 1. je zobrazené vyznačenie rozmerových prvkov (*FOS*) na modeli súčiastky, na ktoré sa vzťahujú všeobecné rozmerové špecifikácie, ktoré sú predpísané na výkrese súčiastky.

Rozmer 50 v okrúhlych zátvorkách je uvedený ako informatívny rozmer. Kóta s rozmerom 100 v obdĺžniku je teoreticky presný rozmer. Rozmerový údaj 50 označený červenou farbou má predpísanú individuálnu rozmerovú špecifikáciu s predpísanou hodnotou tolerancie ($\pm 0,2$). Kóty označené modrou farbou na obr. 2. sú rozmery, pre ktoré sa uplatní všeobecná rozmerová špecifikácia.

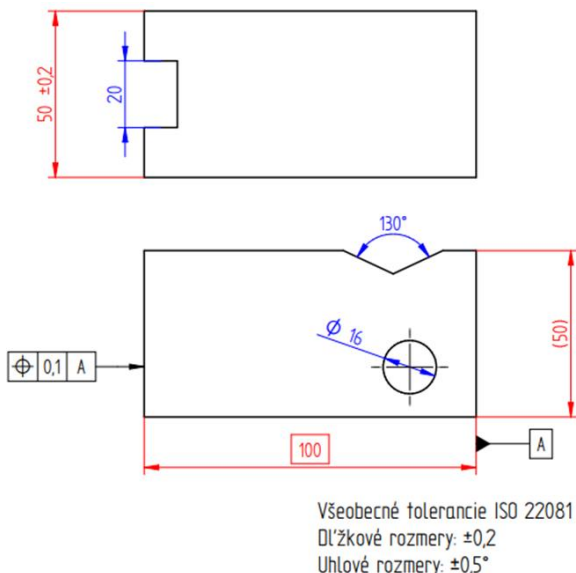
3 VŠEOBECNÉ GEOMETRICKÉ ŠPECIFIKÁCIE

Všeobecné geometrické špecifikácie sa vzťahujú na integrálne prvky (t. j. povrch alebo hranu), ktoré

nemajú určenú žiadnu individuálnu geometrickú špecifikáciu a žiadnu individuálnu rozmerovú špecifikáciu.



Obr. 1. Príklad použitia všeobecných rozmerových špecifikácií na súčiastke; vyznačenie rozmerových prvkov (FOS) na modeli súčiastky [7]



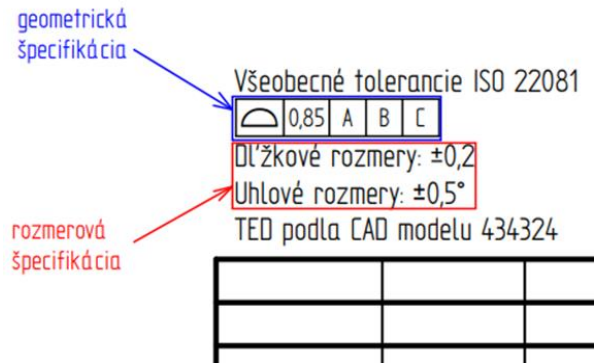
Obr. 2. Príklad použitia všeobecných rozmerových špecifikácií na súčiastke; označenie predpisu všeobecnej rozmerovej špecifikácie v technickej dokumentácii výrobu (TPD) [7]



Obr. 3. Príklad označenia všeobecnej geometrickej špecifikácie [7]

V dôsledku tohto sa majú vylúčiť odvodené prvky ako sú osi, stredné roviny. Pre integrálne geometrické prvky platí všeobecná geometrická špecifikácia bez ohľadu na špecifikáciu charakteru textúry povrchu. Pre všeobecné geometrické špecifikácie platia zásady nezávislosti a princípu geometrického prvku. Všeobecná geometrická špecifikácia sa nevzťahuje na základný prvok, ktorý sa použil v sústave základní a ktorý je definovaný v časti základne všeobecnej geometrickej špecifikácie.

Všeobecná geometrická špecifikácia sa musí uviesť charakteristikou profilu povrchu (obr. 3.).



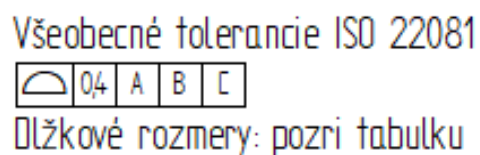
Obr. 4. Príklad predpisu všeobecných rozmerových a geometrických tolerancií umiestnený v blízkosti titulného bloku [7]

Okrem charakteristiky, ktorou môže byť len profil povrchu, vo všeobecnej geometrickej špecifikácii sa môže použiť akýkoľvek prvok špecifikácie z noriem ISO 5459 a ISO 1101 [3, 4], ak nie je v rozpore s pravidlami uvedenými v tomto dokumente. Na obr. 4. sa uvádza v spoločnom zápise nad titulným blokom príklad predpisu všeobecnej geometrickej a rozmerovej špecifikácie podľa ISO 22081.

Pri predpise hodnôt tolerancie je možné predpísať buď jednotlivú hodnotu alebo premenlivú hodnotu. Uvedená jednotlivá (samostatná) hodnota bude platiť pre všetky všeobecné tolerancie na výkrese. Keď sa použijú premenlivé hodnoty, tieto môžu závisieť napr. od rozmerov geometrických prvkov.

Premenlivé hodnoty musia mať jasne uvedený spôsob pre ich získanie.

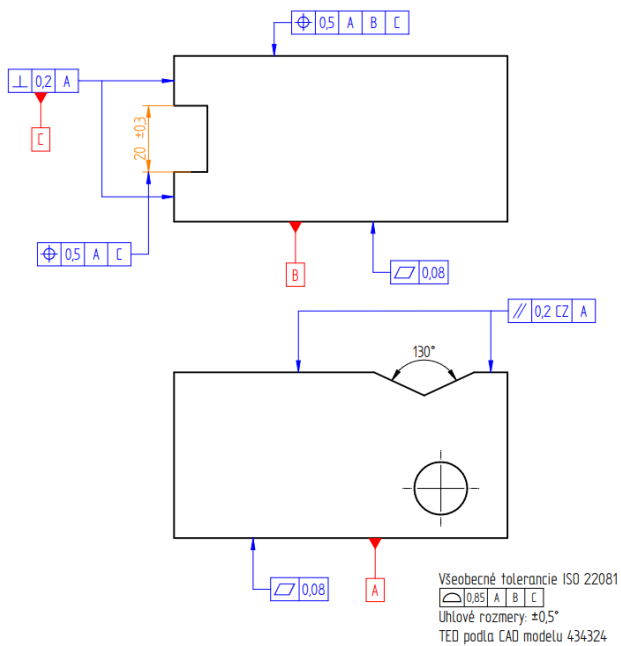
Príklad použitia variabilných hodnôt je uvedený na obr. 5. a tab. 1.



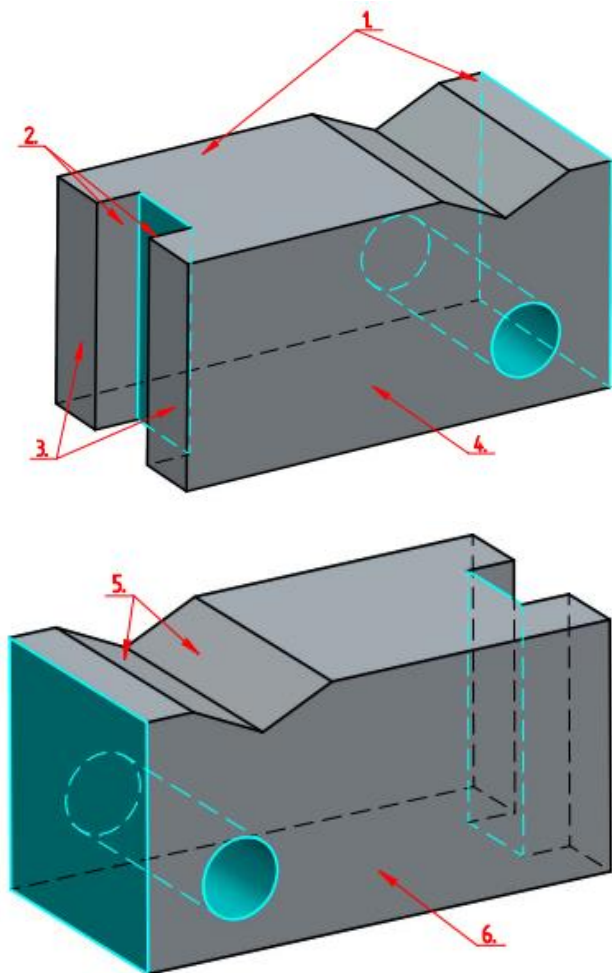
Obr. 5 Odkaz na tabuľku v predpise všeobecnej špecifikácie [7]

Tab. 1. Príklad indikácie s hodnotami tolerancie pre jednotlivé nominálne dĺžkové rozmery [7]

Menovité rozmery [mm]	Hodnoty tolerancií
do 10	± 0,1
cez 10 do 20	± 0,2
cez 20 do 50	± 0,3
cez 50 do 100	± 0,4
cez 100 do 200	± 0,5



Obr. 6. Príklad označenia všeobecných tolerancií a individuálnych tolerancií na výkrese súčiastky [7]



Obr. 7. Vysvetlenie označenia všeobecných tolerancií a individuálnych tolerancií na modeloch súčiastky, hore – pohľad spredu, dole – pohľad zozadu. Vysvetlenie číselného označenia prvkov na obrázku je uvedené v hlavnom texte [7]

Na obr. 6 a obr. 7 sú uvedené príklady s vysvetlením použitia všeobecných geometrických špecifikácií a individuálnych tolerancií na tolerovaných prvkoch.

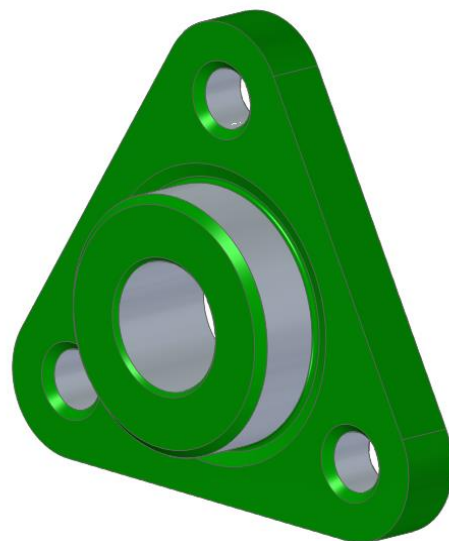
Prvky na obr. 6. označené modrou farbou sú individuálne geometrické špecifikácie, prvky označené červenou farbou sú základne a kóta označená oranžovou farbou, je kóta s predpísanou individuálnou rozmerovou špecifikáciou.

Prvky na obr. 7. zafarbené tyrkysovou farbou sú integrálne geometrické prvky, na ktoré sa aplikuje všeobecná geometrická špecifikácia podľa pravidla D. Prvky, ktorými sú plochy – označené na obrázku číslicami 1 až 6 a vyznačené šedou farbou sú integrálne geometrické prvky, na ktoré sa neuplatňuje všeobecná geometrická špecifikácia. Pre tieto prvky platia individuálne geometrické špecifikácie predpísané na výkrese súčiastky podľa obr. 6.

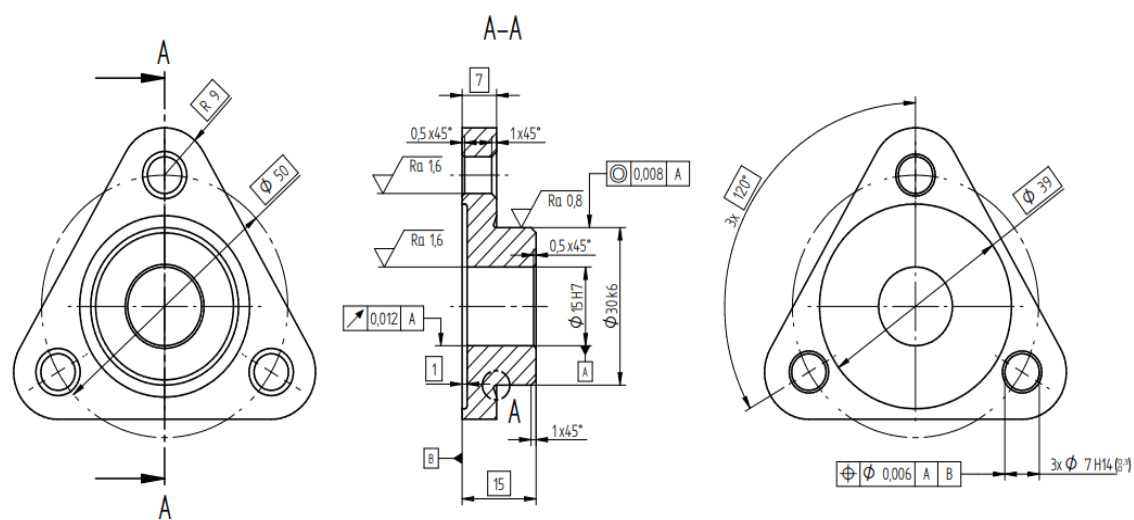
4 EXPERIMENTÁLNE MERANIE

Cieľom experimentálneho merania bolo meranie a vyhodnotenie geometrickej odchýlky profilu plochy na vonkajšom povrchu, t. j. obvode tvarovanej súčiastky podľa špecifikácie predpísanej na výkrese súčiastky (obr. 8).

Súčiastka bola vyhotovená technológiou práškovej metalurgie. Predpísaná všeobecná tolerancia profilu plochy sa predpísala podľa normy *STN EN ISO 22081* a mala hodnotu 0,2 mm. Experimentálne merania sa vykonali na meracom prístroji *EinScan SP* od firmy *Shining3D*. Prístroj vytvorí skeny reálnej súčiastky z rôznych pozícií a následne tieto prekonvertuje na 3D model. Vytvorený skin 3D model reálnej súčiastky (obr. 10) sa porovnal v programe *GOM inspect 2021* s 3D modelom (obr. 9) presného tvaru vytvorenom programe *Solid Edge*.



Obr. 9. 3D model tvarovanej súčiastky vytvorený v programe *Solid Edge*



3D-model



A (5:1)

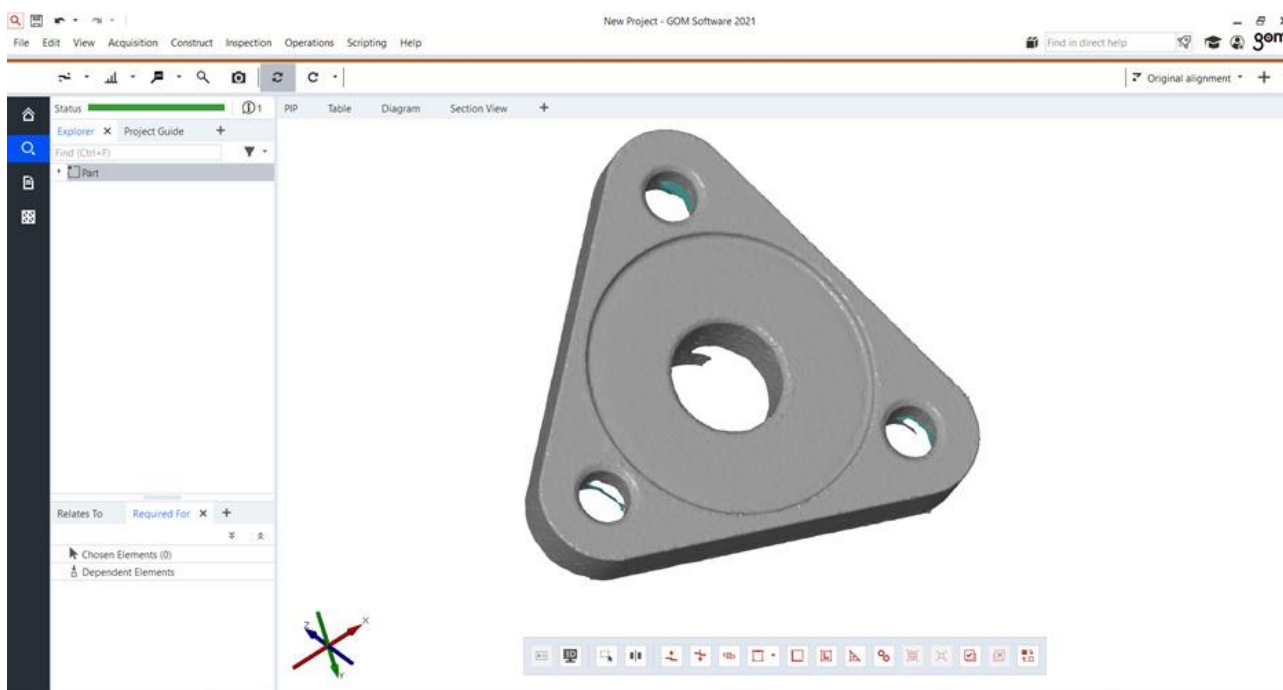


ⓘ Všeobecná špecifikácia profilu povrchu sa neaplikuje na:
 - na žiadny prvok, ktorý má individuálnu rozmerovú, geometrickú alebo všeobecnú špecifikáciu
 - na žiadny základný prvok, na ktorý sa odkazuje v časti základna v indikátore tolerancie

Všetky rozmery v milimetroch (mm)
 Tolerancie podľa ISO 8015
 Dř 2kově rozmery ISO 14405-1 (©) (metóda najmenších štvorcov)
 Menovitá geometria (teoreticky presní) TED podľa CAD modelu ABC.DXF
 Všeobecné tolerancie podľa ISO 22081

Metóda	ISO 22081	Mierka	1,5:1	Solid Edge	
Prizná mka		Názov	Tvarovaná súčiastka		
Všeob. tol.		Material	42CrMo54-2T-285/350MB min. Re800 Mpa		
Palatovar		Prepracovateľ			
Kresiteľ	L. Kachera	Metóda vykresu	A3	Datum	Údaj listu
Kontroloval		Č. vykresu zostavy			1/1

Obr. 8. Výkres a 3D model tvarovanej súčiastky so skutočným povrchom

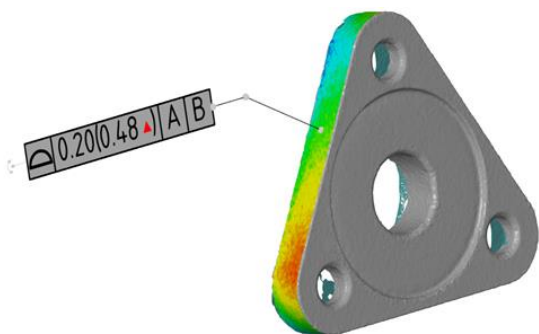


Obr. 10. Sken reálnej súčiastky

Porovnávacou metódou sa k sebe priložili obidva vytvorené modely danej súčiastky. Jeden model pozostával zo skutočného tvaru súčiastky a druhý model pozostával z presného tvaru súčiastky.

Výsledok porovnania je zobrazený grafickou interpretáciou na obr. 11. Porovnanie sa vyhodnotilo

voči základniam A a B. Na základe grafického vyhodnotenia môžeme konštatovať, že hodnota parametra profilu plochy na hodnotenom geometrickom prvku v niektorých častiach povrchu presahuje stanovenú hodnotu odchýlky 0,2 mm.



Obr. 11. Porovnanie geometrického prvku skutočnej súčiastky s teoreticky presným tvarom (TOF) Edge s farebným vyznačením hodnoty parametra profilu povrch

ZÁVER

Nová norma *EN ISO 22081* nahrádza normu *ISO 2768* a udáva pravidlá pre aplikovanie všeobecnej geometrickej a všeobecnej rozmerovej špecifikácie. Všeobecné špecifikácie *GPS*, ktoré predpisujú všeobecné rozmerové a geometrické tolerancie, umožňujú zjednodušiť indikácie a tým aj čítanie výkresovej dokumentácie, podobne ako aj v [8] a zároveň uľahčujú výber tolerancií.

Uplatnením pravidiel, ktoré sú zavedené v tejto norme, sa eliminujú chyby vo výklade špecifikácií v technickej dokumentácii výrobku. Pre prax vo fáze kontroly je predpis špecifikácie všeobecných špecifikácií jednoznačný a korektný.

PodĎakovanie

Tento článok bol vypracovaný v rámci riešenia projektu s názvom „Implementácia jazyka geometrickej špecifikácie výrobkov do oblasti súradnicovej 3D metrológie“, KEGA 033 ŽU-4/2022.

LITERATÚRA

- [1] STN EN ISO 22081: 2021 *Geometrické špecifikácie výrobkov (GPS). Geometrické tolerovanie. Všeobecné geometrické a rozmerové špecifikácie.* (ISO 22081: 2021).
- [2] STN EN ISO 22768-2: 1995 *Všeobecné tolerancie 2. Časť. Nepredpísané geometrické tolerancie.* (ISO 2768-2).
- [3] STN EN ISO: 1101: *Geometrické špecifikácie výrobkov (GPS). Geometrické tolerovanie. Tolerancie tvaru, orientácie, polohy a hádzania* (ISO 1101: 2017).
- [4] BRONČEK, J. a kol. (2015): *Konštruovanie 1.* Vydala ŽU v Žiline. EDIS – vydavateľské centrum ŽU v Žiline, ISBN 978-80-554-1177-4.
- [5] TORNINCASA, S. a kol. (2020): *Technical Drawing for Product Design. Mastering ISO GPS and ASME GDT.* ISBN: 3030608530, Springer.
- [6] NIELSEN, H. S. (2012): *The ISO Geometrical Product Specifications. Handbook.* ISBN 978-87-7310-721-8.
- [7] KOŽIENKA, L. (2022): *Rozmerová a geometrická analýza súčiastok podľa všeobecnej špecifikácie (GPS).* Bakalárska práca, Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta.
- [8] PETR, K. (2020): *Explanation of New Specifications Used in Geometric Dimension Model.* In: Medvecký, Š.; Hrček, S.; Kohár, R.; Brumerčík, F.; Konstantová, V. (eds). *Current Methods of Construction Design. Proceeding of ICMD 2018, Slovak Republic.* pp 139-147. Springer, Cham Switzerland. ISBN 978-3-030-33145-0.

Možnosti skúšania materiálov magnetickou práškovou metódou

Radoslav Koňár, Ing., PhD.*

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

Jozef Šutka, Ing., PhD.

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: jozef.sutka@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2760

Possibilities of testing materials by magnetic particle testing

Abstract: The paper deals with the limitations of testing ferromagnetic materials by the magnetic particle method. It focuses mainly on the influence of orientation and depth of material defects on the reliability of identification of surface and volume defects when using color and UV methods. The results obtained using unidirectional and alternating pole magnetization in manual control with a magnetic yoke are compared.

ÚVOD (DOTERAJŠIE POZNATKY)

Nedeštruktívna (NDT) magnetická prášková metóda sa zaraďuje medzi povrchové NDT kontroly. Je teda určená pre identifikáciu povrchových a podpovrchových chýb na feromagnetických materiáloch, pričom podpovrchové chyby nemusia byť pevne spojené s povrchom skúšanej súčasti. Fyzikálne princípy magnetickej metódy predurčujú magnetickú metódu na spoľahlivú identifikáciu plošných defektov, a to najmä v prípade, ak je plošný defekt orientovaný kolmo na tok magnetického poľa. Tieto teoretické predpoklady vychádzajúce z fyzikálnych princípov metódy sú čiastočne overené v experimentálnej časti tohto článku [1].

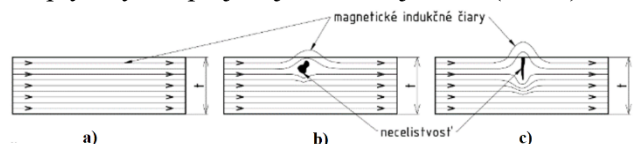
1 MAGNETICKÁ PRÁŠKOVÁ METÓDA

Magnetická prášková metóda je založená na princípe silových účinkov rozptylového magnetického poľa na jemné feromagnetické častice rozptýlené po povrchu feromagnetického materiálu [3].

Magnetická metóda skúšania materiálov je založená na tom, že trhlinka alebo náhla zmena magnetických vlastností – necelistvosť, spôsobí vo feromagnetickom materiáli zvýšenie magnetického odporu tak, že pri zmagnetizovaní nastane rozptyl magnetického toku. Rozptylom sa rozumie časť magnetického toku, ktorý prebieha mimo predpokladanú dráhu tak, že vystupuje do prostredia nad povrch feromagnetického materiálu (obr. 1). Rozptylový tok vystupuje z materiálu takmer kolmo k povrchu a je možné si ho predstaviť, ako polkružnice

znázorňujúce indukčné čiary magnetického toku [3, 4].

Najvyššia spoľahlivosť magnetickej kontroly je pri indikácii chýb plošného charakteru (trhliny, studené spoje a pod.), ktoré spôsobujú najvýraznejší rozptylový tok, ktorý by mal ideálne smerovať kolmo na plošnú chybu. Naopak je to pri chybách priestorových (bublíny, dutiny a pod.), kde sa rozptylový tok prejavuje v menšej miere (obr. 1).



Obr. 1. Priebeh indukčných čiar magnetického toku:
a - materiál bez chyby, b - materiál s objemovou chybou,
c - materiál s plošnou chybou

Magnetickú práškovú metódu rozdeľujeme podľa hodnotenia indikácii z hľadiska použitého magnetického prášku na:

- Farebnú metódu – detekčný prášok šedý, čierny alebo červený farbu. Hodnotenie sa uskutočňuje pri viditeľnom svetle – farebná indikácia je v kontraste s povrchom materiálu (obr. 2a).
- Fluorescenčnú metódu – detekčný prášok obsahuje luminofor, ktorý pri ožiarení čiernym UV svetlom emituje viditeľné svetlo, čo umožňuje pozorovať indikácie (obr. 2b) [1].

Magnetickou práškovou metódou je možné indikovať povrchové a tesne pod povrchom ležiace chyby v materiáloch. Metóda nie je vhodná na zisťovanie vnútorných defektov, ktoré sú hlboko pod povrchom

(viac ako 2 mm). V technickej praxi je táto metóda využívaná pri ručnom a automatizovanom testovaní súčiastok vo výrobných závodoch, ale aj pri periodických skúškach výrobkov počas ich životnosti. Magnetická prášková metóda je čo sa týka *NDT* kontroly rovnocenná s kapilárnou metódou a technologicky nasleduje po vyhovujúcej vizuálnej kontrole. Nevýhodou a obmedzením magnetickej metódy je možnosť skúšania iba feromagnetických materiálov a tiež výskyt falošných tvarových indikácií pri skúšaní reliéfnych povrchov [2-4, 6].



Obr. 2. Magnetická prášková metóda:
a - farebná, b - fluorescenčná

2 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

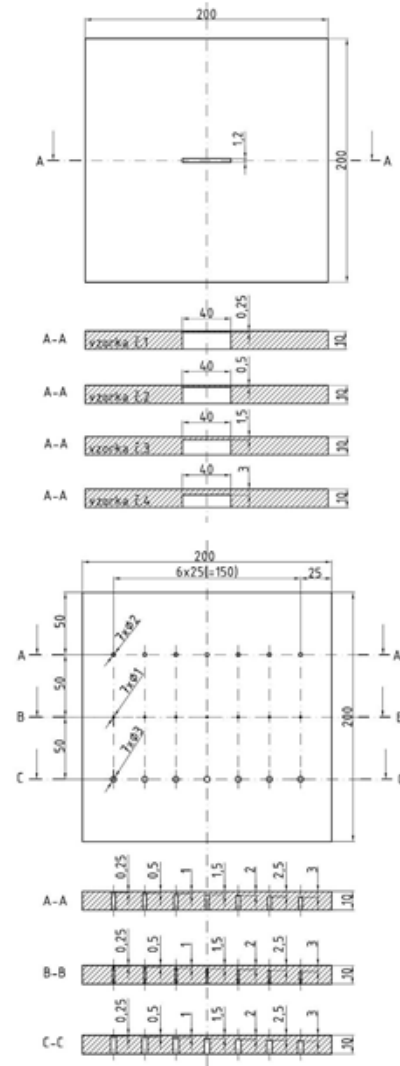
Cieľom experimentálnej časti bolo posúdenie spoľahlivosti a obmedzení magnetickej práškovej metódy pri identifikácii necelistvostí plošného a objemového charakteru s použitím jednosmerného a striedavého pólového magnetovania ručným magnetovacím jarmom. Experiment sledoval vplyv typu chyby (plošná, alebo objemová chyba), smer magnetizácie (0° , 45° , 90°) a hĺbku k chybe (0,25; 0,5; 1,5; 3,0 mm), ktorá nebola pevne spojená so skúšobným povrchom [2].

Pre experiment boli vyrobené štyri vzorky s umelou plošnou chybou, ktorú reprezentovala kolmá drážka rôznych hĺbok so šírkou 1,2 mm a dĺžkou 40 mm a jedna vzorka s umelými chybami objemového typu, ktoré reprezentovali vývrty s plochým dnom (FBH – flat bottom hole) s rôznou hĺbkou orientované kolmo na povrch s priermi $\varnothing 1,0$; $\varnothing 2,0$ a $\varnothing 3,0$ mm. Umelé chyby boli vyrobené do oceľových plechov z materiálu *S235JR* s rozmermi 200x200x10 mm z opačnej strany ako bola vykonaná magnetická kontrola. Schéma vzoriek je na obr. 3.

Na magnetickú práškovú kontrolu bola použitá metóda pólového magnetovania ručným jarmom s jednosmerným a striedavým prúdom. Pre identifikáciu defektov sa využili farebné a fluorescenčné magnetické prášky v sprejových suspenziách. Kontrola bola vykonaná v súlade s normami *STN EN ISO 3059* a *STN EN ISO 9934-1* [2, 4].

Kontrola experimentálnych vzoriek bola vykonaná s použitím magnetickej suspenzie v spreji od výrobcu HELLING (čistič NR 107, podkladová biela farba NR

104A, magnetická suspenzia čierna NRS 103, magnetická suspenzia fluorescenčná NRF 101).



Obr. 3. Schéma experimentálnych vzoriek [2]

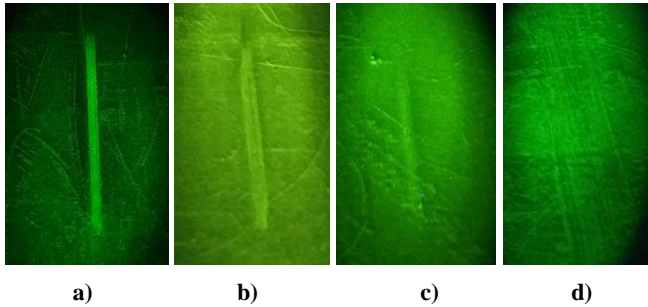
2.1 Kontrola vzoriek jednosmerným magnetovacím jarmom

Na magnetovanie sa použilo ručné jarmo *Hansa UM – 9 DC* od výrobcu *Helling* napájané jednosmerným elektrickým prúdom z batérie. Ručný jednosmerný magnet má podľa výrobcu odtrhovú silu viac ako 265 N a je napájaný napätím 6 V. Pri magnetovaní boli použité pólkové nadstavce, ktoré umožnili priblížiť póly magnetu pri kontrole na vzdialenosť 70,0 mm. Nameraná intenzita jednosmerného magnetickej poľa meraná meračom intenzity poľa Magnetometer *PTS MH 7.5* bola pri kontrole $1,2 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$. Vyššiu intenzitu magnetickej poľa sa jednosmerným magnetovacím jarmom nepodarilo dosiahnuť. Kontrola bola vykonaná fluorescenčnou a farebnou metódou [2].

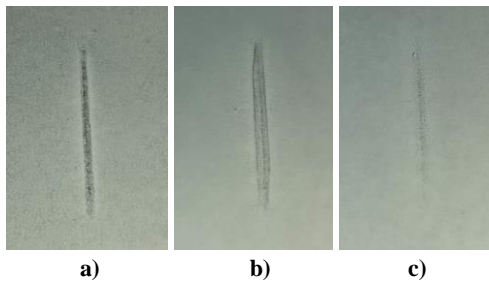
Pri kontrole vzoriek fluorescenčnou metódou sa počas magnetovania nanášal detekčný prostriedok *NR107* priamo na očistený povrch a následne sa indikácia hodnotila pri čiernom svetle ultrafialového zdroja.

Ako zdroj ultrafialového svetla pri UV kontrole bolo použité svietidlo UVG2 od firmy Labino. Magnetovanie prebiehalo v troch smeroch a to kolmo na chybu a s pootočením o 45° a 90°.

Z každej zaznamenatej indikácie bola vyhotovená snímka a odmerala sa jej šírka a dĺžka posuvným meradlom. Snímky indikácií v závislosti od hĺbky pri kolmom dopade magnetických indukčných čiar na chybu sú na obr. 4.



Obr. 4 UV indikácie od plošných umelých chýb pri jednosmernej magnetizácii: a – hĺbka 0,25 mm, b – hĺbka 0,5 mm, c – hĺbka 1,5 mm, d – hĺbka 3,0 mm [2]



Obr. 5 Farebné indikácie od plošných umelých chýb pri jednosmernej magnetizácii: a – hĺbka 0,25 mm, b – hĺbka 0,5 mm, c – hĺbka 1,5 mm [2]

Tab. 1 Výsledky UV a farebnou magnetickou metódou s použitím jednosmerného pólóvého magnetovania [2]

Typ metódy	Hĺbka drážky pod povrchom [mm]	Reálny rozmer chyby [mm]	Nameraný rozmer indikácie [mm]	Ostrosť indikácie
UV	0,25	1,20 x 40,00	2,00 x 40,00	Ostro ohraničená
	0,50	1,20 x 40,00	2,50 x 38,00	Ostro ohraničená
	1,50	1,2 x 40,00	3,00 x 33,50	Menej výrazná
	3,00	1,2 x 40,00	Bez indikácie	Bez indikácie
	0,25-3,00	FBH: ϕ 1,00; ϕ 2,00; ϕ 3,00	Bez indikácie	Bez indikácie
Farebná	0,25	1,20x40,00	1,80 x 38,00	Ostro ohraničená
	0,50	1,20x40,00	2,20 x 39,50	Ostro ohraničená
	1,50	1,2x40,00	Nemerateľná	Menej výrazná
	3,00	1,2x40,00	Bez indikácie	Bez indikácie
	0,25-3,00	ϕ 1,00; ϕ 2,00; ϕ 3,00	Bez indikácie	Bez indikácie

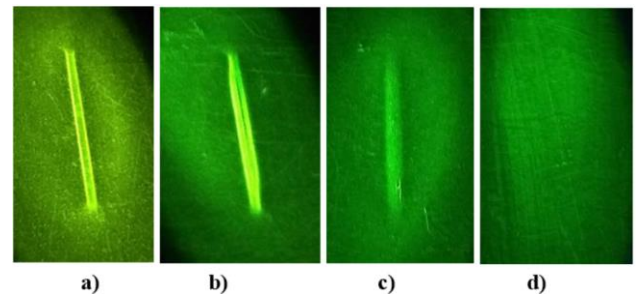
Po UV metóde bola vykonaná magnetická farebná metóda. Indikácie boli hodnotené pri dennom svetle s intenzitou 850 luxov, pričom sa odmerali ich rozmery a pre každú vzorku bol vyhotovený snímok. Výsledky kontroly farebnou metódou sú uvedené na obr. 5.

Pri kontrole vzorky s vývrtmi s plochým dnom (FBH) jednosmerným prúdom neboli pri UV a farebnej magnetickú metóde zobrazené žiadne indikácie od umelých chýb aj napriek tomu, že umelé chyby boli 0,25 mm pod povrchom a priemer najväčšej chyby bol ϕ 3,0 mm. Výsledky kontroly sú zhrnuté v tab. 1.

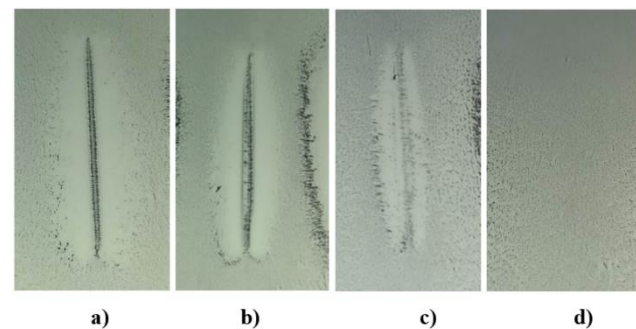
2.2 Kontrola vzoriek striedavým magnetovacím jarmom

Pre magnetovanie striedavým prúdom bolo použité ručné jarmo Hansa 230, UM 15 od výrobcu Helling s pólóvými nastavcami. Jarmo je napájané striedavým elektrickým napätím zo siete 230 V. Ručný striedavý magnet má podľa výrobcu odtrhovaciu silu viac ako 45 N a intenzitu tangenciálneho poľa 23,0 A·m⁻¹. Pre kontrolu boli použité rovnaké indikačné prostriedky, ako pri kontrole jednosmerným prúdom. Vzďialenosť pólóvých nastavcov bola rovnaká ako pri jednosmernom jarme a to 70,0 mm. Nameraná intenzita striedavého magnetického poľa meraná meračom intenzity poľa Magnetometer PTS MH 7.5 bola pri kontrole 6,7 kA·m⁻¹ [2].

Postup a hodnotenie výsledkov kontroly bolo rovnaké ako v prípade pólóvého magnetovania jednosmerným prúdom. Výsledky kontroly striedavým prúdom sú na obr. 6.



Obr. 6. UV indikácie od plošných umelých chýb pri striedavej magnetizácii: a – hĺbka 0,25 mm, b – hĺbka 0,5 mm, c – hĺbka 1,5 mm, d – hĺbka 3,0 mm [2]



Obr. 7. Farebné indikácie od plošných umelých chýb pri jednosmernej magnetizácii: a – hĺbka 0,25 mm, b – hĺbka 0,5 mm, c – hĺbka 1,5 mm, d – hĺbka 3 mm [2]

Výsledky farebnej metódy sa hodnotili pri osvetlení 850 luxov. Výsledky kontroly farebnou metódou sú na obr. 7.

Pri kontrole vzorky s vývrtmi s plochým dnom (FBH) striedavým prúdom neboli rovnako pri UV a farebnej magnetickej metóde zobrazené žiadne indikácie. Výsledky kontroly striedavým pólóvym magnetovaním sú zhrnuté v tab. 2.

Tab. 2. Výsledky UV a farebnou magnetickou metódou s použitím striedavého pólóvoho magnetovania [2]

Typ metódy	Hĺbka drážky pod povrchom [mm]	Reálny rozmer chyby [mm]	Nameraný rozmer indikácie [mm]	Ostrosť indikácie
UV	0,25	1,20 x 40,00	1,60 x 39,80	Ostro ohraničená
	0,50	1,20 x 40,00	2,70 x 39,80	Ostro ohraničená
	1,50	1,20 x 40,00	3,00 x 39,00	Menej výrazná
	3,00	1,20 x 40,00	Bez indikácie	Bez indikácie
	0,25-3,00	φ1,00; φ2,00; φ3,00	Bez indikácie	Bez indikácie
Farebná	0,25	1,20 x 40,00	1,20 x 40,00	Ostro ohraničená
	0,50	1,20 x 40,00	2,00 x 40,00	Ostro ohraničená
	1,50	1,20 x 40,00	3,00 x 41,00	Menej výrazná
	3,00	1,20 x 40,00	Bez indikácie	Bez indikácie
	0,25-3,00	φ1,00; φ2,00; φ3,00	Bez indikácie	Bez indikácie

ZÁVER

Z výsledkov kontroly experimentálnych vzoriek s umelými chybami magnetickou práškovou metódou jednosmerným a striedavým prúdom je možné vyvodit' viacero záverov.

Umelé chyby typu kolmá drážka s rozmermi 1,2x40 mm bola identifikovaná UV aj farebnou magnetickou

kontrolou pri použití striedavého aj jednosmerného pólóvoho magnetovania ručným jarmom. Drážky boli jednoznačne identifikované v hĺbkach 0,25; 0,5 a 1,50 mm v prípade jednosmernej a aj striedavej magnetizácie.

V prípade jednosmernej magnetizácie bola indikácia od drážky v hĺbke 1,5 mm rozmazaná, menej výrazná ako pri striedavej magnetizácii a teda môžeme povedať, že išlo o hraničnú hĺbku indikácie plošného defektu pri jednosmernej magnetizácii. Pri striedavej magnetizácii bol indikácia ostrejšie ohraničená, čo spôsobila hĺbka prieniku striedavého magnetickeho poľa a tiež povrchový skin efekt pri striedavej magnetizácii.

Z výsledkov vyplýva, že striedavým magnetovaním môžeme dosiahnuť vyššiu intenzitu magnetickeho poľa a teda aj vyššiu spoľahlivosť kontroly. Vyššia intenzita magnetickeho poľa je spojená tiež s hlbším prienikom magnetickeho poľa do feromagnetického materiálu a s dosiahnutím ostrejších indikácií.

LITERATÚRA

[1] MORAVEC, J a kol. (2020): *Technológia 1. EDIS – Žilina*, ISBN 978-80-554-1731-8.

[2] FODREK, V. (2019): *Analýza spoľahlivosti nedeštruktívnej magnetickej práškovej metódy pri identifikácii podpovrchových defektov*. Žilinská univerzita v Žiline – Diplomová práca.

[3] HELLIER, CH. (2003): *Handbook of Nondestructive Evaluation*. McGraw-Hill Inc., ISBN 0-07-139947-X.

[4] KOPEC, B. a kol. (2008): *Nedestruktivní skoušení materiálů a konstrukcí*. CERM – Brno, ISBN 978-80-7204-591-4.

[5] LEŽDÍK, V. - KOŇÁR, R. - KOREŇOVÁ, N. (2020): *Opravy plynovodných potrubí vykonávané technológiou zvaania*. IkaV spol. s.r.o. Žilina, ISBN 978-80969599-3-8.

[6] LEŽDÍK, V. - MIČIAN, M. - PATEK, M. (2020): *Schvalovanie postupov zvarania kovových materiálov a plastov*. IkaV spol. s.r.o. Žilina, ISBN 978-80-969599-2-1.

Prehľad historického vývoja a analýza súčasného stavu dopravnej a manipulačnej techniky v zábavnom priemysle

Miroslav Blatnický, doc. Ing., PhD.*

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

Ján Dižo, doc. Ing., PhD.

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

Denis Molnár, Ing.

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

Overview of historical development and analysis of the current state of transport and handling machines in the entertainment industry

Abstract: The article deals with the historical development and analysis of the current state of handling machines used in the entertainment industry. It points in particular to the material aspect, i.e. materials used for the production of amusement park equipment components. The article represents an important aspect that precedes the design of such a device, respecting the currently valid legislative requirements based on the standard *STN EN 13814* so as to ensure protection against injuries or potentially dangerous situations (ejection, falling out, hitting, etc.).

ÚVOD

V dnešnej uponáhľanej dobe, kedy je práca radená na prvé miesto a na bežné radosti života nezostáva čas, by ľudia mali vedieť spomaliť a spestriť si svoje voľné chvíle. Prínos zábavného priemyslu by preto nemal byť zanedbateľný, ale naopak chápaný ako niečo, kde môžu celé rodiny hľadať odreagovanie od bežných starostí a problémov. Z toho dôvodu vznikol prezentovaný článok, ktorý predstavuje prvý krok pri spracovaní návrhu zábavného zariadenia vhodného pre zábavné parky a všetky typy slávností, kde sa táto technika môže vyskytovať.

Jednotlivé kroky spracovania problematiky spočívajú v prehľade historického vývoja zábavného priemyslu, poukazujúc na prvých vynálezcoch zábavných zariadení a postupný vývoj priemyslu so zábavou až do súčasného obdobia. Následne je potrebné sa zaoberať hlavnými komponentami používanými pri stavbe manipulačných zariadeniami a popísať hlavné konštrukčné celky. Tiež analyzovať najčastejšie používané materiály pre ich výrobu. Pri návrhu sa bude vychádzať z postupov

špecifikovaných v norme *STN EN 13814* z ktorej budú vybrané zaujímavé informácie týkajúce sa návrhu a prevádzky zábavných zariadení.

V ďalšom bode celkového riešenia problému bude vybraný typ zábavného zariadenia, spolu s technickými špecifikáciami a miestom implementácie. Budú vytvorený *3D CAD* model v programe *CATIA V5*, pričom v modeli sa bude vychádzať z parametrov odvodených z nutných dimenzionálnych výpočtov.

Pomocou analytických a numerických metód autori navrhnu vybrané konštrukčné celky konštruovaného zariadenia. Prvým takýmto celkom bude navrhovaná gondola, prispôbená hlavným rozmerom tela podľa normy *STN EN 547-3 + A1* s maximálnou nosnosťou 100 kg na pasažiera. Ďalšie výpočty budú zamerané na navrhovanie priehradovej konštrukcie a dutého hriadeľa, ktoré budú overované pomocou analytických a numerických metód. Pri návrhu zábavného zariadenia sa uskutoční konkrétny výpočet výkonu elektromotora spolu s návrhom ozubeného prevodu. Model zariadenia bude

obsahovať hlavný nosník, ktorý bude analytickým riešením overený na požadovaný priehyb a skontroluje sa numerickou metódou v programe ANSYS. Tiež bude potrebné pomocou výpočtov zistiť závislosť zaťaženia od zábavného zariadenia na vysunutie valcov zvoleného teleskopického systému a navrhnúť vhodný priemer jednotlivých valcov.

1 HISTORICKÝ VÝVOJ

História technológií v zábavnom priemysle zaznamenala vlnu inovácií už v 18. storočí, pričom podnety vychádzajú z niekoľkých tradícií, ktoré pochádzajú už zo stredoveku. Zábavný priemysel sa vyvíjal vďaka cestovaniu, periodickým veľtrhom a výstavám. Jedným z najstarších vplyvov bol periodický veľtrh stredoveku z roku 1133 - *Bartolomejský veľtrh v Anglicku*.

V 18. a 19. storočí sa zábavný priemysel pre veľký úspech rozvinul do zábavných miest a parkov, v ktorých si verejnosť mohla pozrieť divadelné predstavenia, akrobacie, kúzelníctvo. Manipulačné technológie z prvej polovice 19. storočia mali jednoduchú konštrukciu a boli ťahané ručne, poprípade poníkmi. Zaujímavým vývojom bolo bicyklové zábavné zariadenie (obr. 1), tzv. velocipéd kolotoč.



Obr. 1. Velocipéd kolotoč

Významný pokrok bol zaznamenaný v roku 1861, kedy *Thomas Bradshaw* zostrojil zariadenie poháňané parou. V nasledujúcich rokoch sa pridali ďalší inovátori ako *Sidney Soames* a *Frederick Savage*, ktorí vytvorili modifikované verzie zariadenia a strojové vybavenie sa vyvážalo po celom svete. Jedna z najstarších verzií obsahovala aj ďalšiu novú myšlienku, hnacie centrum. Skladalo sa z prepravného motora s centrálnym pohonom. Týmito inováciami sa otvorila éra moderného zábavného priemyslu.

Myšlienka mechanizácie sa šírila ďalej a patentom z roku 1888 sa zaviedli prvé „parné hojdačky“. Jedným z prvých úspešných inovátorov bol *William Cartwright* z *Bromitchu*, ktorý zostavil systém

pomocou zvislých valcov. V roku 1888 *Frederick Savage* navrhol a skonštruoval prvú horskú dráhu. Myšlienka sa stala ihneď populárnou a v priebehu niekoľkých mesiacov bolo vytvorených mnoho cestovných okruhov, vrátane *Greens* a *Baileys*. Tieto zariadenia boli vrcholným bodom umeleckého prejavu a estetiky, čo naznačuje aj pokrok pri dosahovaní dekoratívnych kritérií. Dizajnéri a remeselníci sa začali uplatňovať čoraz intenzívnejšie a umelecká hodnota sa stávala štandardom.

Ďalším významným pokrokom v technológiách zábavného priemyslu pred prvou svetovou vojnou bola vyhliadková železnica. Medzi najznámejšie historické vyhliadkové železnice patrí napríklad *Scenic Railway* v zábavnom parku *Dreamland Margate* vo Veľkej Británii, *Kuranda Scenic Railway* v Austrálii alebo *Angels Flight* v Kalifornii. Parou poháňané kolotoče sa vyrábali až do vypuknutia prvej svetovej vojny. Počas vojny bolo zrušených veľa veľtrhov a postavilo sa už len niekoľko vyhliadkových železníc. Po ukončení vojny trpeli krajiny *Európy* infláciou, vďaka čomu boli výroby nákladné. Rozvoj pokračoval najmä v *Amerike* pričom populárnymi a dodnes známymi sa stali retiazkové kolotoče alebo húsenkové dráhy. Populárne boli aj *Cake Walks*, kde mechanizmus pozostával z vlnitých mostov a uličiek poháňaných kľukami (obr. 2)



Obr. 2. Cake walk

Vývoj elektrických autíčok je dodnes predmetom diskusie. Originálny patent získali v roku 1920 bratia *Max* a *Harold Shoehrer*. Autá boli pôvodne vyrobené z cínu a ich používanie bolo nebezpečné. Preto v roku 1928 bratia *Lusse* prišli s modelom *Auto-Skooter*, ktorý bol počas rokov neustále vylepšovaný a používaný až do 90. rokov 20. storočia. Koncom 20. rokov 20. storočia sa do vývoja technológií zábavného priemyslu začali zapájať krajiny ako *Francúzsko* a *Nemecko*. Na trhu sa objavovali nové atrakcie, ako sú hurikánové

trysky, twisty, *Calypso*, *Pirate Boat*, *Break Dance* alebo *Miami Trip*, ktoré sú používané dodnes. [1]

Slovensko vstúpilo taktiež do histórie zábavného priemyslu, keď sa na bratislavskom *Tyršovom nábreží* postavil *Lunapark*, ktorý bol rozšírený v 80. a 90. rokoch 20. storočia. V parku sa nachádzali atrakcie ako napríklad ruské kolo, autodróm, horská dráha, detský vláčik, motokárová dráha a iné kolotoče pre deti. Koniec lunaparku nastal po dvadsiatich rokoch existencie na prelome rokov 2003 a 2004. [2]

2 SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY Z POHLADU POUŽITIA MATERIÁLU

V súčasnej dobe je zábavný priemysel na vysokej úrovni vývoja. Konštrukcie a materiály používané v dnešnej dobe podliehajú prísnyim požiadavkám, ktoré zohľadňujú predovšetkým bezpečnosť. Na konštrukcie sa využívajú predovšetkým oceľové a hliníkové materiály. Zábavné zariadenia a iné atrakcie sú v súčasnosti poháňané najmä elektromotormi [3].

V zábavnom priemysle je veľmi dôležité dbať na správny výber konštrukčných materiálov, pretože ovplyvňujú rozmery prierezov, a tým aj koncepčné riešenia konštrukcií. Na konštrukčné prvky by sa mali používať len materiály, ktorých údaje sa uvádzajú v európskych normách pre stavby. Ostatné materiály by sa mali používať len vtedy, keď sa overila ich použiteľnosť napríklad skúškami pevnosti. Najpoužívanejšie typy ocelí:

- *S235JRG2* - nelegovaná akostná konštrukčná oceľ. Vhodná na zváranie všetkými bežnými typmi zvárania. Používaná najmä na stroje a konštrukcie namáhané staticky a dynamicky.
- *S275JR* - uhlíková a nízkolegovaná vysokopevnostná oceľ. Vhodná na všetky bežne typy zvárania. Zaručuje vyšší stupeň akosti čo zvyšuje výdrž použitého výrobku.
- *S355JO* - nelegovaná akostná konštrukčná oceľ vhodná pre všeobecné použitie so zaručenou zvárateľnosťou za studena. Používa sa na zvárané konštrukcie s vysokou pevnosťou, časti strojov a dopravných zariadení namáhané staticky a dynamicky.
- *GS-52* - nelegovaná konštrukčná oceľ, ktorá sa bežne používa vo všeobecnom strojárstve. Materiál je vhodný na výrobu žeriavových konštrukcií, bubnov, pojazdových kolies, lanových kladiek a vodiacich koľajníc.

Odporúčaná oceľ na strojové súčiastky ako sú skrutky, kolíky, nity, perá, pružné spoje, hriadele, ložiská, spojky, kinematické a hydraulické mechanizmy:

- *S235JRG2* - nelegovaná konštrukčná oceľ triedy 11 vhodná na všetky typy zvárania. Používa sa na konštrukcie a strojové súčiastky namáhané staticky a dynamicky,
- *E295* - nelegovaná konštrukčná oceľ triedy 11 používaná na pevné časti strojov, ktoré sú vysoko namáhané v ťahu a tlaku (skrutky, hriadele, vretená, klíny) pevnosť v ťahu je $440 \div 660$ MPa pri 20 °C.
- *16MnCr5* - nízkolegovaná ušľachtilá mangán-chrómová oceľ k cementovaniu. Najčastejšie využitie na cementačnú oceľ pre stredne namáhané diely strojov a motorových vozidiel. Je zvárateľná a dobre tváriteľná za studena. Pre zvýšenie húževnatosti materiálu sa pridáva bór ($0,0008 \div 0,0050$ %).
- *34CrNiMo6* - stredne legovaná ušľachtilá chróm-nikel-molybdénová oceľ s vysokou prekaliteľnosťou pre vysoko namáhané strojové súčiastky. V ušľachtilom stave má veľmi dobrý pomer pevnosti k medzi klzu a vysokú húževnatosť.
- *42CrMo4* - nízkolegovaná ušľachtilá chróm-molybdénová oceľ s vyššou prekaliteľnosťou pre viac namáhané strojové súčiastky. Po zakalení dosahuje tvrdosť 58 HRC. Do priemeru materiálu 100 mm môže po zušľachtení docieľiť pevnosť nad 1000 MPa.

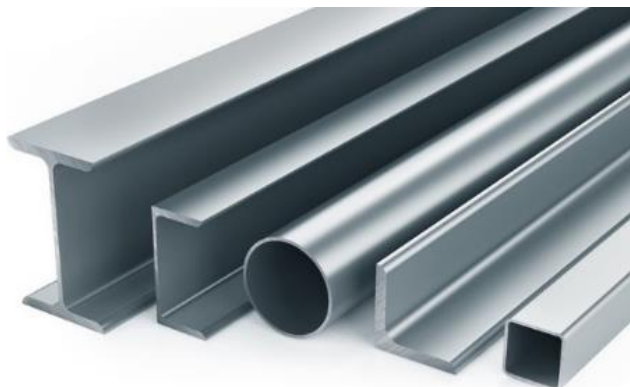
Medzi ďalšie normalizované ocele na strojové súčiastky môžeme zahrnúť: *S355JO*, *E335*, *E360*, *2C22*, *20MnCr5*, *2C45*, *2C60*, *41Cr4*, *51CrV4*, *GS-45.3*. Môžu sa používať aj ostatné triedy ocelí, ktorých technologické materiálové údaje ako chemické a mechanické vlastnosti sa uvádzajú v európskych alebo národných normách [3]. Konštrukčné ocele sa v súčasnosti modifikujú, a to hlavne vo zvyšovaní pevnosti, ktorá umožňuje zmenšenie nosných prierezov zaťažovaných súčiastok a zníženie celkovej hmotnosti strojov a konštrukcií zábavných zariadení.

Jedným z ďalších používaných materiálov je hliník a jeho zliatiny. Je to nepolymorfny kov, ktorý sa vyznačuje nízkou hustotou ($2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), veľmi dobrou elektrickou a tepelnou vodivosťou. Hliník sa taktiež vyznačuje odolnosťou proti korózii, ktorá je v zábavnom priemysle využiteľná, keďže sa atrakcie nachádzajú prevažne v otvorenom prostredí a podliehajú okolitým poveternostným vplyvom. Vyššiu pevnosť hliníka môžeme dosiahnuť tvárnením za studena. Kvôli zlepšeniu vlastností najmä (mechanických, pevnostných a odolností proti korózii) sa hliník leguje. Hlavnými prísadami v hliníkových zliatinách sú meď, horčík, kremík, mangán a zinok. Konkrétne použitie sú na sedadlá, kabíny, zábradlia, diskové ráfiky [4].

Ďalšie používané normalizované materiály v zábavnom priemysle sú: uhlíkové vlákna, drevo, polyuretán, polyamid, polyester, polyetylén, plastické kompozity, betón, nylón, plasty. Tieto materiály sa najčastejšie využívajú na doplnkové prvky ako napríklad sedadlá, zábradlia, okrasné prvky alebo pri uzatvorených kabínach na okná a dvere. Niektoré materiály sa naďalej obmieňajú za používateľsky vhodnejšie, ekonomicky nenáročnejšie a pevnostne potrebnejšie [3].

OCEĽOVÉ KONŠTRUKCIE PRE DOPRAVNÚ TECHNIKU ZÁBavnÉHO PRIEMYSLU

Oceľové konštrukcie sú jedným z najpoužívanejších konštrukcií v strojárstve. Časté používanie týchto konštrukcií je výhodné z hľadiska pevnostných vlastností a ľahkej dostupnosti oproti porovnateľne rovnako pevným materiálom. Vzhľadom na jedinečný dizajn rôznych druhov zábavných zariadení a ich využitia sa používa viacero tvarov oceľových konštrukcií. Pri hlavných konštrukčných prvkoch sa najčastejšie používajú oceľové I-profil, U-profil, obdĺžnikové uzavreté profily, štvorcové uzavreté profily, oceľové hrubostenné profily kruhového prierezu (obr. 3).



Obr. 2. Typy najčastejšie používaných profilov

Podľa normy STN EN 1990 sa musia konštrukcie zábavných zariadení navrhovať tak, aby počas svojej životnosti odolali všetkým zaťaženiám a vplyvom, ktoré sa vyskytujú pri výrobe, prevádzke a manipulácii. Taktiež musia spĺňať osobitné požiadavky použiteľnosti určené pre konštrukciu alebo nosný prvok. Hlavné požiadavky, ktoré musí každá konštrukcia spĺňať sú dostatočná odolnosť, dobrá použiteľnosť a vysoká trvanlivosť. Aby bola konštrukcia schopná funkcie, musia byť možné poškodenia odstránené alebo minimálne obmedzené vhodnou voľbou opatrení. Dôležité je vhodný výber typu konštrukcie, zaistenie celistvosti konštrukcie, správny výber materiálu, bezpečnostne zodpovedajúci návrh a konštrukčné zásady, správny postup výroby, zhotovovania a používania konštrukcií podľa príslušných projektových dokumentácií a overených postupov [5].

Pri navrhovaní konštrukcie sú dôležitým faktorom medzné stavy. Po prekročení medzných stavov, konštrukcia prestáva splňať svoju funkciu a môže dochádzať k porušeniam alebo trvalým poškodeniam. Všetky situácie a zaťažovacie stavy, ktoré môžu pri manipulácii a prevádzke nastať sa preto overujú. Pre kontrolu sa zostavia fyzikálne alebo matematické modely konštrukcie, pri ktorých sa zisťujú dve skupiny medzných stavov, medzné stavy únosnosti a použiteľnosti [5].

Pod'akovanie

Tento výskum podporila Kultúrna a vzdelávacia grantová agentúra MŠ SR v projekte č. KEGA 023ŽU-4/2020: *Vývoj pokročilých virtuálnych modelov na štúdium a skúmanie prevádzkových charakteristík dopravných prostriedkov.*

ZÁVER

Hlavným cieľom autorov je navrhnutie zábavného zariadenia podľa vlastného konštrukčného návrhu. Tomuto predchádza ako bolo v práci uvedené, historický prehľad v oblasti vývoja priemyslu so zábavou, pričom bolo poukázané na prvých vynálezcoch zábavných zariadení s postupným vývojom až do dnešných čias. Následne boli uvedené hlavné materiály používané v stavbe dopravnej a manipulačnej techniky tohto odvetvia. Analýza sa vykonala najmä štúdiom normy STN EN 13814, odkiaľ boli vybrané podstatné a tiež zaujímavé informácie týkajúce sa návrhu takéhoto zariadenia. V ďalšom riešení tejto problematiky sa autori zamerajú na analýzu jednotiek nesúcich pasažierov, pohony takejto techniky upevňovacie prvky.

LITERATÚRA

- [1] THE UNIVERSITY OF SHIEFFIELD (2007): *Fairground Rides- Chronical development.* [online]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20110811021142/https://www.nfa.dept.shef.ac.uk/history/rides/history.html>
- [2] LUNAPARK (2017): *Lunapark* (Bratislava). [online]. 2017 [cit. 10.11.2019]. Dostupné z: [https://sk.wikipedia.org/wiki/Lunapark_\(Bratislava\)](https://sk.wikipedia.org/wiki/Lunapark_(Bratislava)).
- [3] STN EN 13814:2005, *Strojové vybavenie a konštrukcie lunaparku a zábavného parku-Bezpečnosť.*
- [4] SKOČOVSKÝ, P. a kol. (2015): *Náuka o materiáli.* Žilinská univerzita v Žiline / EDIS-vydavateľské centrum ŽU, ISBN 978-80-554-1071-5.
- [5] BUJŇÁK, J. - VIČAN, J. (2012): *Navrhovanie oceľových konštrukcií.* Žilinská univerzita v Žiline/EDIS – vydavateľstvo ŽUŽ. 191 s. ISBN 978-80-554-0529-2.

Benchmarking ako nástroj pre hodnotenie uplatnenia pokročilej technológie riadenia výrobného procesu

Peter Bubeník, doc., Ing., PhD.*

Katedra priemyselného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: peter.bubenik@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2719, Fax.: + 421 41 513 2701

Olha Kolesnyk, Ing.

Katedra priemyselného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: olha.kolesnyk@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2713, Fax.: + 421 41 513 2701

Miroslav Rakyta, doc. Ing., PhD.

Katedra priemyselného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: miroslav.rakyta@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2737, Fax.: + 421 41 513 2701

Juraj Čapek, Ing.

Katedra priemyselného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: juraj.capek@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2719, Fax.: + 421 41 513 2701

Benchmarking as a tool for evaluating the application of advanced production process management technology

Abstract: The growing trend of using and processing big data brings space to study, analyze and understand the performance aspects of the monitored advanced technologies. In general, benchmarking is a well-known tool in the world of software systems that is commonly used to identify companies' strengths and weaknesses. The article presents the use of the benchmarking tool as a tool for evaluating the application of advanced technologies supporting the management of the production process.

ÚVOD

V praxi sa výrobné organizácie snažia vytvoriť riešenia na správu veľkých dát, pre ukládanie a ich spracovanie. Často čelia výzve vybrať vhodnú pokročilú technológiu aby im pomohla naplniť podnikové ciele. Rozhodnutie manažmentu je veľmi náročná úloha, ktorá vyžaduje, aby výber bol založený na znalostiach funkčnosti, vlastností a výkonnostných aspektov dostupných pokročilých technológií (Hwang, 2017). V praxi sa riešenia prirodzene líšia prípad od prípadu z hľadiska uplatnenia technológie pre vybraný charakter výroby, typ výroby, rozmanitosti využitia výrobných zdrojov, charakteru výrobných zákaziek, samotného business modelu výrobného podniku ako i dostupnej IT infraštruktúry. Na vyriešenie problému často hľadajú porovnávací analýzy, ktoré

manažmentu poskytujú potencionálny prínos pokročilých technológií. Základom hodnotenia je doložená výpočet návratnosti investícií vložených do obstarania pokročilých technológií plus odporúčania predajcov a ich spokojných zákazníkov. Manažment využíva „zlaté pravidlo“, že je potrebné nasledovať najlepších z najlepších.

Nástroje benchmarkingu sú známe ako nástroje, ktoré sú nápomocné pri stanovovaní cieľov organizácie tak aby mohli naštartovať realistický proces zlepšovania.

Benchmarking pomáha porozumieť zmenám, ktoré sú na takéto zlepšovanie potrebné. Význam použitia nástrojov sa potom môže odraziť napríklad vo zvýšenej spokojnosti zákazníkov či zlepšení konkurenčnej pozície organizácie. Príklad použitia benchmarkingu uvádza Dean, (2004) nasledovne:

- Poskytnúť meracie nástroj, ktorý porovnáva výkonnosť daného procesu (ktorý chceme zlepšiť) medzi procesmi viacerých organizácií.
- Opísať nedostatok výkonnosti organizácie tak, ako bola zistená porovnaním s identifikovanými úrovňami výkonnosti ostatných organizácií.
- Nájsť najlepšie praktiky a hybné sily, ktoré vyvolávajú také výsledky, ktoré bolo možné sledovať počas porovnávacj štúdie.
- Stanoviť výkonnostné ciele pre proces a identifikovať oblasti, v ktorých potrebné prijať opatrenia na zlepšenie.

1 PRÍSTUPY BENCHMARKINGU

Proces benchmarkingu vychádza z trhových praktík spoločností, ktoré ho využívajú ako nástroj na podporu procesu riadenia na získanie konkurenčnej výhody. Spoločnými prvkami mnohých rôznych definícií sú meranie, porovnávanie, identifikácia optimálnych vzorov, ich implementácia a neustále zlepšovanie. Benchmarking je založený na vhodne zvolených merateľných alebo deskriptívnych hodnotiacich kritériách umožňujúcich porovnanie vo vybraných oblastiach. Vďaka flexibilitě tohto prístupu je možné benchmarking použiť v oblastiach, kde je potrebné porovnať vybrané parametre konkrétneho systému pre určenie najlepšieho riešenia. Je potrebné zdôrazniť, že benchmarking nie je o replikácii hotových riešení, ale o analýze nástrojov a metód na ich implementáciu, čo je obzvlášť užitočné pri porovnávaní mestských logistických systémov. Ich veľmi veľká vnútorná diferenciácia znamená, že mechanický prenos riešení overených v iných systémoch môže viesť k suboptimálnym výsledkom. V praxi existujú dva samostatné prístupy k benchmarkingu, ako benchmarking výkonných pracovníkov a benchmarking procesov.

Výkonový benchmarking je benchmarking založeným na dátach. Porovnáva relatívnu výkonnosť s množstvom alebo súborom (odsúhlasených) ukazovateľov výkonnosti, často medzi konkurentmi. Vo svojej podstate teda rieši otázku čoho dosahuje organizácie aké výkonnosti, koľko merných jednotiek atď. Takýto benchmarking si nevyžaduje návštevy, často sa vykonáva ako takzvaný „benchmarking konzorcía“, kde benchmarking vykonáva viacero organizácií za účasti tretej strany – benchmarkingového centra (Laney, 2011). Medzi hlavné výhody tohto typu benchmarkingu patrí to, že ide o užitočný spôsob identifikovanie rozdielu vo výkonnosti medzi subjektmi vykonávajúcimi benchmarking a tiež to, že výkonový benchmarking môže (ale nemusí) ukázať, kde sa organizácia potrebuje najviac zlepšiť, teda aký je rozdiel vo výkonnosti (meraných výsledkoch).

Nevýhodou výkonového benchmarkingu je, že obvykle neidentifikuje priamo procesy alebo postupy, ktoré viedli k vynikajúcej výkonnosti, a teda nedáva žiadny "návod" pre organizáciu AKO sa zlepšiť. Obťažná môže byť tiež interpretácia výsledkov (aké zlepšenie je naozaj možné / reálne). To sa môže prejaviť pri porovnávaní niektorých výsledkov medzi veľkými a malými firmami (napr. "Investície v Eur do vzdelávania na jedného zamestnanca" v spoločnostiach distribuujúcich elektrickú energiu (prirodzený "monopol") a v malej strojárskjej firme, ktorá pracuje v tvrdom konkurenčnom prostredí) (Laney, 2011).

Výkonový benchmarking je teda dobré vykonávať v spojení či kombináciu s tzv. Procesným benchmarkingom, ktorého vykonanie vyzerá ťažšie.

Procesný benchmarking meria individuálnu realizovateľnosť procesu a jeho funkčnosť. Merania, porovnania často prebiehajú vo vzťahu k organizáciám, ktoré sú lídrami vo vykonaní špecifických porovnávacích procesov. Porovnávané procesy môžu patriť medzi „best practices“ pri implementácii podobných procesov v podnikoch. Predpokladom však je, že je potrebné overiť, či je proces vykonávania „referenčnej“ organizácie oprávnený na vrcholovej úrovni. Preto výkonný benchmarking zodpovedá otázke čo alebo koľko, procesný benchmarking hľadá odpoveď na to, ako organizácia dosahuje výsledný výkon. Výkonný miera a porovnáva výsledky, procesný sleduje dôvod. Výsledkom je, že benchmarking procesu si zvyčajne vyžaduje miestnych partnerov, náležitú prípravu a konkrétne pravidlá. Len čo sa zistí najlepšia prax a organizácia, ktorá vykonáva benchmarking, ju pochopí, je ľahšie prispôbiť udalosť (Laney, 2011). Výsledkom benchmarkingového procesu má byť dosiahnutie vyššej úrovne kvality, než bolo pôvodne. Jednoduchšie a lepšie interpretovanie rozdielov medzi porovnateľnými organizáciami.

Strategický benchmarking je proces identifikácie výkonnosti a štandardov na úrovni svetovej triedy, ktorý sa snažia určiť rozdiely v konkurencieschopnosti (napr. využitie zdrojov a zručností, poskytovanie produktov a služieb a pod.). Jeho výsledkom je vytváranie vhodných stratégií pre to, aby podnik udržal svoju pozíciu a ďalej sa na trhu rozvíjal. Preto sa strategický benchmarking hodí na použitie najmä v situáciách, kedy organizácia reviduje svoje poslanie či stratégiu. V niektorých prípadoch tiež je možné hovoriť o neformálnom benchmarkingu, kedy dochádza k neformálnemu porovnávanie výkonnosti, procesov a praktík počas konferencií, dní otvorených dverí a ďalších podobných aktivitách. Takéto porovnanie by však nemalo zamieňať za správne realizovaný výkonový či procesný benchmarking (Laney, 2011).

2 TYPY BENCHMARKINGU

Benchmarking je možné segmentovať aj podľa typu porovnania, ktoré sa vykonáva vlastným procesom benchmarkingu. Existujú štyri typy potenciálnych partnerov pre takéto porovnanie.

Interný benchmarking porovnáva podobné činnosti, činnosti alebo vykonávanie v rámci rôznych obchodných jednotiek organizácie. Napríklad je možné porovnať porovnanie prístupov k plánovaniu produktu, ktoré využívajú rôzne manažérske informačné systémy v mnohých výrobných zariadeniach organizácie. Je to bežný stanový typ v prípade veľkých, často nadnárodných organizácií. Rovnako ako iné typy benchmarkingu má všetky klady a zápory (Youn, 2017).

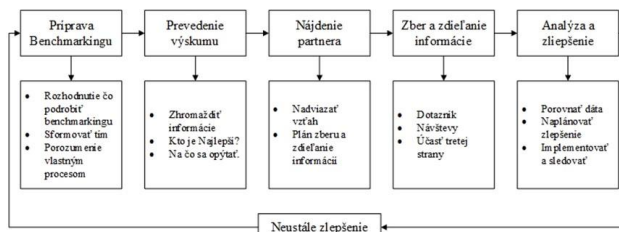
Konkurenčný benchmarking je zameraný na konkrétne produkty, procesy alebo metódy používané (najlepšími) priamymi konkurentmi organizácie. Štúdie konkurenčných procesov sú zvyčajne vykonávané treťou stranou, nezávislou stranou, s cieľom doladiť informácie o konkurencii a zabezpečiť, aby sa výkon normalizoval v súlade s požadovanými normami. Konkurenčné štúdie sa zvyčajne merajú podľa úrovne výkonnosti súčasne. Preto sú tieto štúdie zvyčajne neuspokojivé, pretože účastník štúdie by mohol požiadať o zvýšenie úrovne výkonnosti dosiahnutej v konkurenčnom prostredí (Youn, 2017).

Funkčný alebo odvetvový benchmarking porovnávajú podobné funkcie v rámci jedného odvetvia alebo porovnávajú výkonnosť organizácie s výkonnosťou lídrov v odvetví. Benchmarking tohto typu sú skvelou príležitosťou na dosiahnutie skvelých výsledkov a výrazné zvýšenie produktivity. Príkladom je hodnotenie systémov riadenia dodávateľov v organizáciách zastupujúcich rôzne odvetvia.

Generický benchmarking porovnáva pracovné postupy alebo procesy, ktoré sú nezávislé od odvetvia. Tento prístup najviac napomáha inováciám a môže viesť k zmenám paradigmy a prepracovaniu konkrétnych činností. Príkladom je štúdium rozšíreného používania čiarových kódov v rôznych priemyselných odvetviach.

3 IMPLEMENTÁCIA BENCHMARKINGU

Procesný benchmarking načrtáva kroky, ktoré treba urobiť v rámci benchmarkingového projektu. Existuje rad prístupov s rôznym počtom krokov. *Center Benchmarkingu (APQC)* vykonával prieskum medzi organizáciami v oblasti metodiky vedenia benchmarkingu. A sumarizoval obvyklé kroky, ktoré organizácie zaoberajúce sa benchmarkingom v procese benchmarkingu realizujú obr. 1 (Bajabera, 2020).



Obr. 1. Kroky benchmarkingu (Bajabera, 2020)

Prvý krok je samotná príprava benchmarkingu. Podniku je potrebné rozhodnúť čo podrobiť procesu porovnaniu. Taktiež je podstatné sformovať tím, ktorý bude zaoberať sa procesom benchmarkingu. Druhým krokom je prevedenie výskumu. Podniku je potrebné zhromaždiť informácie tikajúce objatá ktorý sa bude porovnávať. Zistiť kto je najlepší v tej oblasti sa čo porovnáva. Tak tiež je potrebné ujasniť čo sa bude pýtať a čo chceme vedieť. Ďalším krokom je potrebné nájsť partnera, nadviazať vzťah zo partnerským podnikom a vypracovať plán zberu a zdieľania informácii. Nasledujúci krok je samotný zber a zdieľanie informácie. Je možné urobiť dotazníka alebo dohodnúť návštevy, taktiež je možné zlúčiť tretiu stranu firmu ktorý sa zaoberá procesom benchmarkingu. Ďalším krokom je analýza a zlepšenie. V tomto kroku sa analyzuje a porovnávajú získane dáta, plánuje sa kroky zlepšenia. A taktiež sa implementuje zlepšenie a sledujú sa ukazovatele. Proces benchmarkingu je cyklicky a preto podnik môže po pevnom čase opakovane prejsť všetky kroky procesu porovnania.

4 HODNOTENIE UPLATNENIA POKROČILEJ TECHNOLÓGIE

Hodnotenie uplatnenia pokročilej technológie riadenia výrobného procesu poskytuje manažmentu nástroj na výber progresívnych technológií na základe poznatkov „best practices“. Poznatky najlepších riešení sú získavané porovnaním zúčastnených výrobných spoločností medzi sebou, ktoré majú záujem zlepšovať dosahované výsledky vo výkonnosti a efektívnosti výrobných procesov v rámci striktno definovaných výrobných segmentov.

Výrobné segmenty vznikajú spracovaním vstupných informácii poskytnutých zúčastnených podnikov, ktoré sú kategorizované pomocou tzv. triednika.

Spoločnosť definuje konkrétne výrobné odvetvie, prevádzku a výrobné pracovisko spolu so dosahovanými výkonnosťnými ukazovateľmi.

Ukážky potrebných údajov pre benchmarking sú v tab. 1.až tab. 4 rozdelené podľa kategórií:

- Charakteristika podniku, charakteristika výrobnej prevádzky.
- Použité metódy plánovania a riadenia výroby.
- Použité výrobné technológie.
- Použité IT technológie.

- Ekonomické a výrobné ukazovatele.

Tab. 1. Charakteristika podniku, charakteristika výrobnej prevádzky.

Charakteristika/ podnik:	XYZ	XYZ1	XYZ2
Typ priemyslu:	Automobilový priemysel	Automobilový priemysel	Automobilový priemysel
Pozícia dodávateľskom reťazci automobilového priemyslu:	Priamy dodávateľ	Priamy dodávateľ	Priamy dodávateľ
Typ výroby podľa rôznej miery opakovateľnosti:	Sériová výroba	Sériová výroba	Sériová výroba
Typ používaného zariadenia:	Automatizovaná - 50%	Automatizovaná - 50%	Automatizovaná - 75%
Trieda	426	424	425
Výrobný proces z hľadiska spôsobu a miery opakovateľnosti výroby:	Prerušovaná výroba	Necyklický	Prerušovaná výroba
Materiál hlavného produktu	Kov, Hliník	Kov	Hliník
Obsluha výroby (Pracovníci)	Specializovaná (Len 1 typ stroja)	Specializovaná (Len 1 typ stroja)	Specializovaná (Len 1 typ stroja)
Logistika	Mechanizovaná - 75%	Mechanizovaná - menej ako 50%	Mechanizovaná - 100%

Ďalšou skupinou pre porovnanie je plánovanie a riadenie výroby, údržby a zásob. Podniky vo veľkej miere používajú známe metódy plánovania a riadenia výroby. Rozdiely v metódach riadenia výroby sa odzrkadľujú na prevádzke vo veľkosti zásob rozpracovanej výroby. Správnym výberom a nastavením systému plánovania a riadenia údržby sa snažia zabezpečiť bezporuchovú prevádzku po čo najdlhšiu dobu a maximalizovať životnosť zariadení. Snaha je o minimalizáciu prestojov z dôvodu porúch na zariadení. Veľký podiel na dosahovaní požadovaných cieľov zohráva podpora informačným systémom, ktorá je v spoločnostiach čo do hĺbky spracovania a poskytovania údajov pre operatívnu rôznorodá. Výhodou je rýchla evidencia základných výrobných ukazovateľov, aby manažéri mohli rýchlo a presne ovplyvňovať situáciu vo výrobe, aby sa dosiahla vysoká efektivita procesu riadenia.

Tab.2 Plánovanie a riadenie výroby, údržby a zásob

Riadenie/podnik:	XYZ	XYZ1	XYZ2
Typ údržby	Údržba po poruche	Plánovaná Preventívna údržba +	Plánovaná Preventívna údržba +
Plánovanie výroby	Podľa zákaziek	Podľa zákaziek	Podľa zákaziek
Usmerňovanie materiálových tokov:	Usmerňovanie podľa objednávok	Usmerňovanie podľa objednávok	Usmerňovanie podľa objednávok
Riadenie zásob	V bode rozpojenia objednávok zákazníka (nezávislý dopyt)	V bode rozpojenia objednávok zákazníka (nezávislý dopyt)	Pred bodom rozpojenia objednávok zákazníka (závislá potreba)
Metóda riadenia výroby	Tlak	Ťah	Ťah
Systém dielenského riadenia výroby:	Urgentné riadenia	Priame riadenie výroby	Priame riadenie výroby
Systém riadenia pracovných procesov z hľadiska logistiky	ERP	ERP	ERP

Ďalšou skupinou pre porovnanie je technológie ktoré zefektívňujú riadenia výroby. Do tejto skupiny boli zaradené technológie, ktoré sa používajú pre zber dát, výmenu dát, uschovanie, pre analýzu a ktoré podporujú systémy riadenia výroby. Podnik (XYZ2) prechádza obdobie renovácia preto na niektorých pracoviskách sú použité senzory na sledovanie a zber dát a *RFID* technológia. Pri kombináciách čiarový kód a *EDI* a *QR* kód a *IOT* proces výmeny je spomalený a vyžaduje účasť zaškoleného pracovníka. Kombinácia *RFID*, Senzory a *IOT* je

rýchlejšie a nepotrebuje zaškoleného pracovníkov ako porovnávajúce kombinácie.

Tab. 3. Použité technológie zberu a spracovania dát

Technológia / podnik :	XYZ	XYZ1	XYZ2
zber údajov	Čiarový kód	QR kód	RFID, Senzory
výmena dát	EDI	IOT	IOT
uschovanie a spracovanie údajov	Databáza	Databáza	Cloud computing
nástroje analýzy dát	Nástroje modelovania a simulácie	Rozšírená analytika	Nástroje modelovania a simulácie
podporujúca systém riadenia výroby	Mechatronické systémy	Mechatronické systémy	Mechatronické systémy

Pri použití technológie *Cloud Computingu* procesy pri riadení podniku je možné spracovávať ľahšie, rýchlejšie a efektívnejšie. *IoT* zabezpečí prepojenie jednotlivých operácií, takže nedôjde k chybám v komunikácii, ktoré môžu viesť k stratám. *Cloud* zabezpečí zber dát, ich analýzu a ich následné vyhodnotenie. Technológie a nástroje analýz dát v danom výpadku sú neporovnateľne pretože pre taký podnik nie je podstatne investovať do viac pokrokovejších technológií. Samotný *Cloud computing*, ktorý používa tretí podnik poskytuje aj analyzovanie dát. Technológie podporujúce systém riadenia výroby vo všetkých troch podnikoch používa mechatronické systémy. Ďalšou skupinou pre porovnanie sú ekonomické a prevádzkové ukazovatele, ktoré v rámci benchmarkingu pomáhajú definovať rebríček úspešnosti uplatnenia vybraných technológií.

Tab.4 Dosahované ukazovatele prevádzky

Ukazovateľ / podnik:	XYZ	XYZ1	XYZ2
Priebežná doba výroby	8 týždňov	6 týždňov	6 týždňov
Prestoj vo výrobe a jej podiel	27 % Technologické prestoje	25 % Technologické prestoje	20 % Technologické prestoje
Dosahovaná výkonnosť	80%	85%	91%
Plnenie kvality	95%	95%	98%
Celková efektivita zariadenia OEE	69%	73%	75%
Produktivita výroby	84%	90%	98%

ZÁVER

Cieľom použitia nástroja benchmarkingu bolo zistiť poradie najlepších podnikov vo vybranej skupine a pozrieť na technológie a metódy, ktoré boli použité na prevádzke v rámci definovaného segmentu. Na príklade pre vysvetlenie ako využiť benchmarking pre hodnotenie uplatnenia pokročilých technológií podporujúcich riadenie výrobného procesu vychádza, že najlepším podnikom je podnik XYZ2 ktorý sa nachádza v skupine z vyššou automatizáciou. Na druhom mieste je podnik XYZ1 ktorý sa nachádza v tej istej skupine čo aj vybraný podnik ale už používa konkrétne pokročilé technológie, snaží sa o zjednodušenie riadiacich procesov cez vyššiu automatizáciu.

Záverom pre hodnotený podnik je, že má príležitosť dostať sa vo výkonnosti na vyššiu úroveň ak bude do svojich procesov integrovať technológie pre zlepšenie riadenia výroby akými dnes disponujú

podniky zaradené do príbuznej skupiny podľa triedníka.

Predkladané riešenie umožní manažmentu výrobných podnikov vybrať vhodnú technológiu aby im pomohla naplniť podnikové ciele a požadované ekonomické a výrobné ukazovatele prevádzky. Rozhodnutie manažmentu je takto podoprené výberom založený na znalostiach, skúsenostiach a „best practices“ realizovaných v obdobných výrobných spoločnostiach.

Pod'akovanie

Táto práca vznikla vďaka podpore projektu APVV-18-0522, Agentúra na podporu výskumu a vývoja.

LITERATÚRA

[1] HWANG, K. - CHEN, M. (2017): *Big Data*

analytics for Cloud, IoT and Cognitive Computing. John Wiley & Sons.

[2] DEAN, J. - GHEMAWA, S. (2004): *MapReduce: Simplified data processing on large clusters.* In: OSDI, 2004, pp. 137-150.

[3] LANEY, D. (2011): *3d data management: controlling data.* Volume, velocity and variety META GROUP Res. Note, 6.

[4] YOUN, C.H. - CHEN, M. - DAZZI, P. (2017): *Opportunistic Task Scheduling over Co-Located Cloud.* Volume PP.

[5] BAJABERA, F. - SAKR, S. - BATARFIA, O -. BARMANI, A.A.A. (2020): *Benchmarking big data system: A surveillance, computer Communication,* Volume 149.

Stanovenie kinetiky rastu austenitického zrna ocele S960MC

Martin Frátrik, Ing.*

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

Miloš Mičian, doc. Ing., PhD.

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

Libor Trško, Ing., PhD.

Výskumné centrum,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina
E-mail: libor.trsko@rc.uniza.sk

Determination of Grain Growth Kinetics of S960MC Steel

Abstract: The strength of fine-grained *HSLA* steels is mainly based on the grain boundary strengthening, which as the only strengthening mechanism allows the yield strength to increase without a decrease in ductility. Therefore, any change in grain size leads to irreversible changes in the properties of the material. Such changes also occur in the coarse-grain heat affected zone (*CGHAZ*) of welded joints, where there is an increase in austenitic grain size, which leads to a decrease in yield strength, or decrease of fatigue strength. The paper experimentally determines the growth kinetics of austenitic grain for *S960MC* steel. Based on the measured data, it will be possible to predict the grain growth kinetics in the *CGHAZ* and *FGHAZ*. The acquired knowledge will help to set the welding processes of fine-grained steels. The measured data will also provide a basis for numerical simulations of metallurgical processes in high-temperature *HAZ* during welding.

ÚVOD

Proces výroby ocelí termomechanickým spracovaním umožňuje výrobu ocelí s vysokými mechanickými vlastnosťami pri nízkom obsahu uhlíka a prísadových prvkov. Riadenou deformáciou a teplotou v kombinácii s vhodne zvoleným chemickým zložením je možné v oceliach aplikovať súčasne viacero mechanizmov spevňovania, z ktorých prevažuje spevnenie hranicami zŕn, dislokačné spevnenie a precipitačné spevnenie. Z hľadiska navýšenia medze klzu a zachovania ťažnosti je obzvlášť dôležité spevnenie hranicami zŕn. Matematicky je možné príspevok spevnenia hranicami zŕn k celkovej medze klzu vyjadriť *Hall-Petchovou* rovnicou [1]. Z toho dôvodu je pri výrobe ocelí snaha zmenšiť veľkosť zrna v čo najväčšej miere. V procese termomechanického spracovania je takáto štruktúra dosiahnutá riadeným valcovaním a ochladzovaním v kombinácii s precipitáciou disperzných precipitátov typu (*V, Nb*) (*C, N*) [2, 3].

Z výrobného procesu vyplýva, že dané vlastnosti ocele nie je možné dosiahnuť iba procesom tepelného

spracovania. Preto akékoľvek tepelné zaťaženie v dôsledku zvarovania nenávratne ovplyvňuje mikroštruktúru ocele v teplom ovplyvnenej oblasti (*TOO*) a degraduje vlastnosti pôvodného základného materiálu. Pri vyšších pevnostných triedach termomechanicky spracovaných (*TMCP*) ocelí, ktoré sú tvorené nestabilnými štruktúrnymi zložkami, akou je aj oceľ *S960MC* sa tieto zmeny prejavujú výrazným poklesom tvrdosti a pevnosti [4-6].

K najväčšiemu ovplyvneniu materiálu v dôsledku teplotného zaťaženia z procesu zvarovania dochádza v podhúsenicovej oblasti (*CGHAZ*). V danej oblasti dochádza k prehriatiu základného materiálu v rozmedzí teplôt od približne 1000 °C po teplotu solidu materiálu. Dochádza k austenitizácii a následnému nárastu austenitického zrna, ktorého nárast je závislý predovšetkým od dosiahnutej teploty a času výdrže na tejto teplote. Po opätovnom ochladení je výsledná štruktúra výrazne hrubozrnná a disponuje odlišnými mechanickými vlastnosťami ako pôvodný základný materiál. Ako najvýraznejší sa javí pokles medze klzu a medze pevnosti. *Mičian et al.* [7]

preukázali na fyzikálnych simuláciách ocele S960MC výrazný pokles medze klzu a medze pevnosti v závislosti od maximálnej dosiahnutej teploty a veľkosti zrna.

Aby bolo možné výsledné zmeny odhadnúť s čo najväčšou presnosťou je nutné stanoviť rovnice vyjadrujúce kinetiku rastu austenitického zrna. Vo všeobecnosti platí, že rast zrna spôsobuje redukcii plochy hraníc zŕn, čo je sprevádzané poklesom množstva voľnej energie. V procese rastu zrna platí, že rast prebieha prioritne pohybom hraníc zŕn, než zlučováním. Tento pohyb je následne prerušený a smer pohybu sa môže zmeniť. Zrno môže rásť aj do existujúceho zrna a zväčšiť tak svoj objem [8]. Okrem faktorov, ktoré podporujú rast zrna, existuje viacero faktorov, ktoré pôsobia proti rastu austenitického zrna. Vo väčšine prípadov ide o častice (karbidy, nitridy), ktoré zabraňujú pohybu hraníc zŕn. V prípade termomechanicky spracovaných ocelí pôsobia proti nárastu zrna najmä precipitáty typu (V, Nb) (C, N) [8-10]. V literatúre sú takéto sily pôsobiace proti rastu zrna nazývané Zenerové ťahové sily.

Matematicky je kinetika rastu austenitického zrna popísaná vzorcom (1), ktorý stanovuje veľkosť zrna počas izotermického ohrevu [9]. V prípade, že sa difúzia atómov cez hranice zŕn považuje za aktivovaný proces, možno nahradiť konštantu K výrazom (2) [10]:

$$D^n - D_0^n = K \cdot t \quad (1)$$

$$K = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad (2)$$

kde D je priemer výsledného zrna,

D_0 je počiatočný priemer zrna,

t je čas výdrže na danej teplote,

n je materiálová konštanta závislá od chemického zloženia,

K a K_0 sú proporcionálne konštanty závislé od teploty T a aktivačnej energie Q potrebnej na rast zrna,

R je univerzálna plynová konštanta. Hodnota konštanty n je rôzna v závislosti od materiálu a jej hodnota sa pohybuje v rozmedzí 2÷10. Pre mikrolegované ocele, v ktorých je nárast zrna kontrolovaný kombinovane precipitáciou aj difúziou má koeficient n hodnotu 4÷4,5 [8, 9].

1 STANOVENIE KINETIKY RASTU AUSTENITICKÉHO ZRNA

Na účely experimentu bola zvolená oceľ Strenx 960MC (SSAB AB, Švédsko) hrúbky 3 mm. Oceľ je tvorená prevažne bainitom, martenzitom, popusteným martenzitom a zvyškovým austenitom s disperznými precipitátmi prvkov Nb, V a Ti (obr. 1). Mechanické vlastnosti na základe vlastných meraní sú uvedené

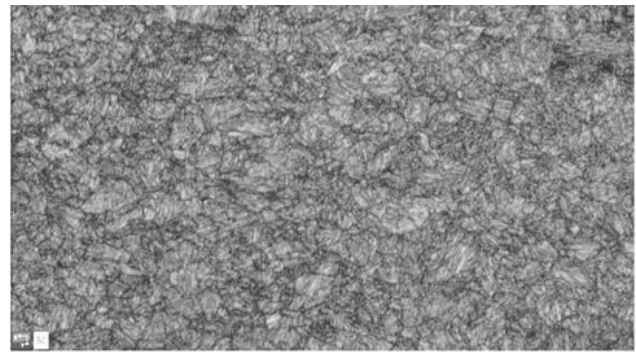
v tab. 1 a chemické zloženie na základe inšpekčného certifikátu sú uvedené v tab. 2.

Tab. 1. Mechanické vlastnosti ocele S960MC na základe vlastných meraní

$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{50mm} [%]	CET (CEV)	KV -20 °C [J]
1007	1092	8	0,26 (0,50)	85

Tab. 2. Chemické zloženie ocele S960MC na základe inšpekčného certifikátu

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

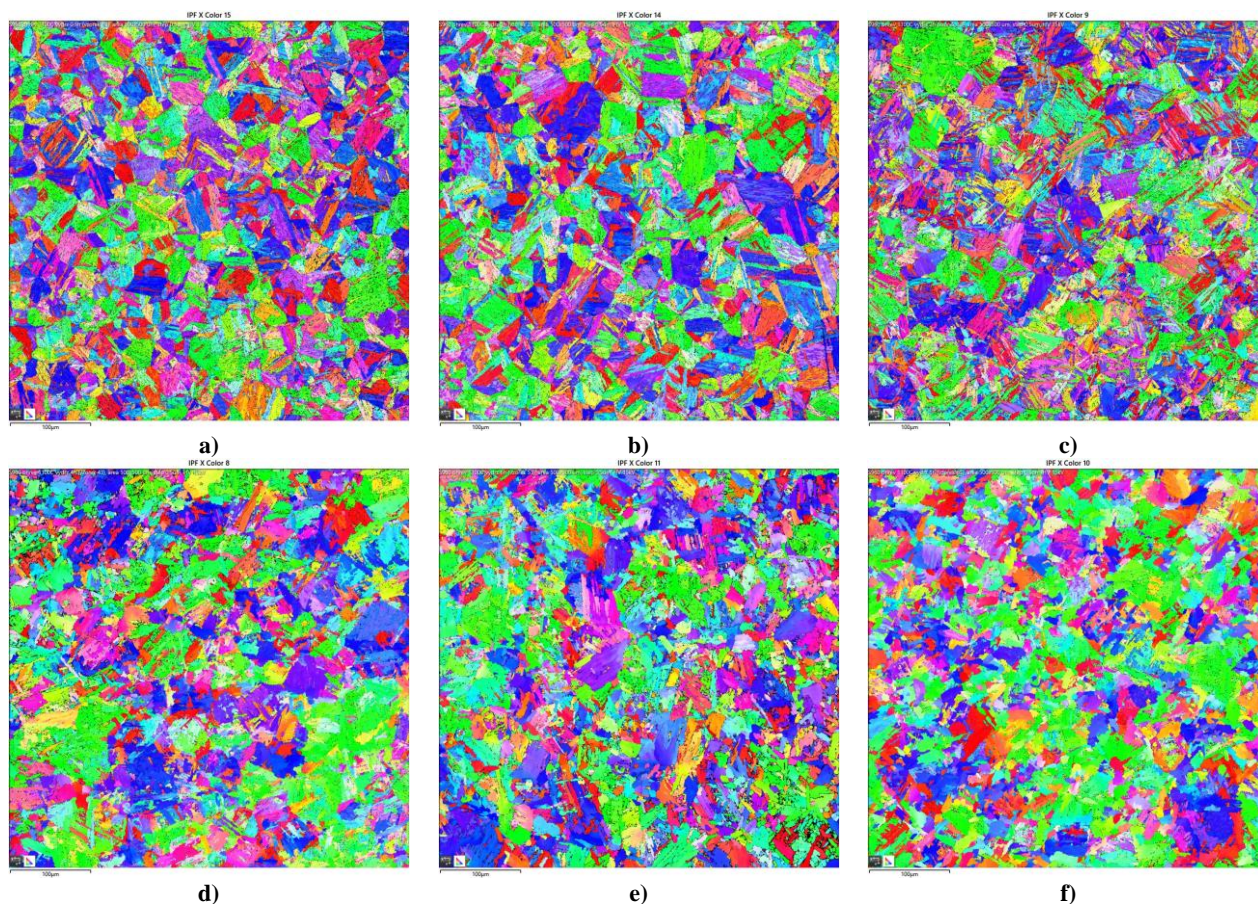


Obr. 1. Mikroštruktúra ocele S960MC (EBSD – Band contrast)

Aby bolo možné dostatočne presne stanoviť chýbajúce koeficienty K , K_0 a Q vyplývajúce z rovníc (1) a (2) je potrebné vykonať experimentálne merania. Nakoľko sú obe hodnoty závislé od teploty, je možné ich stanoviť skúškou, pri ktorej budú vzorky vystavené rôznym teplotám s rôznymi časmi výdrže. Pre stanovenie hodnôt K a Q ocele S960MC boli vzorky základného materiálu vystavené teplotám 900 °C, 1000 °C, 1100 °C a 1200 °C, pričom na každej teplote bola vzorka vystavená výdrži 0,5, 1, 2, 4, 6 a 8 hodín. Vzorky o rozmeroch 3×12×50 mm boli zohrievané v peci s ochrannou argónovou atmosférou LAC LT 50/500/13, aby sa predišlo ich nadmernej povrchovej oxidácii. Všetky vzorky boli do pece vložené do až po jej vyhriatí na danú teplotu. Po vytiahnutí z pece boli vzorky okamžite ponorené do vody. Vzorky boli následne rozrezané a metalograficky pripravené na EBSD analýzu, z ktorej bola vyhodnotená veľkosť austenitického zrna. Na vyhodnotenie boli použité snímky v zobrazení Band contrast a IPF v závislosti od kvality vyobrazenia hraníc austenitických zŕn pre jednotlivé vzorky. Snímaná bola oblasť v strede hrúbky materiálu o veľkosti 500×500 µm. Obrázok 2 zobrazuje snímky vzoriek vystavených teplote 1100 °C. Stredná hodnota veľkosti austenitického zrna bola stanovená

Tab. 3. Stredná veľkosť zrna (μm) pre experimentálne vzorky ocele S960MC

S960MC		Čas výdrže na danej teplote [hod.]					
		0,5	1	2	4	6	8
Teplota [°C]	900	9,50	9,70	10,40	11,40	13,00	14,90
	1000	20,00	21,40	21,90	24,60	31,00	35,70
	1100	33,20	34,70	38,00	47,20	51,30	54,90
	1200	53,60	56,10	59,00	65,50	76,10	84,30



Obr. 2. Austenitické zrna na vzorke vystavenej teplote 1100 °C po dobu: a) 0,5 h, b) 1 h, c) 2 h, d) 4 h, e) 6 h, f) 8 h (EBSD)

na základe lineárnej metódy (STN EN ISO 643). Namerané hodnoty strednej veľkosti austenitického zrna sú uvedené v tab. 3.

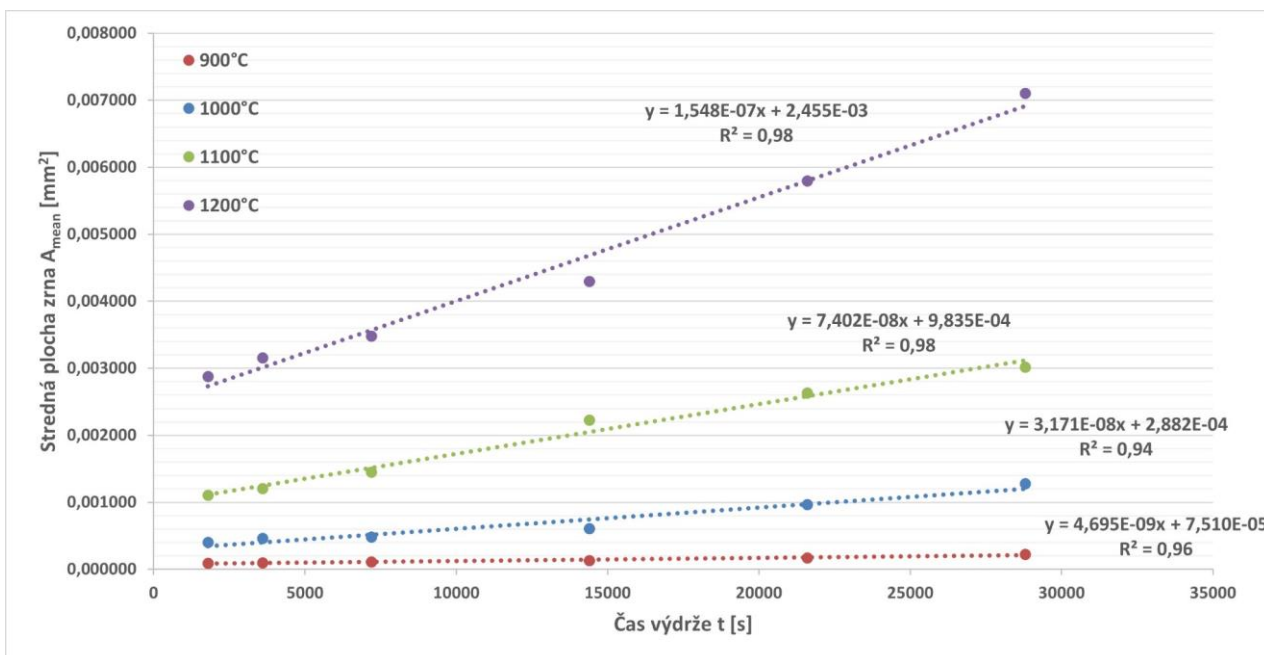
Na základe získaných dát je možné zobrazit' grafickú závislosť medzi strednou plochou austenitického zrna (A_{mean}) a časom výdrže pre každú z teplôt (obr. 3). Hodnota strednej plochy austenitického zrna zodpovedá druhej mocnine hodnoty strednej veľkosti zrna z tab. 3. Z grafu sa následne stanovujú dáta potrebné pre stanovenie konštánt K_0 a Q . Z jednotlivých kriviek sa zároveň dajú určiť aj hodnoty D_0 , ktoré sú dôležité pre odhad nárastu zrna v podhúsenicovej oblasti a v normalizačnej oblasti.

Daná hodnota vyjadruje strednú veľkosť zrna pri čase výdrže $t = 0$ s, čo zodpovedá približne hodnote nárastu zrna, ktorý je dosiahnutý v procese zvarovania pri danej

teplote. Hodnoty boli vypočítané ako druhá odmocnina z hodnoty zodpovedajúcej bodu pretnutia s osou y v grafe na obr. 3. Zo sklonu jednotlivých kriviek bola taktiež stanovená konštanta K_T , ktorá zodpovedá smernici daných kriviek a bude použitá pre ďalšie výpočty. Hodnoty K_T a D_0 sú uvedené v tab. 4.

Tab. 4. Hodnoty konštánt K_T a D_0 pre dané teploty

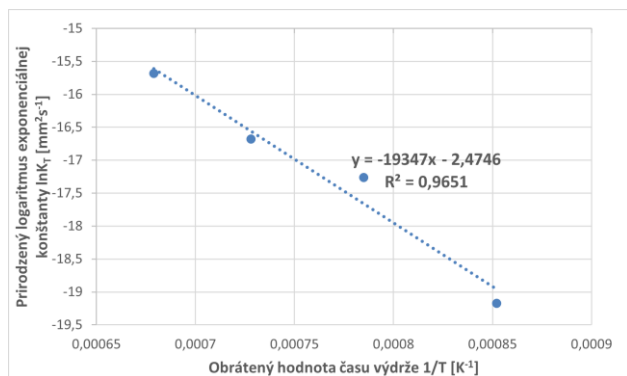
S960MC	K_T (mm^2s^{-1})	D_0 (mm)
900°C	$4,695 \cdot 10^{-9}$	0,00866
1000°C	$3,171 \cdot 10^{-8}$	0,01698
1100°C	$7,402 \cdot 10^{-8}$	0,03136
1200°C	$1,548 \cdot 10^{-7}$	0,04950



Obr. 3. Stredná plocha zrna v závislosti od času výdrže na teplotách 900 °C, 1000 °C, 1100 °C a 1200 °C

Pre získanie hodnôt aktivačnej energie Q a konštanty K_0 je potrebné zostrojiť graf v ktorom bude zobrazená závislosť medzi prirodzeným logaritmom pre konštantu K_T a obrátenou hodnotou teploty T [K⁻¹]. Výsledkom danej závislosti bude trendová krivka vyjadrujúca lineárnu závislosť vo formáte (3):

$$y = C \cdot x + B \quad (3)$$



Obr. 4. Stanovenie konštanty K_0 a aktivačnej energie potrebnej pre rast zrna Q

Pre finálny výpočet aktivačnej energie Q bude použitá rovnica (4) a pre výpočet konštanty K_0 bude použitá rovnica (5):

$$Q = -(2 \cdot 3 \cdot R \cdot C), \quad (4)$$

$$K_0 = e^B, \quad (5)$$

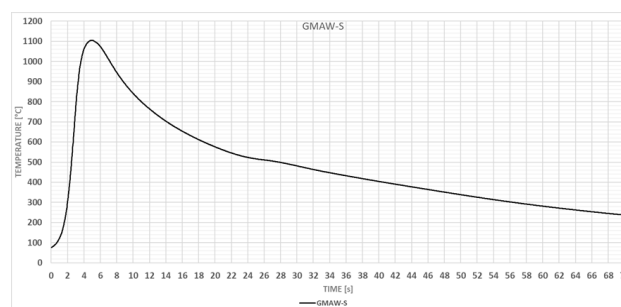
kde R je univerzálna plynová konštanta,
 B a C sú konštanty z rovnice (3),
 e je Eulerovo číslo.

Po dosadení do rovníc boli pre oceľ S960MC zistené hodnoty aktivačnej energie rastu zrna $Q = 369,95$ kJ·mol⁻¹ a konštanta $K_0 = 8,42 \cdot 10^{-2}$ mm²·s⁻¹.

2 POROVNANIE VYPOČÍTANÝCH VÝSLEDKOV SO ZVÁRANÝMI VZORKAMI

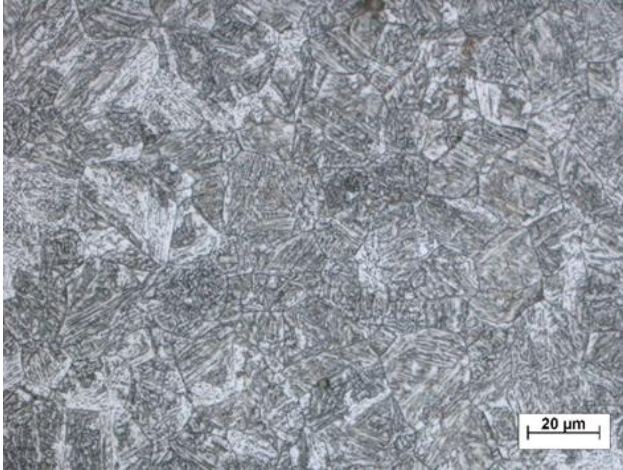
Na porovnanie vypočítaných hodnôt veľkosti zrna s reálnymi hodnotami bol zvolený zvarový spoj ocele S960MC. Vyhotovený bol tupý zvarový spoj na plechu hrúbky 3 mm metódou GMAW v skratovom režime [4]. Chemické zloženie a mechanické vlastnosti základného materiálu sú totožné so skúmanými vzorkami a sú uvedené v tab. 1 a tab. 2. Ako prídavný materiál bol použitý zvarací drôt (Union X96) priemeru 1 mm, označovaný ako G89 5 M21 Mn4Ni2.5CrMo podľa STN EN ISO 16834-A.

Teplotný cyklus zvarovania bol zaznamenávaný termočlánkom umiestneným v oblasti CGHAZ vo vzdialenosti 2,79 mm od osi zvaru. Umiestnenie termočlánku umožnilo zaznamenať oblasť s maximálnou teplotou $T_{max} = 1104$ °C, v ktorej došlo k plnej austenitizácii materiálu a k nárastu austenitického zrna. Teplotný cyklus je zobrazený na obr. 5.



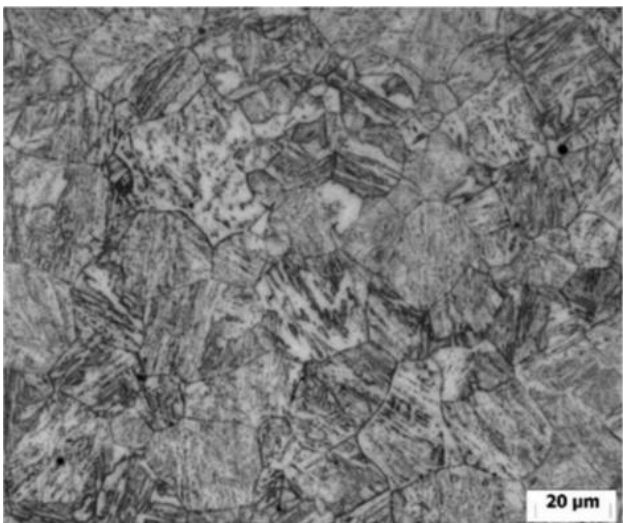
Obr. 5. Teplotný cyklus zvarového spoja ocele S960MC

Z oblasti na úrovni polohy termočlánku, v ktorej bola dosiahnutá teplota približne 1100 °C bola vyhotovená snímka mikroštruktúry (obr. 6). Lineárnou metódou bola vypočítaná stredná veľkosť zrna, ktorej hodnota bola stanovená na $D = 19 \mu\text{m}$. Daná hodnota by mala zodpovedať hodnote D_0 pre 1100 °C z obr. 3, ktorá bola na úrovni $D_0 = 31 \mu\text{m}$ (tab. 4). Dosiachnutý rozdiel hodnôt je spôsobený rozdielnou rýchlosťou ohrevu, ktorá má pri malých časoch výdrže výrazný vplyv na nárast veľkosti austenitického zrna. Kým pri zvarovom spoji bola dosiahnutá rýchlosť ohrevu na úrovni $205 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, pri experimente bola rýchlosť ohrevu iba na úrovni $5 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 6. Mikroštruktúra oblasti CGHAZ zvarového spoja zodpovedajúca teplote 1100 °C

Presnejšiu zhodu výpočtového modelu z reálnym zvarom priniesli fyzikálne simulácie základného materiálu. Použitím zariadenia Gleeble 3500 [11] bola dosiahnutá rýchlosť ohrevu rovnajúca sa rýchlosti ohrevu pri zváraní na úrovni $210 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Stredná veľkosť zrna pri maximálnej teplote 1105 °C a výdrži na úrovni 0 s bola líniovou metódou stanovená na hodnotu $24 \mu\text{m}$. Mikroštruktúra zobrazujúca vzorku vystavenú teplote 1105 °C s výdržou $t = 0 \text{ s}$ je zobrazená na obr. 7.



Obr. 7. Mikroštruktúra vzorky vystavenej teplote 1100 °C na základe fyzikálnej simulácie na zariadení Gleeble 3500

ZÁVER

Experimentálnymi meraniami bola stanovená kinetika rastu austenitického zrna pre vysokopevnú konštrukčnú oceľ S960MC. Vysoká pevnosť danej ocele je dosiahnutá jemnozrnnou mikroštruktúrou, ktorá je získavaná procesom termomechanického spracovania v kombinácii s vhodne zvoleným chemickým zložením. Dôležité sú predovšetkým prvky Nb, V a Ti, ktorých karbidy, nitridy a karbonitridy zabraňujú nárastu zrna v procese valcovania a potláčajú nárast zrna počas procesu zvárania (Zenerove ťahové sily).

Stanovením kinetiky rastu austenitického zrna je možné popísať zmeny veľkosti zrna v závislosti od teploty a času. Pre čo najpresnejšie výsledky experimentu boli vzorky základného materiálu vystavené teplotám 900 °C, 1000 °C, 1100 °C a 1200 °C po dobu 0,5, 1, 2, 4, 6, 8 hodín. Na všetkých 24 vzorkách bola následne stanovená stredná veľkosť zrna pomocou EBSD analýzy. Dáta boli graficky spracované a získané konštanty boli použité v príslušných výpočtoch. Výpočtami bola stanovená hodnota koeficientu K_0 a hodnota aktivačnej energie Q . Taktiež bola pre každú teplotu stanovená hodnota D_0 , ktorá slúži na odhad veľkosti austenitického zrna pre nulovú výdrž. Podobná výdrž je dosahovaná v procese zvárania a preto je túto hodnotu možné použiť pri odhade veľkosti zrna v oblastiach TOO (podhúsenicová zóna, normalizačná zóna).

Vypočítané hodnoty strednej veľkosti zrna boli následne porovnané s hodnotami strednej veľkosti zrna získanými zo zvarového spoja a z fyzikálnej simulácie. Porovnanie preukázalo, že veľkosti zrna namerané v TOO zvarového spoja a fyzikálnou simuláciou dosahovali menšie hodnoty, ako boli hodnoty stanovené výpočtom pre danú teplotu. Dôvodom bude predovšetkým rozdielna rýchlosť ohrevu, ktorá má výrazný vplyv na nárast austenitického zrna.

POĎAKOVANIE

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

LITERATÚRA

- [1] REN, J. - LIU, Z. (2019): *Mechanical Properties and Strength Prediction of Ti Microalloyed Low Carbon Steel with Different Ti Content*. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 611 012010.
- [2] WEBEL, J. - HERGES, A. - BRITZ, D. - DETEMPLE, E. - FLAXA, V. - MOHRBACHER, H. - MÜCKLICH, F. (2020): *Tracing Microalloy Precipitation in Nb-Ti HSLA Steel during Austenite Conditioning*. Metals 10, 243.

- [3] ENDO, S. - NAKATA, N. (2015): *Development of Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) and High Performance Steel in JFE Steel*. JFE Tech. Rep., Vol. 20, 1–7.
- [4] MIČIAN, M. - FRÁTRIK, M. - KAJÁNEK, D. (2021): *Influence of Welding Parameters and Filler Material on the Mechanical Properties of HSLA Steel S960MC Welded Joints*. Metals, 11, 2, 305
- [5] HOCHHAUSER, F. - ERNST, W. - RAUCH, R. - VALLANT, R. - ENZINGER, N. (2012): *Influence of the Soft Zone on the Strength of Welded Modern HSLA Steels*. Welding in the World, Vol. 56 (2012), pp. 77-85.
- [6] SCHNEIDER, C. - ERNST, W. - SCHNITZER, R. - STAUFER, H. - VALLANT, R. - ENZINGER, N. (2018): *Welding of S960MC with undermatching filler material*. Welding in the World, 62, 801–809.
- [7] MIČIAN, M. - WINCZEK, J. - HARMANIAK, D. - KOŇÁR, R. - GUCWA, M. - MORAVEC, J. (2019): *Physical Simulation of Individual Heat-Affected Zones in S960MC Steel*. Arch. Metall. Mater. 66, 1, 81-89.
- [8] MORAVEC, J. - NOVAKOVA, I. - SOBOTKA, J. - NEUMAN, H. (2019): *Determination of Grain Growth Kinetics and Assessment of Welding Effect on Properties of S700MC Steel in the HAZ of Welded Joints*. Metals 9, 707.
- [9] MANOHAR, P. A. - DUNNE, D. P. - CHANDRA, T. - KILLMORE, C. R. (1996): *Grain Growth Predictions in Microalloyed Steels*. ISIJ Int., 36, 194-200.
- [10] ABBASCHIAN, R. - ABBASCHIAN, L. - REED-HILL, R. E. (2009): *Physical Metallurgy Principles*, Fourth Edition, Stamford, Cengage Learning, 750 s., ISBN 978-0-495-08254-5
- [10] STRENX (2017). *Welding of Strenx*. SSAB AB: Stockholm, Sweden.
- [11] MIČIAN, M. - HARMANIAK, D. - NOVÝ, F. - WINCZEK, J. - MORAVEC, J. - TRŠKO, L. (2020): *Effect of the $t_{8/5}$ Cooling Time on the Properties of S960MC Steel in the HAZ of Welded Joints Evaluated by Thermal Physical Simulation*. Metals, 10, 229.

Žiarobetóny pre zlievarenský priemysel z produkcie RMS Košice s.r.o.

Rastislav Hirjak, Ing., PhD.*

RMS Košice s.r.o.,
Vstupný areál U. S. Steel, 04454, Košice-Šaca.
E-mail: dchudikova@rms-kosice.sk, Tel.: +421 55 673 8599,

Viera Mišaneková, Ing.

RMS Košice s.r.o.,
Vstupný areál U. S. Steel, 04454, Košice-Šaca
E-mail: dchudikova@rms-kosice.sk, Tel.: +421 55 673 8599,

Dáša Chudíková, Ing., PhD.

RMS Košice s.r.o.,
Vstupný areál U. S. Steel, 04454, Košice-Šaca.
E-mail: dchudikova@rms-kosice.sk, Tel.: +421 55 673 8599,

Radomír Šimko, Ing.

RMS Košice s.r.o.,
Vstupný areál U. S. Steel, 04454, Košice-Šaca.
E-mail: dchudikova@rms-kosice.sk, Tel.: +421 55 673 8599,

Martin Piroško, Ing.

RMS Košice s.r.o.,
Vstupný areál U. S. Steel, 04454, Košice-Šaca.
E-mail: dchudikova@rms-kosice.sk, Tel.: +421 55 673 8599,

Matúš Jaremko, Ing.

EUROCAST Košice, s.r.o.,
Vstupný areál U. S. Steel, 04454, Košice-Šaca.
E-mail: info@silbitz-group.com, Tel.: +421 918 555 700

Radoslav Uhrík, Ing.

EUROCAST Košice, s.r.o.,
Vstupný areál U. S. Steel, 04454, Košice-Šaca.
E-mail: info@silbitz-group.com, Tel.: +421 918 555 700

Castables from the production of the company RMS Košice s.r.o. in the foundry industry

Abstract: One of the basic requirements of the current industrial production is to extend the life time of thermal aggregates while taking into consideration the maximum economic effectiveness. The use of non-shaped refractory mixtures for manufacturing of monolithic linings represents a progressive trend that replaces traditional brick linings. Non-shaped materials enable to create linings of different shapes and sizes, their firing takes place at the consumer and their repair is much simpler. These aspects increase the productivity and save energy. The paper covers practical applications of castables from the production of the company *RMS Košice s.r.o.* in the foundry industry.

ÚVOD

Zlievarenská technológia patrí k najstarším spôsobom výroby spotrebných predmetov, pri ktorej získava produkt svoj tvar vyplnením dutiny zlievarenskej formy tekutým kovom, kde následne zatuhne. Na výrobu tekutého kovu je potrebné

vytvoriť špecifické fyzikálno-metalurgické podmienky, ktoré formujú konečné vlastnosti výrobku po zatuhnutí v zlievarenských formách. Neoddeliteľnou súčasťou zlievarenskej technológie sú aj žiaruvzdorné materiály, ktoré sú v konštrukcii

tepelných agregátov pri vysokoteplotnej metalurgii nevyhnutné.

1 EUROCAST Košice, s.r.o.

Spoločnosť *EUROCAST Košice, s.r.o.* patrí do skupiny *Silbitz Group*, ktorá je združením zákazkových zlievarní na výrobu jednotlivých dielov alebo malých a stredných sérií. Svojim zákazníkom ponúka široké spektrum výkonov od konštrukčného poradenstva, cez vytvorenie modelu, odlievania, obrábanie, farbenie, až po dopravu. Obchodne sa zlievaň skôr orientuje na export, pričom až 95 % jej produktov putuje do zahraničia.

Prevádzka disponuje dvomi na sebe nezávislými zlievarňami. Prvá z nich je vybavená automatickou formovacou linkou, ktorá dokáže vyrábať odliatky od 10 do 200 kg. Tie sú určené predovšetkým pre železničný a strojársky priemysel. V druhej zlievarni sa nachádza ručná formovňa pre odliatky od 150 kg až do 10 ton. Zlievaň vďaka nej dokáže pokrývať požiadavky zákazníkov hlavne z odvetví veterných elektrární, techniky pohonov a energetického priemyslu.

Tekutý kov sa vyrába v dvoch indukčných strednofrekvenčných peciach *JUNKER* s kapacitou cca 6 t. Roztavenie 6 t kovu s úpravou chemického zloženia trvá zhruba 90 minút, vyprázdňovanie pece prebieha na 5 krát po 1,2 t a trvá od 35 do 150 minút, podľa zložitosti výroby. Odpichová teplota kovu sa pohybuje v rozmedzí 1460÷1580°C.

Výroba na Zlievarni 1:

- 10 % - liatina s lupienkovým grafitom (sivá, *LLG*) - zliatina železa s uhlíkom a prísadovými prvkami s obsahom uhlíka nad 2,14 %, pričom prevažná časť uhlíka je vylúčená ako lupienkový grafit.
- 90 % - liatina s guľôčkovým grafitom (tvárna, *LGG*) - zliatina železa s uhlíkom a prísadovými prvkami s obsahom uhlíka nad 2,14 %, pričom prevažná časť uhlíka je vylúčená ako grafit v tvare guľôčok (ten sa dosiahne modifikovaním v spracovacej panve).

1.1 Zlievarenské panvy

Na Zlievarni 1 sa používajú dva druhy panví.

Liaci sifónová panva (*LP*) s kapacitou 1,2 t slúži na prepravu a liatie tekutého kovu z liacieho zariadenia do foriem. Teplota kovu v liacej sifónovej panve sa pohybuje v rozmedzí 1360÷1450 °C.

Najviac namáhané miesta v tejto panve sú v spodnom otvorení sifónu prúdením tekutého kovu a vo vrchnej časti panvy, v ktorej sa pri čistení kovu nalepuje troska v najhrubších vrstvách, a znižuje tak kapacitu panvy.

Spracovacia (alebo tiež modifikačná) „*Tundish Cover*“ panva s kapacitou 1,2 t slúži k úprave tekutého kovu. Do spodnej komory panvy, ktorá je predhriata na teplotu cca 800 °C sa pred naliatím tekutého kovu pridávajú presne navážené dávky spracovacích materiálov:

1. Modifikátor na báze *Mg* - úprava tvaru grafitu z lupienkového na guľôčkový.
2. Očkovadlo na báze *Si* - zvýšenie množstva aktívnych zárodokov grafitu.
3. Zásyp - oceľový šrot, alebo liatinové špony - oddialenie modifikačnej reakcie.

Spracovacia panva (*SP*) je po nadávkovaní materiálov uzavretá vekom v ktorom je nalievací otvor. Reakcia tekutého kovu s *Mg* je intenzívna, sprevádzaná zábleskami a uvoľňovaním plynu, ktorý zvyšuje tlak v uzavretej panve. Teplota kovu v spracovacej panve sa pohybuje v rozmedzí 1420÷1480 °C. Pri tomto procese dochádza k nalepovaniu a penetrácii trosky z pretaveného zásypu do žiaromateriálu v hornom obvode panvy, ale aj v spodnej oblasti komory. Kov sa po spracovaní preleje do sifónovej panvy osadenej v liacom vozíku a po odstránení trosky z hladiny kovu sa odlieva do pieskových foriem.

1.2 Žiarobetóny pre zlievarenské panvy

V minulosti boli pracovné výmurovky panví v zlievarni realizované zo šamotových stavív. Vývojom kvalitných žiarobetónov sa postupne prešlo na tvorbu monolitických výmuroviek. Testovaním viacerých druhov netvarových žiaruvzdorných materiálov sa najlepšie osvedčila monolitická výmurovka z vysokohlinitého žiaruvzdorného betónu, ktorá je vymazaná náterovou hmotou. Táto zmena zloženia výmurovky mala za následok zlepšenie ucelenosti výmurovky a zvýšenie jej životnosti. Taktiež realizácia a opravy monolitických výmuroviek prebiehajú rýchlejšie, efektívnejšie, čím sa znižujú výrobné náklady u spotrebiteľa.

2 KOFOND FAB 75

Pre výmurovku liacej panvy na Zlievarni 1 bol firmou *RMS Košice s.r.o.* navrhnutý vysokohlinitý žiarobetón *Kofond FAB 75* na báze andaluzitu, bauxitu a prísad. Ako vymazávacia hmota bola navrhnutá vysokohlinitá hmota *Komah AC 1*. Vlastnosti žiarobetónu a hmoty sú uvedené v tab. 2.

Monolitická výmurovka liacej panvy č. 5 bola realizovaná v lete roku 2017. Žiarobetón bol aplikovaný priamo na oceľový plášť. Po vyliatí monolitického dna panvy sa osadilo jadro a začala sa realizovať stena o hrúbke cca 6 cm. Žiarobetón *Kofond FAB 75* bol priebežne zhutňovaný ponorným vibrátorom (obr. 1). Po voľnom zatuhnutí

žiarobetonu sa jadro vybralo a panva bola pomocou horného horáka vysušená na teplotu 900±1000 °C.

Vysušená výmurovka sa vymazala vymazávacou hmotou kvality *Komah AC 1*. Vymazávací hmotou zrnitosti 0÷1 mm bola na výmurovku nanášaná mechanicky do hrúbky 2÷3 mm (obr. 2.).



Obr. 1. Realizácia monolitckej výmurovky liacej panvy č. 5



Obr. 2. Monolitcká výmurovka LP č. 5 po odformovaní

Vymazávací hmotou slúži k zamedzeniu impregnácie koróziívneho média do žiarobetonovej výmurovky. Kvalita ochrannej vrstvy hmoty sa ukazuje hlavne pri bežných opravách výmurovky, kedy dochádza k začisťovaniu výmurovky od kovových zliatkov a troskových nálepv. Ak sa na výmurovke nachádza zostatková vrstva vymazávacej hmoty, splnila tak dostatočne ochrannú úlohu a taktiež samotný proces čistenia prebieha jednoduchšie.

Prevádzková kampaň jednej tavby zlievarenskej panvy je cca 5 preliatí. V závislosti od opotrebenia výmurovky a od vzniku troskových nárastov, k bežnej oprave výmurovky dochádza po cca 20 tavbách. Na proces opotrebovania vplýva výrobný sortiment zlievarne, cyklickosť prevádzkovania a starostlivosť o panvu (udržiavanie na teplote atď.). Zvyšovaním počtu preliatí v kombinácii s pravidelným mechanickým čistením troskových nálepv dochádza k postupnému opotrebovaniu

monolitckej výmurovky. Ošetrovanie pracovnej časti žiarobetonu sa vykonáva tenkou vrstvou hmoty *Komah AC 1*. K oprave nerovnomerne opotrebenej výmurovky sa používa žiarobeton na báze andaluzitu *Kofond F6A-1* (tab. 2.). V najviac opotrebovaných miestach sa žiarobeton nanáša mechanicky do hrúbky 1÷2 cm.

Liaca panva č. 5 po 9 mesiacoch prevádzkovania dosiahla životnosť 2406 preliatí čo predstavovalo 481 tavieb. Prevádzkovateľovi vznikli náklady 0,79 Eur na jednu tavbu. Ešte lepší výsledok 601 tavieb bol dosiahnutý v ďalšej kampani LP č. 5, kde náklady na jednu tavbu sa znížili na 0,63 Eur.

Po ukončení kampane LP č. 5 bola na monolitckej výmurovke nameraná zostatková hrúbka 3 cm čo predstavuje cca 50 % opotrebenie (obr. 4.). Z pohľadu rýchlosti opotrebenia na počet tavieb a úbytku hrúbky je možné povedať, že pri jednej tavbe sa opotrebuje 0,1 % objemu betónu. Veľkou výhodou žiarobetonu je jeho celistvosť pri prevádzkovaní. V priebehu kampane neboli na výmurovke zaznamenané výrazné praskliny. Žiarobeton veľmi dobre odoláva tepelným šokom, čo je možné vidieť na testovaných vzorkách podľa ASTM 1525. Výsledky testov sú uvedené na obr. 3.

Datum	Číslo vzorky	Akosit	Prvina	Odolnosť voči náhlym zmenám teplot podľa ASTM- pri teplote 1093°C
27.01.2016	RS30/003-V3/16	KOFOND FAB 75		V3/16
				Číslo vzorky
				1 2 3 4 5
				Index porušenia
				Cyklus č.
				1 2 3 4 5
				1 1 1 1 1
				2 1 1 1 1
				3 1 1 1 1
				4 1 1 1 1
				5 1 1 2 1
				6 2 1 2 1
				7 2 1 2 1
				8 2 2 3 3
				9 3 3 3 3
				10 3 3 3 3
0 = žiadne náznaky praskania				4 = hrubé trhliny
1 = mierne vlasové trhliny nepresahujúce šírku ani dĺžku plochy				R = rozpad vzorky na 2 alebo viac kusov
2 = mierne popraskanie cez celú dĺžku alebo šírku plochy				MV=malé vydroteniny
3 = stredné trhliny				



Obr. 3. Odolnosť proti náhlym zmenám teploty žiarobetonu *Kofond FAB 75*

Z pracovnej vrstvy opotrebovanej výmurovky boli odobrané vzorky „post mortem“ na fázovú analýzu, aby sme zistili aké fázy vznikajú v zlievarenskom procese na medzifázovom rozhraní. Výmurovka je v priebehu odlievania vystavená pôsobeniu tekutej liatiny a zlievarenskej trosky. Troska vytvára počas

plnenia a vyprázdňovania panvy na výmurovke nálepy vo vrchnej, ale aj v spodnej časti výmurovky. Na obr. 5. je úlomok vzorky monolitckej výmurovky z interakčnej oblasti s troskou, kde je vidno ostré rozhranie medzi žiarobetónom a troskou, s minimálnou penetráciou.



Obr. 4. Zostatková hrúbka výmurovky z Kofondu FAB 75



Obr. 5. Úlomok žiarobetónu „post mortem“ z LP č. 5

V tab. 1 je zaznamenaná fázová analýza zlievarenskej trosky, interakčného rozhrania troska - žiarobetón a zostatkovej vrstvy žiarobetónu.

Prídávaním modifikátora a očkovadla v pomere 3:1 sa v zlievarenskej troske tvoria fázy obsahujúce *Mg*, *Ca*, *Si* a *Fe* z liatiny. Majoritnou fázou je forsterit ($(Mg,Fe)_2SiO_4$, $T_f = 1890\text{ °C}$). V troske sú ďalej zastúpené železo (*Fe*), akermanit ($Ca_2MgSi_2O_7$, $T_f = 1454\text{ °C}$), monticellit ($CaMgSiO_4$, $T_f = 1503\text{ °C}$) a diopsid ($CaMgSi_2O_6$, $T_f = 1391\text{ °C}$) ako jediná nízkotavitelná fáza z pohľadu rozsahu výrobných teplôt. V troske sa nachádza 2,75 % korundu z opotrebovanej výmurovky.

Prítomnosťou čistého horčíka *Mg* ako modifikátora a čistého kremíka *Si* ako očkovadla, pri spracovaní liatiny dochádza ku oxidácii a vzniku MgO a SiO_2 , ktoré sa primárne viaže do komplexných zlúčenín s rôznym bodom tavenia. K tejto oxidácii dochádza len v povrchovej vrstve hrubej cca 0,5 až 1 mm. Z fázovej analýzy vyplýva, že prídavkom *Mg* sa na povrchu betónu vytvára taká škála komplexných zlúčenín, ktoré bránia enormnému taveniu betónu. Práve naopak ochraňujú výmurovku a k opotrebeniu dochádza len postupným miernym olupovaním jednotlivých zhrnutých vrstiev.

Pretože je medzifázové rozhranie troska – žiarobetón ostré, bez výraznej penetrácie nachádzajú sa tam železo z liatiny, fázy z trosky ako monticellit, forsterit, akermanit a zo žiaromateriálu korund a andaluzit. Vzájomnou reakciou vznikli nové fázy hercynit ($FeO.Al_2O_3$, $T_f = 1740\text{ °C}$), gehlenit ($2CaO.Al_2O_3.SiO_2$, $T_f = 1388\text{ °C}$), a spinel ($MgO.Al_2O_3$, $T_f = 2135\text{ °C}$) ktoré svojimi vlastnosťami nenarušujú vrstvu v styku s tekutým kovom. V týchto fázach sú prítomné oxidy *Fe* pochádzajúce zo zliatiny a oxidy *Ca* pochádzajúce z hydraulickej väzby obsiahnutej v betóne. Fáza spinelu s teplotou tavenia 2135 °C sa vytvorila reakciou pôvodnej korundovej zložky betónu a MgO pochádzajúceho ako výsledok oxidácie horčíka vo vysokoteplotnom procese.

Tab. 1. Fázová analýza vzoriek z výmurovky LP č. 5

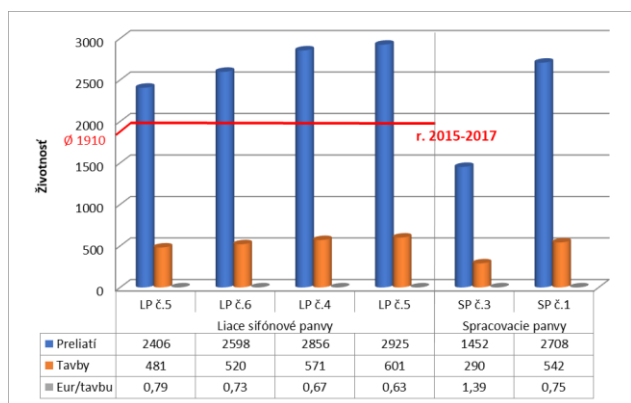
	troska
39,25 % $(Mg,Fe)_2SiO_4$ 15,32 % $Ca_2MgSi_2O_7$ 11,77 % $CaMgSiO_4$ 0,56 % Fe_3O_4 16,85 % <i>Fe</i> 12,16 % $CaMgSi_2O_6$ 1,34 % SiO_2 2,75 % Al_2O_3	
	troska + žiarobetón
16,80 % Al_2O_3 28,87 % Al_2SiO_5 1,14 % SiO_2 12,01 % $CaMgSiO_4$ 1,29 % $FeAl_2O_4$ 4,27 % $Ca_2Al_2SiO_7$ 5,80 % $(Mg,Fe)_2SiO_4$ 6,24 % <i>Fe</i> 2,91 % $Ca_2MgSi_2O_7$ 4,96 % $MgAl_2O_4$ 10,31% $(Ca,Na)(Si,Al)_4O_8$ 5,4% $Ca(Ca,Mn)Si_2O_6$	
	žiarobetón
59,66 % Al_2O_3 33,36 % Al_2SiO_5 1,2 % SiO_2 3,44 % $3Al_2O_3.2SiO_2$ 1,5 % SiO_2 0,85 % $Ca_2(Al,Fe)_2O_5$	

V hĺbke 10 mm je objem opotrebovanej žiarobetónovej výmurovky tvorený čistými pôvodnými materiálmi, zložené hlavne z korundu, andaluzitu a mullitu.

Z dôvodu kvalitných výsledkov bolo rozhodnuté, že žiarobetón Kofond FAB 75 bude aplikovaný na výmurovku spracovacích panví. Konštrukcia výmurovky spracovacej panvy sa oproti liacej panve odlišuje v hornej vylievacej časti a na dne panvy je realizovaná priečka pre umiestnenie spracovacích

materiálov. Priečka sa realizuje zo žiarobetónu *Kofond F6A-1*.

S monolitickou výmurovkou *Kofond FAB 75* bol najlepší výsledok 542 taviieb dosiahnutý na spracovacej panve č. 1. Panva bola v prevádzke 8 mesiacov. Na obr. 6 je graficky znázornený prehľad dosiahnutých výsledkov v Zlievarni 1 na panvách s kombinovanou monolitickou výmurovkou *Kofond FAB 75* a *Komah AC1*. V porovnaní z rokmi 2015÷2017 došlo k zvýšeniu životností na liacich panvách v priemere o 40 %.



Obr. 6. Životnosť výmurovky zo žiarobetónu *Kofond FAB 75* v panvách Zlievarne č.1

Na Zlievarni 2 je širší sortiment panví s objemom od 2 do 9 ton. V závislosti od zákazkovej náplne sa v nich môže a nemusí realizovať rafinácia liatiny. Napríklad v liacej panve č. 14 s kapacitou 5 ton bola realizovaná monolitická výmurovka s hrúbkou steny 12 cm zo žiarobetónu *Kofond FAB 75*. Za sedem mesiacov jej prevádzkovania bol dosiahnutý jeden s najlepších výsledkov 497 liatí.

3 KOSAT SP 25 CM

U technologicky náročnejšej spracovacej panvy bola zo strany zlievarne daná požiadavka na zvýšenie kvality žiarobetónu na Zlievarni 1. Pre monolitickú výmurovku spracovacej panvy č. 2 bol navrhnutý nový výrobok *Kosat SP 25 CM*. Jedná sa o spinelitický samotučiaci žiarobetón na báze tabulárneho korundu, ktorý sa vyznačuje vysokou odolnosťou proti tekutým kovom a troskám. Spracovacia panva č. 2 (*SP* č. 2) bola realizovaná v októbri 2018. Pretože sa panva skladá z dvoch častí, jej aplikácia prebiehala v dvoch fázach. V prvej fáze bola realizovaná dopadová časť s dnom o hrúbke 7 cm a v druhej fáze bola vytvorená vrchná časť obvodovej steny o hrúbke 6 cm. Aplikácia monolitickéj výmurovky prebiehala vylieváním medzi tvarovacie jadro a plášť panvy bez použitia vibrátora. Ako vymazávacia hmota bol navrhnutý nový výrobok *Komah AC 2*, ktorý je chemicky príbuzný s primárnym žiarobetónom. K oprave nerovnomerne opotrebenej výmurovky sa používal žiarobetón na báze andaluzitu *Kofond F6A-1*.

V najviac opotrebovaných miestach sa žiarobetón nanášal mechanicky do hrúbky 1÷2 cm. Vlastnosti žiarobetónov a hmoty sú uvedené v tab. 2.

Tab. 2. Technické parametre žiarobetónov a vymazávacích hmôt

	<i>KOFOND FAB 75</i>	<i>KOMAH AC 1</i>	<i>KOSAT SP25CM</i>	<i>KOMAH AC 2</i>	<i>KOFOND F6A-1</i>
Obsah Al_2O_3 (%)	75	74	90	88	min. 64
Obsah CaO (%)	2,0	10	2,0	3,5	5,0
Obsah Fe_2O_3 (%)	0,9	0,5	0,3	0,3	max. 1
Obsah MgO (%)	-	-	7	7,5	-
$OH_{110}^{\circ C}$ ($kg \cdot m^{-3}$)	2900	-	2980	-	2510
$OH_{1000}^{\circ C}$ ($kg \cdot m^{-3}$)	2800	-	-	-	-
$OH_{1500}^{\circ C}$ ($kg \cdot m^{-3}$)	2780	-	2850	-	2380
$PTL_{110}^{\circ C}$ (MPa)	120	-	40	-	min. 40
$PTL_{1000}^{\circ C}$ (MPa)	100	-	-	-	-
$PTL_{1500}^{\circ C}$ (MPa)	140	-	80	-	min. 40
$TDZ_{1000}^{\circ C/5h}$ (%)	0,4	-	-	-	-
$TDZ_{1500}^{\circ C/5h}$ (%)	0,2	-	1	-	0,1
Spotreba zámesovej vody (%)	4,4÷4,6	20÷30	5,5÷6	20÷30	9÷11



Obr. 7. Zostatková hrúbka výmurovky z *Kosat SP 25 CM*

V priebehu 15 mesiacov panva dosiahla rekordnú životnosť 2925 preliatí čo predstavovalo 953 taviieb, kde náklady boli 0,57 Eur na jednu tavbu. Po ukončení kampane bola v najviac opotrebovaných miestach zostatková hrúbka výmurovky 2 cm, čo predstavuje viac ako 60 % opotrebenie (obr. 7). Vo

vrchnej časti panvy v miestach príruby bola výmurovka takmer nepoškodená v zostatkovej hrúbke 5 cm. Po odobraní vzoriek z interakčnej oblasti kov - žiaromateriál je možné pozorovať koróznú reakciu bez penetrácie (obr. 8).

Opotrebovaná výmurovka mala celistvý vzhľad bez trhlin, ukazovateľom čoho je veľmi dobrá odolnosť proti náhlym zmenám teplôt. Výsledky testovania tohto parametru podľa normy ASTM sú ukázané na obr. 9.



Obr. 8. Úlomok žiarobetónu „post mortem“ zo spracovacej panvy č. 2

Dátum	Číslo vzorky	Akošť	Príčina	Odolnosť voči náhlym zmenám teplôt podľa ASTM- pri teplote 1093°C
03.09.2018	R513-2018/037_256	KOSAT SP25 CM	ZB	ZB 256
				Číslo vzorky 256
				Index porušenia
				Cykly č. 0 1 2 3 4 5
				0 0 0 0 0 0
				1 0 0 0 0 0
				2 0 0 0 0 0
				3 1 1 1 1 0
				4 2 1 2 1 3
				5 3 2 2 1 3
				6 3 3 3 3 3
				7 3 3 3 3 3
				8 3 3 3 3 3
				9 3 3 3 3 3
				10 3 3 3 3 4
				4 = hrubé trhliny
				R = rozpad vzorky na 2 alebo viac kusov
				MI = malé vydroteniny
				V = vydroteniny



Obr. 9. Odolnosť proti náhlym zmenám teploty žiarobetónu Kosat SP 25 CM

Z opotrebovanej výmurovky SP č. 2 boli na fázovú analýzu (tab. 3) odobrané vzorky zostatkových žiaruvzdorných materiálov.

Na niektorých miestach výmurovky boli zostatkové vrstvy náterovej hmoty Komah AC 1 do hrúbky 5 mm, a zostatkové hrúbky žiarobetónu Kofond F6A-1 do hrúbky 15 mm. Obidva materiály sa používali na opravu opotrebovanej monolitickéj výmurovky z materiálu Kosat SP 25 CM. Fázová analýza opravárenských materiálov preukázala vzájomnú reakciu s tekutým médiom za vzniku fázy Akermanite ($Ca_2MgSi_2O_7$). V náterovej hmote Komah AC1 bol výskyt Akermanitu 3,5 % a v žiarobetóne Kofond F6A-1 1 %. Je tam taktiež pozorovaný vyšší podiel zoxidovaných SiO_2 fáz. Ostatné fázy ako korund, andaluzit a mullite sú z pôvodného hlinito-kremičitého žiaruvzdorného ostriva. Fázy mayenite $(CaO)_{12}(Al_2O_3)_7$ a calcite ($CaCO_3$) sú z cementovej fázy.

Tab. 3. Fázová analýza vzoriek z výmurovky SP č. 2

troška		
60,71 % Fe 4,84 % SiO_2 10,92 % $(Mg,Fe)_2SiO_4$ 9,02 % $CaMgSiO_4$ 2,83 % $(Ca,Na)_2(Al,Mg,Fe)[(Al,Si)SiO_7]$ 5,86 % Al_2O_3 5,81 % MgO		
KOMAH AC1 opravárenská hmota	32,99 % Al_2O_3 43,54 % Al_2SiO_5 1,67 % SiO_2 2,14 % SiO_2 (Cristobalite) 3,47 % $Ca_2Mg(Si_2O_7)$ 7,13 % $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ 4,11 % $NaAl_3O_7$ 2,67 % $(CaO)_{12}(Al_2O_3)_7$ 2,28 % $CaCO_3$	
KOFOND F6A-1 opravárenský žiarobetón	16,57 % Al_2O_3 62,27 % Al_2SiO_5 3,11 % SiO_2 1,41 % SiO_2 (Cristobalite) 1,01 % $Ca_2Mg(Si_2O_7)$ 7,99 % $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ 2,29 % $NaAl_3O_7$ 3,72 % $(CaO)_{12}(Al_2O_3)_7$ 1,64 % $CaCO_3$	
KOSAT SP 25 CM	64,59 % Al_2O_3 10,67 % $MgAl_2O_4$ 19,31 % $(Mg_{0,8}Fe_{0,2})Al_2O_4$ 3,31 % $CaCO_3$ 2,12 % Al_2SiO_5	

Zostatková vrstva monolitickéj výmurovky z primárneho žiarobetónu Kosat SP 25 CM, bola vystavená dlhodobému termochemickému procesu

úpravy zlievarenskej liatiny. Na základe fázovej analýzy je možné pozorovať, že žiarobetón je zväčša zložený z pôvodných zložiek, ako korund (Al_2O_3), primárny spinel ($MgAl_2O_4$) a calcite ($CaCO_3$). Prítomnosť andaluzitu (Al_2SiO_5) je spôsobená viacnásobným nanášaním opravárenských materiálov na báze andaluzitu. Vzájomnou interakciou zoxidovaného činidla z korózneho média a korundu zo žiarobetónu vzniká sekundárny spinel ($Mg_{0,8}Fe_{0,2}Al_2O_4$). Prítomnosť spinelov na povrchu žiarobetónu zvyšuje jeho odolnosť proti korózii.

ZÁVER

Vzájomnou spoluprácou medzi odberateľom a dodávateľom žiaruvzdorného materiálu sa podarilo

navrhnuť monolitické výmurovky zlievarenských panví z nových netvarových žiaruvzdorných materiálov. Nešlo iba o aplikáciu primárneho žiarobetónu, ale o celý koncept starostlivosti o panvy pri opravách. Vzhľadom na svoju materiálovú štruktúru všetky uvedené druhy monolitických žiaruvzdorných materiálov dosahujú pozitívne kvalitatívne, technologické a ekonomické ukazovatele.

LITERATÚRA

- [1] RMS Košice, s.r.o. (2022): *Technické podklady a fotodokumentácia*.
- [2] EUROCAST Košice, s.r.o. (2022): *Technické podklady a fotodokumentácia*.

Konštrukčné celky používané v stavbe dopravnej a manipulačnej techniky v zábavnom priemysle

Miroslav Blatnický, doc. Ing., PhD.*

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

Ján Dižo, doc. Ing., PhD.

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

Denis Molnár, Ing.

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

Structural units used in the construction of transport and handling equipment in the entertainment industry

Abstract: The article is a continuation of research dealing with the construction of entertainment facilities. The main goal of the authors is therefore to design such an entertainment device according to their own design. This goal was preceded by a historical overview of the development of transport and handling technology used in the entertainment industry. The current work aims to analyse the main components used in the construction of these devices such as nacelles, seats, restraints or drives and fasteners according to *STN EN 13814* so that the design meets all requirements.

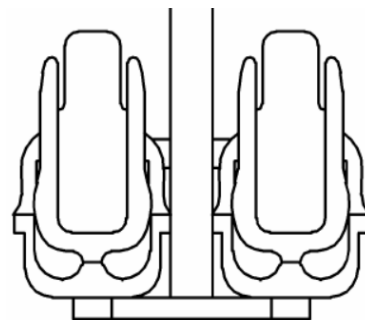
1 JEDNOTKY NESÚCE PASAŽIEROV

Tieto jednotky predstavujú časti zariadenia v ktorých sú usadení pasažieri. Hlavné kritérium pre navrhovanie jednotiek nesúcich pasažierov je bezpečnosť pasažierov. Systém na umiestnenie pasažiera sa navrhuje podľa normy *STN EN 13814* tak, aby zabezpečil ochranu pred zranením alebo prípadnými nebezpečnými situáciami, ako vymrštenie, vypadnutie alebo udretie o časť konštrukcie zariadenia a podobne [1].

1.1 Gondoly

Gondoly sú jednotky nesúce pasažierov ktoré spájajú dve a viac sedadiel do jedného pohybujúceho sa celku (obr. 1). Ich usporiadanie a tvar je závislý od typu zariadenia. Rozmery gondoly sa musia dimenzovať s ohľadom na sily, ktoré vznikajú pri jazde, od vlastných hmotností, užitočných zaťažení a od typu pohybu manipulačného zariadenia. Ak sa gondoly nenavrhlí ako uzavreté kabíny, alebo ak nezodpovedajú bezpečnostným opatreniam podľa príslušných noriem, musia sa namontovať

bezpečnostné prvky, ktoré zabránia kontaktu so súčiastkami alebo inými časťami konštrukcie, ktoré by mohli pre pasažiera znamenať ohrozenie.



Obr. 1. Gondola

Ostatné typy jednotiek sa vybavujú dostatočným zábradlím a opierkami chrbta a nôh, ktoré by umožňovali vzpierať sa proti silám, ktoré vznikajú počas zrýchľovania a spomaľovania gondoly. Výkyvné gondoly alebo vozíky musia byť vybavené príslušnými zariadeniami, ktoré zamedzujú výkyv počas nastupovania a vystupovania [1].

1.2 Sedadlá

Sedadlá sú časti gondoly na ktorých sú usadení pasažieri. Sedadlá sa musia bezpečne pripevniť ku konštrukcii gondoly a ich pripevnenie sa kontroluje analýzou zaťaženia. Samostatnú pozornosť sa vždy venuje vytvarovaniu sedadla, ktoré by malo rešpektovať ergonomické zásady a zabezpečovať podopretie všetkých častí tela náchylné na zranenia, ako opierok chrbta, nôh, rúk, prípadne hlavy. Na výrobu sedadiel sa používajú odľahčené materiály ako sú napríklad plastické kompozity, ktoré sú pripevnené o ocelové konštrukcie gondoly. Povrch sedadiel sa môže potiahnuť materiálom, ktorý zvyšuje trenie a taktiež pomáha k zadržiavaniu pasažierov pri jazde [1].

1.3 Zadržiavacie zariadenia

Hlavnou funkciou týchto zariadení je zaistiť pasažiera a minimalizovať riziká, ktoré môžu vzniknúť počas jazdy, ako sú vymrštenie pasažiera, vypadnutie, udretie o časti zariadenia alebo iného pasažiera, zranenie prudkými pohybmi a podobne. Každá časť dráhy, ktorá slúži pre pasažierov sa musí vybaviť dostatočnými prostriedkami na zadržiavanie pasažierov a musí sa zohľadniť aj typ dráhy. Tieto zariadenia musíme navrhovať tak, aby sa zabránilo zachyteniu a pritlačeniu časti tela, a aby netlačilo na citlivé miesta pasažierov. Najčastejšie používané typy zadržiavacích zariadení sú zadržiavanie cez plecيا a záchytná tyč. Pri manipulačných zariadeniach kategórie s počtom otáčok vyšším ako $8 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a s rýchlosťou prekračujúcou $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ musia byť splnené minimálne nasledujúce požiadavky:

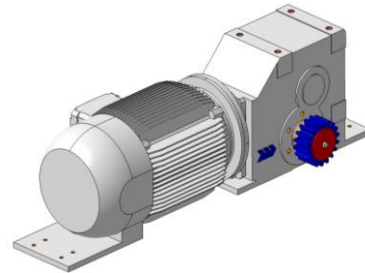
- *Nastaviteľnosť.*
- *Manuálne zaistovanie obsluhou.*
- *Manuálne odistovanie obsluhou.*
- *Možnosť zálohovania* [1].

2 POHON ZÁBAVNEJ TECHNIKY

Hlavnou pohonnou jednotkou zábavných zariadení sú motory. Keďže parametre zariadení sa odlišujú, používame motory rôznej konštrukcie, typu, veľkosti a výkonu. Návrh vhodného motora závisí od druhu energie vstupujúcej do motora (elektrická energia, plyn, nafta, benzín a pod.) a na veľkosti a druhu poháňaného zábavného zariadenia. Najčastejšie používané motory sú elektromotory a priamočiarne hydromotory. Samotné motory nie sú vždy účinné pri dosahovaní požadovaných vlastností prenosu energie, preto musíme pridávať pomocné zložky. Využívajú sa prevodovky, brzdy, frekvenčné meniče. Na správne dimenzovanie pohonu sú potrebné poznať predovšetkým údaje o hnanom stroji (hmotnosť, otáčky, rozmery a podobne) [2].

2.1 Elektromotory

Sú to elektrické zariadenia premieňajúce elektrický prúd na mechanickú prácu alebo mechanický pohyb. Dovoľujú rozbeh stroja od nulovej rýchlosti. Pre pohon manipulačných zariadení sa najčastejšie používajú jednosmerné sériové elektromotory, synchronne elektromotory a asynchronne elektromotory. Každý elektromotor (obr. 2) tvoria dve zložky, statická zložka - stator, dynamická zložka - rotor. Z dôsledku jednoduchosti konštrukcie sa konštruujú elektrické motory na rotačnom princípe, ale taktiež existujú netočivé (lineárne) elektromotory.



Obr. 2. Elektromotor s prevodovkou

Medzi výhody používania elektromotorov patria široké rozmedzie otáčok podľa potreby zariadenia a jednoduchá manipulácia riadenia a napájania. V súčasnosti sa prechádza k elektromotorom so zabudovanou brzdou, ktorá zaisťuje bezpečný dojazd a zastavenie zariadenia. Brzda je elektromagnetická kotúčová, budená jednosmerným prúdom. Odbrzďuje sa elektrickým systémom a zabrzďuje sa silou pôsobenia pružiny [2].

2.2 Prevodový mechanizmus

Prevodovka (obr. 2) je technický systém, ktorý je zložený z rôznych druhov súčiastok zabezpečujúcich ich hlavnú funkciu, ktorou je zmena parametrov vstupných otáčok a krútiaceho momentu na parametre výstupu. Prevodový mechanizmus pozostáva z hriadeľov, ozubených kolies a reťazí, ktoré sú spojené v sústave kinematickými dvojicami (ozubením, ložiskami) a dočasne spojenými prvkami. Základné rozdelenie prevodového mechanizmu:

- *Hriadeľové* - osi hriadeľov sa nepohybujú.
- *Planétové* - jeden a viac pohyblivých členov koná priestorový pohyb.
- *Kombinované.*

Prevodová časť (prevod), prenáša výkon (mechanickú prácu) z hnacej časti na hnanú časť, ktorá vykonáva prácu, prípadne väčšie množstvo hnaných častí, kde mení hodnoty parametrov mechanickej práce (výkonu, energie) tak, aby boli dostatočne použiteľné. Negatívnym javom pri prenose výkonu sú straty výkonu. Vyznačuje sa to tým, že sa energia vplyvom trenia súčasti prevodu

a iných strát mení na iný druh energie. Pri dimenzovaní sa teda musí rátať s požadovanou účinnosťou prevodovky, ktorá vznikne pomerom výkonu na vstupe a výkonu na výstupe (1).

$$\eta_p = \frac{P_1}{P_2} \quad (1)$$

kde η_p [-] je účinnosť prevodu,

P_1 [W] je výkon na výstupe,

P_2 [W] je výkon na vstupe [2].

2.3 Ozubené prevody

Medzi základné typy prenosu energie z motora na druh zábavného zariadenia patrí prenos pomocou ozubených súkolesí. Ozubené súkolesie je mechanizmus tvorený z troch členov, dvoch zaberajúcich kolies a nehybného rámu. Ozubenie musí spĺňať hlavnú požiadavku, dosiahnuť konštantný prevod medzi dvomi kolesami, bez čo najmenších strát výkonu. Súkolesie sa väčšinou skladá z pastorku (hnacia časť) pripevneného o prevodovku alebo zo samotného motoru, ktorý prenáša hnaciu silu na ozubené koleso (hnaná časť) pripevnené o manipulačné zariadenie, ktoré ju prijíma.



Obr. 3. Čelný ozubený prevod so šikmými zubami

Súkolesie sa musí dimenzovať tak, aby bolo schopné prenášať požadovaný výkon. Okrem toho musí vyhovovať ďalším funkčným požiadavkám, ako je vysoká únosnosť, tichý a plynulý chod, vhodný a produktívny spôsob výroby a montáže. Základné typy používaných súkolesí:

- Čelné s vonkajším ozubením a priamymi zubami.
- Čelné s vonkajším ozubením a šikmými zubami (obr. 3).
- Čelné s vnútorným ozubením a priamymi zubami.
- Závitovkové súkolesia [3].

2.4 Priamočiare hydromotory

Tieto typy hydromotorov sú v zábavnej manipulačnej technike veľmi rozšírené, pretože sú pri celkom malých rozmeroch motora a malej

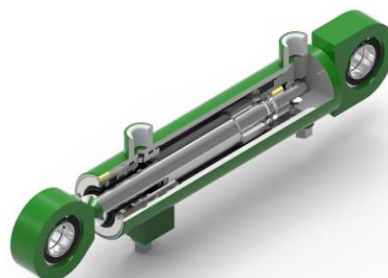
hmotnosti schopné vyvinúť sily, ktoré sa pohybujú až do niekoľko stoviek tisíc Newtonov.



Obr. 4. Teleskopický hydromotor [4]

Hydromotor je teda prvok, ktorý premieňa tlakovú energiu kvapalného prostredia na energiu mechanickú. Základná časť hydromotorov je valec, v ktorom sa pohybuje piest a piestna tyč. Všetky piesty, valce, rúrkovité vedenia a armatúry, ktoré sú pod tlakom musíme navrhovať s ohľadom na to, aby odolali dvojnásobku maximálneho pracovného tlaku v hydraulickom zariadení. Podľa funkčnosti delíme základné typy hydromotorov na:

- *Jednočinné* - pri týchto zariadeniach je v styku s kvapalinou iba jedna strana piesta, takže piest vykonáva prácu iba v jednom smere, pracovná kvapalina prúdi v priestore kde pracuje piest a zabezpečuje posunutie piesta do koncovej polohy. Sily spôsobujúce návrat piesta do pôvodnej polohy zabezpečujú to, že sa kvapalina vytlačí do odtokového potrubia. Poznáme dva typy jednočinných priamočiarych hydromotorov - jedноступňové a viacstúpnové (teleskopické, obr. 4).
- *Dvojčinné* - kvapalina je v styku s oboma stranami piesta hydromotora. Hydromotor koná prácu v oboch smeroch (obr. 5).



Obr. 5. Dvojčinný hydromotor [4]

Hydraulický systém sa musí vybaviť pretlakovým poistným ventilom, zapojeným medzi čerpadlom a spätným ventilom. Ventil je vhodne nastavený na tlak, ktorý nie je vyšší o viac ako 20% normálneho pracovného tlaku. Stabilita valcov sa počíta pri 1,4-násobku pracovného zaťaženia, je potrebné overiť aj únavu materiálu [2].

2.5 Frekvenčný menič

Medzi ďalšie časti pohonu zábavných zariadení patria frekvenčné meniče. Ide o elektronické

zariadenia, ktoré umožňujú regulovať otáčky motora. Konštrukcie nesmú byť vystavené hneď maximálnym otáčkam, preto sú frekvenčné meniče v praxi veľmi dôležité. Umožňujú plynulý rozbeh a taktiež manipuláciu podľa potreby prevádzky. Frekvenčný menič sa zapája do obehu pred motor, aby vytváral potrebné meniteľné striedavé napätie. Frekvenciu a veľkosť napätia už teda neurčuje sieť, ale túto funkciu preberá frekvenčný menič, pričom pri tejto aplikácii zostáva krútiaci moment motora bez zmeny. Medzi hlavné výhody nepatrí len plynulý rozbeh stroja, ale taktiež energeticky úspornejšia prevádzka [5].

3 UPEVNŔOVACIE PRVKY

Významnú časť súčiastok a pomocných zložiek v manipulačnej technike tvoria upevňovacie a kotviace prvky. Slúžia na zabezpečenie a spevnenie konštrukcie proti nežiadúcemu pohybu, ktorý by mohol nastať pri manipulácii so zábavným zariadením. Vo všeobecnosti sa tieto zložky používajú na vytváranie nestálych spojov, ktoré sa dajú ľahko odstrániť alebo demontovať bez poškodenia spojovacích komponentov.

3.1 Demontovateľné a pevné spoje

Demontovateľnými zložkami sú napríklad skrutky, svorníky, napínacie skrutky, poistné skrutky, ktoré sa volia z pevnostných tried 4.6, 5.6, 6.8, 8.8 a 10.9 podľa vybraných noriem. Skrutky ktoré sú vystavené ťahovému namáhaniu sa majú navrhovať s vôľou v diere pre skrutku 1,0 mm.

Pri spájaní komponentov manipulačných strojov v zábavnom priemysle využívame metódu nerozoberateľného spoja. Výhodou tohto spájania je vysoká produktivnosť a nižšia cenová náročnosť ako pri rozoberateľných spojoch. Medzi hlavné nerozoberateľné spoje v manipulačnej technike patria zváranie a nitovanie. Zváranie je spájanie za tepla, tlaku alebo tepla s prídavným materiálom. Táto technológia je pri zábavných zariadeniach najpoužívanejšia, pretože zváraním sa dajú spájať rôzne druhy materiálov. Pri zváraných spojoch sa musia dodržiavať určité technologické zásady a potrebné normy, aby sa zaistila potrebná pevnosť a kvalita spoja. Nity sa pre zábavný priemysel musia zvoliť podľa európskych noriem alebo podľa národných noriem [1].

3.2 Poist'ovacie a bezpečnostné zariadenia pri upevňovacích prvkoch

Čapy, matice, poistné podložky a ostatné upevňovacie prvky, ktoré sú náchylné na uvoľnenie pri premenlivom zaťažení a môžu spôsobiť nebezpečnú situáciu, sa zaistujú spoľahlivým spôsobom aby nedošlo k neočakávanému uvoľneniu.

Zaist'ovanie sa musí vykonávať aj na predpäté spoje pri predpätých skrutkách. Napriek tomu že sa predpäté spoje považujú za menej náchylné na uvoľňovanie, vplyvom usadzovania môže dôjsť k porušeniu pevnosti. Pri pohone otáčania s guľôčkovým ložiskom, sa musia predpäté spoje dostatočne často kontrolovať [1].

ZÁVER

Hlavným cieľom autorov je navrhnutie zábavného zariadenia podľa vlastného konštrukčného návrhu. Tomuto však nutne predchádza historický prehľad v oblasti vývoja priemyslu so zábavou s postupným vývojom až do dnešných čias. Následne boli uvedené hlavné materiály používané v stavbe dopravnej a manipulačnej techniky tohto odvetvia. Analýza sa vykonala najmä štúdiom normy *STN EN 13814*, odkiaľ boli vybrané podstatné a tiež zaujímavé informácie týkajúce sa návrhu takéhoto zariadenia. V tomto príspevku sa autori zamerali na analýzu jednotiek nesúcich pasažierov, pohony takejto techniky a upevňovacie prvky. Všetky spomenuté konštrukčné celky budú aktívne využité vo vlastnom návrhu takéhoto zariadenia. V ďalšom riešení problematiky sa autori zamerajú na analýzu ostatných dôležitých informácií potrebných k návrhu ako sú tiažové zrýchlenie, navrhovanie konštrukčných častí a jednotiek nesúcich pasažierov, hydraulických systémov a prevádzkového postupu.

Pod'akovanie

Tento výskum podporila Kultúrna a vzdelávacia grantová agentúra MŠ SR v projekte č. KEGA 023ŽU-4/2020: „Vývoj pokročilých virtuálnych modelov na štúdium a skúmanie prevádzkových charakteristik dopravných prostriedkov.“

LITERATÚRA

- [1] STN EN 13814:2005 (2005): *Strojové vybavenie a konštrukcie lunaparku a zábavného parku - Bezpečnosť*.
- [2] KUČERA, Ľ. a kol. (2019): *Konštruovanie III*. Žilinská univerzita v Žiline/ EDIS, 164s. ISBN 978-80-554-1569-7.
- [3] MÁLIK, L. a kol. (2013): *Konštruovanie II, Časti a mechanizmi strojov*. Žilinská univerzita v Žiline/ EDIS, 434s. ISBN 978-80-554-0755-5.
- [4] HYDRAULICS s.r.o. (2017): *Katalógové hydromotory*. [online]. Dostupné z: <https://www.hydraulics.cz/24971-katalogove-primocare-hydromotory-hydraulicke-valce>.
- [5] HRBČEK, J. - ŠIMÁK, V. - HRUBOŠ, M. (2017): *Riadenie motorov použitím systému B&R*. V Žiline: ŽU, Elektrotechnická fakulta, 166 s. ISBN 978-80-554-1327-3.

Cutting of Cylindrical Semi-Finished Products of Rolling Elements

Ján Moravec, doc. Ing., PhD.*

Department of Technological Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: jan.moravec@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2764

Borislav Melo, Ing., PhD.

Viena International, Ltd. Martin,
Dolné Kráčiny 2, 010 36 Martin, Slovak Republic.
E-mail: borislav.melo@viena.sk

Abstract: The paper is supplemented by a discussion of the results and in the end an evaluation of the experiments is made. The paper presents basic theoretical knowledge about the cutting process. The experimental part describes the cutting, forming and evaluation of the obtained cylindrical samples for rolling elements.

INTRODUCTION

Shearing is the basic work of dividing materials by shearing. In the case of metals, it begins with elastic, then plastic deformation, and after local exhaustion of plasticity, it ends with a fracture. For more information on the issue of the cutting process, see e.g. in sources [1-12], where the process is described in detail both theoretically and technologically.

1 THEORETICAL FINDINGS

If the calculations concerning the cutting process are based on the shape of a working diagram, a solution can be obtained even for the roughest simplifications. The working diagram of shearing is characterized by a relatively continuous increase of force up to the maximum value, at which for low plastic metals there is a sharp decrease of force and for metals beyond the maximum force there is an area of smaller continuous decrease of force with subsequent sharp decrease. A sharp drop in shear force is associated with a fracture. Up to this maximum, the force overcomes the deformation resistance in the area of the plastic deformation focus (Fig. 1). It is important to know what causes a steady increase in shear force up to the maximum, when at the same time the shear area decreases monotonically from the beginning of cutting. It can be assumed that the cause is consolidation. The shearing process in the focus of plastic deformation is considered to be shear, and thus the maximum shear stresses act on the shear edges of the cutter and the shear [13-15].

1.1 Shearing

On the mechanical shears of the *ScPK* type (Fig. 1) the lower knife *1* is mounted in the machine frame *2*,

the upper *3*, in the slider the *4*-cut bar *5* is fed (by its own electric motor driven) conveyor with rollers *6* to the tilting stop *7*. Hydraulic holder *8*, whose movement is connected with the movement of the upper knife *3*, the rod *5* is pressed against the lower knife *1* and the conveyor rollers *6*, which can be adjusted in the vertical direction. The clip *8* falls on a chute, which transports it directly or via an articulated conveyor to the crate.

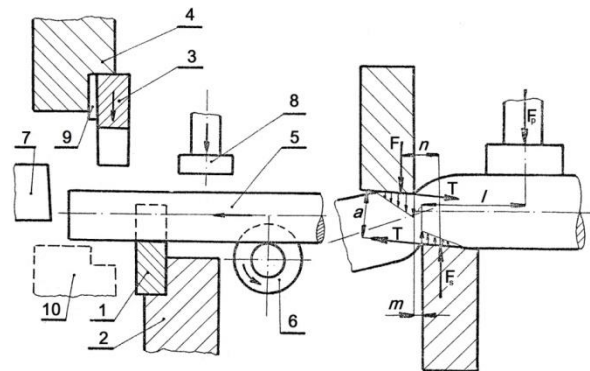


Fig. 1. Scheme of cutting round bar steel: 1 - lower knife, 2 - machine frame, 3 - upper, 4 - slider, 5 - cut bar, 6 - conveyor with rollers, 7 - folding stop, 8 - hydraulic holder, 9 - knife washer, 10 - fixed stop

1.2 Knife forces and cutting deformation

Gradual extrusion of the opposite knives constantly increases the specific pressure, which causes deformation of both the end of the cut and the beginning of the bar - the beginning of the next cut. The deformation at the top of the cut is manifested by pushing, at the bottom by bending and stretching of the material fibers. This 1st stage of shearing ends when the shear stress reaches such a magnitude that the cohesion of the metal begins to be compromised. (Fig. 2 and Fig. 3). Due to the fact that the shear

forces of the two F_S knives are spaced apart by the value "n", the resulting moment of rotation causes the clip. The rotation of the clipping, which causes an increase in the skew of the rear face of the clipping, ends when the moment of the pair of friction forces T created by it equals (in the opposite sense) the moment of the pair of shear forces, i.e. when:

$$F_S \cdot n = T \cdot p. \quad (1)$$

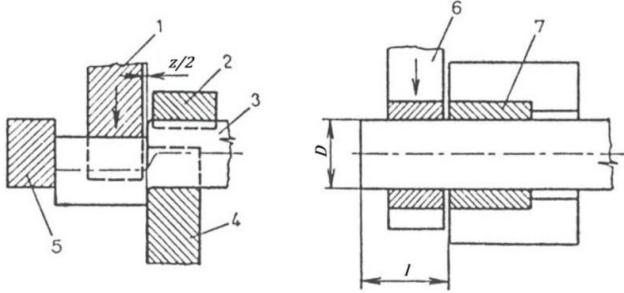


Fig. 2. Volumetric cutting on conventional presses: left - cutting with open knives, right - cutting with closed knives: 1 - movable open knife, 2 - prismatic guide, 3 - cut bar, 4 - fixed open knife, 5 - folding stop, 6 - movable closed knife, 7 - fixed closed knife

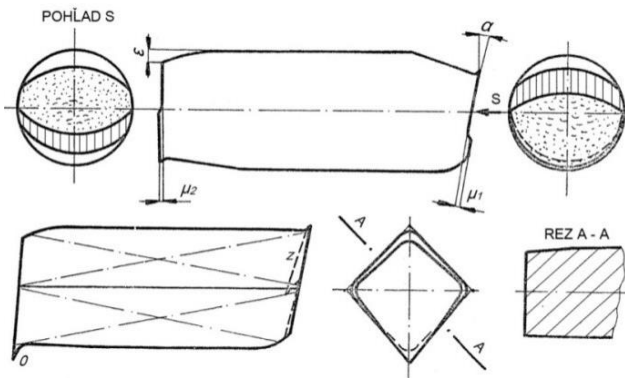


Fig. 3. Geometric characteristics of the clipping

1.3 The voltage analysis according to Fig. 4

In order to obtain high-quality cutting surfaces, it is necessary to bring the cut material into a state of multi-axis stress. This state can be achieved by axial or radial pressure on the material being cut or by torsional prestressing of the material, which together with the other two stresses (tensile and compressive) created during the cutting itself, cause a multi-axis stress state in it. The cutting process greatly affects the focus of deformation. A spatial state of stress arises in said focus, as a result of which elastic and elastic-plastic stresses are suppressed. This spatial stress has a very positive effect on the quality of the cut. The cutting surface is without fracture area and cracks, flat and perpendicular to the axis. According to Fig. 5 will be:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \quad (2)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \quad (3)$$

$$\sigma_A = 1.15 \cdot \frac{\sigma_K}{2}, \quad (4)$$

$$\sigma_1 = -\sigma_A - \frac{\sigma_K}{2} + 2 \cdot \tau_{PS}, \quad (5)$$

$$\sigma_2 = -\sigma_A + \frac{\sigma_K}{2}, \quad (6)$$

$$\sigma_3 = -\sigma_A - \frac{\sigma_K}{2}. \quad (7)$$

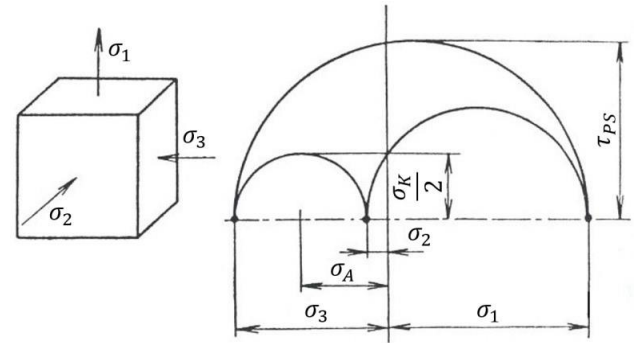


Fig. 4. Stress analysis when cutting a bar with a multi-axis stress state

Tension intensity:

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (8)$$

Shear octahedral stress:

$$\tau_{okt} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (9)$$

To calculate the total required force for cutting the bar, τ_{okt} , is taken into account, because the cut material is brought into the spatial stress state:

$$F_S = \tau_{okt} \cdot S. \quad (10)$$

Steels that are not very cold in the cold are recommended to be cut at temperatures of $450 \div 650 \text{ }^\circ\text{C}$, so that the residual stress does not immediately or additionally cause the occurrence of cracks roughly perpendicular to the cutting surface [16-21].

2 EXPERIMENT

The quality material 14 209 Ø27 h10 was cut on a press LW 160 in a cutting tool for cuttings weighing $270.5 \text{ g} \pm 0.5 \text{ g}$. The metallographic image of the steel is shown in Fig. 5. The cuttings were annealed soft in a protective atmosphere and then phosphated. The surface was coated with grease. On the LU 400 press, the semi-finished products were calibrated to Ø28 mm. Without further heat treatment and without phosphating, they were formed to the required size in three forming operations on a three-operation

TPD 630 forming machine. The rollers were etched hot with *HCl*. The faces of the rollers are apparent from Fig. 6. In one roller, fine cracks appeared on the circumference of the forehead in a radius transition to the shoulder.

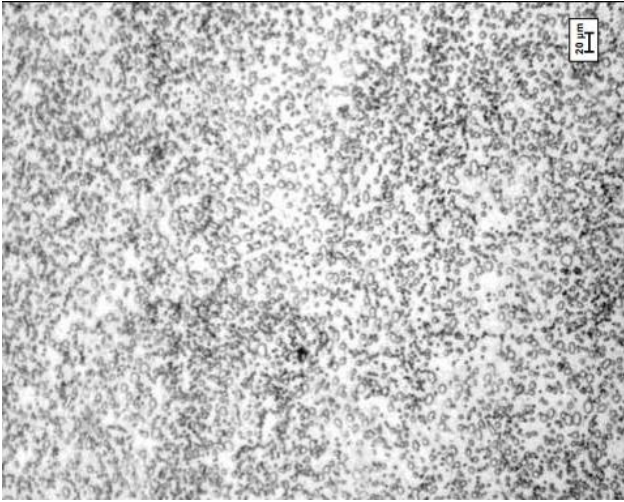


Fig. 5. Metallographic image of cut steel 14 209

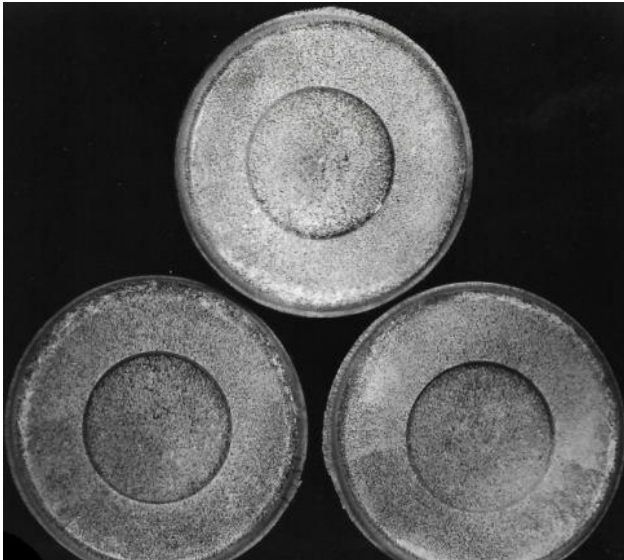


Fig. 6. Faces of samples after forming

There were no cracks in the extended part. Metallography was performed on a longitudinal section etched by *Dickenson* and *Mayer-Riehols*. The course of the formed fibres is evident from Fig. 7. Cracks in the longitudinal section were not visible. There are folds to a depth of 0.1 mm in the recess of the roller face.



Fig. 7. The course of compressed fibre after forming

CONCLUSION

Cutting bars on scissors and presses is undoubtedly the most advantageous way of cutting blocks for current die forging. It should be noted that while the technical level of the scissors used is high, there are still considerable reserves in the technology and construction of knives and mechanization equipment.

REFERENCES

- [1] CERMAK, J. - DVORAKOVA, J. (1980): *Selected shaping methods*. CVUT Prague.
- [2] ELFMARK, J. (1986): *Plasticity of metals*, Ostrava HF VSB.
- [3] HOSFORD, W. F. - CADDEL, R. M. (2011): *Metal Forming, Mechanics and Metallurgy*, Cambridge University Press. ISBN 978-1-107-00452-8.
- [4] HRIVNAK, A. - POLAK, K.(1989): *Forming theory and tools*. Bratislava.
- [5] JOHNSON, W. - MAMALIS, A. G. (1998): *Plasticity and metal forming*. Cambridge.

- [6] KUMAR, S. (2008): *Technology of Metall Forming Processes*, New Delhi, India, p. 358, ISBN 978-81-208-3425-0.
- [7] MORAVEC, J. (2015): *Theory of metals forming*, EDIS ZU Zilina, 332 str. ISBN 978-80-554-1095-1.
- [8] MORAVEC, J. (2016): *Forming technology metals metals, selected state*. EDIS ZU Zilina, 149 pp., ISBN 978-80-554-1251-1.
- [9] *Metal Forming Handbook*. Springer Verlag, Berlin, ISBN 3-540-61185-1.
- [10] NIKEL, Z. (1990): *Theory of forming*. FMMI, VSB - TU Ostrava.
- [11] POLAK, K. (1985): *Forming theory and tools*. SVST Bratislava.
- [12] NOVOTNY, J. - LANGER, Z. (1980): *Cutting and other methods cutting metal amterials*. SNTL Prague.
- [13] MARCINIAK, Z. (1984): *Theorie der Blechformung*. SNTL Prague.
- [14] ROEBUCK, B. - Koll. (1997): *Guidelines for the Measurement of Flow Stress in Hot Axisymmetric Compression Tests*, Teddington. NPL.
- [15] KUNDAR, S. (2004): *Technology of Metal Forming Processes*. ISBN 978-81-203-3425-0.
- [16] BOLJANOVIC, V. (2005): *Sheet Metal forming processes and die Design*. ISBN 0-8311-3182-9.
- [17] PEARCE, R. (2010): *Sheet Metal forming*, ISBN 0-7503-0101-5.
- [18] *Metal Forming Handbook*. Springer Verlag Berlin, ISBN 3-540-61185-1.
- [19] MARCINIAK, Z. - DUINCE, J. L. - HU, S. J. (2004): *Sheet Metal Forming*. Buttenworth - Helnman. ISBN 0-7506-5300-0.
- [20] LANGE, K. (2004): *Lehrbuch der Umformtechnik*. Band. 2. Springer - Verlag Berlin.
- [21] GAJDOS, F. (1999): *Theorie der Formung*. Brno, ISBN 80-214-1032-9.

Zvyškové napätia po zvaraní ocele S960MC

Miloslav Málek, Ing.

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

Miloš Mičian, doc. Ing., PhD.*

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

Residual stress after welding S960MC steel

Abstract: Residual stress plays an important role in welded structures, which are stressed not only by cyclic loading. The work deals with the creation of a butt weld joint made of *HSLA* steel *S960MC* with a thickness of 3 mm and its subsequent analysis for residual stresses. The result of the work is the evaluation of the residual stresses of the welded joint.

ÚVOD

Značný dopyt po ľahkých, ale za to vysokopevných materiáloch v posledných desaťročiach, podnietil vývoj ultra-vysokopevných ocelí (*UHSS - ultra-high strength steels*), ktoré patria do kategórie vysokopevných nízkolegovaných (*HSLA - high strength low alloy*) ocelí. *HSLA* ocele majú výbornú kombináciu ťažnosti, zvarateľnosti a vysoký pomer pevnosti k ich hmotnosti. Tieto vlastnosti umožňujú ich široké uplatnenie v rôznych aplikáciách, ako sú zdvíhacie zariadenia, ropný/plynárenský priemysel, automobilový priemysel, výroba lodí, ale aj na konštrukcie ropných námorných plošín. Hlavná výhoda vysokopevných ocelí spočíva, v použití tenších stien a profilov, čo so sebou prináša značnú úsporu hmotnosti [1-3].

Výrobné náklady, efektívnosť a spoľahlivosť technológii tavného zvarania, ako napríklad konvenčného oblúkového zvarania *GMAW (Gas Metal Arc Welding)*, zabezpečili jej časté používanie na vytváranie spojov konštrukcií z *HSLA* ocelí. Vytvorenie mäkkejšej časti (tzv. *soft zone*) *TOO* (teplom ovplyvnená oblasť), je bežným javom u *HSLA* ocelí. Tento efekt je najviac výrazný pri oblúkových technológiách zvarania, ktoré sú sprevádzané vyšším tepelným príkonom a pomalšími ochladzovacími rýchlosťami, pri porovnaní s lúčovými technológiami. Rýchle nerovnomerné ohrievanie a ochladzovanie v dôsledku tepelného cyklu zvarania, vedie k vzniku elasto-plastických deformácií. Nevratné plastické deformácie spôsobené procesom zvarania, môžu znížiť kvalitu zvarových spojov, ďalej môžu spôsobiť nemožnosť

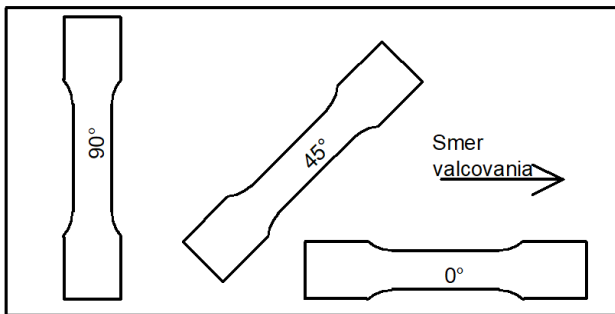
kompletizácie konštrukcie, a tým pádom zvýšenie výrobných nákladov a omeškanie výroby [2, 4, 5].

1 EXPERIMENTÁLNY MATERIÁL A PRINCÍPY MERANIA

V rámci experimentov bola skúmaná termomechanicky valcovaná oceľ (*TMCP - thermo-mechanically controlled processed*) od výrobcu *SSAB* dodávaná pod obchodným označením *Strenx S960MC* vo forme tabule plechu s hrúbkou 3 mm. Jedná sa o zvarateľnú oceľ, určenú na tvárnenie za studena do teplôt 400 °C. Prvým vykonaným experimentom, bola spektrálna analýza pre zistenie chemického zloženia ocele *Oceľ S960MC* svojimi mechanickými vlastnosťami prevyšuje minimálne hodnoty podľa normy *EN 10149-2*. Pre získanie mechanických vlastností boli vykonané štandardné ťahové skúšky podľa normy *EN ISO 6892-1*, na zariadení *INSTRON Series 5985*. Zo skúmaného materiálu boli odobrané 3 typy vzoriek pre ťahovú skúšku, vzhľadom na smer valcovania naznačený na povrchu materiálu, kde jednotlivé uhly (0°, 45° a 90°) predstavujú orientáciu osi vzorky k smeru valcovania (obr. 1).

Zvarové spoje boli vyhotovené pomocou tavného zvarania taviacou sa elektródou v aktívnom plyne s označením 134 podľa normy *STN EN ISO 4063*. Na tento účel bol ako zvarací zdroj vybrané zariadenie *Fronius TransPuls Synergic 4000 CMT*, ktoré je možné riadiť na diaľku pomocou ovládacej jednotky *RCU 5000i*. Pomocou daného zariadenia je možné vybrať predprogramované zvaracie charakteristiky pre rôzny prenos kovu v skratovom, pulznom alebo *CMT (cold metal transfer)* režime. Záznam zvaracích

parametrov počas zvarovania bol vykonaný pomocou softvéru *Fronius Xplorer*, s frekvenciou záznamu 10 Hz. Pre zabezpečenie opakovateľnosti vyhotovenia zvarových spojov ako manipulátor bol použitý zvarací robot *KUKA VKR 250/2* s radiacim systémom *VKR C1*.



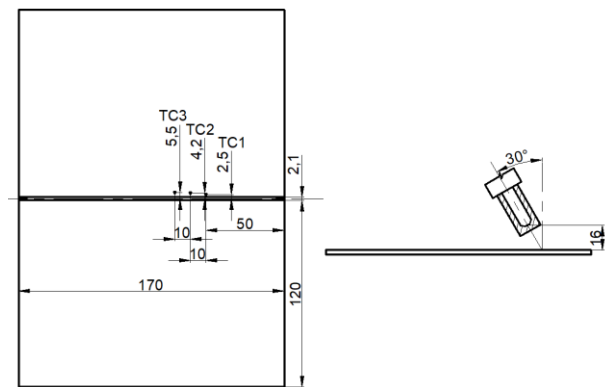
Obr. 1. Schematické rozloženie vzoriek pre statickú skúšku ťahom

Ako prídavný materiál bol zvolený plný zvarací drôt o priemere 1 mm pod obchodným označením *Union X96* od firmy *Böhler*. Podľa normy *STN EN ISO 168344-A* je daný zvarací drôt klasifikovaný ako *G89 5 M21 Mn4Ni2,5CrMo*. Jedná sa o plný zvarací drôt s nízkym obsahom legúr, určený pre zvarovanie v ochrannej atmosfére triedy *M21*. Je vhodný pre polohy zvarovania s dobrou odolnosťou voči vzniku trhlin za studena. Drôt je určený pre zvarovanie vysokopevných jemnozrnných ocelí typu *S890* a *S960 QL* alebo *MC*. Bližšie charakteristiky (chemické zloženie a mechanické vlastnosti) prídavného materiálu *Union X96* sú uvedené v tab. 1.

Tab. 1 Chemické loženie a mechanické vlastnosti prídavného materiálu *Union X96*

Chemické zloženie [%] hm. – <i>Union X96</i>					
<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>
0.12	0.80	1.90	0.45	0.55	2.35
Mechanické vlastnosti					
$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	KV [J] (-50°C)		
930	980	14	47		

Zvary boli vykonané na základnom materiáli *S960MC*. Jednalo sa o jednoprechodové tupé zvary s 2,1 mm koreňovou medzerou medzi dvomi tabuľami ocele s rozmermi 170x120 mm. Pre zaistenie základného materiálu proti pohybu v priebehu zvarovania boli plechy uchytené úpinkami v štyroch bodoch. Ďalej boli vykonané dva bodové spoje základného materiálu (na začiatku a konci), na zabránenie zmenšenia koreňovej medzery v priebehu zvarovania. Vzdialenosť špičky horáka od základného materiálu bola stanovená na 16 mm a sklon horáka od horizontálnej kolmice bol 30°. Pohyb horáka bol dozadu. Schematické znázornenie je na obr. 2.



Obr. 2. Schematické znázornenie procesu zvarovania spolu s umiestnením termočlánkov

Experimentálne zvarovanie bolo vykonané v režime *CMT*. Parametre zvarovania boli odlaďované, tak aby bol dosiahnutý čo najmenší tepelný príkon a zvary boli vyhovujúce vizuálnej kontrole podľa *EN ISO 5817*. Zvaracie parametre spolu s vypočítaným tepelným príkonom sú uvedené v tab. 2.

Tab. 2. Parametre zvarovania

Metóda	Rýchlosť podávania drôtu V_d	Zvarací prúd [A]	Zvaracie napätie [V]	Rýchlosť zvarovania V_z [mm·s ⁻¹]	Tepelný príkon [J·mm ⁻¹]
<i>CMT</i>	5,3	131	13,1	8,3	165

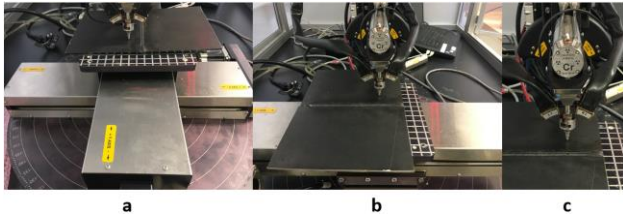
Tepelný cyklus zvarovania bol zaznamenaný pomocou termočlánkov typu *K*. Softvérové zariadenie *LabView 2014* spolu s modulom *NI-9212* slúžilo na záznam a meranie teplotných cyklov do počítača. Termočlánky boli pripevnené pomocou kondenzátorovej zvaračky zo spodnej strany plechu. Na obr.2 sú schematicky zaznačené polohy termočlánkov od osi koreňovej medzery.

Analýza zvarových spojov pozostávala z nedeštruktívneho a deštruktívneho skúšania. Ako prvé boli vykonané nedeštruktívne skúšky. Vizuálna kontrola zvarového spoja bola vykonaná podľa normy *ČSN EN ISO 5817* pre určovanie stupňov kvality zvarových spojov. Posledná vykonaná nedeštruktívna skúška pozostávala v zisťovaní

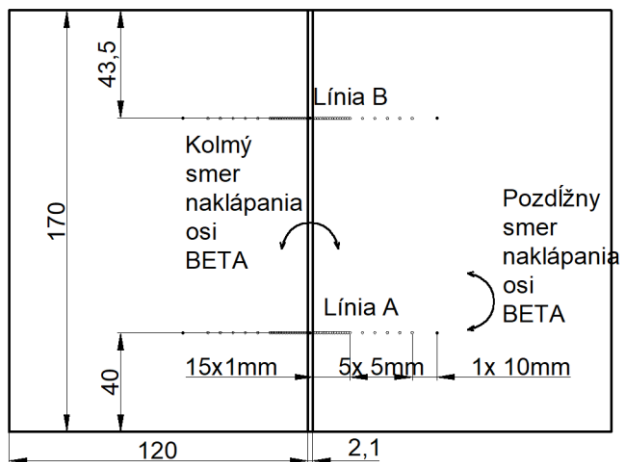
zvyškových napätí na povrchu zvarovaného materiálu pomocou *RTG* difrakcie na prístroji *Proto iXRD* na *Strojníckej fakulte Technickej Univerzite v Liberci*. V priebehu snímania jedného bodu, meracie zariadenie vykonávalo osciláciu v osi *Y* v rozsahu $\pm 0,5$ mm, spolu s postupným naklápaním *BETA* osi až o $\pm 35^\circ$ (obr. 3).

Vyšetrované body boli skenované v pozdĺžnom aj v priečnom smere vzhľadom na os zvaru. Celkovo bolo skenovaných 22 bodov na každú stranu pričom ako 0 bod bol určený v osi zvaru. Vzhľadom na to že skenovaná plocha bola 1x1 mm boli body od seba

vzdialené po 1 mm až do vzdialenosti 15 mm. Táto oblasť bola považovaná za kritickú a preto bola tak zvolená hustota skenovaných bodov. Ďalej už nasledovali 5 a 10 mm rozstupy medzi bodmi (obr. 4).



Obr. 3. Snímanie zvyškového napätia po zváraní: a) naklápanie *BETA* osi kolmo na smer zvaru, b) naklápanie osi *BETA* pozdĺžne k zvaru, c) detail na vyznačenie osi *BETA*



Obr. 4. Schematické znázornenie snímaných bodov pre zistenie zvyškového napätia

2 ANALÝZA VÝSLEDKOV MERANÍ

Chemické zloženie po spektrálnej analýze je uvedené v tab. 3, spolu s chemickým zložením z dodaného certifikátu kontroly a s normou EN 10149-2. Namerané hodnoty chemických prvkov jednoznačne danej norme vyhovujú. Na základe obsahu síri a fosforu je možné konštatovať, že sa jedná o veľmi čistú oceľ. Statická skúška ťahom preukázala, že materiál aj po pevnostnej stránke vyhovuje danej norme (tab. 4). Z koeficientu plošnej anizotropie môžeme konštatovať, že rozloženie precipitátov a veľkosť zrna je rovnomerné rozložená v materiáli.

Základný materiál je tvorený nízkouhlíkovým martenzitom, popusteným martenzitom a zvyškovým austenitom (obr. 5). Výborné mechanické vlastnosti ocele S960MC sú dosahované práve kombináciou vysokého stupňa tvárnenia a tepelného spracovania v priebehu procesu tvárnenia.

Pomocou RTG difrakcie boli zistené zvyškové napätia po zváraní. Zvyškové napätie je vyjadrené v MPa kladnou hodnotou (ťahové napätie) alebo zápornou hodnotou (tlakové napätie) je zobrazené na (obr. 6, obr. 7). Pre obidve snímané línie bodov bol zaznamenaný podobný priebeh zvyškových napätí v pozdĺžnom aj priečnom smere k osi zvaru. V oboch

snímaných smeroch mali zvyškové napätia takmer symetrický charakter. Zvyškové ťahové napätia kolmo na zvar (obr. 6) sú iba do vzdialenosti 1 mm od osi zvaru, pričom ďalej od osi zvaru majú tlakový charakter po posledné snímané body, kedy sa hodnoty zvyškových napätí blížila k nule.

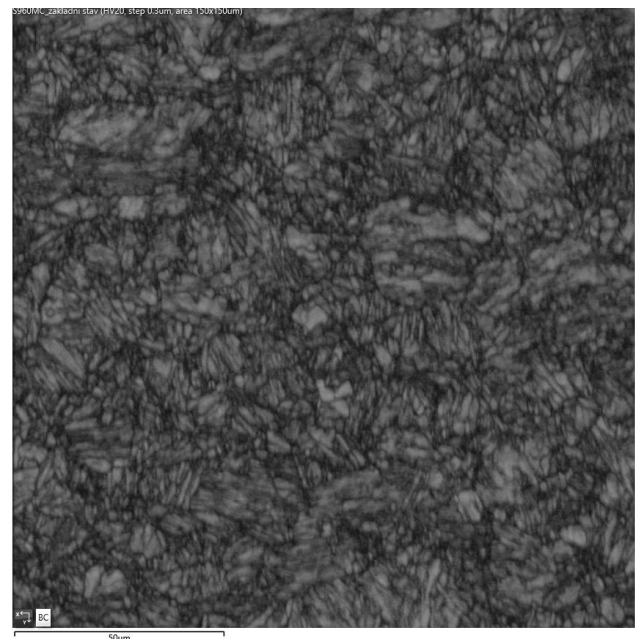
Tab. 3. Chemické zloženie ocele *Strenx S960MC*

Podľa	Chemické zloženie [%] hm. - S960MC					
	C	Si	Mn	P	S	Al
EN 10149-2*	0,20	0,60	2,20	0,025	0,010	0,015
Spektrálna analýza	0,055	0,168	1,203	<0,01	<0,01	0,037
	Nb	Mo	Ti	Cr	Ni	V
EN 10149-2*	0,090	1,000	0,250			0,200
Spektrálna analýza	<0,005	0,086	0,023	1,056	0,046	0,005

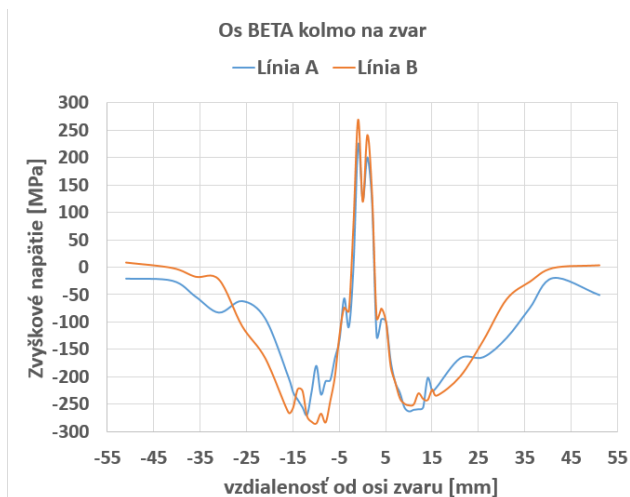
*Maximálne množstvo legujúcich prvkov okrem Al. Predpísaný obsah Al je jeho minimálne množstvo. Súčet prvkov Nb, V a Ti nesmie presiahnuť 0,22 %.

Tab. 4. Mechanické vlastnosti ocele *Strenx S960MC*

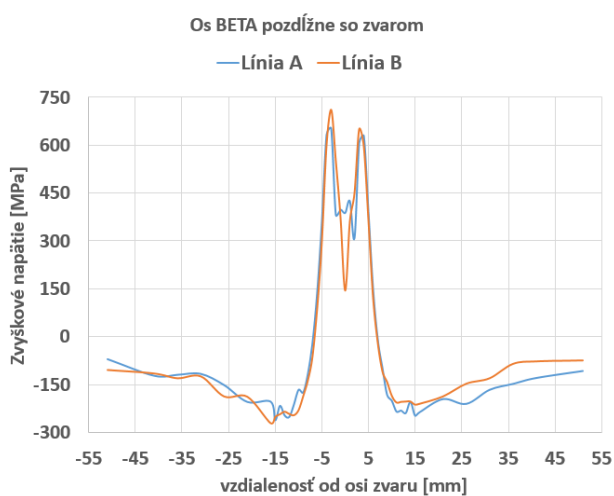
Mechanické vlastnosti S960MC, hrúbka 3 mm					
Podľa	Uhol k smeru valcovania	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$R_{p0.2}/R_m$	A [%]
EN 10149-2	-	min. 960	980 ÷ 1250	-	-
Experimentálne meranie	0°	1007	1092	0,92	0°
	45°	1018	1106	0,92	45°
	90°	1044	1124	0,93	90°



Obr. 5. Mikroštruktúra základného materiálu pozorovaná na elektrónovom mikroskope *Tescan SEM Mira 3*



Obr. 6. Grafické vyhodnotenie zvyškových napätí vo vyšetrovaných bodoch v pozdĺžnom smere so zvarom



Obr. 7. Grafické vyhodnotenie zvyškových napätí vo vyšetrovaných bodoch v kolmom smere na os zvaru

Pri snímaní zvyškových napätí v pozdĺžnom smere, je možné pozorovať viac ako dvojnásobné ťahové napätia od osi zvaru až do vzdialenosti 5 mm, ktoré strmo prechádzajú v tlakové napätia. Tlakové sa postupne znižujú až k nameraným hodnotám $70 \div 100$ MPa.

ZÁVER

V príspevku je uvedený význam používania HSLA ocelí a problematika ich zvarania. Bol vytvorený zvarový spoj HSLA ocele S960MC o hrúbke 3 mm. Na zvarovom spoji bolo vykonané nedeštruktívne meranie zvyškových napätí, za účelom v pozdĺžnom aj priečnom smere na os zvaru. V tesnej blízkosti zvaru je možné pozorovať ťahové napätia,

ktoré sú spôsobené vplyvom chladnutia zvarového kúpeľa. S narastajúcou vzdialenosťou dochádza k výraznej zmene ťahových napätí na tlakové. Vzhľadom na celkovú dĺžku a hrúbku zvaraných plechov, je možné konštatovať, že najväčšie nepriaznivé napätové stavy sa nachádzajú v tesnej blízkosti zvarového spoja. Ďalší výskum sa bude zaoberať súvislosťou veľkosti tepelného príkonu na priebeh zvyškových napätí u oceli S960MC.

Podakovanie

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

LITERATÚRA

- [1] GARCIA, C. (2017). *High strength low alloyed (HSLA) steels*. Automotive steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications (s. 145-167). Matthew Deans.
- [2] HARMANIAK, D. - MIČIAN, M. - JAMBOR, M. - NOVÝ, F. - TRŠKO, L. - BOKŮVKA, O. - PASTOREK, F. (2018): *Gas metal arc welding of thermo-mechanically controlled processed S960MC steel thin sheets with different welding parameters*. Communications (20), pp. 29-35. doi:10.26552/com.C.2018.4.29-35.
- [3] GUO, W. - LI, L. - DONG, S. - CROWTHER, D. - THOMPSON, A. (2017): *Comparison of Microstructure and Mechanical Properties of Ultra-Narrow Gap Laser and Gas-Meta-Arc Welded S960 High Strength Steel*. Optics and Lasers in Engineering, 91, pp. 1-15. doi:10.1016/j.optlaseng.2016.11.011.
- [4] BHATTI, A.A. - BARSOUM, Z. - MURAKAWA, H. - BARSOUM, I. (2015): *Influence of thermo-mechanical material properties of different steel grades on welding residual stresses and angular distortion*. Materials and Design, 65, 878-889. doi:10.1016/j.matdes.2014.10.019.
- [5] GHAFOURI, M. - AHN, J. - MOURUJÄRVI, J. - BJÖRK, T. - LARKIOLA, J. (2020): *Finite element simulation of welding distortions in ultra-high strength steel S960 MC including comprehensive thermal and solid-state phase transformation models*. Engineering Structures, 219. doi:10.1016/j.engstruct.2020.110804.

Optimalizácia parametrov elektroiskrového textúrovania dokončovacích valcov valcovacej stolice oceľových plechov pomocou plánovaného experimentu

Emil Evin, prof. Ing., CSc.*

Katedra automobilovej výroby, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Mäsiarska 74, 040 01 Košice.
E-mail: emil.evin@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 3547

Miroslav Tomáš, doc. Ing., PhD.

Katedra automobilovej výroby, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Mäsiarska 74, 040 01 Košice.
E-mail: miroslav.tomas@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 3524

Electrodischarge texturing parameters optimisation when finishing rolls of steel sheets' rolling mill by design of experiments method

Abstract: In addition to the mechanical properties, the formability and appearance after painting of the coated sheets depends on the surface texture. The surface roughness characteristics of the sheet, the mean arithmetic deviation Ra and the number of peaks per centimetre Pc , depend on the surface texture of the finishing rolls of the rolling mill, their wear and the removal on the rolling mill. This paper presents the results of an investigation of surface-finished sheet metal, the surface of which was textured by changing the electrodischarge texturing (EDT) parameters of the finishing rolls of a rolling mill. The optimization of current I_p , voltage U_p , pulse duration P_{onT} and pulse off time P_{offT} on the target values of roughness $R_{AT,FR}$ and number of peaks $P_{CT,FR}$ of finishing rolls was carried out by response surface methodology (RSM). The obtained regression models describe with a high degree of accuracy the relationships between the input electrodischarge texturing parameters of the finishing rolls and the output texture characteristics $R_{AT,FR}$ and $P_{CT,FR}$.

ÚVOD

Častokrát zákazník pri výbere z niekoľkých podobných výrobkov, ktoré sú ponúkané na trhu za približne rovnakú cenu sa rozhodne na základe ich kvality. Pojem kvalita je veľmi široký a v značnej miere závisí od individuálnych požiadaviek zákazníka. S narastajúcim množstvom ponúkaného tovaru dostávajú požiadavky na kvalitu stále objektívnejší charakter. Kvalita výrobkov je charakterizovaná súborom merateľných znakov. Napríklad, na plechy pre povrchové diely karosérie je kladený dôraz nie len na mechanické vlastnosti plechov ale aj na textúru ich povrchu, aby bola zaistená ich lisovateľnosť a vzhľad povrchových dielov karosérie po lakovaní. Regulovaná textúra povrchu plechov napomáha zadržiavaniu maziva na kontaktných plochách nástroja počas tvárniacich procesov a tým prispieva k zlepšeniu ich lisovateľnosti i konečnému vzhľadu dielov karosérie po lakovaní [1-3].

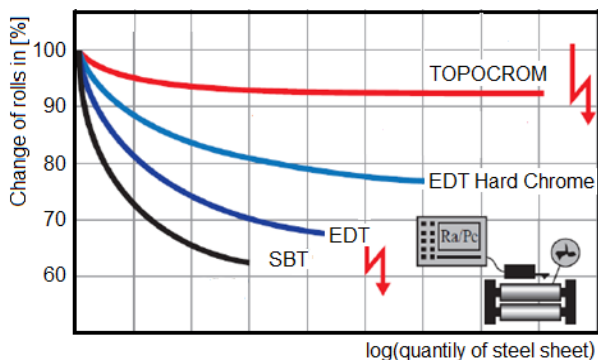
Plechov pre povrchové diely karosérie sa vyrábajú v špeciálnom režime na pozinkovacej linke, ktorý

zahŕňa zvýšenú vstupnú kontrolu pásu (čistoty, geometrie, povrchových defektov a pod.), rýchlosti žihania, parametrov pozinkovacej vane, parametrov valcovacej stolice a parametrov textúry dokončovacích valcov (drsnosti R_{AFR} a počtu vrcholčekov P_{CFR}). V priebehu dokončovacieho valcovania sa textúra dokončovacích valcov valcovacej stolice prenáša na povrch oceľového plechu. Prenos textúry z valcov na povrch plechu závisí v značnej miere od úberu valcovacej stolice, od textúry dokončovacích valcov a od ich opotrebovania - obr. 1 [3]. Cieľové hodnoty textúry plechov požadované jednotlivými automobilkami sú uvedené v tab. 1.

Tab. 1. Požiadavky na parametre drsnosti Ra a Pc povrchu plechov určených pre vonkajšie diely karosérie [4,5]

	R_{AFR} [μm]	P_{CFR} [cm^{-1}]	Tolerancia T_{SSRa} [μm]
Škoda Auto	1,1 ÷ 1,6	min. 40	0,5
Ford	1,1 ÷ 1,7	min. 50	0,6
VW	1,1 ÷ 1,6	min. 115	0,5

Požadované (cieľové) hodnoty textúry povrchu plechov nie je možné dosiahnuť valcovaním na valcovacích stoliciach s valcami mechanicky pieskovaným jemnozrnným granulátom (*SBT – Shot Blast Texturing*), pri ktorom sa vytvára stochastická textúra a ktorej tvorbu nie je možné riadiť. Z týchto dôvodov sa prešlo k aplikáciám deterministických systémov textúrovania: k elektroiskrovému textúrovaniu (*Electric Discharge Texturing EDT*), k textúrovaniu laserovým lúčom (*Laser Beam Texturing LBT*), k textúrovaniu elektrónovým lúčom (*Electron Beam Texturing EBT*) alebo metódou *Topocrom* (obr. 1) [4].



Obr. 1. Zmena drsnosti Ra valca valcovacej stolice [3]

Pri aplikácii elektroiskrového textúrovania je materiál uberaný prostredníctvom opakovaných výbojov, ktoré spôsobujú lokálne tavenie alebo odparenie materiálu z povrchu tepelne upraveného valca. Výsledná textúra pracovných valcov je závislá od veľkosti kráterov, resp. od odobraného množstva materiálu. Textúrovanie pracovných valcov laserovým lúčom umožňuje vytvorenie pravidelnej, pseudostochastickej textúry povrchu s prekrytím kráterov [5] a zvýšenou odolnosťou pracovných valcov oproti opotrebeniu [3]. Elektroiskrovým textúrovaním je možné vytvoriť širokú škálu drsnosti Ra_{FR} od $0,5 \mu\text{m}$ do $10 \mu\text{m}$ s počtom vrcholkov Pc_{FR} až do 150 cm^{-1} , s rovnomerným povrchom mikroreliefu, dobrou reprodukovateľnosťou povrchovej textúry pracovného valca a jej prenosom na povrch plechu [5, 6].

Textúrovanie elektrónovým lúčom ponúka veľký priestor pre vytváranie povrchov v širokom rozsahu parametrov Ra_{FR} . Avšak, získaná textúra nie je najvhodnejšia z hľadiska tribologických podmienok na kontaktných plochách lisovacieho nástroja, možno očakávať zhoršenie lisovateľnosti plechov [6]. Textúrovanie pracovných valcov technológiou *Topocrom* vytvára morfológiu povrchu s vylúčenými chrómovými pologuľovitými segmentami na povrchu pracovných valcov. Počet a rozmery pologuľovitých segmentov (drsnosť Ra_{FR} a počet vrcholkov Pc_{FR} textúry) je možné meniť v širokom rozsahu s malým rozptylom po celej dĺžke pracovného valca zmenou parametrov elektrolytického nanášania. Pracovné valce vyrobené

technológiou *Topocrom* sa vyznačujú vysokou životnosťou - obr. 1 [6].

Nastavovanie parametrov procesov *EDT*, *LBT*, *EBT* i *Topocrom* technikami pokus omyl je neefektívne. Vstupné parametre týchto procesov je možné optimalizovať pomocou plánovaného experimentu, ktorý umožňuje popísať vplyv jednotlivých faktorov a ich interakcií na výsledné charakteristiky (výstupy) resp. vzťah medzi príčinami a následkom. Získané optimalizované vstupné parametre umožňujú prijať účinné opatrenia pre riadenie textúry povrchu valcov [7-9].

1 NÁVRH ÚPLNÉHO PLÁNU EXPERIMENTU

Plán experimentu vychádza z požiadaviek spoločnosti Volkswagen na charakteristiky textúry povrchu plechov určených pre povrchové diely karosérie (tab. 1). Ak vychádzame z predpokladu, že textúra dokončovacích valcov valcovacej stolice sa prenáša na povrch oceľového plechu v priebehu valcovania za studena v závislosti od úberu a od opotrebenia valcov, resp. od množstva vyvalcovaných plechov, potom cieľové hodnoty charakteristík textúry povrchu plechov Ra_{FR} a Pc_{FR} je možné riadiť úberom na valcovacej stolici. Čím je väčší úber, tým je lepší prenos textúry z valca na povrch plechu. Napríklad, pri zmene úberu z $0,7 \%$ na $1,1 \%$ došlo k zlepšeniu prenosu textúry o 30 až 40% . Prenos textúry z valca na povrch plechu je limitovaný maximálnou možnou hodnotou úberu. Z obr. 1 vyplýva, že u valcov pripravených *EDT* v kombinácii s chrómovaním dochádza v dôsledku opotrebenia valcov k zhoršeniu prenosu drsnosti Ra_{FR} o cca 25% . Z tohto dôvodu bola stanovená stredná hodnota cieľovej drsnosti pracovných valcov ako $1,6$ -násobok hornej hodnoty drsnosti požadovanej automobilkou Volkswagen na povrchu plechu $Ra_{UCL,FR} = 1,6$. Teda, predpokladaná stredná hodnota cieľovej drsnosti dokončovacích valcov $Ra_{T,CL,FR} = 1,6 \cdot Ra_{UCL,FR} \approx 2,5 \mu\text{m}$. Dolná hranica cieľovej hodnoty drsnosti plánovaného experimentu bola stanovená v $2/3$ horného pásma maximálnej hodnoty drsnosti povrchu plechu, ktorá je požadovaná automobilkou Volkswagen [10], t.j. $Ra_{T,CL,FR} = Ra_{UCL,SS} - 1/3 \cdot T_{SS,Ra} = 1,53 \mu\text{m}$. Horná hranica cieľovej hodnoty drsnosti plánovaného experimentu bola navrhnutá $Ra_{UCL,FR} = 3,8 \mu\text{m}$ aj s uvažovaním tolerancie drsnosti pracovných valcov $T_{FR,Ra}$. Z tab. 1 vyplýva, že požadované hodnoty drsnosti plechov určených pre povrchové diely karosérie jednotlivými automobilkami sa pohybujú v intervale od $1,1 \mu\text{m}$ do $1,7 \mu\text{m}$, resp. tolerancia na drsnosť povrchu plechov určených pre povrchové diely karosérie $T_{SS,Ra} = \pm 0,25 \mu\text{m}$. Pre jednotlivé cieľové hodnoty drsnosti boli vypočítané

predpokladané počty vrcholkov P_{CFR} podľa vzťahu (3) [5]:

$$P_{CFR} = 12,9 \cdot Ra^2 - 102,9 \cdot Ra + 272 \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (1)$$

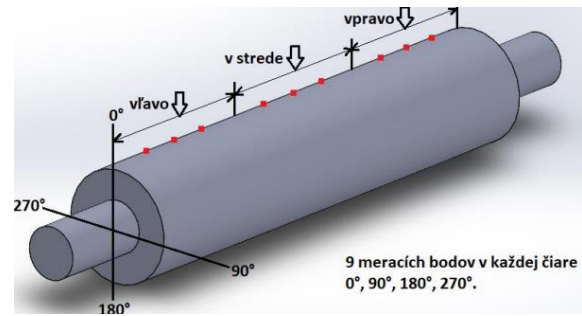
Podľa vzťahu (1) bude cieľovým hodnotám drsnosti dokončovacích valcov: $Ra_{T,FR1} = 1,538 \mu\text{m}$ odpovedať počet vrcholkov $P_{CT,FR1,\min} = 144 \text{ cm}^{-1}$, $Ra_{T,FR2} = 2,5 \mu\text{m}$ bude odpovedať počet vrcholkov $P_{CT,FR2,\min} = 94 \text{ cm}^{-1}$ a $Ra_{T,CUL} = 3,8 \mu\text{m}$ bude odpovedať počet vrcholkov $P_{CT,FR3,\min} = 67 \text{ cm}^{-1}$. Textúrovanie bolo vykonané na zariadení EDT 2100/4500 v olejovom dielektriku BP250 s 8 medenými elektródami pri troch rôznych úrovniach vstupných parametrov elektroiskrového textúrovania - tab. 2.

Tab. 2. Vstupné parametre procesu elektroiskrového textúrovania

	Úroveň		
	1.	2.	3.
Riadené faktory			
Textúrovací prúd I [A]	4	8	19
Dĺžka trvania impulzu Ont [μs]	4	14	29
Dĺžka technologickej pauzy $Offt$ [μs]	6	16	38
Dolná úroveň napätia U_{IL} [V]	5	10	15
Horná úroveň napätia U_{IH} [V]	8	20	35
Priemerná hodnota napätia $(U_{IL} + U_{IH})/2$ [V]	6,5	15	25
Priemer elektród D [mm]	8	8	8
Cieľové hodnoty drsnosti $Ra_{Ti,WR}$ [μm]	1,5	2,5	3,8
Cieľové hodnoty počtu vrcholov $P_{CTi,WR}$ [cm^{-1}]	140	92	62

Pozorovaniu bolo podrobených dvadsať dokončovacích valcov. V tab. 3 sú uvedené namerané hodnoty sledovaných charakteristík (odoziev) textúry povrchu dokončovacích valcov $Ra_{T,FR}$ a $P_{CT,FR}$ pri jednotlivých úrovniach parametrov EDT. Pre každú skupinu údajov bol vypočítaný aritmetický priemer skúmanej výstupnej charakteristiky $Ra_{T,FRi}$, resp. $P_{CT,FRi}$ a smerodajná odchýlka. Charakteristiky textúry dokončovacích valcov získané na troch úrovniach vstupných parametrov boli vyhodnocované drsnomerom Hommel Tester T 1 000 po dĺžke valcov na 9 miestach (na troch miestach na ľavom okraji valca, na troch miestach na pravom okraji valca a na troch miesta v strede valca) v línii pri otočení valca o 0° , o 90° , o 180° a o 270° v zmysle normy DIN EN ISO 12085 (obr. 2). Z opakovaných pokusov boli vypočítané priemerné hodnoty a smerodajné odchýlky sledovaných charakteristík textúry pre jednotlivé úrovne cieľových hodnôt plánovaných pokusov. Charakteristiky textúry boli skúmané na základe navrhnutého úplného faktorového plánu typu 24. pri variovaní nastavení vstupných parametrov Ip ,

Up , P_{Ont} , P_{Offt} (faktorov) EDT. Po spustení procesu sa vstupné parametre menili len na hornej a dolnej úrovni.



Obr. 2 Schéma meracích miest

Tab. 2. Namerané hodnoty cieľových drsnosti $Ra_{T,FRi}$ a počtu vrcholov $P_{CT,FRi}$ pri nastavení jednotlivých úrovni parametrov EDM

Číslo valca	Úroveň 1		Úroveň 2		Úroveň 3	
	$Ra_{T,FR1}$ [μm]	$P_{CT,FR1}$ [cm^{-1}]	$Ra_{T,FR2}$ [μm]	$P_{CT,FR2}$ [cm^{-1}]	$Ra_{T,FR3}$ [μm]	$P_{CT,FR3}$ [cm^{-1}]
1.	1,554	159	2,577	99	3,781	73
2.	1,493	159	2,453	106	3,844	74
3.	1,545	154	2,482	95	3,886	68
4.	1,563	145	2,537	100	3,866	69
5.	1,495	167	2,465	97	3,842	66
6.	1,498	157	2,484	98	3,823	66
7.	1,507	166	2,537	97	3,874	66
8.	1,495	154	2,465	100	3,847	70
9.	1,516	164	2,553	99	3,831	63
10.	1,578	147	2,541	101	3,852	65
11.	1,538	164	2,575	98	3,822	71
12.	1,564	166	2,623	109	3,813	68
13.	1,543	159	2,456	101	3,825	68
14.	1,557	153	2,577	99	3,816	65
15.	1,494	160	2,523	96	3,831	68
16.	1,573	148	2,563	95	3,842	90
AV	1,532	158	2,481	99	3,837	68
SD	$\pm 0,03$	± 7	$\pm 0,05$	± 3	$\pm 0,03$	± 3
CL	1,538	122	2,5	122	3,8	122
UCL	1,788	-	2,25	-	4,05	-
LCL	1,288	115	2,75	115	3,55	115
$C_{pk,UCL}$	2,78	-	1,67	-	2,78	-
$C_{pk,LCL}$	2,78	2,05	1,67	-0,76	2,78	-2,24
CL	1,538	97	2,5	97	3,8	97
UCL	1,788	-	2,25	-	4,05	-
LCL	1,288	70	2,75	70	3,55	70
$C_{pk,UCL}$	2,78	-	1,67	-	2,78	-
$C_{pk,LCL}$	2,78	4,19	1,67	1,38	2,78	-0,10

2 ANALÝZA DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV

Z vypočítaných priemerných hodnôt s cieľovými hodnotami drsnosti $Ra_{T,FR1} = 1,5358 \mu\text{m}$, $Ra_{T,FR2} = 2,5 \mu\text{m}$ a $Ra_{T,FR3} = 3,8 \mu\text{m}$ boli vytvorené regulačné diagramy - obr. 3 a 4. V regulačných diagramoch boli vyznačené centrálné priamky (*Central line* CL_{Ra}), ktorých hodnoty sú rovné cieľovým hodnotám analyzovaných charakteristík $Ra_{T,FRi}$ a $PC_{T,FRi}$ pre jednotlivé úrovne rozsahov. Následne boli vyznačené regulačné medze, t. j. dolná regulačná medza (LCL_{Ra} - *Lower Control Limit*) a horná regulačná medza (UCL_{Ra} *Upper Control Limit*), ktorých hodnoty boli vypočítané z cieľových hodnôt sledovaných charakteristík textúry pracovných valcov a ich tolerancií - obr. 3 a obr. 4. Pri stanovení regulačných medzi LCL_{Ra} a UCL_{Ra} sme vychádzali predpokladu, že textúra dokončovacích valcov sa prenáša na povrch oceľového plechu v priebehu valcovania za studena v závislosti od úberu a od množstva odvalcovaných plechov (opotrebenia pracovných valcov).

$$T_{SS,Ra} = T_{T,FR,Ra} = \pm 0,25 \mu\text{m}, \quad (2)$$

potom:

$$UCL_{Ra} = Ra_{T,FRi} + T_{SS,Ra} / 2 \quad (3)$$

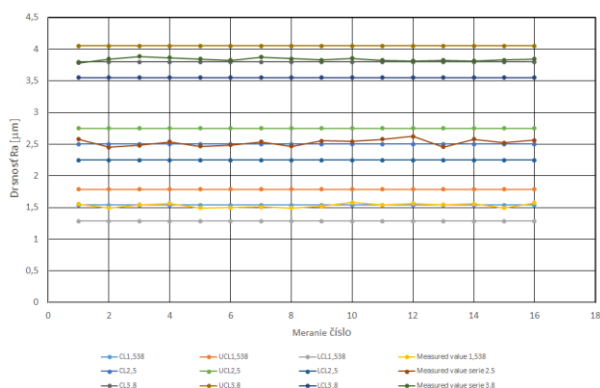
$$LCL_{Ra} = Ra_{T,FRi} - T_{SS,Ra} / 2 \quad (4)$$

a index spôsobilosti procesu *EDT*:

$$C_{pkUCL} = \frac{UCL - \bar{y}}{3T_{FR} / 2} \quad (5)$$

$$C_{pkLCL} = \frac{\bar{y} - LCL}{3T_{FR} / 2} \quad (6)$$

kde \bar{y} je priemerná hodnota sledovaných výstupných charakteristík $Ra_{T,FRi}$ a $PC_{T,FRi}$ v jednotlivých skupinách [10].



Obr. 3. Regulačný diagram pre cieľové hodnoty drsnosti $Ra_{T,FRi}$

Z obr. 2 vyplýva, že hodnoty z drsnosti valcov 1 až 16 s hodnotami drsnosti $Ra_{T,FRi}$ sa nachádzajú v prvom pásme (1/3 tolerancie) regulačných hraníc. Vypočítané hodnoty C_{pk} vo všetkých troch prípadoch boli väčšie ako 1,33. To znamená, že aplikované

pracovné postupy *EDT* v jednotlivých cieľových skupinách sú spôsobilé opakovane dosahovať požadované cieľové hodnoty drsnosti $Ra_{T,FRi}$.

Podobne v regulačnom diagrame sa vyznačí minimálna hodnota špecifikovanej výstupnej charakteristiky počtu vrcholčekov - obr. 4.

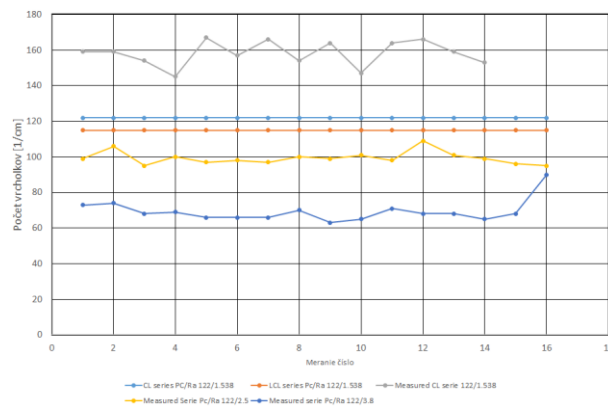
$$LCL_{Pc} = Pc_{SS,min} \quad (7)$$

Poloha centrálny priamky v regulačnom diagrame bola – obr. 3.

$$CL_{Pc,min} = LCL_{Pc} + SD_{Pc,max} \quad (8)$$

kde T_{Pc} je tolerancia počtu vrcholčekov $T_{Pc} = SD_{Pc,max} = 7 \text{ cm}^{-1}$.

Z obr. 4 vyplýva, že proces textúrovania valcov by mal byť spôsobilý opakovane vytvoriť textúru s cieľovou hodnotou s $PC_{T,FR1,min} = 122 \text{ cm}^{-1}$ ($PC_{T,FR,min} = 115 + 7 = 122 \text{ cm}^{-1}$) požiadavka spoločnosti Volkswagen). Pretože namerané hodnoty počtu vrcholčekov sú nad dolnou hranicou LCL_{PC} a index spôsobilosti procesu je väčší ako 1,33 - tab. 3. Počty vrcholčekov pre tieto cieľové hodnoty drsnosti sa nachádzajú pod dolnou hranicou požadovaného minimálneho počtu vrcholčekov a indexy spôsobilosti C_{pkPC} sú menšie ako 1,33 - tab. 3. To znamená, že proces textúrovania pracovných valcov s cieľovými hodnotami $Ra_{T,FR2} = 2,5 \mu\text{m}$ a $Ra_{T,FR3} = 3,8 \mu\text{m}$ nie je spôsobilý opakovane dosahovať textúru s počtom vrcholčekov väčším ako 122 cm^{-1} . Pri nastavení parametrov procesu *EDT* dokončovacích valcov uvedených v tab. 2 je možné predpokladať, že pre požadované hodnoty $Ra_{T,FR} = 2,5 \mu\text{m}$ a $Ra_{T,FR} = 3,8 \mu\text{m}$ by bolo možné splniť aj požiadavky spoločnosti Ford a Škoda ($PC_{T,FR,min} = 50 + 7 = 57 \text{ cm}^{-1}$). Pri cieľových hodnotách drsnosti v rozmedzí od $1,538 \mu\text{m}$ do $3,5 \mu\text{m}$ a minimálnom počte vrcholčekov väčšom ako 57 je index spôsobilosti $C_{pkPC} > 1,33$ - tab. 3.



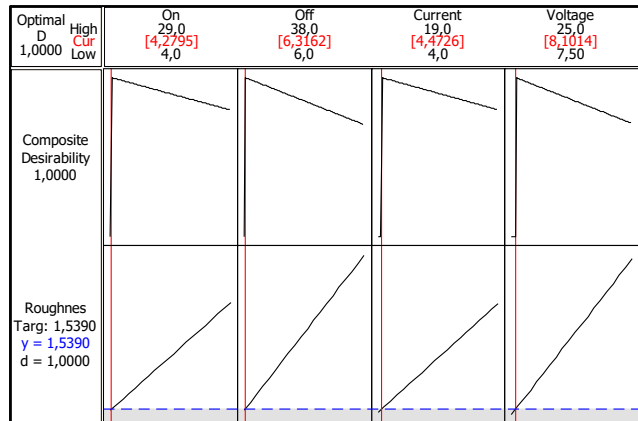
Obr. 1. Regulačný diagram minimálneho počtu vrcholčekov Pc_{min}

Na základe vyššie uvedených výsledkov bol ďalší výskum zameraný na hľadanie nastavenia vstupných parametrov, ktoré by umožňovali dosiahnuť hodnoty Ra_{FRi} v rozmedzí od $1,538 \mu\text{m}$ do $3,5 \mu\text{m}$ a súčasne s počtom vrcholčekov $PC_{FR1,min}$ väčším ako $> 122 \text{ cm}^{-1}$

alebo $P_{CFR2.min}$ väčším ako $> 57 \text{ cm}^{-1}$. Za účelom dosiahnutia tohto zámeru boli výsledky analyzované pomocou úplného faktorového experimentu 24 s využitím matematicko-štatistických metód v prostredí *Minitabu* 16.

3 OPTIMALIZÁCIA PROCESU

Optimálne hodnoty vstupných parametrov *EDT* pre dosiahnutie cieľových hodnôt drsnosti $Ra_{T,FRi}$ v rozmedzí od $1,538 \text{ }\mu\text{m}$ do $3,5 \text{ }\mu\text{m}$ a minimálneho počtu vrcholkov $P_{CT,FR1.min} > 122 \text{ cm}^{-1}$ (požiadavka automobilky *Volkswagen*) alebo minimálneho počtu vrcholkov $P_{CT,FR2.min} > 57 \text{ cm}^{-1}$ (požiadavka automobiliek *Ford* a *Škoda Auto*) boli stanovené metódou odozvy plôch. Tieto dve výstupné charakteristiky $Ra_{T,FRi}$ a $P_{CT,FRi.min}$ povrchu dokončovacích valcov majú protichodnú tendenciu. Pri optimalizácii bola priorita daná na dosiahnutie cieľových hodnôt $Ra_{T,FR1} = 1,538 \text{ }\mu\text{m}$, $Ra_{T,FR2} = 2,5 \text{ }\mu\text{m}$ a $Ra_{T,FR3} = 3,5 \text{ }\mu\text{m}$. Na vstupe boli definované cieľové hodnoty drsnosti $Ra_{T,FRi}$, ich spodné, horné úrovne hodnôt, váhy, dôležitosť, na základe týchto vstupných údajov boli vypočítané optimalizované hodnoty vstupných parametrov: P_{Oni} , P_{Offi} , I_P a U_P procesu *EDT* dokončovacích valcov. Výsledky optimalizácie odoziev vstupných parametrov pre požadované cieľové hodnoty drsnosti $Ra_{T,FRi} = 1,539$ sú uvedené v obr. 5.



Obr. 5. Optimalizácia vstupných parametrov *EDT* pre dosiahnutie cieľovej hodnoty drsnosti $Ra_{T,FR1} = 1,539 \text{ }\mu\text{m}$

Z tab. 4 a obr. 5 vyplýva, že pri kombinácii optimalizovaných parametrov ($P_{Oni} = 4,47 \text{ }\mu\text{s}$, $P_{Offi} = 6,31 \text{ }\mu\text{s}$, $I_P = 4,47 \text{ A}$ a $U_P = 8,1 \text{ V}$) *EDT* boli dosiahnuté požadované cieľové hodnoty drsnosti $Ra_{T,FRi} = 1,539 \text{ }\mu\text{m}$. Celková združená vhodnosť (composite desirability) v prípade použitia *RSM* pre predikciu odozvy (predicted responses), resp. cieľovej hodnoty drsnosti bola na úrovni 1. Teda, odozva (Ra_{T1}) dosiahla ideálny stav – je v akceptovateľnom intervale a minimálny počet vrcholkov $P_{CT,FR1} = 156 \text{ cm}^{-1}$.

Tab. 4. Vstupné a výstupné parametre *EDT* pre cieľovú hodnotu drsnosti $Ra_{T1} = 1,539$

Parameters of roughness			Weight	Import		
Lower	Target	Upper				
1,538	1,539	3,714	1	1		
Starting point parameters of EDT						
On	Off	Current I	Voltage U			
4	6	4	7,5			
Global Solution				Predicted Responses		
On	Off	Current I	Voltage U	Roughness Ra [μm]	Peak Count Pc cm^{-1}	Peak Count Pc cm^{-1}
4,29	6,32	4,47	8,1	1,539	159	156
Process capability indices $C_{pk,UCL}$				2,77		
Process capability indices $C_{pk,LCL}$					2.1	1,95

ZÁVER

Optimálne hodnoty parametrov vstupných parametrov I_P , U_P , P_{Oni} a P_{Offi} boli stanovené metódou *RSM*. Na základe verifikácie výsledkov *RSM* je možné konštatovať, že boli dosiahnuté optimálne hodnoty cieľových charakteristík drsnosti: $Ra_{T,FR} = 1,539 \text{ }\mu\text{m}$ a súčasne požadované minimálne úrovne hodnôt $P_{CT,FR,min} = 156 \text{ cm}^{-1}$ pri nastavení prúdu $I_P = 4,47 \text{ A}$, $U_P = 8,1 \text{ V}$, $P_{Oni} = 4,29 \text{ }\mu\text{s}$, $P_{Offi} = 6,32 \text{ }\mu\text{s}$. Z dosiahnutých výsledkov ďalej vyplýva, že

so zväčšovaním drsnosti Ra_{FR} bol zaznamenaný pokles počtu vrcholkov P_{CFR} a dobrá korelácia medzi týmito charakteristikami textúry valcov. Získaný súbor vstupných parametrov je možné použiť na optimalizáciu ďalších výstupných charakteristík procesu *EDT*, ako sú náklady a tiež môže tvoriť základ pre návrh stratégií adaptívneho riadenia procesov *EDT* pracovných valcov.

Pod'akovanie

Výskum bol financovaný Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva Slovenskej republiky v rámci projektu VEGA 2/0800/19.

LITERATÚRA

- [1] BATALHA, D.F. - STIPKOVIC, M. - FILHO, M. (2001): *Quantitative characterization of the surface topography of coldrolled sheets new approaches and possibilities*. Journal of Materials Processing Technology. 113. pp. 732- 738.
- [2] HONG, M.H. - TARK, H.J. - PARK, J.S. (2012): *Improvement of surface texture on the hot dip galvanized and galvanized steel sheets*. La Metallurgia Italiana. 6. pp. 6-13.
- [3] GROCHEA, P. - CALLIESB, T. (2005): *Tribology in Sheet Metal Forming with Regard to Challenges in Lightweight Construction*. Advanced Materials Research. 6-8. pp. 93-100.
- [4] EVIN, E. - KMEC, J. - FECHOVÁ, E. (2003): *Optimizing of electric discharge texturing parameters of rolls of the rolling mill of steel sheets*. Applied Mechanics and Materials. 420. pp. 78-84.
- [5] TERPÁK, L'. - DORČÁK, J. - REVAJ, J. (2010): *Quality Control of the Electro-Discharge Texturing*. Metalurgiaja. 1. pp.19-22.

- [6] GORBUNOV, A.V. - BELOV, V. - BEGLETSOV, D.O. (2009): *Texturing of rollers for the production of auto-industry sheet*. Steel in Translation. 39/8. pp. 696-699.
- [7] WARRENDER, T.E. - ASPINWAL, T.S. - DEWES, D.K. - SIMAO, R.C. - ASPINWAL, E.M. - SCAMANS, G. (2003): *Difficulties in characterising roll surfaces*. Transactions on Engineering Sciences. 44. pp. 56-64.
- [8] JABER, E.A.Q. - AHMAD, S. - AIMAN, Y. - ABDEL-HAMID, I.M. - HAIDER, M.A. - ELKASEER, A. (2019): *Advanced Electric Discharge Machining of Stainless Steels: Assessment of the State of the Art. Gaps and Future Prospect*. Materials. 12. pp. 907.
- [9] ISHFAQ, K. - AHMAD, N. - JAWAD, M. - ALI, M.A. - AL-AHMARI, A. M. (2019): *Evaluating Material's Interaction in Wire Electrical Discharge Machining of Stainless Steel (304) for Simultaneous Optimization of Conflicting Responses*. Materials. 12. pp. 1940.
- [10] KHAN, R.M. (2013): *Problem solving and data analysis using minitab: A clear and easy guide to six sigma methodology (1st ed.)*. West Sussex. United Kingdom: Wiley. ISBN 978-1-118-30757-1.

Hydrodynamické podmienky prúdenia skloviny

Ján Moravec, doc. Ing., PhD.*

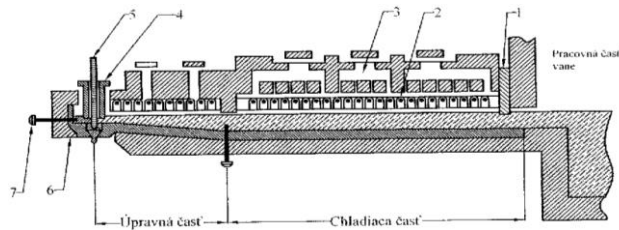
Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: jan.moravec@fstroj.uniza.sk

Hydrodynamic conditions of glass flow

Abstract: The issue of the conditions and suitability of the supply of glass to the dispenser head can be precisely solved only with the use of knowledge of fluid mechanics. The paper presents the used calculation methods of finite parameters and also makes their mutual comparison in terms of suitability of the solution.

ÚVOD

Žľab dávkovača slúži na dopravu skloviny z pracovnej časti taviaceho agregátu do hlavy dávkovača na vytváranie kvapky, a to pri jej súčasnej tepelnej úprave a zachovaní tepelnej homogenity. Žľab sa skladá z chladiacej a úpravnej časti. Z pracovnej časti taviaceho agregátu prichádza do žľabu sklovina teplejšia, než ako je žiadaná teplota kvapky. Sklovinu je preto potrebné vopred ochladiť, čo sa robí v chladiacej časti žľabu. Najšetnejší spôsob znižovania teploty je rovnomerný pokles teploty prirodzeným chladnutím skloviny pri jej prietoku žľabom. Dávkovač však musí vyhovovať aj pri odlišných odberoch skloviny, kedy je aj rýchlosť prúdenia v žľabe rozdielna. Preto je chladiaca časť žľabu vybavená chladiacim a takisto tiež vykurovacím systémom.



Obr. 1. Pozdĺžny rez žľabom a hlavou dávkovača: 1 - hrádzový kameň, 2 - horáky, 3 - odťahové cesty, 4 - rúrka, 5 - plunžer, 6 - hlava dávkovača, 7 - ponorné termočlánky

1 TOK SKLOVINY

Problematikou toku skloviny žľabmi dávkovačov a návrhmi ich rozmerov sa zaoberá mnoho autorov [1-9]. Bežne používaný vzorec pre výpočet je:

$$\frac{Q \cdot (t_1 - t_2) \cdot \log \frac{z_2}{z_1}}{l \cdot \lambda \cdot b \cdot \delta \cdot \Delta t} = K, \quad (1)$$

kde Q - odber skloviny [$\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$],

T_1 - teplota pri vstupe dávkovača [$^{\circ}\text{C}$],

T_2 - teplota kvapky [$^{\circ}\text{C}$],

λ - tepelná vodivosť žiarového materiálu [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

h - výška skloviny [m],

δ - šírka žľabu [m],

Δt - teplotný spád v stranách [$^{\circ}\text{C}$],

$\frac{z_2}{z_1}$ - pomer vnútorného a vonkajšieho obvodu

výmurovky v priečnom reze,

l - dĺžka žľabu [m],

$K = 1,4$ - biele obalové sklo, $K = 2,1$ - zelené hlinité obalové sklo.

Holub [6] uvádza výpočet profilu žľabu so zakrytou aj voľnou hladinou. Pri výpočte vychádza zo všeobecného vzťahu pre výpočet prietoku pravouhlým profilom:

$$v = u \cdot \delta \cdot h, \quad (2)$$

kde u - stredná objemová rýchlosť [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

δ - šírka kanálu [m],

h - hĺbka skloviny [m],

v - objemový prietok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$].

Stredná objemová hmotnosť sa určuje zo vzťahu:

$$u = \frac{2 \cdot D_e \cdot e^2 \cdot q \cdot \rho \cdot \sin \beta}{\eta \cdot f(c)}, \quad (3)$$

kde $f(c)$:

$$f(c) = \left[\frac{96}{(1+c)^2} \right] \cdot \left[\frac{1}{1 - (0,63 \cdot c) + (0,012 \cdot c^5)} \right], \quad (4)$$

kde $c = \frac{h}{\delta}$.

Funkcia $f(c)$ platí v rozsahu $0 < c < 1$.

Vo vzťahoch znamená: D_e - redukovaný priemer [m],

ρ - merná hmotnosť [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], η - dynamická viskozita

[kg·m⁻¹·s⁻¹], g - gravitačné zrýchlenie [m·s⁻²], β - uhol sklonu žľabu.

Pri výpočte sa volia hodnoty h a β a pre predpokladanú viskozitu sa vypočíta \bar{u} .

Tento vzťah sa však nemôže použiť pre výpočet žľabu s nulovým sklonom, lebo vzťah (3) pre výpočet \bar{u} stráca význam ($\sin(0) = 0$).

1.1 Stanovenie tvarového súčiniteľa pravouhlých prietokových profilov

Podľa geometrie sa rozoznávajú:

- Prietokové profily, ktorých celkový objem je zmáčaný kvapalinou a označuje sa ako profil s napätou hladinou.
- Prietokové profily, pri ktorých je povrch kvapaliny voľný a označujú sa ako profily s voľnou hladinou [2-4, 6].

Pri profiloch s napätou hladinou možno vyjadriť hydrodynamické podmienky:

- Hagen-Poiseuillovým zákonom:

$$Q = \frac{\pi \cdot d_r^4 \cdot \Delta p}{2 \cdot A \cdot \eta \cdot l}, \quad (5)$$

v ktorom je charakteristický rozmer prietokového prierezu vyjadrený tzv. redukovaným (ekvivalentným, hydraulickým) priemerom d (6):

$$d_r = \frac{4 \cdot P}{o}. \quad (6)$$

Hodnota koeficientu A závisí od tvaru prietokového profilu a pre kruhový má analyticky odvodenú hodnotu $A = 64$ a pre niektoré iné udáva hodnoty uvedené v tab. 1.

Tab. 1. Hodnoty koeficientu A

Profil	d_r	A
Kruh Oa	a	64
Štvorec so stranou a	a	57
Obdĺžnik $a = 2 \cdot b$	$\frac{a}{1,5}$	62
Medzikružie so šírkou a	$2 \cdot a$	96

Vzorec:

$$Q = \frac{k \cdot a^2 \cdot b^2 \cdot \Delta p}{4 \cdot \eta \cdot l}. \quad (7)$$

platí pre pravouhlé prierezy (štvorec, obdĺžnik). V tomto vzorci sú vyjadrené skutočné rozmery profilu, t. j. šírka a , výška b .

Vzorec:

$$Q = \frac{C \cdot a \cdot b^3 \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot l}. \quad (8)$$

ktorý bol odvodený na základe analógie s úzkym medzikružím.

Pre veľmi úzku štrbinu je uvedená hodnota $C = \frac{2}{3}$.

Uvedené vzťahy sú podobného typu, majú však rôznym spôsobom vyjadrené charakteristické rozmery prietokových prierezo. Z tohto dôvodu majú tvarové koeficienty (A , K , C) pre rovnaké prietokové prierezy rôzne číselné hodnoty. Vzťahy medzi jednotlivými konštantami a charakteristickými rozmermi plynú z rovností:

$$Q = \frac{\pi \cdot d_r^4 \cdot p}{2 \cdot A \cdot \eta \cdot l} = \frac{C \cdot a \cdot b^3 \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot l} = \frac{k \cdot a^2 \cdot b^2 \cdot \Delta p}{4 \cdot \eta \cdot l}, \quad (9)$$

teda:

$$A = \frac{2 \cdot \pi \cdot d_r^4}{k \cdot a^2 \cdot b^2}, \quad (10)$$

$$k = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \frac{b}{a}. \quad (11)$$

S prihliadnutím k uvedeným prepočtovým vzťahom sa došlo k poznatku, že uvedené hodnoty A sú v rozpore s hodnotami A vypočítanými pri rovnakých prierezoch pomocou vzťahu.

Z týchto dôvodov sa robil modelový výskum s cieľom stanoviť vplyv pomerov strán prietokového profilu pri laminárnom prúde na hodnoty koeficientov A , K , C a tým umožniť spoľahlivý výpočet hydrodynamických strát žľabov dávkovačov s napätou hladinou.

Štatistickým spracovaním výsledkov merania na modeli bola určená závislosť K od pomeru $\frac{b}{c}$:

$$K = 1,0498 - \left(0,24 \cdot \frac{b}{2}\right) - \left(\frac{1,8423}{\frac{b}{a} + 1,7376}\right). \quad (12)$$

Pre žľaby dávkovačov s voľnou hladinou bola určená závislosť poklesu hladiny v závislosti od odľahlosti, rozmeroch žľabu a viskozite:

$$H_2 = \sqrt[3]{H_o - \left(\frac{54,6 \cdot Q \cdot L \cdot \gamma}{q \cdot B^2}\right)}, \quad (13)$$

kde H_o - začiatková výška hladiny [m],

H_L - výška hladiny vo vzdialenosti L [m],

Q - objemový prietok [m³·s⁻¹],

L - vzdialenosť [m],

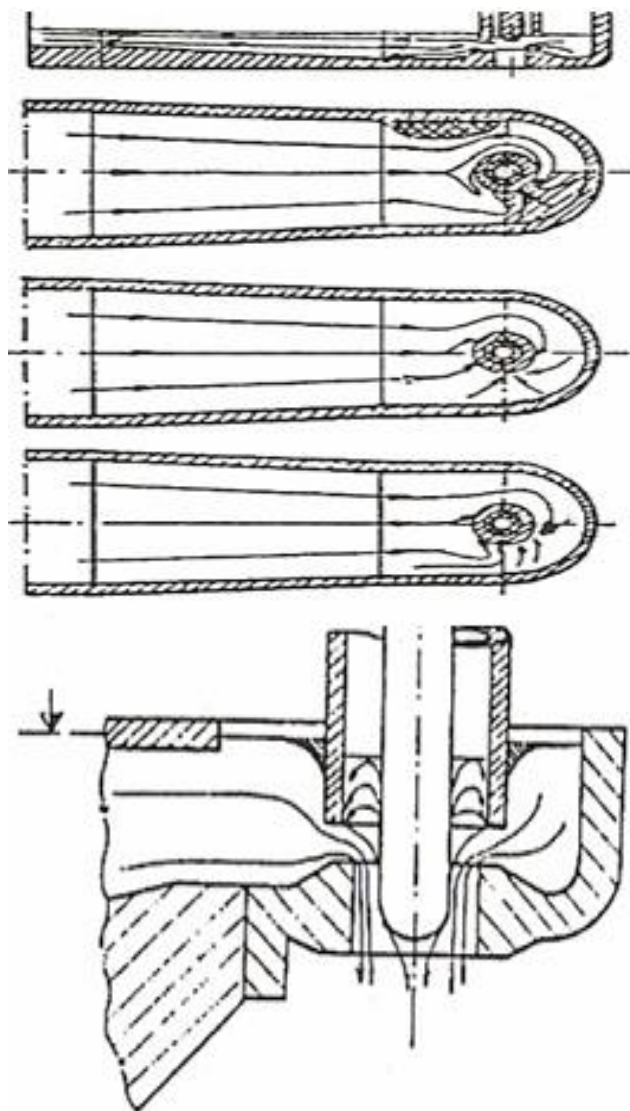
B - šírka žľabu [m],

γ - kinematická viskozita [m²·s⁻¹].

Pomocou uvedených vzťahov sa dá určiť požadovaný prietokový profil tak, aby hydrodynamická strata neprevýšila predpísanú hodnotu [5-14].

2 PRÚDENIE SKLOVINY V DÁVKOVAČI

Charakteristické prúdenie skloviny v žľabe dávkovača a v hlave dávkovača je na obr. 2.



Obr. 2. Oblasti stagnácie skloviny (hore), prúdenie v upravenej v hlave dávkovača homogenizačnej rúrky (dole)

Vyšrafovanými plochami sú vyznačené oblasti stagnácie skloviny, ktoré sú zdrojom šlír¹.

Hlava dávkovača je spravidla vybavená homogenizačnou rúrkou a piestom. Napriek tomu, že sa hovorí o homogenizačnej rúrke, táto môže byť zdrojom ďalších šlír, ako je zrejme z obr. 2. Vplyvom odberu a rotácie homogenizačnej rúrky sa sklovina dostáva po špirále k homogenizačnej rúrke, kde sa ponára. Sklovina z povrchových vrstiev sa ponára pozdĺž vnútorných stien homogenizačnej rúrky. Časť tejto skloviny ide priamo do odberového prúdu a časť je zo spodnej hrany homogenizačnej rúrky vťahovaná piestom do priestoru homogenizačnej rúrky.

Pretože pohyb piesta dolu je podstatne rýchlejší ako nahor, sklovina nestačí sledovať tento pohyb a

dochádza k čerpaniu skloviny do priestoru homogenizačnej rúrky. V homogenizačnej rúrke sa uzavrie cirkulačný okruh s dlhou dobou výmeny skloviny. Doba výplachu medzikružia piest - homogenizačná rúrka je cca 4 ÷ 5 h. Táto doba je dostatočne dlhá, aby v povrchových vrstvách došlo ku zmene chemického zloženia, ktoré sa vo výrobku prejaví ako šlíra, najmä pri sklovine obsahujúcej ľahko tekuté zložky, ako je B_2O_3 , PbO atď. Pri dávkovaní skloviny typu *Simax* bol priestor homogenizačnej rúrky identifikovaný ako hlavný zdroj nehomogenít.

Napriek jej nepriaznivému vplyvu ju nemožno z hlavy dávkovača odstrániť, lebo zaisťuje teplotnú homogenitu skloviny pred dávkovaním a ďalej pôsobí ako regulačný člen hmotnosti kvapky.

Ďalší nepriaznivý efekt, ktorý sa objavuje v homogenizačnej rúrke je pokles hladiny skloviny vo vnútri rúrky. Tento pokles v prípade nesprávneho riadenia dávkovania môže dosiahnuť také hodnoty, že dôjde k vysúvaniu hrotu piestu zo skloviny, čo má za následok tzv. *piestové bubliny*.

Pre pokles hladiny v homogenizačnej rúrke bol vyvedený z modelových meraní nasledujúci vzťah:

$$h = 26,6 \cdot \left(\frac{z}{d}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{Q \cdot \gamma \cdot l}{g \cdot z}, \quad (13)$$

kde Q - objemový prietok [$m^3 \cdot s^{-1}$],

z - zdvih homogenizačnej rúrky [m],

D - vnútorný priemer homogenizačnej rúrky [m],

g - gravitačné zrýchlenie [$m \cdot s^{-2}$],

l - sila steny homogenizačnej rúrky [m],

γ - kinematická viskozita [$m^2 \cdot s^{-1}$].

Uvedený vzťah možno použiť na kontrolu nastavenia homogenizačnej rúrky [6, 9].

ZÁVER

Problematika spracovania skla je integrálnou časťou technológie tvárnenia a preto prezentovaný príspevok vhodne zapadá do obrovského spektra tejto perspektívnej technológie, ktorá i v tomto storočí bude nenahraditeľnou súčasťou výrobného procesu najmä v oblasti spotrebného priemyslu.

LITERATÚRA

[1] KUČERA, J. (1998): *Hydrodynamika hlavy dávkovače*. Hradec Králové.

[2] SÚKUP, J. (2007): *Hydromechanika*. Žilina EDIS, vyd. ŽU v Žiline

¹Šlíry, z nem. *Schlieren* sú optické nehomogenity v priehľadných médiách, ktoré nie sú pre ľudské oko nevyhnutne viditeľné.

- [3] SMRČEK, A. (1989): *Teorie tvarování skla*. Teplice.
- [4] ŠUB, F. (2008): *Hydromechanika*. CERM.
- [5] MACHÝČKOVÁ, V. (1983): *Homogenizace skloviny v hlavě dávkovače*. Rešerše R 527 SVUS Hradec Králové.
- [6] KŘÍŽ, M. - MAJERHÖFER, F. (1983): *Dávkování skloviny*. Hutní sklářska příručka, SNTL Praha.
- [7] HOLUB, P. a kol. (1987): *Metoda výpočtu profilu žlebu dávkovače skla a keramik*. 27/7/87.
- [8] EDGINTON, J. H. (1984): *How the glass coufainer industry, can improve its profitability*. Glass industry 4/1984, pp. 1–8.
- [9] SMRČEK, A. (1981): *Strojní tvarování skla*. SNTL Praha.
- [10] PETRÁŠOVÁ, H. a kol. (1986): *Technológia skla*. Bratislava ALFA.
- [11] BOURA, J. (2022): *Výroba skla a jeho druhy*. Dostupné na: <https://prezi.com/iflortnywcsx/vyroba-skla-a-jeho-druhy/>.
- [12] POPOVIČ, Š. (2009): *Výroba a zpracování plochého skla*. Grada, ISBN 978-80-0247-3154-4.
- [13] MENČÍK, J. (2019): *Teoretické základy procesů tvarování skla*. Univerzita Pardubice, ISBN 978-80-7560-270-1.
- [14] SCHILL, F. (1995): *Chlazení skla*. Informatorium Praha.

Stavivá pre trvalú výmurovku liacich a nalievacích paniev

Ján Derd'ák, Ing.

Dáša Chudíková, Ing., PhD.*

Radomír Šimko, Ing.

Viera Mišaneková, Ing.

Rastislav Hirjak, Ing., PhD.

Eduard Sikora, Mgr.

Martin Piroško, Ing.

Marcel Baba, Bc.

Miroslav Kotorá, Ing.

Rastislav Kamenský, Ing.

RMS Košice s.r.o.,

Vstupný areál U. S. Steel, 04454, Košice – Šaca.

E-mail: dchudikova@rms-kosice.sk, Tel.: +421 55 673 8599

Bricks for permanent lining of hot metal and steel ladles

Abstract: In the hot metal and steel production the thermal equipment used for their production is essential with respect to the associated costs. The lining of torpedoes, blast oxygen furnaces, hot metal and steel ladles must withstand challenging manufacturing conditions. The working lining, that gets in contact with hot metal, wears out since it is affected by molten metal. The permanent lining on the other hand fulfills the safety and insulation function. The permanent lining is supposed to collect molten metal if the working lining is worn out and keep the metal temperature on the level of processing. When emptying a ladle, the lining protective layer (scab) is created if the temperature on the working lining surface is lower than the metal melting temperature. When designing the lining composition, the emphasis is given to material properties, as well as to its life time at the lowest costs per ton of steel. The paper evaluates permanent linings of metallurgical aggregates based on their thermal shock resistance and level of penetration into the brick volume.

ÚVOD

Sekundárna metalurgia je vysoko energeticky náročný krok v procese výroby ocele, pretože vyžaduje presné zladenie zloženia a teploty roztaveného kovu počas rafinácie ocele v panve. V tejto súvislosti zohráva výmurovka tepelného agregátu dôležitú úlohu pri spotrebe energie v procese, pretože vlastností žiaromateriálu úzko súvisia so schopnosťou agregátu udržiavať konštantnú teplotu roztaveného kovu. S cieľom zlepšiť životnosť trvalej výmurovky, jej energetickú účinnosť a znížiť náklady sa zvažili a preskúmali materiály rôznej surovínovej bázy. Predmetom skúmania boli trvalé výmurovky liacích a nalievacích paniev. Vysokoteplotné procesy prebiehajúce

v týchto agregátoch sú diskontinuálne, čo znamená, že v priebehu výroby ocele a železa je výmurovka opakovane nahrievaná a ochladzovaná. Pokiaľ má žiaruvzdorná výmurovka plniť všetky potrebné funkcie (bezpečnostnú a izolačnú) je potrebné brať do úvahy fyzikálne a chemické parametre žiaruvzdorného materiálu. Prednáška sa zaoberá štúdiom trvalej výmurovky na báze magnézie, bauxitu a lupku.

1 TRVALÁ VÝMUROVKA LIACEJ PANVY

Liaca panva je nádoba tvaru zrezaného kužela. V hornej časti obvodu sú z vonkajšej strany navarené dva čapy, ktoré slúžia na dopravu panvy pomocou

žeriavu. Liace panvy boli pôvodne používané ako transportné nádoby pri odlievaní ocele. V súčasnosti sa v modernej oceliarni stáva zariadením, v ktorom sa vykonávajú finálne metalurgické operácie, tzv. panvová metalurgia. Zavedením prevádzky plynulého odlievania ocele sa zmenili podmienky pôsobenia ocele na výmurovku, zvýšila sa teplota ocele a predĺžila doba zotrvania ocele v panve. Trendom vo výmurovkách tepelných agregátov je používať stavivá, ktoré odolávajú tekutému kovu. Z toho dôvodu sa s obľubou používajú stavivá na báze pálenej magnézie a bauxitu. Na obr. 1 je zobrazená časť výmurovky liacej panvy v oblasti troskovej čiary používanej v *U. S. Steel Košice, s.r.o.* Trvalá výmurovka pozostáva z izolačných dosiek, šamotových stavív *KOSAM SD* a vysokohlinitých stavív *ALKO 70 B* v oblasti steny, *ALKO 80 B* v oblasti troskovej čiary. V oblasti troskovej čiary sa používalo aj stavivo *KOMAG KK* na báze pálenej magnézie, no od jeho používania sa v priebehu skúmania nákladov a životností ustúpilo.



Obr. 1. Výmurovka liacej panvy v oblasti troskovej čiary

Tab. 1. Fyzikálne a chemické vlastnosti porovnávaných kvalít

Kvalita	Fyzikálne parametre					Chemické parametre			
	<i>OH</i>	<i>PTL</i>	<i>ZP</i>	<i>TDZ</i>	<i>ÚvŽ</i> ($t_{0,5}$)	<i>MgO</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>Al₂O₃</i>
<i>KOMAG SK</i>	min. 2800	min. 40	max. 20	1400 °C/5 hod, typ ±0,1	typ. > 1700	min. 95	max. 1	typ. 1,4	-
<i>KOMAG KK 90</i>	min. 2800	min. 40	max. 20	1400 °C/5 hod, typ ±0,1	typ. > 1600	min. 95	max. 1	typ. 1,3	typ. 5
<i>ALKO 70 B</i>	min. 2250	min. 30	max. 25	1400 °C/5 hod, typ. 1	typ. > 1450	-	max. 2,5	-	typ. 67
<i>ALKO 80 B</i>	min. 2650	typ. 45	typ. 22	1500 °C/2 hod, typ. ±0,5	typ. > 1580	-	max. 1,8	-	min. 80

Pálené stavivá *KOMAG KK* sú na báze čistej mŕtvopálenej magnézie s keramikou väzbou. Mineralogická skladba je daná chemickým zložením použitej magnézie. Majoritnú časť tvorí periklas a minoritnými sú dikalcium silikát. Pálené stavivá na báze čistej magnézie nie sú vhodné pre hutnicke agregáty s diskontinuálnou prevádzkou, nakoľko stavivo slabo odoláva tepelným šokom. Je veľmi

vhodnou trvalou výmurovkou kyslíkového konvertora, ktorý pracuje kontinuálne s miernym znížením teploty. V spoločnosti *U. S. Steel Košice, s.r.o.* dosahujú životnosti kyslíkových konvertorov do 20 000 tavieb. Túto extrémnu životnosť zabezpečuje optimálne zloženie, bazicita trosky a pravidelné ošetrovanie torkrétovaním.

Pálené stavivá *KOMAG KK 90* sú na báze mŕtvopálenej magnézie s obsahom Al_2O_3 s keramikou väzbou. Aj v tomto stavive je majoritnou fázou periklas, no prídavkom malého množstva oxidu hlinitého do systému vzniká spinel hlinitý, čím sa získa vyššia odolnosť voči tepelným šokom. Táto vlastnosť umožní použiť stavivo ako trvalú, ale aj pracovnú výmurovku agregátu, ktoré je namáhané na teplotné zmeny.

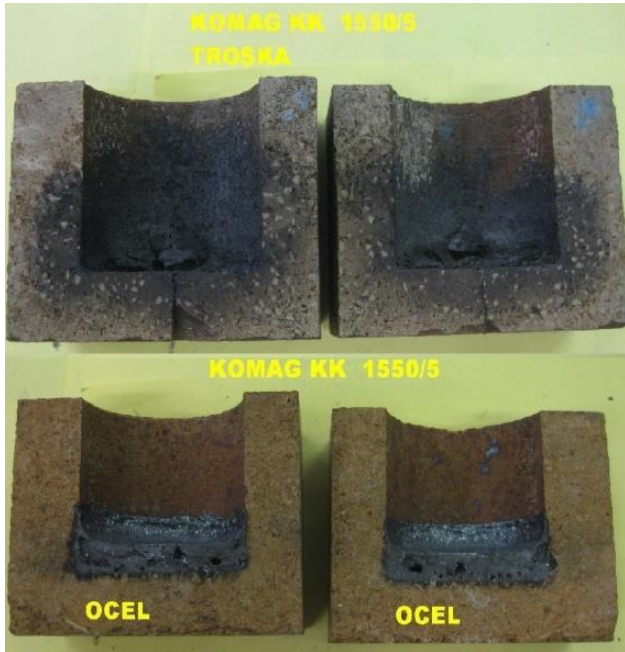
Stavivá *ALKO 70 B* a *ALKO 80 B* sú na báze bauxitu s keramikou väzbou. Mineralogicky sa líšia pomerom obsahu korundu a mulitu pochádzajúceho z fázovej premeny bauxitu. Vynikajú vysokou žiaruvzdornosťou a dobrou oteruvzdornosťou, majú vynikajúcu odolnosť voči tepelným šokom. Vlastnosti uvedených stavív používaných v trvalej výmurovke sú uvedené v tab. 1.

Fyzikálne parametre stavív ako sú zdanlivá pórovitosť, pevnosť v tlaku, trvalé dĺžkové zmeny stanovené pri teplotách blízky prevádzkovým teplotám, spolu s odolnosťou voči penetrácii kovu a odolnosťou voči tepelným šokom predurčujú bezchybný chod agregátu.

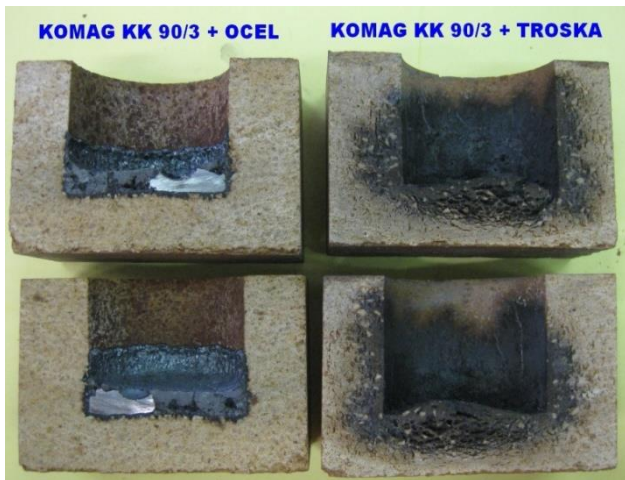
Trvalá výmurovka liacej panvy plní bezpečnostnú funkciu pred pretečením tekutého kovu na plášť. Stavivá teda musia odolávať tekutému kovu aspoň do istej miery, vzhľadom na to ako dlho sa udržiava kov v nádobe a pri akej teplote. Pre potvrdenie výsledkov odolnosti voči penetrácii bol vykonaný koróznny test oceľou a troskou pri teplote 1550°C po dobu 5 hodín. Rozmery téglíka sú 100x100 mm a výška otvoru cca

70 mm s $\varnothing 50$ mm. Doby pobytov ocele a trosky v liacej panve sú rôzne od 180 minút po 5 hodín v závislosti od technologického procesu oceliarnie. Stavivo *KOMAG KK* bolo dlhodobo používané ako trvalá výmurovka kyslíkového konvertora a na základe korózneho testu používané ako trvalá výmurovka liacej panvy. Na obr. 2 a 3 sú zobrazené téglíky stavív *KOMAG KK* a *KK 90*.

Je vidieť, že obe stavivá dokonale odolávajú penetrácii ocele, zatiaľ čo troska penetruje do objemu téglika. Je nutné pripomenúť, že doba temperovania bola 5 hodín, k čomu v reálnej prevádzke dochádza pri havarijných situáciách.



Obr. 2 Koróznny test KOMAG KK



Obr. 3 Koróznny test KOMAG KK 90

Sú samozrejme aj prevádzky, kde je doba pobytu aj 5 hodín, no v týchto prípadoch sa kladie vysoký dôraz na diagnostikovanie stavu výmurovky, životnosti pracovných výmuroviek sú oveľa nižšie. V podmienkach *U. S. Steel Košice, s.r.o.* boli použitím tohto typu trvalej výmurovky dosahované životnosti maximálne 190 liatí a takmer po každej výrobnjej kampani bolo nutné vymeniť určitú časť poškodenej časti, vid' obr. 4.

Skúške odolnosti voči penetrácii troskou bolo podrobené aj stavivo *ALKO 80 B*, ktoré vykazuje oveľa lepšie odolnosti voči penetrácii do objemu staviva ako stavivá komerčnej značky *KOMAG* (obr. 5).



Obr. 4 Rozpadnutá trvalá výmurovka liacej panvy z kvality KOMAG KK po 350 liatiach



Obr. 5 Koróznny test troskou - ALKO 80 B

Spoločnosť RMS Košice s.r.o. vyvinula ako alternatívu ku kvalite KOMAG KK kvalitu KOMAG KK 90 s lepšou odolnosťou voči tepelným šokom, ktorá bola dokázaná skúškou podľa normy ASTM C1525-03, prebiehajúcou pri teplote 1093 °C.

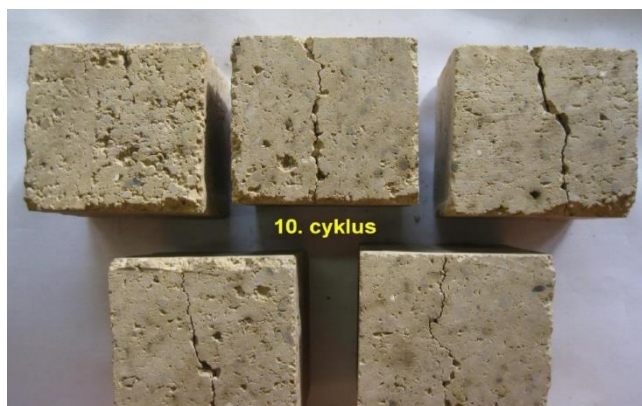
Dosiahnuté hodnoty odolnosti voči tepelným šokom pri desiatich opakovaníach resp. cykloch chladením do vody sú uvedené v tab. 2.

Tab. 2. Výsledky testu odolnosti voči náhlym zmenám teplôt

Odolnosť voči náhlym zmenám teplôt podľa ASTM C1525-03 pri teplote 1093°C				
Císlo vzorky	KOMAG KK 90	KOMAG KK	ALKO 70B	ALKO 80B
Index porušenia				
Cyklus č.				
1	1	1	1	1
2	2	3	1	1
3	3	R	2	2
4	3		2	2
5	4		2	2
6	4		2	2
7	4		3	3
8	R		3	3
9			3	3
10			3	3

0 = žiadne náznaky praskania
 1 = mierne vlasové trhliny nepresahujúce šírku ani dĺžku plochy
 2 = mierne popraskanie cez celú dĺžku alebo šírku plochy
 3 = stredné trhliny
 4 = hrubé trhliny
 R = rozpad vzorky na 2 alebo viac kusov
 MV = malé vydroteniny

Stavivo KOMAG KK používané v trvalej výmurovke kyslíkového konvertora vykázalo už po 3. ochladzovacom cykle úplnú deštrukciu telieska, zatiaľ čo KOMAG KK 90 vykázalo deštrukciu po 8. cykle. Stavivá ALKO 70 B a ALKO 80 B vykazovali mierne trhliny po 10. ochladzovacom cykle. Z uvedených výsledkov vyplýva, že pre diskontinuálne pracujúci technologický agregát je výhodnejšie použiť stavivo na báze bauxitu, ktorého miera poškodenia je uvedená na obr. 6.

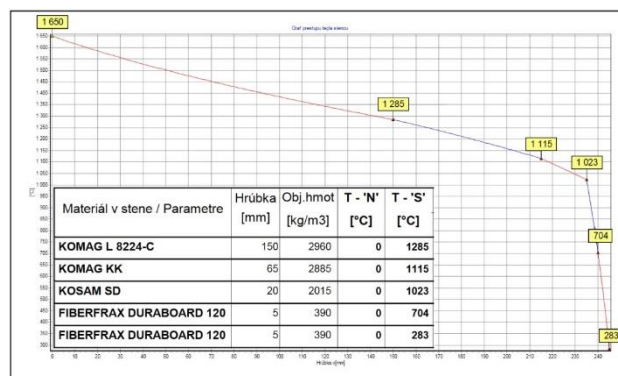


Obr. 6. Test odolnosti voči náhlym zmenám teploty ALKO 80 B

Keďže výroba ocele v každej dobe podlieha prísnemu sledovaniu merných nákladov na tonu vyrobenej ocele, aj v tomto prípade, pri častých opravách trvalej výmurovky KOMAG KK sa merné náklady zvyšujú neúmerne životnosti a počtu kampaní liacich paniev.

Trvalá výmurovka, ako bolo uvedené vyššie má plniť tak úlohu bezpečnostnú resp. chrániť pred pretečením ako aj izolačnú. Je dôležité udržať teplotu v liacej panve na požadovanej úrovni, nakoľko v liacej panve prebiehajú rafinačné deje, ktoré by neprebegli dostatočne keby nebol zabezpečený dokonalý prestup tepla. Rovnako tvorba garnisáže, ako ochrany

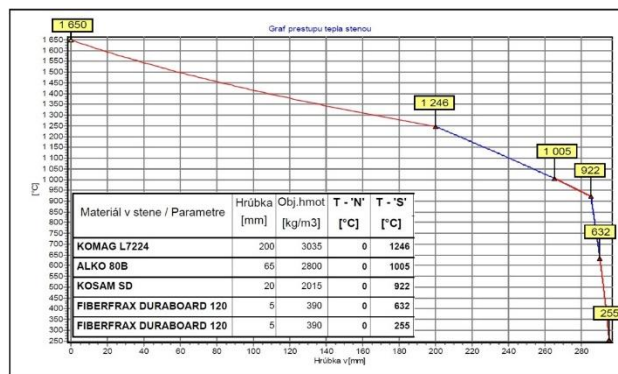
výmurovky pred koróziou sa dosahuje vtedy, ak je zabezpečený optimálny prestup tepla. Na obr. 7 je prestup tepla stenou panvy v oblasti troskovej čiary, pri ktorej bola použitá trvalá výmurovka KOMAG KK.



Obr. 7. Prestup tepla troskovou čiarou použitím magnézieho páleného staviva

Pracovná výmurovka bola tvorená stavivom KOMAG L 8224-C na báze vysoko čistej magnézie s obsahom 10 % uhlíka a druhou izolačnou vrstvou bolo stavivo KOSAM SD na báze lupku so zdanlivou pórovitosťou 25 %. Pri prevádzkovej teplote 1650 °C bude teplota v stavive KOMAG KK dosahovať hodnotu na teplej strane 1285 °C a pričom vodivosť staviva z pálenej magnézie je 17,383 W·m⁻¹·K⁻¹, bude teplota na plášti 283 °C.

Prestup tepla stenou panvy v oblasti troskovej čiary (obr. 8), pri ktorej bola použitá trvalá výmurovka ALKO 80 B, pričom vodivosť staviva z bauxitu je 3,108 W·m⁻¹·K⁻¹, bude teplota na plášti 255 °C.



Obr. 8. Prestup tepla troskovou čiarou použitím bauxitového páleného staviva

Tab. 3. Výhody a nevýhody stavív KOMAG KK a ALKO 70 B

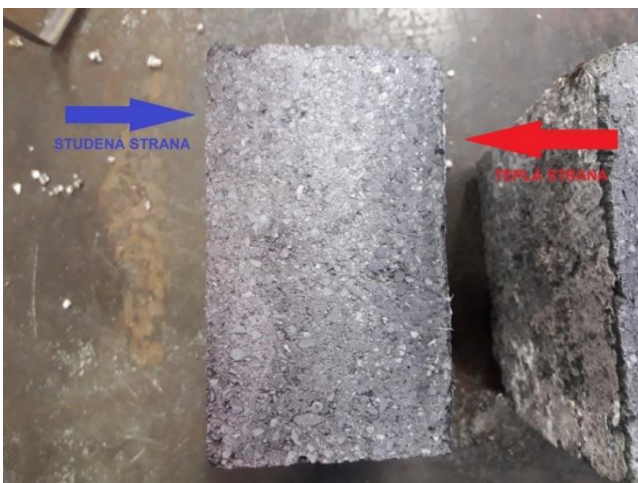
VÝHODY		NEVÝHODY	
ALKO 70 B a 80 B	KOMAG KK	ALKO 70 B a 80 B	KOMAG KK
+ izolačné vlastnosti + odolnosť voči tepelným šokom + vyššia životnosť	+ odolnosť proti penetrácii ocele a trosky + objemová stálosť	- pri dlhodobom pôsobení trosky a pri vysokej teplote môže dôjsť k pretečeniu	- vysoká tepelná vodivosť - nízka odolnosť voči tepelným šokom - pri dlhodobom pôsobení trosky a pri vysokej teplote

2 POST MORTEM ALKO 70 B

Liaca panva ako súčasť technologického toku výroby ocele je z pohľadu jej výroby agregátom, kde sa spotrebovávajú najviac žiaruvzdorného materiálu rôznej povahy, od izolačných materiálov po torkretačné opravárenské hmoty. Každý plní nejakú funkciu a predlžuje životnosť tak, aby merné náklady na tonu vyrobenej ocele boli čo najnižšie a zároveň, aby bolo prevádzkovanie aj v kritických situáciách, čo najbezpečnejšie. Výmurovky so stavivom *ALKO 70 B* majú životnosť v priemere 2400 taviieb, čo je pri priemernom počte liatí 215, cca 11 kampani, čo znamená 22 murovaní troskovej čiary a 11 murovaní steny liacej panvy. Obrázok 9 a obr. 10 dokumentujú stavivom *ALKO 70 B* po 186 a 1095 liatiach v trvalej výmurovke a jeho parametre sú uvedené v tab. 4. Ak porovnáme údaje z tab. 1, je vidieť, že jeho parametre sa vplyvom prevádzkovania a súvisiacich tepelných šokov nemenia.



Obr. 9. Stavivo *ALKO 70 B* po 186 liatiach



Obr. 10. Rez staviva *ALKO 70 B* po 1095 liatiach

Stavivo je stabilné pri dlhodobom prevádzkovaní liacej panvy a nevykazuje enormné zmeny vo

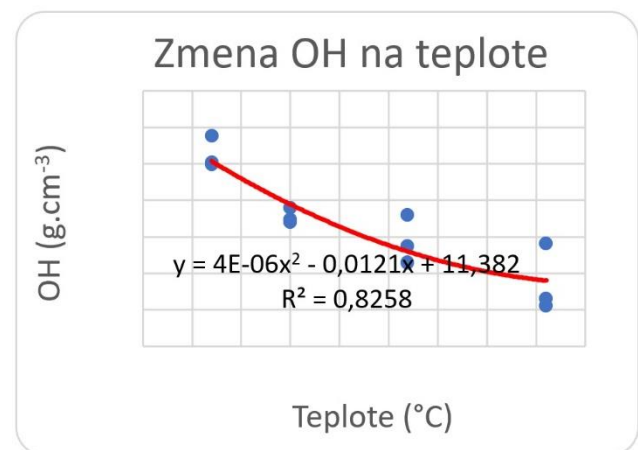
fyzikálnych a chemických parametroch. Najdôležitejším indikátorom zmien je objemová hmotnosť a zdanlivá pórovitosť, ktorej zvýšenie, či zníženie je funkciou použitej vstupnej suroviny a teploty výpalu.

Tab. 4. Životnosť trvalej výmurovky *ALKO 70 B*

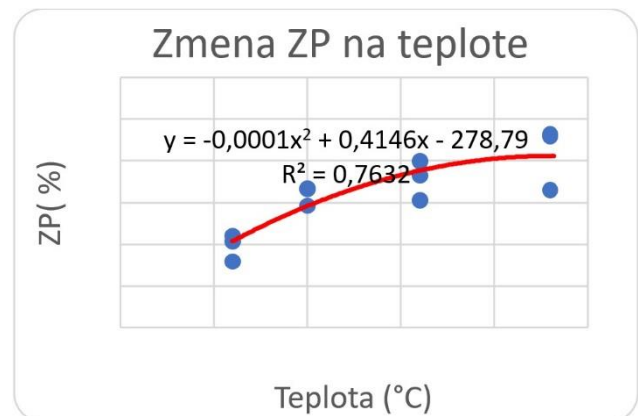
Životnosť (počet liatí/kampaň)	OH (kg·m ⁻³)	ZP (%)	PTL (MPa)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
186/1	2371	23,67	36,36	64,65	1,91
1095/5	2457	22,79	47,66	69,74	1,86

3 LABORATÓRNA SIMULÁCIA DEJOV V PANVE

V laboratórnych podmienkach bolo stavivo *ALKO 70 B* podrobené opakovaným výpalom pri teplotách 1310 °C, 1350 °C, 1410 °C a 1480 °C. (obr. 11, obr. 12 a obr. 13), pričom bolo cieľom simulovať zvyšovanie teploty pri opakovanom náhreve výmurovky, znižovaní hrúbky pracovnej výmurovky s následným zvyšovaním teploty v izolačnej vrstve.



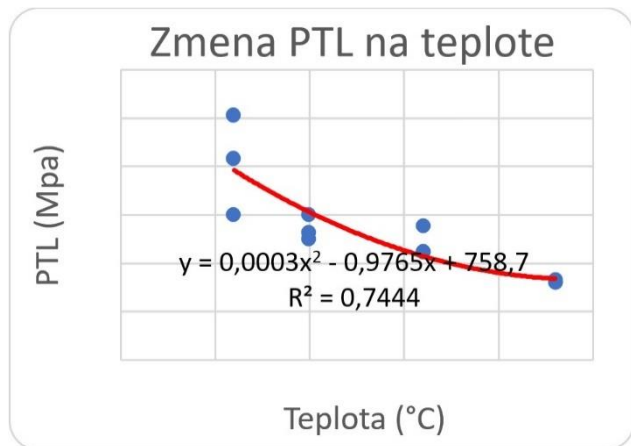
Obr. 11. Zmena objemovej hmotnosti na teplote



Obr. 12. Zmena zdanlivej pórovitosti na teplote

Boli sledované fyzikálne parametre ako pevnosť v tlaku (*PTL*), zdanlivá pórovitosť (*ZP*) a objemová hmotnosť (*OH*). Pevnosť v tlaku klesá so zvyšujúcou

sa teplotou, stavivo sa opakovane vypaľuje a krehne. Objemová hmotnosť klesá a zdanlivá pórovitosť rastie, póry sa otvárajú, stavivo rastie navonok zatvárajú sa špáry vo výmurovke. Dá sa predpokladať, že čím je výmurovka staršia, tým vyššiu má izolačnú schopnosť.



Obr. 13. Zmena pevnosti v tlaku na teplote

4 TRVALÁ VÝMUROVKA NALIEVACEJ PANVY

Nalievacia panva je kruhová nádoba tvaru zrezaného kužela vymurovaná žiaruvzdorným materiálom a vybavená vylievacou hubičkou. V súčasnej dobe slúžia nalievacie panvy na proces odsírenia surového železa pred jeho naliatím do konvertora. Tekuté surové železo je dopravované z vysokých pecí do haly na oceliarni v pojazdných miešačoch. Železo je tu prelievané do nalievacej panvy uloženej na prevážacom voze umiestnenom pod vylievacím otvorom pojazdného miešača. Odtiaľ sa NP žeriavom presúva k odsírovaciemu zariadeniu. Po ukončení procesu odsírenia je surové železo nalievané do kyslíkových konvertorov. Zloženie výmurovky nalievacej panvy používanej v *U. S. Steel Košice, s.r.o.* je zobrazené na obr. 14.

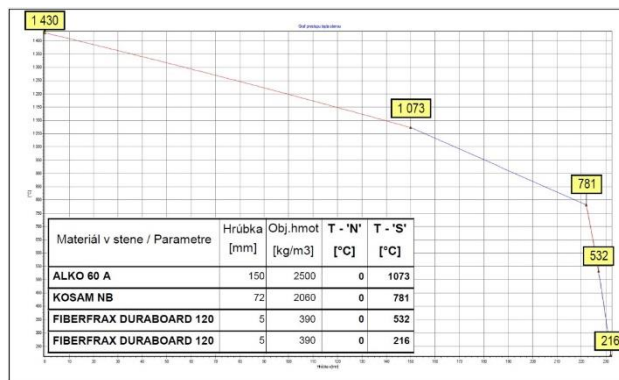
Výmurovka nalievacích paniev je najčastejšie zložená z troch vrstiev žiaruvzdorných materiálov. Na oceľovom plášti nádoby sú uložené dosky z vláknitého materiálu, ktoré predstavujú izolačnú vrstvu, potom nasleduje trvalá výmurovka z obyčajného alebo tvrdého šamotu a nakoniec pracovná výmurovka z vysokohlinítych materiálov na báze andaluzitu alebo bauxitu. Vylievacia hubička je vyhotovená žiarobetónom na báze lupku a prísad s hydraulickou väzbou. Pracovná výmurovka

nalievacej panvy je tvorená stavivom *ALKO 60 A* na báze andaluzitu s obsahom Al_2O_3 min. 60 % a druhou izolačnou vrstvou bolo stavivo *KOSAM NB* (tab. 5) na báze lupku so zdanlivou pórovitosťou 23%. a izolačných dosiek *FIBERFRAX DURABOARD 120*.



Obr. 14. Schéma výmurovky nalievacej panvy

Teplota surového železa pri prevoze v pojazdnom miešači je približne 1460÷1520 °C, prevozom železo chladne a za každú prevezenú minútu teplota klesne o 1 °C. Z pojazdného miešača sa železo vylieva do nalievacej panvy, ktorá slúži na nalievanie do kyslíkového konvertora a jeho teplota sa pohybuje v rozmedzí teplôt 1400÷1450 °C. Stacionárnym výpočtom prestupu tepla stenou (obr. 15) je vypočítaná teplota na stavive *KOSAM NB* od 1078÷781 °C, v prípade, že hrúbka pracovnej výmurovky *ALKO 60 A* je 150 mm.



Obr. 15. Prestup tepla stenou nalievacej panvy

Pri prevádzkovej teplote 1430 °C bude teplota v stavive *KOSAM NB* dosahovať hodnotu na teplej strane 1073 °C a pričom vodivosť staviva z lupku je 1,395 W·m⁻¹·K⁻¹, bude teplota na plášti 216 °C. Pri tejto teplote je použitie staviva vyhovujúce. Nalievacia panva sa pravidelne ošetruje

Tab. 5. Fyzikálne a chemické vlastnosti kvality *KOSAM NB*

Kvalita	Fyzikálne vlastnosti					Chemické vlastnosti	
	OH	PTL	ZP	TDZ 1400 °C/5 hod	ÚvŽ t _{0,5}	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
<i>KOSAM NB</i>	min. 2020	min. 15	max. 23	typ. ±0,2	typ. > 1370	max. 2,6	min. 38

torkretovaním a nálepy železa sa mechanický odstraňujú, z toho dôvodu sa nestáva, aby stavivo *KOSAMNB* prišlo do priameho styku so surovým železom. Na ošetrovanie nalievacej panvy oblasti kovu sa používa torkretačný materiál na báze andaluzitu s hydraulickou väzbou. V oblasti troskovej čiary sa používa torkretačný materiál na báze tehliarskej magnézie, aby sa eliminovala tvorba interakčnej vrstvy a zjednodušilo sa čistenie nálepov trosky. Dosahované životnosti sa pohybujú na úrovni maximálne 600 naliatí v závislosti od prevádzkových podmienok a trvalá výmurovka sa mení po 4 až 5 kampaniach, teda 2400 až 3000 taviieb.

ZÁVER

Prítomnosť kvalitnej izolačnej vrstvy vedie k zníženiu spotreby energie, nižším teplotám plášťa a zmenám teploty výmurovky. Materiál pracovnej výmurovky vykazuje lepšiu životnosť pri šetrení energie, tvorí sa garnisáž, ktorá chráni výmurovku voči pôsobeniu nadmernej korózie. Výmurovka sa opotrebovávajú postupne vo vrstvách odlupovaním pri

zachovaní bezpečnej pracovnej vrstvy výmurovky. Aj keď lokálne dôjde k nadmernému opotrebovaniu pracovnej výmurovky na trvalú, jej odolnosť voči penetrácii tekutého kovu je postačujúca na odstavenie agregátu. Bezpečné prevádzkovanie zabezpečuje ošetrovanie a termovízne sledovanie technologického zariadenia.

LITERATÚRA

- [1] SANTOS, M. F. - MOREIRA, M. H. - CAMPOS, M. G. G. - PELISSARI, P. I. B. G. B. - ANGELICO, R. A. - SAKO, E. Y. - PANDOLFELLI, V. C. (2017): *Steel ladle energy saving by refractory lining desing*, 11.
- [2] FRÖHLICHOVÁ, M. - TATIČ, M. (2012): *Žiaruvzdorné materiály v čiernej metalurgii*, 04/2012, Košice.
- [3] STAROŇ J. - TOMŠŮ, F. (2000): *Žiaruvzdorné materiály výroba, vlastnosti a použitie*, Košice.
- [4] RMS Košice s.r.o. (2022): *Technické podklady a fotodokumentácia*.

Aditívne technológie a ich aplikácia v automobilovej výrobe

Josef Šutka, Ing., PhD.*

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

Radoslav Koňár, Ing., PhD.

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

Additive technologies and their applications in car production

Abstract: The paper deals with an overview of selected additive technologies used in the automotive industry. The emphasis is mainly on technologies that use metal powders. Furthermore, the work focuses on machine improvements and also presents a possible breakthrough in series additive production thanks to new production systems.

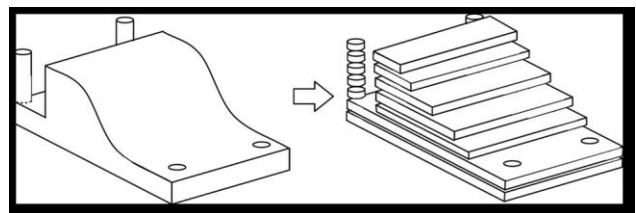
ÚVOD

Aditívne technológie sú pre automobilový priemysel veľmi zaujímavé vďaka svojmu veľkému potenciálu. Kvalita komponentov vyrábaných aditívnymi technológiami sa vďaka aktívnemu výskumu za posledné roky veľmi výrazne zvýšila. Ponúkajú veľmi veľkú variabilitu použitia materiálov čo má veľmi priaznivý vplyv na ich mechanické vlastnosti. Aditívna výroba začala v automobilovom priemysle výrobou prototypov. Vďaka rýchlej tlači boli tieto metódy veľmi výhodné. Tieto metódy sa nazývajú *Rapid Prototyping*. Postupom času neúnavný vývoj technológií 3D tlače na priemyselné účely tieto technológie tak zdokonalil že modeli začali mať vlastnosti porovnateľné s vlastnosťami ktoré boli požadované od komponentov. Tak postupne vznikla metóda *Rapid Manufacturing* ktorá sa sústreďuje na sériovú výrobu dielov nie len modelov. Pri tejto metóde sa využívajú materiály ktoré fungujú na báze kovový práškov. Medzi najpoužívanejšie kovové prášky momentálne patria zliatiny titánu, hliníka, medi a niklu. Jedným za najpopulárnejších kovových práškov pre automobilový priemysel je kovový prášok zo zliatiny hliníka *AlSi10Mg*, používaný je pre svoje vlastnosti ako pevnosť, hmotnosť, dobrá opracovateľnosť a taktiež veľmi dobrá tepelná vodivosť. Pri zameraní sa hlavne na technológie a riešenia ktoré využívajú kovové prášky. Vzhľadom na to že sa jedná o aditívne technológie využívané v automobilovom priemysle, je úvodná časť venovaná začiatkom komerčných aditívnych technológií. Aditívna výroba, tiež známa ako 3D tlač je

transformačný prístup k industriálnej výrobe ktorý umožňuje tvorbu ľahších, silnejších dielov a systémov.

Aditívna výroba využíva dáta z CAD softvéru alebo skenerov pričom sa pridáva materiál vrstva po vrstve a formuje presné geometrické tvary. Slovo aditívna v názve samo o sebe indikuje pridávanie materiálu v kontraste s obrábaním konvenčnými metódami pri ktorých sa materiál ubera [1].

Aditívne technológie je súhrnné označenie pre všetky technológie ktoré fungujú na princípe 3D tlače.



Obr. 1 Princíp aditívnej výroby, vrstva po vrstve [2]

1 ADITÍVNA VÝROBA A AUTOMOBILOVÝ PRIEMYSEL

Za posledné roky si prešiel automobilový priemysel veľkými zmenami, ako napríklad začínajúci prechod zo spaľovacích motorov na tie elektrické alebo zvyšujúci sa záujem o autonómne vozidlá. Je tu hneď niekoľko spôsobov ako využiť vedomosti nadobudnuté z výskumu na zlepšovanie palivo šetrnejších áut. Dôležitá oblasť výroby budúcej generácie áut je vyhodnotenie dizajnu auta. Početné dizajnové riešenia umožňujú skonštruovať auto ktoré

bude ľahšie, silnejšie, a bezpečnejšie pre posádku. Jediný limitujúci faktor môže byť nedostatok technologického pokroku hlavne v oblasti výroby. Hneď niekoľko výrobcov áut začalo pracovať na vývoji pokročilých technológií ktoré budú či už priamo alebo nepriamo napomáhať zo šetrením paliva vo vozidlách. Takými technológiami sú aditívne technológie, ktoré ponúkajú množstvo výhod pre výrobcu jednej súčiastky alebo celého vozidla pri zachovaní výborných mechanických vlastnostiach. Pomocou aditívnej výroby je možná rýchla výroba prototypu a rovnalo je možná aj výroba zložitých dizajnov, ktoré by inak nebolo možné vyrobiť. Tieto neobvyklé technológie poskytujú automobilovej výrobe inovatívne dizajny, slobodu zdokonalenia a zlepšenie zásobovacieho reťazca. Tieto technológie sú používané na testovanie, výrobu a montáž automobilových dielov s vyššou efektívnosťou a optimalizáciou pri znížených nákladoch. Aditívne technológie vôbec nie sú novým pojmom pre automobilový priemysel. Automobilový výrobca *BMW* uvádza že registruje aditívne technológie už 28 rokov. Výrobca má časť venovanú aditívnej výrobe ktoré sa volá *Additive Manufacturing Center*, kde sa vyvíja a vyrába 28 000 výrobkov každý rok. Vyrábajú sa tam výrobky od prototypov až po vysoko dizajnové zložité kovové súčiastky.



Obr. 2. Prototyp kovového rámu motocyklu vyrábaného aditívnymi technológiami, vystavený na podujatí *BMW Digital Day* [4]



Obr. 3. Vodné konektory do motora *AUDI W12* vyrábaných 3D tlačou z kovových práškov [5]

Veľmi podobne sa k problematike postavil automobilový koncern Volkswagen, ten svoje

centrum pre aditívnu výrobu otvoril v roku 2018. Volkswagen plánuje vyrobiť 3D technológiami približne 100 000 dielov ročne, spoločnosť už teraz preukázala výrazné ušetrenie nákladov získaním ceny *Automotive Application of the Year* v roku 2018 [3].

2 TITÁN A JEHO ZLIATINY

Z titánu sa stal najbežnejšie používaný materiál v aditívnej výrobe, využitie si nájde hlavne v kozmickom priemysle, pri výrobe kľbových náhrad, chirurgických nástrojov, pretekárskych áut a rámov bicyklov, v elektronike a pri ostatných vysokokvalitných produktoch. Titán a jeho zliatiny ponúkajú vysokú pevnosť, veľmi dobrý pomer pevnosti a hmotnosti a lepšiu odolnosť voči korózii ako nehrdzavejúca oceľ. Titán robí rakety a lietadlá ľahšie čo šetrí palivo a zvyšuje užitočné zaťaženie.



Obr. 4. Titánový prášok pre aditívnu výrobu [6]



Obr. 5. Brzdový strmeň vyrábaný aditívnymi technológiami výrobcom *Bugatti* do modelu *Chiron*, z materiálu *Titanium 6Al-4V* [7]

V kozmickom priemysle je niekoľko 3D tlačených titánových komponentov schválených americkou Federálnou správou letectva *US FAA*, ktoré sa používajú na vojenský alebo komerčný účel. Pričom niekoľko prototypov ešte na certifikáciu čaká. Kovové prášky z titánu sú tiež cenené pre ich koreláciu medzi váhou vstupného materiálu a váhou materiálu po tlači. Odlievania a obrábanie titánu vedie k vyššej cene výroby na základe vyššej spotreby materiálu, drahších foriem, nástrojov a vyššej spotreby energie. Okrem toho, tieto dva konvenčné spôsoby výroby obmedzujú dizajn produktu a ponúkajú veľmi malú všestrannosť. 3D tlač umožňuje efektívnejšiu výrobu komponentov z

tohto drahého materiálu vďaka menšej spotrebe surového materiálu a teda menšiemu mrhaniu.

Aditívne technológie zvyčajne spotrebujú iba nevyhnutné množstvo na výrobu dielu a relatívne malé množstvo podporného materiálu. Čistý titán nie je zvyčajne používaný v strojárskych aplikáciách pričom je bežný v biomedicínskom priemysle vďaka výrobkom ako sú kolenné alebo bedrové implantáty. Zliatiny titánu sú používané v širokom spektre odvetví, ktoré potrebujú dosiahnuť veľmi špecifické vlastnosti komponentov. Dodávatelia kovových materiálov, ktorý dlhodobo dodávali výrobcovi s titánom pre odlievanie, teraz ponúkajú titánové prášky formulované špeciálne pre aditívnu výrobu [6].

3 NIKEL A JEHO ZLIATINY

Mnoho komponentov z niklových superzliatin je vyrábaných vďaka aditívnym technológiám využívajúcich kovové prášky. Súčiastky zo zliatin *Inconel 625* a *Inconel 718* sú v 3D výrobe veľmi populárne a vyrábajú sa viacerými technológiami vrátane *SLS*, *EBM* a *SLM*. Aditívna výroba sa tiež aplikuje na takzvané „netaviteľné“ zliatiny niklu využívané v plynových turbínach, kde vznikajú vysoké teploty. Sú spracovávané viacerými aditívnymi technológiami ako *SLE* a *SLM*. Pre predstavu, *SLM* je používaná na tlač komponentov zo zliatin *Waspalloy*, *MAR-247* a *CM247LC*. Pričom technológia *SLE* spracováva tiež *Inconel 100*, *René 80*, *MAR-M247*, *René 142*, *CMSX-4* a *René 15*. Technológia *EBM* sa používa hlavne na zliatiny *René 142* a *CMSX-4* [8].



Obr. 6. Blok valcov zo zliatiny *Inconel 625* vyrobený aditívnymi práškovými technológiami 9

Vďaka ich vysokej pevnosti, odolnosti proti korózii, oxidácii, zvariteľnosti a tepelnej odolnosti sú tieto zliatiny používané v kozmickom priemysle, vojenskom priemysle, energetickom priemysle a tiež chemickom priemysle. Svoje využitie si nájdu aj v automobilovom priemysle, hlavne ako materiály z ktorých sa tlačia rôzne časti motora. Už teraz sa aditívnymi technológiami vyrábajú lopatky turbíny, hydrauliky, bloky valcov, telesá ventilov a mnoho ďalších niklových komponentov [9].

ZÁVER

Ako je vidieť, aditívne technológie majú na výrobu a vývoj automobilov čoraz väčší vplyv. Už dnes existujú automobily ktorých súčiastky sú skoro všetky vyrábané pomocou aditívnej výroby. Sú to skôr anomálie a jedná sa väčšinou o prototypy, ukazuje to ale ako veľmi sa tieto technológie v poslednom období posunuli. Sériová výroba aditívnymi technológiami dostala za posledné roky mnoho nástrojov a vylepšení, ako napr. aj tie ktoré sú prezentované v tejto práci. Cieľom veľkosériovej výroby však nie je nahradiť konvenčné technológie. Pri sériovej výrobe aditívnymi technológiami sa výrobcovi skôr otvárajú nové možnosti v dizajne, hospodárnosti výroby materiálovej variabilite. Rýchlosť výroby niekedy tiež zohráva svoju úlohu. Jednou z veľkých otázok 21. storočia je zníženie uhlíkovej stopy v atmosfére. Samozrejme, je vidieť že záujem priemyslu riešiť túto otázku čo najlepším spôsobom je enormný. Mnoho výrobcov sa začína zaujímať o recykláciu a celkové zlepšenie svojej environmentálnej politiky stále viac. Vo firmách vznikajú špeciálne úseky, ktoré sa zaoberajú výskumom nových alternatív pre postupy, ktoré nie sú životnému prostrediu naklonené. Aditívne technológie môžu zohrávať v tomto boji proti klimatickej zmene veľmi dôležitú úlohu. Či už pri zlepšovaní dizajnu alebo materiálovej úspore. Taktiež vďaka 3D technológiám a môže mnohokrát znížiť potrebu transportu polovýrobku medzi jednotlivými pracoviskami, keďže tieto technológie dokážu nahradiť niekoľko operácií. Dokonca už vznikla aj organizácia ktorej cieľom je pomáhať firmám stať sa stali „zelenšími“ práve implementovaním aditívnych technológií do svojich procesov vývoja a výroby. Názov organizácie je *AMGTA* a tvorí ju už viac ako 40 firiem zaoberajúcich sa aditívnou výrobou a environmentálnymi riešeniami. Sloboda dizajnu, ktorú ponúka aditívna výroba možno na prvý pohľad nevyzerá tak podstatná pre ekológiu. Je však potreba brať do úvahy aj vplyv na funkciu motora, báz, prevodovky a podobne. Čím funkčnejší dizajn, tým sa zvýši využiteľnosť auta. To znamená ďalšie možnosti šetrenia životného prostredia. Tiež môžu mať finálne diely vďaka šikovnému dizajnu nižšiu

hmotnosť, čo zase pomáha šetriť životné prostredie. Čo sa týka spotreby materiálu, je výhoda 3D výroby úplne zrejmá. Vzhľadom na to že obrobok nie je nijako obrábaný, neexistujú v podstate nijaké straty materiálu. Pri laserových aditívnych technológiách síce po výrobe zostane nevyužitý prášok, ten ktorý slúžil podpora. Ten je ale buď po malej alebo žiadnej úprave znova funkčný, čo pri konvenčných trieskových technológiách nie je ani zďaleka možné. Budúcnosť aditívnych technológií v automobilovom priemysle môže mať rôzne podoby. Zatiaľ je metóda RM aplikovaná v automobilovom priemysle hlavne na malé zložité plastové súčiastky. Predpoklad je, že tento trend bude ešte pár rokov pokračovať.

Pod'akovanie

Tento článok bol financovaný z projektu Žilinskej univerzity 313011ASY4 „Strategická implementácia aditívnych technológií na posilnenie intervenčných kapacít pri mimoriadnych udalostiach spôsobených pandémiou COVID-19“.

LITERATÚRA

[1] GENERAL ELECTRIC (2021): *What is Additive Manufacturing?* GE. [Online] 2021. <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>.

[2] CORON, J.P. (2017): *Shape optimization of a layer by layer mechanical constraint for additive manufacturing*. Science Direct. [Online] Jún 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631073X1730122X>.

[3] FUTURE BRIDGE BLOG (2021): *Additive Manufacturing in the Automotive Industry*. Future Bridge. [Online] 2021. <https://www.futurebridge.com/blog/additive-manufacturing-in-the-automotive-industry/>.

[4] BMW GROUP (2018): *BMW displays range of metal Additive Manufacturing during Digital Day*. Metal AM. [Online] 25. Apríl 2018. <https://www.metal-am.com/bmw-displays-range-of-metal-additive-manufacturing-during-digital-day/>.

[5] PETCH, M. (2018): *Audi gives update on use of SLM metal 3D printing for the automotive industry*. 3D Printing industry. [Online] 22. Február 2018. <https://3dprintingindustry.com/news/audi-gives-update-use-slm-metal-3d-printing-automotive-industry-129376/>.

[6] COLOMBO-PULGARÍN, J.C. (2021): *3D Printing Titanium: Methods, Printers, Applications*. All 3D pro. [Online] 19. Apríl 2021. <https://m.all3dp.com/1/3d-printing-titanium-methods-printers-applications/>.

[7] WHITWAM, R. (2018): *Bugatti 3D Prints Titanium Brake Calipers For Chiron Supercar*. Extreme Tech. [Online] 23. Január 2018. <https://www.extremetech.com/extreme/262598-bugatti-makes-brake-calipers-chiron-supercar-3d-titanium-printing>.

[8] DAS, S., BOURELL, D. L. a BABU, S. S. (2016): *Metallic materials for 3D printing*. Springer. [Online] 2016. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1557/mrs.2016.217.pdf>.

[9] GRIFFITHS, L. (2021): *Nickel alloy IN625 now qualified for 3D printing on Desktop Metal Production System*. TCT Magazine. [Online] 14. Október 2021. <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/metal-additive-manufacturing-news/nickel-ally-in625-3d-printing-desktop-metal-production/>.

Aplikácia vybraných štatistických metód pri laserovom rezaní ocele

Ivana Pobočíková, Mgr., PhD.*

Katedra aplikovanej matematiky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: ivana.pobocikova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 4967

Vladimír Guldan, RNDr.

Katedra aplikovanej matematiky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: vladimir.guldan@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 4965

Application of selected statistical methods in laser cutting of steel

Abstract: The paper presents the application of one-way analysis of variance (ANOVA) and Tukey's HSD method of multiple comparison, which can be used in the experiment, which determined the effect of cutting speed on the perpendicularity deviation of the cutting surface when cutting stainless steel X5 Cr Ni 1810 using laser. The details and technological parameters of laser cutting steel are mentioned. Based on the results obtained using ANOVA and Tukey's HSD method, it can be argued that different cutting speeds have a statistically significant effect on the perpendicularity deviation of the cutting surface.

ÚVOD

Rezanie laserom je technológia pre presné a rýchle delenie materiálov, pomocou ktorej možno rezať kovové aj nekovové materiály, ako napr. oceľové, nerezové alebo hliníkové plechy, plasty, sklo. Základom rezania je laserový lúč, ktorý je vedený, tvarovaný a zaostrovaný. Po dopade lúča sa rezaný materiál natoľko ohreje, že sa začne natavovať alebo odparovať. Hrúbka deliacej čiary sa pri tom pohybuje medzi 0,1÷1 mm v závislosti na rezanom materiáli. Vďaka tomu možno pomocou laseru rezať aj komplikované geometrie. Dosiahnuté rezné hrany sú zvyčajne vysokej presnosti a bez otrepu, takže nevyžadujú následné opracovanie, čo umožňuje ďalšie jednoduchšie spracovanie (zváranie, ohýbanie).

Pri rezaní kovových materiálov laserom je možné nastaviť viaceré technologické parametre, ktoré ovplyvňujú proces rezania, ako sú: rýchlosť rezania [m/min], výkon laserového lúča [W], zaoblenia ostrých geometrických tvarov v hraničných bodoch [mm], vzdialenosť zápalu od rezanej priamky, resp. krivky [mm], spôsob nábehu z miesta zápalu na krivku rezu, tlak rezacieho média [MPa], druh rezacieho plynu, zmena prierezu použitej dýzy [mm] a poloha bodu zaostrenia laserového lúča [mm].

Pre konkrétnu aplikáciu výrezkov v praxi je dôležitá nejaká kvalitatívne hodnotená vlastnosť výrezkov. Medzi základné kvalitatívne hodnotené vlastnosti rezných plôch patria: odchýlka reznej plochy od

roviny kolmej na povrch rezaného materiálu [°], drsnosť reznej plochy [μm], vlnovitosť reznej plochy [μm], šírka teplom ovplyvnenej oblasti [mm], tvrdosť povrchu reznej plochy [HRC/HV], stav reznej hrany viac vzdialenej od laserovej hlavy a prítomnosť a typ povrchových oxidov na rezných plochách. Odchýlka reznej plochy od roviny kolmej na povrch rezaného materiálu v podstatnej miere ovplyvňuje aj rozmer výrezku. Drsnosť reznej plochy je dôležitá pri súčiastkach, ktorých rezná plocha bude dynamicky zaťažovaná, alebo je dôležité dodržať jej vizuálnu kvalitu. Zvýšená tvrdosť reznej plochy môže nepriaznivo ovplyvniť ďalšie operácie spracovania súčiastky, ako sú rezanie závitov, frézovanie alebo ohýbanie [1-5].

V predloženom príspevku ukážeme aplikáciu vybraných štatistických metód, ktoré sa dajú použiť pri spracovaní experimentu, v ktorom sa zisťoval

vplyv reznej rýchlosti na odchýlku kolmosti reznej plochy pri laserovom rezaní ocele. Pomocou jednofaktorovej analýzy rozptylu (*one-way Analysis of Variance* - ANOVA) sa otestuje vplyv reznej rýchlosti na odchýlku kolmosti reznej plochy. Následne sa pomocou testov mnohonásobného porovnávania otestuje, ktoré priemerné hodnoty odchýlky kolmosti reznej plochy sa významne štatisticky líšia a ktoré nie. Všetky štatistické testy sa testujú na hladine významnosti $\alpha = 0,05$.

1 DETAILY EXPERIMENTU

Na vyhodnotenie vplyvu reznej rýchlosti na odchýlku kolmosti s použitím laserového rezania bola vybraná antikoročná oceľ X5 Cr Ni 1810. Je to austenitická-chróm-niklová oceľ, ktorá je jedným z najviac používaných druhov antikoročného materiálu,

(reziduálnu), o ktorej sa predpokladá, že je náhodná. Testovanie sa vykoná v dvoch krokoch:

1. Testuje sa nulová hypotéza H_0 : priemery všetkých troch výberov sú rovnaké, proti alternatíve H_1 : aspoň dva výbery majú rôzne priemery. V našom prípade nulová hypotéza H_0

Tab. 1. Chemické zloženie, fyzikálne a mechanické vlastnosti antikoročnej ocele X5 Cr Ni 1810

Chemické zloženie v %								Fyzikálne vlastnosti		Mechanické vlastnosti		
Prvky:	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Merná tepelná kapacita c_p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Tepelná vodivosť λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	R_m [MPa]	R_{emin} [MPa]	HRB
max.:	0,07	2,0	0,045	0,03	1,0	20,0	11,5	500	14,7	540÷680	195	max. 88

s veľmi dobrou odolnosťou voči korózii, tvárnosťou za studena a zvariteľnosťou. V tab. 1 sú uvedené chemické zloženie, fyzikálne a mechanické vlastnosti tejto ocele.

Pri experimentálnom rezaní ocele sa použili tieto konštantné parametre : tlak asistenčného plynu: 1,7 MPa, poloha fokusačného bodu: -3 mm, výkon: 3200 W, priemer dýzy: Ø1,4 mm, asistenčný plyn: dusík 5.0. Pri jednotlivých rezaniach sa menila rezná rýchlosť: 3,0 m·min⁻¹, 3,8 m/min a 4,5 m·min⁻¹.

V tab. 2 sú uvedené namerané hodnoty odchýlok kolmosti (v mm) pre rôzne rezné rýchlosti. Pre každú reznú rýchlosť sa namerali hodnoty na piatich experimentálnych vzorkách [5].

Tab. 2. Namerané hodnoty na experimentálnych vzorkách

Rezná rýchlosť [m·min ⁻¹]	Odchýlka kolmosti [mm]				
	1	2	3	3	5
R 3,0	0,0778	0,0778	0,0777	0,0781	0,0781
R 3,8	0,0538	0,0539	0,0538	0,0540	0,0535
R 4,5	0,0454	0,0455	0,0458	0,0456	0,0457

2 ŠTATISTICKÁ ANALÝZA EXPERIMENTU A DISKUSIA

V experimente sa sleduje vplyv faktora „rezná rýchlosť“ na sledovanú premennú „odchýlka kolmosti reznej plochy“ u ocele X5 CR NI 1810. Faktor „rezná rýchlosť“ má tri úrovne: rezná rýchlosť 3,0 m·min⁻¹, 3,8 m·min⁻¹ a 4,5 m·min⁻¹. Zaujímá nás, či existujú rozdiely medzi tromi výbermi, ktoré reprezentujú jednotlivé úrovne sledovaného faktora. Štatistická metóda, ktorá umožňuje urobiť takéto porovnanie priemerov troch a viac výberov sa nazýva jednofaktorová analýza rozptylu (*one-way Analysis of Variance-ANOVA*) [6, 7].

Podstatou tejto metódy je rozložiť celkovú variabilitu sledovanej premennej na variabilitu vysvetlenú pôsobením známeho faktora a variabilitu neobjasnenú

znamená, že vplyv reznej rýchlosti na odchýlku kolmosti reznej plochy je nulový a H_1 znamená, že vplyv reznej rýchlosti na odchýlku kolmosti reznej plochy je významný.

2. Ak sa H_0 zamietne, zisťuje sa, ktoré výbery sa významne štatisticky líšia pomocou testov mnohonásobného porovnávania (post-hoc testy).

Rozhodnutie o zamietnutí, resp. prijatí nulovej hypotézy sa vykoná na základe p -hodnoty. V prípade, že je p -hodnota < 0,05, tak sa hypotéza H_0 zamietne. V prípade, že je p -hodnota \geq 0,05, tak sa hypotéza H_0 nezamietne.

Skôr než sa urobí ANOVA, treba najskôr overiť nasledujúce predpoklady:

1. Nezávislosť výberov.
2. Výbery sú normálne rozdelené.
3. Homogenita rozptylov.

Nesplnenie predpokladov by znamenalo, že ANOVA sa nedá použiť a treba hľadať inú metódu, napr. neparametrický *Kruskal-Wallisov test* [6, 7].

2.1 Testovanie normality a homogenity rozptylov

Testy nezávislosti výberov sa obvykle nerobia. Predpokladá sa, že nezávislosť výberov je ošetrovaná v experimentálnom postupe. Vzhľadom na malý rozsah výberov sa tomto príspevku predpoklad normality overil *Shapiro-Wilkovým testom* [7]. Testuje sa nulová hypotéza H_0 : výber pochádza má normálne rozdelenie, proti alternatíve H_1 : výber nemá normálne rozdelenie.

Výsledky *Shapiro-Wilkovho testu* sú uvedené v tab. 3. Všetky tri p -hodnoty sú väčšie ako 0,05, nulová hypotéza H_0 nezamietame. Dá sa teda tvrdiť, že všetky tri výbery pochádzajú z normálneho rozdelenia.

Homogenita rozptylov sa testovala *Bartlettovým testom* [6]. Testuje sa nulová hypotéza H_0 : výbery majú rovnaké rozptyly, proti alternatíve H_1 : aspoň dva

rozptyly sú rôzne. Na základe výsledkov uvedených v tab. 4 nulovú hypotézu H_0 nezamietame, dá sa teda tvrdiť, že rozptyly sú rovnaké (p -hodnota je väčšia ako 0,05).

Tab. 3. Namerané hodnoty na experimentálnych vzorkách

Rezná rýchlosť [m·min ⁻¹]	Testovacia štatistika	p -hodnota
R 3,0	0,817188	0,109227
R 3,8	0,907649	0,449329
R 4,5	0,986714	0,954827

Tab. 4: Bartlettov test homogenity

Testovacia štatistika	p -hodnota
1,01215	0,936881

2.2 Jednofaktorová analýza rozptylu

Vplyv reznej rýchlosti na odchýlku kolmosti reznej plochy teda môžeme riešiť pomocou jednofaktorovej ANOVA. Výsledky analýzy sú uvedené v tab. 5. Pretože p -hodnota pre F -test je menšia ako 0,05, môžeme nulovú hypotézu zamietnuť. Na základe ANOVA na hladine významnosti $\alpha = 0,05$ sa dá tvrdiť, že faktor „rezná rýchlosť“ má štatisticky významný vplyv na hodnotu odchýlky kolmosti reznej plochy.

Tab. 5. Tabuľka analýzy rozptylu

Zdroj variability	Súčet štvorcov SS	Stupne voľnosti df	Stredný štvorec SS/df	Testovacia štatistika F	p -hodnota
Medzi reznými rýchlosťami	0,0028189	2	0,00140945	44 508,95	0,0000
Reziduálny	$3,8 \cdot 10^{-7}$	12	$3,16667 \cdot 10^{-8}$		
Celkový	0,00281928	14			

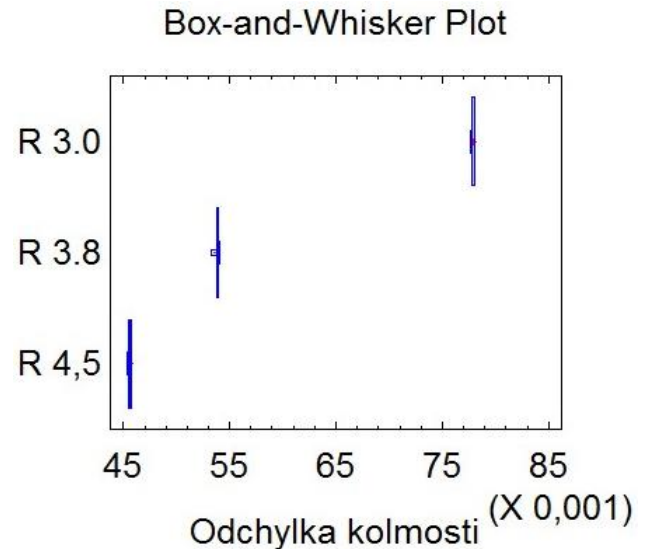
Tab. 6. Mnohonásobné porovnanie: Tukey HSD metóda

Rezná rýchlosť [m·min ⁻¹]	Počet	Priemer	Homogénna skupina	Rozdiel	Rozdiel priemerov	95% interval spoľahlivosti pre rozdiel priemerov	
						dolná hranica	horná hranica
R 3,0	5	0,0456	X	R 3,0 – R 3,8 *	0,0241	0,023799	0,024401
R 3,8	5	0,0538	X	R 3,0 – R 4,5 *	0,0323	0,031999	0,032601
R 4,5	5	0,0779	X	R 3,8 – R 4,5 *	0,0082	0,007899	0,008501

2.3 Mnohonásobné porovnanie

Pomocou testov mnohonásobného porovnávanía sa teraz otestuje ktoré priemerné hodnoty odchýlky kolmosti reznej plochy sa významne štatisticky líšia a ktoré nie. V tomto príspevku sa použila Tukeyho HSD metóda. V tab. 6 sú homogénne skupiny označené písmenom X v rovnakom stĺpci a štatisticky významný rozdiel medzi dvojicami rezných rýchlostí

označený *. Z výsledkov vidieť, že Tukeyho HSD metóda určila tri homogénne skupiny. Je zrejme, že vplyv reznej rýchlosti na odchýlku kolmosti reznej plochy je štatisticky významne odlišný pre každú dvojicu rezných rýchlostí.



Obr. 1. Box-plot pre tri rezné rýchlosti

Z krabicového grafu na obr. 1 je vidieť, že zmena reznej rýchlosti má vplyv na odchýlku od kolmosti reznej plochy. Z nameraných výsledkov a ich porovnaní je možné konštatovať, že s rastúcou reznou rýchlosťou klesá hodnota odchýlky kolmosti reznej plochy.

ZÁVER

V predloženom príspevku sa študoval vplyv reznej rýchlosti na kolmosť reznej plochy po rezaní laserom na experimentálnych vzorkách antikorozynej ocele X5 Cr Ni 1810. Vplyv reznej rýchlosti na odchýlku kolmosti reznej plochy sa analyzoval pomocou jednofaktorovej ANOVA. Ako metóda mnohonásobného porovnávanía sa použila Tukeyho

HSD metóda. Testy sa robili na hladine významnosti $\alpha = 0,05$.

- Vzájomné porovnanie jednotlivých skúšobných vzoriek ukázalo, že so zvyšovaním reznej rýchlosti sa znižuje odchýlka kolmosti reznej plochy.
- Pomocou ANOVA sa zistilo, že rozdielne rezné rýchlosti pri laserovom rezaní antikorozynej ocele X5 Cr Ni 1810 majú štatisticky významný vplyv na odchýlku kolmosti reznej plochy.
- Pomocou Tukeyho HSD metódy mnohonásobného porovnávania sa zistilo, že všetky tri rezné rýchlosti dávajú významne rozdielne výsledky.

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol vďaka podpore projektu KEGA č. 029ŽU-4/2022 s názvom „Implementácia princípov blended learningu do výučby predmetu Numerické metódy a štatistika.“ Za poskytnutie nameraných údajov a konzultácie autori ďakujú Ing. Andrejovi Zrakovi, PhD. z KTI SjF ŽU.

LITERATÚRA

[1] RADEK, N. - ANTOSZEWSKI, B. (2009): *Influence of laser treatment on the properties of*

electro-spark deposited coatings. Kovové materiály - Metallic Materials 47, pp. 31-38.

[2] MEŠKO, J. - ZRAK, A. - NIGROVIČ, R. - NIKOLIČ, R. (2018): *The effect of selected technological parameters of laser cutting on the cut surface roughness.* Tehnički Vjesnik = Technical Gazette, Vol. 25 4, pp. 997-1003.

[3] MEŠKO, J. - ZRAK, A. - NIGROVIČ, R. (2015): *Effect of cutting speed by laser on thickness of heat affected zone of mild steel S235.* Scientific Papers of the University of Pardubice: Series B, The Jan Perner Transport Faculty, Pardubice, Univerzita Pardubice, pp. 99-104.

[4] VAJDOVÁ, A. - MIČIETOVÁ, A. - MEŠKO, J. - ZRAK, A. (2014): *Cust evaluation after thermal and mechanical cutting of materials.* Technológ, Vol. 6, N. 2, pp. 59-64.

[5] MEŠKO, J. - ZRAK, A. - NIGROVIČ, R. (2015): *The influence of the cutting speed for the squareness of cutting edge of steels S235 and X5 Cr Ni1810 using laser cutting.* Technológ, Vol. 7, N. 3, pp. 70-73.

[6] ANDEĽ, J. (1998): *Statistické metódy.* Praha, Matfyzpress.

[7] MONTGOMERY, D.C. - RUNGER, G.C. (2003): *Applied Statistics and Probability for Engineers.* John Wiley & Sons.

Numerický výpočet parametrov zjednodušeného matematického modelu skúšobného prúdového a napät'ového impulzu

Zuzana Sedliáčková, Mgr., PhD.*

Katedra aplikovanej matematiky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: zuzana.sedliackova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 4963

Radoslav Chupáč, RNDr., PhD.

Katedra aplikovanej matematiky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: radoslav.chupac@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 4954

Numerical calculation of parameters of a simplified mathematical model of a trial current and voltage pulse

Abstract: The solution of electromagnetic compatibility and resistance of equipment to atmospheric discharges is a very important issue in the development and testing of electrotechnical and electronic equipment. The paper presents a numerical calculation of the parameters of a simplified mathematical model of a trial current and voltage pulse, which is defined by the IEC 61000-4-5 standard. The simplification consists in replacing the current pulse leading time, which is determined by said standard as 1.25 times the time from reaching 10% of the maximum amplitude to reaching 90% of the maximum amplitude, by a time from 0% to 100% of the maximum amplitude. For the solution of the equations for the calculation of the parameters of the simplified model by the numerical Newton - Raphson method, the initial approximation of the solution is determined and the cases when the solution does not exist are determined.

ÚVOD

Pre potreby ochrany človeka a majetku je nutné dodržiavať všetky požiadavky na ochranu pred možným výskytom prechodných prepätí atmosférického pôvodu prenášanými napájacou rozvodnou sieťou, vrátane priamych úderov bleskov do napájacej siete, a ochranu pred spínacími prepätiami. Preto pri vývoji elektronických zariadení, najmä tých, ktoré budú umiestnené v otvorenom teréne bez možnosti ochrany, musíme brať do úvahy atmosférické javy a vedieť ich matematicky opísať. Následne budeme môcť s matematickým opisom rázových vln prúdu a napätia modelovať zložitejšie deje v elektronických zariadeniach a správne dimenzovať prepäťové resp. nadprúdové ochrany, pozri [1-3].

Bleskové prúdy a napätia majú nepravidelný tvar, ktorý je potrebný pre výpočty a merania zjednodušiť. Tvar skúšobných impulzov, ktoré generujú generátory rázových vln, je daný obrázkami 2 a 3 v norme [4]. Prúdový, resp. napät'ový impulz je charakterizovaný týmito hodnotami:

- I_{max} – maximálna hodnota prúdu,
- U_{max} – maximálna hodnota napätia,

- Doba čela prúdového impulzu T_1 - je 1,25-násobok časového intervalu medzi okamžikmi, v ktorých okamžitá hodnota prúdu vzrastie z 10% na 90% svojej vrcholovej hodnoty.
- Doba čela napät'ového impulzu T_1 - je 1,67-násobok časového intervalu medzi okamžikmi, v ktorých okamžitá hodnota napätia vzrastie z 30% na 90% svojej vrcholovej hodnoty,
- Doba poltylu T_2 - je časový interval medzi virtuálnym začiatkom impulzu a okamžikom, kedy sledovaný priebeh poklesne na 50% svojej vrcholovej hodnoty.

Tvar impulzu sa udáva zlomkom T_1/T_2 v μs . Pri skúškach odolnosti zariadení pred nadprúdom je používaný skúšobný prúdový impulz s časmi čela a poltylu 8/20 μs , ktorý sa používa k simulácii nepriamych účinkov blesku resp. skúšobný napät'ový impulz s časmi čela a poltylu 1,2/50 μs pre skúšky prepäťovej odolnosti elektronických zariadení. Tolerancie uvedených časov čela a poltylu impulzov sú $\pm 20\%$ pre časy 8, 20 a 50 μs a $\pm 30\%$ pre čas 1,2 μs , pozri [4-5].

1 ZJEDNODUŠENÝ MATEMATICKÝ MODEL SKÚŠOBNEHO PRÚDOVÉHO IMPULZU

Časová závislosť prúdového impulzu môže byť podľa [2] matematicky modelovaná rozdielom dvoch exponenciálnych funkcií, t. j. funkciou:

$$i(t) = I \cdot \left(e^{-\frac{t}{t_2}} - e^{-\frac{t}{t_1}} \right), \quad (1)$$

kde $t \geq 0$ a parametre t_1 a t_2 sú kladné čísla.

Pri teoretických výpočtoch udávame tvar vlny pomerom T_h/T_m , kde T_h je čas, v ktorom funkcia (1) nadobúda maximálnu hodnotu I_{max} , a T_m je čas, v ktorom funkcia (1) nadobúda hodnotu $I_{max}/2$.

Potom teda platí:

$$i(T_h) = I \cdot \left(e^{-\frac{T_h}{t_2}} - e^{-\frac{T_h}{t_1}} \right) = I_{max}, \quad (2)$$

$$i(T_m) = I \cdot \left(e^{-\frac{T_m}{t_2}} - e^{-\frac{T_m}{t_1}} \right) = \frac{I_{max}}{2}. \quad (3)$$

Odtiaľ vyplýva, že:

$$e^{-\frac{T_h}{t_2}} - e^{-\frac{T_h}{t_1}} - 2 \cdot \left(e^{-\frac{T_m}{t_2}} - e^{-\frac{T_m}{t_1}} \right) = 0. \quad (4)$$

V čase T_h má funkcia (1) extrém, teda:

$$i'(T_h) = 0, \quad \left(e^{-\frac{T_h}{t_2}} \cdot \left(-\frac{1}{t_2} \right) - e^{-\frac{T_h}{t_1}} \cdot \left(-\frac{1}{t_1} \right) \right) = 0, \quad (5)$$

čo upravíme na tvar:

$$T_h = \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 - t_2} \cdot \ln \frac{t_2}{t_1}. \quad (6)$$

Parametre t_1 a t_2 vo funkcii (1) dostaneme riešením nelineárneho systému dvoch rovníc:

$$e^{-\frac{T_h}{t_2}} - e^{-\frac{T_h}{t_1}} - 2 \cdot \left(e^{-\frac{T_m}{t_2}} - e^{-\frac{T_m}{t_1}} \right) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 - t_2} \cdot \ln \frac{t_2}{t_1} - T_h = 0$$

Označme:

$$f_1(t_1, t_2) = e^{-\frac{T_h}{t_2}} - e^{-\frac{T_h}{t_1}} - 2 \cdot \left(e^{-\frac{T_m}{t_2}} - e^{-\frac{T_m}{t_1}} \right), \quad (8)$$

$$f_2(t_1, t_2) = \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 - t_2} \cdot \ln \frac{t_2}{t_1} - T_h = 0. \quad (9)$$

2 NEWTON-RAPHSONOVA METÓDA

Na riešenie systému (7) použijeme Newton-Raphsonovu metódu. Uvažujeme systém nelineárnych rovníc:

$$\begin{aligned} f_1(t_1, t_2) &= 0 \\ f_2(t_1, t_2) &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

kde f_1 a f_2 sú diferencovateľné funkcie na nejakej oblasti $\Omega \in R^2$ obsahujúcej riešenie systému.

Potom platí:

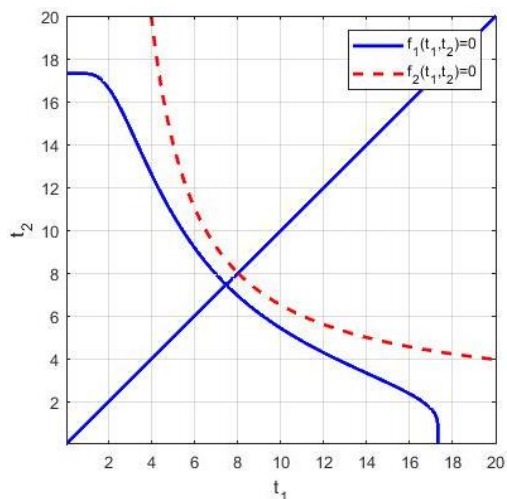
$$\begin{aligned} t_1^{(k+1)} &= t_1^{(k)} + \Delta t_1^{(k)} \\ t_2^{(k+1)} &= t_2^{(k)} + \Delta t_2^{(k)}, \end{aligned} \quad (11)$$

kde $k = 0, 1, 2, \dots$ a $\Delta t_1^{(k)}, \Delta t_2^{(k)}$ nájdeme riešením systému lineárnych rovníc:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f_1(t_1^{(k)}, t_2^{(k)})}{\partial t_1} & \frac{\partial f_1(t_1^{(k)}, t_2^{(k)})}{\partial t_2} \\ \frac{\partial f_2(t_1^{(k)}, t_2^{(k)})}{\partial t_1} & \frac{\partial f_2(t_1^{(k)}, t_2^{(k)})}{\partial t_2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta t_1^{(k)} \\ \Delta t_2^{(k)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -f_1(t_1^{(k)}, t_2^{(k)}) \\ -f_2(t_1^{(k)}, t_2^{(k)}) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

3 VÝPOČET PARAMETROV PRÚDOVÉHO IMPULZU

Podľa normy STN EN 61643-21/A1 [5] uvažujme prúdový impulz $8/20 \mu s$ a $I_{max} = 2000 A$. Pre hodnoty $T_h = 8 \mu s$ a $T_m = 20 \mu s$, systém (7) nemá riešenie, pozri obr. 1.

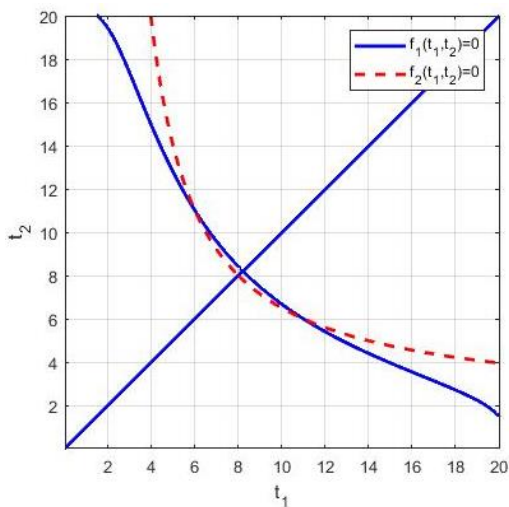


Obr. 1. Separácia koreňov systému (7) pre: $T_h = 8 \mu s$ a $T_m = 20 \mu s$ – riešenie neexistuje

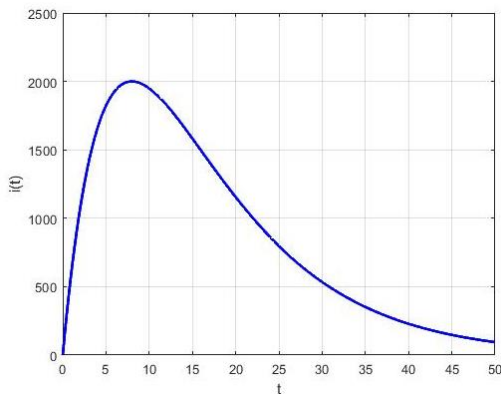
Vezmime $T_h = 8 \mu s$ a $T_m = 22 \mu s$, pričom hodnota $22 \mu s$ je stále v povolenej tolerancii $\pm 20 \%$ podľa normy [4]. Na separáciu koreňov systému (7), ako aj na ostatné výpočty, použijeme výpočtový systém Matlab (obr. 2).

Keďže funkcia (1) nadobúda kladné hodnoty, potom musí byť $t_2 > t_1$. Systém má jedno riešenie. Za začiatočnú aproximáciu riešenia vezmeme $t_1^{(0)} = 6 \mu s$ a $t_2^{(0)} = 11 \mu s$. Numerické riešenie systému rovníc Newton-Raphsonovou metódou je $t_1 = 5,98842 \mu s$,

$t_2 = 11,02299 \mu\text{s}$. Potom pre $I_{\max} = 2000 \text{ A}$, je $I = 9048,13650 \text{ A}$ a výsledný model je zobrazený na obr. 3.



Obr. 2. Separácia koreňov systému (7) pre: $T_h = 8 \mu\text{s}$ a $T_m = 22 \mu\text{s}$



Obr. 3. Výsledný model prúdového impulzu 8/22 μs s maximálnou hodnotou 2000 A

4 ZJEDNODUŠENÝ MATEMATICKÝ MODEL SKÚŠOBNÉHO NAPĚŤOVÉHO IMPULZU

Model skúšobného napätového impulzu je analogický modelu skúšobného prúdového impulzu, a teda časová závislosť napätového impulzu môže byť, podobne ako časová závislosť prúdového impulzu, matematicky modelovaná funkciou:

$$u(t) = U \cdot \left(e^{-\frac{t}{t_2}} - e^{-\frac{t}{t_1}} \right). \quad (13)$$

Podľa normy STN EN 61643-21/A1 [5] uvažujeme napätový impulz 1,2/50 μs a $U_{\max} = 10 \text{ kV}$. Potom parametre modelu opísaného rovnicou (13) sú: $t_1 = 0,20507 \mu\text{s}$, $t_2 = 70,10722 \mu\text{s}$ a $U = 10202,48357 \text{ V}$.

ZÁVER

Uvedený zjednodušený matematický model prúdového a napätového impulzu slúži na prvotný

odhad indukovaných prúdov resp. napätí pri vývoji a skúšaní elektrotechnických a elektronických zariadení citlivých na atmosférické javy. Rovnice (1) a (13) s parametrami, vypočítanými v častiach 3 a 4, môžu byť použité ako jeden zo vstupných parametrov zložitejších matematických modelov pre výpočty v oblasti elektromagnetickej kompatibility a odolnosti voči atmosférickým výbojom, ktoré sú nápomocné pri výbere a dimenzovaní vhodných, napr. polovodičových ochranných prvkov typu transilové diódy a varistory, prípadne k návrhu pasívnych RLC filtrov určených na potlačenie rušenia z atmosférických výbojov v komunikačných zariadeniach.

Ďalší výskum bude smerovať k spresneniu parametrov modelu a priblíženiu modelu k požiadavkám normy [4], teda k zostaveniu zložitejšej sústavy nelineárnych rovníc, ktoré budú odrážať časové priebehy skúšobných napätových a prúdových impulzov bez zjednodušujúcich podmienok. Spresnenie bude zamerané na detailnejší výpočet doby čela impulzu so zapracovaním požiadaviek na jeho definíciu.

PodĎakovanie

Tento článok vznikol vďaka podpore v rámci programu KEGA pre projekt č. 029ŽU-4/2022 s názvom: Implementácia princípov blended learningu do výučby predmetu Numerické metódy a štatistika.

LITERATÚRA

- [1] VESTENICKÝ, P. (2004): *Solution of some technical problems in marker and marker locator development*. Communications – Scientific letters of the University of Žilina, vol. 4, pp. 103-106. ISSN 1335-4205.
- [2] ROUS, Z. (1981): *Ochrana sdělovacích vedení a zařízení proti přepětí*. NADAS, Praha.
- [3] HUNA, R. - MACALÁK, P. - JANEČEK, K. (2017): *Prvky prepětových ochrán (SPD) na stípcích veřejného nn distribučního rozvodu*. 46. konferencia elektrotechnikov Slovenska, Bratislava, 29-30.3, pp. 34-50.
- [4] IEC 61000-4-5 (2014): *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test*. 3rd edition. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- [5] STN EN 61643-21/A1 (2010): *Nízkonapätové ochrany pred prepätím. Časť 21: Ochrany pred prepätím zapojené do telekomunikačných a signálnych sietí. Požiadavky na spôsobilosť a skúšobné metódy*. Úrad pre normalizáciu, metrologiu a skúšobníctvo Slovenskej republiky, Bratislava.

Influence of filtration on the deformation resistance of aluminium alloy

Ján Moravec, doc. Ing., PhD.*

Department of Technological Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: jan.moravec@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2764

Elena Kantoríková, Ing., PhD.

Department of Technological Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: elena.kantorikova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2763

Abstract: The paper discusses that the filtration of castings influences the deformed resistance. The article describes the change in toughness in castings using filtration during casting and subsequent changes in mechanical properties after forming these castings. Subsequently, the volumetric compressibility of samples of the same material was monitored. The chosen material is aluminium alloy due to good formability. The mechanical properties after forming on the filtered casting were compared with the casting without filtration. The essence of the tests is to ensure the behaviour of the material in two mutually different environments and to compare the size of the barrel and the susceptibility to cracking on the circumference of the samples. The experiment confirmed the effectiveness of filtering and its effect on the forming force.

INTRODUCTION

Metal forming is of great economic importance in various fields of mechanical engineering. The possibilities offered by unconventional forming of metals processing are not yet fully exhausted and can be used to significantly increase the mechanical properties of metal alloys [1]. Basic information about the technical materials is provided by mechanical tests. The essence of the test methods is the action of external forces on the tested material and subsequent determination of metals mechanical characteristics. The materials are processed during the production by various technological procedures, therefore they must also have guaranteed technological properties, which are a necessary condition for the implementation of the given technological operation. One of the most important technological property is formability [1, 2]. Technological properties (in general) are difficult, resp. they cannot be expressed at all in precisely definable physical quantities. Technological tests must be carried out in conditions approaching the real situation in practice [3, 4].

1 THEORETICAL FOUNDATIONS

The transformation resistance is essentially the deformation resistance, which the metal puts on the forming tool during permanent deformation, under certain specific conditions [8]. The transformation resistance as a stress acting against the forming force refers to the cross-section of the formed body, perpendicular to the direction of the applied force.

The direction of the deformation resistance vector falls within the direction of the forming force and is actually a reaction of the forming pressure, resp. strain. Its distribution on a given cross-section is in most cases uneven. It is a technological quantity that is quite difficult to determine [5]. The most important conditions affecting the deformation resistance include, for example: the nature of the material, deformation temperature, deformation rate, external friction tool/metal, degree of deformation and strengthening of metal, ratio of contact areas and free area during deformation, etc. [5, 6].

During thermoforming, the transformation resistance is constant. If it is cold formed, the deformation resistance increases with increasing degree of deformation and therefore it is necessary to take into account the mean value of deformation resistance at the beginning and at the end of deformation. *Gubkin's relation* [7] is suitable for the ramming process:

$$K = K_p \cdot w \cdot m \cdot z \cdot u \quad [\text{MPa}], \quad (1)$$

where K - is the technological transformation resistance [MPa],

K_p - transformation strength (resistance at a given forming temperature [MPa],

w - factor including the effect of strain rate,

m - factor including the effect of external friction and the shape of the deformation zone,

z - a factor including inhomogeneity of the structure and uneven temperature distribution in the rammed material,

u - a factor including a limitation on the validity of the law of similarity.

1.1 Filtration of aluminium alloys during casting

During filtration of aluminium alloys with ceramic foam filters, primary inclusions trapping and inertial/hydrodynamic forces are applied. The main part of the refinement occurs in the convergent part of the filter cell [9, 10]. In the divergent part, the probability of inclusions refinement is lower. The trapping of inclusions occurs by mechanical trapping of particles larger than the mean pore size of the filter, or by settling of particles in the blind spaces of the filter by changing the velocity and direction of flow at smaller particles than the pore size of the filter [11]. The efficiency of the filter can be expressed by the relation:

$$\eta = \frac{C_{vst} - C_{vyst}}{C_{vyst}} = 1 - 1^k \cdot H, \quad (2)$$

where C_{vst} - input particle concentration [%],

C_{vyst} - output particle concentration [%],

H - filter thickness [mm],

k - a filter efficiency coefficient.

2 EXPERIMENTAL PART

Based on a theoretical analysis of the filtration influence on the final quality of castings and their mechanical properties, a methodology consisting of two interdependent parts was chosen. Two melts of test samples were made. One melt was done without filtration. The second melting was performed using a ceramic filter with 20 ppi. The ceramic foam filter was chosen because it has a maximum coefficient of local resistance according to [3]. An *AlSi12Mn* alloy was used for the experiment, which is often used in the automotive industry, e.g. in the manufacture of components for internal combustion engines, but also in the manufacture of components for the defense industry, aerospace. The samples chemical composition is shown at Tab.1.

Tab. 1. Chemical composition of the samples

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti
(%)	12,7	0,12	0,01	0,2	0,01	0,014

The samples were turned to a diameter of 9 mm and cut to a length of 12 mm to obtain cylindrical shape. Samples were intended for testing of transformation resistance. The aim of evaluation was to determine (in an integral way) the resulting value of

deformation resistance. The samples were deliberately designed so that the state of stress during transformation was as close as possible to uniaxial stress. The essence of the test is the application of a Sharpy hammer, where a pendulum with a weight of 25 kg has a stroke $H_{max} = 1.5$ m.

Because this test is closer to static ramming than to classical dynamic tests, the evaluation can be made according to relation (3):

$$A = k_m \cdot V \cdot \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right) = k_m \cdot V \cdot \phi \quad [\text{J}], \quad (3)$$

where A - transformation work consumed to deform the sample [J],

K_m - mean deformation resistance [MPa],

V - volume of compressed sample [mm³],

h_0 - initial height of the compressed sample [mm],

h_1 - height of the sample after compression [mm],

ϕ - logarithmic degree of transformation (1), i.e.:

$$\phi = \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right). \quad (4)$$

The transformation resistance was determined at ambient temperature $t = 20$ °C. The experimental samples were compressed at the selected material reduction in the range of 10 ÷ 60 %. The measured values of deformation work, volume and degree of deformation were fitted to relation (3), from which the values of mean deformation resistance at the indicated temperature were calculated. After adjusting equation (3), a relation is obtained for the calculation of the specific work a_m , i.e. the work required to convert the unit of volume:

$$a_m = \frac{A}{V} \quad [\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}], \quad (5)$$

where V - volume of compressed sample [cm³],

A - transformation work consumed to convert the sample [J].

For the described measurement, the method of determining the deformation resistance using a rotary cam plastometer was used. Both groups of samples (unfiltered and filtered) were evaluated and the results are summarized in Fig. 2.

In Tab. 2 and Tab. 3 represents: D_0 - initial sample diameter, D_1 - final sample diameter, H_0 - initial sample height, H_1 - final sample height, n - plastometer cam rotation, v - plastometer cam speed, ε - average speed. When comparing the graphs of the test procedure for unfiltered and filtered samples, it can be seen that with filtered material, compared to

unfiltered, with the same chemical composition, the total required forming work.

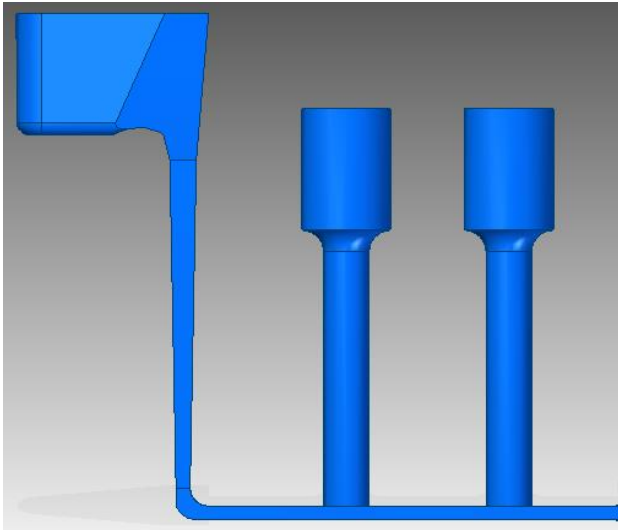


Fig. 1. Schematic of gating system design

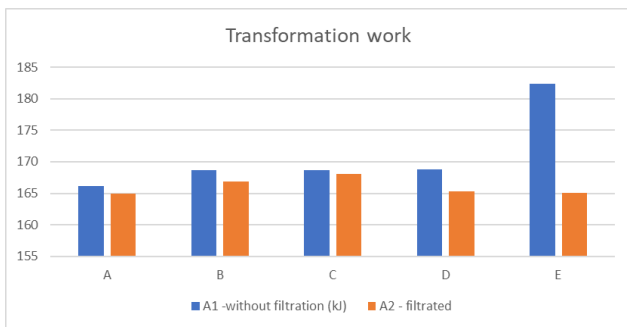


Fig. 2. Results after simple compression of the samples at ZDM 30 machine

Tab. 2. Obtained values for unfiltered samples

Sample	D_0 [mm]	H_0 [mm]	D_1 [mm]	H_1 [mm]	n [$l \cdot \text{min}^{-1}$]	v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
1A	9.18	11.98	10.69	9.32	180	0.31
2B	9.12	11.99	10.61	9.30	180	0.31
3C	9.17	11.95	11.90	7.48	358	0.63
4D	9.13	12.20	11.92	7.51	358	0.63
5E	9.14	12.10	11.85	7.50	358	0.63

Tab. 3. Obtained values for filtered samples

Sample	D_0 [mm]	H_0 [mm]	D_1 [mm]	H_1 [mm]	n [$l \cdot \text{min}^{-1}$]	v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
2A	9.10	12.20	10.65	9.13	180	0.31
2B	9.15	12.01	10.64	9.11	180	0.31
2C	9.12	12.21	11.84	7.49	358	0.63
2D	9.14	12.22	11.91	7.51	358	0.63
2E	9.13	12.20	11.81	7.50	358	0.63

Cylindrical bodies with dimensions of 12x18 mm were used as test samples. Experimental material was an *Al-Si* alloy with the chemical composition according to Tab. 1. The group of samples was 5 + 5 for filtered, and the same number of 5 + 5 for unfiltered samples. After performing this part of the experimental work, the samples were compressed in a liquid medium with the same reduction.

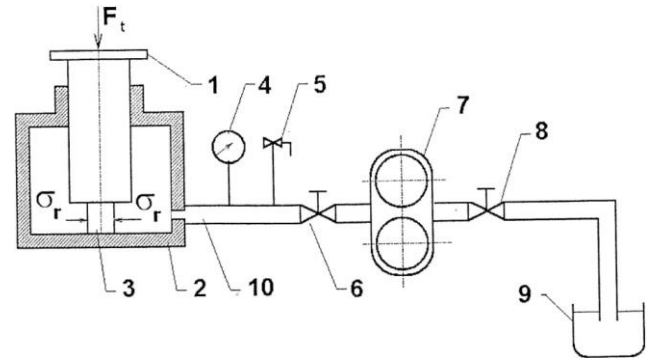


Fig. 3. Test set-up for compression of samples in a liquid: 1 - punch, 2 - forming chamber, 3 - sample, 4 - manometer, 5 - safety valve, 6, 8 - valves, 7 - gear pump, 9 - tank, 10 - piping

3 COMPRESSION

The same methodology was applied as in the determination of the deformation resistance of the samples described above. The essence of the tests is to ensure the behaviour of the material in two mutually different environments and to compare the size of the barrel and the susceptibility to cracking on the perimeter of the samples.

The tests were performed in the so-called simple arrangement, i.e. on a test device of the ZDM - 30 type, the bodies were subjected to compression to reduce approx. 40 %. Five pieces of filtered and five pieces of unfiltered samples were compressed.

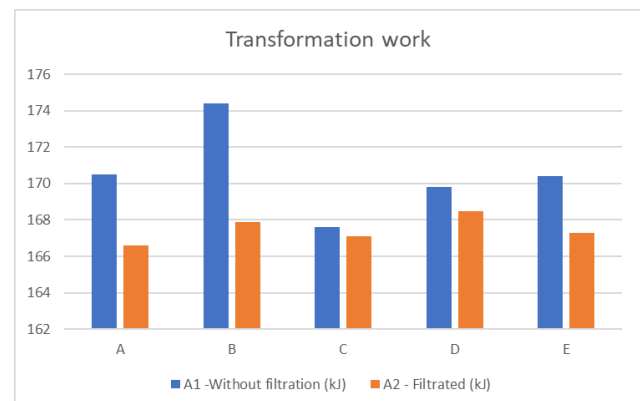


Fig. 4. Results after compression of the samples in the liquid at ZDM 30 machine

Since the law of volume stability applies, the test sample does not cause a change in the cavity (space filled with liquid), as is clear from the above. During the compression process, the liquid moves in all directions equally (pressure is the same, as follows

from Pascal's law), but when the pressure threshold is reached, the liquid moves (flow) against the direction of movement of the mold and front of the cavity, causing part of the liquid volume to flow out of the cavity [12-14].

With an ideal condition and seal, the liquid pressure would also cause the test chamber to deform. The effect of the oil (liquid) has proven to be positive, replacing the "retainer" of the sample. The ductility of the material is greatly influenced by the stress ratios during forming. When forming under all-round pressure, extremely large deformations can be achieved in one operation.

CONCLUSION

It is known from theoretical knowledge that pressure force will close the cracks, and tensile forces will open cracks. Considerable attention must be paid to the application of all-round pressure, as they have a significant effect on the plastic properties of metals. Increasing plasticity in conditions of all-round pressure makes it possible to form even materials, that cannot be classically formed. Submitted paper fits well into this spectrum of progressive methods and in the future it will certainly be interesting to perform tests in these conditions with different materials and try to apply this specific method in a company with a small series of production of works.

When comparing the graphs of the test procedure for unfiltered and filtered samples, it can be seen that with filtered material (Fig. 2) compared to unfiltered (Fig. 1) with the same chemical composition of the material, the total required forming work is lower on average by 38 %. Due to the overall design of the tests and their evaluation, the fully obtained results and values of the mean deformation resistances cannot be considered exact. Nevertheless, the findings obtained clearly indicate that the basic indicative values can be successfully used in practice. It is possible to compare with sufficient accuracy the effect of filtration on specific castings and on the change in the values of mean deformation resistances at a given mean strain rate of carried test.

The stated goal of the paper has been met and the above knowledge will broaden the horizon of knowledge in this area.

Acknowledgements

This work was supported by project KEGA 022ŽU-4/2021 by Scientific Grant Agency of Ministry of Education of Slovak Republic.

REFERENCES

- [1] ELFMARK, J. (1986): *Plasticity of Metals* Ostrava, VSB.
- [2] HRIVNAK, A. - POLAK, K. (1989): *Theory forming and forming tools*. Bratislava 1989.
- [3] JOHNSON, W. - MAMALIS, A. G. (1998): *Plasticity and metal forming*. Cambridge.
- [4] MORAVEC, J. (2015): *Theory Metals Forming*. EDIS pub. House University of Zilina, 332 pp. ISBN 978-80-554-1095-1.
- [5] NIKEL, Z. (1990): *Theory Forming*. FMFI, VŠB-TU Ostrava.
- [6] POLAK, K. (1985): *Theory forming and forming tools*. SVŠT Bratislava.
- [7] SCHEY, J. A. (1970): *Metal deformation Processes*. Marcel Debbes.
- [8] GREGUS, M. - SVEC, M. - SEDA, V. (1985): *Ordinary differential equations*. ALFA Bratislava.
- [9] STOROZEV, M. V. - POPOV, J. A. (1978): *Theory of Metal forming*. Alfa Bratislava.
- [10] BLASČÍK, F. - POLAK, K. (1985): *Theory Forming*. Alfa/SNTL Bratislava.
- [11] POCTA, B. (1966): *Fundamentals of metal forming theory*. SNTL Praha.
- [12] KUBA, F. (1982): *Flexibility theory and selected applications*. SNTL/Alfa Praha.
- [13] BILIK, J. - KAPUSTOVA, M. - RIDZON, M. (2015): *Theory Forming*. Alumni Press, Trnava, ISBN 978-80-8096-215-9.
- [14] KAISER, J. et al. (1990): *Flexibility and plasticity*. Alfa Bratislava, ISBN 80-05-00579-2.

Техническое состояние автомобильной техники как фактор безопасности дорожного движения

Александр Петрович Кравченко, д.т.н., проф.

Кафедра автомобилей и транспортных технологий, Факультет компьютерно-интегрированных технологий, мехатроники и робототехники, Государственный университет «Житомирская политехника»,

ул. Чудновская 103, 100 02 Житомир, Украина.

E-mail: avtoap@ukr.net, Тел.: + 38 050 91 38 228

Екатерина Александровна Кравченко, к.т.н., доц.*

Кафедра транспорта и подъёмно-транспортных машин, Машиностроительный факультет, Жилинский университет в Жилине,

ул. Универзитна 8215/1, 010 26 Жилина, Словацкая республика.

E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Тел.: + 421 41 513 2660

Ян Янович Дижо, к.т.н., доц.

Кафедра транспорта и подъёмно-транспортных машин, Машиностроительный факультет, Жилинский университет в Жилине,

ул. Универзитна 8215/1, 010 26 Жилина, Словацкая республика.

E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Тел.: + 421 41 513 2560

Мирослав Янович Блатницкий, к.т.н., доц.

Кафедра транспорта и подъёмно-транспортных машин, Машиностроительный факультет, Жилинский университет в Жилине,

ул. Универзитна 8215/1, 010 26 Жилина, Словацкая республика.

E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Тел.: + 421 41 513 2570

The technical state of automotive technology as a factor of road safety

Abstract: The results of a survey of the reliability of automobile trains in the composition of *MERCEDES-BENZ* 1844 *ACTROS LS* trucks and semi-trailers *KÖGEL*, *KRONE*, *SCHMITZ* at different stages of operation are presented. The malfunctions of units and assemblies are revealed, regularities are established, the causes of malfunctions and failures are determined.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение количества автомобилей стало одной из причин существенного роста абсолютных и относительных показателей аварийности, существенно ухудшило ситуацию на автомобильных дорогах [1]. Это особенно актуально для *Украины*, где интенсивность движения транспортных средств выросла в несколько раз и уже сейчас достигла нормативных значений уровня развития автомобильной инфраструктуры, составляя более 200 автомобилей на тысячу жителей. Автомобильный парк страны наряду с динамичным ростом в последние 10 лет, становится все более технически и морально устаревшим. Сравнивая удельные показатели *Украины* с аналогичными европейскими показателями, можно отметить, что количество

погибших в дорожно-транспортных происшествиях (*ДТП*) на 1000 автомобилей составило: в *Украине* – 0.79, в *Польше* 0.71, во *Франции* – 0.24. Количество погибших в *ДТП* в *Украине* составляет приблизительно 14 % от погибших в *ДТП* во всей *Европе* при относительном количестве автомобилей около 2.2 %. Динамика изменения последствий *ДТП* за последнее десятилетие с учетом спада в объемах транспортной работы и пробега также негативная. По оценкам экспертов убытки народного хозяйства *Украины* от *ДТП* за каждый год оцениваются почти в 3.5 % *ВВП* [2].

Увеличение количества *ДТП* связано с несовершенной технической политикой на автомобильном транспорте, которая не обеспечивает безопасность, эксплуатационную надежность и качество автомобильной техники.

Украина уже давно достигла критического уровня износа транспортных средств, поскольку большинство, завезенных в страну, уже достигли более 20 летнего возраста.

Еще в 2005 г. доля транспортных средств, производимых в ближнем зарубежье (*Россия*) и эксплуатируемых свыше 5 лет, превышало 69 %, что совместно с подержанными иномарками

возрастом более 10 лет составляло более 81 % автомобильного парка *Украины*.

Самая высокая вероятность возникновения аварийной обстановки наблюдается при эксплуатации транспортных средств с неисправностями шин, осветительных и светосигнальных приборов и тормозных систем (табл. 1).

Табл. 1. Распределение ДТП в *Украине* по видам неисправностей транспортных средств [3]

Неисправные элементы и системы	Доля ДТП, %	
	Все транспортные средства	Транспортные средства индивидуальных владельцев
Шины (разрыв, износ протектора)	24.2÷25.8	26.4÷26.8
Осветительные и светосигнальные приборы	23.1÷24.9	25.3÷25.9
Рабочая и стояночная тормозная системы	17.5÷16.5	14.3÷14.7
Рулевое управление	14.1÷14.4	6.6÷6.7
Колеса (заклинивание, отрыв)	4.2÷4.6	3.4÷3.8
Сцепное устройство	1.2÷1.6	0.7÷1.0
Прочие	7.0÷6.8	6.6÷7.0

Заслуживает внимания мнение сотрудников, принимающих непосредственное участие в обеспечении безопасности дорожного движения. По их мнению, техническое состояние транспортных средств находится на третьем месте после состояния автомобильных дорог и низкой транспортной дисциплины на дорогах [4].

На основании этого можно сделать вывод, что:

- Одной из причин аварийности на дорогах является техническая неисправность транспортных средств;
- Аналитические зависимости, применяемые при анализе *ДТП*, учитывают ограниченное число факторов, что затрудняет разработку эффективных мероприятий по снижению аварийности;
- Официальные статистические данные представляют заниженные величины.

Целью работы явилось обследование контрольных групп автомобилей-тягачей и прицепного состава с выявлением характерных нарушений работоспособности и определения закономерностей затрат времени на устранение неисправностей.

1 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Большая часть автопоездов, выполняющих грузовые перевозки, относится к ведущим мировым производителям, значительную долю которых составляют автомобили-тягачи *MERCEDES-BENZ 1844 ACTROS LS*, полуприцепы производителей: *KÖGEL, KRONE*,

SCHMITZ. Авторитет производителей не вызывает сомнений, однако данные федеральных органов *Германии* свидетельствуют о том, что в условиях реальной эксплуатации большинство грузовиков не подтверждают заявленных характеристик [5].

В обследовании приняли участие 160 единиц автомобилей-тягачей и по 50 единиц полуприцепов.

Обработка данных обследования автомобилей-тягачей в течении первого года эксплуатации показала, что большинству автомобилей потребовалось посещение фирменных сервисных центров для устранения нарушений работоспособности. При среднем годовом пробеге 89.4 тыс. км для устранения дефектов, выполнения регулировочных и диагностических работ автопоездов около 300 раз необходимо было представить на фирменные сервисные центры. За этот период рассмотрено около 800 заявок по устранению нарушений работоспособности тягачей. За 300 дней эксплуатации автопоездов поток обращений является пуассоновским и возникновение неисправностей удовлетворительно аппроксимируется линейной зависимостью с коэффициентом 0.8717 (рис. 1).

Проведенный анализ посещения фирменных сервисных центров позволил распределить их по видам работ на четыре группы: замена деталей, узлов, агрегатов, регулировочные работы, крепёжные работы, диагностические работы (табл. 2).

К наиболее характерным работам первой группы относятся: замена рулевых тяг, замена сальника ведущей шестерни главной передачи, замена топливного бака, замена торсиона кабины, ремонт или замена автономного отопителя, замена тахографа. Замены форсунок, электронных блоков управления агрегатов и узлов, дисплеев, воздушных и масляных трубопроводов, датчиков, кабеля ABS, генератора, амортизаторов, тормозных механизмов, аккумуляторной батареи, магнитофона, холодильника составили 29,0% от общего количества (табл. 3).

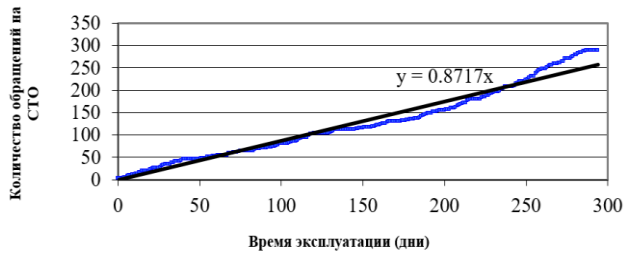


Рис. 1. Количество обращений в гарантийный ремонт

Табл. 2. Распределение нарушений работоспособности по видам работ

Вид работ	К общему количеству, %	Вид работ	К общему количеству, %
Замена деталей, узлов, агрегатов	57.5	Крепежные работы	10.1
Регулировочные работы	22.9	Диагностические работы	9.5

Табл. 3. Распределение нарушений работоспособности по видам работ

Наименование детали, узла, агрегата	К общему количеству, %	Наименование детали, узла, агрегата	К общему количеству, %
Торсион кабины	21.0	Тахограф	3.3
Автономный отопитель	20.5	Топливный бак	2.3
Рулевые тяги	8.6	Турбокомпрессор	1.7
Стекла фонарей	8.6	Другое	29.0
Сальник ведущей шестерни главной передачи	7.2		

Вторая группа посещений связана с регулировочными работами: крана управления подвеской (61.1%), углов установки колес и сцепного устройства (17.4%), фар (16.8%), двигателя на токсичность (4.7%).

Третья группа связана с выполнением крепежных работ: обтекателей и спойлеров (56.4%), крана уровня подвески (16.6%), топливного бака, холодильника, автономного отопителя и пр. (27.0%).

К диагностическим работам относятся: диагностика компьютерной системы (35.7%), диагностика топливной системы (11.9%), диагностика тормозов, турбокомпрессора, электрооборудования, холодильника составила 13.1%.

Характеристика затрат времени на устранение неисправностей на интервалах пробега приведена в табл. 4. Гистограммы и соответствующие им распределения Пуассона для количества обращений в ремонт в расчете на один день и на одну неделю приведены на рис. 2. Расчетные 95% - ные доверительные границы параметра μ распределения Пуассона определены как корни уравнения $\sqrt{292(0.8717 - \mu) / \sqrt{\mu}} = \pm 1.96$. Для количества обращений в ремонт в течение суток получены 95% - ные доверительные границы 0.767 и 0.980, для количества обращений в ремонт в течение недели соответственно – 6.358 и 5.796.

Следует отметить, что простой автопоездов с небольшим временем устранения неисправностей (до 2 ч. и от 2 до 4 ч.) составил соответственно 7.8% и 7.6%. Постояй автопоездов с временем устранения неисправностей от 4 до 8 ч. составил 22.2%. Простой автопоездов с временем устранения неисправностей более 8 ч. составил 62.4%. Замены коробки передач, заднего моста и блоков управления агрегатов потребовали соответственно 72, 114 и 216 ч.

В целом появление неисправностей в автомобилях описываются нормальным законом распределения: $f(t) = 0.0325 e^{-\frac{(t-45)^2}{302.18}}$. Выявленные нарушения технического состояния по своему виду, характеру, причинам возникновения и времени устранения значительно разнятся между собой. Исследование законов распределения соответствующих наработок на отказ показывают, что имеют место симметричные, но в большем количестве – ассиметричные распределения; характеристика некоторых, описываемых бета-распределением, приведена в таблице 5. Ассиметричные законы распределения в ряде случаев указывают на имеющиеся в конструкции автомобилей или технологии их сборки недоработок [6]. Изучение этих законов, позволило глубже познать природу отказов, их физическую сущность, выработать стратегию их предупреждения, моделировать и прогнозировать нарушения технического состояния автомобилей.

Табл. 4. Статистическая характеристика времени устранения дефектов

Наименование показателей	Интервалы пробега, тыс. км				
	0÷25	25÷50	50÷75	75÷100	100-125
Математическое ожидание, ч	13.0	8.9	12.3	14.1	20.2
Среднеквадратическое отклонение, ч	9.64	12.87	9.73	25.61	27.02

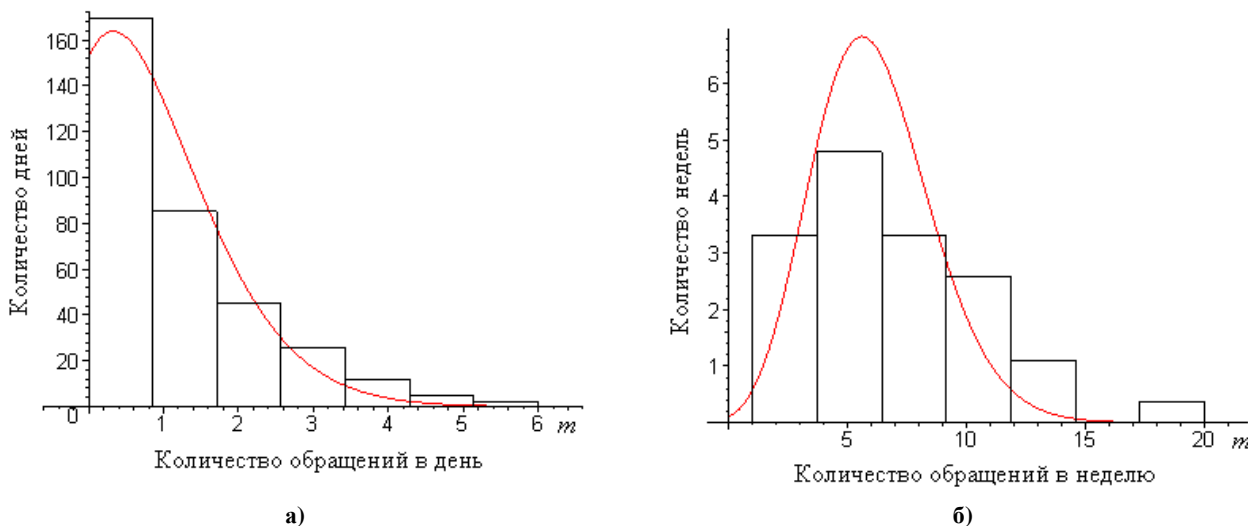


Рис. 2. Характеристика количества обращений в расчете на один день а) и на одну неделю б)

Табл. 5. Статистическая характеристика появления неисправностей и отказов

Наименование агрегата, системы	Закон распределения	Плотность распределения
Агрегаты	Бета-распределение	$0.175 \cdot 10^{-5} \cdot (8.71+t)^{1.75} \cdot (84.06-t)^{1.67}$
Подвеска		$1.054 \cdot (0.52+t)^{0.29} \cdot (73.43-t)^{0.04}$
Рулевое управление		$0.0008 \cdot (-3.89+t)^{1.30} \cdot (72.46-t)^{0.52}$
Электрооборудование		$0.3771 \cdot (-4.11+t)^{0.21} \cdot (73.88-t)^{0.14}$
Топливный бак		$0.00001 \cdot (25.06+t)^{2.05} \cdot (71.09-t)^{0.26}$
Сальник ведущей шестерни главной передачи		$0.0022 \cdot (7.60+t)^{0.82} \cdot (72.45-t)^{0.58}$
Автономный отопитель		$0.3138 \cdot (7.92+t)^{0.71} \cdot (69.80-t)^{0.39}$

Сбор информации по полуприцепам осуществлялся в два этапа с разным средним пробегом. На первом этапе характерными нарушениями работоспособности являются: отказы и неисправности тормозной системы, отказы или нарушения работы ABS, износ деталей навесных и запорных элементов ворот и бортов, нарушения герметичности пневматической системы, трещины в сварных соединениях, нарушена работоспособность крана уровня подвески, нарушается крепление ресиверов, смещения и перекосы мостов (рис. 3). Некоторые закономерности и статистическая характеристика видов нарушений

работоспособности полуприцепов приведены в табл. 6.

Перекося осей является причиной перерасхода топлива, неравномерного и повышенного износа протектора шин; приводит к смещению центра тяжести полуприцепа, а в сложных дорожных условиях нарушает динамику поведения автопоезда.

Повторные обследования прицепного состава производились со средним пробегом SCHMITZ – 230 тыс. км, KRONE – 303 тыс. км, KÖGEL – 440 тыс. км. Результаты обследования показывают, что характер распределения отказов и неисправностей значительно изменился. В некоторых системах количество отказов

уменьшилось (например, кран уровня подвески). Но при этом обнаружены отказы и неисправности, которые ранее не наблюдались (поломка и ослабление крепления деталей каркаса, выход из строя элементов

электрооборудования, поломка и нарушение крепления полов); обрыв и ослабление крепления стремянок, перекос и смещение осей, в небольшом количестве, но остались (табл. 7).



а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Некоторые нарушения работоспособности полуприцепов: а - трещины тормозного диска; б - износ регулировочной пластины; в - поломка кронштейна амортизатора; г - износ протектора шины от перекоса оси

Табл. 6. Статистическая характеристика отказов и неисправностей полуприцепов

Название прицепа	\bar{M} , тыс. км	σ , тыс. км	α	β	Плотность распределения
<i>KÖGEL</i>	244.7	43.36	6.83	262.56	$0.57 \cdot \left(\frac{t}{262.56}\right)^{5.83} \cdot e^{-\left(\frac{t}{262.56}\right)^{6.83}}$
<i>KRONE</i>	139.55	37.05	4.923	152.753	$0.65 \cdot \left(\frac{t}{160.67}\right)^{7.214} \cdot e^{-\left(\frac{t}{160.97}\right)^{8.214}}$
<i>SCHMITZ</i>	75.24	29.29	2.962	84.232	$0.7 \cdot \left(\frac{t}{84.232}\right)^{1.962} \cdot e^{-\left(\frac{t}{84.232}\right)^{2.962}}$

Причиной поломки и ослабления крепления деталей каркаса является обрыв кронштейнов стоек и перемычек каркаса, износ деталей в местах сопряжения и, как следствие, увеличение нагрузки на другие элементы каркаса и выход их из строя. Также, в процессе эксплуатации под влиянием внешних факторов происходит разрушение изоляции проводов и самих электрических приборов полуприцепа. Это

приводит к коротким замыканиям в цепях, нагреву до высоких температур проводов и соединений. Под воздействием внешних факторов также происходит разрушение крепежных соединений деталей пола с платформой полуприцепа и повреждение деталей самого пола. Это приводит к проникновению влаги через детали пола и возможности намокания и порчи перевозимого груза.

Табл. 7. Статистическая характеристика отказов и неисправностей полуприцепов

Наименование неисправностей	<i>SCHMITZ</i>	<i>KRONE</i>	<i>KÖGEL</i>
Нарушение работоспособности тормозной системы	3	16	16
Износ деталей навесов и запоров ворот и бортов	11	11	18
Нарушение крепления амортизаторов	28	3	–
Негерметичность пневматической системы	11	12	20.5
Нарушение крепления ресиверов	–	3	–
Перекося и смещение мостов	1	5	2.5
Нарушение работоспособности крана уровня подвески	–	–	3.5
Трещины в сварных элементах	–	2	3.5
Течь амортизаторов	2	3	–
Неисправность кассеты запасного колеса	4	–	–
Поломка и ослабление крепления деталей каркаса	17	5	15
Выход из строя элементов электрооборудования	15	4	12
Поломка и нарушение крепления полов	4	6	9
	3	16	16

ВЫВОДЫ

Выполненная оценка надёжности автопоездов европейского производства позволила выявить наименее надёжные агрегаты и узлы, нуждающиеся в улучшении конструкции и качестве изготовления. В эксплуатации эта информация использована для определения объёма ремонтных воздействий по устранению соответствующих отказов. Определены причины появления неисправностей и отказов прицепного состава. Установлено, что большая часть причин появления нарушений работоспособности, имеющих несимметричные законы распределения, отражают несовершенство конструкции, нарушения технологических процессов сборки, непригодность подвижного состава к условиям эксплуатации по дорогам Украины.

Благодарность

This work was supported by the Cultural and Educational Grant Agency of the Ministry of Education of the Slovak Republic in the project No. KEGA 023ŽU-4/2020: Development of advanced virtual models for studying and investigation of transport means operation characteristics as well as in the project No. KEGA 036ŽU-4/2021: Implementation of modern methods of computer and experimental analysis of the properties of vehicle components in the education of future vehicle designers.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Горизонты транспорта: Эффективная транспортная политика* (2004): Экспертный совет Комитета СФ по промышленной политике. – Челябинск: Социум. 673 с.
- [2] *Автомобільний транспорт України: стан, проблеми, перспективи розвитку* (2005): Монографія / Державний автотранспортний науково – дослідний і проектний інститут; За заг. ред. А.М. Редзюка. К.: ДП «ДержавтотрансНДІпроект». 400 с.
- [3] РЕДЗЮК, А.М. (2001): *Безпека дорожнього руху: аналіз, завдання та шляхи вирішення*: Автошляховик України. 2. С.14-18.
- [4] ГОВОРУЩЕНКО, Н.Я. – ВОЛКОВ, В.П. - ШАША И.К. (2006): *Обеспечение безопасности движения на автомобильном транспорте*: Харьков: ХНАДУ. 361 с.
- [5] ФОМИН, А. (2004): *В тисках стандартов*: За рулём. М. С.148-154.
- [6] БАЖИНОВ А.В., КРАВЧЕНКО А.П. (2009): *Надёжность автомобильных поездов*: Монография. – Луганск: Изд-во «Ноулидж». 412 с.